



Der Ultrasim fatigue tester, der neuartige Probekörper für Untersuchungen der Betriebsfestigkeit von technischen Kunststoffen; besteht aus dem Polyamid 66 Ultramid A3WG7 CR

**Betriebsfestigkeit.** Die richtige Werkstoffauswahl und Bauteilkonstruktion ist besonders für Kunststoffe im Motorraum von essenzieller Bedeutung. Denn Materialien sind dort über einen langen Zeitraum pulsierenden Belastungen in heißen, aggressiven Medien ausgesetzt. Aus diesem Grund legen Systemlieferan-

ten und Fahrzeughersteller großen Wert darauf, besonders die dynamische Langzeitbelastung von maßgeschneiderten Kunststoffen vor ihrem Einsatz zu kennen. Mit einem neu entwickelten Prüfkörper aus glasfaserverstärktem Polyamid gelingt es nun, das Ermüdungsverhalten des technischen Kunststoffs systematisch zu erkunden.

## Auch Bauteile ermüden

WERNER WILHELM KRAFT U. A.

Welche hohen mechanischen und chemischen Belastungen ein technischer Kunststoff heute aushalten muss, ist aus den Lastenheften bekannt. Das Verhalten gegenüber zyklischer Langzeitbelastung, auch Ermüdung oder Betriebsfestigkeit genannt, wurde für die Kunststoffe bisher jedoch nicht intensiv erforscht. Für die Entwicklung maßgeschneiderter Werkstoffe wird es aber von großer Bedeutung sein, denn Systemlieferanten wie Fahrzeughersteller legen heute Wert darauf, dass Motorlager, Ölsaugmodule und andere Strukturteile bzw. medienführende Teile mit pulsierender Druckbelastung ein definiertes und vorhersagbares Verhalten gegenüber dynamischer Langzeitbelastung zeigen: und dies besonders, wenn es um hoch beanspruchte und sicherheitsrelevante Anwendungen geht.

### Konzept eines neuartigen Testkörpers

Nach zahlreichen Vorarbeiten gab es für die Experten der BASF, Ludwigshafen, nur eine Möglichkeit, zu umfassenden theoretischen und praktischen Erkenntnissen über die Betriebsfestigkeit von Bauteilen aus technischen Thermoplasten zu gelangen: Es musste ein speziell gestalteter Probekörper für zyklische Innendruckbelastung konstruiert werden, der eine Vielzahl von Anforderungen erfüllt. Es sollte sich um einen nicht vollständig rotationssymmetrischen, offenen Hohl-

körper handeln, der an keiner Stelle dünner als 2,2 mm ist, für spätere Medienversuche ein möglichst kleines Volumen aufweist und die Beaufschlagung mit Medien von innen und außen ermöglicht. Des Weiteren soll er

- zyklische Belastungsdrücke von maximal 30 bar aushalten,
- in seiner Grundstruktur nur einen Versagensmodus aufweisen,
- in einem definierten Gebiet versagen,
- an der definierten Schwachstelle eine typische Faserverteilung haben und
- durch leichte Konstruktionsänderungen, Größenvariationen, das Einfügen von Bindnähten und von Schweißnähten erlauben.

Als Material für den neuen Testkörper wählte das Unternehmen zunächst Ultramid A3WG7 CR – ein für hohe dynamische Belastung ausgelegtes, mit 35 % Glasfasern verstärktes Polyamid 66. Der Probekörper erfüllt alle oben genannten Eigenschaften und trägt die Bezeichnung Ultrasim fatigue tester (Ermüdungs-Prüfkörper) (**Titelbild**). Diese Bezeichnung deutet an, dass die umfangreiche Materi-



### Artikelserie

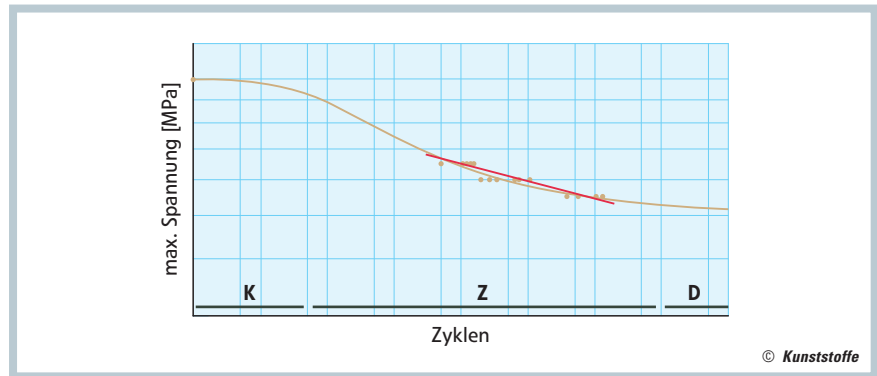
Der Beitrag ist Teil 1 einer zweiteiligen Serie zur „Betriebsfestigkeit von technischen Kunststoffen“ und beinhaltet die CAE-Auslegung und Herstellung eines neuartigen Prüfkörpers. Teil 2 zu diesem Thema erscheint im 2. Quartal 2010 nach der Vorlage weiterer Ergebnisse.

**ARTIKEL ALS PDF** unter [www.kunststoffe.de](http://www.kunststoffe.de)  
Dokumenten-Nummer KU110261

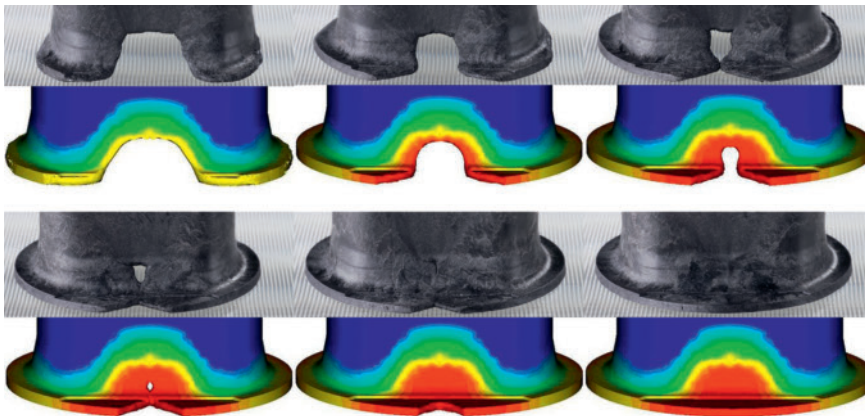
aldatenermittlung und -validierung am Prüfkörper Hand in Hand geht mit der Erarbeitung eines numerischen Modells im Rahmen des inzwischen universellen BASF-Simulationsinstruments Ultrasim.

### Voraussetzung: ein hochwertiger Kunststoff

Mit Ultramid A3WG7 CR fiel die Wahl für den ersten Ultrasim fatigue tester auf eine Marke aus dem 2007 vorgestellten CR-Sortiment. Der Werkstoff ist, wie auch die anderen Vertreter dieses Teils des Polyamidsortiments, mithilfe von Ultrasim exakt auf die Anforderungen bei hohen dynamischen Lasten abgestimmt. Solche Lasten treten beispielsweise beim Fahrzeugcrash auf, aber auch bei Bauteilen wie Triebwerklagern, die einer konti-



**Bild 1.** Der Verlauf einer Wöhlerkurve lässt sich in der Kurvenmitte durch eine Gerade mit negativem Gradienten, die sog. Wöhlerlinie, annähern. Im Bereich dieser Wöhlerlinie herrscht Zeitfestigkeit (Z), d. h. in Abhängigkeit von der Art der Last und der zu erreichenden Zahl der Lastwechsel ergibt sich die Spannung, bei der das Teil versagt. Links von diesem Bereich herrscht Kurzzeitfestigkeit (K). Hier erreicht das Bauteil noch annähernd die anfängliche, hohe statische Bruchspannung. Am anderen Ende der Skala, d. h. oberhalb von einigen Millionen Lastwechseln, wird die Kurve wieder deutlich flacher (D)



**Bild 2.** Füllsimulation und reales Füllverhalten des Probekörpers Ultrasim fatigue tester

nuierlichen, schwingenden Belastung ausgesetzt sind. Die Materialien sind ausreichend steif, fest und temperaturstabil, nehmen viel Energie auf und lassen sich vor allem mit der anspruchsvollen CAE-Software genau beschreiben. Die CR-Produkte verfügen über die für die Simulation notwendigen Materialdaten zum Verhalten bei hohen Dehnraten und zur Versagensmodellierung bei Bruch in Abhängigkeit von der Faserorientierung. Die optimierten Rezepturen dieser Kunststoffe erlauben enge Materialspezifikationen, die intensiven Qualitätskontrollen unterliegen und die Basis für Werkstoffzulassungen beim OEM sind.

Die Materialcharakterisierung erfolgte an EMI (Ernst-Mach-Institut)-Zugstäben und resultierte in Material-Wöhlerkurven, die in Kürze im Detail dargestellt werden. Bei Wöhlerkurven wird die Maximalspannung oder Spannungsamplitude der schwingenden Belastung gegen die Zahl der erreichten Lastwechsel bis zum Bruch doppelt logarithmisch aufgetragen. Bei Metallen ebenso wie bei Kunst-

stoffen ergibt sich eine S-Kurve, mit flachem Anfangs- und Endbereich (**Bild 1**).

### Herausforderung: CAE-Auslegung des Prüfkörpers

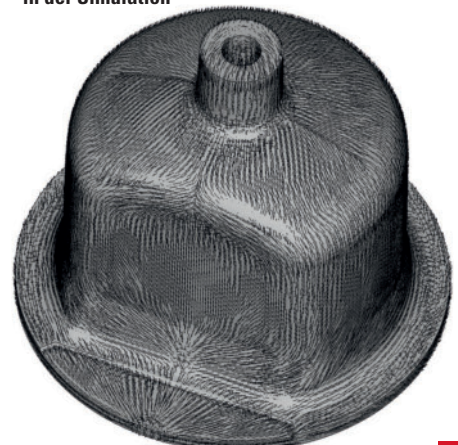
Die an den Probekörper gestellten Anforderungen stellen eine große Herausforderung für seine Gestaltoptimierung mit CAE dar. Die annähernd rotationssymmetrische Geometrie und die kugelförmige Kappe führen zu großen hoch beanspruchten Zonen, die es dem Körper erlauben, je nach Lage material- oder fertigungsbedingter Schwachstellen wie Lunker oder Oberflächendefekte, verschiedene Versagensorte oder -modi aufzuweisen. Erschwerend kommt bei faserverstärkten Werkstoffen noch der Einfluss des Herstellungsprozesses auf die mechanischen Eigenschaften mit hinzu [1 bis 3].

Die Auslegung und Optimierung des Probekörpers erfolgte virtuell mit Ultrasim [4] und umfasst neben der Simulation des Herstellprozesses die Festigkeitsberechnung mit integrativer Simulation

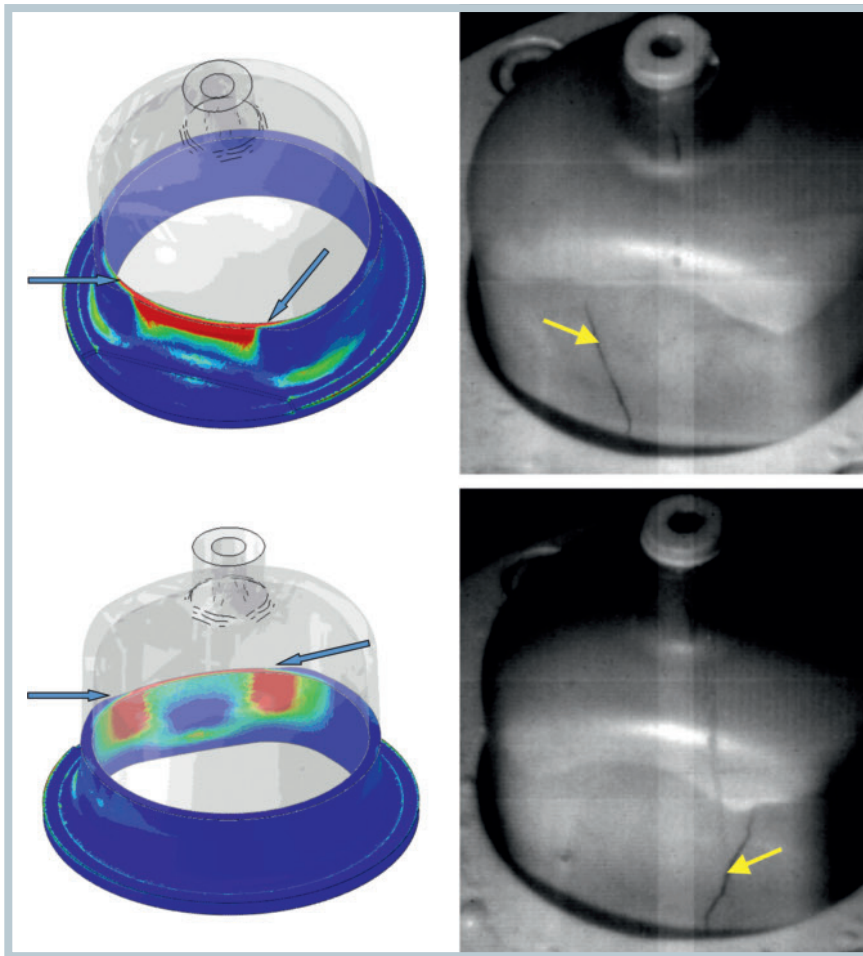
und die mathematische Bauteiloptimierung. Als Belastungskriterium wurde ein statischer Innendruck angesetzt, der bei maximal 40 bar zum Versagen führen soll. Die Forderung nach einem Versagen an einer definierten Stelle wird durch eine Abflachung im zylindrischen Teil erreicht. In den Randbereichen der Flachstelle ergibt sich eine hoch belastete Zone, die sich aus der Überlagerung einer Biegebelastung mit einer Umfangsbelastung zusammensetzt. Da lokale Faserorientierung und Bindenähte wesentlichen Einfluss auf das lokale Festigkeitsverhalten haben, ist es zwingend erforderlich, sie in die Auslegung mit einzubeziehen.

Um weitere Bindenähte zu vermeiden, wird der Probekörper zentral an der Oberseite im Bereich der Verschraubung angespritzt. Die Ergebnisse der Füllsimulation sind in **Bild 2** zusammen mit der Füllstudie am realen Probekörper dargestellt. Man erkennt, dass ein Zurückbleiben der Schmelze im Bereich der Flachstelle wegen ihrer reduzierten Wanddicke unvermeidlich ist. Um ein robustes Ver-

**Bild 3.** Faserorientierung des Probekörpers in der Simulation





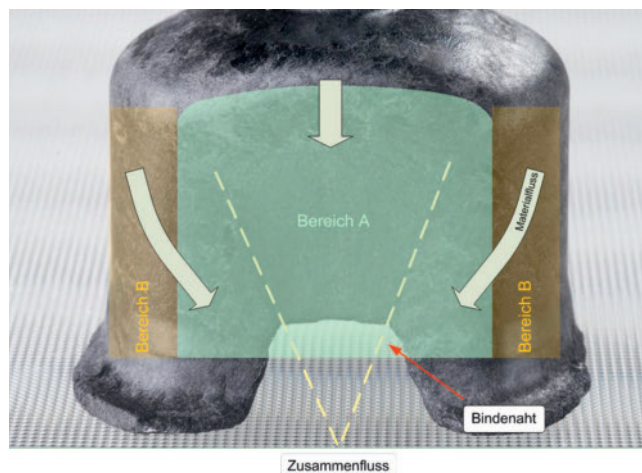


**Bild 4.** Links: lokale Beanspruchung des Materials, in den roten Bereichen ist das Material überlastet (die Pfeile kennzeichnen den kritischen Bereich: oben wird der Probekörper von außen, unten von innen betrachtet). Rechts: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen beim Versagen, Rissentstehung (die Pfeile kennzeichnen den kritischen Bereich)

halten des Probekörpers zu erreichen, müssen die lokalen Wanddicken so dimensioniert werden, dass der Zusammenfluss im Fuß des Probekörpers geschieht. Die resultierende Faserorientierungsverteilung zeigt **Bild 3**. Aus dem Zurückbleiben der Schmelze im flachen Bereich und Zusammenfließen im Fuß ergibt sich eine typische keilförmige Faserorientierung.

Die Festigkeitsanalyse unter statischem Innendruck zeigt die kritischen Zonen. In **Bild 4 (links)** ist der lokale Beanspruchungsgrad des Materials zu sehen, abhängig vom Belastungszustand und lokalen Materialeigenschaften. In den roten Bereichen ist das Material überlastet und es kommt zu Schädigung. Kritisch ist diese Schädigung im Bereich der Abflachung und im Übergangsbereich der flachen Zone in den zylindrischen Teil des Probekörpers. Hier reicht die überlastete Zone über die gesamte Wanddicke des Probekörpers und beginnt das Versagen. Der Probekörper reißt an diesen Stellen über den ganzen Querschnitt ein,

was durch Hochgeschwindigkeitsaufnahmen (**Bild 4, rechts**) bestätigt wird. Innerhalb eines etwa 5 mm breiten Bereichs auf der linken oder der rechten Seite beginnt lokal ein Riss. Das Experiment bestätigt das reproduzierbar. Dieses stabile Versagensverhalten beobachtet man sowohl in statischen als auch in dynamischen Versuchen.



**Bild 5.** Schmelzefluss bei der Herstellung des Probekörpers: Die Schmelze fließt in den dickwandigeren Bereichen B naturgemäß schneller als im dünnwandigen Bereich A und eilt dort voraus. Es bildet sich eine V-förmige Bindenaht mit einem Zusammenfluss der drei Fließfronten direkt oberhalb des Bauteilfußes aus

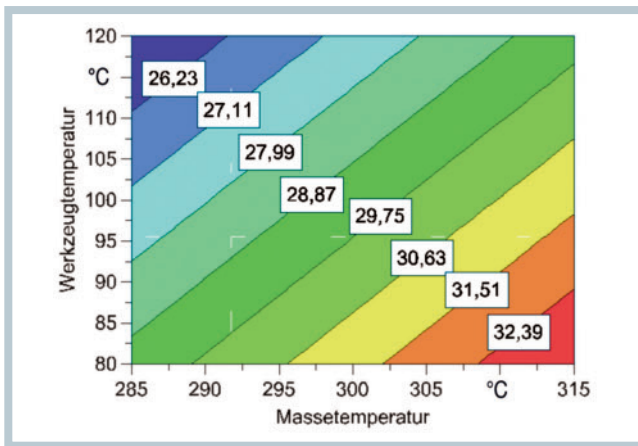
Während der Entwicklung des Probekörpers wurden viele Geometrievariationen betrachtet, bei denen das Versagen in mehreren Bereichen gleichzeitig auftrat, z. B. in den Krümmungsbereichen im Übergang zum Flansch oder zur Verschraubung. Durch konsequenten Einsatz der Optimierungsinstrumente und der Versagensmodellierung von Ultrasim konnten Gestalt und Prozess so optimiert werden, dass der Probekörper im finalen Zustand – wie angestrebt – nur einen Versagensmodus an definierter Stelle aufweist.

### Herstellung des Prüfkörpers: optimale Fertigungsparameter

Parallel zur CAE-Auslegung mussten die optimalen Fertigungsparameter ermittelt werden, denn die makroskopischen Eigenschaften des Ultrasim fatigue testers hängen – neben dem verwendeten Kunststoff – maßgeblich von den Verarbeitungseinflüssen ab. Damit fällt der Prozessführung im Spritzgießprozess eine entscheidende Rolle zu. Um bei den geplanten Reihenversuchen später reproduzierbare und aussagekräftige Ergebnisse erzielen zu können, müssen alle spritzgegossenen Teile identische Eigenschaften haben.

Das herausragende Kriterium ist dabei der zu erzielende Berstdruck. Bereits Druckabweichungen von wenigen bar können dazu führen, dass bei einem Wöhlerversuch die avisierten Lastwechsel bis zum Bersten entweder nicht erreicht oder um ein Vielfaches überschritten werden. Dann sind die adäquate Auswahl der Lastamplitude und damit die genaue Planung der Versuche schwer zu realisieren.

Wie in den Füllstudien (**Bild 2**) und in (**Bild 5**) dargestellt, führen die unterschiedlichen Wanddicken des Probekörpers zu



**Bild 6. Berstdruck in Abhängigkeit von Masse- und Werkzeugtemperatur bei hohen Einspritzgeschwindigkeiten (Angabe der Berstdrucke in bar)**

einem komplexen Füllbild. Durch die geschickte Wahl der Maschineneinstellungen lassen sich die Lage der Bindenähte und vor allem der Zusammenflussstelle beeinflussen. Bei höherer Schmelzetemperatur oder Einspritzgeschwindigkeit nimmt die Viskosität der Schmelze durch die erhöhte Scherung ab: Die Schmelze eilt in den dünnwandigen Flächen schneller voran, die Zusammenflussstelle wandert in Richtung Ende des Fließwegs und die Bindenähte werden nach außen verschoben.

Diese Effekte in der Bauteilmorphologie machen sich im Berstdruck der Bauteile bemerkbar. Um den Einfluss der Maschinenparameter zu quantifizieren und den optimalen Prozesspunkt für die Fertigung zu bestimmen, wurde ein vollständiger faktorieller  $2^3$ -Versuchsplan verwendet und Formmassentemperatur, Werkzeugtemperatur sowie Einspritzgeschwindigkeit variiert. Vorangegangene Screeningversuche hatten gezeigt, dass die übrigen Maschinenparameter keinen signifikanten Einfluss auf den Berstdruck haben.

Das Ergebnis ist Bild 6 zu entnehmen. Hier ist der ermittelte Berstdruck für den Versuchsraum über der Masse- und der Werkzeugtemperatur bei einer konstant hohen Einspritzgeschwindigkeit aufgetragen. Der Einfluss der Massetemperatur auf den Berstdruck ist plausibel; wie erwartet wird durch eine niedrigere Schmelzeviskosität der Zusammenflusspunkt zum Fließwegende hin verschoben. Erstaunt hat zunächst der Einfluss der Werkzeugwandtemperatur: Entgegen den Erwartungen führen hier niedrige Werte – die eher die Fließfähigkeit des Kunststoffes behindern – zu höheren Berstdrücken. Dies kann nur mit dem komplexen Zusammenspiel der drei Fließfronten erklärt werden: Durch die hohe Einspritzgeschwindigkeit wird die Schmelze im dünnwandigen Bereich stark geschert,

und die kühlere Werkzeugtemperatur fällt im Vergleich weniger ins Gewicht. Das Vorseilen der Schmelzefronten aus den dickwandigen Bereichen wird so ausgeglichen.

Neben der Wahl des richtigen Versuchsaufbaus ist die ständige Überwachung des Spritzgießprozesses notwendig. Um die Formteile bei gleichbleibender Qualität zu fertigen, erfolgt die Umschaltung von der Einspritz- auf die Nachdruckphase mittels Werkzeuginnen-druckaufnehmer. Durch diese Maßnahme kann der Verschleiß von Rückstrom-sperren erkannt und kompensiert werden. Im Zusammenspiel mit dem Druck im Schneckenraum lassen sich so auch Anhaltspunkte für Viskositätsschwankungen im Material (z.B. durch unterschiedliche Trocknung) finden.

## Kontakt

**BASF SE**  
**Fachpressestelle Kunststoffe**  
**D-67056 Ludwigshafen**  
**TEL +49 621 60 43348**  
**werner-wilhelm.kraft@basf.com**  
**→ [www.plasticsportal.eu](http://www.plasticsportal.eu)**

## Fazit

Mit dem neu entwickelten, patentierten Probekörper Ultrasim fatigue tester, und den bisher gewonnenen ersten Erkenntnissen zur Betriebsfestigkeit der hochfesten Materialien im BASF-Sortiment sollen nun alle wichtigen Parameter für das Ermüdungsverhalten von Kunststoffbauteilen systematisch ermittelt werden. Der Fokus wird auf dem Einfluss von Last, Lastamplitude, R-Verhältnis und Lastfrequenz, Temperatur und Temperaturänderung, der Anwesenheit von Medien wie Öl, Kraftstoff und Kühlmitteln liegen. Aus

den Gradienten der Wöhlerkurven im Bereich der Zeitfestigkeit werden die Ingenieure dann die zentralen Informationen über das Ermüdungsverhalten von realen Bauteilen in Abhängigkeit von realen Einflussgrößen gewinnen. Diese Kenntnisse werden in der Zukunft zu einer weiter verbesserten und spezifischen Werkstoffauswahl und Bauteilkonstruktion beitragen. ■

## LITERATUR

- 1 Glaser, S.; Wüst, A.: Modellierung am Computer. Kunststoffe 3 (2005) 95, S. 132–136
- 2 Glaser, S.; Wüst, A.; Aumer, B.: Metall ist die virtuelle Messlatte. Kunststoffe 7 (2008) 98, S. 88–92
- 3 Glaser, S.; Wüst, A.; Jansen, D.: Crashbelastete Bauteile virtuell entwickeln. Kunststoffe 9 (2006) 96, S. 168–172
- 4 [www.ultrasim.basf.com](http://www.ultrasim.basf.com)

## DIE AUTOREN

DR. WERNER WILHELM KRAFT, geb. 1953, leitet die Einheit Parts Testing/Parts Development im Business Management Automotive.

DR. STEFAN GLASER, geb. 1961, ist Leiter der Einheit Simulation Engineering im Business Management Automotive.

DIPL.-ING. SVEN WENIGMANN, geb. 1976, ist in der Einheit Processing Technologies im Bereich Spritzgießverfahren tätig.

KAI BERINGER, geb. 1970, ist in der Einheit Simulation Engineering für Strukturanalysen zuständig.

DIPL.-ING. JOCHEN HUBER, geb. 1976, beschäftigt sich in der Einheit Parts Testing mit Bauteilentwicklung.

DR. ANKA BERNNAT, geb. 1968, ist für Produktentwicklung von technischen Kunststoffen im Business Management Automotive verantwortlich.

Alle Autoren sind in der Geschäftseinheit Engineering Plastics Europe der BASF SE, in Ludwigshafen tätig.

## SUMMARY

### COMPONENTS ALSO SUFFER FROM FATIGUE

**FATIGUE STRENGTH.** Choosing the right material and component design is particularly critical for plastics destined for use under the hood. Materials in this environment are exposed to pulsations for long periods of time in hot, aggressive media. For this reason, system suppliers and auto manufacturers place great importance on knowing the long-term dynamic load behavior of plastics, especially tailor-made polymers, before they are introduced into service. With a newly developed test specimen made from glass-fiber-reinforced polyamide, it is now possible to systematically study the fatigue behavior of the engineering plastic.

Read the complete article in our magazine

**Kunststoffe international** and on

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