

**Insassensicherheit.** Ein guter Energieabsorber weist eine optimale Druckverformung auf, um die Aufprallenergie langsam zu vernichten und die Verzögerungskräfte auf ein sicheres Niveau abzusenken. Der Zusammenhang zwischen der Verzögerung, der Verformung und dem Aufprall zeigt eindeutig, dass der Insassenschutz stark von dem zur Verfügung stehenden Bauraum und den Druckverformungseigenschaften des Energieabsorbers abhängt. Ein neuer Schaumstoff übertrifft die gegenwärtigen Sicherheitsanforderungen an den Insassen-Kopfschutz.

# Maßgeschneiderter PUR-Schaumstoff für den Aufprall

**GEORGE NG  
HERBERT SCHMIDT  
STEPHAN FRICK**

In den letzten Jahren wurde mit einer optimierten Struktur der Fahrgastzelle sowie der Verwendung von Airbags und so genannten passive Energie absorbierenden (EA) Komponenten der Insassenschutz in Pkws deutlich erhöht. Der Federal Motor Vehicle Safety Standard 201U dehnte den Bereich des Insassenkopfschutzes auf die oberen Bereiche des Pkw-Innenraums (Säulen und Himmel) aus. Für diese Bereiche wird ein HIC(d)-Wert (Kopfaufschlagverhalten) von unter 1000 bei einem Aufprall mit 24 km/h und unter Verwendung einer FMH-Kopfform (Free Motion Headform) von 4,5 kg Gewicht gefordert. Die Aufprallenergie im Falle einer Fahrzeugkollision wird mit Energieabsorbern gedämpft. Die Entwicklung eines EA-Werkstoffes sowie dessen funktionsgerechter Einsatz zur zielgerichteten Energievernichtung erfordert fundierte Einblicke in die Mechanismen der Energieabsorption sowie der spezifischen Eigenschaften der EA-Werkstoffe. Der Geschäftsbereich Enerflex Solutions der kanadischen Woodbridge Foam Corporation befasst sich seit vielen Jahren mit der Thematik der Energieabsorber für den Insassenschutz. Unter Verwendung dieses Know-hows wurden innovative Werkstoffe für zukünftige höhere Bauteilanforderungen auch für den europäischen Markt entwickelt.

Enerflex-HE ist ein Werkstoff auf PUR-Basis, der diese Anforderungen erfüllt. Im

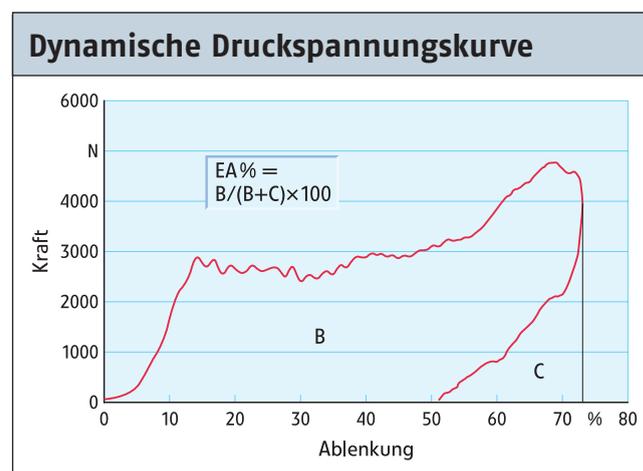
Folgenden werden die Ansatzpunkte und die Vorgehensweise bei der Entwicklung dieses Werkstoffes beschrieben.

## Anforderungen an den Insassen-Kopfschutz

Knautschzonen in Fahrzeugen vergrößern den Verformungsweg, der während eines Aufpralls benötigt wird, um zum Stillstand zu kommen. Längere Wege bedeuten, dass sich auch das Zeitintervall beim Aufprallimpuls vergrößert. An den Fahrzeuginsassen werden dadurch geringere Kräfte wirksam, was zu einem geringeren Verletzungsrisiko führt. Im Innenraum können Energieabsorber auf ähnliche Weise verwendet werden, um Kopfverletzungen beim Auftreffen im oberen Bereich des Fahrzeuginnenraums zu verringern.

Ein guter Energieabsorber weist optimale Druckverformung auf, um die Aufprallenergie langsam zu vernichten und die Verzögerungskräfte auf ein sicheres Niveau abzusenken. Der Zusammenhang zwischen der Verzögerungskraft, dem Verformungsweg und der Aufprallzeit zeigt eindeutig, dass der Insassenschutz stark von dem zur Verfügung stehenden Bauraum und den Druckverformungseigenschaften des Energieabsorbers abhängt.

Bauraumeinschränkungen im oberen Bereich von Fahrzeuginnenräumen führen dazu, dass nur geringe Materialdicken eingesetzt werden können und somit die effektiv nutzbare Dicke reduziert ist. Werkstoffentwickler sind hier vor die große Herausforderung gestellt, einen leistungsfähigen EA-Werkstoff zu entwickeln, der zur Erfüllung der Sicherheitsnormen wesentlich beiträgt. ▶



**Bild 1.** Anhand der Druckspannungskurve lässt sich die EA-Effizienz eines Werkstoffes berechnen

## PUR-Schaumstoffe für die Energieabsorption

Das verwendete Polymer in PUR-Schaumstoffen weist im Verlauf der Kraftaufnahme und des Kraftabbaus eine Hysterese auf, was besonders für die Energieabsorption von Vorteil ist. Für den Insassen-Kopfschutz bietet PUR eine Reihe von Vorteilen: hohe Belastbarkeit, geringes Gewicht, geringe Temperaturabhängigkeit, sehr flexible konstruktive Gestaltungsmöglichkeiten, ausgezeichnete EA-Eigenschaften usw.

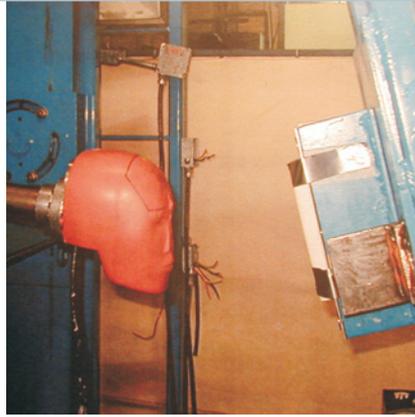
Die physikalischen Vorgänge, wie sie bei der Energieabsorption von PUR-Schaumstoffen ablaufen, können so beschrieben werden:

- viskoelastisches Verhalten des Polymers,
- Luftzirkulation in der Zellstruktur,
- Brechen der Zellwände/Zellstege.

Viskoelastische, reversible, halbhart, zähhart und sprödharte Schaumstoffe vereinen einzelne der o. g. Eigenschaften oder Kombinationen davon. Die Auswahl eines EA-Werkstoffs muss sich an den realen Bedingungen der vorgeschriebenen Prüfungen sowie am tatsächlichen Fahrzeugumfeld orientieren.

## Differenzierung bei der Effizienz der Energieabsorption

EA-Werkstoffe werden in der Regel durch statische Druckversuche bei relativ niedriger Geschwindigkeit (2,5 mm/min) geprüft. Anhand der Druckspannungskurve in Bild 1 lässt sich die EA-Effizienz eines Werkstoffs berechnen, indem der Be-



**Bild 2. Aufprall-Prüfstand mit FMH (Free Motion Headform)**

reich B ins Verhältnis zum Bereich B + C gesetzt wird. Bei einem Werkstoff, dessen Kurvenverlauf einem rechteckigen Verlauf sehr nahe kommt, wird in der Regel davon ausgegangen, dass er bessere Energie absorbierende Eigenschaften besitzt. Bei einem Polymer mit viskoelastischen Eigenschaften kann die Druckspannungskurve von PUR-Schaumstoffen je nach Belastung anders verlaufen. Untersuchungen haben gezeigt, dass bei bestimmten PUR-Werkstoffen der Wirkungsgrad der Energieabsorption mit zunehmender Dehnrates abnimmt. Die Druckfestigkeit der Schaumstoffe nimmt in der Regel mit höherer Dehnrates zu. Als weitere externe Faktoren, die den Wirkungsgrad ähnlich beeinflussen, sind die Aufprall-Masse und deren Geometrie sowie die Dicke der Schaumstoffprobe zu nennen.

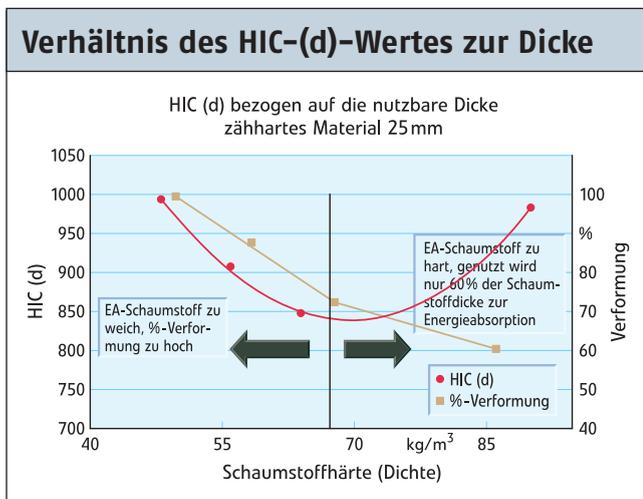
Die große Bandbreite des EA-Wirkungsgrads aufgrund dieser Variablen weist darauf hin, dass mit statischen Druckversuchen und normierten Prüfkörpern die Energie absorbierenden Eigenschaften bei verschiedenen EA-

Schaumstoffen nicht zufrieden stellend beschrieben werden können.

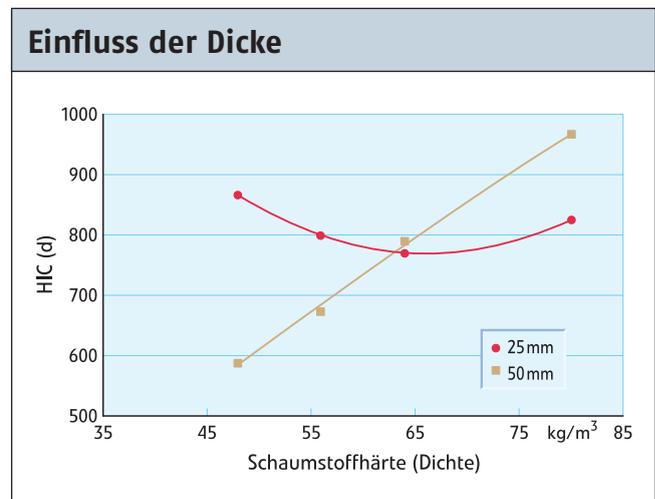
Um die Aussagefähigkeit der Prüfergebnisse bei verschiedenen EA-Schaumstoffen sicherzustellen, wird im Rahmen der Werkstoffentwicklung eine dynamische Prüfmethode angewandt, deren Parameter (Prüfgeschwindigkeit, Aufprallmasse, Probendicke usw.) realen Bedingungen gerechter werden.

## Ermittlung der HIC(d)-Werte

Verwendet wurde ein Aufprall-Prüfstand Typ 201U-100 des Herstellers MGA Research Corporation bei einem Leistungsvermögen von 200 g. Für den Aufprallversuch wurde der Schaumstoff in einer Metallhalterung gehalten. Als Prüferunterlage für die Schaumproben wurde eine Stahlplatte mit 13 mm Dicke verwendet, an der ein HIC(d)-Grundwert (Head Injury Criterion) von 1600 ermittelt wurde. Wichtig ist in diesem Zusammenhang, dass sämtliche HIC(d)-Werte der durchgeführten Prüfungen auf dem Ausgangswert für den BIW von 1600 basieren. Bild 2 zeigt den Versuchsaufbau für die FMH-Kopfform, mit dem gemäß FMVSS201U das Verhältnis zwischen den HIC(d)-Werten und Schaumstoffvariablen, wie Härte und Probendicke, untersucht wurde. Zur Auswertung kamen drei verschiedene Arten von EA-PUR-Schaumstoffen: halbhart, zähhart und sprödhart. Mit Hilfe der Daten wurde ein Modell erstellt, mit dem sich der optimale HIC(d)-Wert im Verhältnis zur dynamischen Druckbelastung, Variation der chemischen Bausteine und der Probendicke darstellen lässt. Mit den hieraus ge-

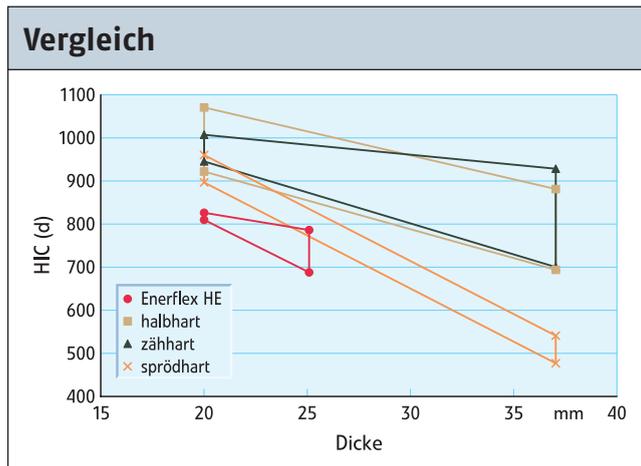


**Bild 3. Zur Erläuterung des konkaven Verlaufs der HIC(d)-Kurve wird die Änderung des HIC(d)-Wertes bei unterschiedlicher Härte von zäharten Schaumstoffen beschrieben**



**Bild 4. Einfluss der Probendicke auf HIC(d)-Verhalten in Abhängigkeit der Schaumstoffhärte (Dichte)**

**Bild 5. HIC(d)-Werte:  
Vergleich des neuen  
EA-PUR-Schaum-  
stoffs mit halb-  
hartem, hartem und  
sprödhartem PUR**



wonnen Daten ließen sich die optimalen chemischen Parameter bestimmen.

### HIC(d)-Wert abhängig von Schaumstoffhärte und -dicke

Bei diesen Prüfungen galt es, den Zusammenhang zwischen den HIC(d)-Werten und den Schaumstoffeigenschaften wie z. B. dem Druckspannungsniveau bei dynamischer Belastung und der Material-

- Mit zunehmender Schaumstoffdicke sinkt der HIC(d)-Wert.
- Der sprödharte EA-Schaumstoff weist einen niedrigeren HIC(d)-Wert auf als die restlichen untersuchten EA-Werkstoffe. Der zu beobachtende Vorteil des sprödharten EA-Werkstoffs beim HIC(d)-Verhalten wird mit höherer Schaumstoffdicke deutlicher. Bei einer Schaumstoffdicke von 20 mm ist der sprödharte Schaumstoff nur geringfügig besser.

### Ermittlung der optimalen HIC(d)-Werte

Zur Erläuterung des konkaven Verlaufs der HIC(d)-Kurve wird in Bild 3 die Änderung des HIC(d)-wertes bei unterschiedlicher Härte von zähharten Schaumstoffen beschrieben. Außer dem optimalen HIC(d)-Wert bei einer Dichte von  $64 \text{ kg/m}^3$  und dem konkaven Kurvenverlauf zeigt die Grafik auch die Eindringtiefe der Kopfform in den Prüfling. Es stellt sich heraus, dass die Eindringtiefe bei zunehmender Schaumstoffhärte von 48 bis  $80 \text{ kg/m}^3$  inkremental abnimmt, und zwar von 100 auf 60 % der Ausgangsdicke.

Die hohe Eindringtiefe bei einer Schaumstoffdicke unter  $64 \text{ kg/m}^3$  lässt den Rückschluss zu, dass die FMH-Kopfform auf Block fährt. Bei einer Dicke von nur 25 mm sind diese Schaumstoffe zu weich, um die Aufprallenergie der FMH-Kopfform abzubauen, was hohe Verzögerungskräfte und zu hohe HIC(d)-Werte zur Folge hat.

Dementsprechend weisen Schaumstoffe mit einer Dichte über  $64 \text{ kg/m}^3$  nur 60 % bzw. weniger Eindringtiefe auf, was den Rückschluss zulässt, dass an der FMH-Kopfform hohe Beschleunigungskräfte wirksam werden, obwohl die Kopfform nicht auf Block geht. Das Druck-

spannungsniveau dieser Schaumstoffe ist zu hoch, wodurch die effektiv nutzbare Probendicke zur Energievernichtung reduziert ist. Eine höhere Druckspannung hat höhere Beschleunigungskräfte und schlechtere HIC(d)-Werte zur Folge. Der optimale HIC(d)-Wert wird bei einer Schaumstoffdicke von  $64 \text{ kg/m}^3$  erzielt. Bei dieser Dichte stehen Härte und effektiv nutzbare Probendicke (70 %) in einem ausgewogenen Verhältnis zueinander.

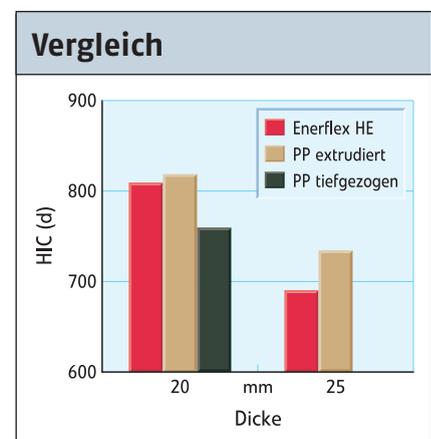
### Wechselwirkung zwischen Schaumstoffdicke und HIC(d)-Wert

Der aus HIC(d)-Werten und Schaumstoffhärte resultierende Kurvenverlauf verändert sich von einem konkaven Verlauf zu einem linearen Verlauf bei zunehmender Materialdicke (Bild 4). Ähnliches Verhalten wird bei anderen EA-Werkstoffen beobachtet, die für die vorliegende Untersuchung verwendet wurden.

Mit zunehmender Schaumstoffdicke werden die energieabsorbierenden Eigenschaften des EA-Systems verbessert, ohne dabei das Druckspannungsniveau zu verändern. Insbesondere mit weichen Schaumstoffen wird der zeitabhängige Impuls verlängert und es werden hohe Beschleunigungskräfte reduziert.

### Ein Hochleistungs-Schaumstoff für den Insassen-Kopfschutz

Das Entwicklungsziel lautete, einen EA-Werkstoff zu entwickeln, der den HIC(d)-Wert von 800 bei einer Materialdicke von 20 mm gemäß FMVSS 201 U erreicht. Ein sprödharter PUR-Schaumstoff führt in der Regel zu besseren HIC(d)-Werten als zäharte und halbhartete Schaumstoffe. ▶



**Bild 6. HIC(d)-Werte: Vergleich des neuen EA-PUR-Schaums mit anderen EA-Werkstoffen auf nicht-PUR-Basis**

i	Hersteller
<p><b>Woodbridge Foam Corporation</b> 42 Sherwoodtowne Blvd. Mississauga Ontario L4Z 2G6 Kanada <a href="http://www.woodbridgegroup.com">www.woodbridgegroup.com</a> <a href="mailto:enerflexeu@woodbridgegroup.com">enerflexeu@woodbridgegroup.com</a></p>	

dicke zu bestimmen. In der vorliegenden Untersuchung wird die Druckfestigkeit bzw. Härte bei dynamischer Belastung gleich der Dichte des Schaumstoffs gesetzt. Diese Annäherung ist zulässig, solange es sich um gleichartige Schaumstoffe handelt. Die untersuchte Schaumstoffhärte und -dicke bewegt sich in einem Bereich von 48 bis  $96 \text{ kg/m}^3$ , bei jeweils 20, 25 und 37 mm Dicke. Bezogen auf die Schaumstoffhärte lassen sich drei Tendenzen des HIC(d)-Verhältnisses ablesen:

- Bei einer Schaumstoffdicke von 20 und 25 mm verläuft die HIC(d)-Kurve konkav und weist einen optimalen niedrigsten Wert bei einer bestimmten Dichte bzw. Härte auf. Bei einer Dicke von 37 mm ist der Verlauf jedoch nicht mehr konkav, sondern steigt mit zunehmender Schaumstoffhärte. Dieser Effekt gilt für alle drei PUR Arten.

Daher wurde eine Untersuchung durchgeführt, um zu einem besseren Verständnis der Wechselwirkung zwischen Schaumstoffsprödheit und EA-Verhalten unter dynamischen Aufprallbedingungen zu kommen. Auf der Basis dieser Erkenntnisse wurde der neue Hartschaum speziell für den Insassen-Kopfschutz für die Bereiche entwickelt, wo die Bauteildicke auf 20 bis 25 mm beschränkt ist.

Unter Verwendung eines FMH-Prüfstands wurden die HIC(d)-Werte des neuen EA-Schaumstoffs ebenfalls ausgewertet und mit denen herkömmlicher PUR-Werkstoffe verglichen (Bild 5). Der Enerflex-HE Schaumstoff weist niedrigere HIC(d)-Werte auf, insbesondere bei einer Schaumstoffdicke zwischen 20 und 25 mm. Bei einem HIC(d)-Wert von 810 und einer Dicke von 20 mm gemäß der definierten Prüfbedingungen bedeutet dies eine Verbesserung um 10–20 %. In Bild 6 werden die HIC(d)-Werte des neuen EA-Schaumstoffs und anderer EA-Werkstoffe (PP-Extrusionsschaumstoffe, Strandfoam, Hersteller: Dow Chemical

Company) miteinander verglichen. Das Ergebnis zeigt, dass der neue Energie absorbierende Schaumstoff im Vergleich zu anderen EA-Werkstoffen, die nicht auf PUR-Schaumstoffen basieren, über herausragende Eigenschaften verfügt.

### Fazit

Nach Auswertung gemäß FMVSS 201 U erfüllt und übertrifft der neue Schaumstoff die gegenwärtigen Sicherheitsanforderungen an den Insassen-Kopfschutz und ist anderen EA-Werkstoffen überlegen. Seine Gesamteigenschaften zeigen, dass das Entwicklungspotenzial von PUR-Schaumstoffen bei weitem noch nicht ausgeschöpft ist und weitere Werkstoffinnovationen zu erwarten sind. ■

### DIE AUTOREN

MSC. GEORGE NG, geb. 1962, kam 1995 zu Woodbridge Foam Corporation als Entwicklungskemiker für weichelastische Formschaumstoffe und hat jetzt eine leitende Funktion bei der Entwicklung von Ener-

gie absorbierenden Schaumstoffen, Strukturschäumen und weich-elastischen Formschaumstoffen.

MSC. HERBERT SCHMIDT, geb. 1954, ist bei Woodbridge Foam Corporation seit 1996 in der Entwicklung Energie absorbierender Werkstoffe tätig.

DIPL.-ING. STEPHAN FRICK, geb. 1957, ist als verantwortlicher Business Unit Manager Enerflex Solutions für das Europageschäft zuständig. Er ist seit 1991 bei der Woodbridge Foam GmbH in verschiedenen Positionen tätig; stephan\_frick@woodbridgeregrou.com