

Auxetisch
Neue Wege zu gewichtseffizienten
Konstruktionen

www.lightweight-design.de

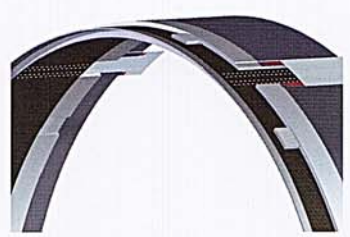
lightweightdesign

DIE FACHZEITSCHRIFT FÜR DEN LEICHTBAU BEWEGTER MASSEN

Thermografie
Prüfung von Luftfahrtstrukturen



Hintergrund: © iStockphoto.com



Asymmetrisch
Sandwichstrukturen für
eine Flugzeug-Rumpfschale



Kopfsache
Entwicklung eines
CFK-Helms für
Motorradfahrer

Auxetische Strukturen

Neue Wege zu gewichtseffizienten Konstruktionen

Sandwich- und Verbund-/Leichtbauteile, Schutzeinrichtungen oder Fasern und Textilien bieten mögliche Anwendungsbereiche für sogenannte auxetische Strukturen. Darunter sind Materialien zu verstehen, deren Querverformungseigenschaften sich zu denen konventioneller Materialien konträr verhalten. Mit ihnen lassen sich unter anderem Eigenschaften wie Porosität, Dichte, Steifigkeit, Nachgiebigkeit, Festigkeit, Duktilität, Energieabsorption, Gewichtseffizienz und Bruchfestigkeit und Zähigkeit direkt beeinflussen.

Der Begriff „auxetisch“ geht auf K.E. Evans [1] zurück und charakterisiert Materialien mit Querverformungseigenschaften, die sich zu denen konventioneller Materialien konträr verhalten. Während bei letzteren eine (positive) Zugbeanspruchung zu einer entsprechenden Verlängerung in Belastungsrichtung und gleichzeitig zu Verkürzungen in den dazu senkrechten Richtungen führt, verkehrt sich dieses Verhältnis bei auxetischen Materialien in sein Gegenteil: Zugspannungen in einer Richtung erzeugen hier positive Längenänderungen in allen drei Raumrichtungen. Bildlich ausgedrückt: Die Querschnittsfläche eines in Längsrichtung gedehnten Elements nimmt bei konventionellen Materialien mit steigender Belastung kontinuierlich ab, während sie bei auxetischen Materialien

stetig zunimmt, wobei auch die Volumenveränderung größer ausfällt, Bild 1. Sie gelten deshalb als Extrem- oder Metamaterialien. Pionierarbeiten über dieses der Alltagserfahrung widersprechende Verhalten leisteten R. S. Lakes [2, 3], K. E. Evans [1, 7, 8] und R. S. Baughman [4, 6, 9], deren Arbeiten wiederum zu einem gerade in letzter Zeit stark zunehmenden Interesse an dieser Thematik geführt haben. Der zentrale Einfluss des Querdehnungsverhaltens eines Materials auf die Lastabtragung lässt sich an den allgemeinen konstitutiven Gleichungen ablesen. Für isotropes, linear elastisches Verhalten erhalten sie als Materialparameter den Elastizitätsmodul E und die Poisson-Zahl ν , wobei letztere als das (negative) Verhältnis von Quer- zu Längsdehnung definiert ist.



»Auxetische Strukturen ermöglichen Konstruktionen mit völlig neuartigen Funktionalitäten und eröffnen attraktive Designoptionen.«

Prof. Hans Obrecht, PhD., war Inhaber des Lehrstuhls für Baumechanik-Statik der TU Dortmund.

Bei allgemeinen Spannungszuständen ist eine Normalspannung σ_{11} mit den entsprechenden Normaldehnungen ϵ_{11} , ϵ_{22} , ϵ_{33} durch den Zusammenhang

$$\sigma_{11} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\epsilon_{11} + \nu\epsilon_{22} + \nu\epsilon_{33}] \quad \text{Gl. [1]}$$

verknüpft, der oft zu

$$\sigma_{11} = E \epsilon_{11} \quad \text{Gl. [2]}$$

vereinfacht wird und dann nur Materialien beschreibt, bei denen $\nu = 0$ ist. In diesem Fall findet keine Kopplung zwischen Längs- und Querdehnungen statt, während $\nu \neq 0$ immer ein räumliches Deformations- und Lastabtragungsverhalten zur Folge hat, das wesentlich durch die Poisson-Zahl bestimmt wird.

Da für die gängigen Werkstoffe der (positive) Wert von ν vergleichsweise wenig schwankt, während die entsprechenden E-Moduln über mehrere Größenordnungen variieren, wird die Bedeutung der Querdehnung häufig unterschätzt. Ein weiterer Gesichtspunkt ist, dass es für E – außer der Bedingung $E \geq 0$ – keine theoretische Obergrenze gibt, ν aber aufgrund thermodynamischer Überlegungen auf den Gültigkeitsbereich $-1 \leq \nu \leq 0,5$ begrenzt ist. Offensichtlich führen die Grenzwerte $\nu = 0,5$ und $\nu = -1$ beim Stoffgesetz (1) wie auch beim Schubmodul

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \text{Gl. [3]}$$

und dem Kompressionsmodul

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad \text{Gl. [4]}$$

zu Singularitäten. Für $\nu = 0,5$ – was inkompressible Verhalten entspricht (zum Beispiel bei Gummi oder Wasser) – ist dies generell bekannt. Weitgehend unbeachtet dagegen ist die Tatsache, dass ν auch negativ sein kann. Es beschreibt dann Materialien mit auxetischem – und für $\nu = -1$ schubstarr – Verhalten.

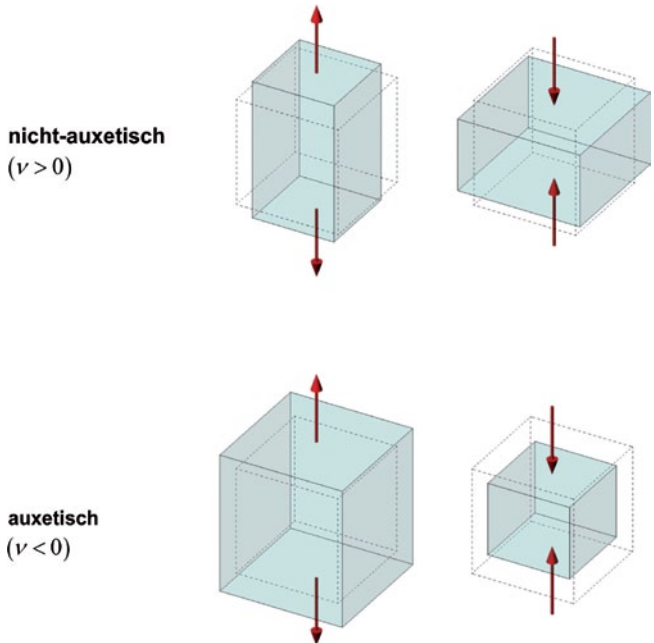


BILD 1 Deformationsverhalten nicht-auxetischer und auxetischer Materialien unter Zug- beziehungsweise Druckbeanspruchung

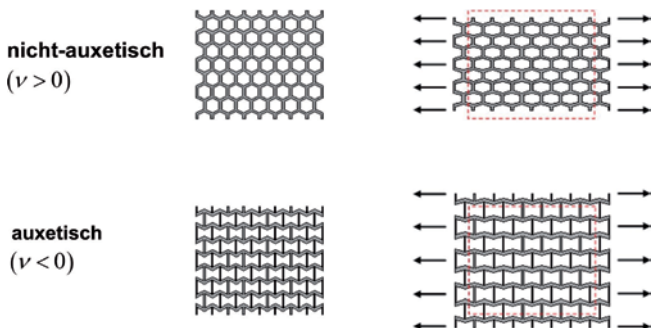


BILD 2 Deformationsverhalten ebener nicht-auxetischer und auxetischer Gitterstrukturen



»Anwendungsmöglichkeiten für auxetische Strukturen finden sich in allen Bereichen der Technik.«

Dipl.-Ing. Ulf Reinicke ist wissenschaftlicher Mitarbeiter des Lehrstuhls für Baumechanik-Statik der TU Dortmund.

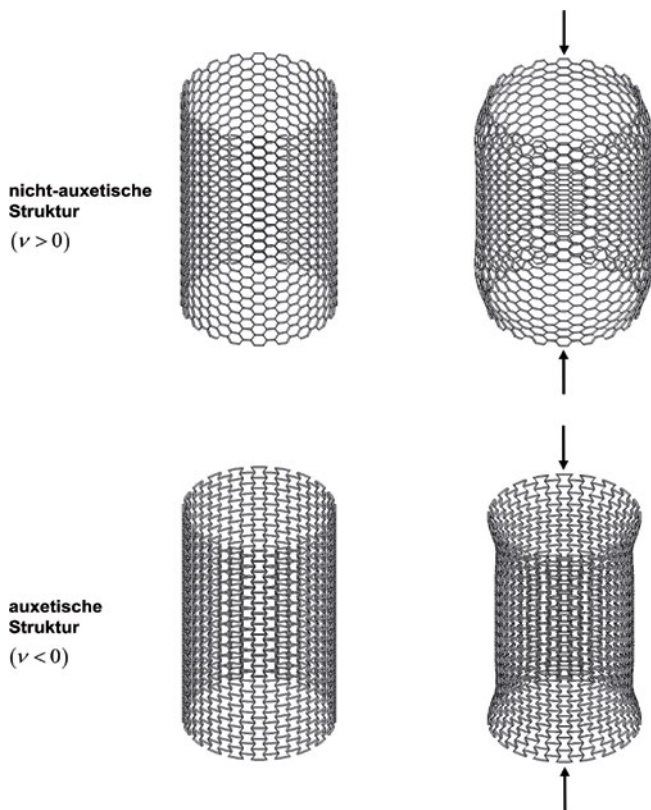


BILD 3 Deformationsverhalten gekrümmter nicht-auxetischer und auxetischer Gitterstrukturen am Beispiel eines Kreiszyllinders unter Axialdruck

Die Poisson-Zahl ν hat somit für alle relevanten mechanischen Parameter eine zentrale Bedeutung und beeinflusst auf entscheidende Weise nicht nur die mikroskopischen Material- sondern auch die makroskopischen Struktureigenschaften. Eine gezielte Steuerung von ν hat deshalb für das mechanische Verhalten und die Effizienz von Strukturen und Bauteilen weitreichende Konsequenzen.

Hinzu kommt, dass sich im negativen auxetischen Definitionsbereich nicht nur der Deformationsmechanismus von ν umkehrt, sondern auch seine „Bandbreite“ (und folglich seine quantitative „Wirksamkeit“) verdoppelt wird. Dies macht die Auxetik sowohl aus theoretischer wie auch anwendungstechnischer Sicht besonders interessant. Darüber hinaus ermöglicht sie multifunktionale Strukturen mit qualitativ und quantitativ verbesserten beziehungsweise völlig neuartigen Funktionalitäten, die mit konventionellen nicht-auxetischen Materialien nicht realisierbar sind.

Zu den durch auxetische Strukturen direkt beeinflussbaren Eigenschaften zählen: Porosität, Dichte, Steifigkeit, Nachgiebigkeit, Festigkeit, Duktilität, Energieabsorption, Gewichtseffizienz, Bruchfestigkeit/-zähigkeit sowie thermo-mechanisches, Schwingungs-, Dämpfungs-, elektromagnetisches und dielektrisches Verhalten. Als mögliche technische Anwendungsbereiche werden häufig genannt: Sandwich- und Verbund-/Leichtbauteile, Schutzeinrichtungen, Filter, Fasern und Textilien, formadaptive sowie intelligente Materialien und

Die ganze
Media-Vielfalt
aus einer
Hand.



Best Ad Media kommuniziert Ihre Botschaften über Fachzeitschriften, Online-Lösungen, Lehrbücher | Fachbücher in gedruckter Form oder als eBook, über Veranstaltungen und über eigens für Sie maßgeschneiderte mediale Formate. Als Teil der renommierten Fachverlagsgruppe Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH bieten wir Ihnen erstklassige Entscheider-Zielgruppen in den Bereichen Wirtschaft, Technik und Gesellschaft. Das Beste für Ihre Kommunikation – aus einer Hand!

www.best-ad-media.de



Richtig schalten.

Strukturen, Sensoren und Aktoren, orthopädische und medizinische Geräte sowie Implantate und vieles mehr.

Auf dem Weg zur praktischen Nutzbarmachung geht ein Großteil der Arbeiten im Bereich der Auxetik von den oben beschriebenen grundlegenden Zusammenhängen für isotrope elastische Materialien und kleine Dehnungen aus. Der Fokus liegt dabei einerseits auf der Identifizierung natürlich vorkommender Materialien dieser Art sowie auf der Beschreibung ihres mikrostrukturellen Deformationsverhaltens. Andererseits wird angestrebt, auf der Basis dieser Erkenntnisse „neue“ Materialien mit entsprechenden Eigenschaften chemisch oder prozesstechnisch zu synthetisieren.

Für verschiedene polymere Schäume, Fasern oder auch Faserverbunde ist dies bereits gelungen, während die Zahl der bislang identifizierten natürlichen an-/organischen Materialien vergleichsweise gering ist. Letztere weisen zumeist nur einen geringen Grad an Auxetizität auf und sind deshalb – von weiteren Einschränkungen abgesehen – für technische Anwendungen von eher untergeordneter Bedeutung.

Charakteristischer Ursprung des allen auxetischen Materialien gemeinsamen Deformationsverhaltens sind zelluläre Strukturen unterschiedlicher Form auf molekularer, mikroskopischer oder mesoskopischer Ebene. Eines der bekanntesten und einfachsten Modelle hierfür ist eine aus Einheitszellen gebildete zweidimensionale Struktur mit einspringenden Ecken, Bild 2 unten, die bei ebener Zug- und Druckbeanspruchung nicht nur die beschriebenen Deformationseigenschaften, sondern auch einen Auxetizitätsgrad in der für praktische Anwendungen wünschenswerten Größenordnung aufweist. Die bekannte Wabenstruktur aus regulären Sechsecken, Bild 2 oben, verhält sich dagegen konventionell nichtauxetisch.

Häufig wird nun versucht, zunächst Strukturen dieser Art auf mikro- oder mesoskopischer Ebene zu reproduzieren, um so auxetische Materialien zu gewinnen, aus denen sich anschließend makroskopisch auxetische Produkte erzeugen lassen. Dagegen verfolgen die Autoren den pragmatischen Weg, aus konventionellen nicht-auxetischen Werkstoffen mit Hilfe etablierter Herstellungsverfahren und geeigneter Formgebung direkt – in der Regel zelluläre – makroskopische Strukturen mit den erwünschten auxetischen Eigenschaften herzustellen. Dies hat den Vorteil, dass der nichttriviale Zwischenschritt der Herstellung und Verarbeitung neuartiger auxetischer Materialien umgangen wird und grundsätzlich Anwendungen beliebiger Art und Größenordnung aus einem breiten Spektrum an erprobten Materialien und Materialkombinationen möglich werden.

Einschränkungen ergeben sich lediglich in Bezug auf die Effizienz der gewählten Formgebung im Hinblick auf die beabsichtigte Anwendung beziehungsweise deren wirtschaftliche Herstellbarkeit im industriellen Maßstab. Während häufiger diskutierte, vor allem dreidimensionale, auxetische Mechanismen den letztgenannten Kriterien nur sehr eingeschränkt gerecht werden, konnten die Autoren in den vergangenen Jahren eine Reihe alternativer auxetischer Strukturen entwickeln, die diese Defizite nicht aufweisen. Verschiedene justierbare Parameter ermöglichen es überdies, die erwünschten makroskopischen auxetischen Eigenschaften gezielt auf bestimmte

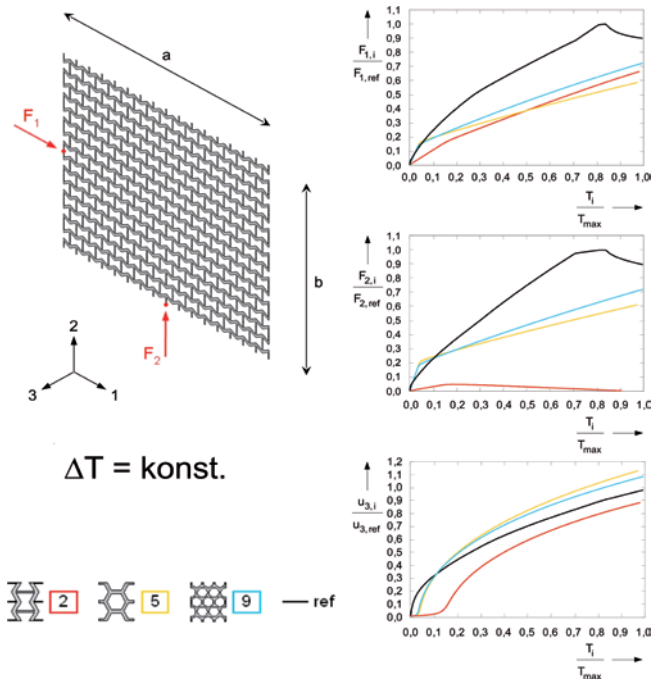


BILD 4 Zwängungskräfte einer ebenen auxetischen Struktur bei gleichförmiger Erwärmung

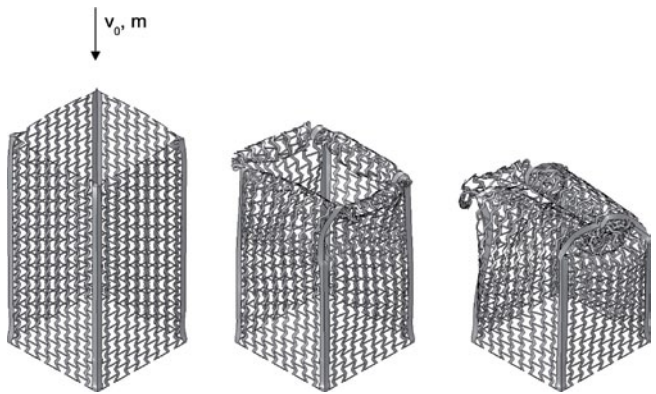


BILD 5 Deformationszustände eines auxetischen Crashelements bei axialer Aufprallbelastung

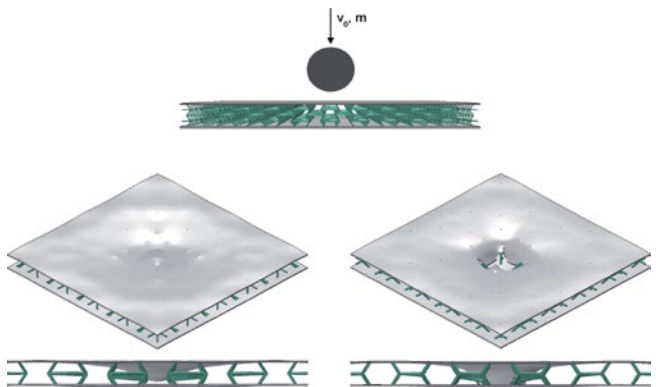


BILD 6 Sandwichelemente mit offenen 3D-Gitterkernen unter Aufprallbelastung

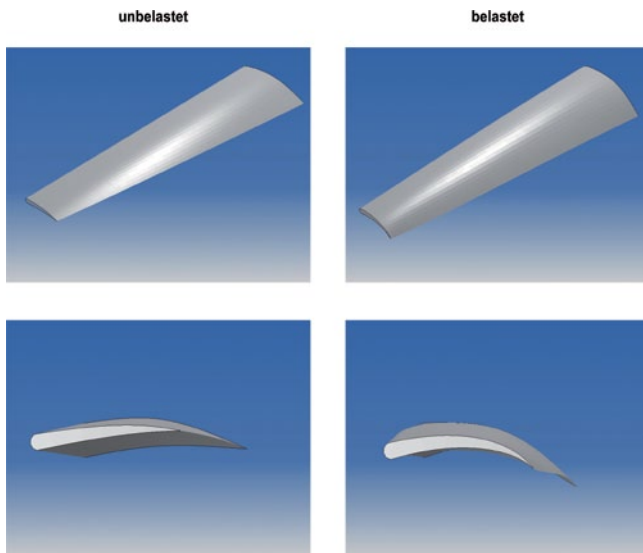


BILD 7 „Morphing“ einer Tragflügelstruktur durch Axialkräfte

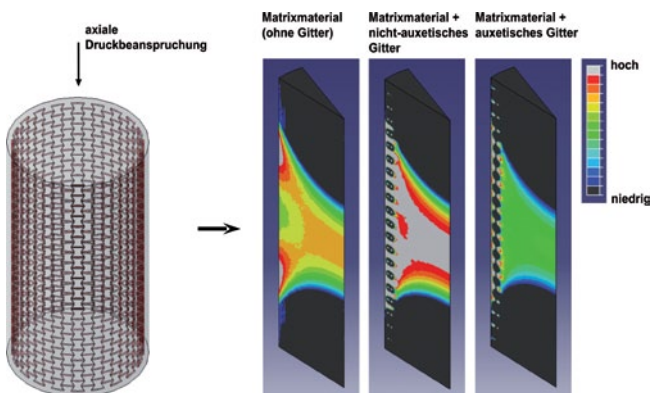


BILD 8 Hybridkonstruktion mit auxetischer und nichtauxetischer äußerer Verstärkung unter Axialbeanspruchung – Verteilung der maximalen Hauptzugspannungen

Anforderungsprofile hin „maßzuschneiden“. Zudem ergeben sich daraus attraktive Gestaltungs- und Designoptionen.

Die nachfolgend kurz beschriebenen Beispiele sollen einen knappen Einblick in bisherige Arbeiten geben sowie einen Eindruck von den durch auxetische Formgebung erzielbaren Funktionalitäten und Gestaltungsmöglichkeiten vermitteln.

Bild 3 zeigt einen auxetisch beziehungsweise nicht-auxetisch strukturierten und durch Axialdruck beanspruchten Kreiszyylinder. Der negative Wert von ν führt hier zu einer Verkleinerung des Durchmessers, während ein positiver Wert dessen Vergrößerung zur Folge hat.

Die signifikant positiven Auswirkungen auxetischer Strukturierungen auf das thermische Verhalten verdeutlicht Bild 4. Für eine ebene Konfiguration mit einer auxetischen oder verschiedenen nichtauxetischen Gitterstrukturen und unverschieblichen Rändern zeigt es, bezogen auf die Vergleichswerte für ein homogenes Referenzblech konstanter Dicke (schwarz), die Abhängigkeit der axialen Auflagerkräfte F_1 und F_2 sowie der Normalverschiebung u_3 von einer gleichförmigen Temperaturzunahme ΔT . Die auxetische Strukturierung (rot) führt dabei aufgrund ihrer inneren Kinematik zu einer Kompensation der thermischen durch elastische Dehnungen und zu annähernd verschwindenden seitlichen Zwängungskräften F_2 .

Die homogene Referenzkonfiguration weist dagegen die bei weitem größten Randkräfte auf. Auxetische Strukturierungen ermöglichen folglich eine nennenswerte Erhöhung der thermischen Beulstabilität und sind dabei deutlich einfacher als aufwendiger herzustellen zelluläre Hybridkonstruktionen mit stark reduzierten Wärmeausdehnungskoeffizienten.

Bild 5 zeigt die Ergebnisse von Untersuchungen zum Deformations- und Versagensverhalten auxetischer Crashelemente unter Aufprallbelastung. Die auxetische Strukturierung schafft hier die Möglichkeit, die Verzögerungs- und Energieabsorptionseigenschaften positiv zu beeinflussen. Bei gleicher oder verbesserter Dissipationsleistung fallen zum Beispiel die maximalen Reaktionskräfte wesentlich geringer aus als bei gewichtsgleichen Crashelementen ohne Strukturierung. Qualitativ ähnliche Zusammenhänge ergeben sich beim Aufprall



»Makroskopische auxetische Strukturierungen ermöglichen die Umsetzung innovativer Konstruktionsansätze zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften.«

Dipl.-Ing. Marcel Walkowiak ist wissenschaftlicher Mitarbeiter des Lehrstuhls für Baumechanik-Statik der TU Dortmund.

(alle Autorenfotos: N. Ethner)

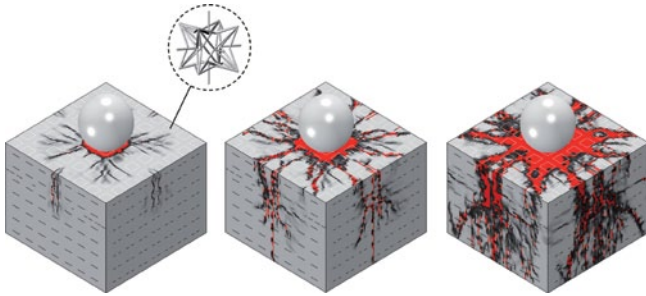


BILD 9 Hybridbauteil aus einem räumlichen auxetischen Gitter und einem spröden Matrixmaterial unter Aufprallbelastung (die Ausbreitung der Schädigungsbereiche ist rot markiert)

einer starren Masse auf Sandwichbauteile mit offenen gitterstrukturierten Kernen, **Bild 6**. Auch hier haben die Details der Strukturierung weitreichenden Einfluss auf das Deformations- und Energiedissipationsverhalten sowie die weitergeleiteten Reaktionskräfte. Alle charakteristischen Merkmale lassen sich in weiten Grenzen variieren, und überdies kann die Rissbildung in der vom Aufprall betroffenen Deckfläche gezielt beeinflusst werden.

Bild 7 demonstriert die Möglichkeit, auxetische Strukturierungen für Zwecke der Formadaption zu nutzen. Dargestellt ist ein tragflächenförmiges Bauteil, auf dessen Ober- und Unterseite wechselseitig auxetische und nichtauxetische Flächenteile angeordnet sind. Bei axialer Beanspruchung ändert sich der Krümmungsverlauf der Querschnitte in beiden Richtungen kontinuierlich, was erhebliche Auswirkungen auf die mechanisch relevanten Kenngrößen und das aerodynamische Verhalten hat. Dies sowie weitergehende Untersuchungen machen deutlich, dass die Verwendung auxetischer Strukturierungen auch im Bereich der sogenannten „Morphing Structures“ ein beträchtliches Entwicklungspotenzial besitzen.

Schließlich kann die Kombination der unterschiedlichen Verformungseigenschaften auxetischer und nicht-auxetischer Materialien beziehungsweise Strukturen das Tragverhalten von Hybridkonstruktionen signifikant verbessern. Ein Beispiel hierfür ist die Kombination eines Zylinders aus einem herkömmlichen homogenen Material mit einem flächigen auxetischen Gitter unter Axialbelastung, **Bild 8**. In diesem Fall führen die entgegengesetzt gerichteten Deformationsmechanismen der umschließenden auxetischen Verstärkung und des nicht-auxetischen Matrixmaterials zu wesentlich geringeren Querspannungen im Bauteilinnern als bei einer Vergleichskonstruktion ohne bzw. mit einer nicht-auxetischen Verstärkung. Dieser Effekt verstärkt sich überdies bei zunehmender Belastung.

Im Unterschied zu **Bild 8** besteht das durch den Aufprall einer starren Masse beanspruchte Hybridbauteil in **Bild 9** aus einem spröden homogenen Matrixmaterial, in das eine dreidimensionale auxetische Gitterstruktur eingebettet ist. Gegenstand aktueller Untersuchungen ist hier die Beschränkung der Entstehung und Ausbreitung von Rissen, und erste Ergebnisse deuten darauf hin, dass die besondere Kinematik der räumlichen auxetischen Struktur den internen Spannungszustand und die Tragfähigkeit der Gesamtkonstruktion positiv beeinflusst. ●

LITERATURHINWEISE

- [1] Evans, K. E. (1991): Auxetic polymers: a new range of materials. *Endeavour* 15 (4), S. 170-174
- [2] Lakes, R. S. (1987): Negative Poisson's ratio materials. *Science* 238, S. 551
- [3] Lakes, R. S. (1987): Foam structures with a negative Poisson's ratio. *Science* 235, S. 1038-1040
- [4] Lakes, R. S. (1991): Deformation mechanisms of negative Poisson's ratio materials: Structural aspects. *Journal of Materials Science* 26, S. 2287-2292
- [5] Baughman, R. H.; Shacklette, J. M.; Zakhidov, A.; Stafstrom, S. (1998): Negative Poisson's ratios as a common feature of cubic metals. *Nature* 392 (6674), S. 362-365
- [6] Alderson, A. (1999): A triumph of lateral thought. *Chemistry & Industry*, 17, May, S. 384-391
- [7] Baughman, R. H.; Dantas, S. O.; Stafstrom, S.; Zakhidov, A.A.; Mitchell, T. B.; Dubin, D. H. E. (2000): Negative Poisson's ratios for extreme states of matter. *Science* 288, S. 2018-2022
- [8] Evans, K. E.; Alderson, A. (2000): Auxetic Materials: Functional materials and structures from lateral thinking! *Advanced Materials* 12 (9), S. 617-628
- [9] Evans, K. E.; Alderson, K. L. (2000): Auxetic Materials: The positive side of being negative. *Engineering Science and Education Journal* 9, S. 148-154
- [10] Baughman, R. H. (2003): Auxetic materials: Avoiding the shrink. *Nature* 425 (6959), S. 667
- [11] Yang, W.; Li, Z.-M.; Shi, W.; Xie, B.-H.; Yang, M.-B. (2004): Review on auxetic materials. *Journal of Materials Science* 39, S. 3269-3279

Die Autoren:

PROF. HANS OBRECHT, PHD., war Inhaber des Lehrstuhls für Baumechanik-Statik der TU Dortmund.

DIPL.-ING. ULF REINICKE ist wissenschaftlicher Mitarbeiter des Lehrstuhls für Baumechanik-Statik der TU Dortmund.

DIPL.-ING. MARCEL WALKOWIAK ist wissenschaftlicher Mitarbeiter des Lehrstuhls für Baumechanik-Statik der TU Dortmund.

Gemeinsam sind sie Gründer und Geschäftsführer der Applied Auxetics GmbH in Dortmund, info@applied-auxetics.de.

www.applied-auxetics.de
info@applied-auxetics.de