

GAK *Gummi* *FASERN* **Kunststoffe**

Fachmagazin für die Polymerindustrie

Simulation

Additive Fertigung

Hochdämpfende Polyurethan-Elastomere

Elastomer-Weichmacher-Kompatibilität



Hochdämpfende Polyurethan-Elastomere

M. Heim, M. Seidl-Nigsch, H. Loy

Elastomere zeichnen sich dadurch aus, dass mechanische Verformungen reversibel sind. Verschwindet also die auf einen Prüfkörper wirkende Kraft, bewegt sich dieser zurück in seine ursprüngliche Geometrie. Benötigt er dafür eine vernachlässigbare Zeitspanne, ist der sogenannte elastische Anteil der Verformung sehr groß. Beansprucht das Wiederherstellen der Anfangsgeometrie hingegen eine nicht-vernachlässigbare Zeitspanne, ist der sogenannte viskoelastische Verformungsanteil ausgeprägt. Das Elastomer ist dann nicht (ideal-)elastisch, sondern viskoelastisch. Je nach Anwendung verwenden Ingenieure elastische oder viskoelastische Werkstoffe –, z.B. als schwingungsisolierenden oder -dämpfenden Bestandteil von Lagern. Getzner Werkstoffe bietet mit Sylodamp einen Werkstoff mit ausgeprägt viskoelastischem Verhalten an. Es dämpft Stöße und Schwingungsamplituden und kommt somit überall dort zum Einsatz, wo Lastspitzen reduziert und bei periodischen Kräften Resonanzphänomene eingeschränkt werden müssen. In diesem Aufsatz beschreiben wir jene physikalisch-chemischen Grundlagen, die das zielgerichtete Werkstoffdesign ermöglichen.

Elastomers are defined by their reversible deformation behavior: Consider a specimen underlying an external force. Once this force vanishes, its initial geometry will be restored. In the case of ideal-elastic materials this happens nearly instantly, while so-called viscoelastic materials need some time to restore the initial geometry. Depending on the application, engineers make use of one or the other class of elastomers. For example, almost ideal-elastic materials are the best choice to isolate vibrations in, e. g., building industry and railway engineering. In contrast, viscoelastic elastomers allow damping of impacts as well as damping of the amplitude of vibrations. For such applications, Getzner Werkstoffe offers a material series named Sylodamp. In this article we describe the basic physical and chemical relations allowing us to design materials with pre-defined damping characteristics.

1 Einleitung

Geschäumte Werkstoffe aus Polyurethan (PU) dienen als Schutz vor Körperschall und zur Schonung von Bauteilen. Sie werden in den Bereichen Bahn, Bau und Industrie

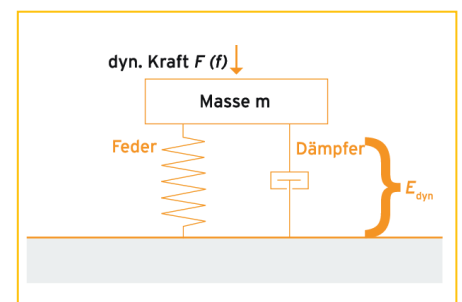
eingesetzt. Die Eigenschaften der Produkte reichen von hochelastisch bis plastisch. Die elastischen Werkstoffe wirken in technischen Systemen wie Bahnoberbauten, Gebäudefundamenten und Maschinenlagern überwiegend als Feder, durch die Vibrationen isoliert und dadurch bauliche Einheiten vor Körperschall geschützt werden. Dieser entsteht im Allgemeinen durch dynamisch-periodische Kräfte oder durch Stoßbelastungen. Elastische Lager entkoppeln entweder die Schallquelle von der Umgebung – wie im Fall von Eisenbahnfahrwegen –, oder sie trennen eine vibrierende Umgebung von der zu schützenden Anlage, etwa einem Wohnhaus.

Im einfachsten Fall lassen sich solche Systeme als Ein-Massen-Schwinger mit der Masse m beschreiben (Abb. 1). Das Federelement ist im Allgemeinen kein ideal-elastischer Werkstoff, im physikalischen Ersatzbild entspricht ihm daher die Parallelschaltung einer Feder und eines Dämpfers. Die Steifigkeit dieser Feder-Dämpfer-Kombination bei dynamischer Belastung hängt von der Frequenz f ab. Der dynamische Elastizitätsmodul $E_{\text{dyn}}(f)$ des Werkstoffs ist ein Maß für diese Steifigkeit und bestimmt – neben anderen Größen – die Eigenfrequenz f_0 des Ein-Massen-Schwingers:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{E_{\text{dyn}} \cdot A}{d \cdot m}} \quad 1$$

wobei A die Lagerfläche und d die Lagerdicke sind. Neben der Steifigkeit des Werkstoffs (E_{dyn}) steuern also die konstruktive Form des Lagers (vollflächig, streifen- oder punktförmig; A , d) und die Masse die Eigenfrequenz. Bei der Auslegung eines Lagers muss der Ingenieur die Parameter so aufeinander abstimmen, dass die geforderte Eigenfrequenz herauskommt – wobei die realisierbaren Parameterwerte im Allgemeinen eingeschränkt sind. Zum Beispiel kann

Abb. 1: Physikalisches Ersatzbild für schwingungsfähige mechanische Systeme. Die Feder-Dämpfer-Kombination weist bei periodischer Belastung mit der frequenzabhängigen Kraft $F(f)$ eine dynamische Steifigkeit auf, die dem dynamischen Elastizitätsmodul E_{dyn} des eingesetzten Werkstoffs entspricht.



Dr. Markus Seidl-Nigsch¹
markus.seidl-nigsch@getzner.com
Materials Development

Markus Heim¹
Research and Development, Railway Division

Dr. Harald Loy^{1,2}
Head of Research and Development,
Railway Division

¹Getzner Werkstoffe GmbH, Bürs, Österreich
www.getzner.com

²Institut für Infrastruktur, Arbeitsbereich Intelligente Verkehrssysteme, Universität Innsbruck, Innsbruck, Österreich
www.uibk.ac.at

Alle Abbildungen und Tabellen wurden, sofern nicht anders angegeben, freundlicherweise von den Autoren zur Verfügung gestellt.

die Lagerdicke begrenzt und die Masse fix vorgegeben sein.

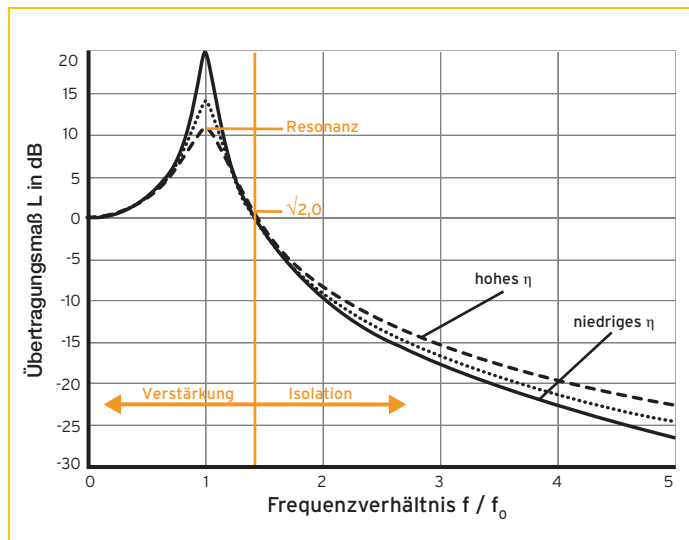
Die Eigenfrequenz eines federnd gelagerten Systems ist dessen zentrale Kenngröße, weil sie die Wirksamkeit des Schallschutzes bestimmt. Die (stets unvollständige) Entkopplung des mit der Frequenz f schwingenden Teils hängt nämlich vom Verhältnis f/f_0 ab. Das Übertragungsmaß L quantifiziert diesen Zusammenhang:

$$L = 20 \cdot \log \left[\sqrt{\frac{1 + \eta^2 \cdot (f/f_0)^2}{(1 - (f/f_0)^2)^2 + \eta^2 \cdot (f/f_0)^2}} \right]^2$$

wobei η der sogenannte mechanische Verlustfaktor ist.

Lager werden so ausgelegt, dass $f/f_0 > \sqrt{2}$ ist, denn nur dann findet tatsächlich eine – wenn auch nur unvollständige – Entkop-

Abb. 2: Übertragungsmaß L in Abhängigkeit vom Verhältnis der Frequenz f der dynamischen Kraft und der Eigenfrequenz f_0 . Der mechanische Verlustfaktor η bestimmt den konkreten Verlauf der Kurve.



plung der dynamischen Kräfte statt (negativer Wert für L , **Abb. 2**). Je größer f/f_0 bzw. je kleiner f_0 ist, umso kleiner ist L und umso besser isoliert das Lager den schwingenden Teil. Der ideale Werkstoff zum Schutz vor Vibrationen weist daher einen möglichst kleinen dynamischen Elastizitätsmodul E_{dyn} auf (**Gleichung 1**). Aus diesem Grund ist die Minimierung des Elastizitätsmoduls und somit des Übertragungsmaßes L ein häufiges Ziel bei der Entwicklung neuer Werkstoffe. (Im Allgemeinen machen jedoch anwendungsspezifische Vorgaben – z.B. in Bezug auf die

Langzeitstabilität – aus der Minimierung eine Optimierung.)

Es gibt aber auch Anwendungen, bei denen der Lagerwerkstoff im Bereich der Schwingungsverstärkung ($f/f_0 < \sqrt{2}$) konkrete Vorgaben erfüllen muss. Ist z.B. eine Maschine zu entkoppeln, die eine relativ große Zeitspanne zum Anlaufen bzw. zum Erreichen der Betriebsfrequenz f benötigt, muss der Werkstoff das Resonanzphänomen bei $f/f_0 = 1$ einschränken (**Abb. 2**).

Soll ein Werkstoff die Lastspitzen bei stoßartiger Belastung dämpfen und somit nicht bloß das bei periodischen Kräften auftretende Resonanzphänomen einschränken, muss sein Verlustfaktor sehr groß sein. Getz-

ner Werkstoff-

fe hat mit Sylodamp einen für solche Anwendungen optimierten Werkstoff entwickelt. In unserem Beitrag erläutern wir sowohl die physikalischen als auch die materialchemischen Zusammenhänge, die dem zielgerichteten Design von Sylodamp zugrunde liegen – und wir beschreiben Anwendungen, die unseren neuen Werkstoff bereits nutzen. Schließlich machen wir einen

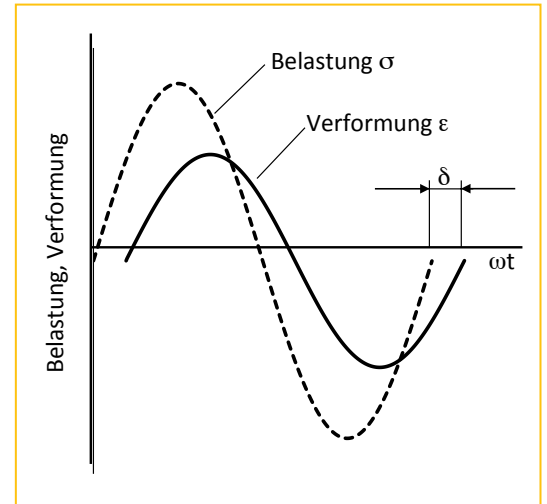
Blick in die Zukunft und diskutieren das Potenzial hochdämpfender Polyurethan-Elastomere für Produkte zum Schutz vor Eisenbahnlärm.

2 Theorie viskoelastischer Werkstoffe

2.1 Belastung, Verformung und Zeit

Bei elastischen Werkstoffen sind mechanische Verformungen reversibel: Prüfkörper

Abb. 3: Zusammenhang zwischen einer sinusförmigen, dynamischen Belastung σ (z. B. Pressung) und der Verformung ϵ (z. B. Stauchung) als Antwortsignal bei einem viskoelastischen Werkstoff nach [1a]. ωt ist der sogenannte Phasenwinkel ω die durch $2\pi \cdot f$ gegebene Kreisfrequenz und δ die sogenannte Phasenverschiebung.



oder Bauteile aus ideal-elastischem Material nehmen unmittelbar nach dem Aufheben der Belastung ihre ursprüngliche Geometrie an; solche aus viskoelastischem Material tun dasselbe, benötigen dazu aber eine endliche Zeitspanne – die (Rück-)Verformung folgt der Belastungsänderung zeitlich verzögert (**Abb. 3**).

Diese Verzögerung ist die makroskopische Folge von dämpfend wirkenden Bewegungen auf atomarer Ebene (parallelgeschalteter Dämpfer im physikalischen Ersatzbild in **Abb. 1**). Ist die Verformung nicht vollständig reversibel, dann liegt zusätzlich ein viskoser Verformungsanteil vor. Im Ersatzbild entspricht er einem in Serie geschalteten Dämpfer. Ein Spezialfall viskoser Verformung ist das sogenannte Kriechen, das langsam stattfindet und somit eine große Belastungsdauer voraussetzt. Es ähnelt dem Fließen einer Polymerschmelze.

Beide dämpfenden Verformungsanteile (viskoelastisch und viskos) korrelieren mit dem Umlagern von Abschnitten der Polymerketten, mit dem Wandern von Seitenketten durch das umliegende Polymergerüst und mit anderen – potenziell irreversiblen – Bewegungen [1b]. Dabei erwärmt sich der Werkstoff durch mikroskopische Reibungseffekte (Energie wird dissipiert), sodass nur ein – mehr oder weniger großer

– Teil der durch die äußere Kraft verrichteten Arbeit als potenzielle Energie gespeichert wird.

Im Gegensatz dazu korreliert der ideal-elastische Verformungsanteil (Feder in **Abb. 1**) mit der Änderung interatomarer Abstände und der Verzerrung von Valenzwinkeln [1b]. Die damit assoziierten Bewegungsmodi gehen kaum mit Wärmeverlusten einher, weil die Änderung der räumlichen Koordinaten der jeweils beteiligten Atome klein ist.

2.2 Mechanischer Verlustfaktor und dynamischer Elastizitätsmodul

Im Fall einer periodisch-dynamischen Belastung ist die Verschiebung zwischen Verformungs- und Belastungskurve – quantifiziert anhand des Winkels δ (**Abb. 3**) – ein geeignetes Maß zur Charakterisierung der Werkstoffdämpfung. Die sogenannte Phasenverschiebung δ folgt aus der zeitlichen Differenz Δt zwischen Verformungs- und Belastungsänderung und ist somit umso größer, je größer die viskoelastischen und viskosen Verformungsanteile eines Werkstoffs sind. Es ist vorteilhaft, den Tangens der Phasenverschiebung anzugeben, weil dieser sowohl das Verhältnis von dissipativer zu potenzieller Energie als auch das Verhältnis von Verlust- zu Speichermodul wiedergibt. Zugleich ist diese Größe bereits aus der Einleitung bekannt; es ist der mechanische Verlustfaktor η :

$$\eta(T, f) = \tan \delta(T, f) = \frac{E_D(T, f)}{2 \cdot \pi \cdot E_{\text{pot}}(T, f)} \quad 3$$

$$= \frac{E_D(T, f)}{\pi \cdot \sigma_0(T, f) \cdot \epsilon_0(T, f)} = \frac{E''(T, f)}{E'(T, f)}$$

dabei sind T die Temperatur, f die Frequenz, δ die Phasenverschiebung, E_D die dissipative Energie (Wärmeenergie), E_{pot} die potenzielle Energie, σ_0 die Spannung, ϵ_0 die Verformung (Dehnung oder Stauchung), E'' der Verlustmodul und E' der Speichermodul.

Der Begriff Verlust-Faktor weist darauf hin, dass die in Wärme umgewandelte Energie zur wiedergewinnbaren Formänderungsenergie – das ist die gespeicherte potenzielle Energie – in Beziehung gesetzt wird. An dieser Stelle sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass Kenngrößen zum Beschreiben

der Dämpfung schwingungsfähiger Systeme oder Bauteile (Dämpfungskonstante, Dämpfungskoeffizient, Lehrsches Dämpfungsmaß, logarithmisches Dekrement etc.) von Größen zur Charakterisierung dämpfender Materialien zu unterscheiden sind. Der quantitative Zusammenhang zwischen Verformungs- und Belastungskurve (**Abb. 3**) kennzeichnet die Steifigkeit des Werkstoffs – im Fall der relativen Verformung und der Spannung ist dies der dynamische Elastizitätsmodul E_{dyn} (eine komplexe Größe):

$$E_{\text{dyn}}(T, f) = E'(T, f) + i \cdot E''(T, f) = E'(T, f) \cdot |1 + i \cdot \eta(T, f)| \quad 4$$

wobei die Beziehung $E'' = \eta \cdot E'$ verwendet wurde.

E_{dyn} bestimmt (neben anderen Größen) die Eigenfrequenz f_0 des Ein-Massen-Schwingers (**Gleichung 1**). Der Betrag ist gegeben durch:

$$|E_{\text{dyn}}(T, f)| = \sqrt{[E'(T, f)]^2 + [E''(T, f)]^2} = \frac{\sigma_A(T, f)}{\epsilon_A(T, f)} \quad 5$$

Dabei ist σ_A die Spannungsamplitude und ϵ_A die Verformungsamplitude (**Abb. 3**).

Sowohl der dynamische Elastizitätsmodul als auch der Verlustfaktor eines Elastomers hängen von der Temperatur und der Frequenz ab, darüber hinaus sind sie aber auch eine Funktion der Vorlast und der Spannungsamplitude (kraftgeregelte Messung). Die Temperaturabhängigkeit der genannten Größen steht beim Entwickeln eines Elastomers im Zentrum, weil sie aufgrund verschiedener physikalisch-chemischer Zustände stark ausgeprägt ist: die Kurven $E'(T)$ und $E_{\text{dyn}}(T)$ weisen eine Stufe auf und die Kurve $\eta(T)$ hat ein Maximum (**Abb. 4**). Die Eigenschaften des Werkstoffs im energieelastischen Bereich unterscheiden sich sehr stark von jenen im entropieelastischen Bereich. Zum Beispiel kann der Elastizitätsmodul der beiden Zustände um das Zehn- bis Tausendfache divergieren [1d].

Im energieelastischen Bereich – d.h. bei tiefer Temperatur – ist die Beweglichkeit der Polymerketten so klein, dass sie einer

periodisch-dynamischen Belastung mit der Frequenz f nicht folgen können. Die mit der Last einhergehende Verformung korreliert daher nur mit der Änderung interatomarer Abstände und der Verzerrung von Valenzwinkeln, weshalb die Verformung klein und der Elastizitätsmodul groß ist. Außerdem ist der Werkstoff hart und spröde. Die Verformungsarbeit wird als potenzielle Energie gespeichert, sodass der elastische Verformungsanteil sehr groß und der Verlustfaktor sehr klein ist. Nimmt die Belastung ab, verursacht

das interatomare Potenzial – d.h. die Wechselwirkungsenergie zwischen den Atomen – die mikroskopischen Kräfte, die für das makroskopische beobachtbare Rückstellverhalten verantwortlich sind. Aus diesem Grund heißt der Zustand energieelastisch.

Im entropieelastischen Bereich – also bei hoher Temperatur – hingegen ist die Beweglichkeit der Polymerketten sehr groß. Rotationen und Umlagerungen von Kettensegmenten und gegebenenfalls vorhandenen Seitenketten finden auf einer Zeitskala statt, die relativ zur Frequenz f der periodisch-dynamischen Belastung kurz ist. Die Verformungskurve des Werkstoffs ist daher gegenüber der Belastungskurve (**Abb. 3**) nur wenig verschoben – der mechanische Verlustfaktor ist aus diesem Grund auch in diesem Temperaturbereich klein. Aufgrund der mikroskopischen Bewegungen ist der Werkstoff weich und der Elastizitätsmodul ist somit klein. Im Gegensatz zum energieelastischen Zustand ist im entropieelastischen Zustand nicht die Energie, sondern die Entropie jene Größe, die Verformungen reversibel macht: Die Polymerketten liegen im unbelasteten Zustand nämlich als Knäuel vor, weil diese gegenüber gestreckten Ketten aufgrund des größeren Entropieterms zu einer niedrigeren Gibbs-Energie führen. Beim Belasten werden die Polymerketten gestreckt und die Verformungsenergie in Form verkleinerter Entro-

pie (bzw. vergrößerter Gibbs-Energie) gespeichert.

2.3 Hochdämpfende Elastomere

Für technische Anwendungen – wie für den allgemeinen Gebrauch – kommen Elastomere fast ausschließlich in ihrem entropieelastischen Zustand in Frage. Hier besitzen sie jene Eigenschaften, die bspw. ein Federelement zur Isolation von Vibrationen aufweisen muss: E_{dyn} und η sind klein und somit ist auch das Übertragungsmaß L im Bereich $f/f_0 > \sqrt{2}$ klein (Abb. 2).

Eine Ausnahme bilden hochdämpfende – also energieabsorbierende – Elastomere: Diese müssen bei der Gebrauchstemperatur im Übergangszustand zwischen energie- und entropieelastischem Zustand vorliegen. In ihm nehmen Elastomere nämlich einen großen Teil der eingebrachten Energie auf, indem sie Verformungsarbeit in Wärme umwandeln. Das zu diesem Übergangszustand gehörende Temperaturfenster heißt Glasübergangsbereich, weil sich die Eigenschaften beim Aufwärmen von glasig (fest) in weichelastisch ändern. Der glasartige Kunststoff geht aufgrund seines chemischen Aufbaus aus Makromolekülen zwar nicht unmittelbar in eine Flüssigkeit über, die Mobilität von Kettensegmenten und Seitenketten erinnert aber an deren Bewegungen in einer Polymerschmelze (die bei Thermoplasten durch weiteres Erwärmen tatsächlich zugänglich ist).

Im entropieelastischen Zustand relaxieren die Polymerketten relativ zur Frequenz der periodisch-dynamischen Belastung schnell, im energieelastischen Zustand hingegen sehr langsam. Ihre mikroskopischen Bewegungen sind daher in beiden Fällen von der makroskopischen Verformung entkoppelt. Daraus folgt, dass im Übergangsbereich zwischen den beiden Zuständen die Bewegungen der Kettensegmente (und der gegebenenfalls vorhandenen Seitenketten) von der äußeren Verformung gerade nicht entkoppelt sind. Die Frequenz f determiniert daher die Lage des Übergangsbereichs, und die Kopplung selbst bestimmt die Eigenschaften des Elastomers im entsprechenden Temperaturfenster. Analog zu schwingungsfähigen mechanischen Systemen (Abb. 1) bewegen

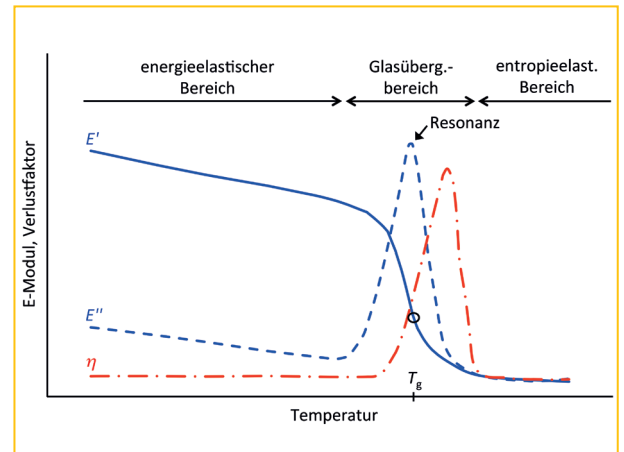
sich die Polymerketten mehr oder weniger im Takt der periodischen Belastung.

Im Extremfall kommt es – wiederum wie bei makroskopischen Systemen (Abb. 2) – zur Resonanz. Im Allgemeinen tritt dieser Fall ein, wenn die Frequenz f und der Kehrwert der Relaxationszeit $1/\tau(T)$ gleich groß sind. Je näher $f \cdot \tau(T)$ bei 1 liegt, umso größer ist die Kopplung und umso größer ist auch der Verlustmodul $E''(T)$. Den Glasübergangsbereich zeichnet daher ein Peak in der Kurve $E''(T)$ aus (Abb. 4). Aufgrund der Relation $\eta(T) = E''(T)/E'(T)$ weist auch der mechanische Verlustfaktor einen Peak auf. Während bei mechanischen Systemen Resonanz zu einer Verstärkung der Schwingungsamplitude führt (Abb. 2), wirkt sie sich im Inneren von Elastomeren dämpfend aus (Abb. 4).

Eine Erklärung für den großen Verlustmodul im Übergangsbereich liefert die sogenannte Freies-Volumen-Theorie der Glasbildung [1e, 2, 3]: Das Volumen eines Prüfkörpers nimmt beim Abkühlen ab, wodurch auch das freie Volumen zwischen den Polymerketten kleiner wird. Zugleich nehmen die Wechselwirkungen zwischen den Ketten zu, weil die interatomaren Abstände kleiner werden. Die Kettensegmente und Seitenketten können sich zwar noch bewegen, allerdings wird ein Teil der makroskopischen Verformungsarbeit durch mikroskopische Reibungseffekte in Wärme umgewandelt. Der entsprechende Energieanteil geht verloren und steht somit nicht mehr zur Wiederherstellung der ursprünglichen Geometrie des Prüfkörpers zur Verfügung, was die Verformung gegenüber der Belastung verzögert (Abb. 3).

Der Peak der Kurven $E''(T)$ und $\eta(T)$ ist bei Kunststoffen sehr breit, weil Polymere durch ein breites Spektrum an Relaxationszeiten charakterisiert sind: Jeder Unterschied im chemischen Aufbau einzelner Kettensegmente, in der Länge von Seiten-

Abb. 4: Speichermodul E' , Verlustmodul E'' und mechanischer Verlustfaktor η eines Elastomers bei periodischer Belastung (mit konstanter Frequenz f) als Funktion der Temperatur nach [1c]. Der stufenförmige Abschnitt des Speichermoduls bzw. der Peak des Verlustmoduls definieren den Glasübergangsbereich. Auf seiner Tieftemperaturseite liegt der energieelastische Bereich, auf seiner Hochtemperaturseite der entropieelastische Bereich. Die Glasübergangstemperatur T_g beschreibt die Lage des Glasübergangsbereichs; hier ist sie definiert als Wendepunkt in der E' -Kurve.



ketten etc. sowie jeder Unterschied in der räumlichen Umgebung eines Segments führt zu einer je eigenen Relaxationszeit. Die Lage des Glasübergangsbereichs gibt die Glasübergangstemperatur T_g an, wobei sie verschieden definiert werden kann – z. B. als jene Temperatur, bei der die Krümmung der Kurve $E'(T)$ ihr Vorzeichen wechselt (Wendepunkt, Abb. 4).

2.4 Design viskoelastischer Polyurethane mit ausgeprägter Dämpfung

Elastomerprodukte haben bei der Gebrauchstemperatur üblicherweise einen mechanischen Verlustfaktor η von 0,1 bis 0,2; sie sind daher mäßig dämpfend. Vereinzelt sind auch Elastomere mit $\eta < 0,1$ am Markt, z. B. Sylodyn von Getzner Werkstoffe. Bei diesen Werkstoffen ist die Dämpfung sehr klein, dementsprechend verwendet man sie überall dort, wo die Funktion einer möglichst verlustfreien Feder zu erfüllen ist. Ein Beispiel dafür ist der Vibrationsschutz, bei dem das Übertragungsmaß L im relevanten Bereich möglichst klein sein soll. Zum einen ist L umso kleiner, je kleiner η ist (Abb. 2). Zum anderen hängt L von der Eigenfrequenz $f_0 \sim \sqrt{E_{dyn}}$ des Systems ab. Je kleiner f_0 bzw. E_{dyn} ist, umso größer ist das Verhältnis f/f_0 – also die Abszissengröße in Abbildung 2 – und umso kleiner ist das zugehörige Über-

tragungsmaß L . Der dynamische Elastizitätsmodul E_{dyn} wiederum ist umso kleiner, je kleiner der Verlustmodul E'' und der Verlustfaktor η sind (**Gleichung 5**). Dämpfung erhöht daher das Übertragungsmaß L (**Gleichung 2**) direkt über η und indirekt über die Korrelationskette $E''-E_{\text{dyn}}-f_0$.

Elastomere mit $\eta \geq 0,3$ sind stark dämpfend und dienen als Energieabsorber bei Stoßbelastungen oder zum Einschränken des Resonanzphänomens bei periodischer Belastung (**Abb. 2**). Bei der Synthese dafür geeigneter Werkstoffe aus Polyurethan muss der Entwickler eine Rezeptur finden, die verschiedene Forderungen optimal erfüllt:

- (a) Ausmaß der Dämpfung
- (b) Mechanische Langzeitstabilität
- (c) Breite des Glasübergangsbereichs

Zu (a): Um einen Verlustfaktor $\geq 0,3$ zu erzielen, muss die vorgegebene Gebrauchstemperatur im Bereich des Peaks der $\eta(T)$ -Kurve (**Abb. 4**), das heißt im Glasübergangsbereich liegen. Aus diesem Grund ist die Lage des Glasübergangs eine Zielgröße. Sie hängt von vier Strukturmerkmalen ab [1f]: Wechselwirkungen zwischen einzelnen Ketten bzw. Kettenabschnitten (Van-der-Waals-Wechselwirkungen, Wasserstoffbrückenbindungen) und Hauptvalenzbindungen schränken die Beweglichkeit der Hauptketten ein. Physikalische und chemische Vernetzung erhöht daher die Glasübergangstemperatur T_g . Darüber hinaus ist T_g umso höher, je mehr die Drehbarkeit um die C-C-Bindungen und die Beweglichkeit von Kettenabschnitten zueinander behindert sind. Aus diesem Grund verschieben sperrige Seitengruppen und Ringstrukturen in der Hauptkette den Glasübergangsbereich in Richtung höherer Temperatur. Verschiedene Kunststoffe weisen daher sehr unterschiedliche Werte für T_g auf, sie reichen von -70°C (Polyisobutylen) bis 145°C (Polycarbonat) [1g].

Zu (b): Rohstoffe mit dämpfend wirkenden Strukturmerkmalen erhöhen neben dem viskoelastischen häufig auch den viskosen Verformungsanteil des Werkstoffs. Dieser wirkt sich nachteilig auf das bei vielen technischen Anwendungen erforderliche Dauerstand- bzw. Dauerschwellverhalten aus, denn die viskose Verformung ist irreversibel, was das Rückstellvermögen reduziert. Die Rezeptur

muss somit das rechte Maß zwischen den einander widerstrebenden Materialeigenschaften Dämpfung und mechanische Langzeitstabilität treffen.

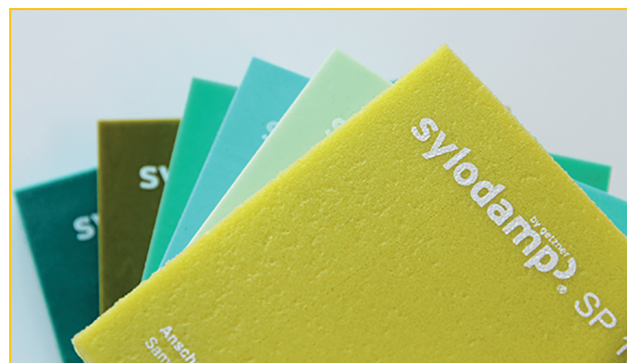
Zu (c): Die Gebrauchstemperatur – also jene Temperatur, bei der Werkstoffe ihre Funktion erfüllen müssen – ist tatsächlich ein endlich breiter Bereich. Dämpfende Produkte müssen daher bei praktisch allen Anwendungen (verbaut in Geräten, im Inneren von Gebäuden oder im Freien) die geforderte Energieabsorption in einem bestimmten Temperaturfenster aufweisen. Da die Gebrauchstemperatur im Bereich des Peaks des mechanischen Verlustfaktors $\eta(T)$ liegen muss (siehe Punkt (a)), soll der Peak möglichst breit sein. Dann hängen nämlich $\eta(T)$ und die Energieabsorption nicht zu stark von der Temperatur ab und die Dämpfung ist über den ganzen Einsatzbereich ausreichend hoch. Der Glasübergangspeak ist umso breiter, je größer das Spektrum an Relaxationszeiten ist. Der Werkstoff muss daher strukturell heterogen sein, und die individuellen, lokalen Strukturen müssen in ungefähr gleichem Ausmaß vorliegen.

Die vielfältigen Zielvorgaben in Bezug auf die Eigenschaften eines neuen Elastomers mit großer Dämpfung und ihre chemisch-physikalischen Korrelationen machen deutlich, dass Erfahrungswissen eine äußerst wertvolle Ressource für Unternehmen darstellt, die Rezepturen selbst entwickeln.

3 Neue Werkstoffreihe

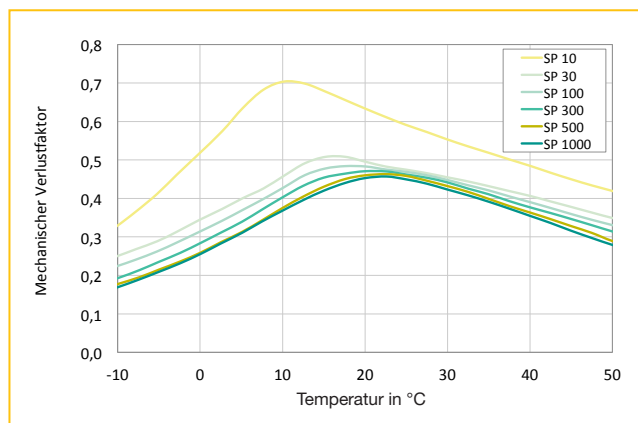
Um einen Ausgleich zwischen einem hohen Verlustfaktor von $\eta \geq 0,45$ und der mechanischen Langzeitstabilität zu schaffen,

Abb. 5: Das Sylodamp-Sortiment aus sechs verschiedenen steifen Werkstofftypen



hat Getzner Werkstoffe einen hochdämpfenden Werkstoff aus Polyurethan entwickelt. Der Werkstoff Sylodamp ist explizit nicht das Ergebnis der Maximierung einer einzelnen Eigenschaft (zum Beispiel der Dämpfung), sondern das Ergebnis eines Optimierungsprozesses, der sämtliche Forderungen an ein dämpfendes Elastomer (siehe oben) berücksichtigt.

Abb. 6: Mechanischer Verlustfaktor der sechs Sylodamp-Typen in Abhängigkeit von der Temperatur (dynamisch-mechanische Analyse bei einer statischen Last unterhalb der Obergrenze des statischen Einsatzbereichs, sinusförmige Anregung mit einem Geschwindigkeitspegel von 100 dB bei einem Referenzwert von $5 \cdot 10^{-8}$ m/s und einer Frequenz von 10 Hz, Formfaktor 3).



3.1 Eigenschaften

Sylodamp gibt es in sechs farblich gekennzeichneten Typen unterschiedlicher Steifigkeit (**Abb. 5**), wodurch für verschiedene statische Belastungen im Bereich $0,005 \text{ N/mm}^2$ bis $0,5 \text{ N/mm}^2$ eine effiziente Auslegung möglich ist. Je nach Typ verträgt Sylodamp Lastspitzen, die relativ zur Obergrenze des statischen Einsatzbereichs zehn- bis fünfzigmal so groß sind. Der Druckverformungsrest beträgt weni-

ger als 5 % (Lagerung: 25 % Stauchung, 23°C, 72 h; Prüfung 30 min nach dem Entlasten).

Bei klassischen Elastomeren befindet sich praktisch der gesamte Glasübergangsbereich unterhalb der Raumtemperatur. Dementsprechend ist der mechanische Verlustfaktor bei Raumtemperatur mit 0,1 bis 0,2 klein. Im Gegensatz dazu beträgt er bei den Typen der Sylodamp-Reihe $\eta \geq 0,45$, weil bei ihnen das Maximum der Kurve $\eta(T)$ in der Nähe der Raumtemperatur und somit im Bereich der Gebrauchstemperatur liegt (Abb. 6). Zugleich ist die Breite des $\eta(T)$ -Peaks und somit der Glasübergangsbereich so groß, dass die Dämpfungseigenschaften des Werkstoffs im Einsatzbereich nicht zu stark von der Temperatur abhängen.

Die Rückprallelastizität von 13 % bis 16 % und die für das jeweils vorliegende Raumgewicht verhältnismäßig große dynamische Steifigkeit (Abb. 7) spiegeln das ausgeprägte Dämpfungsverhalten von Sylodamp wider.

3.2 Anwendungen

Sylodamp mindert das Ausmaß von Resonanzphänomenen bei Anwendungen mit periodischen Belastungen (Abb. 8). Bei Stößen bewirkt es die Isolation von Körperschall sowie schnelleres Abklingen von Schwingungen. Außerdem schützt es mechanisch beanspruchte Bauteile, empfindliche Elektronik oder Menschen (Abb. 9) vor zu großen Kräften – z. B. als Werkstoff für die Füße von Stanzmaschinen, als Aufprallschutz und dergleichen.

Ingenieure können die gewünschte Wirkung (Schwingungsisolation, Schwingungsdämpfung, Reduktion der maximalen Kraft) optimieren, indem sie Werkstoffe mit verschiedenen Feder- bzw. Dämpfungseigenschaften in Parallel- oder Reihenschaltung kombinieren (Abb. 8). Körper- oder luft-

Abb. 7: Dynamischer Elastizitätsmodul der sechs Sylodamp-Typen als Maß für die Steifigkeit der Werkstoffe in Abhängigkeit von der Temperatur (dynamisch-mechanische Analyse bei einer statischen Last unterhalb der Obergrenze des statischen Einsatzbereichs, sinusförmige Anregung mit einem Geschwindigkeitspegel von 100 dB bei einem Referenzwert von $5 \cdot 10^{-8}$ m/s und einer Frequenz von 10 Hz, Formfaktor 3)

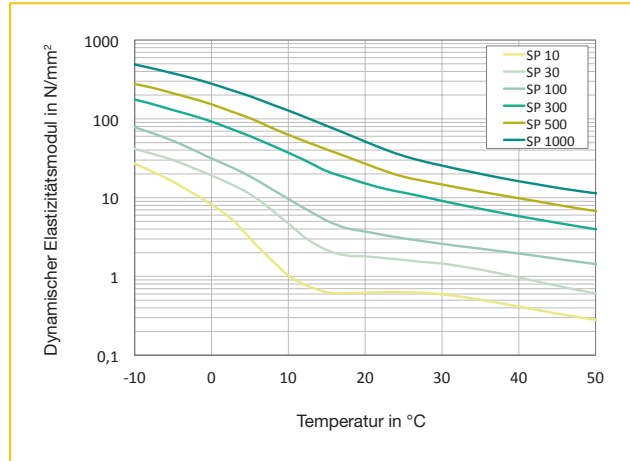
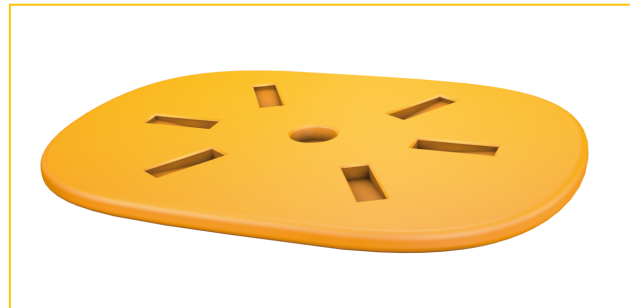


Abb. 8: Lagerungen eines Kompressors auf parallel geschalteten Zylindern aus Sylodamp und Stahlfedern



Abb. 9: Protektor aus Sylodamp zum Schutz des Körpers bei stoßartigen Belastungen



schalltechnische Messungen vor Ort helfen, die spezifische Anwendung zu optimieren und die Werkstoffe ideal auszuwählen.

4 Ausblick: Schwingungsdämpfer gegen Eisenbahnlärm

Das Eigenschaftsprofil von Sylodamp hält die Balance zwischen den einander entgegengesetzten Werkstoffeigenschaften Dämpfung und mechanische Langzeitstabilität. Dadurch bewirkt Sylodamp Produktverbesserungen in vielen Anwendungsbereichen ohne extreme Spezifikation.

Ist jedoch – wie z. B. im Eisenbahnwesen – das geforderte Dauerschwellverhalten besonders groß, muss der mit Sylodamp verwirklichte Rezepturansatz modifiziert werden. Der Faktor Langzeitstabilität erhält dann im Optimierungsprozess ein größeres Gewicht und es werden Rohstoffe eingesetzt, die den Ziel-Eigenschaften des gewünschten Produkts entsprechen. Bahnspezifische Produkte aus Polyurethan-Werkstoffen mit hoher Dämpfung haben großes Potenzial, weil sie die Lebensdauer des Eisenbahnobersbaus verlängern [4] und außerdem den Eisenbahnlärm reduzieren können. Dieser nimmt aufgrund zunehmender Auslastung von Bahnstrecken stetig zu – und damit auch die Lärmbelastung von uns Menschen.

Im Eisenbahnobersbau emittieren schwingende Schienen und Schwellen Schall (Abb. 10). Hochdämpfende Zwischenlagen könnten diesen verringern und so zum Lärmschutz beitragen. Üblicherweise dienen Zwischenlagen als federnde Elemente zwischen Schiene und Schwelle. Sie bewirken, dass die Last des Zuges auf mehr Schwellen verteilt wird und dadurch der Oberbau geschont und seltener gewartet werden muss. Gängige Zwischenlagen aus elastischen Werkstoffen mit kleinem mechanischem Verlustfaktor

erfüllen diese Funktion sehr gut, mindern aber kaum das Schwingen der Schienen und Schwellen und die damit verbundene Lärmemission. Im Gegensatz dazu haben visko-

Abb. 10: Lärm durch Eisenbahnverkehr: Die Wechselwirkung zwischen Rad und Schiene bewirkt, dass die Räder, Schienen und Schwellen schwingen [5] und dadurch Luftschall erzeugen.

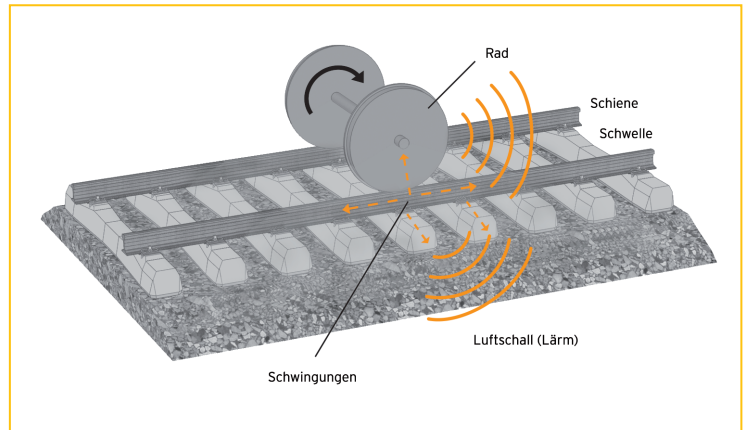
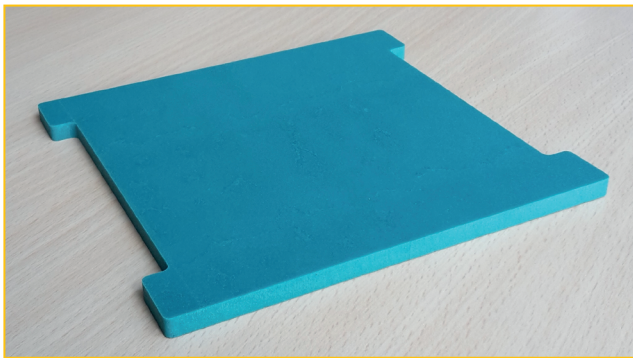


Abb. 11: Muster einer hochdämpfenden Zwischenlage aus viskoelastischem Polyurethan



elastische, hochdämpfende Zwischenlagen (**Abb. 11**) das Potenzial, die Schwingungsamplituden und dadurch den Pegel des emittierten Schalls zu verkleinern.

5 Zusammenfassung

Hochdämpfende Elastomere sind viskoelastische Werkstoffe. Aufgrund ausgeprägter Reibung zwischen Kettenabschnitten des Polymergerüsts absorbieren sie beim Verformen Bewegungsenergie. Ingenieure verwenden dämpfende Elastomere daher zum Reduzieren von Lastspitzen bei Stößen sowie zum Einschränken von Resonanzphänomenen bei periodischen Kräften. Getzner Werkstoffe hat mit Sylodamp eine Werkstoff-Reihe für solche Anwendungen entwickelt. Diese ist bei Raumtemperatur stark dämpfend: Der mechanische Verlust-

faktor beträgt bei allen sechs Sylodamp-Typen $\geq 0,45$.

Um einen so hohen Verlustfaktor zu erreichen, muss der viskoelastische Verformungsanteil sehr groß sein. Deshalb ist Sylodamp aus chemischen Struktureinheiten aufgebaut, die dazu führen, dass der Werkstoff bei Raum- bzw. Gebrauchstemperatur im Glasübergangsbe-

reich vorliegt. In diesem bewegen sich die Polymerketten nämlich ungefähr im Takt mit der periodischen Belastung, zugleich ist das für die Bewegung zur Verfügung stehende freie Volumen klein. Beides führt zu mikroskopischer Reibung – Energie wird dissipiert.

Das Eigenschaftsprofil von Sylodamp ist das Ergebnis eines materialchemischen Optimierungsprozesses, der sowohl zu einem hohen Verlustfaktor als auch zu einer hohen mechanischen Langzeitstabilität des Werkstoffs führt. Er eignet sich somit für viele verschiedene Anwendungen, bei denen Menschen, empfindliche Elektronik oder mechanisch beanspruchte Bauteile vor zu großen Kräften geschützt werden sollen.

Darüber hinaus haben hochdämpfende Polyurethan-Elastomere großes Potenzial

zum Schutz vor Lärm. Zum Beispiel könnten dämpfende Zwischenlagen im Eisenbahnoberbau die Schwingungen von Rädern, Schienen und Schwellen und somit die Lärmemission reduzieren. Um das im Bahnwesen geforderte Dauerschwellverhalten zu erfüllen, ist die mit Sylodamp verwirklichte Rezeptur zu modifizieren, wobei der Faktor Langzeitstabilität in einem neuen innovativen Zwischenlagen-Produkt ein größeres Gewicht erhält.

6 Literatur

- [1] G. W. Ehrenstein, „Polymer-Werkstoffe. Struktur, Eigenschaften, Anwendung“, Carl-Hanser-Verlag, München, 2011, a) S. 181, b) S. 36, c) S. 183, d) S. 34, e) S. 82f u. 192–195, f) S. 199–201, g) S. 203.
- [2] M. H. Cohen, D. Turnbull, „Molecular transport in liquids and glasses“, J. Chem. Phys. 31 (1959), 1164.
- [3] M. D. Ediger, C. A. Angell, S. R. Nagel, „Supercooled liquids and glasses“, J. Phys. Chem. 100 (1996), 13200.
- [4] H. Loy, A. Augustin, „Pushing the limits of ballasted heavy-haul railway track by means of high-strength under-sleeper pads made of a specially developed PUR“, Rail Engineering International Edition 2015, Number 4 (2015), 3.
- [5] D. J. Thompson, C. J. C. Jones, „A review of the modelling of wheel/rail noise generation“, J. Sound Vib. 231 (2000), 519.



Abb. 12: Getzner Zwischenlagen aus Polyurethan im Eisenbahnoberbau

Impressum

Dr. Gupta Verlags GmbH

Am Stadion 3b,
40878 Ratingen

Geschäftsführer Hans Langohr

Amtsgericht Düsseldorf HRB 79922
USt.-IdNr. DE 314055034

Tel. +49 2102 9345-0
Fax +49 2102 9345-20

E-Mail info@gupta-verlag.de

Internet www.gak.de

Redaktion

Dr. Ernst Debie (ED)
(Chefredakteur, v. i.S.d.P.)
Dr. Christine Rüdiger (CR)
(Stellvertretende Chefredakteurin)
Dr. Isabella Kappner (IK)
Dipl.-Biol. Markus Linden (ML)
Robert Müller (RM)
Dr. Stephanie Waschbüsch (SW)

Dr. Heinz B. P. Gupta †

Freie Mitarbeiter

Gert F. Hartmann (GFH)
Siegfried Heimlich (SH)

Redaktionsbüro

info@gupta-verlag.de
Tel. +49 2102 9345-0

Abonnements

service@gupta-verlag.de
Tel. +49 2102 9345-12

Anzeigen

ads@gupta-verlag.de
Tel. +49 2102 9345-12

Layout + Druck

D+L Printpartner
Schlavenhorst 10, 46395 Bocholt

Erscheinungsweise:

10 Ausgaben 2020
Postvertriebsnummer 4637
ISSN 0176-1625

Bankverbindungen

Deutsche Bank
IBAN DE49 3007 0024 0729 0729 00
BIC DEUTDE33

Commerzbank

IBAN DE33 3004 0000 0859 3915 01
BIC COBADE33

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen. Oft handelt es sich um gesetzlich geschützte eingetragene Warenzeichen, auch wenn sie nicht ausdrücklich als solche gekennzeichnet sind.

Abonnement-, Bezugs- und Lieferbedingungen:

Jahresabonnementpreis 280,- EUR (zzgl. Versandkosten). Einzelheft 35,- EUR (Inlandspreise verstehen sich inkl. der jeweils gültigen Mehrwertsteuer). Bestellungen nehmen der Verlag und alle Buchhandlungen im In- und Ausland entgegen. Eine neue Abonnementbestellung gilt zunächst nur für das laufende Kalenderjahr. Das Abonnement verlängert sich automatisch, wenn nicht sechs Wochen vor Ablauf des Kalenderjahres schriftlich gekündigt wird. Die Abonnementgelder werden jährlich im Voraus in Rechnung gestellt und bei Teilnahme am Lastschriftverfahren automatisch abgebucht. Sollte die Fachzeitschrift aus Gründen, die nicht vom Verlag zu vertreten sind, nicht geliefert werden können, besteht kein Anspruch auf Nachlieferung oder Erstattung vorausbezahlter Bezugsgelder. Gerichtsstand für Vollkaufleute ist Ratingen, für alle Übrigen gilt dieser Gerichtsstand, sofern Ansprüche im Wege des Mahnverfahrens geltend gemacht werden.

Urheber- und Verlagsrecht:

Mit Namen oder Signum des Verfassers gekennzeichnete Artikel sind nicht unbedingt die Meinung der Redaktion. Unverlangte Manuskripte werden nur zurückgesandt, wenn Rückporto beigefügt ist. Der Verlag setzt voraus, dass der Autor Inhaber der Urheber- und Verwertungsrechte hinsichtlich sämtlicher Bestandteile der Einsendung ist, also auch bezüglich miteingesandter Abbildungen, Tabellen usw. Mit Annahme des Manuskripts gehen das Recht der Veröffentlichung sowie die Rechte zur Übersetzung, zur Vergabe von Nachdruckrechten, zur elektronischen Speicherung in Datenbanken, zur Herstellung von Sonderdrucken, Fotokopien und Mikrokopien an den Verlag über. Die Zeitschrift und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der durch das Urheberrechtsgesetz festgelegten Grenzen ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig.