

DIE BIBLIOTHEK DER TECHNIK

*Grundwissen mit dem Know-how
führender Unternehmen*

BT

293

Technische Elastomerwerkstoffe

DIE BIBLIOTHEK DER TECHNIK

293

Technische Elastomerwerkstoffe

Basis für Hightech-Lösungen in der Dichtungs-
und Schwingungstechnik



VERLAG
MODERNE
INDUSTRIE

Freudenberg Sealing Technologies

Die Bibliothek der Technik
Band 293

Technische Elastomerwerkstoffe

**Basis für Hightech-Lösungen in der
Dichtungs- und Schwingungstechnik**

Meike Rinnbauer



verlag moderne industrie

Dieses Buch wurde mit fachlicher Unterstützung
der Freudenberg Sealing Technologies
GmbH & Co. KG erarbeitet.

© 2006 Alle Rechte bei
sv corporate media, D-80992 München
<http://www.sv-corporate-media.de>
Abbildungen: Freudenberg Sealing Technologies
GmbH & Co. KG, Weinheim
Satz: abavo GmbH, D-86807 Buchloe
Druck und Bindung: Sellier Druck GmbH, D-85354 Freising

Inhalt

Elastomerentwicklung	4
Vom Naturprodukt zum Hightech-Werkstoff	4
Grundlagen	5
Elastomere und ihre Eigenschaften	9
Viskoelastisches Verhalten von Elastomeren	9
Korrelation von Frequenz und Temperatur	12
Systematik der Elastomere	13
Einflussfaktoren auf das Werkstoffverhalten	16
Mischungsbestandteile	16
Einfluss der Vernetzungsdichte	19
Physikalisches und chemisches Einwirken	23
Verarbeitungsverfahren	30
Mischtechnologie	30
Formgebungsverfahren	37
Prozessoptimierung in der Elastomerverarbeitung	43
Prüfung von Elastomeren	46
Prüfung entlang der Prozesskette	46
Vorhersage der Lebensdauer	48
Bauteilsimulation mittels FEM	49
Hightech-Produkte aus technischen Elastomerwerkstoffen	52
Ausblick	63
Fachbegriffe	66
Literatur	67
Anhang	68
Der Partner dieses Buches	71

Elastomerentwicklung

Vom Naturprodukt zum Hightech-Werkstoff

Jahrhundertealter Werkstoff

Elastomere Werkstoffe sind in Form von Naturkautschuk schon seit Jahrhunderten bekannt. Bereits mittel- und südamerikanische Indianer verwendeten diesen Werkstoff für Abdichtungen und als Spielbälle. Die Bezeichnung »Kautschuk« stammt aus dem Indischen (*cao* = Baum und *ochu* = Träne) und ist ein Sammelbegriff für alle unvernetzten, elastischen Polymere. Die zufällige Entdeckung der Vulkanisation durch Goodyear (1839) erlaubte die Herstellung von vernetzten, hochelastischen Werkstoffen (Elastomere) und ermöglichte, dass dieses Material für zahlreiche technische Anwendungen genutzt werden konnte. Heute sind Elastomere für Dichtungen oder schwingungstechnische Anwendungen unverzichtbar. Ohne Elastomere würde kein Auto fahren, kein Flugzeug starten, wären Hydraulik und Pneumatik undenkbar.

Hightech-Produkte

Viele Elastomerbauteile sind heute Hightech-Produkte, die höchste Anforderungen an Temperatur, Medienbeständigkeit und Verschleiß erfüllen. Ein Radialwellendichtring (Simmerring®) ist ein Beispiel für ein hochentwickeltes Elastomerteil. Er funktioniert wie eine mikroskopisch kleine Pumpe, die in der Lage ist, Schmierstoffe oder Gase unter der Dichtkante hindurch und wieder zurück in den Ölraum zu transportieren und somit für eine ausreichende Schmierung zwischen Welle und Dichtring zu sorgen (Abb. 1). Neben der reinen Dichtfunktion können Dichtungen durch Kombination mit moderner Sensortechnik vielfältige Zusatzfunktionen übernehmen. Die zunehmende Multifunktionalität moderner Elastomerbau-

Zusatzfunktionen

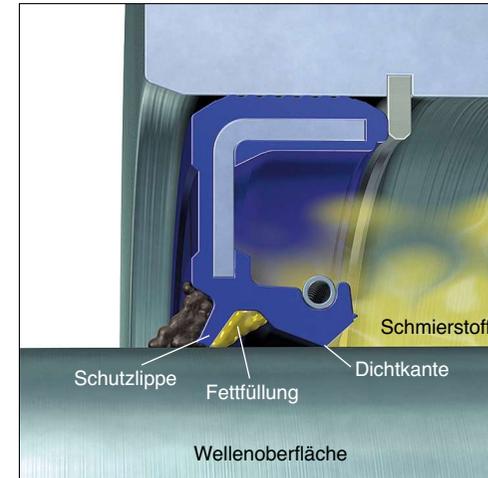


Abb. 1:
Funktionsprinzip eines Simmerrings (Querschnitt) mit zusätzlicher Schutzlippe zur weiteren Abdichtung gegen Schmutz und Staub

teile hat dazu geführt, dass für eine zielgerichtete Elastomerentwicklung Expertenwissen mit hohem Erfahrungsschatz notwendig ist.

Grundlagen

Unter Polymeren versteht man sehr große Moleküle, die durch Aneinanderbindung von sehr vielen kleinen Grundeinheiten (Monomere) entstehen. Die Verknüpfung der Monomere erfolgt über funktionelle, reaktionsfähige Gruppen, wodurch Verbindungen mit ganz anderen Eigenschaften als die der Ausgangsstoffe entstehen.

Der Molekülaufbau der Polymere kann linear, verzweigt oder vernetzt vorliegen. Je nach Orientierung der Molekülketten wird bei Polymeren zwischen einem amorphen und einem teilkristallinen Zustand unterschieden. Der Polymerisationsgrad, d. h. die Anzahl der Monomere in einer Polymerkette, hat einen wesentlichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Polymere. Mit zunehmender Kristallinität bzw. Dichte steigen der Schmelzbereich, die

Polymerisationsgrad

Viskoelastisches Verhalten

Glasübergangstemperatur

Zugfestigkeit, die Steifigkeit (E-Modul), die Härte, die Beständigkeit gegen Lösemittel sowie die Undurchlässigkeit für Gase und Dämpfe. Hochmolekulare Polymere wie Elastomere zeigen bei mechanischer Beanspruchung ein im Vergleich zu den meisten anderen Werkstoffen besonders stark ausgeprägtes viskoelastisches Verhalten. Die auftretenden Deformationen sind je nach Beanspruchung teils elastischer, teils viskoser Natur. Den Schlüssel zum Verständnis der mechanischen Eigenschaften bei verschiedenen Temperaturen bildet die Kenntnis der Vorgänge im Übergangsbereich zwischen den definierten Zuständen, der unter anderem durch die so genannte Glasübergangstemperatur T_g gekennzeichnet ist. Der Glasübergang ist eine für jedes Polymer charakteristische Größe. Unterhalb der Glasübergangstemperatur sind die Eigenbewegungen der Moleküle, auch brownische Molekularbewegung genannt, eingefroren. Der Werkstoff befindet sich in einem harten, glasartigen Zustand. Beim Überschreiten des Glasübergangs werden die Moleküle wieder beweglicher und das Polymer geht in den weichen, gummielastischen Zustand über (Abb. 2). Bei weiterer Temperaturerhöhung überwiegt das viskose Fließen, bis schließlich die Zersetzung des Polymers eintritt.

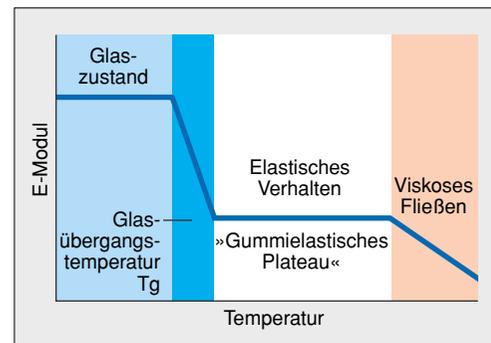
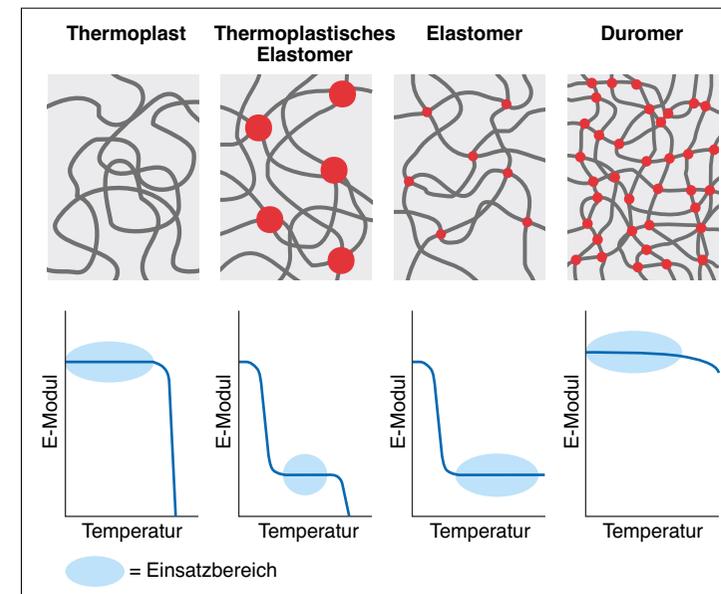


Abb. 2: Änderung des E-Moduls des Polymers in Abhängigkeit von der Temperatur

Polymerwerkstoffe werden nach ihrem Strukturaufbau, ihrem deformationsmechanischen Verhalten und dementsprechend nach ihren Eigenschaften und Anwendungsbereichen in mehrere Gruppen eingeteilt (Abb. 3). *Thermoplaste* sind aus langen linearen oder schwach verzweigten Polymeren aufgebaut, die nicht vernetzt sind. Bei Raumtemperatur sind diese Stoffe hart-spröde bis zäh-elastisch. Es gibt amorphe und teilkristalline Strukturen. Die Polymerketten liegen bei amorphen Thermoplasten sowohl in der Schmelze als auch im festen Zustand in regelloser Anordnung vor. Teilkristalline Thermoplaste sind in der Schmelze amorph, weisen aber im festen Zustand Bereiche auf, in denen die Polymerketten parallel zueinander ausgerichtet sind. Das Ausmaß der Kristallinität hat erheblichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des

Thermoplaste

Abb. 3: Schematischer Aufbau der Polymere und E-Modul-Temperatur-Kurven



Elastomere

Werkstoffs. Infolge von Temperaturerhöhung und starker Scherung werden Thermoplaste plastifiziert und sind somit umformbar.

Elastomere entstehen durch weitmaschige Vernetzung von amorphen, oft hochverzweigten Polymeren (z. B. Naturkautschuk). Diese lockere Fixierung von Polymerketten durch chemische Bindungen führt zum für diesen Polymerwerkstoff typischen hochelastischen Verhalten oberhalb der Glasübergangstemperatur T_g (so genanntes »gummielastisches Plateau«).

Die Formgebung von Elastomeren ist im Gegensatz zu den Thermoplasten mit einer chemischen Reaktion (Vernetzung) gekoppelt. Bei höheren Vernetzungsgraden wird T_g hin zu immer höheren Temperaturen verschoben, bis schließlich nahezu alle molekularen Bewegungen durch die starre Fixierung der Polymerketten unterbunden werden (wie z. B. beim Hartgummi). Somit sind bei äußerer Belastung nur noch geringfügige Verschiebungen möglich. Engmaschige (dreidimensionale) Vernetzung oder besser »Härtung« führt zu *Duromeren*, die wie Elastomere bei Überschreiten der Zersetzungstemperatur irreversibel zerstört werden. Beispiele für Duomere sind Epoxidharze oder Phenolformaldehyde.

Duomere**TPE**

Thermoplastische Elastomere (TPE) stellen eine Zwitterklasse dar. Oberhalb von T_g bis zum Schmelzpunkt bzw. bis zur Erweichungstemperatur verhalten sie sich wie Elastomere, sind aber bei höheren Temperaturen ($>100^\circ\text{C}$) thermoplastisch verarbeitbar. Bei vielen TPEs entsteht beim Abkühlen durch physikalische Vernetzung über (teil-)kristalline Bereiche eine thermoreversible Struktur mit elastischen Eigenschaften. Dies hat zur Folge, dass – wie es bei Thermoplasten der Fall ist – ein geringfügiges Überschreiten der Erweichungstemperatur zu einem irreversiblen Verlust der Bauteilgeometrie in der Anwendung führen kann.

Elastomere und ihre Eigenschaften

Die ASTM-Norm D 1566 (ASTM; *American Society for Testing and Materials*) definiert Elastomere als hochpolymere, organische Netzwerke, die in der Lage sind, große Verformungen reversibel aufzunehmen. Diese Eigenschaft in Verbindung mit der Möglichkeit, mechanische Energie zu absorbieren, führt dazu, dass aus Elastomeren Produkte hergestellt werden, die Toleranzen überbrücken, Bewegungen zwischen verschiedenen Bauteilen erlauben, ruhende und bewegte Abdichtungen ermöglichen, Schwingungen abbauen und dämpfen sowie Federfunktionen übernehmen.

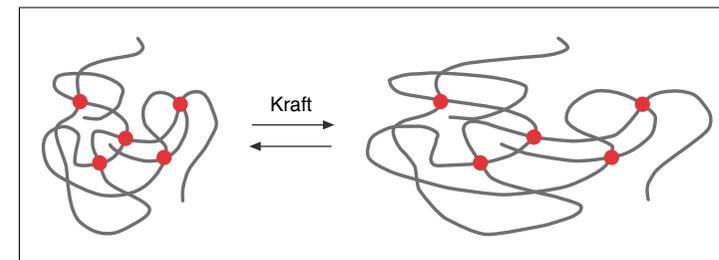
Hochpolymere organische Netzwerke

Viskoelastisches Verhalten von Elastomeren

Im Gegensatz zu den energieelastischen Festkörpern wie beispielsweise Metallen oder Legierungen sind Elastomere entropieelastisch. Triebkraft dieser Elastizität ist die Entropie, d. h. das Maß der Unordnung, die im verkäulten, ungeordneten Zustand der Polymerketten größer ist als in einer ausgerichteten, gedehnten Anordnung. Bei der Entropieelasti-

Entropieelastizität

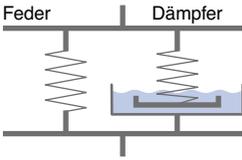
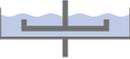
Abb. 4:
Modell der
Entropieelastizität



Entropieab- ...
...-zunahme

zität werden keine Atomabstände verändert, sondern einzelne Kettensegmente gegeneinander verschoben. Kommt es nun zu einer Spannungsbelastung im Elastomer, werden die geknäuelten Ketten in den geordneten und damit unwahrscheinlicheren Zustand überführt (Entropieabnahme). Bei Entlastung wird der alte, energetisch günstigere Knäuelzustand wieder eingenommen (Entropiezunahme). Die Änderung von Entropie ist die treibende Kraft für die Rückstellfähigkeit von Elastomeren im gummielastischen Bereich oberhalb der Glasübergangstemperatur T_g (Abb. 4). Viskoelastisches Verhalten bei Elastomeren bedeutet, dass sowohl das elastische Verhalten von Festkörpern (reversibel) als auch das viskose Verhalten von Flüssigkeiten (irreversibel) zu beobachten ist. Je nach Art der Beanspruchung ist die eine oder die andere Eigenschaft stärker ausgeprägt (Abb. 5). Bei tiefen Temperaturen und hohen Verformungsgeschwindigkeiten dominiert das Festkörperverhalten,

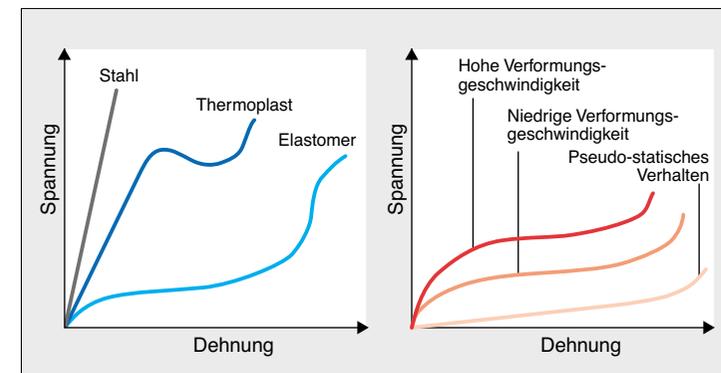
Abb. 5:
Feder-Dämpfer-Modell zur Beschreibung der Elastizität

Zustand	Ursache	Wirkungsmodell
Energieelastizität	Beruhrt auf reversiblen Änderungen der Schwingungs- und Rotationszustände von Atomen.	Feder 
Entropieelastizität	Beruhrt auf (weitgehend) reversibler Verschiebung von Molekülsegmenten unter Beibehaltung des Molekülschwerpunkts (mikrobrownsche Bewegung).	Feder + Dämpfer 
Viskoses Fließen	Beruhrt auf irreversibler Verschiebung ganzer Moleküle gegeneinander (makrobrownsche Bewegung).	Dämpfer 

während bei hohen Temperaturen und niedrigen Verformungsgeschwindigkeiten viskoses Verhalten auftritt. Letzteres führt zu Kriechen, Spannungsrelaxation oder kaltem Fluss. Das viskose Fließen kann durch eine Fixierung der Ketten untereinander (Vernetzung) stark unterdrückt werden. Die weitmaschige Vernetzung bedingt also im Endeffekt das typische gummielastische Verhalten. Die Viskoelastizität der Elastomere hat eine ausgeprägte Zeit- und Temperaturabhängigkeit sehr vieler physikalischer, besonders mechanischer Eigenschaften zur Folge. So liegt bei Stahl ein linearer Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung vor, während beim Elastomer eine nicht-lineare Beziehung zwischen Spannung und Dehnung existiert, die sich unter anderem in einer Abhängigkeit von der Verformungsgeschwindigkeit zeigt (Abb. 6).

Als Konsequenz aus dieser Abhängigkeit reagieren Elastomere sehr empfindlich auf Änderungen der Prüfbedingungen. Daher kommt es in der Praxis häufig zu Problemen bei der Korrelation von einfachen physikalischen Prüfergebnissen mit den tatsächlichen vorherrschenden Beanspruchungen eines Elastomerbauteils im Einbauraum (Lastkollektiv). Umso wichti-

Abb. 6:
Spannungs-Dehnungs-Diagramm
Links: Vergleich von Stahl, Thermoplast, Elastomer
Rechts: Verhalten von Elastomeren bei unterschiedlichen Verformungsgeschwindigkeiten



ger ist eine exakte Erstellung von Spezifikationen eines Elastomerbauteils, damit die wichtigsten Eigenschaften des Produkts auch durch Prüfungen abgebildet werden können.

Korrelation von Frequenz und Temperatur

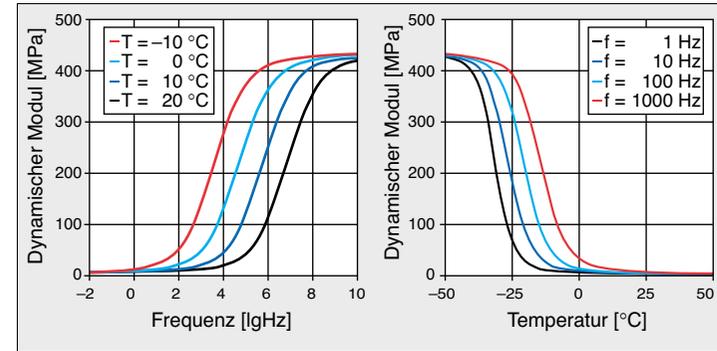
In der Praxis beobachtet man sowohl bei tiefen Temperaturen als auch bei hohen Frequenzen einen Sprung in den mechanischen Eigenschaften des Elastomers. Die Ursache liegt im viskoelastischen Verhalten von Elastomeren. Es besteht bei einer zeitlich wechselnden Belastung durch Druck oder Zug eine Korrelation zwischen der Frequenz der Belastung und dem Temperaturverhalten. Durch den viskosen Anteil im Elastomer werden bei Deformation die auftretenden Spannungen teilweise durch Kettenverschiebungen abgebaut (mikrobrownsche Bewegung). Die dazu benötigte Zeit bezeichnet man als *Relaxation*. Mit sinkender Temperatur frieren die Kettenbewegungen des Polymers langsam ein und der Spannungsabbau benötigt immer mehr Zeit. Das Elastomer verhärtet und wird glasartig. Bei einer hohen Belastungsfrequenz reicht die Kettenbeweglichkeit nicht mehr aus, um der vorliegenden Verformung zu folgen. Das Material wirkt »eingefroren«. Diesen Effekt bezeichnet man auch als *dynamische Verhärtung*. Somit wirkt sich eine Frequenzerhöhung genauso aus wie eine Temperaturerniedrigung (Abb. 7).

Dementsprechend ist die Glasübergangstemperatur T_g nicht nur von der Bestimmungsmethode, sondern auch von der Prüffrequenz abhängig und steigt pro Frequenzdekade um ca. 7 Kelvin. Dieser Effekt ist als Zeit-Temperatur-Korrespondenzprinzip bekannt. Als Konsequenz dieses Prinzips bewirkt eine Frequenzerhöhung bei tiefen Temperaturen eine früh-

Relaxation

Dynamische Verhärtung

Zeit-Temperatur-Korrespondenzprinzip



zeitige Verhärtung des Materials (Anstieg des dynamischen Moduls). Dieser Einfluss der Relaxation in Abhängigkeit von Temperatur und Frequenz muss daher bei der Bauteilauslegung, insbesondere bei dynamischen Dichtungen, berücksichtigt werden.

Abb. 7: Zeit-Temperatur-Korrespondenzprinzip: Abhängigkeit des dynamischen Moduls von der Frequenz (links) und der Temperatur (rechts)

Systematik der Elastomere

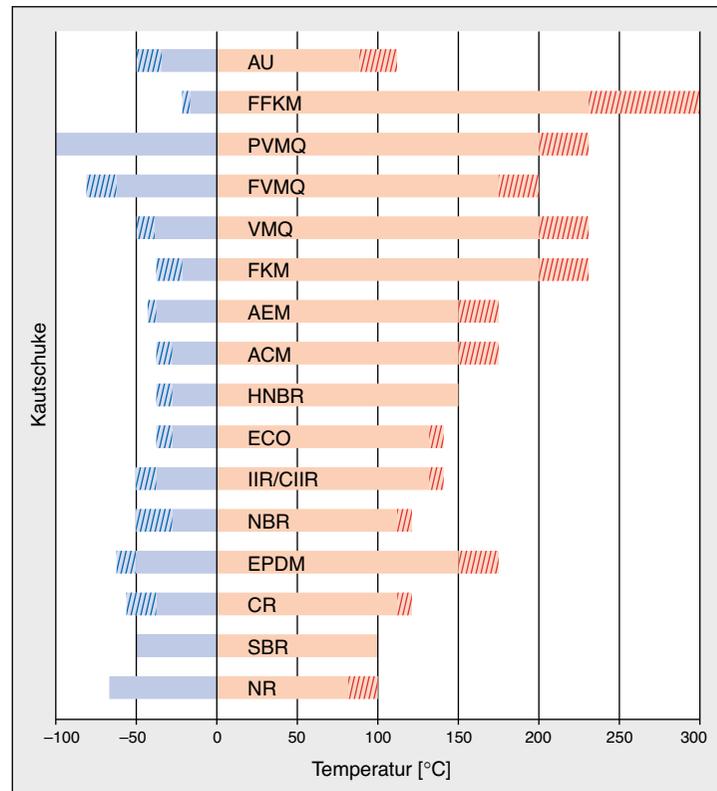
Für Elastomere hat sich eine Systematik und die Verwendung von Abkürzungen bewährt, die nach ASTM D 1418 definiert worden ist.

Tab. 1: Systematik der Elastomertypen

Letzter Buchstabe der Kurzbezeichnung	Bedeutung	Beispiel
M	Kautschuke mit gesättigter Kohlenstoffkette, ohne Doppelbindungen	EPDM, ACM, EVM, FKM, FFKM
R	Kautschuke mit Doppelbindungen in der Kohlenstoffkette (ungesättigt)	NR, CR, SR, SBR, IIR, NBR, HNBR
O	Kautschuke mit Sauerstoff in der Polymerkette	CO, ECO
Q	Kautschuke mit Silizium und Sauerstoff in der Polymerkette	VMQ, FVMQ
T	Kautschuke mit Schwefel in der Polymerkette	Polysulfid-Elastomer
U	Kautschuke mit Kohlenstoff, Sauerstoff und Stickstoff in der Polymerkette	AU, EU

Abb. 8:
Temperatureinsatzbereich der Elastomere. Die schraffierten Flächen geben Temperatureinsatzbereiche an, denen Standardtypen nur kurzzeitig ausgesetzt werden dürfen bzw. die von Spezialtypen abgedeckt werden.

Die Abkürzungen bestehen aus Kombinationen von zwei bis vier Buchstaben (Tab. 1). Die ersten Buchstaben beschreiben das Basispolymer, der letzte Buchstabe kennzeichnet die chemische Struktur der Elastomere. So werden zum Beispiel alle Elastomere, deren Hauptkette nur aus Kohlenstoffatomen aufgebaut ist und die keine Doppelbindungen (reaktive Stellen) in der Hauptkette enthalten, als *M-Typen* bezeichnet. Sind Doppelbindungen in der Hauptkette vorhanden, werden diese Elastomere in die *R-Klasse* eingeordnet. Man



spricht in diesem Fall auch von ungesättigten oder Dien-Kautschuken. Polysiloxane unterscheiden sich von den organischen Kautschuken dadurch, dass die Hauptkette nicht aus Kohlenstoffverbindungen, sondern aus alternierenden Silizium- und Sauerstoffatomen aufgebaut ist. Sie werden als *Q-Typen* klassifiziert. Allgemein werden diese Verbindungen auch als Silikonkautschuke bezeichnet. Abbildung 8 zeigt im Überblick die thermischen Anwendungsbereiche der verschiedenen Elastomertypen (zu Eigenschaften und Anwendungsgebieten von Elastomeren siehe *Anhang*, Seite 68 f.).

Silikonkautschuk

Einflussfaktoren auf das Werkstoffverhalten

Kenntnisse des Anwendungsbereichs

Elastomere sind empfindlich gegen Licht, Ozon, hohe Temperaturen, gegen viele Flüssigkeiten und Chemikalien sowie gegen verschleißende Beanspruchung. Somit ist bei der Auswahl eines geeigneten Dichtungswerkstoffes neben dem Temperatureinsatzbereich auch häufig die chemische Beständigkeit und das Quellverhalten des Elastomers von großer Bedeutung. Deshalb spielen Informationen über den Anwendungsbereich, zum Beispiel mit welchen flüssigen oder gasförmigen Medien das Material in Berührung kommt, eine entscheidende Rolle für die Funktionsfähigkeit eines Elastomerwerkstoffes. Allerdings muss man bei der Mischungsentwicklung der Elastomere nicht nur die chemischen und physikalischen Einflussfaktoren der Umgebung berücksichtigen, sondern auch die Wechselwirkungen, die durch das Polymer und die Mischungsbestandteile selbst auftreten und dementsprechend das physikalische Eigenschaftsbild bestimmen. Alle diese Faktoren haben letztendlich wesentlichen Einfluss auf die Lebensdauer des Bauteils.

Mischungsbestandteile

Elastomere sind Mehrkomponentensysteme, in denen jede Komponente einen bestimmten Zweck zu erfüllen hat. Bei der Mischungsentwicklung sind vier Haupteffekte zu erzielen: die Verstärkung des Elastomers durch Füllstoffe, die Verbesserung der Verarbeitbarkeit und die Vernetzung des Kautschuks durch

Vier Haupteffekte

Vulkanisationsmittel sowie der Schutz des Elastomerbauteils gegen schädliche äußere Einflüsse.

Die Grundeigenschaften einer Elastomermischung werden durch das Polymer bestimmt und sind entscheidend für die Leistungsfähigkeit der Dichtung. So sind zum Beispiel die Kälteeigenschaften durch das Polymer vorgegeben, können aber durch Weichmacher innerhalb gewisser Grenzen verbessert werden. Bei der Zugabe von Weichmachern muss jedoch berücksichtigt werden, dass diese im Praxisfall durch Kontakt mit Schmierölen wieder aus dem Elastomer extrahiert werden können oder bei hohen Temperaturen verdampfen. Daher ist bei der Entwicklung darauf zu achten, welchen Einsatzbedingungen (z. B. Temperaturen) die Dichtung ausgesetzt ist.

Weichmacher

Einen weiteren bedeutenden Einfluss auf die Materialeigenschaften des Elastomers haben so genannte Verstärkerfüllstoffe wie Ruße oder Kieselsäuren. Durch Art und Menge der Füllstoffe lassen sich dem Verwendungszweck angepasste physikalische Eigenschaften erzielen. Maßgeblich verantwortlich für die verstärkende Wirkung sind die spezifische Oberfläche, die Struktur sowie die Oberflächenaktivität der Füllstoffe. Das Prinzip beruht auf der Wechselwirkung des Füllstoffs mit der Polymermatrix oder, einen ausreichend hohen Füllgrad vorausgesetzt, auf der Bildung von Füllstoffnetzwerken, die dem chemischen Polymernetzwerk überlagert sind. Verstärkende, d. h. aktive Füllstoffe haben einen Partikeldurchmesser zwischen 10 und 100 nm (Nanoteilchen), inaktive Füllstoffe dagegen einen Partikeldurchmesser zwischen 500 und 1000 nm. Zur Klassifizierung der Ruße verwendet man einen Code (nach ASTM), der die Aktivität der Ruße charakterisiert. Je kleiner die Zahl, desto größer ist die verstärkende

Verstärkerfüllstoffe

Aktive Ruße

Homogene Verteilung

Wirkung des Rußes. Da aktive Ruße das Eigenschaftsbild der Elastomere wesentlich stärker beeinflussen als inaktive Füllstoffe, lässt sich eine Abhängigkeit mechanischer Eigenschaften wie Zugfestigkeit, Abriebverhalten oder Weiterreißfestigkeit von der Struktur und Oberfläche der Ruße sowie vom Füllstoffgehalt beobachten (Abb. 9). Eine homogene Dispersion (Verteilung) der Füllstoffe in der Poly-

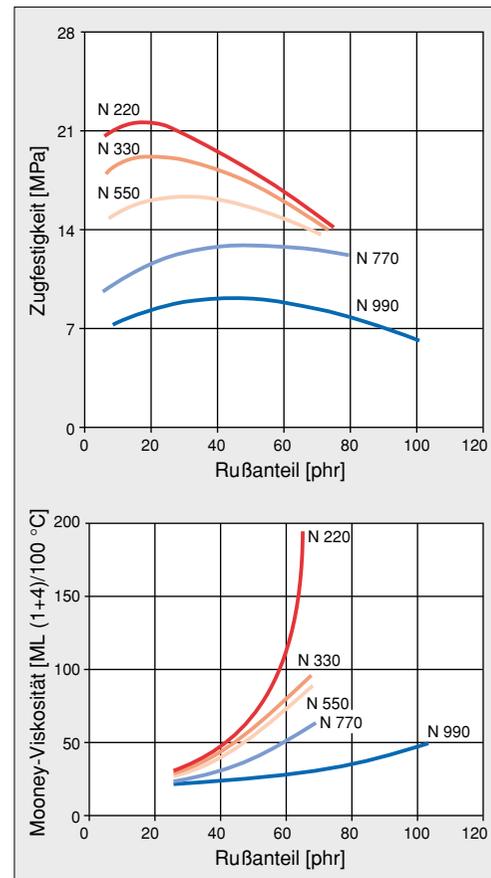


Abb. 9:
Die Wirkung aktiver (N 220, N 330), halbaktiver (N 550) und nicht aktiver Ruße (N 770, N 990) auf die Compoundeigenschaften wie Zugfestigkeit und Viskosität wird maßgeblich durch die Auswahl der Rußtypen und des Rußanteils bestimmt. phr parts per hundred rubber

matrix ist die Voraussetzung für eine gute Qualität der Elastomerprodukte. Daher werden heute im Bereich technischer Elastomerwerkstoffe Ruße eingesetzt, die eine gute Dispergierbarkeit und eine hohe Verarbeitungssicherheit gewährleisten.

Helle Füllstoffe wie Kieselsäuren haben ein vergleichbares Verstärkungspotenzial wie Ruße. Allerdings zeigen Kieselsäuren eine ausgeprägte Agglomerationsneigung. Sie bilden starke Füllstoffnetzwerke, die für die Verstärkungswirkung in der Polymermatrix verantwortlich sind. Mischungen mit aktiven Kieselsäuren sind daher bei gleichem Füllstoffgehalt wesentlich schwieriger zu verarbeiten als rußgefüllte Mischungen. Zudem stören Kieselsäuren aufgrund ihrer Polarität die Vernetzung mit Schwefel-Beschleuniger-Systemen. Dadurch reduziert sich die Vernetzungsgeschwindigkeit. Bei Ersatz von Rußen durch Kieselsäuren ist es deshalb notwendig, eine Anpassung der Vernetzungsschemie vorzunehmen.

Einfluss der Vernetzungsdichte

Die Vulkanisation oder Vernetzung ist der formgebende Schritt bei der Herstellung eines elastomeren Bauteils. Bei diesem Vorgang werden chemische Bindungen geknüpft, die aus der Kautschukmischung ein Elastomer mit maßgeschneiderten Eigenschaften machen. Die Vulkanisation erfolgt in der Regel unter Druck und bei erhöhter Temperatur ($T > 140^\circ\text{C}$) in speziell dafür konstruierten Werkzeugen.

Das Vernetzungssystem bestimmt die Verarbeitungseigenschaften, den chemischen Aufbau des Netzwerks und die physikalischen Eigenschaften der Elastomere. Bei der Entwicklung von Elastomermischungen spielt somit die Wahl des Vulkanisationssystems eine maß-

Kieselsäuren

Vernetzung als formgebender Schritt

Schwefel- und Peroxidvernetzung

gebliche Rolle, um die gewünschten Werkstoffeigenschaften zu erzielen. Die zwei häufigsten Vernetzungsarten sind: die *Schwefelvernetzung* und die *Peroxidvernetzung*. Die Schwefelvernetzung erfolgt nicht ausschließlich über die Zugabe von freiem Schwefel, sondern über eine Kombination unterschiedlicher Substanzen, um die geeignete Vernetzungscharakteristik einzustellen. In der Praxis bedeutet dies, eine verarbeitungsfähige Mischung zu entwickeln, die nicht nur eine sichere Formgebung gewährleistet, sondern gleichzeitig auch eine wirtschaftliche Fertigung zulässt. Dabei erlaubt die Vielzahl der zur Verfügung stehenden Beschleuniger, Schwefelspender und Verzögerer eine nahezu unendlich große Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten. Die Schwefelvernetzung wird vor allem bei der Vernetzung von Dien-Kautschuken wie zum Beispiel NR, SBR, BR, NBR oder CR eingesetzt. Mit der Entwicklung gesättigter synthetischer Kautschuktypen hat die Peroxidvernetzung zunehmend an Bedeutung gewonnen. Durch diese Vernetzungsart ist es überhaupt erst möglich geworden, Kautschuke ohne Doppelbindungen in der Hauptkette zu vernetzen. Darüber hinaus lässt sich durch Peroxidvernetzung insbesondere bei NBR die Wärmebeständigkeit verbessern. Allerdings können verschiedene Faktoren wie Luftheizung, acide Gruppen enthaltende Füllstoffe oder entstehende Zerfallsprodukte des Peroxids während des Vulkanisationsprozesses eine reibungslose Vernetzung behindern.

Das Ausmaß an geknüpften chemischen Bindungen zwischen den Polymerketten während der Vulkanisation hängt bei beiden Vernetzungsarten neben dem Kautschuktyp in erster Linie von Art und Menge des gewählten Vernetzungssystems ab und wird auch als Vernetzungsgrad oder Vernetzungsdichte bezeichnet.

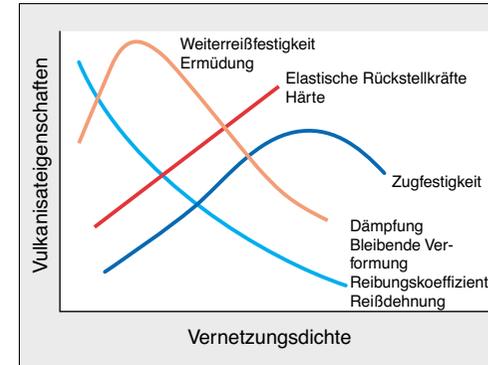


Abb. 10:
Einfluss der Vernetzungsdichte auf die Elastomereigenschaften

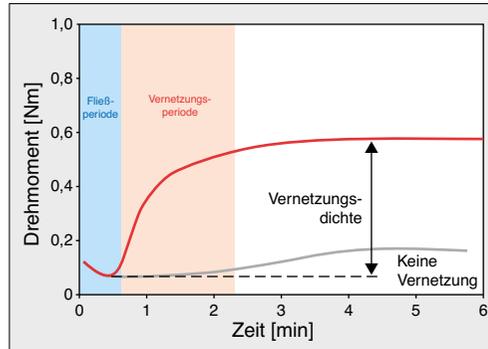
Die Vernetzungsdichte hat einen entscheidenden Einfluss auf Werkstoffeigenschaften wie Ermüdung, Härte, Zugfestigkeit, bleibende Verformung, Reibung und Reißdehnung (Abb. 10). Mit zunehmender Vernetzungsdichte nehmen E-Modul, Härte und Elastizität zu, Reißdehnung, Dämpfung sowie bleibende Verformung ab, während Weiterreißwiderstand und Zugfestigkeit ein Maximum durchlaufen, bevor sie wieder deutlich abnehmen. Als Konsequenz daraus ergibt sich, dass bei einer bestimmten Vernetzungsdichte nicht für alle Materialeigenschaften ein Optimum erzielt werden kann. In der Regel wird die Vernetzungsdichte so gewählt, dass die für eine bestimmte Anwendung wichtigen physikalischen Eigenschaften optimiert werden.

Da es sehr aufwändig ist, die Vernetzungsdichte chemisch zu bestimmen, wird während der Vernetzungsreaktion bei konstanter Temperatur eine mechanische Größe – das Drehmoment – aufgezeichnet, die der Vernetzungsdichte näherungsweise direkt proportional ist. Eine zunehmende Vernetzungsdichte zeigt sich an einem ansteigenden Drehmoment. Das Prüfgerät, das so genannte Rheometer, besteht aus einer temperierten Messkammer

Vernetzungsdichte

Messung des Drehmoments

Abb. 11:
Vernetzungs-
charakteristik von
Elastomeren durch
Messung des
Drehmoments



und einer flachen zylindrischen Scherscheibe (Rotor), die sich mit konstanter Drehzahl bewegt. Nach dem Einlegen der Kautschukprobe entsteht an der Rotorwelle ein Drehmoment. Dieses wird im zeitlichen Verlauf registriert und zur Beurteilung der Vernetzungsdichte herangezogen. Darüber hinaus gibt die Vulkanometerkurve Aufschluss über die Mischungsviskosität bei Vulkanisationstemperatur. Man unterscheidet drei charakteristische Abschnitte (Abb. 11):

Fließperiode

- Die *Fließperiode* umfasst das Zeitintervall vom Beginn der Messung bis zum Beginn der Vernetzung, d. h. bis zum Anstieg des Drehmoments. Sie kennzeichnet den Bereich des viskosen Fließens, der zur Formfüllung des Werkzeugs genutzt wird. Während dieser Zeit nimmt das Drehmoment zunächst ab.

Vernetzungsperiode

- Die *Vernetzungsperiode* gibt Aufschluss über die Zeitspanne, die vom Beginn der Vernetzung bis zum Überführen des Materials in einen formstabilen Zustand notwendig ist.

Vollständige Vernetzung

- Die *vollständige Vernetzung* ist erreicht, wenn sich alle möglichen Vernetzungstellen ausgebildet haben. Das Drehmoment erreicht ein stabiles Wertenniveau.

Physikalisches und chemisches Einwirken

Je nach Art der Einwirkung lösen Alterungsvorgänge im Elastomernetzwerk Veränderungen aus, die zu Verhärtung, Erweichung oder zum Verlust an Festigkeit führen. Dies äußert sich beispielsweise durch Aufquellen, durch Rissbildung und Versprödung oder durch Verfärbung des Elastomers. Eine Temperaturerhöhung beschleunigt die Alterungsvorgänge sehr deutlich. Es gilt die Faustregel: *Pro 10 °C wird die Alterung um den Faktor 2 bis 4 beschleunigt*. Entsprechend sinkt die Lebensdauer von Bauteilen um den gleichen Faktor.

Angriff durch Sauerstoff

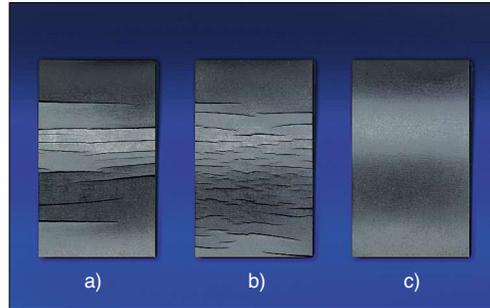
Dichtungen sind vielen verschiedenen Umwelteinflüssen wie Sauerstoff, Ozon, UV-Licht oder wechselnden klimatischen Bedingungen ausgesetzt. Der Sauerstoff in der Luft führt in Kombination mit erhöhten Temperaturen zu einer Schädigung der Elastomermatrix. Diese Schädigung kann darin bestehen, dass es zu einer zusätzlichen Vernetzung der Polymerketten oder zu einem Abbau der Vernetzungsstellen kommt. Als Folge davon sind Festigkeitsverlust, Verhärtung oder eine charakteristische Rissbildung zu beobachten, was letztendlich zum Ausfall des Bauteils führen kann. Dien-Kautschuke (z. B. NR, SBR, NBR), die in der Polymerkette noch Doppelbindungen enthalten, werden durch Sauerstoff und vor allem durch Ozon wesentlich stärker angegriffen als gesättigte Kautschuke (z. B. EPDM, ACM, ECO usw.).

Um die Alterungsprozesse zu verzögern oder gar zu unterbinden, werden den Elastomermischungen (insbesondere den Dien-Kautschuken) auf den jeweiligen Elastomertyp ab-

Elastomere altern

Schädigung der Elastomermatrix

Abb. 12: Schädigung des Elastomers durch Einwirken von Ozon: mit Ozonschutzmittel (a), ohne Ozonschutzmittel (b) im Vergleich mit einem nicht-gealterten Elastomer (c)

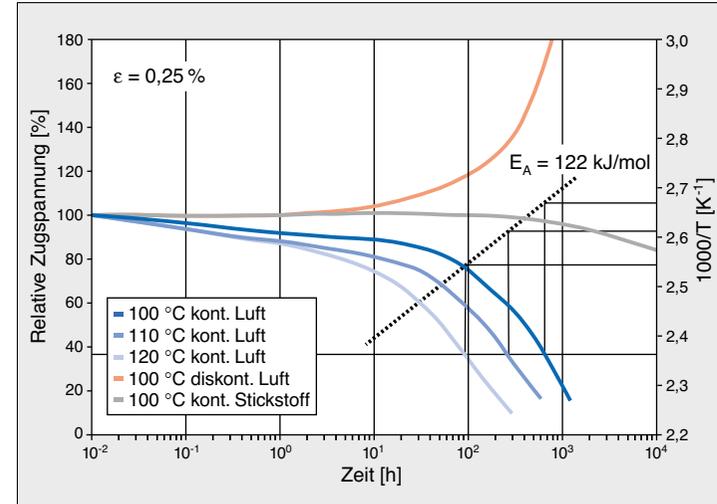


gestimmte Alterungsschutzmittel beigemischt. Diese machen den Luftsauerstoff auf chemischem Wege unschädlich, sodass es erst gar nicht zur Oxidation der Polymerketten kommt. Um eine Schädigung durch Ozon zu vermeiden, werden entsprechende Ozonschutzmittel und Wachse eingesetzt. Bei dauerhafter Verformung – insbesondere bei Einwirkung erhöhter Temperaturen – können chemische Prozesse (Kettenabbau, Netzstellenabbau oder Umlagerungen), die zu einer bleibenden Veränderung des Werkstoffs führen, den physikalischen Vorgängen überlagert sein. Stehen Elastomerbauteile unter Zugspannung, kann Ozon die Elastomermatrix deutlich schneller angreifen. In diesem Fall entstehen charakteristische Risse quer zur Spannungsrichtung, die unter ungünstigen Umständen zum Bauteilversagen führen können (Abb. 12).

Ozonschutzmittel und Wachse

Messung der chemischen Spannungsrelaxation

Eine exakte Beurteilung des Alterungsverhaltens und einen tieferen Einblick in die Alterungsmechanismen ermöglicht die Messung der chemischen Spannungsrelaxation bei verschiedenen Temperaturen. Um die verschiedenen chemischen Einflüsse besser zu beurteilen, werden die Messungen zum Vergleich auch in Stickstoff oder in flüssigen Medien durchgeführt. Ein Arrhenius-Plot der Ergebnisse erlaubt die Extrapolation auf lange Ex-



positionszeiten bei tieferen Temperaturen (Abb. 13). Bei dicken Prüfkörpern ist die langsamere Diffusion des Sauerstoffs in das Elastomer der begrenzende Faktor für die Zerstörung der Elastomermatrix und den damit verbundenen Alterungsvorgängen. Daher altern dicke Elastomerbauteile in der Praxis wesentlich langsamer als dünne Bauteile. Welcher Alterungsschutz für ein Elastomerbauteil am besten ist, hängt wesentlich von dessen Einsatzbedingungen ab. Nur im günstigsten Fall reicht ein einzelnes Alterungsschutzmittel aus. In der Regel werden Kombinationen aus verschiedenen Alterungsschutzmitteln eingesetzt.

Medieneinfluss

Bei der Einwirkung von Medien wie beispielsweise Ölen oder Fetten laufen immer zwei unterschiedliche Prozesse ab, die das Elastomer und somit seine Dichtfunktion beeinträchtigen können: das *physikalische Aufquellen*

Abb. 13: Lebensdauer-vorhersage anhand der Extrapolation der Messwerte der Zugspannungsrelaxation (Material: NBR Peroxidvernetzt) gemessen bei verschiedenen Temperaturen in Luft und Stickstoff
 ϵ Dehnung
 E_A Aktivierungsenergie des Alterungsprozesses

Abb. 14:
Medienlagerung
von Prüfkörpern



und das *chemische Einwirken*, bei dem sich der Werkstoff im Gegensatz zum reinen Quellen unter Medieneinfluss chemisch irreversibel ändert.

Um einen Elastomerwerkstoff auf seine Eignung für ein bestimmtes Medium zu untersuchen, wird er im Rahmen eines Kurzzeitversuchs in der Flüssigkeit des Prüfmediums gelagert (Abb. 14). Durch Diffusion kommt es zur Aufnahme des Mediums in die Elastomer-matrix. Hierbei kann sich das Medium an die Polymerketten anlagern. Diese zunächst nur rein physikalischen Vorgänge der Quellung und Volumenveränderung können durch gleichzeitige Extraktionsvorgänge überlagert werden. Dabei wandern Bestandteile des Elastomerwerkstoffs wie zum Beispiel Weichmacher, Alterungsschutzmittel oder sonstige Additive in das umgebende flüssige Medium aus (chemisches Einwirken). Dies hat zur Folge, dass die tatsächlich beobachteten Volumen- und Gewichtsänderungen eine Bilanz aus eindiffundierter Flüssigkeit und extrahierten Elastomerbestandteilen darstellen. Die reinen Quellvorgänge sind nach wenigen Tagen abgeschlossen und geben Aufschluss über die

Quellung und Volumen- änderung

Eignung des Werkstoffs in dem betreffenden Medium. Allerdings kann durch einen solchen Kurzzeitversuch (<3 Tage) kein wirklicher Eindruck von den tatsächlich zu erwartenden Langzeitveränderungen gewonnen werden, da das chemische Einwirken unterschiedlich stark von Zeit und Temperatur abhängt. Daher sind Prüflaufversuche unter Einsatzbedingungen ein unumgänglicher Schritt bei der Beurteilung eines Bauteils. Eine geringe Volumenschwellung stellt bei geeigneter Auslegung der Dichtungsumgebung keine Gefahr für die Funktion der Elastomerdichtung dar. Dagegen führt der Volumenschwund zu einer Beeinträchtigung der Dichtfunktion in Form von Leckage. Wandert das Medium (gasförmig oder flüssig) durch den Werkstoff hindurch, ohne dabei Poren oder Risse zu durchdringen, spricht man von Permeation. Ein solcher Prozess führt zu einer Mikroleckage der Dichtung.

Durch die Medieneinwirkung werden viele Werkstoffeigenschaften wie Härte, Dichte, Reißfestigkeit und Dehnung, elektrische und optische Eigenschaften sowie die Farbe und die Oberflächenstruktur beeinflusst. Die Ursachen eines Schadensfalls lassen sich somit nicht nur auf Fehler bei der Dichtungsherstellung, sondern auch auf Fremdeinflüsse wie die Einwirkung von Ölen, Fetten oder Gasen zurückführen, die das Elastomer sowohl chemisch als auch physikalisch verändern können. Insbesondere die hohen Anteile an Additiven in den neuen vollsynthetischen Ölen können den Dichtungswerkstoff chemisch angreifen und zerstören. Daher müssen Dichtungshersteller über eine umfangreiche Datenbasis verfügen, um aus der Interpretation der Schmierstoff-Elastomer-Wechselwirkungen die Leistungsfähigkeit und Lebensdauer der Dichtung möglichst exakt vorhersagen zu können.

Volumen- schwund beeinträchtigt Dichtfunktion

Schädigung durch Schmier- stoffadditive

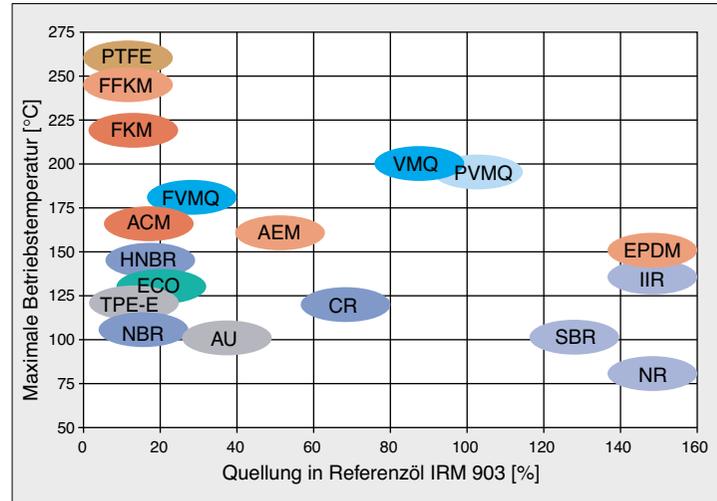


Abb. 15:
Medienbeständigkeit
der Elastomere im
Referenzöl IRM 903

»Gleiches löst Gleiches«

Es gibt kein Elastomer, das alle Anforderungen an Ölbeständigkeit sowie an Wärme- und Kältebeständigkeit gleichermaßen erfüllt. Für die Auswahl eines geeigneten Dichtwerkstoffs sind daher das Umgebungsmedium und die Temperaturbedingungen im Einsatzfall zu berücksichtigen. Es gilt der chemische Grundsatz: »Similia similibus solvuntur« (lat.: »Gleiches löst Gleiches«). Das bedeutet, dass polare Elastomere (z. B. NBR) in polaren Medien (z. B. Glykol) stark aufquellen, während unpolare Elastomere wie EPDM in unpolaren Medien (z. B. Mineralöl) nicht beständig sind (Abb. 15). Nähere Angaben über die Eignung von Elastomerwerkstoffen in ausgewählten Dichtmedien finden sich im Anhang zu diesem Buch (siehe Seite 70).

Dynamische Belastung

Bei ständig sich wiederholender Verformung werden Elastomerwerkstoffe durch innere Reibung geschädigt. Dies führt mit der Zeit zur

inneren Erwärmung des Elastomers und somit zur Rissbildung und Zerstörung des Werkstoffs. Man bezeichnet diesen Vorgang auch als *Ermüdung*. Um das Ermüdungsverhalten eines Elastomerdichtstoffs vorhersagen zu können, ist die Ermittlung der reinen Materialkenngrößen wenig sinnvoll, da Prüfbedingungen und Form der Prüfkörper einen großen Einfluss haben. Daher werden meist Fertigteile auf praxisnahen Prüfständen getestet (Abb. 16).

Ermüdung



Abb. 16:
Prüffeld für
Funktionstests von
Simmerringen

Bei reibender äußerer Beanspruchung tritt häufig Materialabtrag oder eine Veränderung der Oberfläche auf. Dieser *Verschleiß* ist nicht nur vom Elastomermaterial, sondern auch von der Gegenauflfläche, ihrer Schmierung und der Gleitgeschwindigkeit sowie von anderen Parametern abhängig. Nur wenn genaue und relevante Material- und Ermüdungsdaten aus praxisnahen Untersuchungen vorliegen, ist die Anwendung moderner Berechnungs- und Simulationsmethoden zur Vorhersage der Bauteileigenschaften und zu Aussagen über den Funktionserhalt möglich.

Verschleiß

Verarbeitungsverfahren

Voraussetzungen für die Produktion von Bauteilen aus Hochleistungselastomerwerkstoffen sind die Zuverlässigkeit der Rohstoffqualität, exakte Gewichtsanteile der Rohstoffe, ein kontrollierter Mischprozess sowie optimierte Formgebungsverfahren.

Mischtechnologie

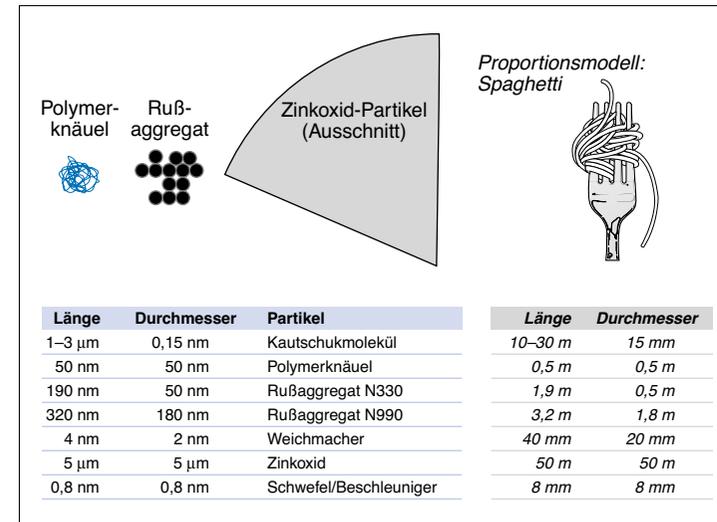
Elastomere sind Mehrkomponentensysteme. Die verschiedenen Rohstoffe mit sehr unterschiedlichen Gewichtsanteilen und verschiedenster Konsistenz müssen zu einer homogenen Mischung verarbeitet werden. So wird der Kautschuk als plastisches Polymer in Ballen- oder Chipform angeliefert und erst bei Verarbeitungstemperatur fließfähig, während beispielsweise Weichmacher in der Regel als Öl vorliegen.

Ziel: homogene Mischung

Mischprozess

Ziel des Prozessschrittes Mischen ist es, alle erforderlichen Rohstoffe gleichmäßig zu verteilen (distributives Mischen) und Agglomerate aufzubrechen (dispersives Mischen), um eine optimale Anbindung der Füllstoffpartikel an das Polymer zu ermöglichen. Diese ist insofern von besonderer Bedeutung, da die Wechselwirkungen zwischen den Füllstoffpartikeln und der Polymermatrix unter anderem die Verstärkung des Elastomers bedingen. Um die Größenunterschiede der Mischungsbestandteile zu verdeutlichen, wurden in Abbildung 17 die Länge und der Durchmesser eines Kautschukmoleküls auf eine Spaghetti-Nudel übertragen. Entsprechend wurden die Dimen-

Unterschiedlich große Mischungsbestandteile



sionen für Ruße, Weichmacher und Beschleuniger umgerechnet. Anhand des »Spaghetti-Modells« lassen sich die Anforderungen erkennen, die an den Mischprozess gestellt werden. Die Kunst des Kautschukmischens besteht darin, die unterschiedlichen Bestandteile und Aggregate aufzubrechen und gleichmäßig in der Polymermatrix zu verteilen, um eine homogene Qualität des Compounds zu gewährleisten.

Die Vereinigung der verschiedenen Komponenten kann in der Regel *nicht in einem* Arbeitsgang erfolgen. Dies gilt insbesondere für Mischungen, die feinteilige Ruße oder Naturkautschuk als Polymerbasis haben. Der Mischprozess besteht in der Regel aus vier Stufen:

- Das als Ballen in die Mischkammer zugeführte kalte Rohpolymer muss zerkleinert werden, um genügend große Oberflächen für die Füllstoffinkorporation zu erzeugen. Im Inneren der Mischkammer befinden sich dazu

Abb. 17: Größenunterschiede der Mischungsbestandteile am Beispiel des Spaghetti-Modells

Mehrere Arbeitsgänge

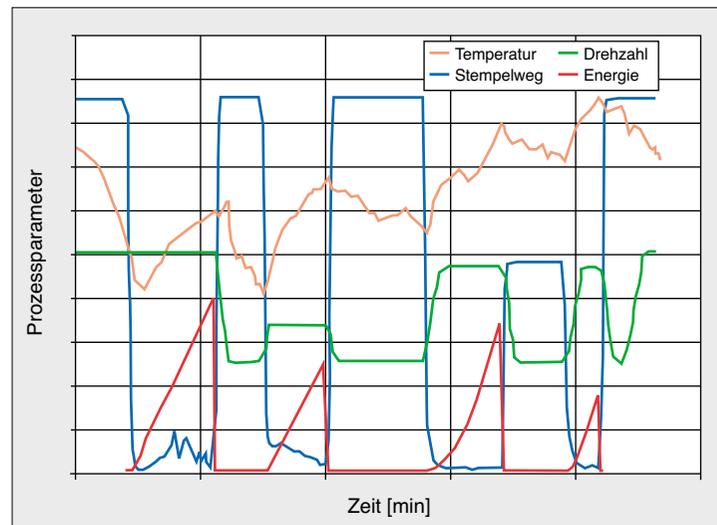
Inkorporation

zwei sich gegenläufig drehende Rotoren. Durch die entstehenden Scherkräfte erwärmt sich das Polymer und wird fließfähiger.

- Die zugeführten Füllstoffe und Weichmacher müssen eingearbeitet werden, sodass eine zusammenhängende Masse entsteht. Das Polymer dringt hierbei in die Leerräume der Füllstoffagglomerate ein und verdrängt die Luft. Diesen Prozessschritt bezeichnet man als *Inkorporation*.
- Die Füllstoffe, insbesondere die Ruße, liegen als Agglomerate vor, die durch Scherkräfte abgebaut werden (*Dispersion*).
- Die zerkleinerten Füllstoffe werden gleichmäßig in der Polymermatrix verteilt. Diesen Prozessschritt bezeichnet man als *Distribution*.

Dispersion**Distribution**

Abb. 18:
Zeitlicher Verlauf der
Prozessparameter
während des Misch-
prozesses



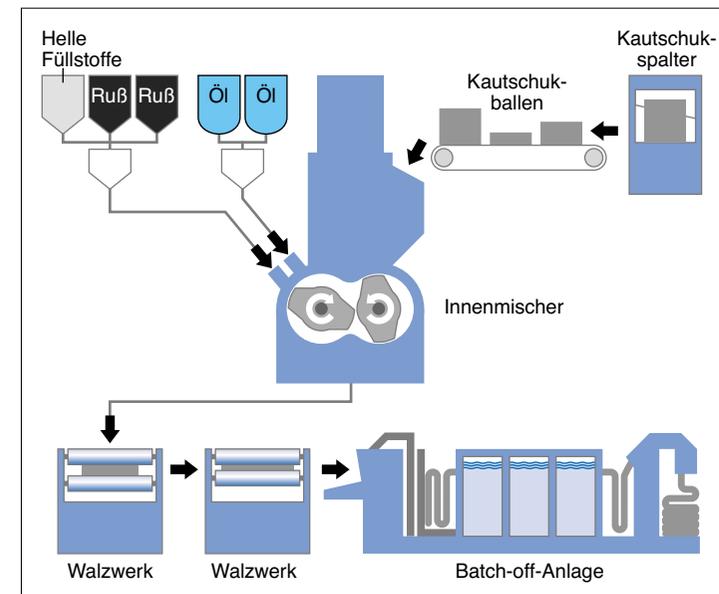
In allen Mischprozessstufen verändern sich die Oberflächeneigenschaften, Größen und Verteilungsgrade der Zuschlagsstoffe sowie, bedingt durch thermische Vorgänge, die Fließfähigkeit des Polymers und damit das Fließverhalten

des Mischguts während des Prozesses. Daher gilt der zeitliche Verlauf der zugeführten Energie gleichsam als »Fingerabdruck« der Mischung (Abb. 18). Eine durchgängige Dokumentation der wichtigsten Prozessparameter wie zum Beispiel Temperatur, Drehzahl, Zeit und Energie dient somit zur Überwachung und Sicherung der Mischungsqualität. Für die Herstellung von hochwertigen technischen Elastomerbauteilen werden Innenmischer mit ineinandergreifenden Rotoren bevorzugt, da sie in der Regel eine bessere Dispersionsqualität liefern und eine schnellere Wärmeabfuhr erlauben. Dies ermöglicht einen Mischprozess bei niedrigeren Temperaturen.

Vom Bereitstellen der Rohstoffe bis zum Ausliefern der fertigen und geprüften Mischung ist für die Herstellung einer Charge eine Vielzahl von Prozessschritten erforderlich. Um den

Durchgängige Dokumentation

Abb. 19:
Materialfluss in der
Produktion



Materialfluss zu gewährleisten, sind verschiedenste Aggregate von der Verwiegeinheit über den Kautschukspalter, den Innenmischer, das Walzwerk bis hin zur Batch-off-Anlage erforderlich (Abb. 19).

Homogenisieren am Walzwerk

Walzwerke bestehen im Wesentlichen aus zwei hintereinander angeordneten, temperierbaren Walzen, die mit unterschiedlicher Drehzahl laufen. Durch die Reibung zwischen Walze und Mischgut wird sichergestellt, dass die ausgewalzte Mischung (Mischungsfell) in der Regel auf der langsamer laufenden Vorderwalze klebt. Die erste Aufgabe des Walzwerks besteht im Abkühlen der Mischung, deren Temperatur nach Beendigung des Mischvorgangs im Innenmischer bis zu 150 °C betragen kann. Zusätzlich erfolgt am Walzwerk eine weitere Homogenisierung der Mischung. Die Mischwirkung des Walzwerks beruht unter anderem auf der im Walzenspalt stattfindenden Dispersion, die durch die unterschiedliche Drehzahl der Walzen verstärkt wird. Die Verteilung der Mischungsbestandteile wird durch Schneiden des Mischungsfells und den Einsatz von Hilfswalzen, so genannte Stockblender, verstärkt. Die Fellbildung wird durch die Walzenspaltstärke sowie durch Reibung und Temperatur beeinflusst. Falls es das Rezept erfordert, werden auf der Walze nach der Abkühlphase temperatursensible Vulkanisations- und Beschleunigungchemikalien zugegeben. Sind in einer Mischlinie zwei Walzwerke aufgestellt, steht während der Zykluszeit des Innenmischers mehr Zeit zum Walzen zur Verfügung. Um die Reproduzierbarkeit der Abläufe zu gewährleisten, wird der Walzprozess automatisch überwacht und dokumentiert. Um Füllstoffagglomerate vollständig zu zerstören, werden die Mischungen in Ausnahmefällen

sehr hohen Scherkräften ausgesetzt. In einem zusätzlich integrierten Walzwerk läuft das Mischgut dabei durch einen sehr engen Walzenspalt (< 1 mm) bei gleichzeitig hoher Reibung. Diese Maßnahme verbessert die Qualität der Mischung und ist insbesondere bei Mischungen, die ein hohes Dispersionsniveau erfordern (Sicherheitsbauteile, Druck- und Lippendichtungen), ein obligatorischer Prozessschritt.

Qualitätsaspekte und Prozesssteuerung

Die Anforderungen an Funktionseigenschaften und Qualität der Zulieferteile für die Automobil- und die allgemeine Industrie sind in den vergangenen Jahren bereits erheblich gestiegen und werden auch zukünftig weiter steigen. Gesetzliche Richtlinien sowie zunehmend höhere Qualitätsansprüche der Kunden erfordern eine kontinuierliche Überwachung und Dokumentation der Rohstoffqualität, der Mischungen sowie der Prozesse. Durch systematische Qualitätsvorausplanung werden alle Schritte von der Konzeptphase über die Entwicklung bis hin zum serienreifen Mischungsrezept bewusst eingeleitet und abgeschlossen. So erfolgt bereits in der Entwicklungsphase mittels einer FMEA (Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse) eine Bewertung und Risikoabschätzung der Mischungen.

Da Elastormischungen »Werkstoffe nach Maß« sind, bedeutet dies für einen Hersteller technischer Elastomerprodukte, dass eine Vielzahl verschiedener Mischungen (es können mehr als 1000 sein) gefertigt und verwaltet werden müssen. Für die Herstellung der Mischungen ist eine entsprechend große Anzahl an Rohstoffen erforderlich. Um eine hohe Qualität sicherzustellen, werden nur Rohstoffe von freigegebenen und zertifizierten Lieferanten eingesetzt. Computergesteuerte Systeme übernehmen in der Produktion die Auftrags-

**Abkühlung
und Homo-
genisierung**

**Qualitäts-
vorausplanung**

**Hohe Rohstoff-
qualität**

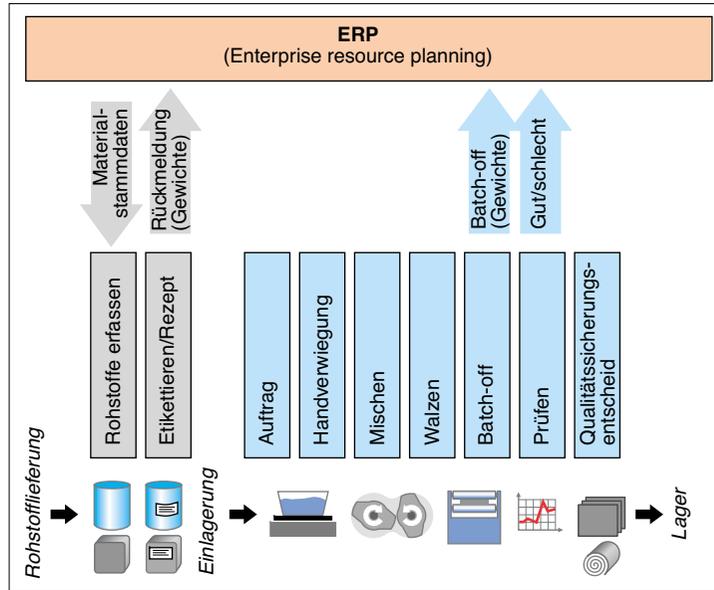


Abb. 20:
Rechnergesteuerter
Prozess zur
Ressourcenplanung

Erstellen der Mischaufträge

abwicklung, Rohstoffverwaltung sowie die Prozess- und Qualitätssteuerung (Abb. 20). In einer großen Mischerei, die über mehrere Mischlinien verfügt, wird jedem Rezept eine Mischlinie zugeordnet, um die aggregatspezifischen Stärken zu nutzen, aber auch um häufige Mischungswechsel und damit verbundene Rüst- und Reinigungszeiten sowie das Risiko von Kontaminationen zu vermeiden. Die Reihenfolge der Mischaufträge wird so zusammengestellt, dass

- sich möglichst große Losgrößen ergeben,
- Rezepte mit ähnlichen Rohstoffen einander folgen sowie
- Farbwechsel vermieden werden.

Die Optimierung der Mischprozesse und Anlagen ist die Basis für das Erreichen sicherer und stabiler Mischprozesse.

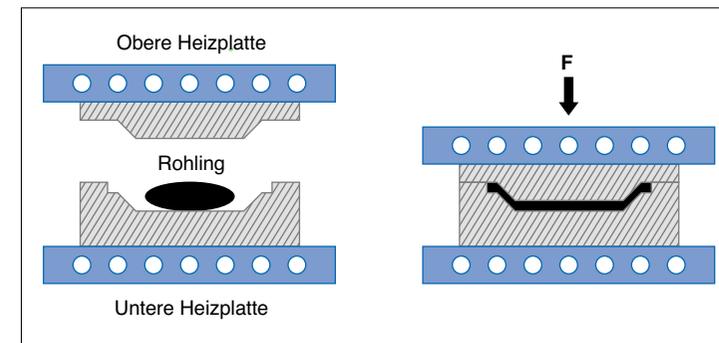
Formgebungsverfahren

Die Technologie der Kautschukverarbeitung ist ein weites Gebiet, das von der flüssigen Latexverarbeitung über Extrusions- und Formgebungsverfahren in geschlossenen Werkzeugen bis hin zu manuell aufgetragenen Behälterauskleidungen reicht. Die am weitesten verbreitete Formgebungs- und Vulkanisationsmethode für Dichtungen und technische Formteile beruht auf der Bauteilherstellung in geschlossenen Werkzeugen.

Compression Moulding

Das Kompressionsverfahren (engl. *Compression Moulding*) ist eine der ältesten Herstellungsformen technischer Elastomerbauteile. Für dieses Verfahren benötigt man einen Rohling, der groß genug ist, die Form des zu fertigenden Bauteils auszufüllen. Für die Herstellung dieser Art von Rohling hat sich das Barwell-Verfahren bewährt. Bei diesem Verfahren wird die Kautschukmasse durch eine Düse gedrückt und mittels eines rotierenden Messers in sehr gleichmäßige Stücke gleichen Gewichts abgeschnitten. Anschließend wird der vorgeformte Rohling in die Bauteilform im Werkzeug (Werkzeugnest) eingelegt und

Abb. 21:
Prinzip des
Compression Mouldings

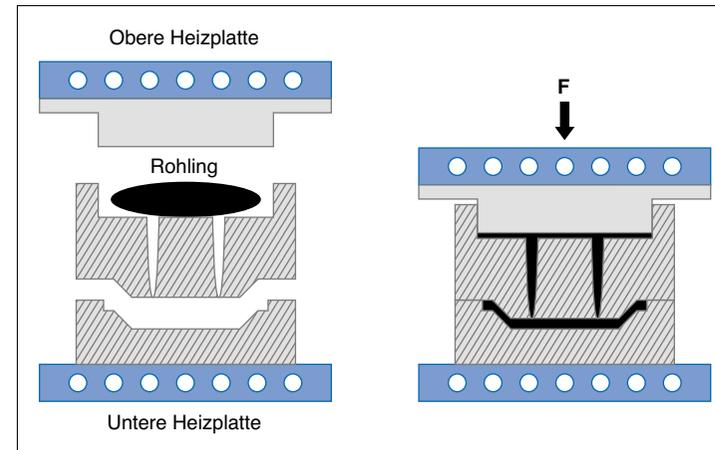


**Lange
Heizzeiten**

die Presse geschlossen. Die durch die Heizplatten erzeugte Wärme wandert in die Formmasse und setzt den Vulkanisationsprozess in Gang (Abb. 21). Das Kompressionsverfahren erfordert relativ lange Heizzeiten. Dies liegt vor allem daran, dass der Rohling von der Umgebungstemperatur auf die bei 150 bis 180 °C liegende Vulkanisationstemperatur aufgeheizt werden muss. Da Elastomere schlechte Wärmeleiter sind, kann dieser Vorgang bei dickwandigen Bauteilen mehrere Minuten dauern. Um Lufteinschlüsse zu vermeiden, muss die Form während des Vulkanisationsvorgangs mehrfach durch kontrolliertes Aufahren der Presse entlüftet werden. Das überschüssige Material muss ebenfalls entweichen. Dabei bildet sich in der Trennebene der beiden Werkzeughälften eine Gummihaut als Grat, die nach der Vulkanisation vom Formteil entfernt werden muss. Dies geschieht in einem entsprechenden Nachbearbeitungsschritt.

Transfer Moulding

Das Transfer-Moulding-Verfahren ist eine Weiterentwicklung des Kompressionsverfahrens und kann grundsätzlich mit den vorhandenen Kompressionspressen durchgeführt werden. Bei diesem Verfahren ist in die obere Werkzeughälfte eine Vertiefung eingearbeitet, in welche die unvulkanisierte Mischung in Form von einfachen Rohlingen eingelegt wird (Abb. 22). Die obere Werkzeughälfte ist im Bereich der Vertiefung durch feine Kanäle (»Transfertopf«) mit dem Werkzeugnest verbunden. Der wichtigste Unterschied zum Kompressionsverfahren besteht darin, dass das Werkzeugnest bereits beim Beginn des Pressens geschlossen ist. Wird die Presse zugefahren, bewegt sich das Werkzeug gegen einen eingebauten Kolben und die Elastormischung wird in die Werkzeugnester einge-

**Formgebung
über Kanäle**

drückt. Beim Pressen durch die engen Fließkanäle ist ein intensiver Wärmeaustausch mit der Werkzeugwand gewährleistet. Zudem wird durch die Fließgeschwindigkeit eine hohe Reibungswärme erzielt. Dies muss bei der Entwicklung des Mischungsrezepts berücksichtigt werden, da die zusätzliche Reibungswärme zum vorzeitigen Anvulkanisieren der Mischung führen kann. Die Heizzeiten werden im Vergleich zum Kompressionsverfahren erheblich verkürzt. Auch im Transfer-Moulding-Verfahren entsteht normalerweise ein Grat, der in der Regel aber dünner ist als beim Kompressionsverfahren. Mit dem Transfer-Moulding-Verfahren lassen sich Formteile innerhalb enger Toleranzgrenzen fertigen; daher ist es besonders gut für die Herstellung komplexer Kleinteile geeignet.

Abb. 22:
Prinzip des
Transfer Mouldings

**Verkürzte
Heizzeiten****Injection Moulding**

Das Spritzgießverfahren (engl. *Injection Moulding*) wurde schon erfolgreich in der Kunststoffindustrie eingesetzt, bevor es einige Jahre später in der Kautschukindustrie eingeführt

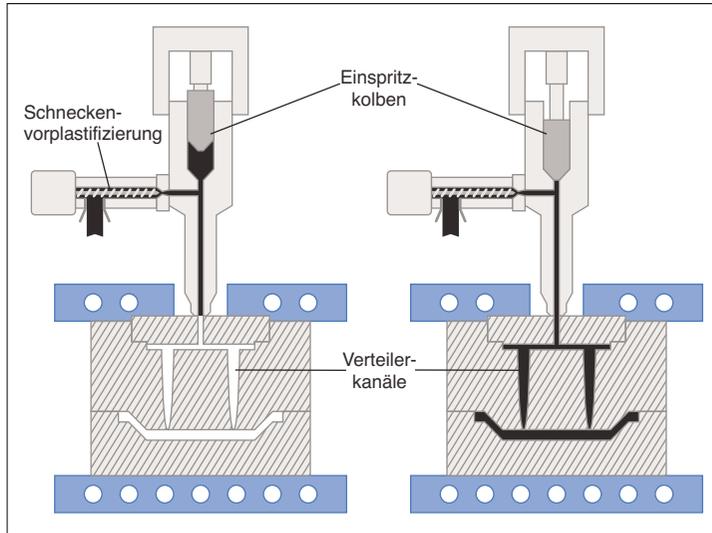


Abb. 23:
Prinzip des
Injection Mouldings

Getrennte Aggregate

wurde. Der Werkzeugaufbau ähnelt dem des Transfer-Moulding-Verfahrens, nur sind hier die einzelnen Nester des Werkzeugs über Kanäle mit dem Einspritzpunkt verbunden. Der Formgebungsprozess beginnt bei geschlossenem Werkzeug, in das die vorplastifizierte Mischung unter hohem Druck durch die Einspritzdüse und weiter durch die Verteilerkanäle in die Werkzeugnester gespritzt wird (Abb. 23). In der Kautschukindustrie hat sich weitestgehend das Spritzgießen mit Schnecken- vorplastifizierung und Kolbeneinspritzung durchgesetzt. Bei dieser Methode sind die Vorgänge des Plastifizierens und des Einspritzens getrennt, sodass jedes Teileaggregat bezüglich seiner Funktion optimal ausgelegt werden kann. Durch die Vorplastifizierung ist die Mischung beim Eintritt in das Werkzeugnester schon nahezu auf Vulkanisationstemperatur gebracht, sodass die Vulkanisationszeit beim Injection-Moulding-Verfahren im Ver-

gleich zu den anderen genannten Verfahren am kürzesten ist. Aufgrund der vergleichsweise hohen Investitionskosten eignet sich das Injection-Moulding-Verfahren allerdings nur für größere Produktionsserien.

Weitere Technologien

Das Problem der Entgratung bzw. die Vermeidung der Gratbildung hat zur Entwicklung neuer Verfahren und Werkzeuge geführt. Die Werkzeugoberfläche lässt sich beispielsweise so modifizieren, dass zwar noch Luft entweichen kann, aber kein Elastomer aus dem Nest herausdringt. Diese Methode wird als Ready Moulding oder als »Flash-less«-Verfahren bezeichnet. Ihre Anwendung ist besonders für die Herstellung von Präzisionsformteilen geeignet.

Die Kombination der verschiedenen Formgebungsverfahren hat zu einer Reihe weiterer Verfahren geführt. So verbindet das *Injection-Ready-Moulding-Verfahren* das Spritzgießen mit der Werkzeugtechnologie zur gratlosen Fertigung. Zum Spritzgießen kleiner, flacher Formteile, vorzugsweise O-Ringe, verwendet man unter anderem das *Injection Compression Moulding (Spritzprägen)*. Grundsätzlich beruht dieses Verfahren darauf, dass beim Schließen des Werkzeugs noch ein Restspalt offen gelassen wird. In diesen Spalt wird die benötigte vorplastifizierte Mischung eingespritzt und anschließend die Presse zugefahren. Mit diesem Verfahren lassen sich flache, hochpräzise Formteile herstellen, die weitgehend gratfrei entformt werden können.

Bei der *Kaltkanaltechnik* sind die Injektionskanäle vom Werkzeug thermisch getrennt. Durch ein gestaltungsoptimiertes und richtig temperiertes Kanalsystem lässt sich ein Materialverlust durch bereits vulkanisierte Angüsse vermeiden (Abb. 24). Dies bedeutet eine enorme Materialeinsparung, insbesondere

Für große Pro- duktionsserien

Injection Ready Moulding

Injection Compression Moulding

Kaltkanal- technik

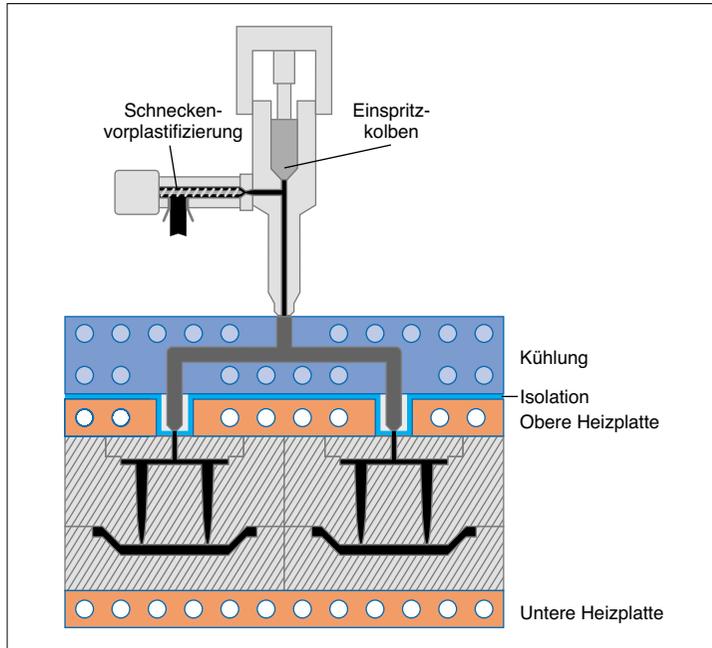


Abb. 24:
Prinzip der
Kaltkanaltechnik

Zeit- und Material- einsparung

bei hochwertigen Mischungen. Durch die geschickte Gestaltung der Kanäle können größere Formteile mit kleinem Querschnitt hergestellt werden. Für dieses Verfahren benötigt man Mischungen mit sehr guter Fließfähigkeit. Positiver Nebeneffekt der guten Fließfähigkeit ist die Möglichkeit, gleichzeitig die Spritzgeschwindigkeit zu erhöhen. Neben der dadurch erzielten Zeitersparnis müssen keine Kanäle mehr entformt und vom Formteil entfernt werden. Die Kaltkanaltechnik ist mit allen Formgebungsverfahren wie dem herkömmlichen Spritzverfahren oder dem Injection-Ready-Moulding-Verfahren kombinierbar und erlaubt eine weitgehende Automatisierung des jeweiligen Verfahrens.

Prozessoptimierung in der Elastomerverarbeitung

Bei allen Vulkanisationsprozessen ist es wichtig, die rheologischen Eigenschaften der Mischungen zu kennen, um die Prozessparameter optimal einstellen und auf das Material abstimmen zu können. In der Rheologie betrachtet man das Fließverhalten (Viskosität) und Scherverhalten von Materialien. Rheologie und Prozesssimulation gehören untrennbar zusammen, wenn es um die Optimierung von Fertigungsprozessen und um Kosteneinsparungen in der kautschukverarbeitenden Industrie geht. Die Kenntnis der Vernetzungsreaktion und deren Geschwindigkeit dient dem Mischungsentwickler zur Bestimmung der Reaktionskinetik und dem Verfahrenstechniker zur Ermittlung der idealen Heizzeit sowie der Qualitätssicherung in der Produktion. Die rheologischen Daten werden für Strömungs- oder Füllsimulationen beim Spritzgießen verwendet, um die Scherratenabhängigkeit der Viskosität zu bestimmen und anhand dieser den elastischen Anteil der Elastomerspannung zu berechnen. Die Simulation von Füllprozessen ist daher ein wichtiges Hilfsmittel, um fehlerfreie Bauteile herzustellen. So kann beispielsweise der Füllfrontverlauf und die Lage von Zusammenfließnähten oder auch der Druckbedarf zur Auswahl eines geeigneten Spritzgießaggregats rechnerisch bestimmt werden. Mögliche Fehlerquellen, zum Beispiel Lufteinschlüsse, können auf diese Weise frühzeitig erkannt und behoben werden. Durch die Erweiterung universeller Strömungssimulationsprogramme mit optimierten Materialmodellen zur Beschreibung der Vernetzungskinetik können auch der *Scorch-Index* (Fließperiode, d. h. die Zeit bis zur Vernetzung des Elastomers) und die Vernetzungsdichte beim Spritzguss von Elastomerbauteilen berechnet werden.

Strömungs- oder Füllsimulationen

Berechnung des Scorch-Indexes

**Erheblicher
Rechenaufwand**

Ein Elastomerteilchen erfährt zwischen dem Füllvorgang im Zylinder der Spritzgießmaschine bis zu seiner endgültigen Position im Werkzeug eine über die Zeit veränderliche Scher- und Dehndeformation. Bei der Simulation müssen starke Geschwindigkeitsgradienten am Werkzeugrand sowie dünne Temperaturgrenzschichten berücksichtigt werden. Dies erfordert neben speziellen Softwarepaketen auch einen erheblichen Rechenaufwand, um die komplexen dreidimensionalen Strömungsvorgänge zu beschreiben (Abb. 25).

Abb. 25:
Füllsimulation am
Beispiel einer
Konusschichtfeder
zur Beschreibung
komplexer Strömungsvorgänge



Eine besondere Herausforderung stellt die Simulation des Compression Mouldings dar. Im Gegensatz zur Spritzgussimulation, bei der die zeitlich veränderliche Fließfront (Verformung des Rohlings bis zum vollständigen Füllen) innerhalb eines starren Raums (feste Wände des Werkzeugneests) berechnet werden muss, ändern sich beim Compression Moul-

ding nicht nur die Fließfront und damit die Parameter, sondern es bewegen sich zusätzlich auch die Werkzeughälften gegeneinander.

Der Vorteil aller Prozesssimulationen liegt darin, dass sich Parameteränderungen und -optimierungen am Computer innerhalb weniger Stunden oder Tage zuverlässig durchführen und überprüfen lassen. Die gewonnenen Erkenntnisse können bereits in einem frühen Entwicklungsstadium in das Produkt- bzw. Prozessdesign einfließen. Physikalische Zusammenhänge und Abläufe werden bei der Simulation transparenter, sodass der Anwender ein tieferes Verständnis für sein Produkt bzw. seinen Prozess entwickelt, das mit ausschließlich experimentellen Untersuchungen nicht erreichbar ist. Optimierungsprozesse lassen sich somit zielgerichtet dort ansetzen, wo die größten Potenziale erkennbar sind. Auf diese Weise wird mit wenig Aufwand ein maximales Entwicklungsergebnis erzielt.

**Frühzeitige
Optimierung**

Prüfung von Elastomeren

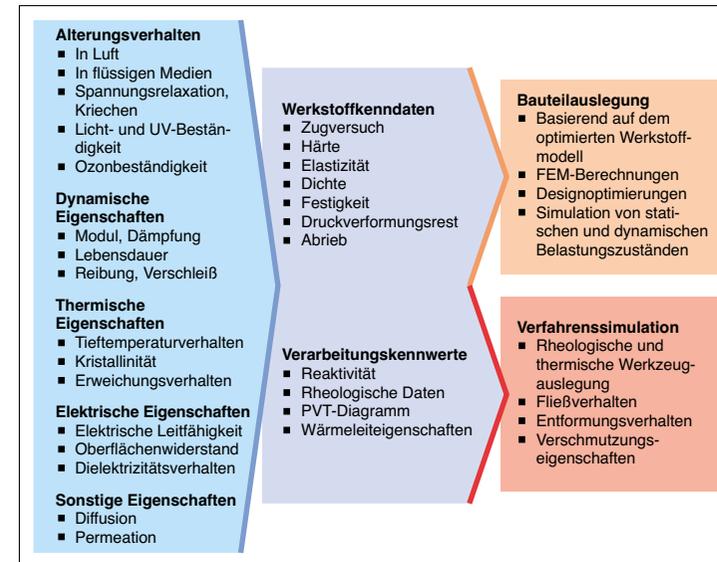
Prüfungen an Elastomeren dienen in erster Linie zur Werkstoffcharakterisierung, zur Überprüfung der Funktion und zur Qualitätskontrolle. Da die meisten Elastomereigenschaften zeit- und verformungsabhängig sind, erfassen Prüfungen die komplexen Zusammenhänge der Elastomereigenschaften nur bedingt. In vielen Fällen können nur eingeschränkte Aussagen über die Eignung eines Produkts für den vorgegebenen Einsatz gemacht werden. Daher ist neben der reinen Ermittlung der Werkstoffdaten die Bauteilprüfung im Rahmen von Feldtestläufen für eine Beurteilung der Einsatztauglichkeit des Elastomers entscheidend.

Komplexe Zusammenhänge

Prüfung entlang der Prozesskette

Die genaue Kenntnis der Zusammenhänge zwischen Rezeptaufbau, physikalischen Eigenschaften und ihre Veränderungen durch Alterungseinflüsse ist eine notwendige Voraussetzung zur Qualitätsverbesserung der Endprodukte. Um eine umfassende Charakterisierung der elastomeren Werkstoffe vornehmen zu können, wird eine Vielzahl an Materialeigenschaften geprüft (Abb. 26). Die Bestimmung des Druckverformungsrests (DVR) gibt beispielsweise darüber Aufschluss, inwiefern die elastischen Eigenschaften von Elastomeren nach lang andauernder, konstanter Druckverformung bei vorgegebener Temperatur erhalten bleiben. Der Druckverformungsrest ist daher eine der wichtigsten Werkstoffeigenschaften, die der Produktentwickler vor dem Einsatz seiner Dichtung kennen muss. Anhand

DVR-Bestimmung



des Druckverformungsrests kann die Qualität der Elastomermischung bestimmt und ein Anhaltspunkt für die Eignung des Werkstoffs für dynamische oder statische Dichtanwendungen gewonnen werden. Neben den mechanisch-technologischen Eigenschaften wie Dichte, Härte, Zugfestigkeit und Bruchdehnung sind insbesondere die physikalischen Wechselwirkungen mit Kontaktmedien und die chemischen Materialveränderungen durch Umwelteinflüsse relevant.

Allerdings sind die reinen Kennwerte zur Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit wenig geeignet. Praxisnahe Prüfungen zu Temperatur- und Medieneinwirkungen werden üblicherweise über verschiedene Zeiträume unter Laborprüfbedingungen simuliert. Moderne Verfahren der auf der Finite-Elemente-Methode (FEM) basierenden Bauteilprüfung sowie Prüfläufe unter Einsatzbedingungen im Labor ermöglichen es, die Funktion der Bau-

Abb. 26: Übersicht über Prüfmethoden entlang der Prozesskette

Praxisnahe Prüfungen

teile umfassend zu beurteilen. Eindeutige Aussagen über die Gebrauchstauglichkeit werden idealerweise in Feldtests mit Bauteilprototypen ermittelt.

Vorhersage der Lebensdauer

Die ermittelten mechanischen, thermischen und dynamischen Kennwerte sind die Basis für die Entwicklung von Materialmodellen. Hierbei werden nicht nur die Einflüsse der Mischung und der Umgebung, sondern auch das Werkstoffverhalten unter dynamischen Belastungen berücksichtigt. Anders als beispielsweise bei metallischen und keramischen Werkstoffen besteht beim Elastomer zwischen Spannung und Dehnung kein linearer Zusammenhang. Neben diesem nichtlinearen Verhalten muss die Steifigkeit des Werkstoffs in Abhängigkeit von der Verformungsgeschwindigkeit berücksichtigt werden. Optimierte Materialmodelle, so genannte *hyperelastische Materialmodelle*, zeigen eine gute Korrelation mit den experimentellen Daten und behalten auch bei großen Materialverformungen (>150 %) noch ihre Gültigkeit (Abb. 27).

Hyperelastische Materialmodelle

Bewertung der Alterungsbeständigkeit

Insbesondere die Bewertung der Alterungsbeständigkeit von Elastomeren ist ein wichtiges Kriterium bei der Beurteilung der Lebensdauer von Dichtungen. Die Untersuchungen werden im Allgemeinen durch Zugversuche an gealterten Proben durchgeführt. Dabei ist zu beachten, dass Kurzzeit- und Einpunktmessungen immer zu Fehlinterpretationen führen können. Die Beobachtung der Alterungsphänomene bei unterschiedlichen Temperaturen und Zeitstufen führt dagegen zu wesentlich aussagefähigeren Ergebnissen und lässt eine Abschätzung des Langzeitverhaltens zu. Zusätzliche, aus Bauteilanalysen und Alterungsversuchen gewonnene, Informationen

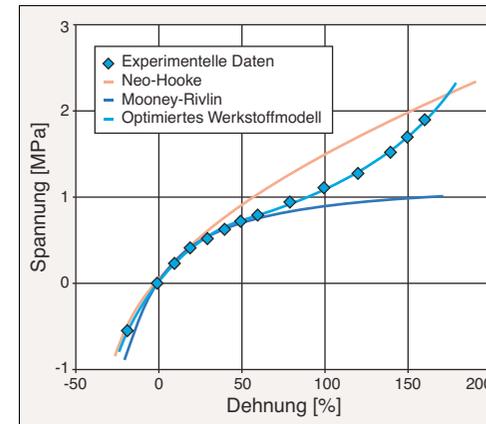


Abb. 27: Vergleich verschiedener Materialmodelle mit experimentellen Daten hinsichtlich des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens

verfeinern die numerischen Materialmodelle und liefern so ein umfassendes Bild bezüglich der Lebensdauer von Elastomerdichtungen.

Bauteilsimulation mittels FEM

Die Finite-Elemente-Methode dient in der industriellen Produktentwicklung als Berechnungsverfahren zur Lösung komplexer Probleme der Statik, Festigkeit, Dynamik und Thermodynamik. Um bei der Entwicklung technischer Elastomerbauteile alle Potenziale hinsichtlich Konstruktion und Verkürzung der Entwicklungszeiten auszuschöpfen und gleichzeitig eine hohe Produktqualität sicherzustellen, ist es erforderlich, optimierte Methoden zur Berechnung des nichtlinearen Verhaltens einzusetzen und somit das Werkstoffverhalten möglichst exakt wiederzugeben.

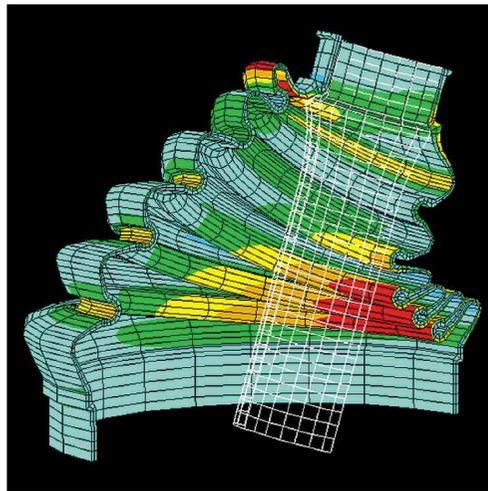
Nichtlineare FEM-Rechenmodelle sind unverzichtbar, wenn es um die Beschreibung wichtiger Phänomene geht, wie zum Beispiel das Betriebsverhalten von Elastomerbauteilen, die Prozesssimulation in der Umformtechnik oder die rechnerische Simulation von Aufprallvor-

Nichtlineare FEM-Rechenmodelle

Absicherung der Bauteilfunktion

gängen. Zum einen werden durch die Simulation die physikalischen Zusammenhänge für den Anwender transparenter, zum anderen erlaubt die frühzeitige Berücksichtigung der Nichtlinearitäten im Konstruktionsprozess eine zuverlässige Absicherung der Bauteilfunktion. Simulationen mit FEM-Modellen, die das Werkstoffverhalten exakt beschreiben, können hierbei einen wertvollen Beitrag leisten und gewinnen zunehmend an Bedeutung. So lassen sich Topologie und Gestalt mechanisch belasteter Bauteile unter Berücksichtigung geringer Dehnungen und Spannungen optimieren.

Abb. 28:
FEM-Berechnung einer Achsmanschette. Die rot eingefärbten Flächen markieren extreme Spannungen im Material.



Beispiel Faltenbälge

Der erfolgreiche Einsatz von FEM-Berechnungen lässt sich am Beispiel von Faltenbälgen verdeutlichen. Zur Abdichtung der Gelenkschmierung von Achsen werden Faltenbälge eingesetzt, die große Winkelbewegungen zulassen müssen. Neben der Erfüllung der Elastizitätsanforderungen ist vor allem eine lange Lebensdauer des Bauteils ein wichtiges

Ziel bei der Entwicklung. Die auf das axial-symmetrische Bauteil wirkenden Lasten sind nicht axialsymmetrisch. Daher muss bei der Berechnung eine Kombination von Axial- und Querlasten berücksichtigt werden. In der Simulation werden Spannungsspitzen im Bauteil sichtbar. Durch geeignete Anpassung des Bauteildesigns oder teilweise durch Optimierung des Werkstoffs können die Spannungsspitzen reduziert werden. Veränderungen im Bauteildesign haben einen enormen Effekt auf die Höhe von Zug- und Druckspannungen. Im Fall der Faltenbälge bedeutete dies, dass die Spannungsmaxima im Elastomer anhand von Simulationen dargestellt und anschließend reduziert wurden. Dadurch konnte die Lebensdauer um ca. 10 % gegenüber dem herkömmlichen Design verlängert werden (Abb. 28).

Ergebnis:
Lebensdauer-
verlängerung

Hightech-Produkte aus technischen Elastomerwerkstoffen

Kombinationen mit anderen Werkstoffen

Trotz des Fortschritts in den verschiedenen Werkstoffklassen sind Elastomere aufgrund ihrer speziellen chemischen, thermischen und mechanischen Eigenschaften weiterhin die Basis für technische Dichtlösungen. Durch die feste Verbindung von Elastomeren mit Metallen, Kunststoffen, Geweben oder anderen Materialien lassen sich die werkstoffspezifischen Eigenschaften der verschiedenen Materialien vorteilhaft nutzen. Dadurch entstehen multifunktionale Elemente in Form von statischen oder dynamischen Dichtungen, Formteilen, Elastomerverbundteilen und vieles mehr.

Ob in einer statischen oder einer dynamischen Anwendung – immer ist das Elastomer von entscheidender Bedeutung für Funktion, Lebensdauer und Wirtschaftlichkeit der Dichtung. Je nach Anwendungsgebiet kommen noch weitere spezielle Anforderungen an die Werkstoffe hinzu. Die Palette an Dichtungen ist breit gefächert und reicht von klassischen Rundschnurringen über Simmerringe bis hin zu schwingungstechnischen Bauteilen mit gleichzeitiger Dichtfunktion. Einige der Produkte sollen im Folgenden exemplarisch vorgestellt werden.

O-Ringe

O-Ringe werden überwiegend zur statischen Abdichtung ruhender Maschinenteile gegen flüssige und gasförmige Medien eingesetzt. Die Dichtwirkung des O-Rings beruht auf axialer oder radialer Verformung seines Querschnitts im eingebauten Zustand. Diese Verformung wird durch entsprechende Auslegung des Einbauraums erreicht. Die hierdurch entstehende Reaktionskraft ergibt die für die Ab-

dichtung erforderliche Anpresskraft, die durch den Druck des Mediums zusätzlich unterstützt wird. Bei sachgemäßem Einbau und richtiger Werkstoffauswahl können Drücke bis zu 1000 bar und mehr abgedichtet werden. Mittels moderner Berechnungsmethoden lässt sich das Verformungsverhalten der O-Ringe in der Funktion simulieren und die Lebensdauer durch Designoptimierung erhöhen. Neben den klassischen O-Ringen gibt es unterschiedliche Sonderformen, die auch komplexe Bauteilgeometrien abdichten. O-Ringe, die im Einsatz mit heißem Wasser oder Dampf in Berührung kommen, z. B. in Armaturen, Stellventilen, Dampferzeugern, Speisepumpen, Magnetventilen oder in der Solartechnik, werden heute aus EPDM oder HNBR gefertigt (Abb. 29).



Sonderformen für komplexe Bauteilgeometrien

Abb. 29:
In der Solartechnik eingesetzte O-Ringe aus EPDM

O-Ringe aus speziellen EPDM-Compounds zeichnen sich durch eine bessere Langzeitstabilität, insbesondere bei hohen Temperaturen (bis 180 °C in Wasserdampf) aus. Um diese O-Ring-Werkstoffe in Trinkwasser einsetzen zu können, sind zusätzlich spezielle, zum Teil länderspezifische Freigaben erforderlich.

Klappenventile oder mechanisch betätigte Verschlussventile zur Durchflussregulierung wer-

Klappenventile

Abb. 30:
Klappenventil-
dichtung



den tausendfach in der Getränke-, Molkerei- und Abfülltechnik eingesetzt (Abb. 30). Sie sind einfach aufgebaut, robust und damit weitgehend unanfällig gegen Störungen. Klappenventile müssen Drücken bis 10 bar sowie Fließgeschwindigkeiten von bis zu 2,5 m/s sicher standhalten. Die Standzeit der Dichtungen ist ein entscheidender Faktor für die Wirtschaftlichkeit von Klappenventilen. Bei richtiger Werkstoffauswahl hält die Dichtung über viele tausend Schaltzyklen. Um die steigenden technischen Anforderungen zu erfüllen, werden Werkstoffe benötigt, die niedrige Reibmomente beim Betätigen der Klappen ermöglichen und ein sehr gutes Dichtverhalten in einem möglichst breiten Einsatzbereich zeigen. Ein geringes Relaxieren des Elastomers bietet zudem die Gewähr, dass die Ventildichtungen auch nach längeren Zyklen unter Druckbelastung (Schließzustand) eine hohe elastische Rückstellkraft und damit eine hohe Langzeitdichtheit aufweisen.

**Langzeit-
dichtheit**

Dichtungen für die Lebensmittel- und Getränkeindustrie müssen neben der Beständigkeit gegen das abzudichtende Medium auch außer-

ordentlich beständig gegen Dampf sowie gegen aggressive Reinigungsmedien sein, d. h., sie müssen für CIP- und SIP-Prozeduren (CIP steht für *Cleaning in Place*, SIP für *Sterilisation in Place*) geeignet sein. Aufgrund des Einsatzes im Lebensmittelbereich dürfen die Elastomere nur unbedenkliche Mischungsbestandteile enthalten, die nach gesetzlichen Richtlinien vorgegeben sind (z. B. nach Empfehlung des BfR und FDA CFR 21 § 177.2600). Neuentwicklungen in diesem Bereich sind Hochleistungswerkstoffe auf der Basis von EPDM, HNBR, FKM und in Spezialfällen auf der Basis von FFKM. HNBR-Compounds bieten beispielsweise sehr gute mechanische Festigkeitswerte sowie gute Gleiteigenschaften. Sie werden vielfach in Anlagen eingesetzt, in denen Fette, Wachse und Öle abgesperrt oder geregelt werden, da HNBR gegenüber diesen Medien eine hohe Beständigkeit aufweist. Die Einsatztemperaturen von HNBR-Klappendichtungen reichen von -20°C bis $+140^{\circ}\text{C}$.

**Neue Hoch-
leistungs-
werkstoffe**

Membranen werden immer in Anwendungen eingesetzt, in denen Bauteile flexibel miteinander verbunden, Räume zwischen ihnen getrennt und gleichzeitig eine dichte Trennwand errichtet werden soll. Wegen ihren vielfältigen Funktionsmöglichkeiten (fördern, stellen, regeln, dichten, trennen, speichern) reicht ihr Einsatzbereich vom Maschinenbau über die Automobiltechnik, die Raumfahrt bis hin zur Medizintechnik. Die sehr unterschiedlichen Anforderungen in Bezug auf mechanische, thermische und chemische Belastungen erfordern in den allermeisten Fällen kundenspezifische Lösungen. Membranen werden beispielsweise in Kraftstoff oder Schmiermedien fördernden Pumpen eingesetzt oder auch als Regel- und Abdichtelement in Ventilen von Getränkeabfüllmaschinen. Neben hoher Beständigkeit gegen Medien sind darüber hinaus eine

Membranen

**Kundenspezifi-
sche Lösungen**

hohe Abriebfestigkeit und gute dynamische Eigenschaften gefordert. Durch die Kombination von Strukturfestigkeit (z. B. durch die Verwendung spezieller Gewebe) und Flexibilität erreichen Membranen hohe bis höchste Druck- und Dauerstandfestigkeiten. In motor-nahen Aktuatoren setzen moderne Membranen bereits kleinste Druckunterschiede in Regel- und Schaltvorgänge um. Auch unter kritischen Betriebsbedingungen, nahe an Turboladern oder in Blow-by-Gasströmen, die durch den Verbrennungsprozess im Motor entstehen, erreichen die Membranen lange Standzeiten bei durchgehend zuverlässiger Schaltpräzision. Ein Beispiel für den Einsatz von Membranen in Aktuatoren ist die als Ladedruckventil im Fahrzeug arbeitende Zweikammerdose (Abb. 31). Sie leitet die heißen Abgase während des Kaltstarts und im Vollastbetrieb am Turbolader vorbei. Die Zweikammerdose besteht aus zwei durch Membranen getrennte Kam-

Beispiel Zweikammerdose



Abb. 31:
Zweikammerdose als
Ladedruckregelventil

mern, die in die gleiche Verstellrichtung arbeiten. Mit diesem System wird das Ansprungsverhalten des Katalysators deutlich beschleunigt. Otto- oder Dieselmotoren erfordern aufgrund ihrer unterschiedlichen Betriebstemperaturbereiche auch unterschiedliche Elastomercompounds für die Membranen.

Dynamische Dichtungen, wie beispielsweise Simmerringe, dienen zur Abdichtung sich bewegender Bauteile (z. B. rotierender Wellen) und werden unter anderem in Motoren zur Abdichtung von Kurbel- und Nockenwellen oder im Antriebsstrang von Pkw und Nkw sowie in Land- und Baumaschinen, in Industriegetrieben, Hydroaggregaten oder auch in Waschmaschinen eingesetzt. Für Industrieanwendungen liegt die geforderte Lebensdauer dynamischer Dichtungen zum Teil bei bis zu 40 000 Stunden. Hohe Wellendrehzahlen und damit hohe Umfangsgeschwindigkeiten verursachen trotz des Einsatzes reibungsoptimierter Werkstoffe häufig einen extremen Temperaturanstieg an der Dichtlippe. Dies kann unter ungünstigen Umständen zur Verkohlung des Öls und aufgrund der Ablagerung dieser Rückstände an der Dichtkante letztlich zur Leckage führen. Daher muss ein für Simmerringe eingesetztes Elastomer diesen hohen Temperaturen dauerhaft standhalten. Durch den verstärkten Einsatz moderner synthetischer Schmierstoffe in Motoren und Getrieben sind die Elastomere darüber hinaus einer völlig andersartigen chemischen Beanspruchung als bei herkömmlichen Mineralölen ausgesetzt, sodass sie auch gegenüber neuen Ölgenerationen eine sehr gute Beständigkeit aufweisen sollten.

Um rechtzeitig Funktionsprobleme zu erkennen, können Radialwellendichtringe neuerdings mit Zusatzfunktionen wie beispielsweise einem Leckagesensor ausgestattet werden.

Dynamische Dichtungen

Lebensdauer bis zu 40 000 Stunden

Integrierter Leckagesensor

Abb. 32:
Simmerring® mit
Leckagesensor



Lässt die Dichtfunktion beim Erreichen der Produktlebensdauer nach, nimmt ein Leckage-depot die austretende Flüssigkeit auf. Ein im Dichtsystem integrierter Sensor erkennt die Leckage und meldet, wenn Wartung und Austausch der Dichtung nötig werden (Abb. 32). Auf diese Weise kann ein ungeplanter Maschinenstillstand vermieden werden.

Neue Wege werden auch in der Steuerungs- und Sensortechnik beschritten, um den Anforderungen nach niedrigen Leckageraten (im ppm-Bereich) sowie nach Zuverlässigkeit und Kostenoptimierung gerecht zu werden. Die Kombination von flexibler Leiterplattentechnologie und Elastomeren zu multifunktionalen Dichtsystemen bildet die Basis von Produkten, die gleichzeitig dichten und elektrische Signale ohne herkömmliche Kabel störungsfrei weiterleiten (Abb. 33). Das System besteht dabei aus einer statischen Dichtung mit integriertem Sensor, einem Stecker und einer flexiblen Leiterplatte, die alle Komponenten zu einer Baugruppe verbindet. Ohne zusätzliche Bohrungen, Abdichtungen und Durchführungen lässt sich mit diesem multifunktionalen Dichtsystem ein elektrisches Signal aus einem medium- und/oder druckbe-

Multifunktionale Dichtsysteme



Abb. 33:
Dichtungslösungen
mit integriertem Sen-
sor und Stecker sind
mit flexibler Leiter-
platte für fast jede
Kontur realisierbar.

aufschlagten Raum heraus- bzw. hineinleiten. Aufgrund großer Gestaltungsfreiheiten sind vielfältige Einsatzmöglichkeiten in der Automobil- und Konsumgüterindustrie, in der Medizin- sowie in der Telekommunikationstechnik möglich. Durch Miniaturisierung dieses Dichtsystems entstehen platzsparende Bauteillösungen, die durch Faltungen der flexiblen Leiterplatte in kleinste Bauräume eingebaut werden können.

Bälge und Staubkappen werden sowohl in der Automobilindustrie als auch in der Baumaschinenindustrie, der Elektrotechnik, der Nahrungsmittelindustrie und der Medizintechnik eingesetzt. Im Automobil schützen diese Bauteile Achsen, Getriebe, Stoßdämpfer oder die Lenkung, Gelenk- und Kardanwellen, aber auch Kugelgelenke in Spurstangen sowie Stabilisatoren werden mit speziellen Elastomerbälgen gegen das Eindringen von Schmutz und Feuchtigkeit geschützt. In Gelenkwellen eingesetzte Elastomerbälge verhindern darüber hinaus den Verlust der Schmiermittelfüllung. Zudem müssen die Bälge Auslenkungen von bis zu 45°, Temperatur- und Medienbelastungen sowie hohen lokalen Beanspruchungen standhalten. Die Bälge

Platzsparende Lösungen

Bälge und Staubkappen ...

... schützen empfindliche Teile

bestehen aus einem beweglichen Mittelteil und zwei Anschlüssen. Entsprechende Verschluss-elemente sorgen für einen passgenauen Sitz und stellen die erforderliche Dichtheit sicher. Die Auslegung eines Balgs richtet sich nach dem jeweiligen Gelenktyp und dem spezifischen Anforderungsprofil des Kunden. Aufgrund der unterschiedlichen Beanspruchung von Fest- und Verschiebegelenken (Rad- und Getriebeseite) werden für deren Abdichtung unterschiedliche Elastomerwerkstoffe verwendet. Gelenkwellenbälge für Festgelenke werden vorzugsweise aus thermoplastischen Elastomeren (TPE) gefertigt, während Gelenkwellenbälge für Verschiebegelenke meist aus Chloropren-Kautschuken bestehen (Abb. 34).

Aufgrund der gestiegenen Leistungsdichte bei *Hydraulikaggregaten* lassen sich die Anforderungen an leistungsfähige, leckagefreie Komponenten nur mit speziellen Dichtsystemen erfüllen, die zudem über eine lange Lebensdauer verfügen. Die dort eingesetzten Dichtsysteme bestehen meistens aus einer Kombination genau aufeinander abgestimmter Dichtelemente wie Abstreifer, Nutring, Führungsband, Stützring und Stangendichtung. Dichtelemente in

Dichtsysteme für Hydraulikaggregate



Abb. 34:
Elastischer Schutz-
balg für Antriebs-
wellen

Hydraulikzylindern von Baggern, Radlagern und Planierdraupen sind besonders hohen Belastungen ausgesetzt. Sie müssen sowohl starke Verschmutzungen durch Schlamm und Staub als auch große Temperaturschwankungen überstehen. Darüber hinaus darf das Dichtsystem nicht durch hohe Systemdrücke, insbesondere nicht durch Druckspitzen oder durch auf den Hydraulikzylinder einwirkende Querkräfte, Schaden nehmen. Die neue Generation von Hydraulikdichtungen zeichnet sich durch ein hohes Rückstellvermögen auch bei extremen Kältetemperaturen aus, sodass mobile Hydrauliksysteme in allen Klimazonen sowie auch im Winter von Beginn an ihre volle Leistungsfähigkeit ohne nennenswerte Leckage erreichen (Abb. 35).

Ein weiteres Einsatzgebiet technischer Elastomerwerkstoffe ist die Schwingungstechnik. Schwingungen treten überall dort auf, wo Anfahrtsmomente, Unwuchten oder das Einwirken von äußeren Kräften und Drehmomentspitzen eine Rolle spielen. Dabei verursachen die dadurch hervorgerufenen Vibrationen nicht nur Lärm, sondern sie belasten auch die Komponenten des Antriebsstrangs, sodass deren Lebensdauer deutlich sinken kann. Motoren,

Hohes Rückstellvermögen

Einsatzgebiet Schwingungstechnik



Abb. 35:
Dichtsystem für
Hydraulikzylinder

Hydrolager als Dämpfungselement

Abb. 36:
Motorlager mit integrierter hydraulischer Dämpfung (Hydrolager)



Getriebe, Antriebswellen oder Kupplungen mit nachgeschalteten Maschinen beeinflussen sich dabei gegenseitig. Im Fahrzeug werden die Schwingungen auf das Fahrgestell und die gesamte Karosserie übertragen, was zu einer Verschlechterung des Fahrkomforts bis hin zur Instabilität führen kann. Der Frequenzbereich der Schwingungen im Fahrzeugbereich erstreckt sich von ca. 1 Hz bis über 1000 Hz. Elastomere Bauelemente sorgen im Spannungsfeld von Isolation und Dämpfung dafür, dass die Motoren und die Wellen in den Antriebssträngen vibrations- und geräuscharm laufen. *Hydrolager* als elastomere Entkopplung mit hydraulischer Dämpfung können aufgrund ihrer besonderen Konstruktion sowohl niederfrequente Schwingungen dämpfen als auch hochfrequente Anregungen isolieren. Hydrolager (Abb. 36), die als Kabinenlager

bei Land- und Baumaschinen eingesetzt werden, verbessern den Benutzerkomfort und schaffen gleichzeitig die Voraussetzung zur Erfüllung der gesetzlichen Lärm- und Schwingungsrichtlinien sowie der Arbeitssicherheitsrichtlinien.

Ausblick

Aufgrund ständig steigender Anforderungen an die Dichtungswerkstoffe in Bezug auf Lebensdauer, Reibung, Verschleiß, Medien- und Temperaturbeständigkeit sowie immer enger gefasster Spezifikationen ist es für die Dichtungshersteller zwingend notwendig, sich mit den Materialien und den lebensdauerbeeinflussenden Faktoren intensiv auseinander zu setzen. Nur so können moderne Elastomerwerkstoffe entwickelt werden, die höchste Funktionsansprüche erfüllen. Für Motoren und Getriebe zeigt sich ein Trend hin zu einem breiteren Temperatureinsatzbereich (von -40°C bis $+175^{\circ}\text{C}$) und zum Einsatz von vollsynthetischen Schmiermedien. Zu diesen steigenden Anforderungen kommen neue, strengere gesetzliche Regelungen hinzu. Ein Beispiel dafür ist die Vorschrift, dass Kraftfahrzeuge zukünftig keine flüchtigen Kohlenwasserstoffverbindungen mehr emittieren dürfen (»Zero Emission Vehicle«).

Die Herstellung von anwendungsoptimierten Polymeren ermöglicht eine erhebliche Erweiterung des Anwendungsspektrums von Elastomercompounds. So wurden beispielsweise für die neue Generation von Wellendichtungen maßgeschneiderte ACM-Polymere entwickelt, die über einen um 15°C erweiterten Temperatureinsatzbereich verfügen (von -40°C bis $+175^{\circ}\text{C}$) und damit die bereits genannten Anforderungen der Automobilindustrie erfüllen. Mit speziellen Rezeptformulierungen lassen sich neue Werkstoffe mit verbesserter Verschleißfestigkeit und Alterungsbeständigkeit entwickeln, welche die Lebensdauer des Bauteils erhöhen.

Durch die wachsende Bedeutung der Elektronik generell sowie durch die Zunahme von elek-

Höchste Funktionsansprüche

Strenge Gesetze

Maßgeschneiderte Elastomere

Integration zusätzlicher Funktionen

trischen Antrieben entstehen neue Dichtkonzepte, die sich durch das Integrieren zusätzlicher Funktionen in die Dichtung auszeichnen. Diese Konzepte ersparen einzelne Komponenten, reduzieren somit Bauraum, vermindern das Gewicht und vereinfachen letztlich auch die Montage für den Anwender. So gibt es schon heute Simmerringe mit Elastomer-Encoder-elementen und aktiven Sensoren zur Drehzahlmessung im Automobil, insbesondere in ABS-Systemen. Die Dichtungen verfügen über eine auf der Außenseite axial oder radial aufgetragene magnetisierbare und sektorweise codierte Elastomerschicht (siehe Umschlagbild). Ein Feldsensor erfasst die unterschiedlichen Intensitäten entlang des Magnetfelds und liefert so ein Signal für die Drehzahl.

Zusätzlich muss ein weiterer Aspekt – die elektromagnetische Abschirmung – in Zukunft stärker berücksichtigt werden. Die Zunahme der im Automobil eingesetzten elektrischen Systeme führt zu elektromagnetischen Interferenzen, die für Funktionsstörungen der Bauteile verantwortlich sind. Durch die Entwicklung elektrisch leitfähiger Elastomere lassen sich elektrostatische Aufladung und störende Wechselwirkungen elektrischer Komponenten untereinander vermeiden. Dichtungen aus elektrisch leitfähigen Elastomerwerkstoffen können zukünftig im Bereich der Sensortechnik oder der Kommunikationselektronik zum Einsatz kommen.

Elektrisch leitfähige Elastomere

Als wichtige Zukunftsstrategie gilt die Entwicklung der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie. Mit ihr verbinden sich die Hoffnungen, Energieverbrauch und Kohlendioxidemissionen in den Bereichen Verkehr und Energieversorgung deutlich zu verringern. Brennstoffzellensysteme stellen allerdings ganz andere Anforderungen an die Dichtungen als herkömmliche Verbrennungsmotoren. So

Brennstoffzelle

spielen Themen wie die Gaspermeation oder sehr hohe chemische Reinheitsanforderungen eine wesentliche Rolle. Die Dichtungen müssen dementsprechend gasundurchlässig sein und eine hohe chemische Beständigkeit gegen die in der Brennstoffzelle anfallenden Reaktionsprodukte aufweisen.

Der Trend zu multifunktionalen Dichtungsmodulen in Verbindung mit modernen Verarbeitungstechnologien ermöglicht die Herstellung filigraner und komplexer Bauteile. Ein profundes Werkstoffverständnis sowie der Einsatz moderner Berechnungsverfahren wie FEM und leistungsfähiger Zeichnungs- und Konstruktionsprogramme wie CAD werden zukünftig die Entwicklung innovativer Elastomerwerkstoffe, welche die hohen Anforderungen bezüglich Qualität, Leistungsvermögen und Lebensdauer erfüllen, noch weiter beschleunigen.

Schlüssel: Werkstoff- Know-how

Fachbegriffe

Agglomerate Zusammengelagerte Partikel, die aus einer Vielzahl von Einzelpartikeln bestehen und einen Durchmesser im Größenbereich von 50 bis 100 Nanometer (nm) aufweisen können.

Amorph Materialien, bei denen die Atome keine geordneten Strukturen, sondern unregelmäßige Muster ausbilden, bezeichnet man als amorph. Regelmäßig strukturierte Materialien heißen im Gegensatz dazu kristallin.

Batch-off-Anlage Dem Mischprozess nachgeschaltete Anlage, welche die Aufgabe hat, das Elastomerfell zu kühlen.

Brownsche Molekularbewegung Phänomen, das die thermisch getriebene Eigenbewegung der Moleküle beschreibt.

Drehmoment Produkt aus Kraft und dem senkrechten Abstand ihrer Wirkungslinie vom Drehpunkt.

Diffusion Ausgleich eines Konzentrationsunterschieds von gasförmigen oder gelösten Stoffen, bei dem sich die Teilchen temperaturabhängig von der höheren zur niedrigeren Konzentration bewegen.

Duromere Kunststoffe, die nach ihrer Aushärtung nicht mehr verformt werden können; auch Duroplaste genannt.

Elastomere Polymere Netzwerke, die in der Lage sind, reversibel große Verformungen zu absorbieren; vulkanisierter Kautschuk.

E-Modul Das Zug-E-Modul drückt das Verhältnis zwischen Zugspannung und Zugdehnung aus und beschreibt die Steifigkeit des Elastomers.

Entropie Thermodynamische Größe, die die molekulare Beweglichkeit (Unordnung) eines Systems beschreibt.

FEM Abkürzung für *Finite-Element-Methode*; ein Verfahren der numerischen Mathematik.

FMEA Abkürzung für *Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse*. Die FMEA ist eine analytische Methode, um potenzielle Schwachstellen zu finden.

Glasübergangstemperatur Temperatur, bei der Polymere vom gummielastischen, flexiblen Zustand in den hartelastischen, spröden Zustand übergehen. Sie ist für jedes Polymer spezifisch.

Grat Ein beim Formgebungsverfahren entstehender hervorstehender Rand des Elastomers.

Kautschuk (indian. *cao* = Baum und *ochu* = Träne) Sammelbegriff für unvernetzte, elastische Polymere.

Kriechen Temperatur- und zeitabhängige Verformung von Werkstoffen bei langfristig wirkender, konstanter mechanischer Belastung.

Polymer Makromolekül, das aus gleichartigen Einheiten (Monomere) aufgebaut ist. Ein Polymer kann aus linearen oder verzweigten Molekülen bestehen.

Rheologie Wissenschaft, die sich mit dem Verformungs- und Fließverhalten von Materie beschäftigt.

Scorch-Index Fließperiode, d. h. die Zeit, bis die Vernetzung des Elastomers einsetzt.

Simmerring® Radialwellendichtring; eingetragenes Warenzeichen von Freudenberg.

Spannungsrelaxation Die zeitliche Abnahme der Spannung bei konstanter Verformung und Temperatur.

Thermoplaste Kunststoffe, die sich unter dem Einfluss von Wärme plastisch verformen lassen. In der Regel bestehen Thermoplaste aus Polymeren mit linearen oder wenig verzweigten Kettenmolekülen.

Viskoelastizität Die zeit-, temperatur- und geschwindigkeitsabhängige Elastizität von polymeren Schmelzen oder Festkörpern (Kunststoffe).

Vulkanisation Verfahren, bei dem der Kautschuk durch Änderung seiner chemischen Struktur in einen gummielastischen Zustand überführt wird; auch Vernetzung genannt.

Literatur

Freudenberg Forschungsdienste KG: *Elastomere Werkstoffe*. Eigenverlag 2001
Hirsch, V.; Schneider, E.; Weiß, R.: »Numerische Berechnungen für Dichtungen und Bauteile.« *MTZ*, Jhrg. 65, 10/2004, S. 812 ff.

Kaczmarek, M.; Rieg, F.: *Taschenbuch der Maschinenelemente*. Hanser und Fachbuchverlag Leipzig, 2006

Krompf, W.: »Membrantechnik für motornahe Aktuatoren.« *MTZ*, Jhrg. 66, 4/2005, 288 ff.

Mars, W.V.: »Factors that affect the fatigue life of rubber: a literature survey.« *Rubber Chemistry and Technology*, Vol. 77, Issue 3, 2004, S. 391

Priebe, N.: »Kontinuierliches Mischen von Kautschukmischungen.« *KGK – Kautschuk, Gummi, Kunststoffe*, 58. Jhrg., 03/2005, S. 102–108

Röthemeyer, F.; Sommer, F.: *Kautschuktechnologie*. Hanser Verlag, 2001

von Arndt, E.; Bußmann, M.: »Gleiche Mischungsqualität von verschiedenen Produktionsstandorten – Qualitätssystem eines multinationalen Gummiverarbeiters.« *VDI-Jahrestagung Mischen Extrudieren Spritzgießen*, 2000

Anhang

Chemische Bezeichnung und Anwendungsbeispiele

Kurzzeichen	Chem. Bezeichnung	Eigenschaften	Handelsname	Anwendung
NR	Naturkautschuk	<ul style="list-style-type: none"> Hohe statische und dynamische Festigkeit Sehr niedrige Dämpfung (= hohe Elastizität) Sehr gutes Tief-temperaturverhalten Geringe Alterungs-, Ozon- und Ölbeständigkeit 	–	Schwingungsdämpfer, Tilger, Motorlager, Maschinenlager, Kupplungen im Automobil und Maschinenbau sowie Schifffahrt
SBR	Styrol-Butadien-Kautschuk	<ul style="list-style-type: none"> Mittlere Elastizität Sehr gute Abrieb- und Verschleißfestigkeit Mäßige Alterungsbeständigkeit Keine Ozon-/Ölbeständigkeit 	Buna SL [®] , Europrene [®] , Solprene [®] , Dunatex [®]	Formteile, O-Ringe, Membranen, Tilger sowie in Reifen im Kfz, als Förderbänder, Schläuche oder Fußbodenbeläge
CR	Chlor-Butadien-Kautschuk	<ul style="list-style-type: none"> Gute Hitze-, Witterungs- und Ozonbeständigkeit Mittlere Ölbeständigkeit Neigung zur Kristallisation bei T < 0 °C 	Neoprene [®] , Baypren [®]	Faltenbälge, Staubkappen, Brems-schläuche, Dämpfer im Automobil, allgemeine und Bauindustrie
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk	<ul style="list-style-type: none"> Sehr gutes Hitze- und Witterungsverhalten Hohe Ozonbeständigkeit Sehr gute Abrieb- und Verschleißfestigkeit Sehr gutes Kälteverhalten Hohe Heißwasser- und Dampfbeständigkeit Nicht ölbeständig 	Dutral [®] , Nordel [®] , Buna EP [®] , Keltan [®] , Vistalon [®]	O-Ringe, Formteile, Lagerelemente in Lebensmittel- und Getränkeindustrie sowie im Automobil gegen Bremsflüssigkeiten
NBR	Acrylnitril-Butadien-Kautschuk	<ul style="list-style-type: none"> Gute Ölbeständigkeit Gute Dämpfung (mit steigendem ACN-Gehalt) Gute Abrieb- und Verschleißigenschaften Schlechte Ozonbeständigkeit Mäßige Alterungsbeständigkeit Mäßige Kälteeigenschaften in Abhängigkeit vom ACN-Gehalt 	Perbunan [®] , Nipol [®] , Europrene [®] , Buna N [®]	Radialwellendichtringe, Dämpfer, Tilger, Membranen, Hydraulik- und Pneumatikteile, Präzisionsformteile, O-Ringe in der Antriebs- und Elektrotechnik, in der Lebensmittelindustrie, für Isolierung gegen Kälte
IIR	Butyl-Kautschuk	<ul style="list-style-type: none"> Ausgezeichnete Hitze-, Ozon- und Witterungsbeständigkeit Chemische Beständigkeit gegen Säuren, Heißwasser, Glykol Gasundurchlässig Gute Kältebeständigkeit Hohe Dämpfung, stark temperaturabhängig 	Esso Butyl [®] , Polysar Butyl [®]	Membranen, O-Ringe für Heißwasser und Dampfanwendungen

ECO	Ethylenoxid-Epichlorhydrin-Kautschuk	<ul style="list-style-type: none"> Gute Beständigkeit gegen Kraftstoffe, Mineralöle und -fette Gasundurchlässig Kälteresistent 	Hydrin [®] , Herclor [®] , Epichlomer [®]	Membranen, Formteile, Motorlager im Automobil
HNBR	Hydrierter Acrylnitril-Butadien-Kautschuk	<ul style="list-style-type: none"> Gute Öl- und Benzinbeständigkeit wie bei NBR, jedoch höhere Temperaturbeständigkeit Gute Alterungsbeständigkeit Gute Abrieb- und Verschleißigenschaften 	Therban [®] , Zetpol [®]	Radialwellendichtringe, Dämpfer, Tilger, Membranen, Hydraulik- und Pneumatikteile, Präzisionsformteile, O-Ringe in der Antriebs- und Elektrotechnik, aber auch im Sanitär- und Trinkwasserbereich
ACM	Acrylat-Kautschuk	<ul style="list-style-type: none"> Ausgezeichnete Hitze-, Ozon- und Alterungsbeständigkeit Sehr gute Ölbeständigkeit Hohe Dämpfung 	Nipol AR [®] , Hytemp [®] , Noxtite [®]	Radialwellendichtringe, O-Ringe, Flachdichtungen, Formteile für Getriebe im Kfz-Bereich; für den Öl- und Kühlmittelkreislauf
AEM	Ethylen-Acrylat-Kautschuk	<ul style="list-style-type: none"> Ausgezeichnete Hitze- und Witterungsbeständigkeit Hohe Ozonbeständigkeit Hohe Dämpfung Mittlere Ölbeständigkeit 	Vamac [®]	Dämpfer, Tilger, Flachdichtungen für Getriebe im Kfz-Bereich, für den Öl- und Kühlmittelkreislauf
FKM	Fluor-Kautschuk	<ul style="list-style-type: none"> Sehr gute Öl- und Chemikalienbeständigkeit Extreme Hitze- und Witterungsbeständigkeit Schlechte Kälteeigenschaften unterhalb von –20 °C (Ausnahme: Spezialtypen) 	Viton [®] , Fluorel [®] , Tecnoflon [®] , Dai-EI [®] , Noxtite [®]	Radialwellendichtringe, O-Ringe, Membranen, Formteile, Präzisionsteile im Motorenbau, in Hydraulik, Chemie- und Prozesstechnik sowie Luftfahrt
FFKM	Perfluor-Kautschuk	<ul style="list-style-type: none"> Ausgezeichnete Medienbeständigkeit Extreme Hitze- und Witterungsbeständigkeit Spezialtypen bis –20 °C beständig 	Kalrez [®] , Simriz [®]	Radialwellendichtringe, O-Ringe, Membranen, Formteile, Präzisionsteile in der Chemie- und Prozesstechnik, Raumfahrt bzw. gegen aggressive Medien und Dampf
VMQ	Methyl-Vinyl-Polysiloxan	<ul style="list-style-type: none"> Extreme Hitzebeständigkeit Ausgezeichnetes Tief-temperaturverhalten bis –60 °C Niedrige Festigkeit 	Silopren [®] , Silastic [®] , Elastosil [®]	Präzisionsteile, O-Ringe, Flachdichtungen, Membranen für Medizintechnik
FVMQ	Fluormethyl-Vinyl-Polysiloxan	<ul style="list-style-type: none"> Hohe thermische, Alterungs-, Ozon- und Witterungsbeständigkeit 	Silastic [®] , FluorSilicon [®]	Formteile, Membranen etc., überwiegend für Luftfahrt
PVMQ	Phenyl-Vinyl-Polysiloxan	<ul style="list-style-type: none"> Sehr gute Tieftemperaturbeständigkeit, Ozon-, UV- und witterungsbeständig 	GE-Sil [®] , Silastic [®] , Silopren [®] , Elastosil [®]	Formteile, O-Ringe, Membranen
AU	Polyester-Urethan	<ul style="list-style-type: none"> Gute Alterungs- und Ozonbeständigkeit Hohe Reiß- und Verschleißfestigkeit 	Adiprene [®] , Pellethan [®]	Pneumatik- und Hydraulikdichtungen für allgemeinen Maschinenbau, Land- und Baumaschinen, Fördertechnik

Einsatz von Elastomerwerkstoffen in verschiedenen Dichtmedien

	NR	SBR	CR	IIR	EPDM	NBR	ECO	HNBR	ACM	ACM	AEM	FKM	FFKM	VMQ	FVMQ	AU
Max. Höchsttemperatur [°C]	+80	+100	+120	+130	+140	+120	+130	+150	+160	+160	+150	+210	+230	+200	+175	+90
Zulässige Tieftemperatur [°C]	-60	-50	-40	-40	-40	-30	-40	-30	-30	-30	-40	-20	-15	-60	-60	-30
Motorenöle	-	-	(+)	-	-	(+)	+	+	+	+	+	+	+	(+)	+	0
Getriebeöle	-	-	(+)	-	-	(+)	+	+	+	+	+	+	+	(+)	+	0
Hypoidöle	-	-	(+)	-	-	(+)	+	+	+	+	+	+	+	(+)	+	0
ATF-Öle	-	-	(+)	-	-	(+)	+	+	+	+	+	+	+	(+)	+	0
Fette	-	-	(+)	-	-	(+)	+	+	+	+	+	+	+	(+)	+	+
Polyalkylen-glycole (PAG)	-	-	-	-	(+)	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
Polyalphaolefine (PAO)	-	-	0	-	-	(+)	+	+	+	+	+	+	+	(+)	+	0
HLP nach DIN 51524 Teil 2	-	-	(+)	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
HLP nach DIN 51524 Teil 3	-	-	(+)	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
HETG-Rapsöl	-	-	-	-	-	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	0
HEES - Synthetische Ester	-	-	-	-	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	0
HEPG-Polyglykole	-	-	-	-	0	(+)	-	(+)	-	-	-	-	-	-	-	-
Gruppe HFA	-	-	-	-	-	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-
Gruppe HFB	-	-	-	-	-	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-
Gruppe HFC	-	-	-	(+)	(+)	+	-	(+)	-	-	-	-	-	-	-	-
Gruppe HFD	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Heizöl EL und L	-	-	0	-	-	(+)	(+)	(+)	-	0	0	+	+	0	0	-
Bremsschicht DOT3 /DOT4	0	0	-	(+)	++	-	+	-	-	-	-	-	+	0	0	-
Benzin	-	-	-	-	-	(+)	+	(+)	-	-	-	-	+	-	++	-
Wasser	0	0	(+)	+	++	+	0	+	0	0	0	(+)	++	0	0	0
Wasschläuche	0	0	(+)	(+)	++	+	0	+	-	-	-	(+)	++	0	0	-
CIP/SIP	-	-	-	-	-	+	0	(+)	-	-	-	+	++	0	0	-
Luft	0	0	+	+	++	+	+	++	++	++	++	++	++	++	++	-

++ sehr gut, + gut, 0 mäßig, - nicht geeignet; Spezialtypen können von den vorliegenden Angaben abweichen.

Der Partner dieses Buches

Freudenberg Sealing Technologies
 GmbH & Co. KG
 Höhrerweg 2-4
 69465 Weinheim
 Internet: www.FST.com



Freudenberg Sealing Technologies ist Teil des breit diversifizierten, international tätigen Familienunternehmens Freudenberg. Der Technologiespezialist entwickelt, produziert und liefert für die Kunden in der Automobil-, der Zulieferer- und der Allgemeinen Industrie eine breite Palette an dichtungstechnischen Lösungen – von der in enger Zusammenarbeit mit den Kunden entwickelten Einzellösung bis hin zu weltweit standardisierten, kompletten Dichtungspaketen. Alle wichtigen Automobilhersteller, großen Zulieferer und mehr als 15000 Kunden in der Allgemeinen Industrie beziehen Dichtungen von Freudenberg.

Seit 1960 ist Freudenberg an der japanischen NOK beteiligt. Beide Partner arbeiten insbesondere in der Dichtungstechnik eng und erfolgreich in einem globalen Netzwerk zusammen. Sie haben eine Vielzahl von Gemeinschaftsunternehmen in aller Welt gegründet und ihre Unternehmensstrukturen aufeinander abgestimmt. Meilensteine der Globalisierung waren die Gründung der Freudenberg-NOK General Partnership, Plymouth/USA, im Jahr 1989 sowie der NOK Freudenberg Asia Holding im Jahr 1996. Gemeinsam verfügen die Partner über mehr als 50 Produktionsstätten weltweit.

Der Simmerring®, 1929 bei Freudenberg durch Prof. Walther Simmer entwickelt, war die Grundlage des heute mehr als 80000 unterschiedliche Produkte umfassenden dichtungstechnischen Sortiments. Dabei entstand eine Vielzahl an wegweisenden Innovationen. Heute übernehmen Dichtungen unter anderem Zusatzfunktionen, um Signale an das Bremssystem oder die Motorsteuerung zu übermitteln.

Innovationen in der Dichtungstechnik sind undenkbar ohne eine tiefe Kenntnis der Elastomere. Bei Freudenberg arbeiten rund 250 Experten weltweit in der Werkstoffentwicklung. Das Unternehmen setzt mehr als 1600 verschiedene Compounds und mehr als 850 verschiedene Rohstoffe ein. Modernste Analysemethoden und eigene Modelle zur Berechnung und Simulation von Werkstoffverhalten tragen dazu bei, Dichtungen von Freudenberg Sealing Technologies immer weiter zu verbessern.