



Autoren: Prof. Dr.-Ing. Heinz K. Müller und Dr. Bernard S. Nau

Eine besondere Herausforderung an den Ingenieur ist eine sichere Abdichtung von Maschinen und Anlagen. Wenn es um den unerwünschten Austritt von Flüssigkeiten oder Gasen aus Maschinen, Aggregaten und Anlagen geht, wird die häufig unterschätzte Kunst des Abdichtens zum zentralen Thema.

www.fachwissen-dichtungstechnik.de befasst sich auf allen Ebenen mit dem Vermeiden oder mit der kontrollierten Eindämmung von Leckage. In 24 Fachkapiteln werden die physikalischen Grundlagen und die vielfältigen Techniken des Abdichtens in klarer Sprache und mit prägnanten Bildern beschrieben. **fachwissen-dichtungstechnik** liefert damit die notwendigen Informationen zu Gestaltung, Auswahl, Entwicklung und Betrieb von Dichtungen und Dichtsystemen.

Inhaltsverzeichnis der Fachkapitel

Allgemeine Grundlagen

1. Grundbegriffe der Dichtungstechnik
2. Polymerwerkstoffe
3. O-Ring: Theorie und Praxis
4. Fluidströmung im engen Dichtspalt

Abdichtung bewegter Maschinenteile

5. Hydraulikdichtungen
6. Pneumatikdichtungen
7. Abstreifer
8. Wellendichtringe ohne Überdruck
9. Wellendichtringe mit Überdruck
10. Fanglabyrinth-Dichtungen
11. Stopfbuchs-Packungen
12. Gleitringdichtungen: Grundlagen

13. Gleitringdichtungen: Gestaltung
14. Gleitringdichtungen: Werkstoffe
15. Kolbenringe für Motoren und Verdichter
16. Drosseldichtungen für Flüssigkeiten
17. Drosseldichtungen für Gase
18. Gewinde-Wellendichtungen
19. Zentrifugal-Wellendichtungen
20. Magnetflüssigkeits-Dichtungen
21. Membran- und Faltenbalgdichtungen

Abdichtung ruhender Maschinenteile

22. Flanschabdichtung: Grundlagen
23. Flanschdichtungen: Bauformen
24. Statische Dichtungen: Sonderbauformen

Sponsoren: www.fachwissen-dichtungstechnik.de wird unterstützt von

 ISGATEC [®] Dichten. Kleben. Polymer.	ISGATEC GmbH Am Exerzierplatz1A • 68167 Mannheim Tel:+49(0)621-7176888-0 • Fax:+49(0)621-7176888-8 info@isgatec.com • www.isgatec.com
 SEALWARE [®]	SEALWARE International Dichtungstechnik GmbH Feldbergstr.2 • 65555 Limburg Tel:+49(0)6431-9585-0 • Fax:+49(0)6431-9585-25 info@sealware.de • www.sealware.de
 VERBAND TECHNISCHER HANDEL Fachgruppe Dichtungstechnik	VTH Verband Technischer Handel e.V. Prinz-Georg-Straße 106 • 40479 Düsseldorf Tel:+49(0)211-445322 • Fax:+49(0)211-460919 info@vth-verband.de • www.vth-verband.de
 Xpress seals Dichtungen für Hydraulik	xpress seals GmbH Elbring 14 • 22880 Wedel Tel:+49(0)4103 92828-10 • Fax:+49(0)4103 92828-69 michael.mueller@xpress-seals.com • www.xpress-seals.com



2

Prof.Dr.-Ing. Heinz K. Müller · Dr. Bernard S. Nau

Polymerwerkstoffe

Polymere in der Dichtungstechnik. Vorteile und Anwendungsgrenzen wichtiger Elastomerwerkstoffe. Molekülstruktur, Fluidaufnahme, Glasübergang. Physikalische Grundlagen der Elastomere. Polymerketten, Vernetzung, freies Volumen, Löslichkeit, E-Modul, Härte. Chemischer und thermischer Abbau. Setzen. Spannungs-Dehnungsverhalten: Hooke-, Mooney-Rivlin-Modelle. Eigenschaften sowie chemische und thermische Verträglichkeiten von Basiselastomeren in der Dichtungstechnik. Literatur.

2.1 EINFÜHRUNG

Polymerwerkstoffe sind für die Dichtungstechnik von großer Bedeutung. Viele Dichtungen bestehen insgesamt oder größtenteils aus Polymerwerkstoffen. Der Begriff Polymerwerkstoff umfaßt sowohl Elastomere (Gummi) als auch plastische Polymere. Beide bestehen aus langkettigen Molekülen und sind meist vermischt mit Zugabestoffen, die ihnen spezifische, technisch erwünschte Eigenschaften verleihen. Diese *Compounds* sind in der Regel geschützt, und die speziellen Details ihrer Zusammensetzung und Verarbeitung werden normalerweise von den Herstellern nicht preisgegeben. Obwohl man Polymerwerkstoffe in der Regel nach ihren Basispolymeren benennt, sind sie dadurch nicht im Einzelnen spezifiziert. Zum Beispiel gibt es unter der Bezeichnung Nitril-Gummi (bzw. Nitril-Kautschuk) eine Vielzahl unterschiedlicher Werkstoffmischungen für die Dichtungstechnik. Wie in der Dichtungstechnik üblich, werden die Begriffe „Elastomer“ und „Gummi“ hier und in folgenden Kapiteln gleichbedeutend verwendet.

Dieses Kapitel behandelt Elastomere, das heißt Polymere mit elastischen Eigenschaften. Neben dem thermoplastischen Polymer PTFE haben Elastomere für die Dichtungstechnik eine Schlüsselfunktion.

2.2 VORTEILE DER ELASTOMERE

Elastomere sind für die Dichtungstechnik wegen ihrer hervorragenden physikalischen Eigenschaften von besonderer Bedeutung:



(a) *Kleiner Elastizitätsmodul bei gleichzeitig großer Bruchdehnung (>100%)*: Gummi erlaubt große Herstellungstoleranzen für die Dichtungen wie auch für die sie aufnehmenden Bauteile. Zugleich entstehen bei der Vorspannung bzw. Zusammenpressung von Dichtungen verhältnismäßig geringe Kontaktspannungen. Bild 1 zeigt die Bruchdehnung für eine Reihe von Elastomeren unterschiedlicher Härte.

(b) *Große Querdehnungszahl ν , nahe dem theoretischen Grenzwert 0,5*: Deshalb verhält sich Gummi nahezu inkompressibel, ähnlich wie eine Flüssigkeit. Gummi überträgt einen hydrostatischen Druck gleichmäßig in alle Richtungen. Ein kompakter Elastomerdichterring, auf dessen freie Oberfläche ein Fluidruck einwirkt, überträgt diesen auch auf die Kontaktflächen, an denen er die angrenzenden Bauteile berührt.

(c) *Kleiner Schubmodul in Verbindung mit Inkompressibilität*: Gummi läßt Formänderungen ohne große Reaktionskraft und ohne Änderung seines Volumens zu. Deshalb paßt sich eine Gummidichtung leicht einem beliebigen Einbauraum an. Ein einseitig druckbelasteter O-Ring in einer rechteckförmigen Nut nimmt deshalb ohne weiteres eine nahezu rechteckige Form an.

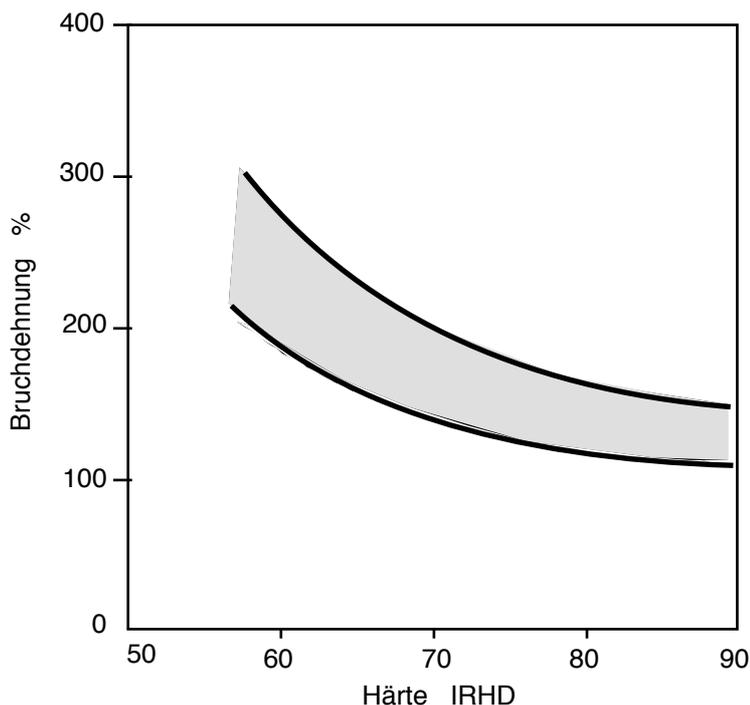


Bild 1
Bruchdehnung
in Abhängigkeit
von der Härte

(Bereich für die
Hochleistungs-
Elastomere
HNBR, FPM, TFEP)

2.3 ANWENDUNGSGRENZEN VON ELASTOMERWERKSTOFFEN

Elastomerwerkstoffe haben einige charakteristische physikalische Eigenschaften, die ihre technische Anwendung wesentlich einschränken; dies sind:



(a) *Fluidaufnahme*: Angrenzende Fluide gehen an der Oberfläche der Dichtung in Lösung und diffundieren sodann ins Innere des Gummitteils. Dieser Vorgang hält an, bis die Konzentration ein Gleichgewicht erreicht, das vom speziellen Gummi und der Art des Fluids abhängt. Als Folge der Fluidaufnahme quillt und erweicht der Gummi. Wenn sich ein *Gas* im Gummi gelöst hat, führt ein plötzlicher Druckabfall zur sogenannten "explosiven Dekompression", wobei sich im Inneren des Gummis schlagartig Gasblasen bilden. Dies kann zu einer ernststen Schädigung führen.

(b) *Reversibler Übergang* von gummielastischem Verhalten zu glasartigem Verhalten, wenn die Temperatur unter einen kritischen Wert sinkt, die Glasübergangstemperatur T_g . Für die meisten Elastomere liegt T_g weit unter der Raumtemperatur. Bild 2 zeigt den Bereich von T_g für einige NBR- und FPM- Elastomere. Der Übergang ist nicht scharf sondern erstreckt sich über einen Temperaturbereich, dessen Mitte die Temperatur geringster Nachgiebigkeit des Gummis ist. In diesem Bereich zeigt das Elastomer lederartiges Verhalten. Im Gegensatz zum Verhalten oberhalb von T_g verliert eine Gummidichtung im Übergangsbereich die Eigenschaft, den Fluiddruck hydrostatisch zu übertragen. Dadurch entsteht Leckage, die jedoch bei höherer Temperatur wieder verschwindet.

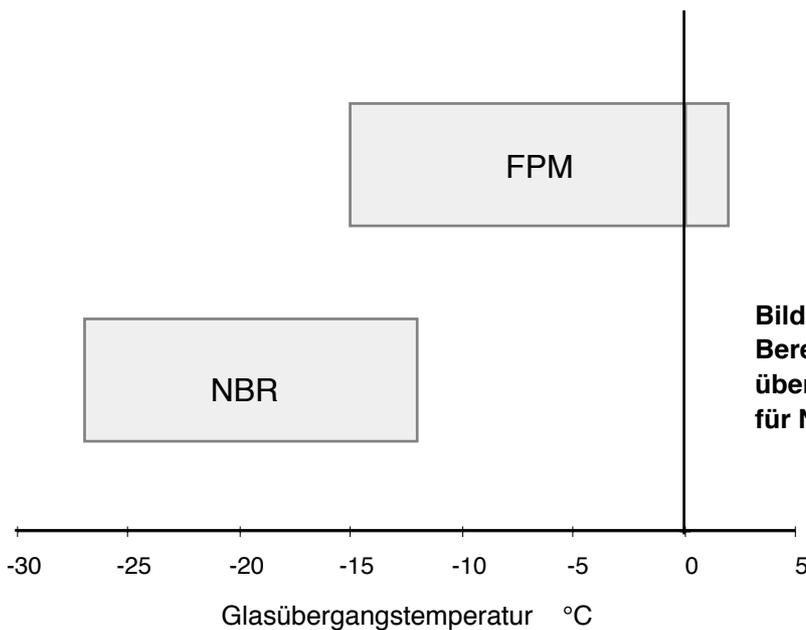


Bild 2
Bereiche der Glas-
übergangstemperatur
für NBR und FPM

2.4 PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN DER ELASTOMERE

Das Verhalten der Elastomere spiegelt die Vorgänge auf der molekularen Ebene wider. Diese sind gekennzeichnet durch eine dreidimensionale Vernetzung gefalteter und verdrehter Poly-



merknetten, mit verteilten Querbindungen und einem begrenzten „freien Volumen“ zwischen den Ketten. Angeregt durch thermische Energie drehen sich die Kettensegmente zufallsverteilt um die Bindungsstellen. Wenn Gummi sich dehnt, werden die verdrehten Ketten zusehends gestreckt. Dies ist der Grund für die außergewöhnliche Dehnfähigkeit. Die thermische Querbewegung um die Drehpunkte der Kettensegmente bewirkt, daß sich deren Enden zusammenziehen. Dadurch entsteht der Widerstand gegen Verformung. Die Größe dieses Widerstands bestimmt den Elastizitätsmodul, der somit bei steigender thermischer Energie, also mit steigender Temperatur, zunimmt. Die Zunahme des Elastizitätsmoduls ist als Joule-Gough-Effekt bekannt. Die statistische Thermodynamik liefert folgenden vereinfachten Ausdruck für die Dehnungsenergie W eines Elastomers:

$$W = 0.5 NkT (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) \quad (1)$$

Dabei sind $\lambda_{1,2,3}$ die relativen Dehnungen (gespannte Länge/ungespannte Länge) in den drei Koordinatenrichtungen, kT die thermische Energieeinheit (k = Boltzmannkonstante), N die Anzahl der schwingenden Kettensegmente pro Volumeneinheit ($N/2$ = Vernetzungsdichte), und T die absolute Temperatur. Die Größe $0.5 NkT$ ist gleich dem Schubmodul G des Werkstoffs, der E-Modul ist $E = 2(1+\nu)G$.

Dieser Zusammenhang für den E-Modul unterscheidet sich wesentlich von dem der meisten technisch verwendeten Werkstoffe. Bei diesen hängt der Verformungswiderstand direkt mit der Energie zusammen, die zur Überwindung der molekularen Anziehungskräfte nötig ist, und sie nimmt deshalb mit steigender Temperatur ab.

Bei Gummi ist eine thermische Bewegung der Molekülketten nur möglich, wenn dafür freier Raum zur Verfügung steht, nämlich das schon erwähnte freie Volumen. Dieses ermöglicht aber Fluidmolekülen, in das Innere eines Gummikörpers vorzudringen mit der Folge, daß dieser quillt. Das Quellverhalten eines Elastomers in Verbindung mit einem speziellen Fluid wird vom Energiezustand bestimmt. Die zur Trennung der molekularen Bestandteile eines Materials (z.B. Elastomer oder Flüssigkeit) notwendige Energie wird als kohäsive Energiedichte (Cohesive energy density, CED) bezeichnet. Ist der CED-Wert des Elastomers und der Flüssigkeit wenig verschieden, dann quillt das Elastomer. In der Praxis wird der Wert $CED^{0.5}$ als „Löslichkeitsparameter“ bezeichnet, der für wichtige Elastomere und Flüssigkeiten in Fachbüchern zu finden ist. Ungünstigerweise haben flüssige Kohlenwasserstoffverbindungen und Elastomere etwa gleich große Löslichkeitsparameter (7 bis $10 \text{ (cal/cm}^3\text{)}^{0.5}$), was die Neigung zum Quellen begünstigt. Der Wert für Wasser ist ungefähr 23, für polare Flüssigkeiten wie Methanol liegt er zwischen diesem und dem von Kohlenwasserstoffen. Die Quellneigung ist deshalb hier geringer.

Die Orte freien Volumens in einem Elastomer-Compound verändern sich dauernd, zeitlich und räumlich, indem die schnell oszillierenden Molekülketten an einer Stelle freien Raum füllen und an anderer Stelle freigeben. Bei abnehmender Temperatur verlangsamt sich dieser dynamische Prozeß und kommt schließlich zum Stillstand, das Elastomer wird steif. Diese



molekularen Vorgänge stehen hinter dem Begriff der Glasübergangstemperatur T_g . Oberhalb von T_g verhält sich Gummi wie eine Flüssigkeit, darunter wie eine unterkühlte Flüssigkeit, d.h. wie Glas. Im Glaszustand sind die Molekülketten durch schwache van-der-Waals-Kräfte verbunden, der Glasübergang ist somit reversibel. Die Glasübergangstemperatur T_g hängt mit dem chemischen Aufbau der Polymerketten zusammen. Weichmacher vergrößern die freien Volumina und verringern demgemäß T_g . Füllstoffe haben in diesem Zusammenhang einen verhältnismäßig geringen Einfluß.

Diese Zusammenhänge werden wesentlich komplexer, wenn man einzelne technische Dichtungswerkstoffe mit ihrem komplexen chemischen Aufbau sowie den diversen Mischungen und Herstellungsprozessen betrachtet. Bei thermoplastischen Werkstoffen gibt es ähnliche Zusammenhänge, mit dem Unterschied, daß bei diesen eine starke kovalente Vernetzung fehlt. Sie neigen deshalb bei stetig wirkender Belastung zum Kriechen, es sei denn, daß schwache van-der-Waals-Kräfte dies verhindern, wie beispielsweise bei den Polyurethanen, die deshalb gummiartiges Verhalten zeigen.

Tabelle 1 Vergleich der physikalischen Eigenschaften von dichtungstechnischen Elastomeren, Thermoplasten und Metall-Legierungen.

Eigenschaft bei 20°C	Symbol	Einheit	Elastomere	Thermoplaste	Metall-Leg.
E-Modul	E	MPa	4-20	300-5000	ca. 200 000
Schubmodul	G	MPa	1-2		50 000
Kompress.modul/E	K/E	—	100—1000		1
Querdehnungszahl	ν	—	0,46—0,499?		0,30—0,45
Zugfestigkeit		MPa	2—20	1—250	50—2000
Reißdehnung		%	10—200(+)	0,1[Fließen]	
Kerbzähigkeit		MPa m ^{0,5}	kein Bruch f.T>>T _g	2—5	5—200
Wärmeleitfähigkeit	k	Wm ⁻¹ K ⁻¹	0,1—0,2	0,1—0,5	10—150
Wärmedehnungszahl	α	MK ⁻¹	100—300	50—200	10—25
Glasübergangstemp.	T _g	°C	-50 — +10	-	-
Dichte	ρ	kg m ⁻³	0,9—1,2	0,9—2,2	2—12

Tabelle 1 zeigt wichtige Eigenschaften von dichtungstechnischen Elastomeren und Thermoplasten im Vergleich mit üblichen metallischen Werkstoffen. Der Begriff ‘Härte’ wird in der Dichtungstechnik häufig verwendet. Die Einheit ist ‘*International Rubber Hardness Degrees (IRHD)*’, bisweilen wird auch die ältere Einheit ‘*Shore*’ verwendet. Die Gummihärte ist eine leicht meßbare Größe, äquivalent zum E-Modul. Zwischen dem E-Modul und der Härte besteht ein logarithmischer Zusammenhang. Eine Zunahme von 80 auf 85 IRHD bedeutet somit einen stärkeren Anstieg des E-Moduls als eine Zunahme von 70 auf 75 IRHD. Die Härte der meisten Dichtungs-Elastomere liegt im Bereich 60 bis 90 IRHD, entsprechend einem Bereich des E-Moduls zwischen ungefähr 4 und 20 Nmm⁻². Oberhalb 90 IRHD sind Elastomere extrem hart.



2.5 EINSATZGRENZEN VON DICHTUNGS-ELASTOMEREN

Viele Anwendungsprobleme bei dichtungstechnischen Elastomeren hängen zusammen mit Veränderungen der Gummistruktur aufgrund folgender direkter oder indirekter chemischer Einflüsse:

(a) *Chemischer Abbau* des Basiselastomers durch Kontakt mit einem Fluid (abgedichtetes oder umgebendes). Dies kann zur Bildung oder Auftrennung von Vernetzungen zwischen den Polymerketten oder zu anderen Veränderungen der Moleküle führen. Weiterhin können Bestandteile des Elastomer-Compounds extrahiert werden.

(b) *Thermischer Abbau bei höherer Temperatur* infolge eines beschleunigten chemischen Angriffs oder anderer, dadurch ausgelöster Vorgänge.

Beim chemischen Abbau von Gummi steht die Abbaurate k_r in exponentiellem Zusammenhang mit der absoluten Temperatur T :

$$k_r = k_0 \exp\{-E_a / RT\} \quad (2)$$

Dabei bedeuten: R die Gaskonstante, E_a eine Aktivierungsenergie und k_0 eine für den speziellen Abbauprozess charakteristische Konstante.

Wie schon erwähnt können bei Elastomeren auch *physikalische* Vorgänge Probleme verursachen:

(c) *Folgen der Fluidaufnahme*: Quellung von wenigen Volumenprozent bis zu 100% oder mehr. Sowohl die Löslichkeit s als auch der Diffusionskoeffizient D hängen ab von der speziellen Kombination von Elastomer und Fluid (D ist ein Maß für die Diffusionsrate). Die Bilder 3 und 4 zeigen Werte von D beziehungsweise s in Abhängigkeit von der Temperatur. Die Löslichkeit von Gasen (entfernt vom kritischen Punkt) ist proportional zum Druck. Der zeitliche Verlauf der Diffusion hängt wiederum von der Materialkombination und der absoluten Temperatur ab. Der Vorgang der explosiven Dekompression wurde bereits erwähnt. Seine Folgen können gemildert werden, indem man den Einbauraum einschränkt. Generell kann Quellung zur Spaltextrusion, und, bei relativ bewegten Kontaktflächen zu Verschleiß führen.

(d) *Starke thermische Ausdehnung*: Elastomere haben lineare thermische Ausdehnungskoeffizienten im Bereich von 10^{-4} bis $3 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, ähnlich wie Flüssigkeiten. Deshalb dehnen sich Elastomere bei großer Temperaturdifferenz im Verhältnis zum aufnehmenden Gehäuse stark aus.

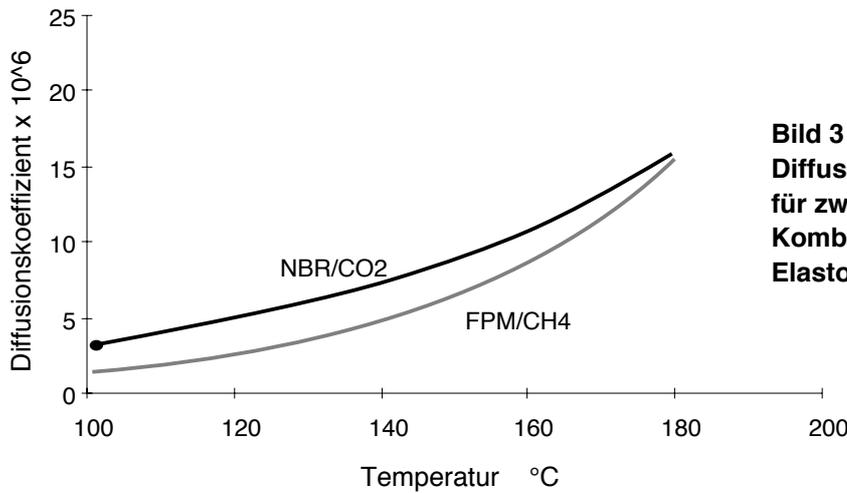


Bild 3
Diffusionskoeffizient D
für zwei verschiedene
Kombinationen von
Elastomer und Gas

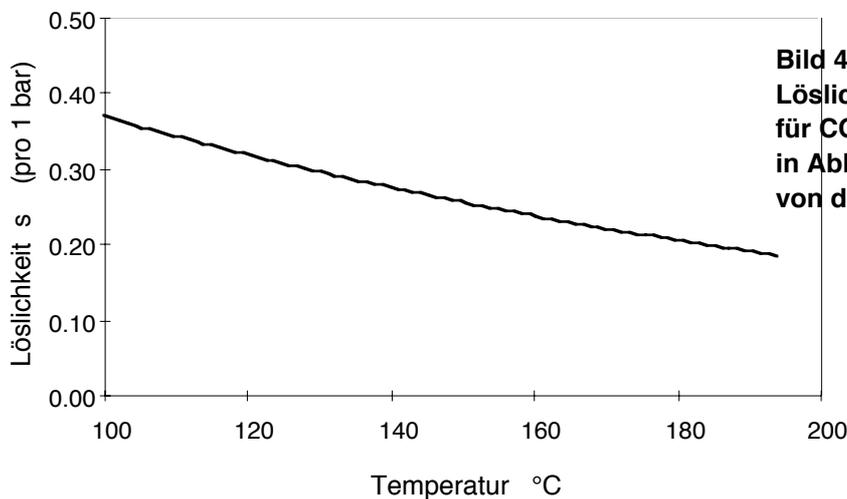


Bild 4
Löslichkeit
für CO₂ in NBR
in Abhängigkeit
von der Temperatur

(e) *Strukturänderungen:* Bei Annäherung an die Glasübergangstemperatur vermindert sich die elastische Nachgiebigkeit reversibel und der Elastizitätsmodul nimmt zu. Im verformten Elastomer treten vorübergehende Strukturänderungen auf; gefaltete Molekülketten gleiten und Füllstoffstrukturen können sich verändern. Dies kann auch zu Gestaltänderungen, etwa zum Setzen (compression set) führen.

(f) *Temperaturabhängige Eigenschaften:* Bei dichtungstechnischen Elastomeren nimmt der Elastizitätsmodul mit zunehmender Temperatur etwas ab. Bild 5 zeigt, wie auch ihre Festigkeit mit steigender Temperatur abnimmt.

Wie schon erwähnt sind auch Löslichkeit und Diffusion temperaturabhängig; die meisten übrigen physikalischen Eigenschaften bleiben im Wesentlichen unbeeinflusst, außer in der Nähe der Glasübergangstemperatur. Die physikalisch bedingten Anteile des Setzbetrags (compression set) und der Spannungsrelaxation können „einfrieren“, wenn sie bei höherer Temperatur



entstanden sind und hernach das Elastomer sehr schnell abgekühlt wurde. Nach einer Entlastung können die reversiblen physikalischen Eigenschaften des Elastomers wieder hergestellt werden.

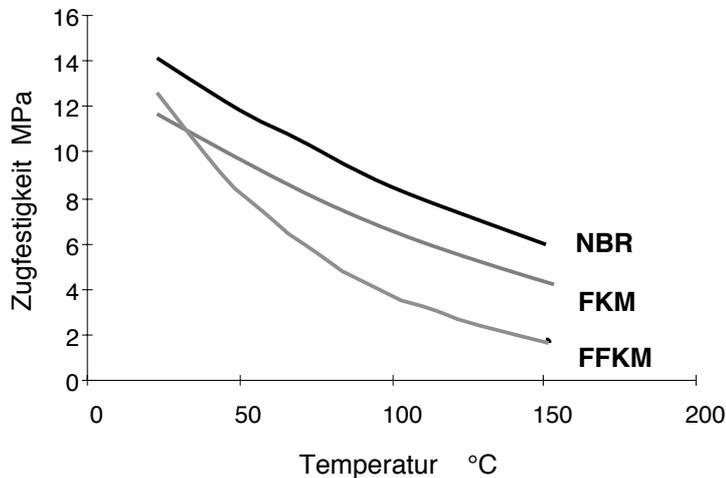


Bild 5
Zugfestigkeit
einiger Elastomere
in Abhängigkeit
von der Temperatur

Während die oben beschriebenen chemischen Abbauerscheinungen irreversibel ablaufen, sind die physikalischen zumindest im Prinzip reversibel. Folgende Veränderungen haben dichtungstechnische Bedeutung:

- **Härteänderungen** treten häufig in Form einer Härtezunahme und letztlich von Versprödung auf. Alternativ kann ein Elastomer aber auch durch Extraktion oder Fluidaufnahme erweichen. Letztere Erscheinung ist zwar im Prinzip reversibel, was jedoch in der Praxis nicht unbedingt der Fall ist.
- **Setzbetrag C (compression set)**: Darunter wird eine unumkehrbare Änderung der Form und der Abmessungen einer Dichtung verstanden. In der Regel vermindert sich dabei die Anpreßkraft (Dichtkraft) und somit auch die Abdichtwirkung. Der Setzbetrag C ist definiert in Bezug auf das Maß I , um das das Elastomerteil von einer metallischen Gegenkontakfläche zusammengedrückt wird. Der zeitabhängige prozentuale Setzbetrag

$$C(t) = 100 \times \{ I(t) - I(0) \} / I(0) \quad (3)$$

reicht somit von Null bis zu 100%. Im letzteren Fall ist die anfänglich durch die Zusammendrückung erzeugte Vorspannung gänzlich abgebaut. Ein bekanntes Beispiel für das Setzen ist die Berührfläche eines O-Rings, die nach dem Ausbau permanent eben bleibt. Am Setzen sind sowohl chemische als auch physikalische Einflüsse beteiligt, letztere sind reversibel und finden binnen einiger Minuten statt, erstere sind irreversibel in einer Zeitskala von Wochen. Ein Setzbetrag von wenigen Prozent kann unerheblich sein, 50-100% können jedoch in der Praxis erhebliche Probleme verursachen.



- *Schrumpfen* infolge chemischer Extraktion (Auslaugung) von Bestandteilen des Gummi-körpers durch das Fluid. Der Unterschied zum Setzen besteht darin, daß hier Material aus dem Dichtelement verschwindet.
- *Überfüllung* des Dichtungseinbauraums infolge Quellung und/oder Wärmedehnung mit nachfolgender Spaltextrusion und/oder Bewegungshemmung. Eine O-Ringnut wird deshalb üblicherweise so dimensioniert, daß beim Einbau das O-Ringmaterial 70-80% des verfügbaren Raums einnimmt. Der restliche Nutraum kompensiert Herstellungstoleranzen, Wärmedehnung und eventuelles Quellen des O-Rings.
- *Zeitweiliger Verlust der Dichtungs-Anpreßkraft* kann verursacht werden von temperaturbedingter Schrumpfung und/oder durch den Betrieb nahe der Glasübergangstemperatur, wobei die hydrostatische Druckfortpflanzung im Gummi beeinträchtigt ist. Dieser Effekt tritt eher bei hoch fluorierten Elastomeren auf, weil diese einen verhältnismäßig hohen Wert von T_g aufweisen.
- *Spannungsrelaxation* bezeichnet die Verminderung der Dichtungs-Anpreßkraft und damit eine Störung der Dichtwirkung. In der Regel ist sie ein sekundärer Effekt der oben beschriebenen Erscheinungen.

Mechanische Schädigung von Elastomerdichtungen bei der Montage und Demontage sowie durch Extrusion und Abrieb werden in Kapitel 3 ausführlicher besprochen.

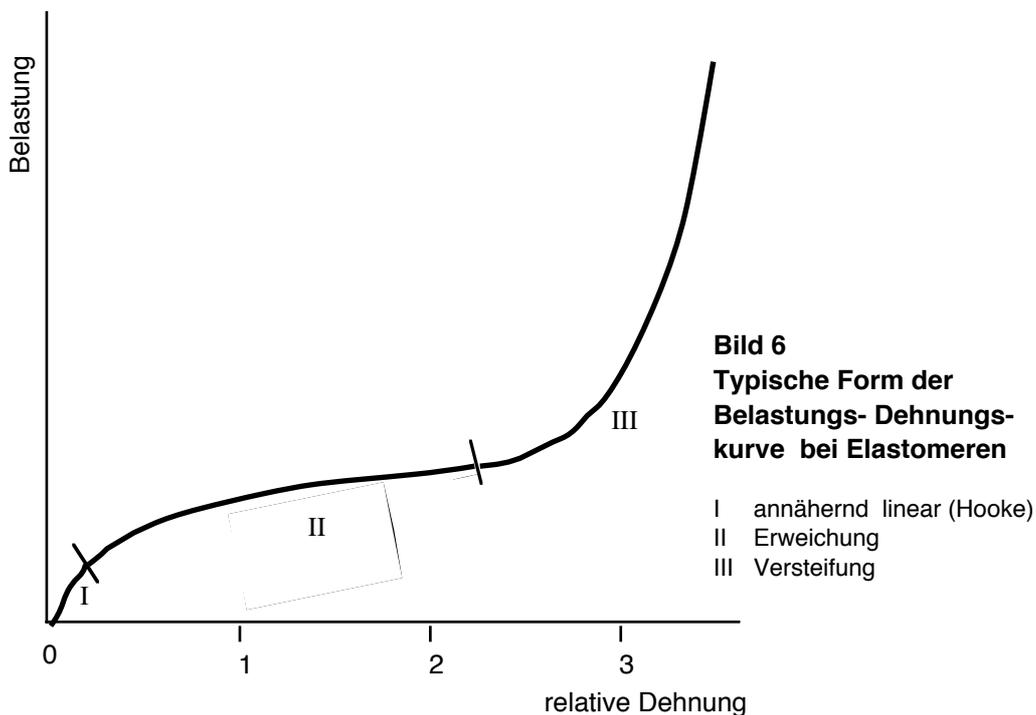
2.5 DAS SPANNUNGS-DEHNUNGSVERHALTEN VON ELASTOMEREN

Der Zusammenhang zwischen Belastung und Verformung ist bei Elastomeren ziemlich ungewöhnlich und komplex. Bei langsamer Lastzunahme folgt ein Elastomer zunächst dem Hoo-keschen-Gesetz, d.h. die Dehnung ist proportional zur Spannung und der E-Modul konstant. Bei weiter zunehmender Last wird das Elastomer zunächst weicher (abnehmender E-Modul), bei noch weiter zunehmender Last dann aber progressiv steifer (zunehmender E-Modul), Bild 6. Dichtungen befinden sich in der Regel in den beiden erstgenannten Bereichen.

Bei abnehmender Belastung entsteht ein typischer Hystereseverlauf, bei dem die Rückverformung zunächst steiler und dann flacher verläuft, bis schließlich der Ausgangszustand erreicht ist. Überraschenderweise verhält sich das Material aber anders, wenn der Belastungszyklus wiederholt wird. Die nachfolgende Belastungs-Verformungsschleife ist nun versetzt und der E-Modul bei zunehmender Belastung ist kleiner als vorher. Weitere Belastungszyklen zeigen einen ähnlichen, jedoch abnehmenden Effekt. Dieses Verhalten wird damit erklärt, daß im Elastomer bei der ersten Belastung die vernetzten Molekülketten eine bleibende Umordnung erfahren, wobei der Verformungswiderstand abnimmt.



Man sollte letzteres im Auge behalten, wenn man den Elastizitätsmodul von Gummi mißt. Ebenso hängt das Verhalten eines Gummiteils davon ab, ob vorher bereits einmal eine bestimmte Dehnung überschritten wurde. Dieser spannungsabhängige Erweichungseffekt erklärt manchmal ein unerwartet verändertes Verhalten von Elastomerdichtungen. Er tritt unabhängig vom Vorhandensein von Füllstoffen auf. Hingegen beeinflussen Füllstoffe den initialen E-Modul (bzw. die Härte). Größere Füllstoffanteile vergrößern den E-Modul deshalb, weil der für die Lastaufnahme wirksame Querschnitt des Elastomerkörpers dabei kleiner ist und man sich somit in einem steiferen Bereich der Belastungs-Verformungskurve befindet.



Bislang wurde lediglich ein langsamer Lastanstieg im Bereich von einigen zehn Sekunden betrachtet. Bei schnell ansteigender oder schwingender Belastung zeigt der Gummi ein anderes Verhalten. Mathematisch gesprochen verhält sich ein Elastomer dabei so, wie wenn der E-Modul eine reale und eine imaginäre Komponente aufwiese. Der Realteil ist ein dynamischer E-Modul, der Imaginärteil bestimmt die Dämpfung, die ihren höchsten Wert bei der Glasübergangstemperatur hat. Bei geringer Dehnungsamplitude ist der dynamische E-Modul unerwartet groß (5 bis 10 -fach erhöht), d.h. der Gummi ist sehr steif; er nimmt dann bei zunehmender Dehnungsamplitude einen niedrigeren konstanten Wert an. Dieser Effekt wird mit einem Auseinanderbrechen schwach gebundener Füllstoffteilchen erklärt.



Mathematische Darstellung des Spannungs-Dehnungsverhaltens

Gummi folgt dem Hookeschen Gesetz nur im Bereich kleiner Dehnungen bis etwa 10%. Bei Dichtungen treten jedoch bisweilen auch größere Verformungen auf. Für dichtungstechnische Belange werden oberhalb des Hookeschen Bereichs zwei Werkstoffmodelle verwendet, das Neo-Hooke-Modell und das Mooney-Rivlin-Modell. Deren Ableitung gründet sich auf die Dehnungs-Energiefunktion W und geht aus von der selbstverständlichen Forderung, daß die Energie unabhängig vom verwendeten Koordinatensystem ist. Es gibt in diesem Sinn drei grundlegende invariante Dehnungsfunktionen, bezeichnet mit I_1 , I_2 , I_3 die jeweils Längen, Flächen und Volumen repräsentieren. Die Energiefunktion ist eine Funktion dieser Größen:

$$W = f(I_1, I_2, I_3) \quad (4)$$

wobei

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2; \quad I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2; \quad I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2,$$

und λ die Dehnungsverhältnisse bedeuten (>1 für Längung infolge Zugspannung). Die Spannungen gewinnt man durch Differenzieren von W . Für einen völlig inkompressiblen Werkstoff ist das Volumen konstant und somit $I_3=1$, wodurch sich die Form der Energiefunktion W vereinfacht.

Das viel verwendete Mooney-Rivlin-Modell gründet sich auf diese Annahme und wird von vielen FE-Programmen unterstützt. Es wurde mit Erfolg bis zu Dehnungen von 100-200% angewendet. Die Mooney-Rivlin-Energiefunktion ist die allgemeinste Energiefunktion erster Ordnung. Sie lautet:

$$W = C_1 (I_1 - 3) + C_2 (I_2 - 3) \quad (5)$$

Für einachsige Zugbeanspruchung führt dies zur folgenden Form eines verallgemeinerten Hookeschen Gesetzes:

$$\sigma = 2 (C_1 + C_2/\lambda) (\lambda - 1/\lambda^2) \quad (6)$$

Der Koeffizient $C_1 = NkT$ ergibt sich aus der kinetischen Theorie. N ist die Vernetzungsdichte, T die absolute Temperatur und k die Boltzmann-Konstante. C_2 ist ein Korrekturfaktor, der etwa 20% von C_1 beträgt, und eine meist brauchbare Näherung ist $C_2 = 0$ (außer bei Druckspannung). Die Werte von C_1 und C_2 werden aus einem Diagramm gewonnen, in dem die reduzierte Spannung $\sigma/2(\lambda - 1/\lambda^2)$ über $1/\lambda$ aufgetragen ist. Dies ergibt eine Gerade mit der Steigung C_2 und C_1 als Schnittpunkt mit der y -Achse.

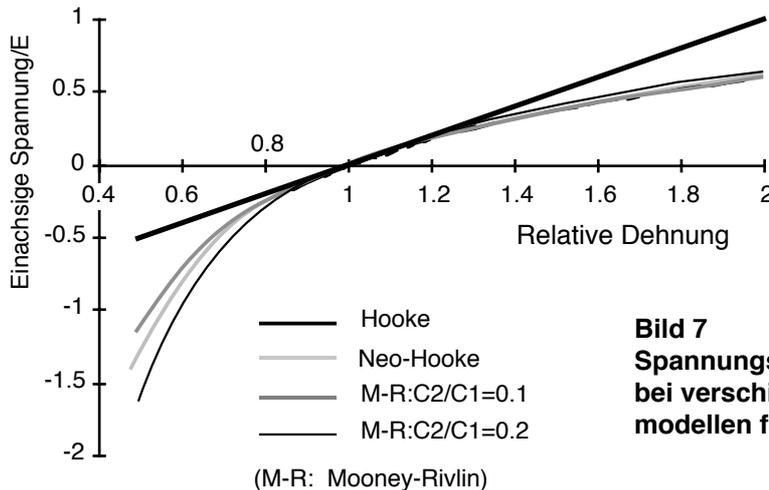
Für ein- und zweidimensionale Dehnung ergibt das Mooney-Rivlin-Modell brauchbare Ergebnisse für Dehnungsverhältnisse im Bereich 0.5 (bei Druck) bis 2 (bei Zug). Eine genaue experimentelle Ermittlung der beiden physikalischen Konstanten ist aufwendig. Deshalb wird im Bereich von Dehnungen bis 20% oft das Neo-Hooke-Modell verwendet, das mit nur einer



Konstanten C_1 auskommt. Wenn $C_1=E/6$ und $C_2=0$ gesetzt werden lautet es :

$$\sigma = (E/3) (\lambda - 1/\lambda^2) \tag{2.7}$$

Bild 7 zeigt einen Vergleich der Modelle, wobei der geringe Einfluß von C_1 zu erkennen ist.



Für die Querdehnungszahl dichtungstechnischer Elastomere kann annähernd $\nu = 0.4995$ angenommen werden. Bei geringer Dehnung hängt der genaue ν -Wert ab von der Mischung und von der Verarbeitung des Gummis. Bei der Verwendung von FE-Programmen zur Modellierung von Elastomerdichtungen kann dieser nahe bei 0,5 liegende ν -Wert zu Problemen führen. Das Formelwerk von FE-Programmen enthält oft einen Faktor $\{1 - 2\nu\}^{-1}$, der bei $\nu \rightarrow 0,5$ über alle Grenzen wächst und somit zu unbrauchbaren Ergebnissen führt. Man vermeidet diese Probleme mit speziell für inkompressible Werkstoffe entwickelten Finiten Elementen, die von vielen FE-Programmpaketen angeboten werden. Rechnet man stattdessen mit einem ν -Wert zwischen 0,49 und 0,45 zeigt sich, daß der geringe Unterschied zum wahren Wert nur scheinbar belanglos ist. Tabelle 2 zeigt, daß kleine Unterschiede des ν -Werts eine große Auswirkung auf die Kompressibilität haben. Der Fehler fällt bei der Berechnung des Verhaltens von Dichtungen bei hohem hydrostatischem Druck besonders ins Gewicht. Eine Veränderung von ν zwischen 0,48 und 0,4998 verändert die Kompressibilität um den Faktor 100!

Tabelle 2 Einfluß der Querdehnungszahl ν auf die Kompressibilität
[K = Kompressionsmodul, E = Elastizitätsmodul]

ν	0,33	0,42	0,48	0,498	0,4998
K/E	1	2	10	100	1000

2.6 ELASTOMERE IN DER DICHTUNGSTECHNIK

Elastomer-Mischungen für Dichtungen enthalten neben dem Basiselastomer eine Reihe von Zusätzen. Speziell sind dies *Vulkanisiermittel*, *Füllstoffe*, *Antioxydantien* (Zusätze die den Abbau verhindern) und *Weichmacher*. Ein Basiselastomer kann man sich vorstellen als ein Durcheinander gefalteter Ketten des Basispolymers, da und dort verbunden (vernetzt) mit benachbarten Ketten und darin eingekapselte Füllstoffnester, Bild 8. Eine Polymerkette kann aus vielen Tausend Monomereinheiten, mit einer nur zweistelligen Anzahl von Querverbindungen zu anderen Ketten. Die Kette hat in der Regel ein „Rückgrat“ aus Kohlenstoffatomen mit mehr oder weniger komplexen Seitengruppen und Querbindungen. Bild 9 veranschaulicht eine Reihe von monomeren Einheiten aus denen sich die Polymerketten verschiedener Elastomere zusammensetzen.

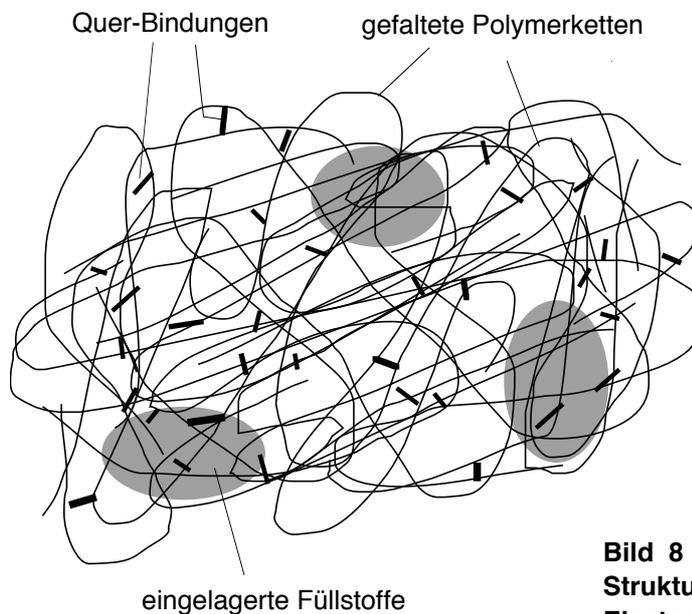


Bild 8
Strukturschema eines
Elastomer-Werkstoffs

Die Strukturen lassen erkennen weshalb Gummi einerseits inkompressibel und andererseits bei Scherbeanspruchung nachgiebig ist. Die früher erwähnten freien Volumina wechseln ständig ihre Position und haben deshalb wenig Einfluß auf die statische Kompressibilität. Andererseits setzen die gefalteten Ketten einer Formänderung wenig Widerstand entgegen.

Beim Vernetzen (Vulkanisieren) entstehen viele Querverbindungen. Dadurch wird die Verformbarkeit unter Last eingeschränkt. Die thermische Bewegung der Kettenglieder zwischen den Querverbindungen erzeugt bei der Verformung des Elastomers die Rückstellkraft. Unter Vernetzen versteht man die chemische Reaktion zur Herstellung von Querverbindungen, die in der Regel stark kovalente Bindungen sind. Das Vernetzen erfolgt in der Praxis in metallischen

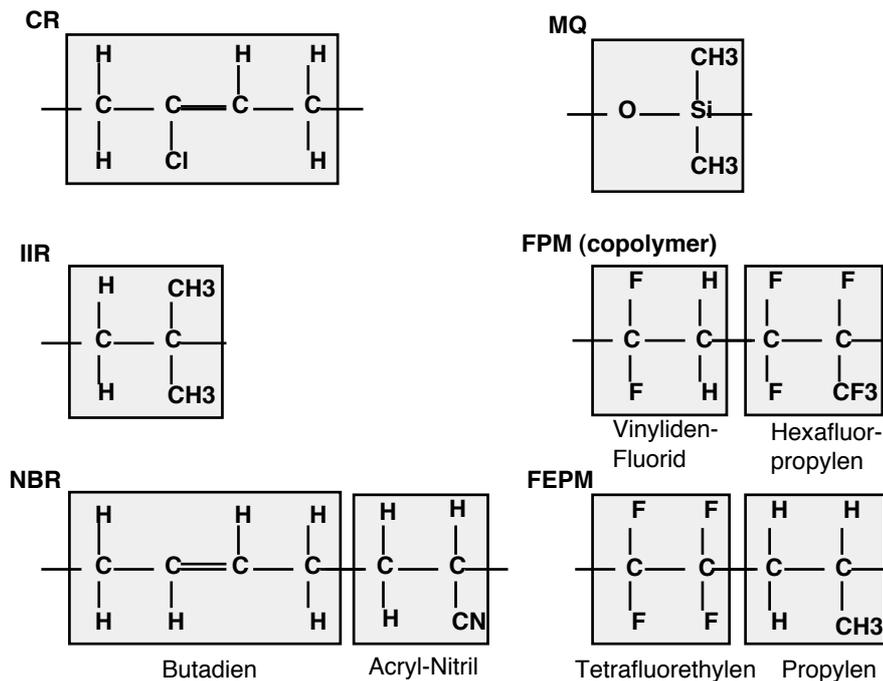


Bild 9
Beispiele von Monomeren dichtungstechnischer Elastomere

Vulkanisierformen unter Druck und erhöhter Temperatur. Fluorpolymere (FKM, FFKM) und bestimmte andere Elastomere erfordern noch eine mehrere Stunden dauernde, drucklose Nachvernetzung bei höherer Temperatur. Dabei können Reaktionsgase ausdiffundieren. Als *Vernetzungsmittel* werden verwendet: *organische Peroxide* (Peroxid-Vulkanisation), *Amine*, *Schwefel* (das klassische Vulkanisiermittel für Naturgummi) und *Biphenole* (für Fluor-Elastomere). Die Vernetzungsdichte bestimmt die Eigenschaften des Elastomers. Sie wird hauptsächlich durch die Wahl und die Menge des Vernetzungsmittel beeinflusst. Der Zusammenhang zwischen Vernetzungsdichte und E-Modul wurde bereits im Zusammenhang mit den Modellen zur Gummielastizität aufgezeigt.

Polyurethane unterscheiden sich von anderen Elastomeren durch die Art der Vernetzung. Bei Polyurethanen hat diese eher eine physikalische als eine chemische Basis. Anstatt der üblichen kovalenten Querbindungen haben Polyurethane clusterartige Wasserstoffbindungen die demselben Zweck dienen. Bei erhöhter Temperatur, bei etwa 200°C, gehen diese verhältnismäßig schwachen Bindungen verloren und das Polyurethan zeigt dann plastisches Verhalten. Diese Polymere verhalten sich wie Thermoplaste und können in Spritzformen verarbeitet werden. Die hohe Zugfestigkeit und Abriebfestigkeit der Polyurethane kommt dadurch zustande, daß sich die physikalischen Querbindungen während der Verformung immer wieder neu bilden und deshalb eine günstigere Verteilung aufweisen.



Einige *Füllstoffe* bewirken eine aktive Verstärkung des Elastomers durch schwache van-der-Waals-Bindungen. Sie werden als verstärkende Füllstoffe bezeichnet. Dazu gehören insbesondere Ruß - der am meisten verwendete Füllstoff - sowie fein gemahlenes Siliciumoxid. Auch Form und Größe der Füllstoffpartikel haben einen Einfluß. Zugfestigkeit und Härte nehmen mit dem Gehalt an verstärkenden Füllstoffen zu. Dies hat jedoch seine Grenzen, weil sonst der Gummi für dichtungstechnische Zwecke zu hart wird. Außerdem werden Baryt, Kaliumkarbonat, Kalziumsilikat, Magnesiumkarbonat, Talcum und Schlämme als Füllstoffe verwendet.

Weichmacher verbessern die physikalischen Eigenschaften bei tiefer Temperatur. Überdies erleichtern sie das Mischen und Formpressen, allerdings auf Kosten einer verstärkten Alterung bei höherer Temperatur. Obwohl nicht empfehlenswert, werden Weichmacher manchmal auch einfach zur Vergrößerung des Volumens und damit zur Verbilligung des Produkts verwendet.

Anti-Oxidationsmittel hemmen Reaktionen des Gummis beispielsweise mit Sauerstoff, Ozon und unter UV-Strahlung. Verwendet werden komplexe organische Verbindungen oder Wachse um damit besondere Arten des chemischen Angriffs zu beherrschen.

2.7 HERSTELLUNG VON ELASTOMERMISCHUNGEN

Die Herstellung beginnt in der Regel mit der Mischung einer bestimmten Charge der Ausgangsstoffe, daraus werden Streifen oder Pellets geformt und diese bis zur Weiterverarbeitung gelagert. Eine nächste Stufe ist die Erzeugung von Zuschnitten zum Einlegen in Vielteil-Vulkanisationsformen, in die zur Herstellung von Verbundteilen auch Metallteile mit eingelegt werden. Nun folgt die Vulkanisation (Vernetzung) unter Druck bei vorgegebener Temperatur. Nach dem Auswerfen werden die Teile entgratet und gegebenenfalls nachbearbeitet.

Es ist nicht einfach, in einer Vielteilform sämtliche Teile in engen Toleranzen herzustellen. In Verbindung mit thermisch bedingten Spannungen und dem hohen Formdruck kann dies zu Problemen mit den fertigen Dichtungen führen. Im Hinblick darauf ist das Spritzformen besser, jedoch sind im Falle von Gummi die erforderlichen Fertigungseinrichtungen wesentlich aufwendiger als bei plastischen Polymeren und somit oft unwirtschaftlich.

Einige Elastomere, insbesondere Fluor-Elastomere, schrumpfen in der Form verhältnismäßig stark, was es schwierig macht, enge Toleranzen einzuhalten. Dies spiegelt sich wider in den standardisierten Toleranztabellen für O-Ringe aus Elastomer. Zum Beispiel beträgt die Querschnittstoleranz $\pm 0,1$ mm für einen mittelgroßen O-Ring mit einer Schnurdicke von 3.53 mm, viel größer als bei Metallteilen üblich. Verschiedene Eigenschaften, etwa die Härte, die Reißdehnung, der Setzbetrag, das Quellverhalten usw. werden zur Kontrolle des Mischungsverhältnisses und des Vernetzungsgrads während des Herstellungsprozesses überwacht.



Thermogravimetrie ist ein modernes Verfahren, mit dem man den Beginn von Abbauprozessen in Elastomeren bestimmen kann. Dabei wird in einer speziellen Einrichtung die Gewichtsveränderung einer kleinen Probe verfolgt, während unter kontrollierten Bedingungen die Temperatur stetig erhöht wird. Aus den Unstetigkeiten im Verlauf des Gewichts über der Zeit erkennt man den Beginn verschiedener Abbauprozesse. Man erhält dadurch einen wertvollen Einblick in das Verhalten des Materials und eine Hilfe für die Planung speziellerer Versuche; überdies kann auf diese Weise die Einheitlichkeit gefertigter Produkte überwacht werden. Eine Einschränkung für die Anwendung dieses Verfahren ist die lange Zeitdauer einiger chemisch bedingter Abbauprozesse.

Weil die Eigenschaften der Elastomere von so vielen Faktoren abhängen, können sich nominell gleiche Produkte von unterschiedlichen Herstellern wesentlich unterscheiden. Bei unzureichender Kontrolle der Herstellprozesse können sich auch nacheinander verarbeitete Chargen vom gleichen Hersteller erheblich unterscheiden. Dies unterstreicht, wie wichtig es ist, beim Kauf von Elastomeren für kritische Anwendungsfälle die Produktqualität zu überwachen.

2.8 BASIS-ELASTOMERE (ELASTOMER-GATTUNGEN)

Dichtungstechnische Elastomer-Compounds werden in der Regel nach ihrem Basispolymer benannt. Solche Gattungsbezeichnungen geben aber nur einen oberflächlichen Hinweis auf die zu erwartenden Eigenschaften. Tabelle 3 enthält die in der Dichtungstechnik vorwiegend verwendeten Basis-Elastomere. Die Tabelle ist so angeordnet, daß die thermische und chemische Widerstandsfähigkeit nach unten hin zunimmt. Die angegebenen Kurzzeichen entsprechen den ISO- und ASTM-Normen. Die Bezeichnungen nach der chemischen Zusammensetzung sind in der Tabelle *kursiv* gedruckt, mit dem einheitlichen Zusatz *...-Elastomer*. In anderen Veröffentlichungen werden oft die äquivalenten Begriffe *...-Kautschuk* bzw. *...-Gummi* verwendet. Die Basiselastomere werden im Übrigen unter einer Vielzahl verschiedener Handelsnamen geführt.

Höhere Beständigkeit ist in aller Regel mit einem höheren Preis verbunden. Eine Dichtung aus Fluor-Elastomer (FKM) kann das Zehnfache einer Dichtung aus Nitril-Elastomer (NBR) kosten, eine Perfluor-Elastomer-Dichtung (FFKM) wiederum das Zehnfache einer Fluorelastomer-Dichtung. Leider haben Dichtungen mit höherer chemischer und thermischer Beständigkeit oft ungünstigere physikalische Eigenschaften. Deshalb muß bei einer kritischen Anwendung der Dichtungswerkstoff besonders umsichtig ausgewählt werden. Das Hauptkriterium bei der Auswahl eines Elastomer-Compounds ist in der Regel die Verträglichkeit mit dem abgedichteten und dem außenseitigen Fluid bei allen im Betrieb auftretenden Temperaturen. Bild 10 zeigt eine Reihe günstiger und ungünstiger Kombinationen von Elastomer und Fluid. In der Praxis sind noch andere Details von Bedeutung, etwa die Betriebstemperatur und die erwartete Lebensdauer.



Tabelle 3 In der Dichtungstechnik hauptsächlich verwendete Elastomere

Kurzzeichen ISO 1629 ASTM 1418	Bezeichnung nach der chemischen Zusammensetzung	Bemerkungen zur Anwendung
NR	Naturgummi	Hoch elastisch; verschleißfest; In der Dichtungstechnik wenig verwendet.
CR	<i>Chloropren</i> -Elastomer	In der Dichtungstechnik wenig verwendet
IIR	<i>Isobuten-Isopren</i> -Elastomer („ <i>Butyl</i> “- Elastomer)	sehr undurchlässig; nicht beständig gegenüber Mineralöl.
NBR	<i>Acrylnitril-Butadien</i> -Elastomer („ <i>Nitril</i> “-Elastomer)	am häufigsten verwendetes Dichtungs- elastomer; mineralölbeständig; mittlere Wärmebeständigkeit.
AU EU	<i>Polyester-Urethan</i> <i>Polyether-Urethan</i>	sehr abriebfest; begrenzt wärmebeständig; nicht heißwasserbeständig.
EPDM	<i>Ethylen-Propylen-Dien</i> -Elastomer	Geeignet für Heißwasser/Dampf und Phosphat- ester; nicht für Mineralöl und Diester.
ACM AEM	<i>Polyacrylat</i> -Elastomer („ <i>Acryl</i> “-) <i>Ethylen-Acrylat</i> -Elastomer	im Automobilbau verwendet; wirtschaftlich.
HNBR	<i>Hydriertes</i> <i>Acrylnitril-Butadien</i> -Elastomer	Höhere Wärmebeständigkeit und chemisch widerstandsfähiger als NBR
MQ VMQ PMQ FMQ	<i>Methyl-Silikon</i> -Elastomer <i>Vinyl-Methyl-Silikon</i> -Elastomer <i>Phenyl-Methyl-Silikon</i> -Elastomer <i>Fluor-Methyl-Silikon</i> -Elastomer	Weitreichende Temperaturbeständigkeit, nicht abriebfest. FMQ ist ölbeständig
FKM	<i>Fluor</i> -Elastomer	hohe Wärmebeständigkeit; chemisch wider- standsfähig; (begrenzt für Wasser/Dampf) Stärkeres Setzen (Compression set).
FEPM*	<i>Tetrafluorethylen-</i> <i>Propylen</i> -Elastomer	hohe Wärmebeständigkeit; chemisch wider- standsfähig, auch für Wasser/Dampf und Amine; Stärkeres Setzen (Compression set) (* wird oft auch als TFEP bezeichnet)
FFKM	<i>Perfluor</i> -Elastomer	Extreme chemische und thermische Beständigkeit. sehr teuer; Stärkeres Setzen (Compression set).

Zu beachten ist, daß einige Elastomere unverträglich sind mit Mineralölen, die als Schmierstoffe in Lagern und Getrieben und in Einrichtungen der Schmiermittelherstellung verwendet werden. Einige Fluor-Elastomere, beispielweise FKM, sind in einem weiten Temperaturbereich beständig gegenüber hochaggressiven Chemikalien, werden aber angegriffen von scheinbar harmlosen polaren Fluiden wie Heißwasser (oder Wasserdampf), Methanol, schwachen Säuren oder Alkalien. Andererseits ist EPDM mit den letztgenannten Fluiden verträglich, versagt aber seinerseits im Kontakt mit Mineralöl. In Hydraulikzylindern werden in großem Umfang hoch verschleißfeste Polyurethane verwendet, die jedoch bei höherer Temperatur versagen und in heißem Wasser durch Hydrolyse angegriffen werden. Besondere Anforderungen bestehen bei der Abdichtung von synthetischen Hydraulikflüssigkeiten, z.B. Phosphatester. Eine Möglichkeit bieten hier im Prinzip EPDM und Butyl-Elastomere; sie scheiden aber aus,



	NR	AU	CR	VMQ	ECO	ACM	NBR	IIR	EPDM	FVMQ	HNBR	FKM	FEPM	FFKM	PTFE *
Silikonöl	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
Luft		◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
Niedere Alkohole		■	◆	◆	◆	■	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
Wasser bis 80°C	■	■		◆	◆	■	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
Pflanzenöle				◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
Kerosin	■			■	◆	◆	◆	■	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
Mineralöl					◆	◆	◆	■	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
Tierische Öle					◆	■	◆	■	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
Wasser-Glykol		■				■	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
Aliphat. Kohlenwasserstoffe						◆	◆	■	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
Verdünnte Säuren		■				■		◆			◆	◆	◆	◆	◆
Verdünnte Lauge		■				■		◆				◆	◆	◆	◆
Heißwasser über 80°C				◆		■		◆			◆	◆	◆	◆	◆
Aldehyde		■				■		◆		■		◆	◆	◆	◆
Dieselöl, Heizöl		■			◆	◆		■				◆	◆	◆	◆
Benzin		■			◆	◆		■				◆	◆	◆	◆
Amine		■				■		■			◆	■	◆	◆	◆
Chlorierte Lösungsmittel		■				■		■		◆		◆	◆	◆	◆
Aromat. Kohlenwasserstoffe		■				■		■		◆		◆	◆	◆	◆
Schwefelwasserstoff		■				■		■		◆		◆	◆	◆	◆
Ketone		■				■		◆		■		◆	◆	◆	◆
Wasser-Öl-Emulsionen		■				■		■		■		◆	◆	◆	◆
Aliphat. Phosphatester						■		■		■		◆	◆	◆	◆
Aromat. Phosphatester						■		■		■		◆	◆	◆	◆
Synthetische Schmieröle						■		■		■		◆	◆	◆	◆

Bild 10 Allgemeine Leitlinien für die Verträglichkeit von Elastomeren und Fluiden

* (Obwohl kein Elastomer, ist das plastische Polymer PTFE hier mit aufgeführt)

Die Fluide sind nach zunehmender Aggressivität geordnet, die Elastomere nach zunehmender Widerstandsfähigkeit. Im konkreten Fall sind die Hinweise der Hersteller zu beachten!

wenn sie zusätzlich mit Mineralölen oder Di-Estern in Berührung kommen. EP-Additive in Getriebeölen (Hoch- druckzusätze für Grenzreibung) können bei vielen Elastomeren verheerende Schäden anrichten. In diesem Fall sind Polyacrylat-Elastomere (ACM) besser geeignet, obwohl diese wiederum im Kontakt mit Wasser hydrolysieren. Aromatische oder halogenisierte Lösungsmittel erfordern die Anwendung von Fluor-Elastomeren. Bei Temperaturen über 200°C können eigentlich nur noch Fluor-Elastomere eingesetzt werden, wobei spezielle Perfluor-Elastomere die höchste Wärmebeständigkeit (bis ca.325°C) aufweisen. Bild 11 gibt Hinweise auf Temperatureinsatzgrenzen unter günstigen Bedingungen. Man sollte jedoch daran denken, daß die Betriebsbedingungen oft alles andere als günstig sind.

In der Ölbohrtechnik haben sich die in den Spülflüssigkeiten enthaltenen Korrosions-Inhibitoren (Amine) als sehr aggressiv gegenüber manchen Elastomeren erwiesen. Für Dichtungen kommen hier Elastomere auf der Basis von FEPM, FFKM, HNBR und EPDM in Betracht. Für Rohöl, das Anteile von Schwefelwasserstoff enthält, wird FEPM empfohlen.



Dichtungswerkstoffe, die im Betrieb radioaktiver Strahlung ausgesetzt sind, müssen in Bezug auf Alterungsbeständigkeit besonders sorgfältig ausgewählt werden. Selbst nur dem Sonnenlicht oder atmosphärischem Ozon ausgesetzte Elastomere können schnell angegriffen werden, ein Problem für den Einsatz bei Gebäudedichtungen, Automobilfenstern und für Dichtstreifen von Schwimmbädern. Bei diesen Anwendungen sollte der Einsatz von Polychloropren, Butyl und VMQ-Silikongummi erwogen werden. Nitrilgummi und Naturgummi sind hier ungeeignet.

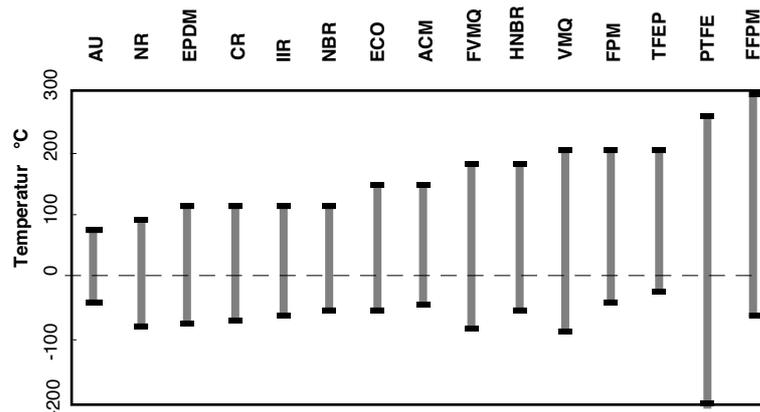


Bild 11 Temperatur-Einsatzbereiche von Basis-Elastomeren

Bei der Montage von Elastomerdichtungen kann die Reibung hinderlich sein. Deshalb wird oft ein Schmiermittel auf die Dichtung und die Gegendichtfläche des Gehäuses aufgebracht. Dabei sollte man jedoch immer eine eventuelle Unverträglichkeit in Betracht ziehen. Keinesfalls sollte man für die Abdichtung von Mineralöl oder Mineralfett Naturgummi, Butyl- oder Ethylen-Propylen-Elastomer verwenden, ebenso nicht Silikongummi für die Abdichtung von Silikonöl oder Silikonfett.

Es sei nochmals betont, daß Bild 10 lediglich allgemeine Hinweise auf die Verträglichkeit bzw. Unverträglichkeit zwischen den Basis-Elastomeren und bestimmten Fluiden enthält. In der Praxis beeinflussen die Betriebstemperatur, die geforderte Lebensdauer und viele andere Faktoren die Auswahl eines Elastomers für eine bestimmte Anwendung. Es kann jedoch auch vorkommen, daß ein Hersteller für einen speziellen Einsatz ein „modifiziertes“ Basiselastomer anbietet, obwohl dieses zu einer Klasse gehört, die unter den speziellen Bedingungen sonst als ungeeignet angesehen wird.

Eine weitere Verträglichkeitsforderung gilt für Dichtungen in der Nahrungsmittelindustrie und der Medizintechnik, die keinesfalls Gift- oder Reizstoffe enthalten dürfen. Bei diesen Einsatzbereichen sind die Gummimischungen in Übereinstimmung mit den Regeln und Vorschriften der Gesundheitsbehörden auszuwählen.



Tatsächlich bewegt man sich bei der Auswahl geeigneter Elastomer-Compounds oft in einem potentiellen Minenfeld, besonders dann, wenn entsprechende Erfahrungen fehlen. Deshalb ist es empfehlenswert, die Auswahl zusammen mit Dichtungsherstellern zu treffen, die die Möglichkeiten und Grenzen ihrer Elastomere im Detail kennen.

2.9 LITERATUR

Eisele, U., Introduction to polymer physics, Springer-Verlag, Berlin, 1990.

Mullins, L., Engineering with rubber, Rubber Chemistry & Technology, 59,3,G69—G83, 1986,

Ogden, R. W., Recent advances in the phenomenological theory of rubber elasticity, Rubber Chemistry & Technology, 59,3,361-383,1986.

Treloar, L. R. G., 1975, "The physics of rubber elasticity." Oxford University Press, London.

Gohl, W.: Elastomere Dicht- und Konstruktionswerkstoffe, Lexika-Verlag, Grafenau 1977

Williams, J. G. ,1980, "Stress analysis of polymers." Ellis Horwood, Chichester.

Nagdi, K.: Gummi-Werkstoffe, Vogel-Verlag, Würzburg 1981

Müller, H.K., Nau, B.S.: Fluid Sealing Technology, Principles and Applications, M.Dekker Inc., New York, 1998, ISBN 0-8247-9969-0



Hinweise auf Inhaber, Urheberrecht und Verwertung von *www.fachwissen-dichtungstechnik.de*

Inhaber und Betreiber der Domain www.fachwissen-dichtungstechnik.de ist Evelyn Voigt-Müller, Samlandstr. 38, 81825 München, Deutschland.

Der gesamte Inhalt der unter der Domain www.fachwissen-dichtungstechnik.de veröffentlichten Internetpublikation einschließlich der Fachkapitel, die als PDF herunterladbar sind, ist urheberrechtlich geschützt und darf insgesamt oder in Teilen ausschließlich für den persönlichen Gebrauch ohne Vergütung kopiert und verwendet werden. Zitate sind mit Angabe der Quelle ausführlich zu kennzeichnen. Jede anderweitige Verwendung oder Verwertung, Vervielfältigung, Übersetzung, Nachdruck, Vortrag, Entnahme von Abbildungen, Funksendung, Mikroverfilmung und Speicherung auf elektronischen Datenträgern ist vergütungspflichtig und bedarf der schriftlichen Genehmigung durch den Inhaber der Domain (s.o.).

Inhaber des Urheberrechts (Copyright ©) und verantwortlich für den Inhalt von www.fachwissen-dichtungstechnik.de sind die Autoren Dr. Heinz Konrad Müller und Dr. Bernard S. Nau.

Hinweise auf den Inhalt bezüglich Handelsnamen, Warenzeichen und den gewerblichen Rechtsschutz:

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenzeichen usw. in www.fachwissen-dichtungstechnik.de berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten sind und von jedermann benutzt werden dürfen.

Ein Teil der in www.fachwissen-dichtungstechnik.de beschriebenen oder im Bild wiedergegebenen Dichtelemente und Dichtsysteme sind, ohne dass darauf hingewiesen ist, durch Patentanmeldungen, Patente oder Gebrauchsmuster rechtlich geschützt. Insofern berechtigen die wiedergegebenen Beschreibungen und Bilder nicht zu der Annahme, dass die beschriebenen oder dargestellten Gegenstände im Sinne des gewerblichen Rechtsschutzes als frei zu betrachten sind und von jedermann hergestellt oder benutzt werden dürfen. Für die Richtigkeit der Wiedergabe der in www.fachwissen-dichtungstechnik.de direkt oder indirekt zitierten Vorschriften, Richtlinien und Normen sowie für die Anwendbarkeit der konstruktiven Regeln und Hinweise im Einzelfall übernehmen die Autoren und der Betreiber der Domain keine Gewähr.