Dipl. Ing. Bernard Richter, O-Ring Prüflabor Richter GmbH

Lebensdauer von NBR-, EPDM-, HNBR- und FKM-O-Ringen – Darstellung des Standes der Technik von O-Ringen unter Berücksichtigung von Einflüssen durch den Einbauraum (Dichtspalt und Verpressung) und den Betriebsbedingungen (Temperaturen, Medien)

Einführung

Obwohl das Langzeitverhalten von O-Ringen von großer praktischer Bedeutung ist, findet man in der technischen Literatur kaum eine Hilfestellung dazu, um die Belastungsgrenzen der O-Ringe realistisch abschätzen zu können. Der Beitrag soll zunächst einmal aufzeigen, unter welchen Randbedingungen die Auswertung von Langzeitversuchen an O-Ringen nach Arrhenius sinnvoll bzw. zielführend ist. Hierzu soll aufgezeigt werden, was zum Versagen von O-Ringen führt, um ein realitätsnahes Lebensdauerkriterium zu definieren. Dabei wird anhand verschiedener Parameterstudien der Einfluss der Schnurstärke, des Spaltmaßes, der Medien, des Temperaturverlaufes und des Verformungsgrades dargestellt. Darüber hinaus wird erläutert, wie O-Ringe spezifiziert werden müssen, damit der zur Verfügung stehende Stand der Technik auch ausgeschöpft werden kann und inwiefern hier die neue O-Ring Werkstoffnorm ISO/DIS 3601-5 (2013-07) eine brauchbare Hilfestellung bietet. Unter klar definierten Randbedingungen können dann durchgeführte Langzeituntersuchungen realistische Lebensdauergrenzen für den Einsatz von NBR- HNBR-, FKM- und EPDM-O-Ringen aufzeigen.

Wie bzw. wie lange funktionieren O-Ringe

Um zu erkennen, unter welchen Bedingungen O-Ringe versagen, ist es erforderlich, die Wirkungsweise von O-Ringen zu verstehen. Die Dichtwirkung der O-Ringe ergibt sich aus zwei wesentlichen Effekten (siehe Bild 1 [1]):

1. Indem der O-Ring einen Kontakt zu den Dichtflächen herstellt und dabei die Oberflächenrauheiten durch sein gutes Anpassungsverhalten abdichtet
2. Indem er eine Rückstellkraft (Dichtflächenpressung) erzeugt, welche sich unter der Einwirkung von Drücken verstärkt (der O-Ring wird „aktiviert“). Dies ermöglicht es dem O-Ring, dass dieser fast beliebig hohe Drücke abdichten kann. Die realen Begrenzungen ergeben sich durch die Extrusionsbeständigkeit der Werkstoffe (bei einseitiger Druckbeaufschlagung).

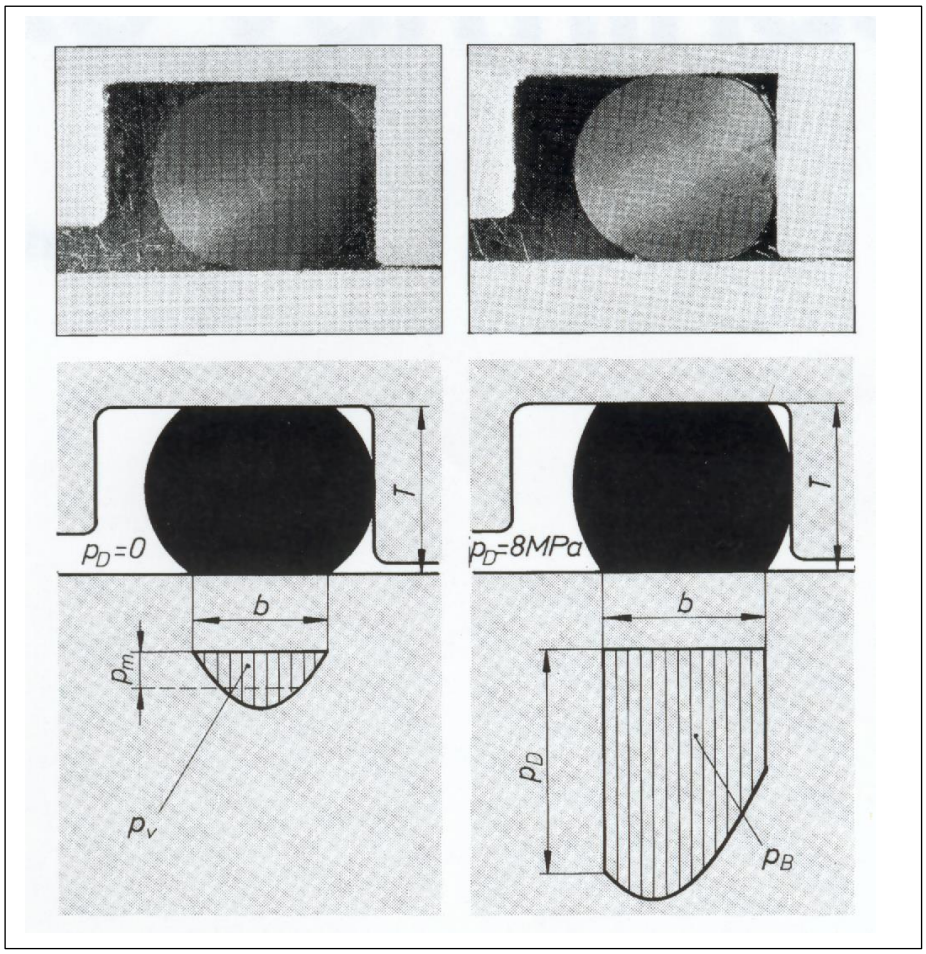


Bild 1 [1]: Der O-Ring als aktives Dichtelement

Eine Leckage tritt dann ein, wenn beide beschriebenen Effekte nicht mehr vorhanden sind. Besonders schön erkennt man diesen Versagensmechanismus bei tiefen Temperaturen. Zunächst erfolgt bei kontinuierlichem Abkühlen des O-Rings ein Verlust der Gummielastizität, damit verliert er den Selbstverstärkungseffekt, das heißt, das Vermögen, druckaktiviert zu werden (siehe oben Punkt 2). Solange aber der O-Ring noch an beiden Kontaktflächen anliegt und nur ein geringer Druck ansteht, wird der

O-Ring aber noch dicht sein, auch wenn dieser sein elastisches Rückstellverhalten ganz oder fast ganz verloren hat. Eine Leckage wird dann erst eintreten, wenn durch ein weiteres Abkühlen durch den relativ großen thermischen Schwund des O-Rings ein Abheben von der Dichtfläche erfolgt und damit ein Spalt entsteht. Da sich O-Ringe unterhalb vom Glasübergangspunkt deutlich langsamer abkühlen [2], können sich damit bei geringen Drücken Tieftemperaturgrenzen von O-Ringen deutlich unterhalb der Glasübergangstemperaturen bzw. der Einfriertemperaturen (kompletter Dichtkraftverlust) ergeben, siehe Bild 2 [3]. Das belegen auch entsprechende Tests

Werkstoff-Bez.	T (100 % DVR) °C	T (Leckage) °C
FPM 1	-21	-35+/-2
FPM 2	-7	-20+/-2
FPM 3	-27	-31+/-2
FPM 5	-33	-44+/-2
FPM 7	-33	-41+/-2
FPM 8	-33	-41+/-2
EPDM	-47	-61+/-2
MVQ	-45	-63+/-2

Bild 2 [3]: Tieftemperaturgrenzen von O-Ring Dichtungen (Flanschabdichtung, 1 bar Druck)

bei der Fa. DuPont [4]. Als Prüfmethode für den Verlust der Gummielastizität wurde hier der TR10-Wert [5,6] angewendet. Tieftemperaturgrenzen von O-Ringen bei hohen Drücken belegen, dass hier der TR10-Wert ein eher konservatives Kriterium für die Versagensgrenze darstellt [7], siehe Bild 3. Dieser Ausflug in das Kälteverhalten von O-Ringen soll aufzeigen, dass bei der Bewertung von Ausfallkriterien für O-Ringe die Anwendungsbedingungen einen großen Einfluss haben, hier der abzudichtende Druck. Für geringe Abdichtdrücke (1 bar) kann man 100% Druckverformungsrest durchaus noch als realistisches Grenzkriterium anwenden, während für erhöhte Drücke der TR10-Wert eines Werkstoffes ein eher konservatives Kriterium darstellt. Erfahrungen zeigen, dass der Grenzwert von 80% Druckverformungsrest ebenso ein sicheres Kriterium für die uneingeschränkte Funktionalität eines O-Rings bei tiefen

	HNBR LT	FKM LT	FKM ULT
TR10-Wert	**-36°C**	**-31°C**	**-40°C**
Minimale Dicht -Temperatur, Prüfdruck 100 bar, erst bei Prüftemperatur aufgebracht	**-41°C**	**-31°C**	**-41°C**

Bild 3 [7] - Minimale Dicht-Temperaturen von druckbeaufschlagten O-Ringen (bei Prüftemperatur)

Temperaturen darstellt. Diese Grenzkriterien für die Funktion von O-Ringen gelten natürlich auch für einen Dichtkraftverlust durch Alterung, wo im Vergleich zum Tieftemperaturverhalten vergleichbare Eigenschaftsänderungen stattfinden, nämlich ein Verlust des Rückstellpotentials und eine Versprödung, nur nicht reversibel wie bei der Kälteeinwirkung sondern irreversibel. Damit ist die Brücke geschlagen zur Thematik des Langzeitverhaltens, wo es darum geht abzuschätzen, unter welchen thermischen Bedingungen mit einem O-Ring Ausfall zu rechnen ist. Diese Lebensdauerprognosen bezüglich des Einflusses durch Wärme und Sauerstoff bzw. Luft können aber nur dann realistische Ergebnisse erbringen, wenn andere Schadensmechanismen als Ausfallursache ausgeschlossen werden können, wie zum Beispiel Abrieb, Spaltextrusion, explosive Dekompression oder ein chemischer Angriff durch das umgebende Öl.

Einflüsse der Rezepturgestaltung

Sollen Langzeitbetrachtungen für O-Ringe angestellt werden, macht das natürlich nur Sinn, wenn die betrachteten O-Ringe auch bezüglich Rezepturqualität und des Vernetzungsgrades definiert sind. Damit stellen die Produkteigenschaften der O-Ringe die eine Schale eines anzustrebenden Ungleichgewichtes zugunsten der Lebensdauerqualität im Vergleich zur Beanspruchung dar, Bild 4. Und da genau liegt in so manchen aufwendig durchgeführten Tests der Schwachpunkt, dass man diese „Lebensdauerqualität“ der O-Ringe nicht ausreichend definiert hat. Die Bilder 5 und 6 lassen erkennen, dass es innerhalb von derselben Polymerfamilie entscheidende Unterschiede im Langzeitverhalten gibt, die Bilder 7 und 8 zeigen auf, dass ein guter Werkstoffkennwert allein nicht ausreicht, wenn der O-Ring nicht angemessen vulkanisiert wird. Die Lebensdauerqualität eines O-Rings ist also nur dann ausreichend

definiert, wenn die funktionsrelevanten Eigenschaften der Rezeptur und der Vernetzungsgrad der O-Ringe, der stark in Abhängigkeit der Verarbeitungsparameter

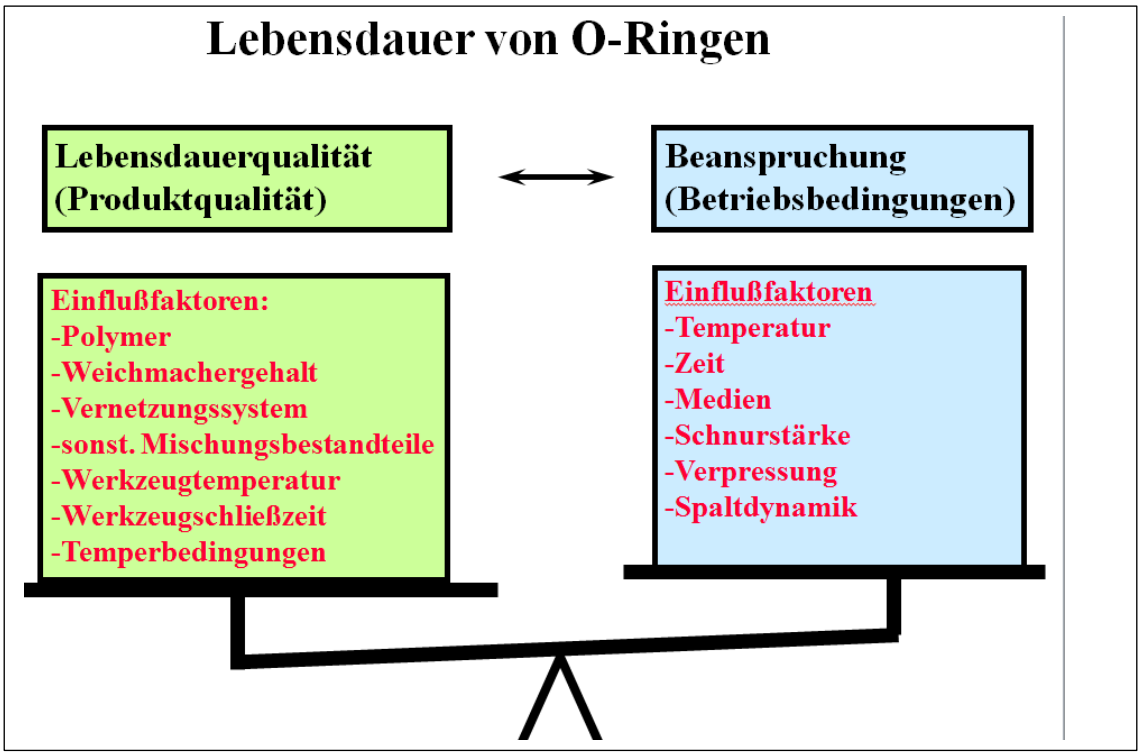
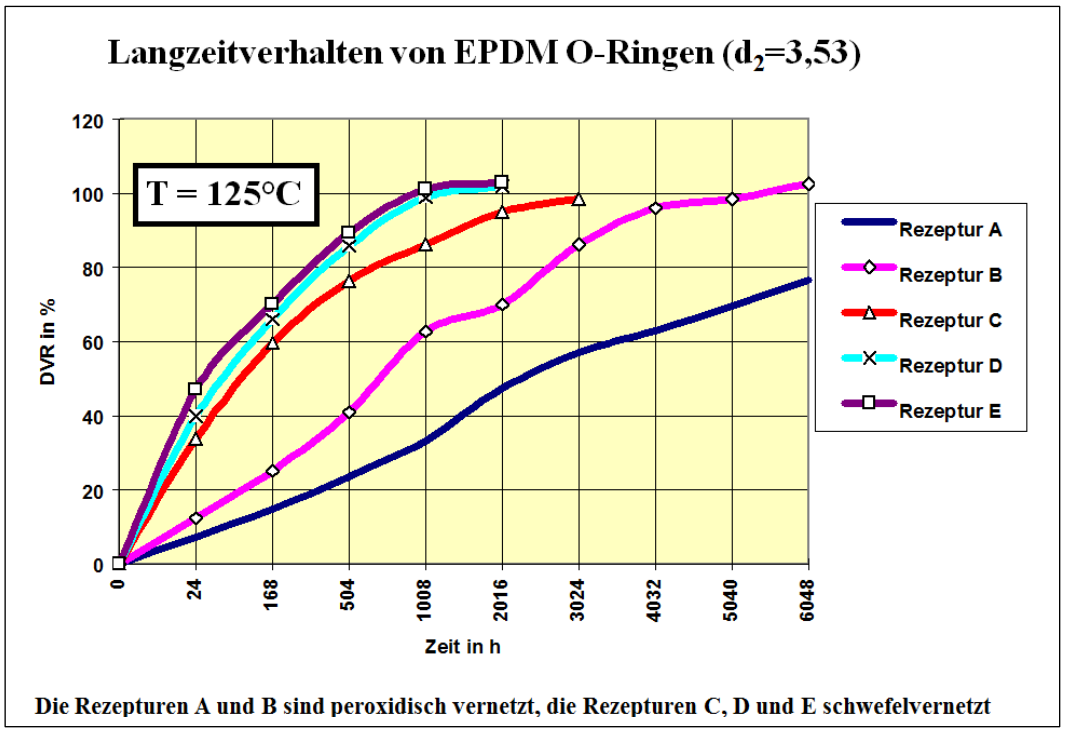


Bild 4: Ein Ungleichgewicht zwischen der O-Ring-Qualität und der Beanspruchung zugunsten des O-Rings sichert die Dichtfunktion ab



.

Bild 5: Das Langzeit-Druckverformungsrest (DVR)-Verhalten verschiedener EPDM O-Ringe

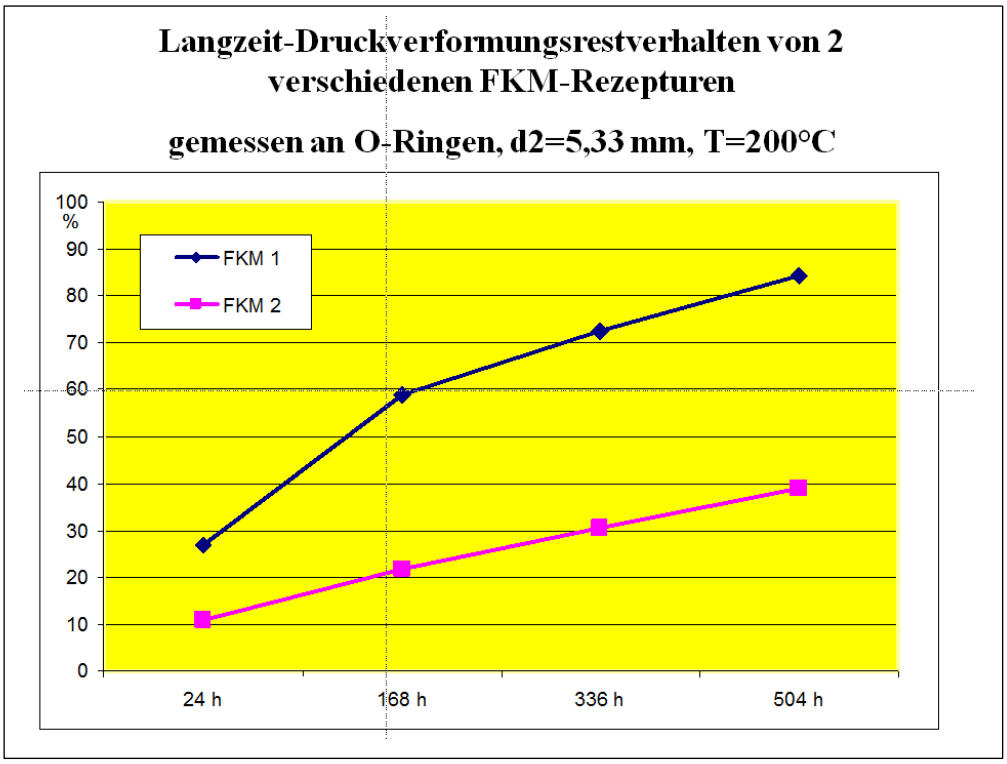


Bild 6: Langzeit Druckverformungsrestverhalten zweier FKM O-Ringe

	REQUIREMENTS	TEST RESULT
A) PHYSICAL PROPERTIES		
PRESS CURE @ 170DEGREE C X 10 MIN		
POST CURE @ 120 DEGREE C X 1 HRS		
HARDNESS SHORE A	90+/-5	86
TENSILE STRENGTH,MPa	10	17
ELONGATION,%	200	332
SPECIFIC GRAVITY		1.513
B)HEAT AGING @ 150 DEGREE C X 70 HRS		
HARDNESS CHANGE, POINTS	+10	+3
TENSILE STRENGTH CHANGE ,%	-25	+4
ELONGATOIN CHANGE ,%	-30	-2
C)COMPRESSION SET		
HEAT AGING @ 150 DEGREE CX 22 HRS %	30	28
D)FLUID RESISTANCE,TEST METHOD NO.1.oil @ 150 DEGREE C X 70H		
HARDNESS CHANGE, POINTS	-5~+10	-3
TENSILE STRENGTH CHANGE , %	-20	-19
ELONGATION CHAGNE, %	-30	+13
VOLUME CHANGE, %	+/-5	+3
E) FLUID RESISTANCE,TEST METHOD NO.3.oil @ 150 DEGREE C X 70H		
HARDNESS CHANGE, POINTS	-15	-15
TENSILE STRENGTH CHANGE, %	-30	-18
ELONGATION CHANGE , %	-30	+48
VOLUME CHANGE, %	+25	+17

NOTE:THE ABOVE TESTS WAS TESTED WITH TEST PIECE AND FOR YOUR REFERENCE ONLY.

Bild 7- Auszug aus dem Datenblatt eines HNBR 90-Werkstoffes

Härteprüfung IRHD Mikrohärte nach DIN ISO 48 M
(in [IRHD])

Einzelwerte: 85,3; 85,0; 86,5; 86,6; 86,0

Mittelwert	Median	Größtwert	Kleinstwert	Range
85,9	86	86,6	85,0	1,6

Dichtemessung nach ISO 2781
(in [g/cm³])

Einzelwerte: 1,51; 1,52; 1,52

Mittelwert	Median	Größtwert	Kleinstwert	Range
1,516	1,52	1,52	1,51	0,01

Druckverformungsrestprüfung nach DIN ISO 815-1
(in [%])
Parameter: 24 h / 150°C

Einzelwerte: 98,9; 99,2; 98,2

Mittelwert	Median	Größtwert	Kleinstwert	Range
98,77	98,90	99,20	98,20	1,00

Infrarot-Spektroskopie
Prüfeinrichtung: FT-IR Spektrometer AVATAR-330 (Thermo-Nicolet)
Prüfverfahren: Abgeschwächte Totalreflexion (ATR) mittels eines Germanium Kristalls

Ergebnis: Das gefundene Spektrum ist typisch für ein HNBR -Elastomer

Transmissionsspektrum anbei.

Bild 8-Ergebnisse an einem HNBR 90 O-Ring ermittelt, gefertigt aus dem Werkstoff aus Bild 7

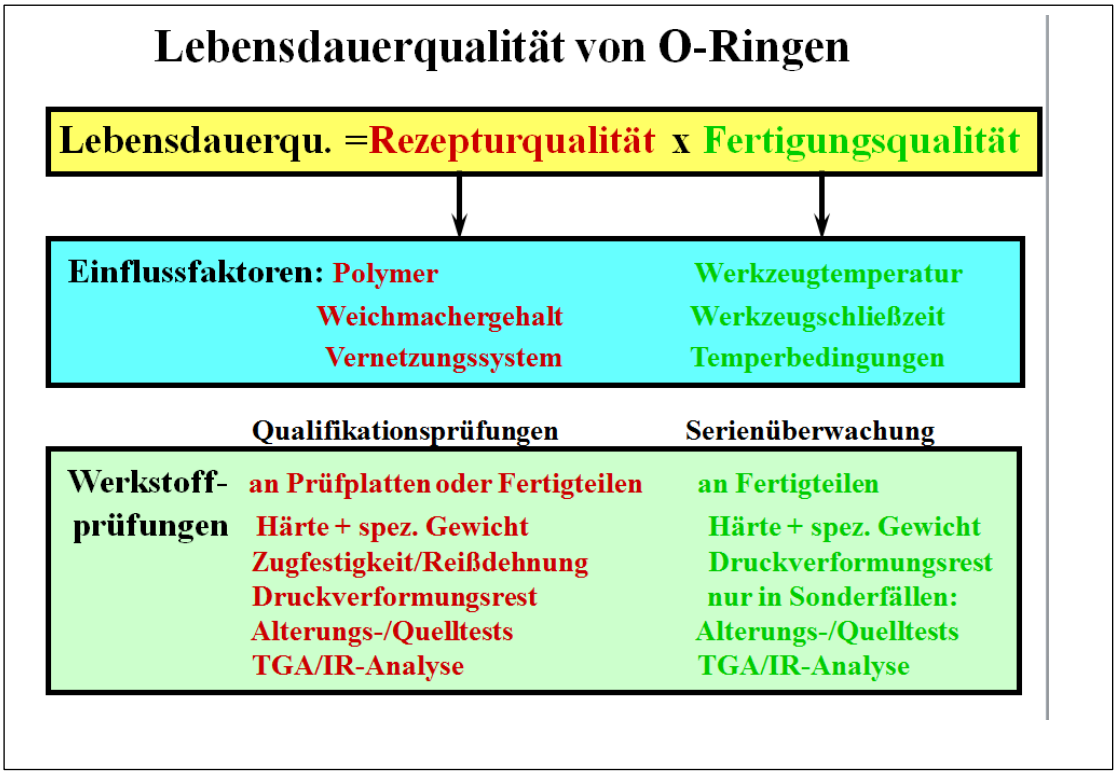


Bild 9 – Einflussfaktoren auf die Lebensdauerqualität von O-Ringen

schwanken kann, ausreichend spezifiziert sind, siehe Bild 9. Genau das ist der Ansatz in der Vornorm ISO/DIS 3601-5 (2013-7) [8].Eine konsequente Umsetzung dieser Norm stellt für Anwender bezüglich der Lebensdauerqualität einen guten Industriestandard dar, womit dann auch das Langzeitverhalten definiert ist. Die Premium-O-Ring Hersteller können natürlich auch weiterhin mit darüber hinaus gehenden Eigenschaften bei den Anwendern punkten.

Auswertung von Langzeit-Druckverformungsrest-Untersuchungen nach Arrhenius

Betrachtet man die Relaxation von O-Ringen nach eher langen Prüfzeiten, so erklärt sich der Verlust des Rückstellverhaltens der O-Ringe durch den Einfluss der Alterung durch Wärme und Sauerstoff, indem das „Gedächtnis“ des O-Rings an seine ursprüngliche Form, also das bei der Vulkanisation entstandene Netzwerk aus langkettigen Molekülen und weitmaschigen Vernetzungen, durch Kettenspaltungen und Nachvernetzungen langsam und kontinuierlich verlorengeht. Damit liegt dieser Schädigung also ein chemischer Reaktionsmechanismus zugrunde, weshalb man unter bestimmten Voraussetzungen, siehe unten, die Arrheniusgleichung [9] ansetzen kann, um einen Zusammenhang zwischen Alterungsreaktion und Reaktionsgeschwindigkeit herzustellen, siehe auch [10]. In bestimmter Form dargestellt, ergibt sich daraus eine Gerade, die sogenannte Lebensdauergerade. Wenn die Reaktionsgeschwindigkeit nicht direkt ermittelt werden kann, wird ersatzweise auf der Y-Achse die Zeit bis zum Erreichen eines Lebensdauerkriteriums aufgetragen, welches natürlich direkt von der Reaktionsgeschwindigkeit abhängen muss. Hier kann man jetzt bei O-Ringen, wie oben aufgezeigt, als Lebensdauerkriterium den Druckverformungsrest verwenden. Um die Anwendbarkeit des Arrhenius-Ansatzes auf das Langzeit Druckverformungsrestverhalten nachzuweisen, wurden im O-Ring Prüflabor über einen Zeitraum von 2 Jahren Druckverformungsrestmessungen an NBR O-Ringen durchgeführt [11]. Dabei wurde die Zulässigkeit des Ansatzes für kleine Schnurstärken (1,78 mm) bestätigt, gleichzeitig wurde aufgezeigt, dass Langzeitversuche an O-Ringen größerer Schnurstärke (3,53 mm) bei Temperaturen über 80°C nicht nach Arrhenius ausgewertet können, da hier geometriebedingt die Alterungsreaktion durch einen Luftmangel bzw. einem Mangel an Reaktionspartnern nicht mehr ungebremst stattfindet, siehe Bild 10. Damit ist beispielsweise auch belegt, dass Langzeit-Druckverformungsrest-Messungen von NBR-Werkstoffen an Norm-Testknöpfen

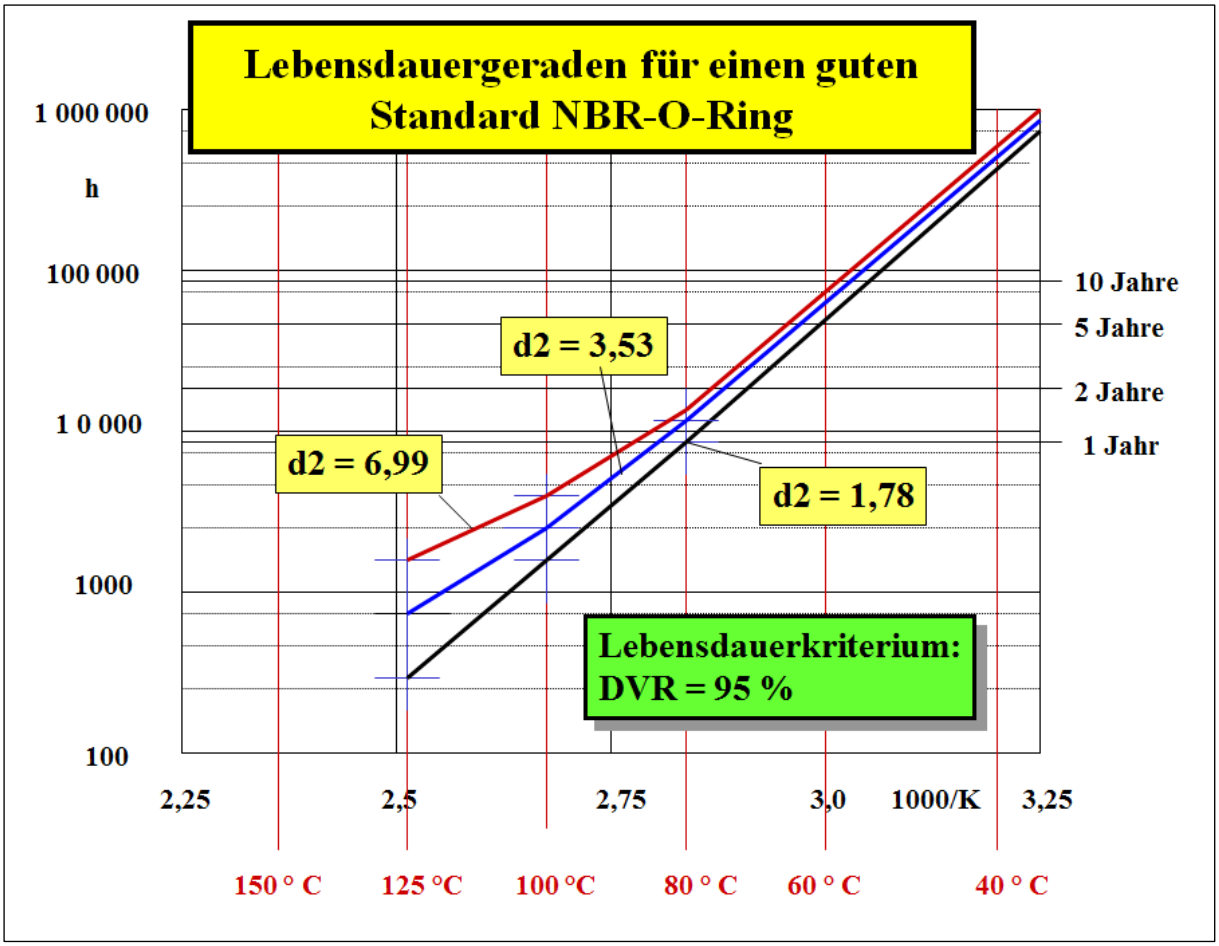


Bild 10-Lebensdauergerade eines guten Standes der Technik von NBR O-Ringen

13x6,3 mm [12] bei Temperaturen von mehr als 80°C nicht auf O-Ringe mit signifikant höherem Verhältnis der freien Oberfläche zum Volumen übertragen werden können. Bild 10 stellt damit eine gut abgesicherte thermische Belastungsgrenze für die O-Ringe aus der getesteten NBR-Rezeptur dar, sofern das dort zugrunde gelegte Lebensdauerkriterium von 95% Druckverformungsrest die Anwendung abbildet. Dies wird bei typischen O-Ring Einbauräumen [13] angenommen. Aus der grafischen Auswertung lassen sich im Rahmen der experimentellen Unsicherheiten Lebensdauermultiplikatoren ableiten, siehe Bild 11. Die Bilder 12, 13 und 14 zeigen solche Lebensdauergeraden von HNBR-, EPDM- und FKM-O-Ringen, welche sich natürlich nur auf die getesteten Rezepturen beziehen. Zudem muss einschränkend bemerkt werden, dass diese Geraden auf Messung von 3000h (18 Wochen) Dauer basieren. Das erscheint zwar immer noch lange, aber im Vergleich zu obigen Auswertungen der NBR O-Ringe (2 Jahre) ist damit die Aussagesicherheit geringer.

Temperatur-absenkung von/bis ° C	Lebensdauermul-tiplikator für eher konservative Abschätzungen	Lebensdauermul-tiplikator für eher progressive Abschätzung
200/190	1,41	1,50
150/140	1,57	1,71
140/130	1,61	1,76
130/120	1,65	1,81
120/110	1,69	1,87
110/100	1,74	1,93
100/90	1,79	2,00
90/80	1,85	2,08
80/70	1,92	2,17
70/60	2,00	2,28
60/50	2,08	2,40
200/150	7,19	10,47
150/100	12,21	19,66
100/50	26,4	49,44

Bild 11-Aus NBR-Langzeit-Versuchen abgeleitete Lebensdauermultiplikatoren

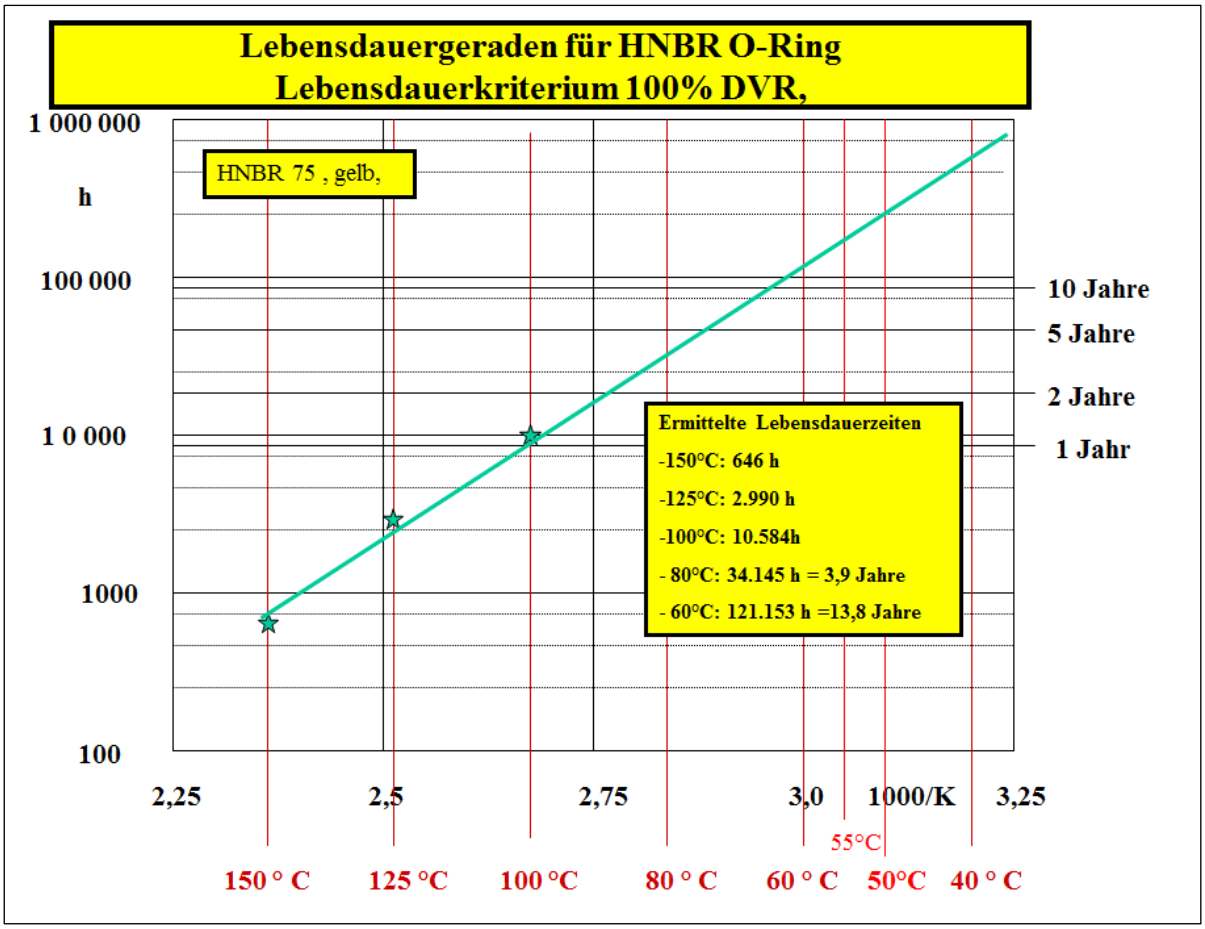


Bild 12- Lebensdauergerade eines HNBR O-Rings

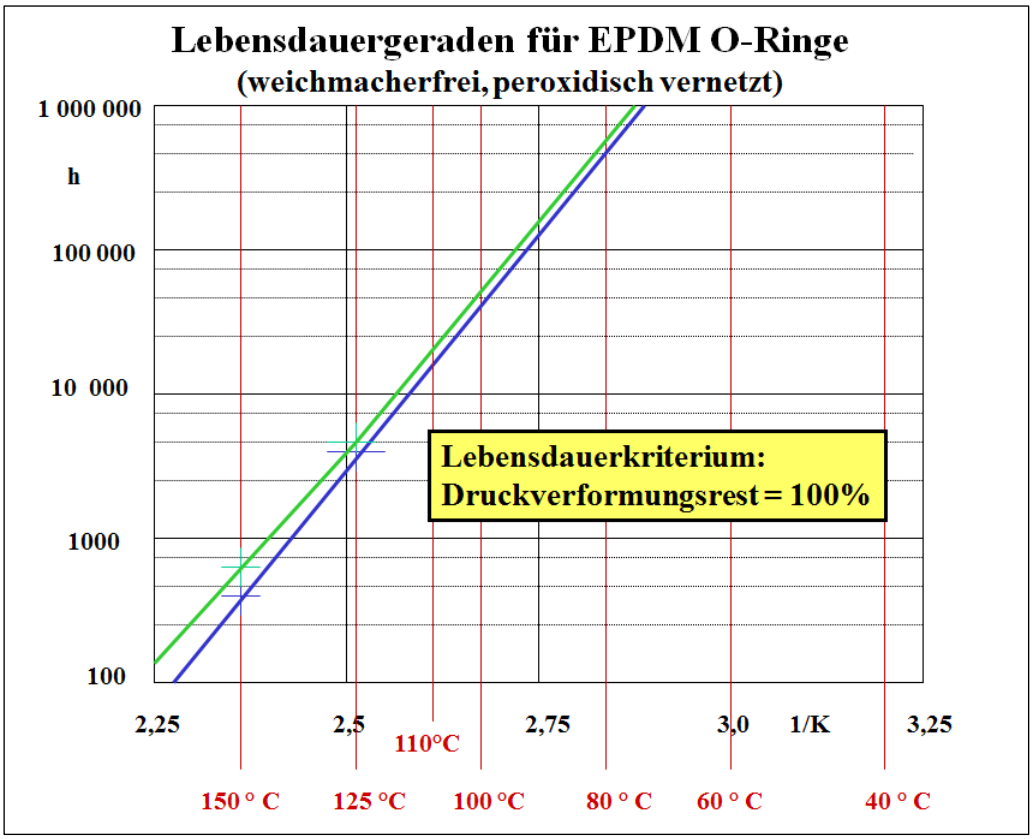


Bild 13-Lebensdauergerade von peroxidisch vernetzten EPDM O-Ringen

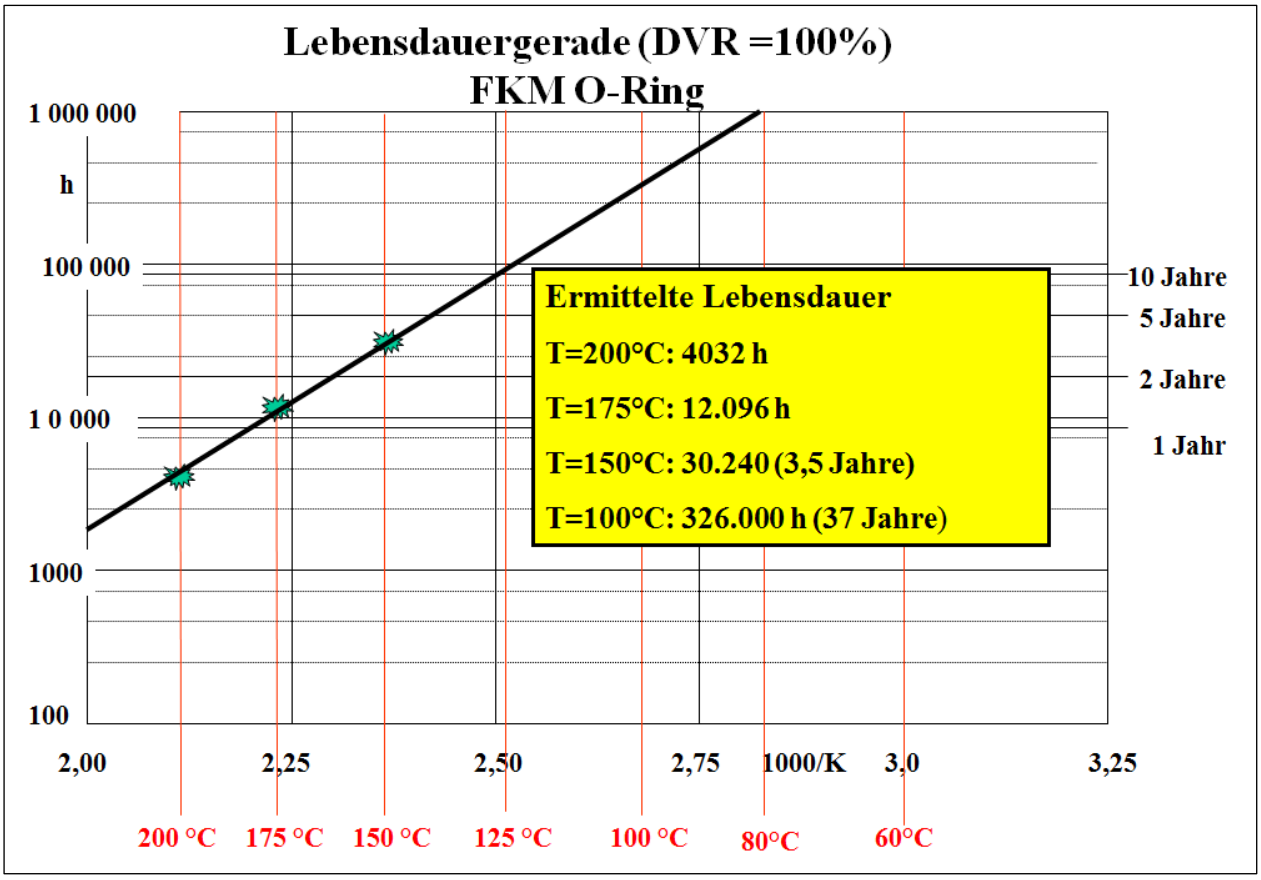


Bild 14-Lebensdauergerade von FKM O-Ringen

Einfluss der Schnurstärke und der Verpressung

Wie obige Ausführungen zeigen, kann das Druckverformungsrestverhalten erheblich von der Geometrie, das heißt, von der Schnurstärke abhängen, siehe auch Bild 15 [14] . Die kleine Schnurstärke von 1,5 mm schneidet hier deshalb so schlecht ab, weil hier das Verhältnis der freien Oberfläche zum Volumen so hoch ist, dass an jedem Massepartikel die Alterungsreaktion auch bei 150°C trotz des progressiv mit der Temperatur zunehmenden Sauerstoffbedarfs uneingeschränkt stattfindet. Die größeren Schnurstärken lassen dagegen weniger Sauerstoff in den O-Ring, wodurch die Alterungsreaktion mit zunehmender Temperatur nur noch gebremst bzw. eingeschränkt stattfinden kann. Die Prüftemperatur von 150°C liegt im oberen Grenzbereich der Alterungsbeständigkeit von HNBR-Werkstoffen. Bei einer Prüftemperatur von 120°C wäre der Einfluss der Schnurstärke vermutlich vernachlässigbar gering gewesen. Zusätzlich ist in Bild 15 der Einfluss der Verpressung dargestellt, also der

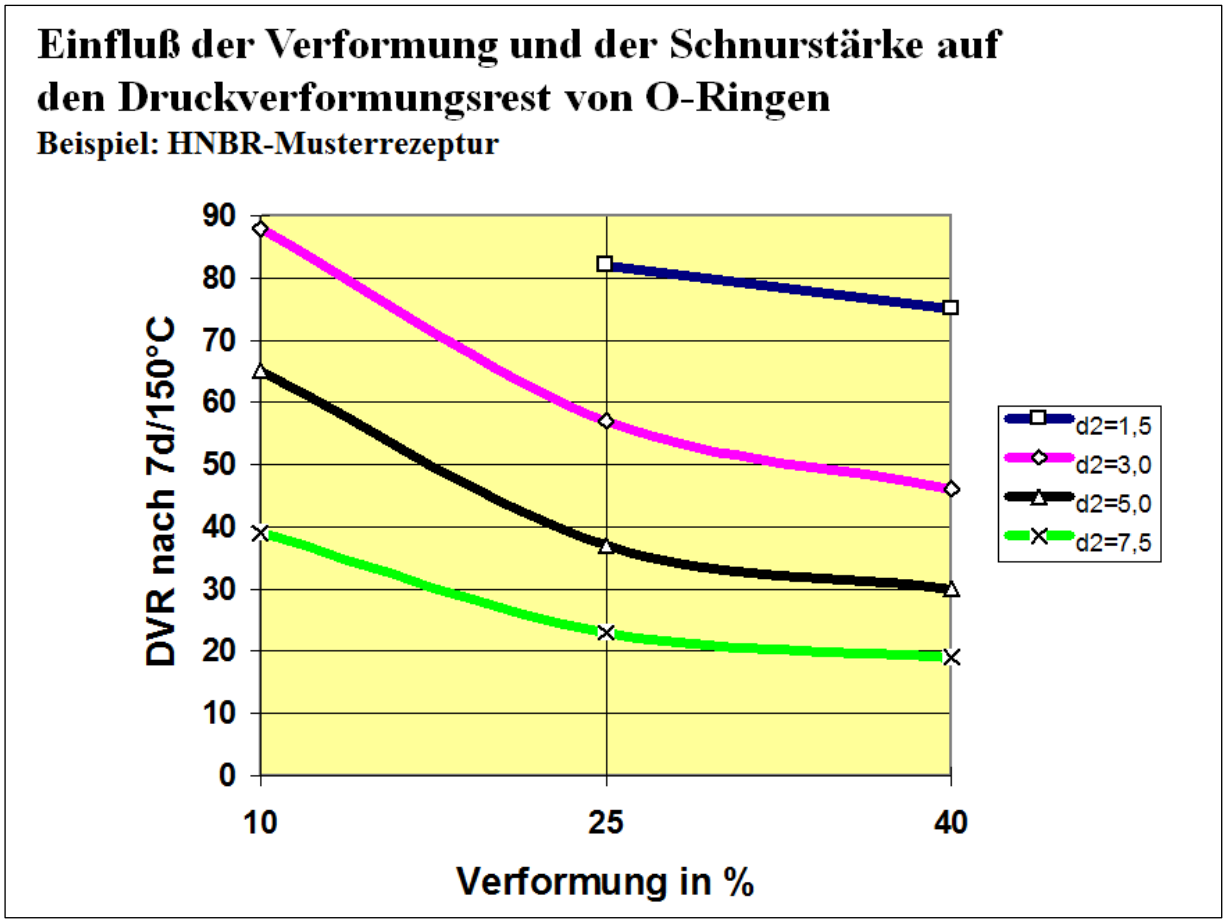


Bild 15- Einfluss der Schnurstärke und der Verformung auf den Druckverformungsrest

relativen Verformung der Schnurstärke in der Nut. Erst mit einer angemessenen Verpressung kann man das elastische Potential des O-Rings auch ausschöpfen. Daher sollte nach den gängigen Einbauempfehlungen von O-Ringen [13] die mittlere Verpressung bei kleinen Schnurstärken (1,78 mm) bei ca. 25% liegen und bei größeren Schnurstärken (6,99 mm) bei 15-20%.

Einfluss des Dichtspaltes

Bei einer O-Ring Auslegung sollte die Verpressung der O-Ringe bei Kolben- und Stangeneinbauräumen neben der zentrischen Einbaulage auch in der exzentrischen Einbaulage überprüft werden. Nur so ist eine sichere Auslegung möglich. Je größer dieses Durchmesserspiel bzw. der Spalt ist, desto mehr wird einem O-Ring bei außermittiger Krafteinleitung der abzudichtenden Bauteile an Spaltüberbrückungsvermögen abverlangt, sofern die abzudichtenden Bauteile nicht zueinander geführt sind. Das ist meistens nicht der Fall. Damit bedeutet ein großes Durchmesserspiel ein schärferes Versagenskriterium bezüglich des Druckverformungsrestes, was dann wiederum zu kürzeren Betriebszeiten führt, siehe Bilder 16 und 17

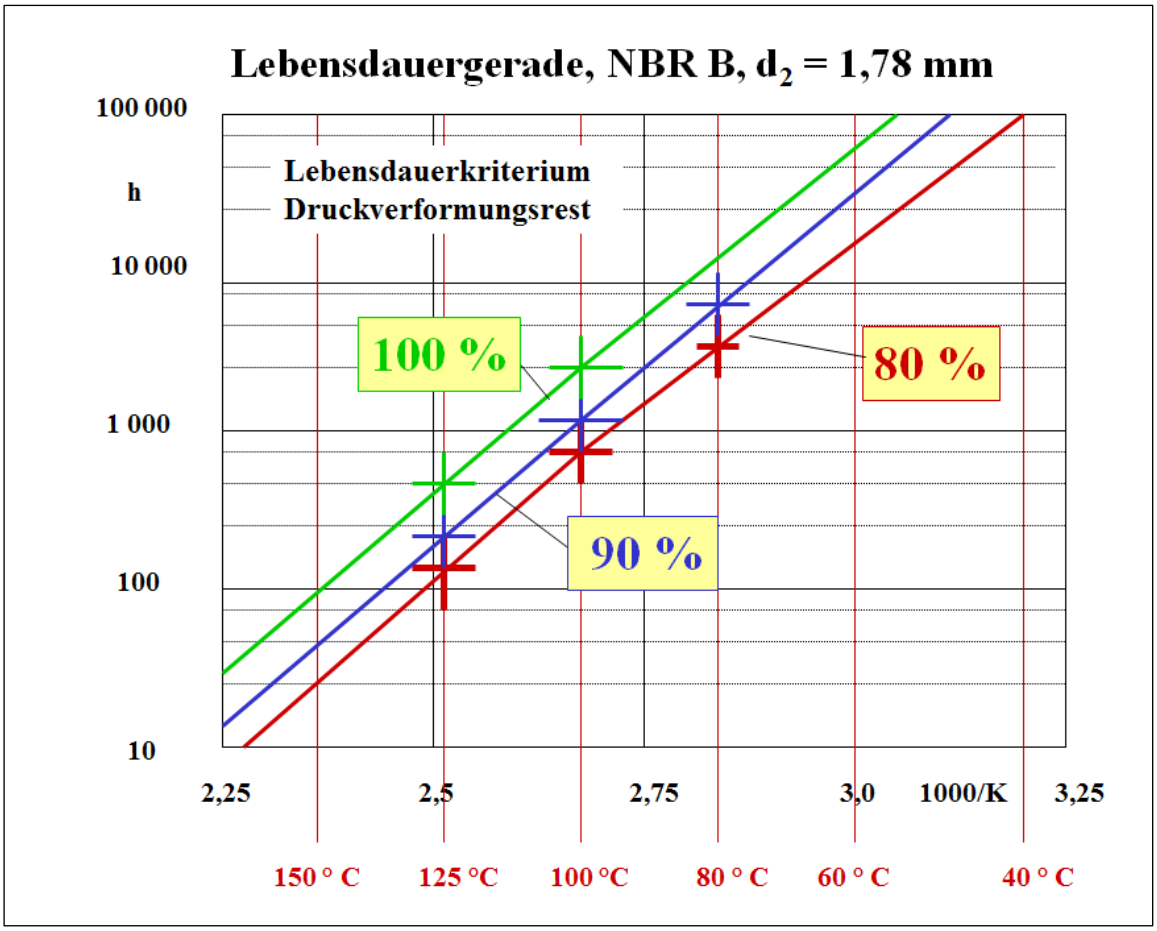


Bild 16- Lebensdauer in Abhängigkeit des Lebensdauerkriteriums (NBR O-Ring)

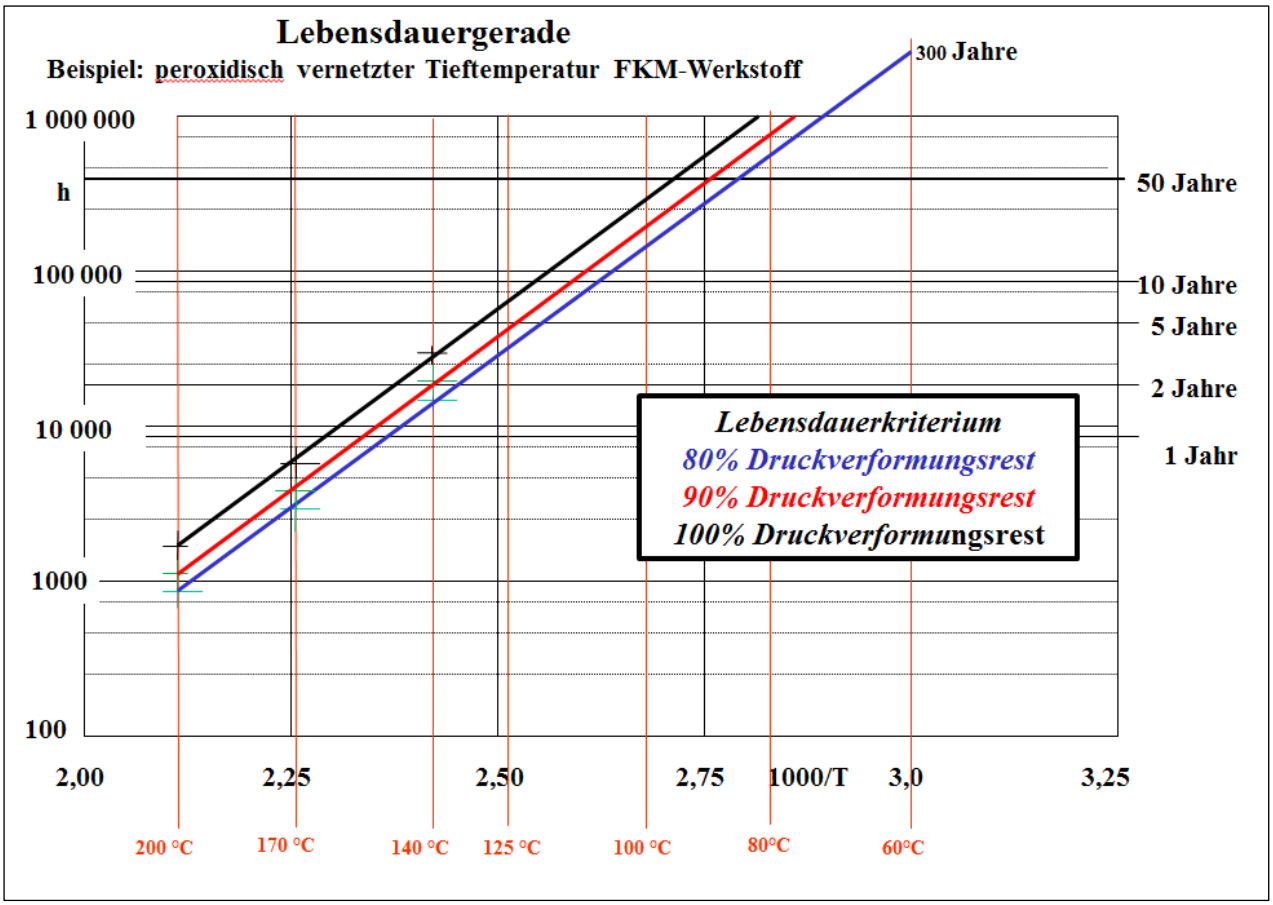


Bild 17- Lebensdauer in Abhängigkeit des Lebensdauerkriteriums (FKM O-Ring)

Einfluss des Mediums

Der Sauerstoff der Luft stellt für viele Elastomere eine relativ aggressive Umgebung dar. Das heißt, wenn die O-Ringe gegen ein Fluid abdichten, gegen das sie gut beständig sind, schützt man die O-Ringe auf der Mediumseite vor aggressivem Sauerstoff, wodurch sich die Lebensdauer des O-Rings erheblich verlängern kann. Besonders ausgeprägt ist dieser Effekt bei EPDM und wässrigen Medien, siehe Bild 18. Bei NBR O-Ringen wirken sich Öle ebenfalls in der Regel lebensdauerverlängernd aus. Anders herum beobachtet man bei Elastomeren, welche eine ausgezeichnete Alterungsbeständigkeit in Luft haben, wie zum Beispiel FKM-Werkstoffe, den gegenteiligen Effekt, dass nämlich umgebende Medien die Lebensdauer erheblich verkürzen können gegenüber der Lebensdauer in Luft, siehe Bild 19. Dieser erhebliche Einfluss muss natürlich bei der Bewertung von Langzeit-Tests berücksichtigt werden und bedeutet, dass Langzeitversuche an EPDM und NBR-O-Ringen in Luft eher eine konservative Lebensdauerabschätzung darstellen.

OR 80x5 EPDM 70 peroxid. vernetzt.	Luft	Wasser
24h/125°C	4,6	-
1008h/125°C	31,1	24,7
2016h/125°C	47,5	26,2
3024 h/125°C	63,8	31,6
24 h/140°C	6,4	-
504h/140°C	41,6	-
1008h/140°C	70,3	23,7
2016 h/140°C	99,8	27,8
3024 h/140°C	102,9	32,3

Bild 18 – Druckverformungsrestwerte eines EPDM O-Rings in Luft und in Wasser

Probekörper: O-Ringe mit d_2=2,0 mm	EPDM 70 (perox.)	FKM 70
Druckverformungsrest 336h/150°C		
in Luft, DIN ISO 815, %	62,8	14,7
in Wasser, DIN ISO 815, %	24,0	94,4

Bild 19- Druckverformungsrestergebnisse in Luft und Wasser (EPDM+FKM O-Ringe)

Zusammenfassung

Die obigen Ausführungen lassen klar erkennen, dass Langzeituntersuchungen an O-Ringen unter bestimmten Randbedingungen über Arrheniusgeraden ausgewertet werden können. Die Übertragbarkeit dieser Versuche in die Praxis ist aber nur gegeben, wenn die Rezepturqualität und der Vernetzungsgrad der O-Ringe auch ausreichend definiert sind. Bei Prüftemperaturen bis maximal 20K unterhalb der zulässigen Dauertemperatur (1000h-Kriterium) des jeweiligen Werkstoffes hat die Schnurstärke nur noch einen eher geringen Einfluss, deshalb sind diese Temperaturen für Langzeittests bevorzugt anzuwenden, oder es sind eher kleine Schnurstärken (1,78 mm) als Probekörper zu verwenden. Zu große Dichtspalte können sich erheblich lebens-

dauerverkürzend auswirken, dagegen führt eine gute Medienbeständigkeit mit dem abzudichtenden Fluid häufig zu einer Lebensdauerverlängerung.

Literaturquerverweise

[1] Peter Weidner, Dichtverhalten von O-Ring Nebendichtungen unter hohem Absolutdruck bei niedrigen abzudichtenden Druckdifferenzen, Sonderdruck der Fa. Burgmann

[2] Mathias Jaunich, Tieftemperaturverhalten von Elastomeren im Dichtungseinsatz, BAM Disertationsreihe 79 Berlin 2012

[3] H.P. Weise, H. Kowalewsky, R. Wenz, Behaviour of Elastomeric Seals at Low Temperature, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin, PATRAM 92, Yokohama 1992

[4] Stevens, R., Thomas, E., Brown, J., and Revolta, W., "Low Temperature Sealing Capabilities of Fluoroelastomers," SAE Technical Paper 900194, 1990

[5] ASTM D 1329 Retraction at lower Temperatures (TR-Test)

[6] ISO 2921 Determination of low Temperature Retraction (TR-Test)

[7]. Peter Warren, James Walker Co Ltd, Cockermouth, UK, Low temperature sealing capability of elastomer O-rings, sealing Technology September 2008, ISSN 1350-4789

[8]. ISO/DIS 3601-5 (2013-07) Fluid power systems-O-rings-Part 5: Specifications of elastomeric materials for industrial applications

[9]. Römpp Chemilexikon, Thieme Verlag

[10]. ISO 11346:2004 Rubber, vulcanized or thermoplastic-Estimation of life-time and maximum temperature of use

[11] Bernhard Richter, Lebensdauer von O-Ringen, o+p „Ölhydraulik und Pneumatik“ 42 (1998) Nr.5

[12] DIN ISO 815-1 Bestimmung des Druckverformungsrestes bei Umgebungstemperaturen oder erhöhten Temperaturen

[13] DIN ISO 3601-2 (2010-8) Fluidtechnik - O-Ringe - Teil 2: Einbauräume für allgemeine Anwendungen (ISO 3601-2:2008)

[14] Hans Magg, Leistungsspektrum von HNBR-Werkstoffen für die Anwendung in Kraftfahrzeugen, Seminar im Haus der Technik „O-Ringe in Kraftfahrzeugen“ Okt.1997