

Das Langzeitverhalten von O-Ring Dichtungen – qualitative und quantitative Beschreibung des Zeitverhaltens funktionswichtiger Einflussfaktoren

Autor: Dipl.-Ing. Bernhard Richter, O-Ring Prüflabor Richter

Was macht eine O-Ring Dichtung letztlich für viele technische Lösungen zu einer guten Dichtung und durch welche Wirkungsmechanismen kann dann die Funktionssicherheit unter Betriebsbedingungen beeinträchtigt beziehungsweise außer Kraft gesetzt werden ?

Die in Bild 1 dargestellten Eigenschaften beziehungsweise Einflüsse geben darauf eine Antwort. Zunächst zeichnet sich ein Gummiwerkstoff dadurch aus, dass dieser ein erhebliches Rückstellvermögen nach einer starken Deformation besitzt. Dabei ist für die Anwendung in der Regel zunächst nicht die Höhe der Rückstellkraft entscheidend, sondern das Weg-Rückstellverhalten, da die Störgröße auf die Dichtung zunächst als Weg auftritt, zum Beispiel infolge von Druckaufweitungen oder Temperaturänderungen. Der große Unterschied zwischen verschiedenen O-Ring Werkstoffen besteht in der Praxis darin, dass dieses Rückstellverhalten zeit- und temperaturabhängig unterschiedlich schnell nachlassen kann. Druckverformungsrest-Messungen an O-Ringen können diese teilweise erheblichen Unterschiede aufzeigen und so zur Definition einer angemessenen O-Ring Qualität beitragen.

Unter Gummielastizität (Bild 1) ist hier insbesondere das Vermögen der elastomeren Werkstoffe gemeint, dass diese die aus den druckbeaufschlagten O-Ringflächen resultierende Kraft als Erhöhung der Dichtflächenpressung weitergeben zu können. Je höher also der anstehende Druck ist, desto höher ist auch die daraus entstehende Dichtflächenpressung. Durch dieses Funktionsprinzip können O-Ring Dichtungen in extremen Anwendungen Drücke von weit über 1000 bar abdichten. Diese Gummielastizität tritt uneingeschränkt nur oberhalb der Glasübergangstemperatur auf, bei tiefen Temperaturen lässt diese nach und unterhalb einer werkstoffabhängigen Grenztemperatur geht diese ganz verloren. Während der Einfluss niedriger Temperaturen auf die Gummielastizität voll reversibel ist, tritt durch die Alterung eine irreversible Einschränkung der Gummielastizität ein. Bei einer fortgeschrittenen Alterung verlieren also O-Ring Dichtungen ihr Vermögen, auch hohe Drücke sicher abzudichten.

Voraussetzung für ein gute Dichtung ist natürlich auch eine ausreichende chemische Beständigkeit. Ist diese nicht gegeben, bewirkt eine dadurch verursachte Veränderung in der

Netzwerk- und Polymerstruktur sowohl eine Spannungsrelaxation als auch einen Verlust der Gummielastizität. Zusätzlich können auftretende Risse an der Oberfläche direkt zu einem Ausfall des O-Ringes führen.

Gummidichtungen werden häufig auch als sogenannte Weichdichtungen bezeichnet. Diese „Weichheit“ fördert zum einen ein gutes Dichtvermögen an nicht ideal glatten Oberflächen, zum anderen bedeutet dies aber auch eine begrenzte physikalische Beanspruchbarkeit in Bezug auf Zugspannungen. Daher müssen O-Ring Dichtungen auch bezüglich der physikalischen Beanspruchungen ausgelegt werden, wie zum Beispiel gegenüber der Einwirkung von hohen Drücken durch Spaltextrusion oder gegenüber der Auswirkung explosiver Dekompression von Gasen oder gegenüber der Einwirkung von Verschleiß bei dynamisch eingesetzten O-Ringen. Neben einer möglichen Beeinträchtigung der Einsatzgrenzen der O-Ringe durch oben beschriebene Vorgänge (Spannungsrelaxation, Alterung und chemische Einwirkung) können zusätzliche negative Effekte durch Quellung oder durch erhöhte Temperaturen (reversible Reduktion der physikalischen Belastungsgrenzen des Werkstoffes infolge der Viskoelastizität) auftreten und zu einem vorzeitigem Dichtungsausfall führen.

Beschreibung des Relaxationsverhaltens von O-Ringen

Das Relaxationsverhalten von Elastomeren in Abhängigkeit der Zeit lässt sich nach Timm, Bild 2, auf ein sogenanntes physikalisches und chemisches Kriechen zurückführen. Für Betrachtungen bei langen Zeiträumen ist danach der chemische Anteil deutlich stärker als der physikalische Anteil. Somit kann angenommen werden, dass sich die Abhängigkeit der Spannungsrelaxation als Folge eines überwiegend chemischen Reaktionsmechanismus als Arrheniusgerade darstellen lässt. Um dies zu überprüfen, wurden im O-Ring Prüflabor Richter Druckverformungsrestversuche an NBR O-Ringen verschiedener Schnurstärken bei drei unterschiedlichen Temperaturen bis zu einer Dauer von über 18.000 h durchgeführt und ausgewertet. Die Ergebnisse daraus sind in Bild 3 für unterschiedliche Lebensdauerkriterien zusammengefasst und in Bild 4 für das Lebensdauerkriterium 95 % Druckverformungsrest in Form von Arrheniusgeraden dargestellt. Aus diesen so gewonnenen „Kurven“ lassen sich nun für den überprüften O-Ringwerkstoff realistische Werte in Bezug auf das Langzeitverhalten ableiten. So kann zum Beispiel angenommen werden, dass die geprüften O-Ringe bei einer Temperatur von 60°C bei dem genannten Lebensdauerkriterium von 95 % für 5 Jahre ununterbrochenem Betrieb als betriebssicher betrachtet werden können.

Interessanter Weise liegen die durch die Langzeitergebnisse ermittelten Werte bei der Schnurstärke von 1,78 mm tatsächlich auf einer Geraden, während dies bei den dickeren

Schnurstärken nicht der Fall ist. Erklärt wird dies dadurch, dass bei den größeren Schnurstärken das Verhältnis der freien Oberfläche des O-Ringes im Verhältnis zu seiner Masse abnimmt, so dass der für den Oxidationsprozess erforderliche Sauerstoff bei den höheren Temperaturen nicht mehr in ausreichender Menge zur Verfügung steht. Die Oxidation läuft damit bei dickeren Schnurstärken und bei hohen Temperaturen infolge von Sauerstoffmangel gebremst ab. Das heißt bei relativ hohen Temperaturen ist der Einfluß der Schnurstärke auf die Lebensdauer hoch (siehe Bild 3 bei 125°C), bei niedrigen Temperaturen gering (siehe Bild 3 bei 80°C).

Ähnliche Versuche, jedoch nur bei 2 unterschiedlichen Temperaturen und bei Prüfzeiten von max. 4000 h wurden auch an peroxidisch vernetzten EPDM O-Ringen durchgeführt, Bild 5. Für ein Lebensdauerkriterium von 100 % Druckverformungsrest ergibt sich daraus für die geprüften O-Ringe eine zu erwartende abgesicherte Betriebsdauer bei 80°C von ca 500.000 h (= 57 Jahre). Die Ergebnisse von Druckspannungsrelaxationsmessungen im Hause Freudenberg ergaben für einen geprüften EPDM-Werkstoff bei 75°C Lebensdauerannahmen je nach Lebensdauerkriterium zwischen 46 Jahre und 230 Jahre, Bild 6.

Ein anderes Beispiel für einen Ansatz der Ermittlung des Zeitverhaltens der Spannungsrelaxation von O-Ringen zeigt Bild 7. Die dort dargestellten Ergebnisse, die im Hause Parker Hannifin von Herrn Dr. Achenbach rechnerisch ermittelt wurden, sind mit Hilfe eines relativ aufwendigen Materialmodelles für die Spannungsrelaxation an FKM- und HNBR O-Ringen bei 95°C in einem Kühlwassergemisch ermittelt worden. Während der HNBR O-Ring nach einer simulierten Betriebsdauer von 20 000 h nach einer Abschaltung die Entstehung eines Spaltes zulässt, hält der FKM-O-Ring noch dicht. Sofern also gut auflösende Materialmodelle bestehen, ergibt sich daraus eine interessante Möglichkeit, das Langzeitverhalten von O-Ringen unter verschiedensten Betriebsbedingungen rechnerisch zu simulieren.

Alterung

Bei der Alterung verliert der Gummiwerkstoff durch parallel ablaufende Kettenspaltungen der Polymere und Nachvernetzungen infolge der Einwirkung von Wärme und Sauerstoff kontinuierlich an Gummielastizität. Dargestellt wird dieser Verlust an elastischen Eigenschaften häufig über die relative Änderung der Reißdehnung des Werkstoffes. Wie in Bild 8 dargestellt, lassen sich damit bei der Definition eines geeigneten Lebensdauerkriteriums, z.B. 50 % Verlust der Reißdehnung, in Abhängigkeit der Betriebstemperatur Lebensdauergrößen ermitteln. Als zulässige sogenannte „Dauertemperatur“ gilt die Grenztemperatur, bei der der betrachtete Werkstoff nach 1000 Betriebsstunden genau 50 % seiner Reißdehnung eingebüßt hat. Der Verlust der Gummielastizität wirkt sich auf das Funktionsverhalten von O-Ringen

ähnlich wie die Einwirkung von tiefen Temperaturen aus, welches in Bild 9 dargestellt ist, das heißt der Werkstoff verliert dadurch an dynamischen Rückstellvermögen. Während der kältebedingte Verlust der Gummieigenschaften reversibel ist, führt die Alterung zu irreversiblen Einschränkungen im Funktionsverhalten. Wie Bild 10 zeigt, führt eine hochfrequente Druckbeaufschlagung ebenfalls zu einem Verlust der Gummielastizität. Das heißt, das insbesondere bei hochfrequenter Druckbeanspruchung (z.B. in der Hydraulik) sich ein alterungsbedingter Verlust an Gummielastizität besonders schnell als Leckage auswirken kann.

Chemischer Angriff durch das Kontaktmedium

Eine unzulässige chemische Einwirkung auf den O-Ring hat ähnliche Folgen wie die Alterung durch Wärme und Sauerstoff, zusätzlich kann dies dann zu einer beschleunigten Spannungsrelaxation führen. Rissbildungen an der Oberfläche des O-Ringes können die Zeit bis zum Dichtungsausfall weiter verkürzen. Daher schließt eine gute O-Ring Auslegung eine Verträglichkeitsprüfung mit ein. Im Allgemeinen gilt eine Verträglichkeit mit dem umgebenden Medium dann als gegeben, wenn in einem angemessen langen Zeitraum, z.B. 1000 h, die Veränderungen der Reißdehnung bei einem Einlagerungsversuch bei der oberen Grenztemperatur kleiner ist als bei einer künstlichen Alterung in Luft unter gleichen Zeit/Temperaturbedingungen, vorausgesetzt, dass sich die Härte- und Volumenänderungen in einem für die Anwendung akzeptablen Rahmen bewegen. Bild 11 zeigt ein Beispiel einer so durchgeführten Verträglichkeitsprüfung (nur Darstellung der relativen Änderungen der Reißdehnungen). Um auch den möglichen Einfluss geringer Mengen an Additiven zu erkennen, werden in additivierten Ölen 1000h-Tests empfohlen bei einer ausreichenden Menge an Prüfflüssigkeit (80-faches Volumen der Probekörper).

Physikalische Einwirkungen

O-Ringe werden je nach Anwendung unterschiedlich stark physikalisch belastet. Bei hohen Drücken (>50 bar) ist der O-Ring auf unzulässige Spalteinwanderung zu überprüfen, bei dynamischen Anwendungen kann der Abriebwiderstand des O-Ringes ein wichtiges Auswahlkriterium werden und bei Hochdruck-Gasanwendungen die Resistenz der Rezeptur gegenüber der Beanspruchung auf explosive Dekompression.

Um eine ausreichende Langlebigkeit der O-Ringe abzusichern, werden im Zweifelsfall physikalische Belastungstests unter „worst case“-Bedingungen empfohlen. Da die physikalischen Belastungsgrenzen von Elastomerwerkstoffen von der Temperatur abhängen, siehe Bild 12, heißt das, immer bei der oberen zulässigen Temperaturgrenze zu prüfen. Bild 13 und Bild 14

zeigen Schadensbilder von O-Ringen, die durch Spaltextrusion beziehungsweise explosive Dekompression zerstört wurden.

Zusammenfassung

Die dargestellten Einflussfaktoren können an O-Ring-Dichtungen zu unbefriedigenden kurzen Betriebszeiten bis zum Ausfall führen. Daher sollte auch eine O-Ring Dichtung mit einem angemessenen Aufwand in Bezug auf die geforderte Lebensdauer ausgelegt werden. Die obigen Ausführungen beschreiben einige Methoden, wie dies in der Praxis aussehen kann und zeigen beispielhaft realisierbare Betriebszeiten von NBR-, EPDM-, und FKM-O-Ringen auf.

Welche Werkstoffeigenschaften sichern die Funktion von O-Ringen ab ?

- ## Wichtige Werkstoffeigenschaften
- Weg-Rückstellpotential
 - Gummielastizität (aktivierende Wirkung)
 - chemische Beständigkeit
 - physikalische Beständigkeit

- ## Begrenzungen durch äußere Einflüsse
- Spannungsrelaxation
 - Alterung durch Sauerstoff und Wärme
 - chemischer Angriff durch das umgebende Medium
 - physikalisch/mechanische Beanspruchung + Quellung + Temperatur

Bild 1 : Funktionswichtige Eigenschaften von O-Ringen und mögliche begrenzende Einflussgrößen

Modell für die Relaxation von Elastomeren

Quelle: Th. Timm, die physikalischen Leistungsgrenzen von Elastomeren, Kautschuk+Gummi, Kunststoffe 39. Jahrgang, Nr. 1/86

$$K = A \times \log t + B \times t$$

**% Kriech-
verformung**

**primäres physikalisches
Kriechen**

**sekundäres chemisches
Kriechen**

Bild 2 : Modellgleichung zur Beschreibung des Relaxationsverhaltens von Elastomeren

Langzeit Druckverformungsrest-Versuche an NBR O-Ringen

Schnurstärke = 1,78 mm	Zeit in h			
DVR-Lebensdauerkriterium,%	80	90	95	100
Lebensdauer bei 80 °C, h	3400	6500	8400	13000
Lebensdauer bei 100 ° C, h	804	1216	1550	2700
Lebensdauer bei 125 °C, h	130	205	282	520

Schnurstärke = 3,53 mm	Zeit in h			
DVR-Lebensdauerkriterium,%	80	90	95	100
Lebensdauer bei 80 °C, h	5000	8300	11000	17 400
Lebensdauer bei 100 ° C, h	1196	1902	2620	4200
Lebensdauer bei 125 °C, h	238	472	752	992

Schnurstärke = 6,99 mm	Zeit in h			
DVR-Lebensdauerkriterium,%	80	90	95	100
Lebensdauer bei 80 °C, h	5000	8300	12000	18400
Lebensdauer bei 100 ° C, h	1657	2973	4082	5700
Lebensdauer bei 125 °C, h	926	1303	1512	1800

Bild 3 : Auswertung von Langzeitversuchen von NBR-O-Ringen

Lebensdauergeraden für einen guten Standard NBR-O-Ring

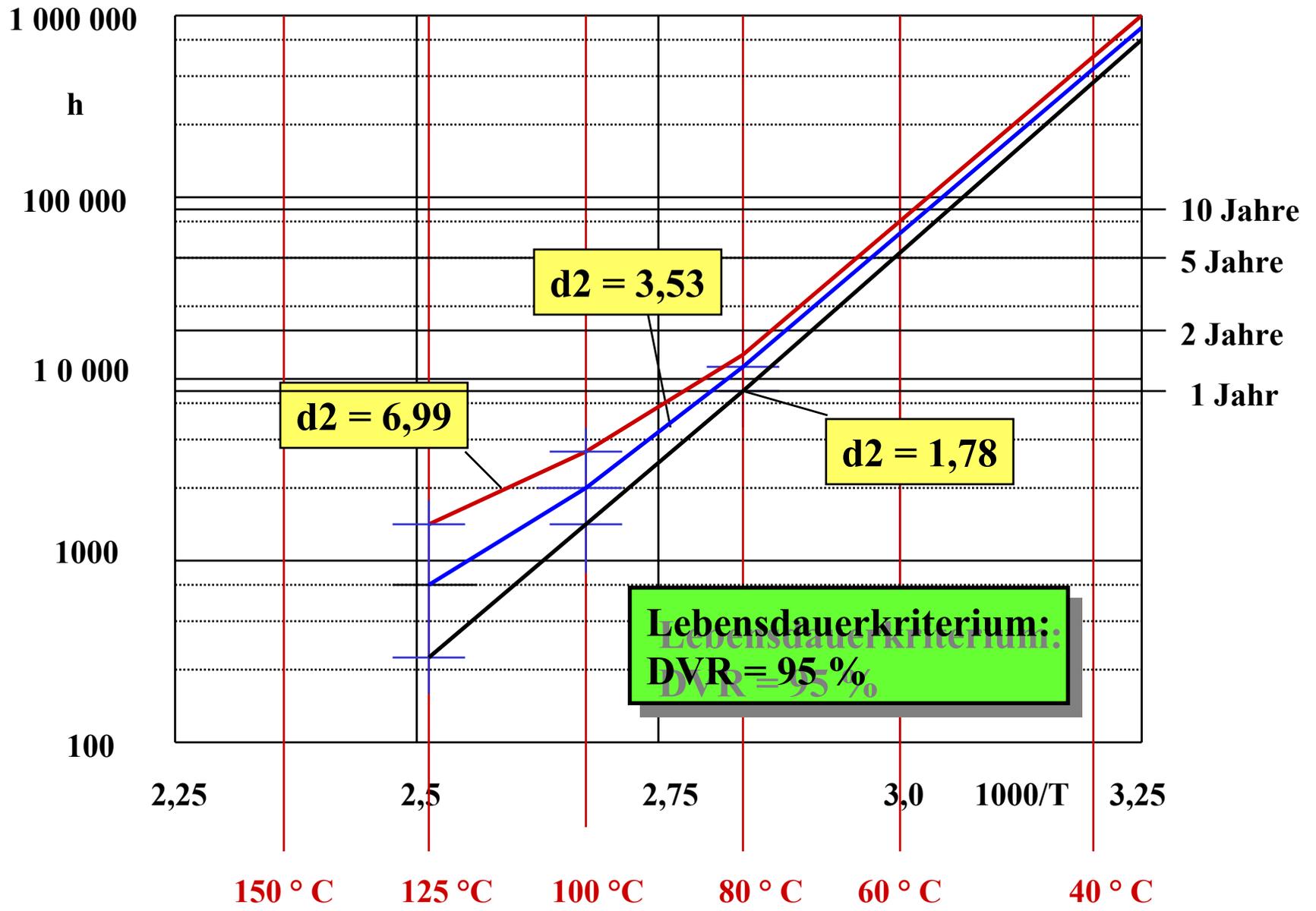


Bild 4 : Darstellung der Ergebnisse aus Bild 3 in Form von Arrhenius-Lebensdauergeraden

Lebensdauergeraden für EPDM O-Ringe (weichmacherfrei, peroxidisch vernetzt)

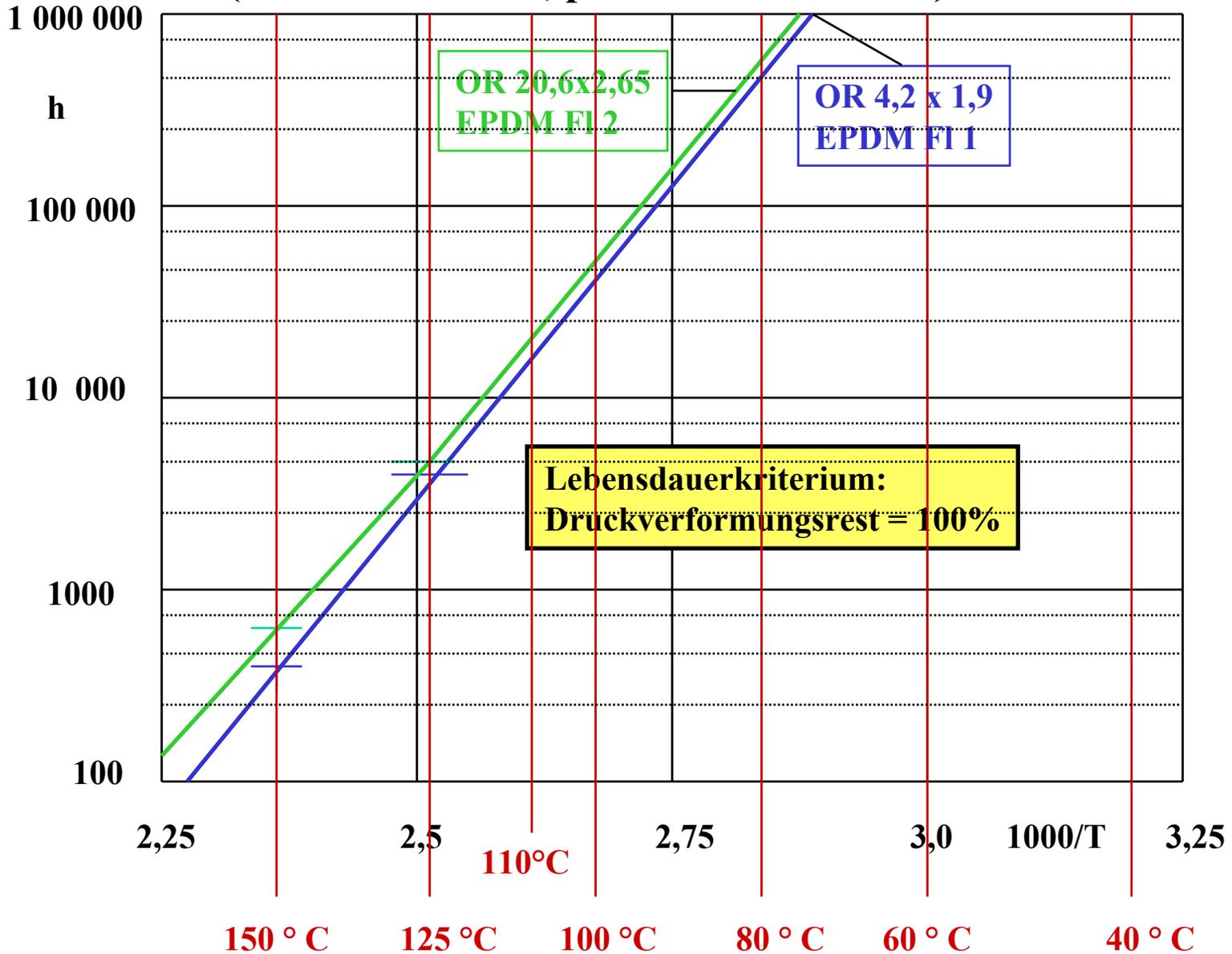


Bild 5 : Lebensdauergeraden von 2 EPDM-O-Ringen (peroxidvernetzt)

Relaxationsverhalten eines EPDM-Werkstoffes

Quelle: „Dichtungstechnik mit gummielastischen Dichtungen und Formteilen im Fahrzeug- und Maschinenbau“, Erich Hoepke und 5 Mitautoren, expert-verlag

Die Ergebnisse beziehen sich auf Auswertungen von Druckspannungsrelaxationsmessungen bis zu 5000 h in Luft für den EPDM-Werkstoff 70 EPDM 281

Temperatur in °C	Relaxationszeit (75 %) t_{chem}	Halbwertszeit t_{chem}
175	10,0 d*	7,5 d
150	50,0 d	24 d
125	1,2 Y	208 d
100	18,0 Y	6,3 Y*
75	230 Y*	46 Y *

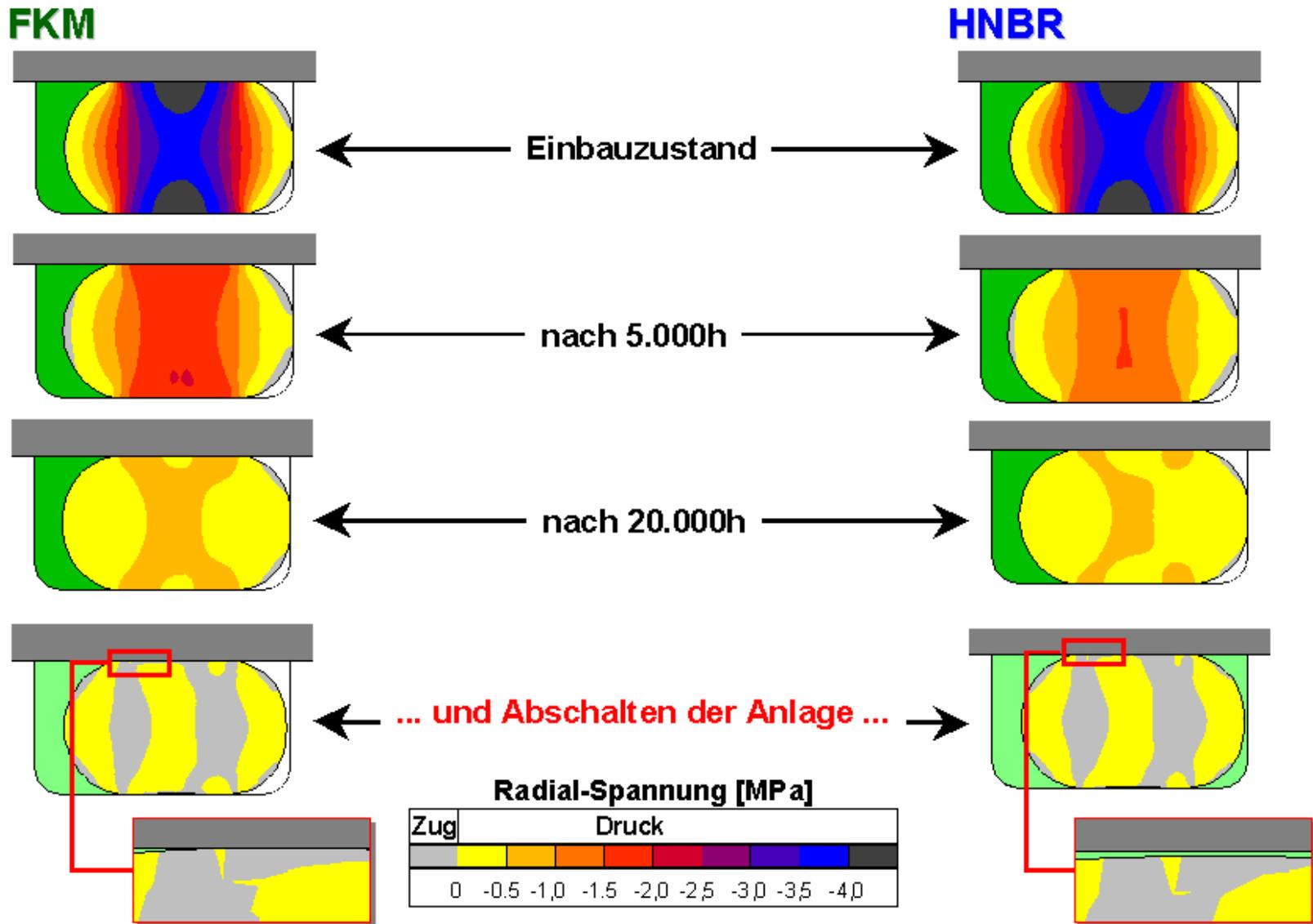
* Ergebnisse berechnet



Nach Arrhenius abgeleitete, angenommene Lebensdauer

Bild 6 : Auswertung von Lebensdauerersuchen durch Druckspannungsrelaxationsmessungen

Vergleich: unterschiedliche Materialien bei gleicher Belastungsgeschichte



Quelle: Dr. Manfred Achenbach, "Verkürzt Entwicklungszeiten", Dichtprofile mit der Finite-Elemente-Methode berechnen, cav 8/2001

Bild 7 : Ergebnisse einer Berechnung des Rückstellverhaltens von O-Ringen

Einfluß von Wärme und Sauerstoff (Alterung)

Lebensdauerkriterium: 50 % rel. Änderung der Reißdehnung

Quelle: O.Kube, Leistungsspektrum von HNBR-Werkstoffen für die Anwendung in Kraftfahrzeugen, Vortrag im Haus der Technik, Seminar "O-Ringe in Kraftfahrzeugen" am 5./6. Okt.99 im Forum der Technik, München

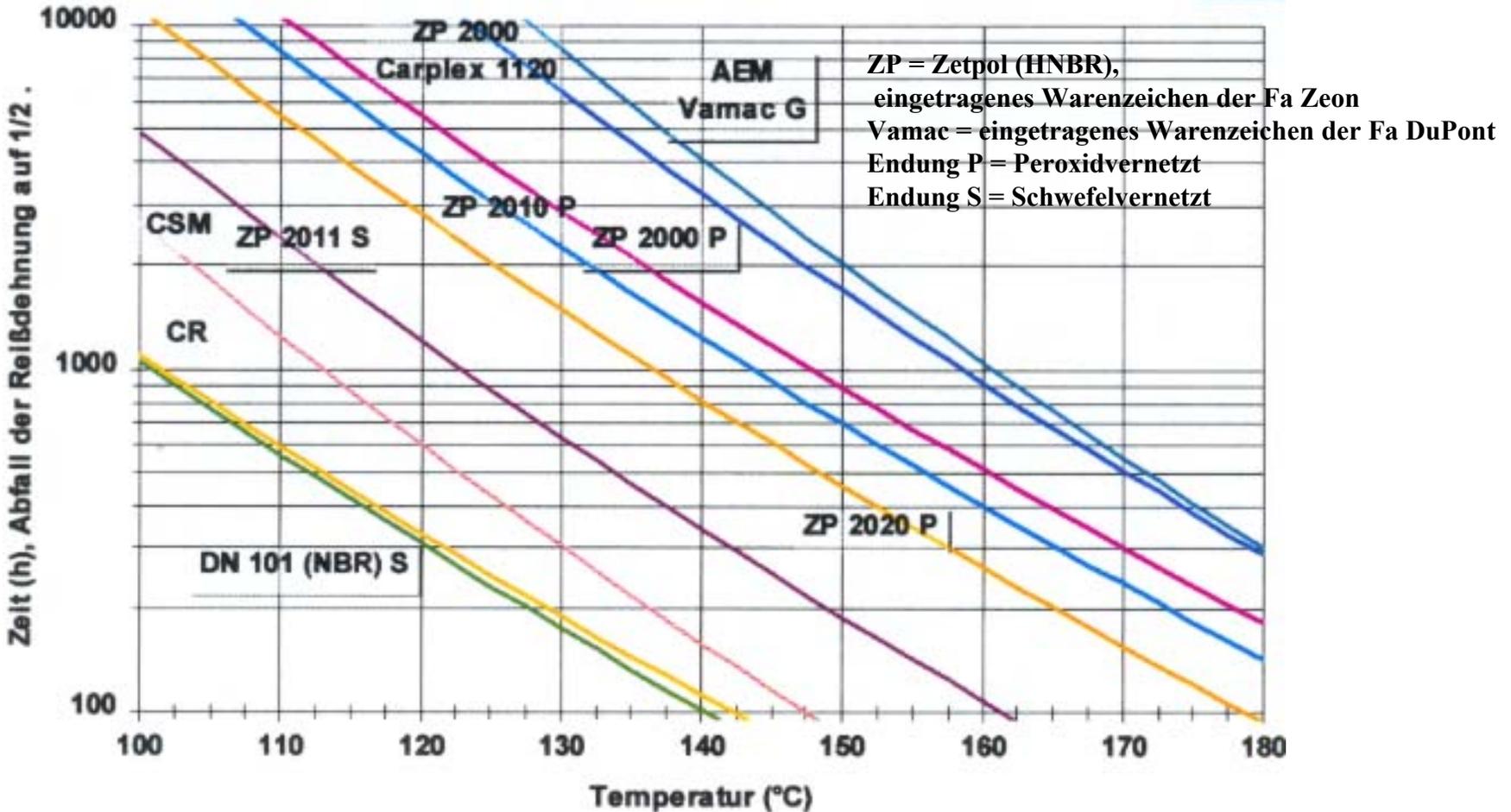


Bild 8 : Lebensdauergeraden von Elastomeren, bezogen auf die Alterung

Temperaturabhängiges Rückstellverhalten von O-Ringen

Simulierte Reaktion eines O-Ringes auf eine sprungförmige Spaltänderung (Reaktion nach 0,1 Sek.) bei -10°C, 20°C und 50°C

Quelle: J.Duarte, G.Streit, M.Achenbach, Verformungsrückstellung von Elastomerwerkstoffen in der Kälte, GAK 10/1999

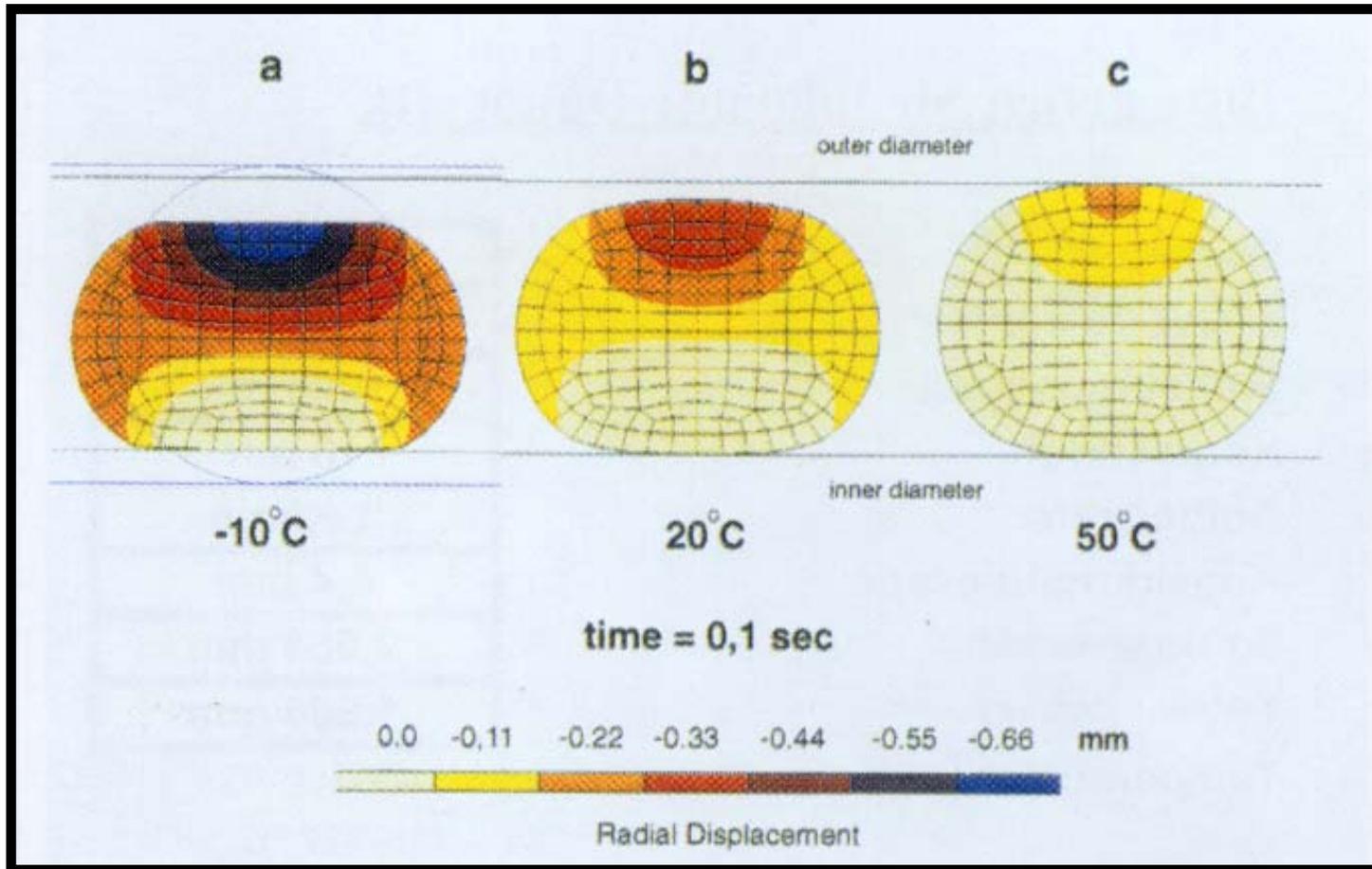


Bild 9 : Einwirkung tiefer Temperaturen auf das dynamische Rückstellverhalten von O-Ringen

Frequenzabhängige Dichtflächenpressung

Verhalten einer O-Ring Abdichtung bei pulsierenden Drücken

Quelle: H..Jongebloed, die Dichtwirkung statischer Dichtsysteme bei dynamischer Beanspruchung, Vortrag anlässlich der 11. internationalen Dichtungstagung in Dresden am 3./4. Mai 1999

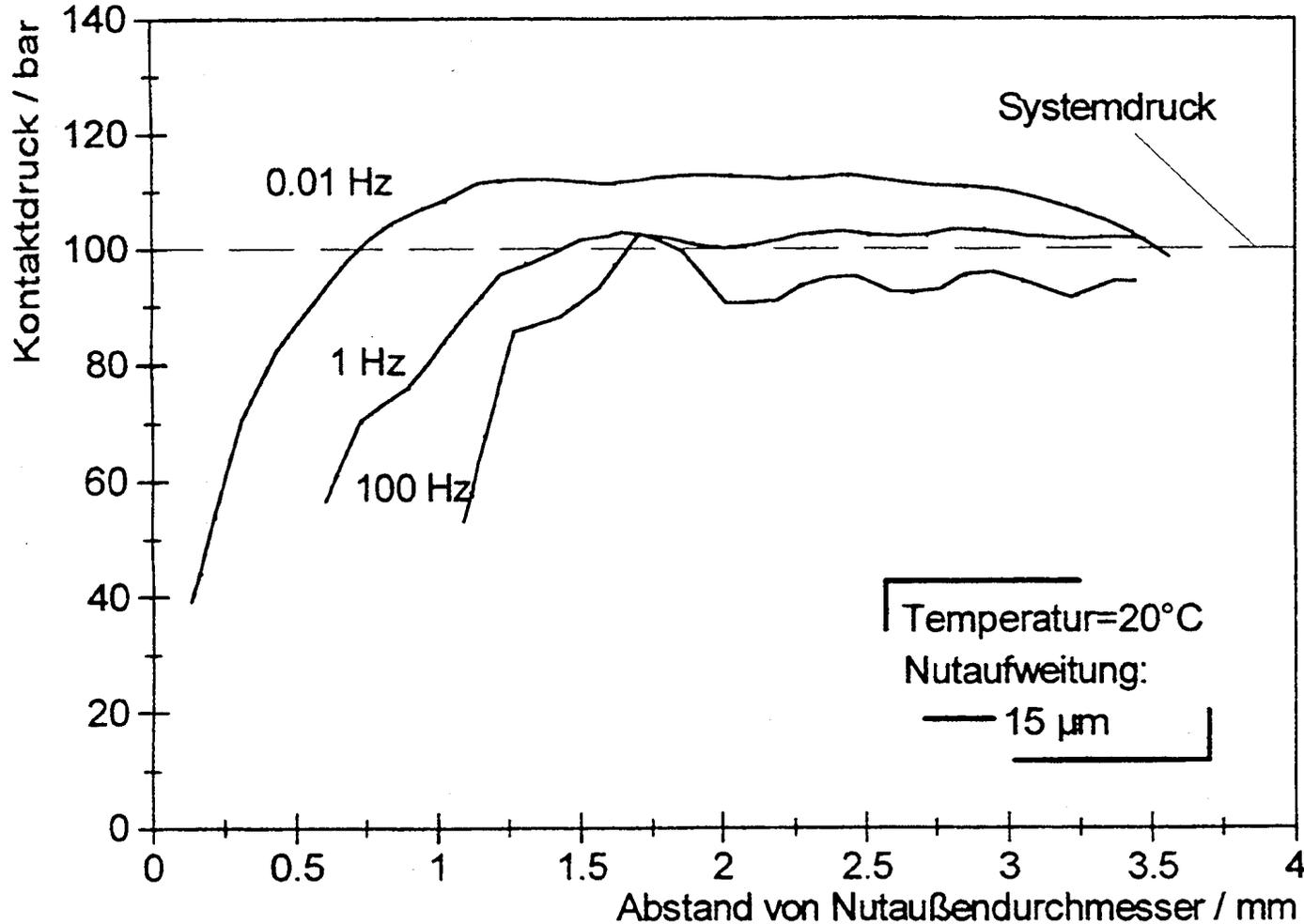


Bild 10 : Berechneter Kontaktdruck einer O-Ring Dichtung bei 100 bar

Langzeitverhalten von NBR gegenüber verschiedenen Ölen, Fett und Luft (T= 100°C)

Quelle: Simrit Standard Katalog, Freudenberg

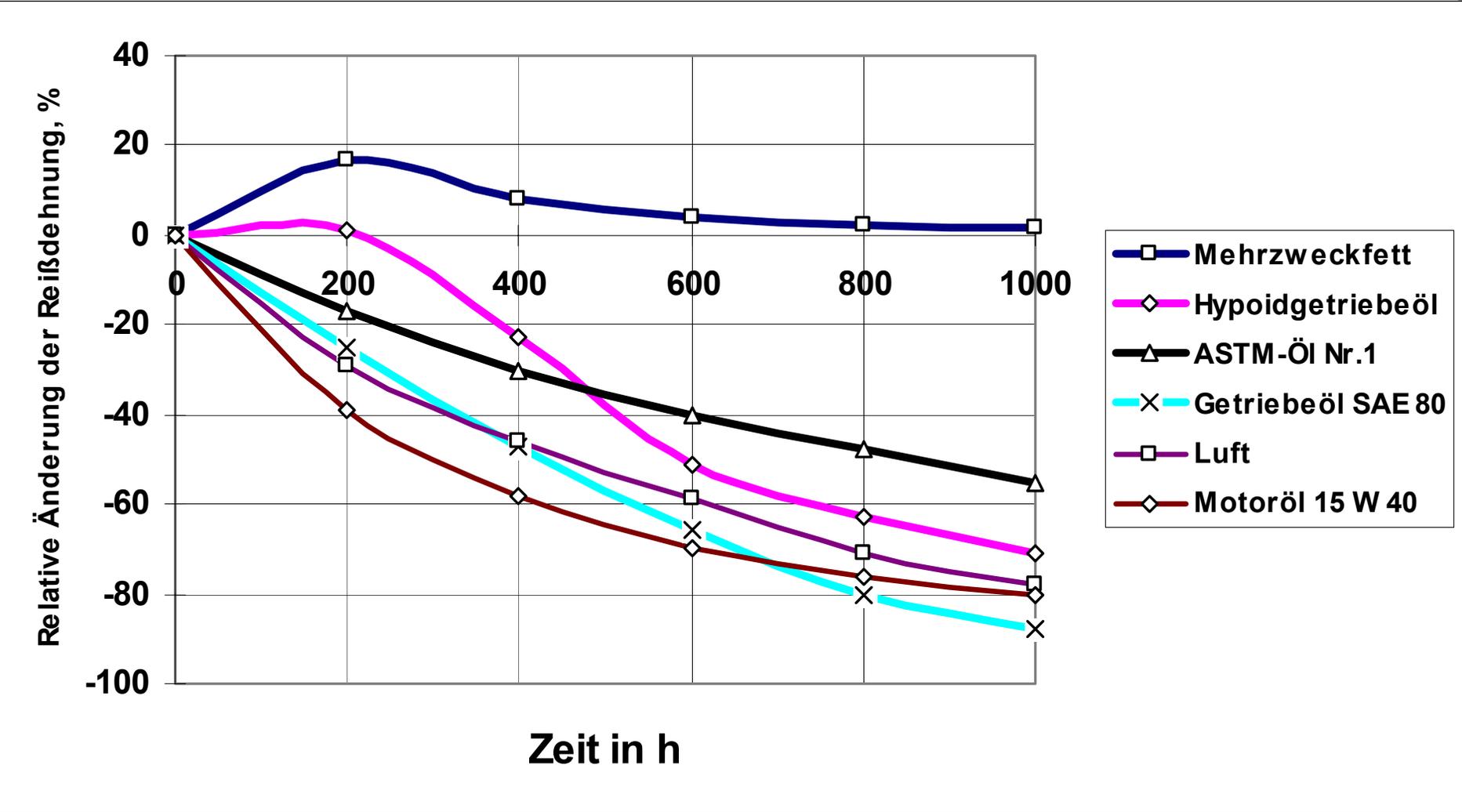


Bild 11 : Verträglichkeitsuntersuchung (nur Darstellung der Änderung der Reißdehnung) eines NBR-Werkstoffes mit verschiedenen Medien

Temperatureinfluß auf mechanische Eigenschaften

Quelle: E.Alexander, J.Francois, Elastomerdichtungen, Sonderdruck aus CAV 5/2000, DuPont Dow Elastomers

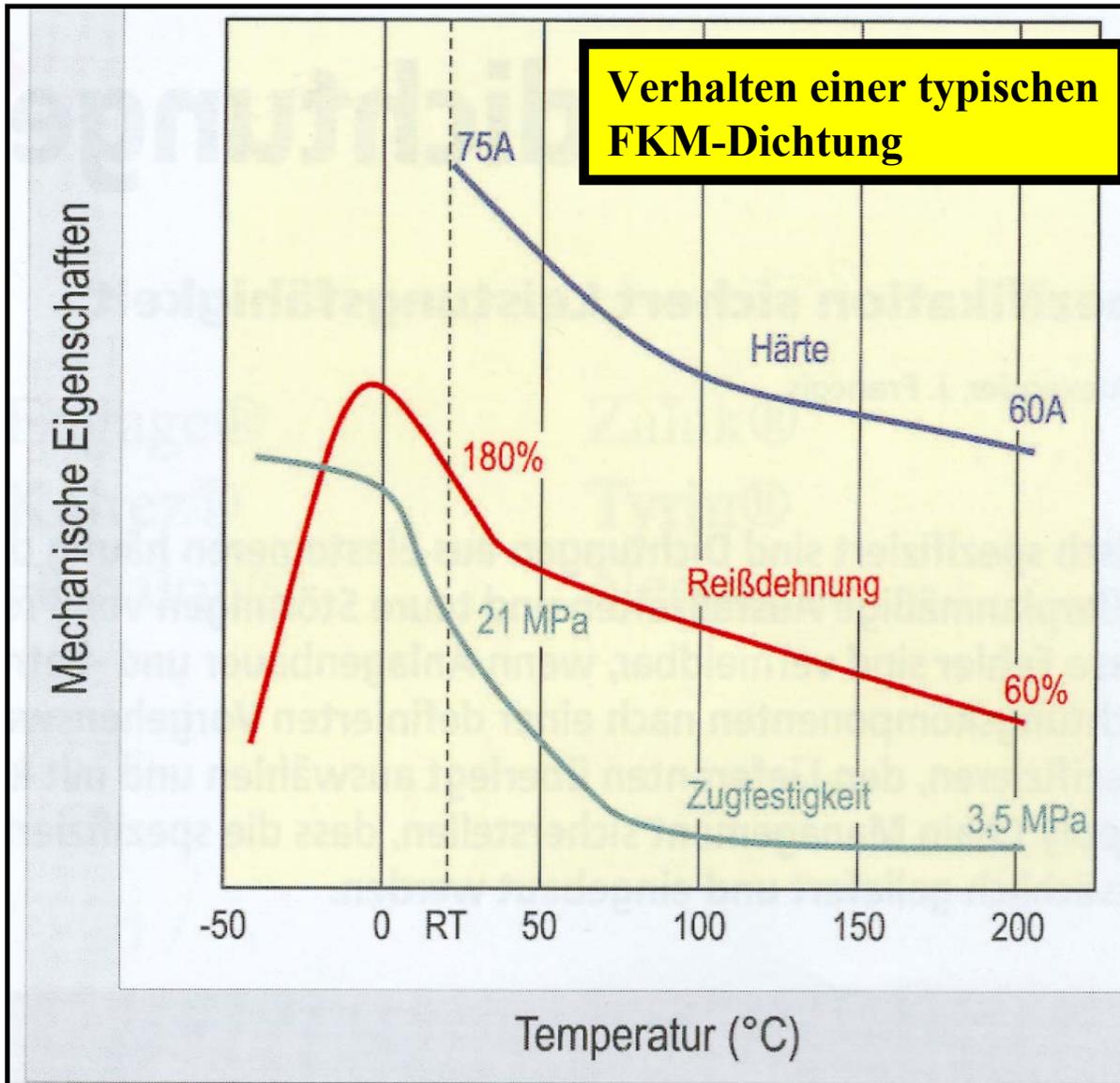
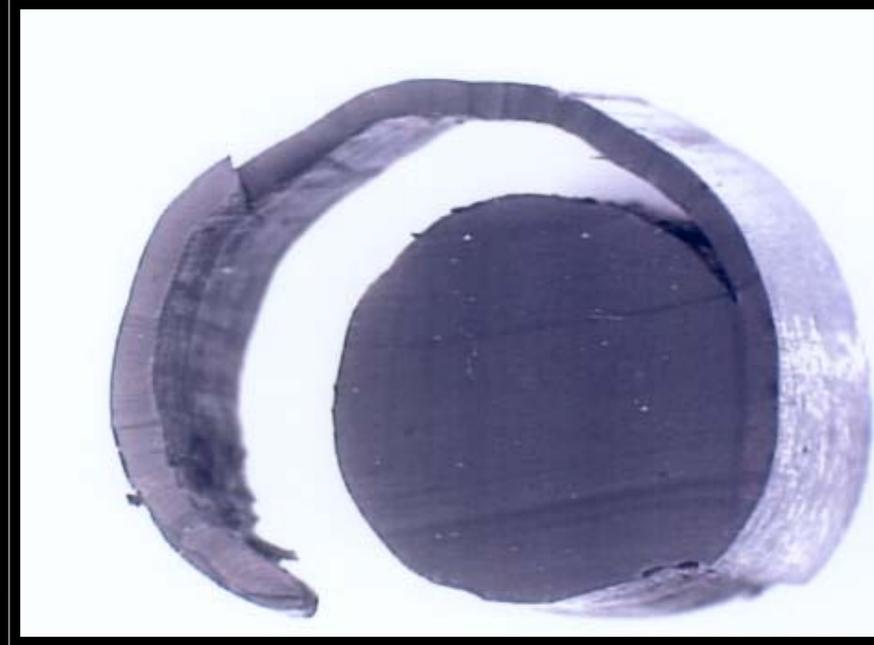


Bild12 : Werkstoffkennwerte von FKM-Elastomeren in Abhängigkeit der Temperatur

Schadensbild Spaltextrusion

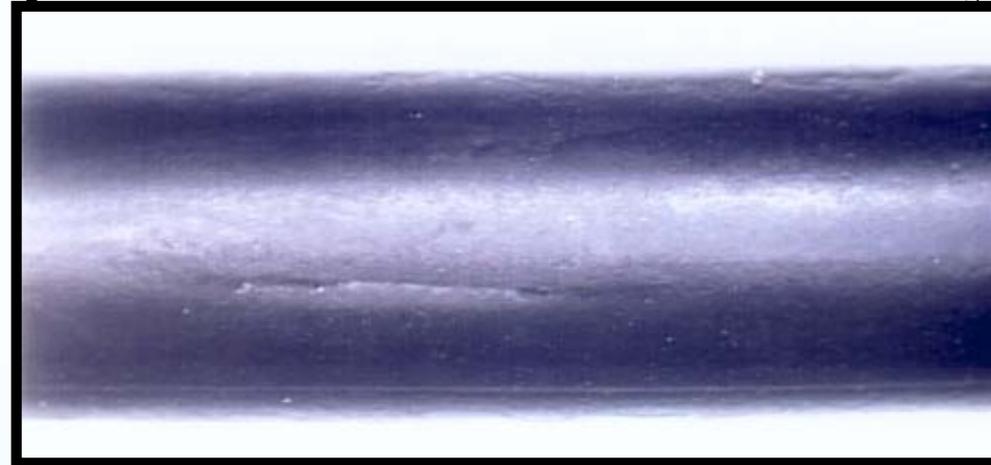
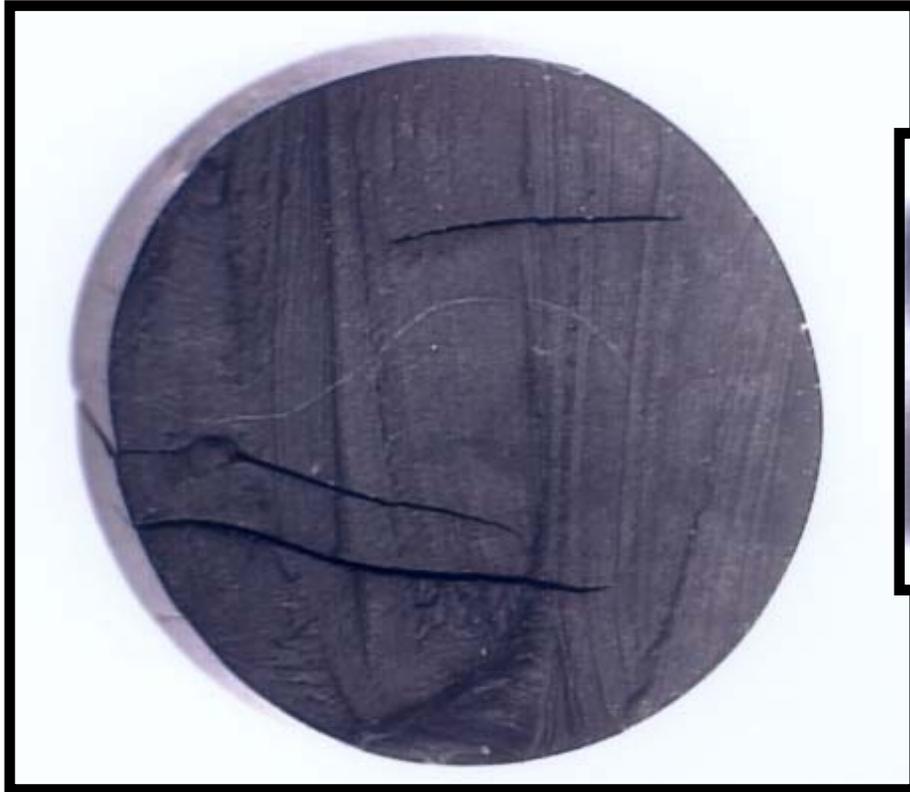


Durch einen unsymmetrischen Kraftangriff ergibt sich eine exzentrische Lage der abzudichtenden Bauteile. Der dadurch entstandene Dichtspalt kann sich durch das “Atmen” der druckführenden Teile noch erhöhen. Der zerstörte O-Ring hat sich an einer Stelle im Umfang fast komplett in den Dichtspalt hineingearbeitet.

An diesem durch Spaltextrusion zerstörten O-Ring läßt sich erkennen, wie sich durch das Hineinarbeiten des O-Ringes in den Spalt der O-Ring richtiggehend schält. Scharfkantige Nutausführungen ($r < 0,1$) und/oder hohe Temperaturen ($> 70^\circ\text{C}$) reduzieren den Widerstand gegen Spalteinwanderung erheblich.

Bild 13: Schadensbilder einer unzulässigen Spalteinwanderung des O-Ringes

Schadensbild Explosive Dekompression



Bei der Draufsicht zeigen sich Längsrisse an der Oberfläche

Im aufgeschnittenen und leicht verformten O-Ringquerschnitt zeigen sich parallel ausgerichtete Risse

Bild 14: Schadensbilder einer unzulässigen Beanspruchung durch explosive Dekompression