Lebensdauer von O-Ringen

Neue Erkenntnisse aus Langzeitversuchen an NBR-O-Ringen

BERNHARD RICHTER

Wie lange halten O-Ringe dicht? Diese Frage haben sich schon viele Anwender gestellt, die ihre Produkte auch bezüglich der Dichtstelle solide auslegen wollten. Auch hartnäckige Recherchen in der technischen Literatur liefern letztlich nur sehr grobe Angaben, die nur sehr begrenzt auf die Gegebenheiten einer O-Ring-Abdichtung übertragbar sind und sich praktisch durchweg auf Normprobekörper beziehen. Welche Einflüße sind bei O-Ringen wichtig, was kann als vernünftiges Lebensdauerkriterium für O-Ring-Dichtungen angesetzt werden?

Die Dichtheitsfrage ist gerade in der Hydraulik ja besonders wichtig, wo man im Wettbewerb zu elektromechanischen Systemen steht und die Leckagefreiheit dort sicherlich ein gewichtiges Argument für die Substitution von „tropfender" Hydraulik ist.

Von einem O-Ring Prüflabor wurden Langzeituntersuchungen an O-Ringen durchgeführt und ausgewertet. Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse daraus zusammengefaßt. Ziel der Untersuchung war es, realistische Betriebszeiten von O-Ring-Abdichtungen zu ermitteln und die wichtigsten Einflußgrößen auf die Lebensdauer auch quantitativ zu erfassen.

Warum wird eine O-Ring-Dichtung undicht?

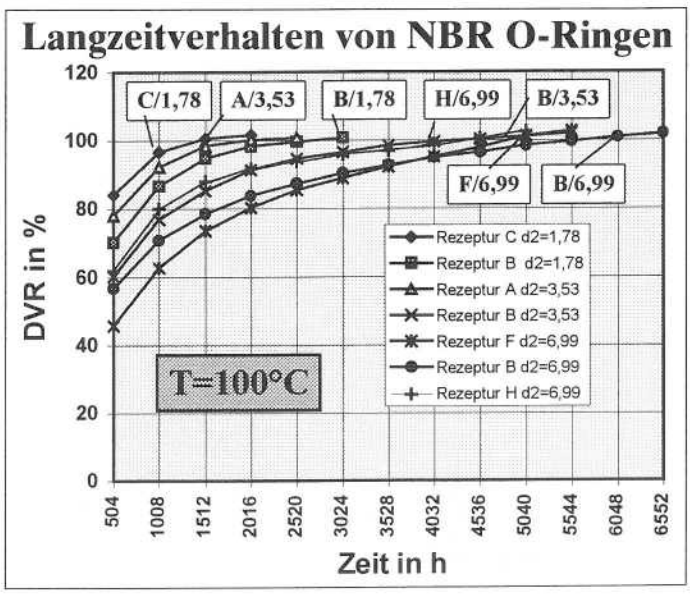
Gummi ist kein idealelastischer Werkstoff und verliert im verformten Zustand nach und nach sein Rückstellvermögen. Aber ein gewisser Verlust an elastischem Rückstellvermögen muß das Dichtheitsverhalten, das zum Beispiel über eine Leckrate gegenüber Prüfgasen gemessen werden kann, noch nicht negativ beeinflussen.

Dichtheitstests an ruhenden O-Ring-Dichtungen bei tiefen Temperaturen belegen zweifelsfrei, daß O-Ring-Dichtungen solange eine annähernd konstante Gasleckrate haben, bis der O-Ring selbst komplett eingefroren ist, das heißt jegliches Rückstellvermögen verloren hat, und darüber hinaus durch eine weitere Temperaturabsenkung der größere Schwund des O-Ringes gegenüber seinen Einbauraum einen zusätzlichen Dichtspalt erzeugt, der nicht mehr überbrückt werden kann. Erst dann steigt die Gasleckrate sprunghaft an [1]. Entscheidend für das Zustandekommen der Leckage an einer O-Ring-Abdichtung ist also nicht der Punkt, wann der O-Ring 50,60 oder 90% seiner Dichtkraft verloren hat, sondern wann er 100% seiner Dichtkraft verloren hat und ein zusätzliches Ereignis in Form eines Dichtspaltes dann die Leckage herbeiführt. Die O-Ring-Dichtung kann in bezug auf ihr Kälteleckageverhalten mit einem Zweipunktregler verglichen werden, die „Schalthysterese" beträgt ±2°C, wie die Untersuchungen aus [1] zeigen **Tabelle 1**.

Betrachtet man jetzt eine alterungsbedingte Leckage einer statischen O-Ring-Abdichtung, so treten hierfür die gleichen Wirkungsmechanismen wie bei der Kälteleckage auf, der O-Ring wird hart und verliert sein elastisches Rückstellverhalten. Der wesentliche Unterschied besteht lediglich darin, das der für die bleibende Verformung verantwortliche Reaktionsmechanismus ein anderer ist, nämlich überwiegend ein chemischer. Die Polymerketten des O-Ringes

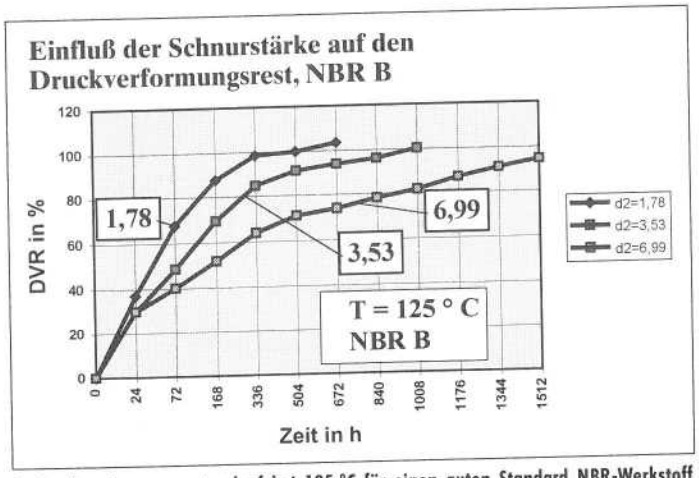
Tabelle 1: Vergleich der Leckage-Temperatur mit der Einfriertemperatur (T 100% DVR), bei der keinerlei elastisches Rückstellvermögen mehr vorhanden ist

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

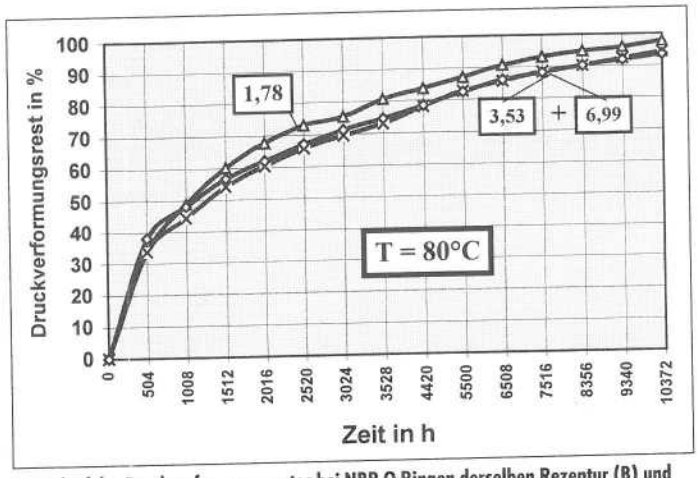


1: Langzeit-Druckverformungsrest-Verhalten von NBR-O-Ringen verschiedener Schnurstärken und verschiedener Rezepturen bzw. Lieferanten

Dipl.-Ing. B. Richter ist Inhaber der Firma O-Ring-Prüflabor Richter, Großbottwar



2: Druckverformungsrestverlauf bei 125 °C für einen guten Standard NBR-Werkstoff (Rezeptur B) bei unterschiedlichen Schnurstärken



3: Verlauf des Druckverformungsrestes bei NBR-O-Ringen derselben Rezeptur (B) und unterschiedlichen Schnurstärken

werden gespalten, parallel dazu erfogt eine Nachvernetzung. Beides bewirkt eine Spannungsrelaxation, d.h. der O-Ring verliert sein Rückstellvermögen, parallel dazu nimmt die Härte zu, da in der Regel die Nachvernetzungsreaktion gegenüber der Kettenspaltung überwiegt. Erst wenn nach einer 100%igen bleibenden Verformung des O-Ringes zusätzlich ein Volumenschwund, zum Beispiel durch das Ausgasen flüchtiger Bestandteile oder durch einen Polymerabbau, oder ein zusätzlicher betriebsbedingter Spalt auftritt, zum Beispiel durch Temperatur- oder Druckänderungen, ist mit einer Undichtheit zu rechnen. Daß O-Ringe auch im sehr fortgeschrittenen Alterungsstadium noch dichten, findet man häufig in der Praxis bestätigt: bei Wartungsarbeiten werden oftmals O-Ringe ausgetauscht, die bereits total versprödet und stark bleibend verformt sind, und trotzdem haben diese bis zum Ausbau noch gedichtet.

Damit läßt sich der Punkt, bei dem zumindestens für die überwiegende Zahl statischer O-Ring-Abdichtungen gerade noch Dichtheit gewährleistet ist, in etwa gleichsetzen mit dem Zeitpunkt, wann ein O-Ring eine 100%ige bleibende Verformung erreicht hat. Und dieser Zeitpunkt läßt sich wiederum in Laborversuchen relativ genau ermitteln, indem man Langzeit-Druckverformungsrest-Messungen durchführt, und zwar an O-Ringen selbst und nicht an Normprobekörpern. Voraussetzung dafür ist eine ausreichend genaue Messung der O-Ring-Schnurstärken vor und nach den Temperatur-Tests, was am besten mit Hilfe eines Laser-Scan-Micrometers möglich ist. Damit lassen sich auch kleine Verformungen sehr genau messen und somit der Zeitpunkt, wann O-Ringe den 100% Druckverformungsrestwert durchlaufen. Dies stellt ein Lebensdauerkriterium dar, das im Vergleich zu klassischen in der Elastomertechnik verwendeteten Lebensdauerkriterien, wie zum Beispiel eine Abnahme der Reißdehnung um 50%, einen direkten Bezug zur Anwendung zuläßt.

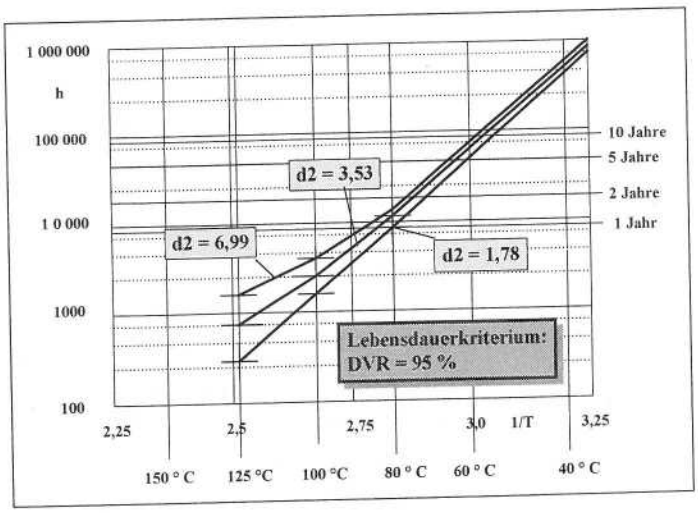
Daher wurden mit O-Ringen von 11 verschiedenen Lieferanten, die zusammen ein erhebliches Marktvolumen repräsentieren, Druckverformungsrest-Versuche für drei Schnurstärken durchgeführt, siehe **Bild 1**. Dabei handelte es sich durchweg um marktgängige schwefelvernetzte Standard-Qualitäten aus Nitrilbutadienkautschuk (NBR) mit der Nennhärte von 70 Shore A, wie sie in zahlreichen Hydraulik- und Pneumatikkomponenten eingesetzt sind. Das Diagramm belegt deutliche rezeptur- und schnurstärkenbezogene Unterschiede. O-Ringe mit der Nenn-Schnurstärke von 1,78 mm lassen bei 100°C eine Lebensdauer zwischen 1500 h (Rezeptur C) und 3000 h (Rezeptur B) erwarten, dickere O-Ringe mit der Schnurstärke von 6,99 mm zwischen 4500 und 6000 h. Je nach Wahl der Schnurstärke und der Rezeptur kann man bei NBR-O-Ringen bei 100°C also von abgesicherten Betriebszeiten von ca. 1500 h bis ca. 6000 h ausgehen. Allein durch die Wahl der Rezeptur läßt sich in etwa der Lebensdauerfaktor 2 bis 2,5 vom Anwender beeinflußen. Die Wahl der Schnurstärke hat eine umso größere Bedeutung, je höher die Betriebstemperatur ist, bei Temperaturen unterhalb von 80 °C ist sie nicht mehr von großem Einfluß. Dies belegen die Untersuchungen bei 125 °C und 80 °C an NBR-O-Ringen derselben Rezeptur (Rezeptur B), (**Bilder 2 und 3**). Die Untersuchungen bei 80 °C sind noch nicht abgeschlossen und werden fortgesetzt, bis auch dort der 100%-Wert erreicht wird.

Bei der weiteren Auswertung dieser Langzeit-Tests sollen folgende Fragen beantwortet werden:

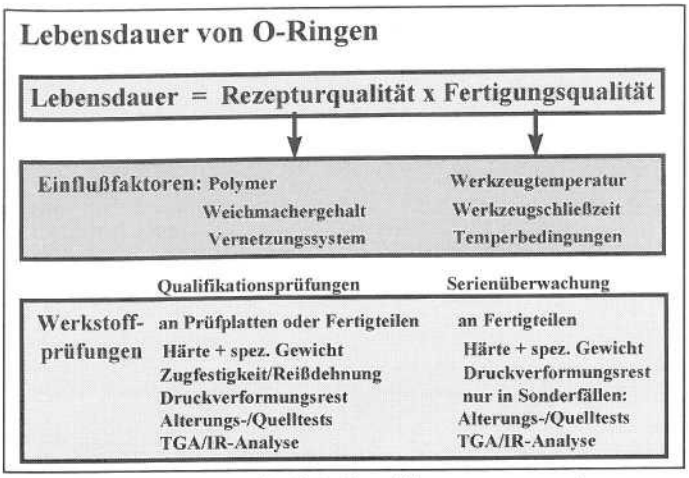
- Wie können die gewonnenen Ergebnisse auf niedrigere Temperaturen übertragen werden?
- Wie erklärt sich der große Einfluß der Schnurstärke und
- was macht den Unterschied zwischen einem guten und einem schlechten NBR O-Ring aus?

Übertragung der Ergebnisse auf niedrigere Temperaturen

Zunächst soll geklärt werden, inwiefern die Zeitverläufe eine Temperaturabhängigkeit zeigen, die dem von Arrhenius [2] aufgestellten Zusammenhang für chemische Reaktionsabläufe zwischen der Temperatur und der Reaktionsgeschwindigkeit folgen. Dazu trägt man die Betriebszeiten bis zum Erreichen des Lebensdauerkriteriums (= 95% bleibende Verformung) logarithmisch über der Y-Achse auf, und als X-Achse trägt man die inverse absolute Temperatur auf und trägt die Ergebnisse bei den drei unterschiedlichen Testtemperaturen von 80, 100, und 125 °C ein, siehe **Bild 4**. Liegen dann diese Punkte auf einer Geraden, kann man davon ausgehen, daß das Eintreten des Lebensdauerkriteriums im Wesentlichen von einem chemischen Reaktionsmechanismus verursacht wurde. Damit läßt sich dann durch Extrapolation der Geraden auf niedrigere Temperaturen eine realistische Ersatzlebensdauer bestimmen. Für gute NBR-O-Ringe (Rezeptur B) können daraus bei 60 °C abgesicherte Betriebszeiten je nach Schnurstärke zwischen 5 und



4: Lebensdauergeraden für einen guten NBR-Standardwerkstoff (Rezeptur B)



5: Lebensdauer von O-Ringen ergibt sich im Wesentlichen aus rezeptur- und fertigungsbedingten Einflußgrößen

Werkstoff-Prüfung	NBR 70	NBR 80	NBR 90
Härte, DIN 53519,Teil 2, IRHD	70+/- 5	80+/- 5	90+/- 5
Spezifisches Gewicht, DIN 53 479, zulässige Abweichung vom rezepturbezogenen Mittelwert, g/cm³	+/-0,02	+/-0,02	+/-0,02
Druckverformungsrest, DIN 53517 , % 24h/100 °C	20 max.	25 max.	30 max.
Druckverformungsrest, DIN 53 517, % 24h/-25 °C, Messung 60 s nach Entspannung,	95 max.	95 max.	95 max.
Lagerung in Prüfkraftstoff FAM B (DIN 51604), 24h/23 °C			
Änderung des Volumens, %	95 max.	90 max.	85 max.
Anschließende Rücktrocknung 22h/100 °C			
Änderung des Volumens, %	-10 max.	-10 max.	-10 max.
Änderung der Härte, Shore A	+12 max.	+12 max.	+12 max.
Lagerung in ASTM-Öl Nr. 3, 70h/100°C			
Änderung des Volumens, %	+20 max.	+20 max.	+15 max.
Änderung der Härte, Shore A	-10 max.	-10 max.	-10 max.
Umluft, 70h/100 °C			
Änderung des Volumens, %	-3 max.	-3 max.	-3 max.
Änderung des Gewichts, %	-3 max.	-3 max.	-3 max.
Änderung der Härte, Shore A	+8 max.	+7 max.	+6 max.

Tabelle 2: Vorschlag für eine fertigteilbezogene Bestellvorschrift (Werkstoffanforderungen) für gute Standard NBR-O-Ringe

9 Jahren abgeleitet werden. Über das Lebensdauerkriterium, d.h. hier über die Höhe des Druckverformungsrestes, ab dem man mit Leckagen rechnen muß, lassen sich anwendungsspezifische Randbedingungen berücksichtigen. Wie oben dargestellt, läßt sich für die meisten O-Ring-Anwendungen ein Lebensdauerkriterium von 100% Druckverformungsrest vertreten, wo jedoch betriebsbedingte Unsicherheiten vorliegen, kann dies auch tiefer angesetzt werden, zum Beispiel bei 80%. In Bild 4 wurden 95% und nicht 100% gewählt, weil bei diesem Grenzkriterium für alle drei Schnurstärken auch die Langzeitwerte für 80 °C vorliegen, daher stellt Bild 4 eher noch eine konservative Abschätzung dar.

Größere Schnurstärken behindern die Sauerstoffzufuhr

Wie Bild 4 zeigt, liegen die 3 Punkte für die Schnurstärke 1,78 mm sehr schön auf einer Geraden, die anderen beiden Schnurstärken nicht. Die Erklärung hierfür liegt wahrscheinlich darin, daß bei größeren Schnurstärken das Verhältnis der freien Oberfläche zum Volumen des O-Ringes abnimmt. Dadurch verringert sich das Vermögen des O-Ringes zur Wärme- und Stoffabsorption mit seiner Umgebung mit zunehmender Schnurstärke, wodurch insbesondere der Luft- bzw. Sauerstoffaustausch behindert wird. Als Folge daraus verzögert sich die Kettenspaltung des Polymers und die Nachvernetzung. Bei niedrigeren Temperaturen (< 80 °C) nimmt der Sauerstoffbedarf infolge geringerer Reaktionsgeschwindigkeiten ab, dadurch verliert auch die Schnurstärke etwas an Bedeutung auf die Lebensdauer.

Die Lebensdauergeraden für die Schnurstärken 3,53 und 6,99 mm lassen sich für niedrigere Temperaturen dann mit der gleichen Geradensteigung wie für die 1,78 mm Geraden fortsetzen. Damit erhält man für alle drei Schnurstärken Lebensdauergeraden, aus der sich für die zugrundegelegte NBR-Rezeptur bei ruhenden O-Ring-Abdichtungen realistische Betriebszeiten gewinnen lassen.

Weitere mögliche betriebsbedingten Einflüsse auf die Lebensdauer

Zunächst muß einschränkend ergänzt werden, daß sich die Lebensdauergeraden aus Bild 4 ausschließlich auf das betrachtete Lebensdauerkriterium der bleibenden Verformung beziehen und andere mögliche Schadensmechanismen, wie zum Beispiel Abrieb, Spaltextrusion oder chemischer Angriff, hier nicht berücksichtigt sind. Auch sind die Versuche durchweg in Luft durchgeführt worden, ein zumindestens einseitiger Ölkontakt hätte das Ergebnis für die getesteten NBR-O-Ringe positiv beeinflußt und damit längere Lebensdauerzeiten ergeben.

Weiterhin sollte erwähnt werden, daß sämtliche Versuche bei einer relativen Verformung der O-Ringe von 25% der Schnurstärke durchgeführt wurden, die toleranzbedingten Verpressungen sich in der Praxis aber an O-Ringen zwischen ca. 15 und 30% (Schnurstärke 1,80 mm) und ca. 10 bis 25% (Schnurstärke 7,00 mm) bewegen [3]. Kleinere Verpressungen als 25% führen zu schlechteren Druckverformungsrestwerten, größere Verformungen zu besseren Werten gegenüber den in den Versuchen ermittelten Ergebnissen [4]. Die Abweichungen in der Praxis gegenüber den Versuchsbedingungen, nämlich der häufig zumindestens einseitige Ölkontakt und die zum Teil niedrigeren O-Ring-Verformungen heben sich somit ein Stück weit auf, so daß die in Bild 4 angegebenen Betriebszeiten auch unter Einbeziehung der hier genannten Einflüsse realistische Anhaltswerte für O-Ring-Abdichtungen mit guten Standard NBR-O-Ringen liefern.

Qualitätskriterien für NBR-O-Ringe

Die Lebensdauerqualität von O-Ringen ergibt sich aus dem Produkt von Rezepturqualität und Fertigungsqualität, **Bild 5**. Die multiplikative Verknüpfung bedeutet, daß eine hohe Rezepturqualität viel von seiner Wirkung verliert, wenn ein O-Ring bei der Herstellung nicht unter den richtigen Bedingungen vulkanisiert wird. Die Rezepturqualität eines Werkstoffes wird über Normprobekörper ermittelt, die teilweise bis zu 20 Minuten lang vulkanisiert werden, O-Ringe dagegen werden unter Serienbedingungen oft gerade mal 30 Sekunden vulkanisiert. Daher sind letztlich erst Prüfergebnisse an unter Serienbedingungen hergestellten O-Ringen tatsächlich aussagefähig über die tatsächliche Lebensdauerqualität. Daher sollte eine Bestellvorschrift für O-Ringe vor allem aussagefähige Fertigteilprüfungen beinhalten, eine Beschreibung einer Rezepturqualität allein ist nicht ausreichend. Neben Härte-, Druckverformungsrest- und Quell- und Alterungswerte sollte dabei auch der Anteil extrahierbarer Mischungsbestandteile begrenzt werden. Hohe Weichmacheranteile führen zu einem schleichenden Volumenschwund durch Extraktion und Ausgasung, was die Lebensdauer von O-Ringen unnötig verkürzt. **Tabelle 2** ist ein Beispiel für eine Bestellvorschrift für gute Standard NBR-O-Ringe. Liegen untergeordnete O-Ring Anforderungen bezüglich Funktion und Langlebigkeit vor, können einzelne Punkte dieser Bestellvorschrift aufgeweitet werden, zum Beispiel der Druckverformungsrest, wo oftmals auch geringere Anforderungen noch ausreichend sind. Der Unterschied zwischen guten und schlechten NBR-O-Ringen zeigt sich bei Kurzzeit-Prüfungen insbesondere im Druckverformungsrestverhalten (24 h/100 °C) und in der Höhe der extrahierbaren Bestandteile (Volumenabnahme nach Kraftstofflagerung und anschließender Rücktrocknung).

Um eine Werkstoffrezeptur aussagefähig zu beschreiben beziehungsweise zu analysieren werden bevorzugt thermogravimetrische Analysen durchgeführt (TGA). Dabei läßt der Gewichtsverlust bei einer definierten Temperaturerhöhung bis zu max. 1000 °C quantitative Rückschlüsse zu auf verschiedene Rezepturbestandteile, wie zum Beispiel niedrig siedende Anteile (Weichmacher), organische Bestandteile (Polymer), Rußanteile und nicht organische Bestandteile (Ascherest). Damit läßt sich eine einmal freigegebene Rezeptur jederzeit an Fertigteilen überprüfen. Infrarot-

spektroskopische Analysen (IR) sind etwas schwieriger zu interpretieren, geben aber in Zweifelsfällen sichere Informationen, ob Mischungsbestandteile in Bezug auf ihre chemischen Zusammensetzung geändert wurden. Wo in kritischen Anwendungen eine klare Rezepturrückverfolgbarkeit erwünscht wird, sollte zumindestens eines dieser beiden Verfahren, bevorzugt die TGA, bei der Musterfreigabe angewendet werden, um bei eventuellen Rezepturänderungen in der Serienlieferung diese auch nachweisen zu können.

Eine komplette Qualitätsabsicherung bei O-Ringen muß also beides umfassen, sowohl die Rezepturqualität als auch die Fertigungsqualität.

Neu: Prüfen als Dienstleistung

Da angemessene Qualifikations- und Serienprüfungen an O-Ringen und natürlich auch an anderen Gummi-Dichtungen zur Lebensdauerabsicherung des Gesamterzeugnisses wichtig sind, diese aber hohe Kosten für Prüfgeräte und qualifiziertes Prüfpersonal bedeuten, bietet hier ein erfahrener O-Ring-Spezialist seine unabhängige Prüf- und Fachkompetenz als Dienstleistung an. Denn gerade der hohe erforderliche Spezialisierungsgrad bei der Prüfung von Gummi-Teilen macht diese Tätigkeit zu einem typischen Dienstleistungssektor. Durch die breite Nutzung dieser Dienstleistung ergeben sich dabei zusätzliche Kostenvorteile für die Anwender. So haben seit der Gründung des O-Ring Prüflabors Richter im Jahr 1996 bereits weit über hundert Firmen dieses Dienstleistungsangebot in Anspruch genommen, sei es in Form von Prüfungen, Schulungen, Beratungen oder Schadensanalysen. Die Inanspruchnahme dieser Dienstleistung versetzt jeden Dichtungsanwender in die Lage, unabhängig vom Lieferanten und von der Abnahmemenge zuverlässig die Qualität von O-Ringen und anderen Gummi-Dichtungen zu beurteilen.

Zusammenfassung

O-Ringe behalten in ruhenden Anwendungen ihre volle Dichtwirkung, bis eine sehr starke bleibende Verformung eingetreten ist. Der Zeitpunkt bis zum Eintreten einer Leckage ist abhängig von den Betriebsbedingungen, insbesondere von der Betriebstemperatur und der Schnurstärke und der Qualität des O-Ringes, die sich als Produkt aus rezeptur- und fertigungsabhängigen Faktoren ergibt. Durch die durchgeführten Langzeit-Tests können realistische Betriebszeiten für gute NBR-O-Ringe ermittelt werden. Zur Absicherung wichtiger O-Ring Eigenschaften wird ein Vorschlag gemacht, der auch an Serien-O-Ringen überprüfbar ist. Durch die Umsetzung der vorgeschlagenen Vorgehensweise lassen sich vorhandene Qualitätsunsicherheiten bei den O-Ringen beseitigen, und damit Ursachen für die bei vielen Endabnehmern ungeliebten Leckagen. Ein neu angebotenes Dienstleistungsangebot kann dabei helfen, Lücken bei der Fach- und Prüfkompetenz bei der O-Ring-Prüfung zu schließen.

Literaturhinweise:
[1] H.P. Weise, H. Kowalewsky, R.Wenz, Behaviour of Elastomeric Seals at Low Temperature, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin, PARTRAM 92, Yokohama
[2] Römpp Chemie Lexikon, Georg Thieme Verlag Stuttgart, Bd. 1, S. 251
[3] DIN 3771, Teil 5, O-Ringe, Berechnungsverfahren und Maße der Einbauräume
[4] Präzisions O-Ringe Handbuch, 5705G, Parker Hannifin, Seite 47

Bildnachweis: Verfasser