

Mit der neuen ISO 3601 Teil 5 (O-Ring Werkstoffe) wird der O-Ring endlich zum Normteil. Waren bisher nur die Abmessungen (Teil 1) und die zulässigen Oberflächenabweichungen (Teil 3) genormt, enthält die neue Ausgabe der Norm auch Vorgaben für die Rezeptur und den Vulkanisationsgrad der O-Ringe (Härte und Druckverformungsrest). Der vorliegende Aufsatz erläutert die einzelnen Teile dieser O-Ring Norm und führt insbesondere auf, warum der neue Teil 5 für die Anwender so wichtig ist.

Wie sichert die ISO 3601 bisher die Funktion von O-Ringen ab.

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). Die üblichen Nenn-Härten bei O-Ringen liegen zwischen 70 und 80 IRHD, was bei typischen O-Ring Einbauräumen (nach ISO 3601-2) ohne die Verwendung von Stützringen Drücke bis zu ca. 150 bar zulässt.

Die Anlagenbreite des O-Rings zur Dichtfläche ist nun abhängig vom Verformungsgrad. Ist dieser Verformungsgrad (ausgedrückt in prozentueller Verformung, auch genannt Verpressung) zu gering, ergibt sich daraus eine höhere Anfälligkeit für Oberflächenfehler der Dichtfläche und der O-Ringe, zudem können die O-Ringe das im Werkstoff vorhandene elastische Rückstellpotential bei kleinen Verformungen nur begrenzt ausschöpfen. Bei zu kleinen relativen Verformungen kann ein erheblicher Teil der durch die Verformung erzeugten Rückstellkraft allein durch physikalische Relaxationsvorgänge verlorengehen, sodass auch ohne Alterung des Werkstoffes bereits eine Beeinträchtigung der Dichtfunktion eintreten kann. Bei einer zu hohen

Verpressung steigt das Risiko von Spannungsrissen im O-Ring-Kern bei der Einwirkung hoher Temperaturen, zudem ergibt sich bei Stangen- und Kolbeneinbauträumen ein erhöhtes Montagerisiko. Daher ist es bei einer O-Ring Auslegung wichtig sicherzustellen, dass O-Ringe im verbauten Zustand in einem bestimmten Verformungsbereich liegen. Die Vorgaben dafür finden sich in der ISO 3601 Teil 2 bzw. DIN ISO 3601-2 und in der deutschen Vorgängernorm DIN 3771 Teil 5.

Der Teil 1 der ISO 3601-Norm definiert die Abmessungen, bei O-Ringen ist das Funktionsmaß die Schnurstärke, siehe oben. Der Teil 3 der Norm beschreibt nun, wo die Grenze liegt für Oberflächenfehler der O-Ringe. Damit kann man also mithilfe der Normteile 1, 2 und 3 die dichtungstechnischen Voraussetzungen für O-Ringe absichern. Nicht geregelt waren allerdings bis zum Jahre 2015 die werkstofflichen Voraussetzungen für O-Ringe, hier konnte die bisherige Ausgabe der ISO 3601-5 aus dem Jahr 2002 lediglich eine kleine anwendungstechnische Hilfestellung geben, um in Abhängigkeit der verwendeten Fluide das passende Elastomer auszuwählen. Für weitergehende Werkstoffvorgaben wurde dann auf den Dichtungslieferant verwiesen.

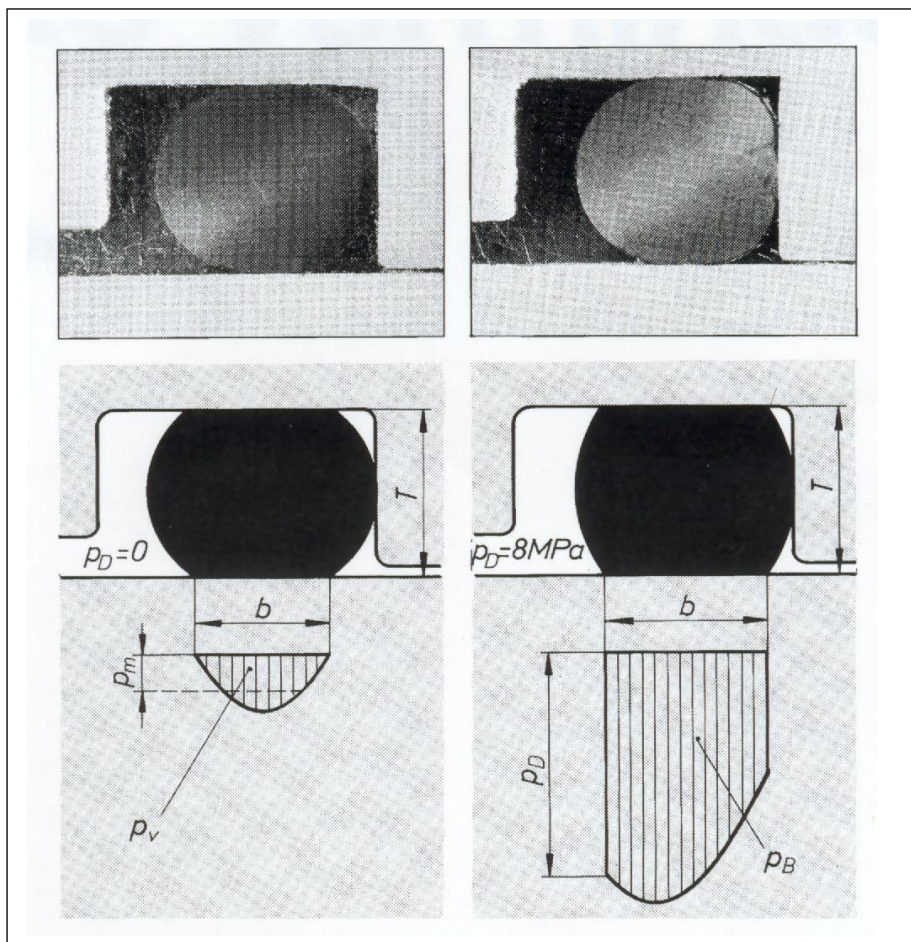


Bild 1 [1]: Der O-Ring als aktives Dichtelement

Was ist notwendig, um die Werkstoffeigenschaften von O-Ringen zu spezifizieren.

Um zu verstehen, welche Einflüsse eine wichtige Rolle spielen können, soll hier zunächst aufgezeigt werden, was denn die werkstoffliche Qualität eines O-Rings bzw. einer Elastomerdichtung ausmacht, siehe hierzu Bild 2

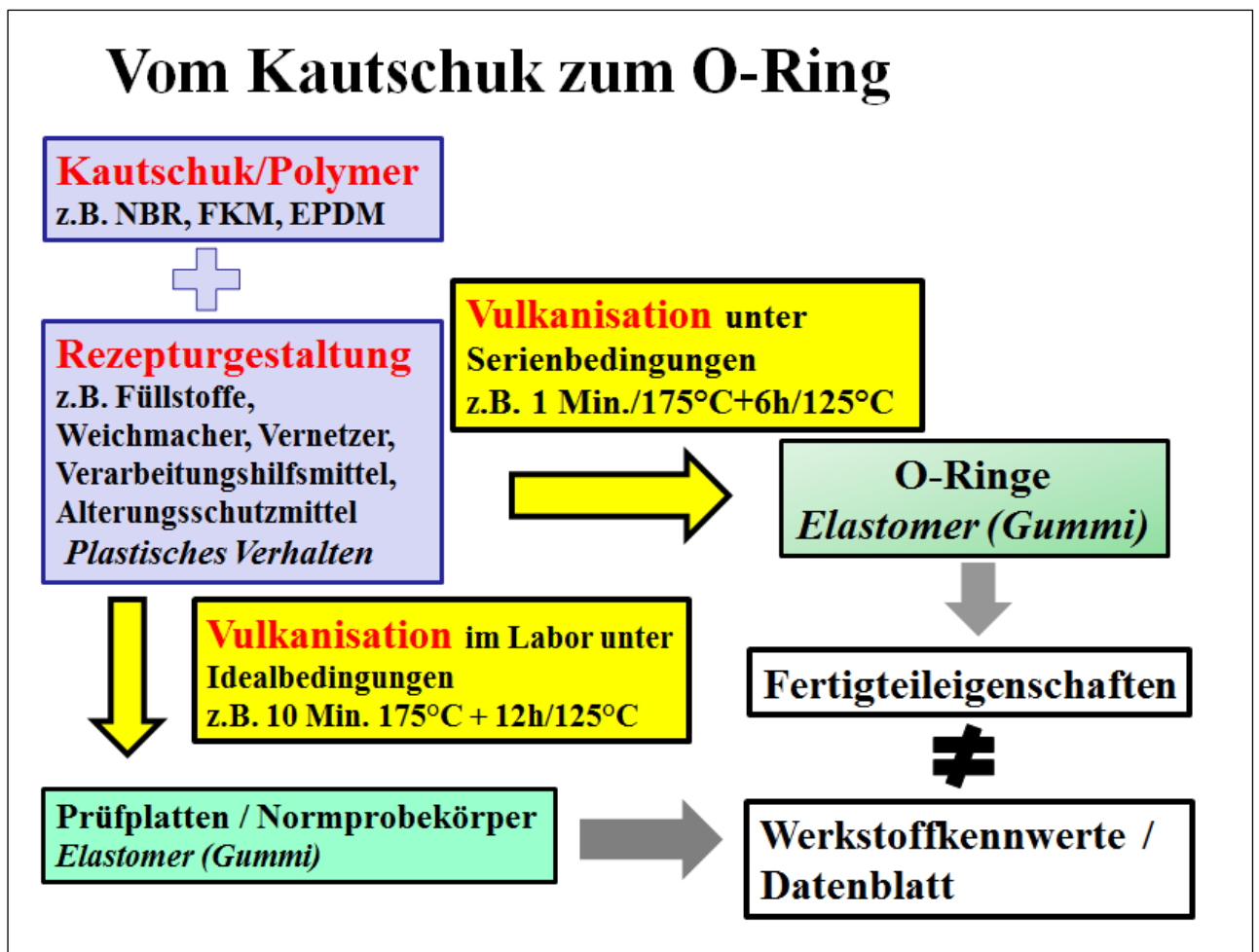


Bild 2: Die drei großen Einflussgrößen Polymer, Rezepturgestaltung und Vulkanisation

Die große werkstoffliche Vielfalt von O-Ringen resultiert letztlich aus folgenden drei Einflussgrößen:

1. Vielfalt der Polymere

Hinter den Kurzbezeichnungen (z.B. FKM, NBR, EPDM) verbirgt sich eine große

Vielfalt an Eigenschaften innerhalb derselben Polymerfamilie. Dies erklärt sich daraus, dass die Kurzbezeichnungen lediglich die Art der möglichen Ausgangsmomere beschreibt, die Mengenanteile aber offen lässt. Auch die mittlere Kettenlänge bzw. das mittlere Molekulargewicht und die Molekulargewichtsverteilung der Polymere sind mit diesen Kurzbezeichnungen keinesfalls geregelt. So gibt es NBR-Polymere mit unterschiedlichem Gehalt an Acrylnitril, was zu großen Unterschieden in der Kälteflexibilität führen kann (-20 bis -50°C). Bei EPDM Polymeren kann der Ethylengehalt im Polymer von ca. 40% (niedriger Druckverformungsrest bis -40°C) bis ca. 90% (hoher Druckverformungsrest schon bei -10°C) liegen, der Dienegehalt von <1% (sehr gute Alterungsbeständigkeit bei 150°C) bis weit über 6% (schlechte Alterungsbeständigkeit bei 150°C). Bei FKM-Werkstoffen unterscheidet man nach fünf unterschiedlichen Grundtypen von Polymeren [2], woraus sich unterschiedliche Kälteflexibilitäten und unterschiedliche Quellbeständigkeiten ergeben.

2. **Große Freiheitsgrade bei der Rezepturgestaltung**

Bei der Rezeptur gibt es einen großen Gestaltungsspielraum durch die Wahl der Qualität und Quantität von Füllstoffen, Weichmachern, Vernetzungschemikalien und zusätzlichen Reagenzien zur Verbesserung bestimmter Eigenschaften, wie zum Beispiel Alterungsschutzmittel oder Ozonwachse. Das heißt konkret, dass bei einem EPDM-Werkstoff erst durch die Rezepturgestaltung festgelegt wird, ob der Polymeranteil bei 30 oder 60% liegt, oder ob als Vernetzer Schwefel (zulässige Dauertemperatur 100°C) oder ein Peroxid (zulässige Dauertemperatur 150°C) verwendet wird. Selbst wenn also zwei Rezepturen dasselbe Polymer enthalten, können sich daraus sehr große Unterschiede ergeben.

3. **Starker Einfluss der Prozessparameter bei der Vulkanisation**

Da Gummiwerkstoffe bei der Formgebung auch gleichzeitig einer chemischen Umwandlung unterworfen sind, haben die Prozessparameter bei der Formvulkanisation (insbesondere die Werkzeugtemperatur und die Vulkanisationszeit) und anschließender Nachvulkanisation im Temperofen (Temperatur/Zeit) einen erheblichen Einfluss auf den Vernetzungsgrad und damit auf die Elastizitätseigenschaften der Fertigteile. Werden zwei Chargen desselben Werkstoffes, das heißt, derselben Rezeptur, unterschiedlich vulkanisiert, können sich daraus stark unterschiedliche Eigenschaften ergeben, zum Beispiel bezüglich des Druckverformungsrestes oder der Zugfestigkeit. Die Datenblatt-Angaben von Elastomerwerkstoffen beziehen sich immer auf ideal

vulkanisierte Prüfkörper und zeigen damit das Potential auf, das in der Rezeptur drinsteckt. Datenblattangaben geben aber keine verbindlichen Werte vor für Fertigteile. Werden also O-Ringe nur nach Datenblatt bestellt, ist es Ermessenssache des Lieferanten, wie gut (oder wie schlecht) er seine O-Ringe vulkanisiert.

Praxis-Beispiele für den Einfluss des Polymers

Tabelle 1 zeigt DSC-Werte [3] (=thermodynamischer Glasübergangspunkt) von 4 verschiedenen NBR O-Ringen, welche von den Lieferanten durchweg als Kältewerkstoffe für Temperaturen bis -40°C bezeichnet wurden. Während die O-Ring Positionen 1 bis 3 einen Glasübergang weit unterhalb der genannten -40°C zeigen, hat die Probe 4 einen Glasübergang bereits bei -31°C; somit liegt hier eindeutig keine Kältemischung vor, wie im Datenblatt angegeben. Diese Unterschiede im Kälteverhalten erklären sich aus dem Acrylnitrilgehalt im NBR-Polymer, der von 18-50% variieren kann.

	Härte, IRHD M	Dichte, g/cm ³	Tg (DSC)
NBR 1	71	1,22	-62°C
NBR 2	73	1,20	-58°C
NBR 3	66	1,28	-52/-33°C
NBR 4	77	1,24	-31°C

Tabelle 1- Glasübergangstemperaturen von 4 verschiedenen O-Ringen

Tabelle 2 zeigt zwei unterschiedliche, peroxidisch vernetzte EPDM-Werkstoffe, welche sich erheblich im Kälteverhalten unterscheiden. Der Werkstoff EPDM A liegt im TR10-Wert [4, 5] (konservativer Kälterichtwert für O-Ringe) um 20K schlechter als der Werkstoff EPDM B. Diese gefundenen Unterschiede erklären sich durch den unterschiedlichen Ethylengehalt im EPDM-Polymer, der von 40 bis ca. 90% variieren kann. Ein hoher Ethylengehalt führt bei EPDM O-Ringen schon fast bei Raumtemperatur zu einer Art Kältestarre.

	TR2	TR10	TR30	TR50	TR70	TR70-10
EPDM A	-45,3°C	-27,4°C	-9,0°C	1,1°C	9,5 °C	36,9 °C
EPDM B	-52,6 °C	-47,1°C	-40,1°C	-34,0°C	-25,0°C	22,1°C

Tabelle 2 TR10 -Vergleich von zwei EPDM-Werkstoffen bezüglich des TR10-Wertes

Dies zeigt auch Tabelle 3: Zwei gut vulkanisierte peroxidisch vernetzte EPDM O-Ringe lassen bei der Druckverformungsrestprüfung bei 100°C (DIN ISO 815-1) nur geringe Unterschiede erkennen, wenn man die O-Ringe nach der Alterung von 24h bei 100°C bei Prüftemperatur entspannt (= Verf. A). Dagegen führt eine Entspannung erst nach Abkühlung auf 23°C (=Verf. B) zu großen Unterschieden bei gleicher Voralterung. Die Unterschiede zwischen Verfahren A und Verfahren B gehen auf reversible Einfriereffekte zurück, dagegen ist die bleibende Verformung nach Verf. A irreversibel, weil diese ausschließlich eine Folge der Alterung ist. Die Höhe dieser bleibenden Verformung ist dann ein gutes Maß für die Netzwerkdicke bzw. den Vulkanisationsgrad.

EPDM 80 O-Ringe, d2=3,53 mm	EPDM A	EPDM B
Druckverformungsrest	Niedriger Ethylengehalt	Hoher Ethylengehalt
24h/100°C ISO 815-1 Verf. A	7%	14%
24h/100°C ISO 815-1 Verf. B	14 %	60%
24h/0°C ISO 815-2	14 %	65%

Tabelle 3 Das Druckverformungsrestverhalten zweier peroxidisch vernetzter EPDM-Werkstoffe mit unterschiedlichem Ethylengehalt bei hohen und tiefen Temperaturen

Der Vergleich mit dem Druckverformungsrest bei 0°C, der sich allein aus dem reversiblen Einfriereffekt erklärt, zeigt ebenfalls die Auswirkungen des unterschiedlichen Ethylengehalts im Polymer sehr deutlich.

Praxisbeispiele für den Einfluss der Rezepturgestaltung

Ein typisches Beispiel für den Rezeptureinfluss ist das Vernetzungssystem von EPDM O-Ringen. Gut vulkanisierte peroxidisch vernetzte EPDM O-Ringe haben einen Druckverformungsrestwert von 24h/150°C zwischen 10 und 30%, schwefelvernetzte EPDM O-Ringe unter denselben Prüfbedingungen (24h/150°C) von 60-80%. Ein weiterer möglicher Unterschied bei EPDM-Werkstoffen ist der Weichmacheranteil. Hier bietet der Markt auch innerhalb der peroxidisch vernetzten Werkstoffe Rezepturen ohne oder mit geringem Weichmacheranteilen an (0-3%), aber auch mit Weichmacheranteilen von bis zu 30% bei einer Nennhärte von 70 Shore A bzw. IRHD. Dies hat enorme Auswirkungen auf die Wärmebeständigkeit, weil die Weich-

macher unter Wärmeeinfluss ausgasen und zum Schwund und zur Verhärtung von O-Ringen führen. So kann ein EPDM O-Ring nach einer Wärmebeanspruchung über 72 Stunden bei 150°C eine verschwindend geringe Härtezunahme zeigen (<3 IRHD) oder gar Werte über 20 IRHD.

Praxisbeispiele für den Einfluss der Vulkanisation

Gute Datenblattwerte beim Druckverformungsrest sind keine Garantie für niedrige Druckverformungsrestwerte an O-Ringen. Im täglichen Laboralltag findet man immer wieder beängstigende Abweichungen. Dass man an HNBR O-Ringen Werte von 99% findet, wo das Datenblatt 28% angibt nach 24h/150°C [6], kommt glücklicherweise eher selten vor. Dass man an O-Ringen aber Druckverformungswerte findet, welche 25-50% über dem angegebenen Datenblattwert liegen (24h/150°C), kommt bei HNBR und EPDM O-Ringen erschreckend häufig vor. Dies erklärt sich prozessbedingt, da der Vulkanisationsgrad an nicht ausvulkanisierten peroxidisch vernetzten EPDM- und HNBR-O-Ringen durch ein Nachtempern (=Nachvulkanisation im Ofen) nicht mehr erheblich verbessert werden kann, wie das zum Beispiel mit NBR- (schwefelvernetzt) und FKM O-Ringen gut möglich ist

Wie spezifiziert man die Werkstoff-Eigenschaften von O-Ringen

Wie oben aufgeführt, haben die Rezepturqualität als auch die Verarbeitung bzw. Vulkanisation einen erheblichen Einfluss auf die werkstoffliche Qualität von O-Ringen. Am einfachsten lässt sich dieser Zusammenhang mit einer multiplikativen Verknüpfung darstellen:

O-Ring Qualität = Rezepturqualität x Fertigungsqualität

Geht ein Faktor gegen Null, geht das ganze Produkt gegen Null. Noch so gute Datenblätter bzw. Rezepturqualitäten sind nutzlos, wenn die Werkstoffe schlecht verarbeitet, das heißt hier, schlecht vulkanisiert sind. Andererseits nützen die besten Qualitätsabläufe eines O-Ring Produzenten nichts, wenn dieser Rezepturen verarbeitet, die nicht annähernd den Stand der Technik darstellen, weil die verwendeten Rezepturen beispielsweise nur auf die Verarbeitbarkeit hin optimiert wurden. Um einen guten Stand der Technik von O-Ringen abzusichern, muss also beides definiert werden: die Rezeptur (über Werkstoffeigenschaften) und die Vulkanisation (über Druckverformungsrestanforderungen für die O-Ringe). Das hört sich zwar einfach an, ist es

aber praktisch nicht, weil es allenfalls in der Luftfahrt Regelwerke für O-Ringe und andere Dichtungen gibt, die das so klar umsetzen. Daher haben sich Anwender bisher nur über hauseigene Spezifikationen diesbezüglich absichern können, um sich dann oft mit erheblichem Aufwand auch am Markt die spezifikationskonformen O-Ringe zu beschaffen. Die neue Werkstoff-Norm für O-Ringe ISO 3601-5 (2015-4) hat diese Thematik nun praxisgerecht umgesetzt.

Was kann die neue ISO 3601 Teil 5 (2015-04)

In der Tabelle 2 der Norm werden Fertigteilanforderungen definiert für O-Ringe bezüglich Härte (IRHD-CM) und Druckverformungsrest, sodass damit der Vulkanisationsgrad der O-Ringe verbindlich vorgeschrieben ist. Für den Druckverformungsrest werden Grenzwerte für 24h und 72h vorgegeben, die alternativ angewendet werden können. Wegen der kürzeren Prüfzeit und des geringeren Einflusses der Schnurstärke ist zu erwarten, dass sich hier die 24h-Prüfzeit durchsetzen wird. Die vorgegebenen Grenzwerte für den 24h- Druckverformungsrest liegen ca. 15-20% über den Werten, was ein guter Stand der Technik an den 13x6 mm Testknöpfen (Probekörper B nach ISO 815-1) zulässt. Folgende Werkstoffe werden dabei spezifiziert:

NBR 70/90-schwefelvernetzt (S)

NBR 70/90-peroxidvernetzt (P)

HNBR 75/90

FKM 70/75/80/90

VMQ 70

EPDM 70/80- schwefelvernetzt (S)

EPDM 70/80- peroxidvernetzt (P) und

ACM 70.

Das ist dann doch eine ganz ansehnliche Anzahl an Werkstoffe, wobei natürlich schon darüber diskutiert werden kann, warum CR 70-Werkstoffe und FVMQ 70 da nicht enthalten sind. Auch lässt sich darüber diskutieren, ob man peroxidisch vernetztes NBR oder schwefelvernetztes EPDM wirklich in der Norm braucht, spielen diese praktisch doch eine untergeordnete Rolle. Wer aber weiß, wie schwierig es ist, in internationalen Normungsgruppen ein Konsens zu finden ist, wird eher positiv überrascht von der Anzahl an Werkstoffen sein. Aus anwendungstechnischer Sicht ist es dabei oft unerheblich, ob ein O-Ring die Nennhärte 70, 75 oder 80 IRHD hat. So

können die verschiedenen O-Ring Hersteller ihre Standardwerkstoffe beibehalten, ohne dass dies zu großen Schwierigkeiten bei den Anwendern führen sollte.

Zu diesen oben aufgeführten Werkstoffgruppen gibt es in den Tabellen 3 bis 10 die dazugehörigen Anforderungen an die Rezepturqualität. Und auch hier wird der fachkundige Anwender erst einmal positiv überrascht sein, dass hier wesentlich mehr an Eigenschaften spezifiziert wird, als dies im allgemeinen mittels Datenblätter von den O-Ring Lieferanten der Fall ist. Insbesondere werden Druckverformungsrestwerte über 2 Wochen durchweg spezifiziert, was das Langzeitverhalten absichert. Besonders erwähnenswert ist, dass für EPDM-Werkstoffe, das ist das Sorgenkind Nr. 1 bei den Anwendern, ein TR10-Wert von unterhalb -40°C vorgeschrieben ist. Viele angebotenen EPDM O-Ringe im Markt bieten dem Anwender hier derzeit wesentlich weniger, als der Stand der Technik hergibt. Somit bildet diese neue Norm durchaus in vertretbarer Weise einen guten Stand der Technik ab und reduziert damit das Risiko für den Anwender gegen O-Ring Ausfälle durch unzureichende Werkstoffqualität, siehe oben, erheblich ab. Dort wo die geforderten Rezepturvorgaben nach Meinung der Anwender nicht ausreichend sind, können ja zusätzliche Vereinbarungen mit dem Lieferanten getroffen werden. Wenn zum Beispiel einem Anwender in der Hydraulik der schwefelvernetzte NBR 70-Werkstoff bezüglich Quellung in IRM-Öl Nr. 1 (+5/-15%) und bezüglich TR10-Wert ($<-20^{\circ}\text{C}$) nicht ausreicht, so kann er ja diesbezüglich engere Grenzen mit ihm vereinbaren, z.B. Quellung in IRM-Öl Nr. 1 von +5/-10% und TR10-Wert $<-25^{\circ}\text{C}$) und sich in allen anderen Punkten auf diese Norm beziehen.

Zusammenfassend bilden die geforderten Rezeptureigenschaften durchaus einen guten Stand der Technik ab. Dabei bleibt aber auch noch genügend Spielraum für die Rezepturen der Premium-Lieferanten, sich durch deutlich bessere Eigenschaften bezüglich Langzeitbeständigkeit, Kälteflexibilität oder Medienbeständigkeit abzuheben.

Praktische Umsetzung der ISO 3601-5 (2015-04)

1. Nachweis der Rezepturkonformität

Die unkomplizierteste Umsetzung der Norm seitens der O-Ring Lieferanten wäre die, dass die Datenblätter der O-Ring Lieferanten bereits einen Soll/Ist-Wert Vergleich mit der Norm ausweisen, das heißt, dass diese ihre Datenblätter in Anlehnung an die

Forderungen der ISO 3601-5 umgestalten. Die Norm selber sagt nichts darüber aus, wer die Konformitätsberichte erstellen darf. Somit darf der Lieferant die Konformität durch eigene Labors nachweisen. Versicherungsrechtlich dürfte aber der Kunde bzw. der Anwender nur dann gegen Fehllieferungen und daraus entstehenden Schäden abgesichert sein, wenn er seiner Sorgfaltspflicht nachkommt und die Angaben des Lieferanten überprüft oder überprüfen lässt. Liegt allerdings vom Lieferanten ein Konformitätsbericht von einem akkreditiertem Prüflabor vor, so gilt dies als lieferantenunabhängiger Nachweis, vergleichbar zu einer selber durchgeführten oder in Auftrag gegebenen Untersuchung. Nicht geregelt ist in der ISO 3601-5, wie der Identitätsnachweis einer Rezeptur aussehen soll, damit der Anwender in Zweifelsfällen überprüfen kann, ob die gelieferten O-Ringe auch tatsächlich der dafür qualifizierten Rezeptur entsprechen. Hier wird ein Nachweis mittels Dichte und einer thermogravimetrischen Analyse empfohlen. Diskutieren kann man dann allenfalls noch über die Zeitspanne der Gültigkeit eines Konformitätsberichtes. Bei Intervallen der Wiederholungsprüfungen bis zu 5 Jahren bewegt man sich sicherlich noch im Rahmen allgemeiner industrieller Praxis in anderen Bereichen (z.B. DVGW-Zulassungen oder Trinkwasserzulassungen).

2. Nachweis der O-Ring Eigenschaften

Hier sei zunächst einmal darauf hingewiesen, dass die ISO 3601-5 in Tabelle 2 eindeutig Anforderungen an O-Ringe (und nicht an Normprobekörper) bezüglich Härte und Druckverformungsrest definiert, unabhängig davon, mit welcher Häufigkeit die Konformität nachgewiesen werden muss. Die Häufigkeit der Prüfung sollte zwischen Besteller und Lieferant vereinbart werden. Die Tabelle 2 bietet Sollwerte für Prüfzeiten von 24h und 72h zur Auswahl an. Es wird angenommen, dass sich hier die 24h-Prüfzeiten durchsetzen werden, weil dies zu schnelleren Ergebnissen führt. Es wird empfohlen, diese schnell durchzuführenden Prüfungen mindestens bei den Erstmustern zu vereinbaren. Wie oben erwähnt, ergeben sich gute Eigenschaften von O-Ringen aus dem Zusammenwirken von Rezeptur und Prozessführung. Mit den Ergebnissen der Erstmuster sichert sich der Anwender ab, dass der Lieferant den Vulkanisationsprozess der jeweiligen O-Ring Abmessung prinzipiell beherrscht. Der Umfang weiterer Wareneingangsprüfungen sollten dann in Abhängigkeit des Prozessrisikos bei der Herstellung (niedrig: NBR-S, FKM, ACM; mittel: VMQ; EPDM-S; hoch:

EPDM-P und HNBR) und der Empfindlichkeit der Anwendung gegen Qualitätsschwankungen festgelegt werden. Für Heiß- und Warmwasseranwendungen, wo peroxidisch vernetzte EPDM O-Ringe eingesetzt werden, ist eine Prüfung von jedem Fertigungslos durchaus üblich.

Zusammenfassung

Mit der neuen ISO 3601-5 (2015-04) ist der O-Ring endlich zum wirklichen Normteil geworden. Dies bietet dem Anwender die Möglichkeit, einen guten Stand der Technik von O-Ringen herstellunabhängig zu beziehen. Die Zukunft wird zeigen, wie weit die Anwender auch von dieser Möglichkeit Gebrauch machen werden.

Literaturquerverweise

- [1] Peter Weidner, Dichtverhalten von O-Ring Nebendichtungen unter hohem Absolutdruck bei niedrigen abzudichtenden Druckdifferenzen, Sonderdruck der Fa. Burgmann
- [2] Parker Hannifin, Engineered Materials Group Europe, EMG-report Nov. 2014
- [3] ISO 11357-2 Kunststoffe - Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC) - Teil 2: Bestimmung der Glasübergangstemperatur und Stufenhöhe
- [4] ASTM D 1329 Retraction at lower Temperatures (TR-Test)
- [5] ISO 2921 Determination of low Temperature Retraction (TR-Test)
- [6]. Bernhard Richter, Langzeitverhalten von O-Ringen, ISC 2014, Stuttgart