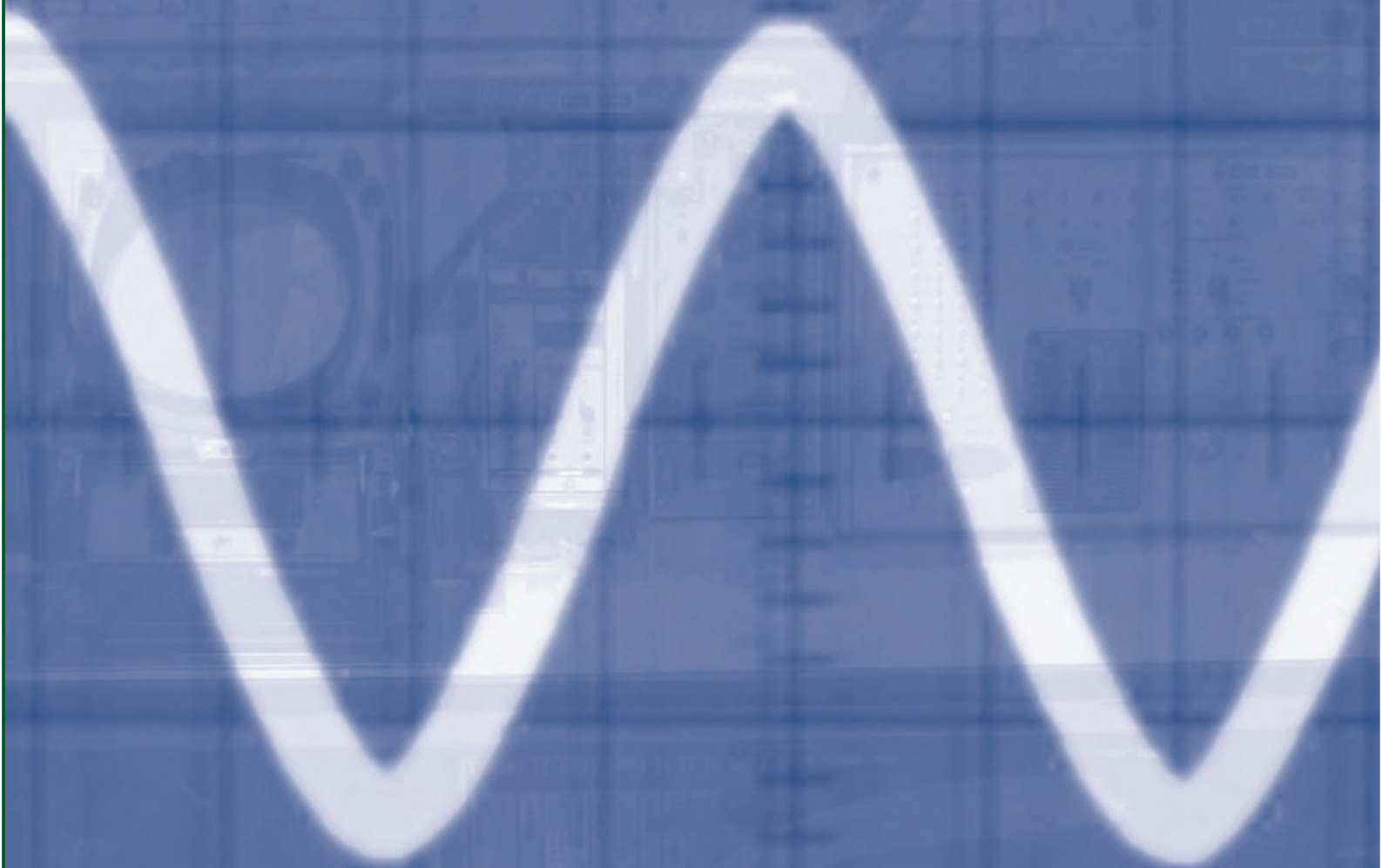


Karl-Friedrich Berger,
Sandra Kiefer (Hrsg.)

JAHRBUCH 2020

Dichten. Kleben. Polymer.

Mess- und Prüftechnik



Zugversuche an O-Ringen – warum und wie?

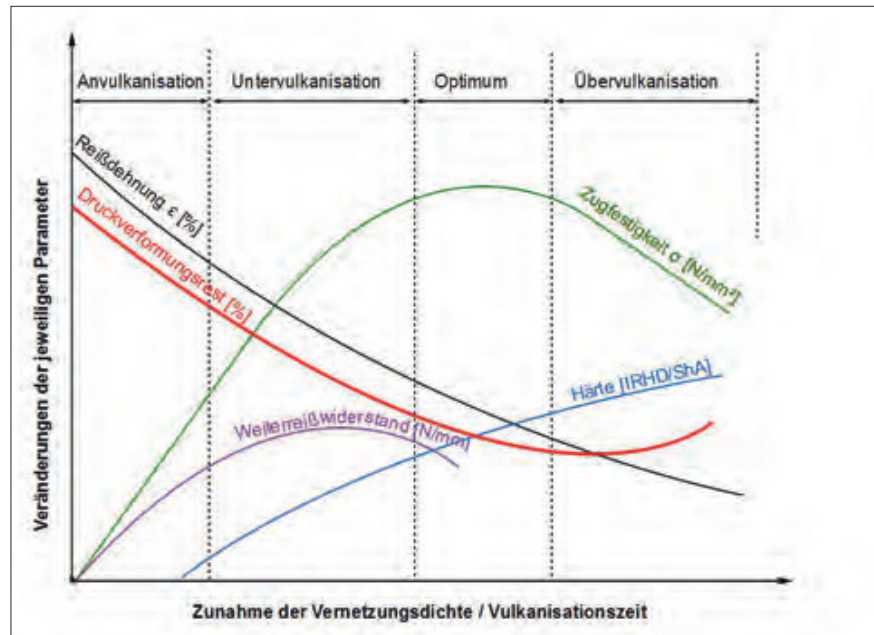
Die Wahrheit liegt im Fertigteil

Viele Anwender von O-Ringen sind der Meinung, dass die Werkstoffkennwerte, die bei der Erstbemusterung an Prüfplatten ermittelt wurden, auch für die einzelnen Dichtungen gelten. Dies ist jedoch leider in den meisten Fällen nicht so. Reale Dichtungen weisen aus den unterschiedlichsten Gründen schlechtere Kennwerte auf, als die unter Idealbedingungen im Labor an Prüfplatten ermittelten. Damit dieser Umstand in der Praxis zu keinen Dichtungsausfällen führt, ist die Prüfung der tatsächlichen mechanischen Kennwerte an ringförmigen Dichtungen eine gute Absicherung und gibt einen guten Einblick in die werkstoffliche Realität.

Die Zugprüfung an O-Ringen wird in erster Linie aus Gründen der Qualitätssicherung durchgeführt. Die Zugprüfung gibt Informationen über die Rezepturqualität (Auswertung der Absolutwerte, Festigkeit des Werkstoffes, Feststellung von Rezepturänderungen). So ist z.B. ein Austauschen des Polymers von Mischungen mit unterschiedlichem Molekulargewicht und/oder einer anderen Molekulargewichtsverteilung (z.B. hochviskose Pressmischung durch niedrigviskose Spritzmischung) nicht über Infrarotspektroskopie (IR) nachweisbar, sondern allenfalls über den Zugversuch und möglicherweise auch über Langzeit-Druckverformungsrestprüfungen. Ferner gibt der Zugversuch Auskunft über nachträgliche Änderungen gegenüber dem Bemusterungszustand. Dies ist oft der einfachste Weg, bei Reklamationen mögliche Veränderungen gegenüber dem Erstbemusterungszustand aufzudecken und nachzuweisen. Außerdem bekommt man mithilfe der Standardabweichung (z.B. verfrühtes Reißen durch Bindenähte, Einrisse, Kerben, Vernetzungsgrad usw.) Aussagen über die Verarbeitungsqualität.

Durch diese vielfältigen Ergebnisse sichert ein Zugversuch an O-Ringen bzw. Fertigteilen die Qualität wesentlich besser ab, als wenn nur die Rezepturqualität an Schulterstäben ermittelt wird.

Bild 1: Es gibt keinen idealen Vernetzungsgrad: Je nach Anwendung ist die optimale Vernetzungsdichte über das Optimum des Weiterreißwiderstandes, der Zugfestigkeit oder des Druckverformungsrestes zu definieren [1]
(Bild: O-Ring Prüflabor Richter GmbH)



Außerdem werden mit dem Zugversuch an O-Ringen auch praktische Anwendungen abgesichert. Dies kann bei besonders stark physikalisch beanspruchten Bauteilen (z.B. durch Montageaufweitung >100%), bei Abrieb oder Spaltextrusion sehr hilfreich sein.

Einflüsse auf das Prüfergebnis

Die Kenntnis der Ursachen, warum reale Dichtungen andere Prüfergebnisse als Normprobekörper aufweisen, ist für einen sicheren und nachhaltigen Dichtungseinsatz sehr hilfreich. So können bei der Auslegung und Bestellung einer Dichtung frühzeitig mit dem Hersteller sinnvolle Grenzwerte an den tatsächlichen Dichtringen vereinbart und damit Schwachstellen im Vulkanisations- bzw. Fertigungsprozess erkannt werden – und nicht erst im Nachhinein als Folge von Schadensfällen. Die folgenden Aspekte behandeln nur Besonderheiten bei der Zugprüfung von O-Ringen, andere Einflussursachen auf den allgemeinen Zugversuch von Elastomeren (wie z.B. Prüftemperatur, Mischungsaufbau, Mullins-Effekt) [2] werden hier nicht behandelt.

Einfluss der Verarbeitung

Bei manchen O-Ringen wird aufgrund schlechter Verarbeitung nicht ein Festigkeitswert des Werkstoffes ermittelt, sondern die niedrigere Festigkeit der Bindenaht (= Zusammenflussstelle der Gummimischung bei der Herstellung des O-Rings im Spritzgusswerkzeug), an welcher der O-Ring reißt. Dieses Problem ist abhängig vom Werkstoff (z.B. bei bestimmten Acrylatkautschuken), dem Werkzeug und von den Prozessparametern. Die Bindenaht kann meist vorab durch eine Sicht- und Dehnungsprüfung erkannt werden oder durch relativ große Streuungen im Zugversuch. Typisch

für die Streuung bei Zugversuchen von O-Ringen sind 5 bis 10% Standardabweichung bezogen auf den Mittelwert der Reißdehnung oder der Zugfestigkeit.

Ein wichtiges Merkmal guter Verarbeitung ist das Erreichen des optimalen Vulkanisationsgrades. Es gibt allerdings kein allgemeingültiges Optimum, sondern dieses muss abhängig von der geplanten Anwendung des Elastomerbauteiles ermittelt werden. Ist z.B. der Weiterreißwiderstand der wichtigste Materialkennwert für das Fertigprodukt, so muss ein anderer Vernetzungsgrad bzw. eine andere Vernetzungsdichte angestrebt werden, als wenn z.B. ein niedriger Druckverformungsrest die wichtigste Bauteileigenschaft wäre. Dies wird in **Bild 1** ersichtlich.

Einfluss der Schnurstärke

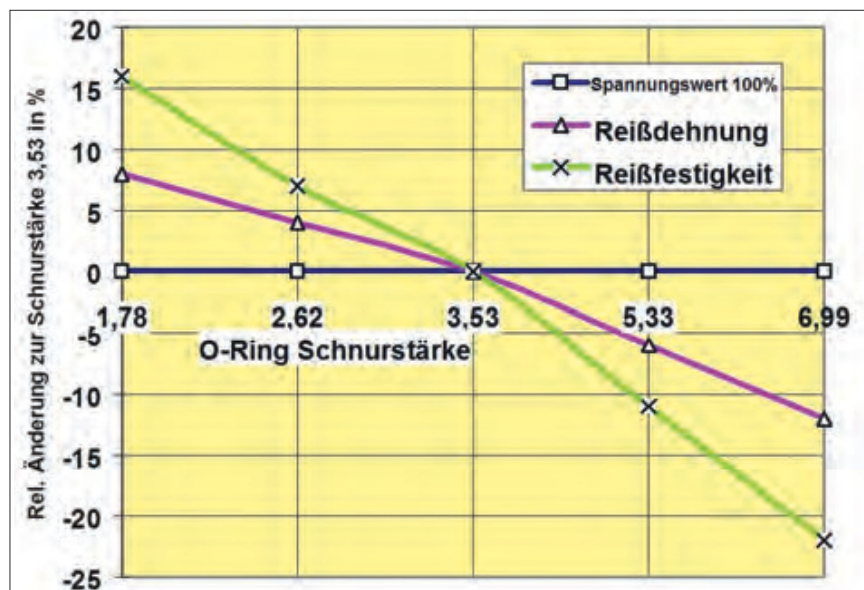
Die unterschiedliche Schnurstärke von O-Ringen hat interessanterweise hauptsächlich Einfluss auf die Festigkeitswerte (Reiß- bzw. Zugfestigkeit) und kaum auf die Reißdehnung und so gut wie keinen auf niedrige Spannungswerte [3]. Dies wird auch in **Bild 2** ersichtlich.

Nagdi beschreibt den Einfluss der Probekörpergeometrie auf die Zugfestigkeit wie folgt und gibt Hinweise auf Ursachen für dieses Verhalten: „Im Allgemeinen gilt die Regel: Je größer der Anfangsquerschnitt oder je größer das Volumen des Probekörpers, umso geringer ist die Reißfestigkeit. Diese Abhängigkeit lässt sich durch die Anzahl der Fehlstellen in der Probe erklären. Je kleiner das Volumen der Probe, umso geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass [kritische] Fehlstellen vorhanden sind“ [4]. Auch in noch so sorgfältig hergestellten Elastormischungen werden sich solche „Fehlstellen“ bzw. Inhomogenitäten befinden: „Die Summe aller solcher Inhomogenitäten, wie z.B. Fehler im regelmäßigen Aufbau, Fremdeinschlüsse, Füllstoff-Agglomerate, Vakuolen, Risse nennt man die Mikrostruktur des Stoffes. Jede Inhomogenität bewirkt bei Deformationsvorgängen eine starke lokale Spannungskonzentration in ihrer unmittelbaren Umgebung. Die „gefährlichste“ Inhomogenität wird dann zum Ausgangspunkt des Bruches“ [5]. So ist es dann auch zu erklären, dass die reale Festigkeit von Elastomer-Compounds oft zwei bis drei Zehnerpotenzen unterhalb der molekularen Festigkeit liegt [6].

Reece [7] gibt hierzu ein eindrückliches Beispiel: Bei der Prüfung von Zugprüfstäben stellte man fest, dass kleinere Schulterstäbe höhere Reißfestigkeiten als größere Schulterstäbe aufwiesen, jedoch nahm auch die Streuung der Ergebnisse stark zu. Wenn man davon ausgeht, dass der Rissausgang – wie beschrieben – an Fehlstellen beginnt, ist es logisch, dass ein kleiner Schulterstab weniger Fehlstellen als ein größe-

Bild 2: Relative Änderung des Spannungswertes der Reißdehnung und Reißfestigkeit in Abhängigkeit von der Schnurstärke von O-Ringen [8]

(Bild: O-Ring Prüflabor Richter GmbH)



rer bzw. keine kritischen Fehlstellen besitzt. Er entwickelte nun das Gedankenexperiment, dass man sich zwei kleine Prüfstäbe zusammengesetzt denken sollte. Angenommen, zwei kleine Probekörper reißen bei unterschiedlichen Belastungen, so reißt ein größerer Schulterstab, der aus den beiden kleinen zusammengesetzt wird, bei der niedrigeren Belastung. Der höhere und eigentlich bessere Belastungswert wird dadurch eliminiert, womit auch die Streuung der Ergebnisse reduziert wird. Neben diesem oben beschriebenen Phänomen gibt es noch einen zweiten Einflussfaktor, den Nazeni [9] auf einer Vortragstagung der Deutschen Kautschuk Gesellschaft 1960 in Berlin am Beispiel von Prüfstäben vorstellte: Dünnere Prüfstäbe wiesen höhere Festigkeiten als dicke Prüfstäbe auf. Er begründete dies mit einer besseren Verdichtung des Compounds bei der Herstellung dünner Probekörper. Analog dazu kann man davon ausgehen, dass bei dünnwandigen Elastomerbauteilen oder bei O-Ringen mit kleinerer Schnurstärke die Druckweiterleitung im Herstellungsprozess besser ist als bei O-Ringen mit größerer Schnurstärke oder als bei dickwandigen Bauteilen. Dadurch entstehen weniger Fehlstellen und der Werkstoff ist durch die bessere Verdichtung weniger anfällig für einen Rissbeginn bzw. -wachstum.

In der Praxis bestätigt sich die Aussage, dass großvolumige Probekörper niedrigere Zugfestigkeiten haben, bei Zugversuchen an O-Ringen aus der gleichen Rezeptur: O-Ringe mit kleiner Schnurstärke (z.B. 1,78 mm) weisen im Vergleich zu O-Ringen mit großer Schnurstärke (z.B. 6,99 mm) signifikant bessere Werte auf (**Bild 2**).

Mit diesen Erkenntnissen lässt sich nun auch die zu Anfang dieses Abschnittes beschriebene Beobachtung, dass die Schnurstärke hauptsächlich Einfluss auf die Festig-



Bild 3: Halbschalen zur reproduzierbaren Prüfung kleiner O-Ring-Durchmesser (Sonderanfertigung) (Bild: O-Ring Prüflabor Richter GmbH)

Bild 4: Zugversuch eines kleinen O-Ringes: Wenn der Einsatz von kugelgelagerten Rollen nicht mehr möglich ist, kommen in der Praxis eingeölte feststehende Dorne vor (Bild: O-Ring Prüflabor Richter GmbH)



keitswerte, nicht aber auf Spannungswerte ausübt, verstehen und erklären. Die Festigkeitswerte geben indirekt eine Aussage über die Häufigkeit von Fehlstellen, die zu einem Durchriss führen können, während niedrige Spannungswerte reine Materialkennwerte sind, bei welchen mögliche Vorschäden (Mikrorisse u.ä.) noch keinen Einfluss spielen.

Einfluss des Stiftdurchmessers

Besonders bei kleineren O-Ring-Durchmessern ist es technisch nicht mehr möglich diese auf geschmierten und kugelgelagerten oder angetriebenen Rollen vor dem Zugversuch aufzubringen. Der Dichtungsring wird dann auf geschmierte Halbschalen (**Bild 3**) oder starre Stifte aufgelegt (**Bild 4**). Es gibt sogar – wie oben bereits beschrieben – Normen [10], die generell, also auch bei größeren O-Ringen, eine Prüfung auf feststehenden Dornen fordern (**Tabelle 1**).

In einer laborinternen Untersuchung konnte nachgewiesen werden, dass im betrachteten Fall der Einfluss des Stiftdurchmessers sich nicht in den Ergebnissen niederschlug. Wie der Vergleich der Medianwerte zeigte, lagen die dabei ermittelten Unterschiede im Bereich zufälliger Streuungen.

Tabelle 1: Untersuchung des Einflusses verschiedener Stiftdurchmesser auf die Reißfestigkeit eines EPDM-O-Ringes (70 ShA) bei einer Prüfgeschwindigkeit von 500 mm/min
(Quelle: O-Ring Prüflabor Richter GmbH)

Probekörper O-Ring	EPDM (18,77 mm x 1,74 mm)		
	2	3	5
Stiftdurchmesser [mm]			
Reißfestigkeit [N/mm]	15,29	14,81	14,44
	16,22	15,43	14,87
	15,57	15,58	16,15
	15,28	15,16	15,76
	15,61	14,74	16,00
Mittelwert [N/mm]	15,59	15,14	15,44
Medianwert [N/mm]	15,57	15,16	15,76

Tabelle 2: Untersuchung des Einflusses verschiedener Prüfgeschwindigkeiten auf die Reißfestigkeit eines EPDM-O-Ringes (70 ShA) bei einem Stiftdurchmesser von 5 mm
(Quelle: O-Ring Prüflabor Richter GmbH)

Probekörper O-Ring	EPDM (18,77 mm x 1,74 mm)	
	200	500
Prüfgeschwindigkeit [mm]		
Reißfestigkeit [N/mm]	15,17	14,44
	14,99	14,87
	15,78	16,15
	15,90	15,76
	15,77	16,00
Mittelwert [N/mm]	15,52	15,44
Medianwert [N/mm]	15,77	15,76

Einfluss der Prüfgeschwindigkeit (100, 200 und 500 mm/min)

Je nach Prüfnorm werden als Prüfgeschwindigkeit 100, 200 oder 500 mm/min gefordert. Als Faustregel gilt in den meisten Fällen, dass für kleinere O-Ringe auch eine niedrigere Prüfgeschwindigkeit gefordert wird. Nach laborinternen Erfahrung haben aber unterschiedliche Prüfgeschwindigkeiten, sofern sie sich in dem oben genannten Rahmen bewegen, kaum bzw. keinen Einfluss auf die Ergebnisse, was in **Tabelle 2** beispielhaft für einen EPDM-Werkstoff gezeigt wird.

Einfluss der Schmierung bzw. Gleitintensivierung von Ringen bzw. Aufnahmestiften/-rollen vor dem Zugversuch

In den meisten Prüfnormen werden entweder angetriebene Rollen oder eine Schmierung des Ringes und der Aufnahmestifte im Zugversuch gefordert. Dass man durch eine Schmierung von Ring bzw. Aufnahmestiften reproduzierbarere Prüfergebnisse und höhere Festigkeits- bzw. Dehnungswerte erhält, ist unbestreitbar.

Die **Tabelle 3** entstand aus der Prüfung von 100 O-Ringen mit dem Innendurchmesser 6 mm bei einer Schnurstärke von 2 mm. Die O-Ringe wurden auf 3 mm Stifte

Probekörper	Zugfestigkeit [N/mm ²]				Reißdehnung [%]			
	\bar{x}	x_{\max}	x_{\min}	$\sigma_{\bar{x}}$ [%]	\bar{x}	x_{\max}	x_{\min}	$\sigma_{\bar{x}}$ [%]
O-Ring 6x2 mm trocken	10,1	13,2	7,8	11,8	120	153	91	11,1
O-Ring 6x2 mm geschmiert	12,9	15	9,5	6,1	156	171	117	4,6

Tabelle 3: Laborinterner Vergleich der Zugfestigkeiten und Reißdehnungen an geschmierten und trockenen FKM-O-Ringen (80 ShA), Prüfgeschwindigkeit 200 mm/min (Quelle: O-Ring Prüflabor Richter GmbH)

gelegt und mit einer Geschwindigkeit von 200 mm/min gezogen. Sie bestanden aus einem FKM-Werkstoff mit 80 ShA Härte. An diesem Diagramm lässt sich klar der Einfluss eines Gleitmittels erkennen.

Die Standardabweichungen (in % vom Mittelwert) haben sich vom trockenen Zustand von 11 bzw. 12% auf 6 bzw. 5% reduziert, die Mittelwerte der Zugfestigkeiten haben sich sogar von 10,1 auf 12,9 MPa und die Reißdehnungen von 120 auf 156% erhöht. Aus diesen Ergebnissen wird ersichtlich, dass der Einfluss durch die Verwendung eines Gleitmittels beim Zugversuch höher als die sonstigen Parameter (Dehngeschwindigkeit/ Stiftdurchmesser) bewertet werden muss. Es empfiehlt sich als Gleitmittel ein Silikonöl.

Größe der O-Ringe

Zwar sind die Größen von O-Ringen genormt, jedoch gibt es davon auch unzählige Abweichungen. Diese wohl beliebteste Dichtungsform der Technik wird sowohl in Miniaturanwendungen ab Schnurstärken von ca. 0,8 mm und geringer als auch bei Großmaschinen und Armaturen bis zu Schnurstärken von 20 mm verwendet. Ab einer Schnurstärke von ca. 10 mm lassen sich aus den O-Ring-Schnüren durch Spaltmaschinen geeignete Streifen zur Herstellung von Schulterstäben (z.B. Typ 3 bzw. S3A nach DIN 53504: März 2017) gewinnen. Mit diesen ist dann wieder eine Prüfung an Normprobekörpern möglich.

Die Prüfung der Zugfestigkeit an ganzen O-Ringen bezieht sich daher in der Praxis auf O-Ringe mit geringeren Schnurstärken (< 10 mm), am häufigsten auf O-Ringe mit Innendurchmesser < 30 mm und Schnurstärken < 5 mm.

Die ASTM D1414 und die DIN 53504 geben Hinweise für die Prüfung von O-Ringen. Anhand der vorgeschriebenen Rollen als Halterung für die O-Ringe und deren Mindestabstand lässt sich errechnen, welcher Durchmesser noch normgerecht geprüft werden kann.



Bild 5: Mikro-O-Ring im Größenvergleich mit einem Finger (Bild: O-Ring Prüflabor Richter GmbH)

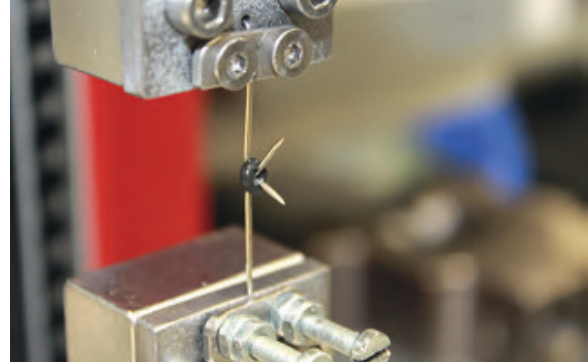


Bild 6: Zugversuch eines Mikro-O-Ringes mit speziellen Nadeln als Probehalter (Bild: O-Ring Prüflabor Richter GmbH)

Die ASTM D1414 [11] erlaubt als kleinste genormte Rollen solche mit einem Durchmesser von 9 mm, deren Mittelpunkte bis zu einem Abstand von 19 mm zusammengefahren werden sollten. Die Rollen sollen kugelgelagert sein. Daraus ergibt sich ein Mindestinnendurchmesser der noch normgerecht prüfbar sind von

$$d_{i \min} = 2 \times 19 \text{ mm} + \pi \times 9 \text{ mm} = 66,3 \text{ mm} / \pi = 21,1 \text{ mm}$$

Das bedeutet, dass O-Ringe ab ca. 21 mm Innendurchmesser mit dieser Rollenordnung geprüft werden können. Voraussetzung ist jedoch, dass der Ring ohne Dehnung auf die Rollen aufgelegt werden kann. Eine Rolle soll entweder mit einer bestimmten Geschwindigkeit angetrieben werden oder die Kontaktflächen der beiden Rollen sollen mit einem Öl („castor oil“) geschmiert werden.

Für O-Ringe mit einem Durchmesser kleiner als 25 mm lässt die ASTM kleinere Stiftdurchmesser ohne Antrieb zu. Eine Mindestabmessung sieht die ASTM nicht vor.

Die DIN 53504 [12] verweist auf den Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA) und nennt in der **Tabelle 3** Mindestmaße. Der kleinste dort angegebene O-Ring hat einen Innendurchmesser von 34,8 mm.

Wie oben erklärt, gibt es für die Prüfung von kleinen O-Ringen keine genauen Normvorgaben. Es sind spezielle Prüfvorrichtungen vonnöten, was in **Bild 3 und 6** gezeigt wird. Die üblichen Genauigkeiten der Messung der Längenänderung liegen bei 1/10 mm oder etwas besser. Folglich nimmt die Genauigkeit bei sehr kleinen O-Ringen ab, da mögliche Messabweichungen prozentual stärker in das Endergebnis eingehen. Die Prüfung von sehr kleinen O-Ringen ($d_i < 3 \text{ mm}$) ist zwar möglich, erfordert

O-Ring-Innendurchmesser [mm]	Prüfdorn-Durchmesser [mm]
< 8	3
8 bis 20	5
20 bis 40	6
> 40	18

Tabelle 4: Geforderte Prüfdorn-Durchmesser der VW PV 3973 [13] (Quelle: O-Ring Prüflabor Richter GmbH)

aber viel Prüferfahrung und ein besonders Maß an Sorgfalt bei der Durchführung, um reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen. Hierfür kommen entweder Halbschalen (**Bild 3**) zum Einsatz, die ein engeres Zusammenfahren der Prüfstifte ermöglichen, oder spezielle Nadeln für Mikro-O-Ringe (**Bild 6**).

Bei sehr großen O-Ringen ($d_i > 200$ mm) stellt sich das Problem, dass u.U. der Ver-

fahrweg der Zugprüfmaschine nicht ausreichend ist. Die ASTM D1414 erlaubt, dass in einem solchen Fall Abschnitte des O-Rings geprüft werden dürfen. Ebenso dürfen Abschnitte von O-Ringen geprüft werden, wenn der O-Ring für eine Alterungsprüfung aufgeschnitten wurde. Das ungealterte Vergleichsstück soll dann in gleicher Weise aus einem O-Ring geschnitten werden. Das Prüfergebnis darf allerdings nur für die Auswertung verwendet werden, wenn das Teilstück des O-Rings nicht an seiner Einspannstelle eingerissen ist.

Die sehr praxisbezogene Volkswagen-Prüfvorschrift 3973 schreibt weder Mindest- noch Maximalgrößen vor, jedoch gibt es auf den Innendurchmesser abgestimmte Prüfdorne. Dies wird aus **Tabelle 4** ersichtlich.

Haltevorrichtungen und Einspannmethoden für O-Ringe

Wie bereits angesprochen, werden O-Ringe standardmäßig auf Rollen geprüft. Diese Rollen sollten nach der ASTM D1414 kugelgelagert sein („ball-bearing spools“). Damit es im O-Ring während des Prüfvorgangs nicht zu lokalen Spannungsspitzen kommt, die das Prüfergebnis signifikant beeinflussen würden, soll eine der Rollen angetrieben sein (**Bild 7 und 8**).

Es wird aber auch die Möglichkeit erlaubt, Rollen ohne Antrieb zu verwenden (**Bild 9**) und stattdessen die Kontaktfläche der Metallrollen einzuölen (mit „castor oil“ = Rizinusöl), um ein Abgleiten des O-Rings während des Zugversuches sicherzustellen. (Vermeidung von Kerbwirkung, Einschnürung im Auflagebereich des Dorns).

Die VW-Prüfvorschrift 3973 (Ausgabe 2010-11) erlaubt die Prüfung von O-Ringen an Dornen (**Bild 4**) und schreibt ebenfalls die Verwendung eines Gleitmittels (Silikonöl) vor.

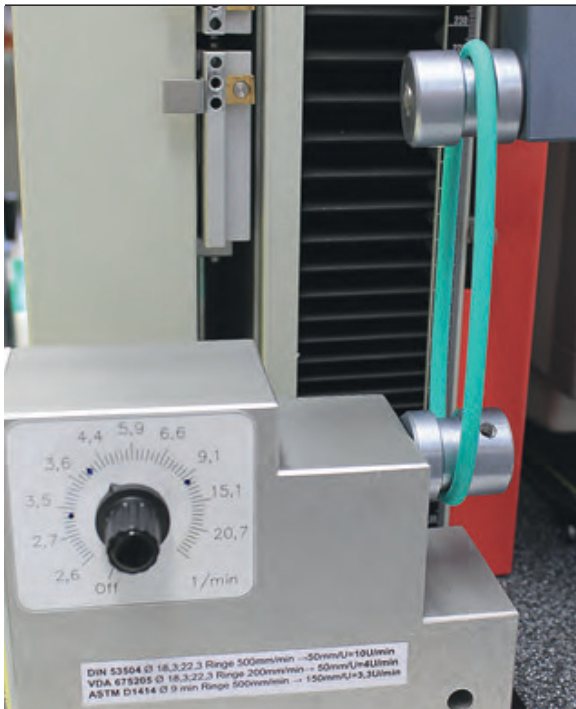


Bild 7: Zugversuch mit angetriebener Rolle: Die Antriebseinheit ist unten links im Bild zu sehen. Die Umdrehungsgeschwindigkeit der Rolle ist variabel einstellbar, je nach Forderung der entsprechenden Norm (Bild: O-Ring Prüflabor Richter GmbH)

Da die genannte Prüfvorschrift von VW eine präzise Versuchsdurchführung für den Zugversuch an O-Ringen beschreibt, empfiehlt es sich, sie bevorzugt als Norm für den Zugversuch an O-Ringen anzuwenden. Der Inhalt dieser PV entspricht weitgehend der gängigen Praxis.

Die ASTM D1414 erlaubt auch Proben aus aufgeschnittenen O-Ringen. Dabei besteht die Gefahr des Einreißen der Probe an der Einspannstelle. Dort besteht nämlich die höchste Kerbwirkung und mitunter kommt es zu Verletzungen der Dichtung, die dann den Rissausgang bilden können.

Ist der aufgeschnittene O-Ring entsprechend lang, empfehlen sich Umlenkprobenhalter [14], bei denen kurz vor dem

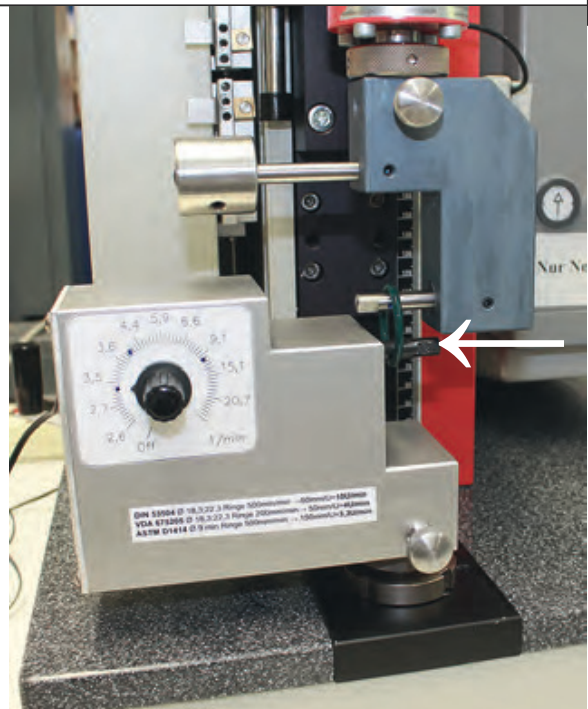


Bild 8: Zugversuch eines kleinen dunkelgrünen O-Rings mit angetriebener Rolle mit kleinerem Durchmesser (Bild: O-Ring Prüflabor Richter GmbH)

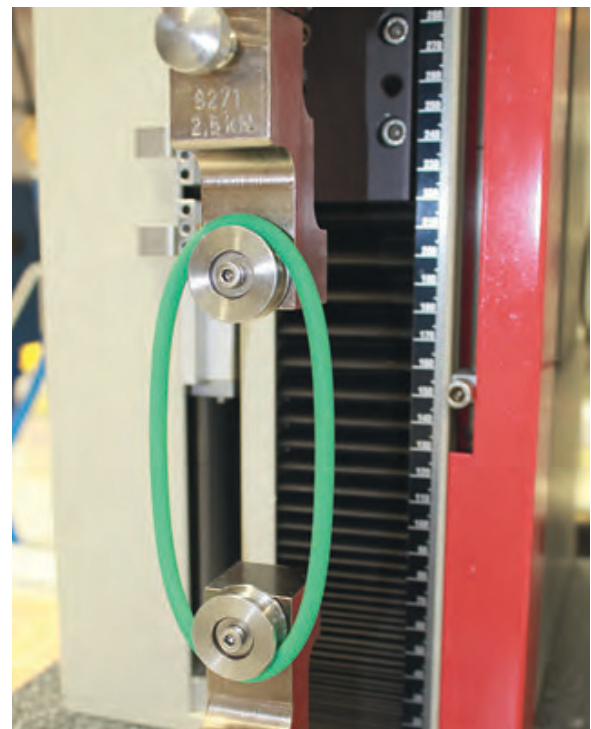


Bild 9: Zugversuch eines O-Ringes auf kugelgelagerten Rollen (hier: nicht angetrieben) (Bild: O-Ring Prüflabor Richter GmbH)

Einspannbereich der Probekörper auf einer Kurve umgelenkt wird, sodass sich die auf die Einspannstelle wirkende Kraft abbaut. Dadurch wird ein Reißen an der Einspannstelle verhindert. Hier wurde intern allerdings eine einfachere und praxisorientierte lokale Vorbehandlungsmethode der Probe entwickelt (Verstärkung im Einspannbereich), die bereits in den meisten Fällen ein Einreißen an der Einspannstelle verhindert.

Prüfgeschwindigkeiten

Die ASTM 1414 [15] schreibt eine Prüfgeschwindigkeit von 500 mm/min vor. Die Norm von Volkswagen PV 3973 (Ausgabe 2010-11) gibt für alle O-Ring-Größen eine einheitliche Prüfgeschwindigkeit von 200 mm/min vor [16]. In einer großen Versuchsreihe an O-Ringen mit unterschiedlichen Abmessungen hat sich bei letzterer Prüfgeschwindigkeit die beste Vergleichbarkeit der Ergebnisse gezeigt, weshalb sie bei der Zugprüfung von O-Ringen zu empfehlen ist. Bei kleineren Prüfgeschwindigkeiten nimmt nämlich der dynamische Einfluss ab, dadurch misst man auch etwas geringere Zugfestigkeiten als bei größeren Prüfgeschwindigkeiten.

Berechnung der Ergebnisse an O-Ringen (Problem unterschiedlicher Außen- und Innenspannung)

Im Vergleich zur Zugprüfung an Schulterstäben tritt beim Zugversuch von O-Ringen folgendes Problem auf: Der Innendurchmesser erfährt eine höhere Belastung als der Außendurchmesser des O-Ringes. Interne Vergleichsmessungen von EPDM-O-Ringen mit Schnurstärken von 3,53 mm und S2-Schulterstäben haben gezeigt, dass für diese Paarung prinzipiell vergleichbare Ergebnisse erzielt werden könnten. Das trifft aber in der Praxis häufig nicht zu, da Serien-O-Ringe meistens nicht so gut vulkanisiert sind wie Prüfplatten und insbesondere bei größeren O-Ringen (Innendurchmesser > 50 mm) die Wahrscheinlichkeit für Oberflächenfehler zunimmt.

Unterschiedliche Berechnungsmethoden von Kennwerten aus dem Zugversuch von O-Ringen

Die folgenden Überlegungen gelten nur für die Berechnung von O-Ringen, die über Rollen bzw. Dorne gespannt und geprüft werden. Für O-Ring-Abschnitte, die in Spannbacken eingespannt werden, gelten ähnliche Gesetze wie für Zugprüfstäbe [17].

Die Berechnung der Zugfestigkeit ist i.d.R. kein großes Problem. Es wird die zum Reißen benötigte Kraft durch die zweifache Fläche des Ringquerschnitts geteilt. Wenn auch die Berechnung der Zugfestigkeit unproblematisch ist, so ist die Bewertung des Ergebnisses schwieriger. Aufgrund der unterschiedlichen Spannungsverteilung über

dem Ringquerschnitt ist es nicht einfach, eine tatsächliche Zugfestigkeit zu ermitteln. In den meisten Fällen wird das Reißen am Innendurchmesser des Ringes beginnen, weil hier die höchste Spannung anliegt. Bei den zitierten Normen (DIN / ASTM / VW-PV) wird die Reißdehnung der Ringe immer mithilfe des Innendurchmessers ermittelt.

Bei der Ermittlung des Spannungswertes unterscheiden sich die Normen gravierend. In den meisten Normen wird bei der Bestimmung des Spannungswertes die Dehnung nicht auf den inneren Ringumfang bezogen, sondern auf den mittleren Ringumfang. Dadurch erhält man besonders bei größeren Schnurstärken einen mehr der Wirklichkeit entsprechenden Spannungswert [18], als wenn man sich auf den Innendurchmesser beziehen würde, und das Ergebnis des Spannungswertes ist dann weitgehend unabhängig von den Abmessungen des Rings. Des Weiteren sind die Ergebnisse dann besser mit den an Prüfstäben ermittelten Werten vergleichbar [19].

Ist der Spannungswert von O-Ringen eine spezifizierte Größe, d.h. dass seine Prüfung explizit in einer Spezifikation gefordert wird, sollte man diesen Wert mithilfe des mittleren Ringumfangs berechnen. Liegt diese Forderung nicht vor, wird der Spannungswert in der Praxis der Einfachheit halber meist mithilfe des inneren Ringumfangs ermittelt.

Stand der Technik für gute Zugfestigkeiten und Reißdehnungswerte an O-Ringen (ISO 3601-5)

Üblicherweise werden bestimmte Zugfestigkeiten und Reißdehnungen nur in Spezifikationen von Dichtungsanwendern (z.B. Industrieanwendungen, Automobilherstellung, Luftfahrt etc.) gefordert. Diese Vorgabewerte sind dann an Normprobekörpern, die unter Idealbedingungen hergestellt wurden, zu ermitteln. Immer öfter finden sich aber auch in Spezifikationen bzw. Bauteilzeichnungen Materialkennwerte, die explizit am O-Ring zu prüfen sind. Ein Dichtungsanwender, der nicht sehr tief mit der Materie befasst ist, kann aber i.d.R. nicht einschätzen, ob diese geforderten Werte in Firmenspezifikationen dem Stand der Technik entsprechen oder nicht.

Mit der ISO 3601-5 [20] steht nun zum ersten Mal eine weltweit gültige Norm zur Verfügung, die unabhängig von äußeren Zwängen oder Firmentraditionen einen guten Stand der Technik abbildet und Rücksicht auf die Unterschiede zwischen Zugprüfungen an Normprobekörpern und O-Ringen nimmt. Außerdem gibt sie auch Sollwerte für die Zugprüfung von heißluftgealterten Standardprobekörpern und O-Ringen vor. Die **Tabelle 5** zeigt, wie bei den wichtigsten Basiselastomeren die Prüfwerte zwischen Normprobekörpern und O-Ringen im Anlieferungszustand abweichen dür-

Geforderte Eigenschaften	Probekörper	NBR (S),	NBR (S),	NBR (P),	NBR (P),	HNBR	HNBR	FKM	FKM
		70	90	75	90	75	90	70	75
Mindestzugfestigkeit [MPa]	2 mm Prüfplatte	12	10	12	10	16	16	10	10
	O-Ring (24,99x3,53)	10	8	10	8	14	13	8	8
Mindestreißdehnung [%]	2 mm Prüfplatte	250	125	150	90	200	125	150	150
	O-Ring (24,99x3,53)	200	100	150	90	200	100	150	150

Geforderte Eigenschaften	Probekörper	FKM 80	FKM 90	VMQ 70	EPDM (S), 70	EPDM (S), 80	EPDM (P), 70	EPDM (P), 80	ACM 70
		Mindestzugfestigkeit [MPa]	2 mm Prüfplatte	10	10	6	10	10	10
	O-Ring (24,99x3,53)	8	8	5	8	8	8	8	7
Mindestreißdehnung [%]	2 mm Prüfplatte	125	100	150	250	175	150	120	150
	O-Ring (24,99x3,53)	125	100	125	200	125	120	120	100

Tabelle 5: Sollvorgaben zur Zugfestigkeit und Reißdehnung sowohl für Normprobekörper als auch für O-Ringe, die einem guten Stand der Technik entsprechen (nach ISO 3601-5)

(NB: Der Zahlenwert hinter dem Werkstoff steht für die Härtegrade in IRHD,CM, (S) = schwefelvernetzter Werkstoff, (P) = peroxidisch vernetzter Werkstoff. Die Prüfungen an den Normprobekörpern (2mm Prüfplatte) erfolgen nach der ISO 37, die Prüfungen an den O-Ringen nach der ASTM D1414) (Quelle: O-Ring Prüflabor Richter GmbH)

fen, um immer noch einem guten Stand der Technik zu entsprechen. Zu diesen Grenzwerten für O-Ringe gem. **Tabelle 5** sollte angemerkt werden, dass sich diese rein formal nur auf die O-Ring-Abmessung 24,99 x 3,53 mm beziehen und auf ideal vulkanisierte, im Labor hergestellte O-Ringe zur Definition der Rezepturqualität. Gleichwohl können diese Grenzwerte auch an Serien-O-Ringen erreicht werden, dies müsste aber dann zusätzlich zu den Forderungen der ISO 3601-5 zwischen Lieferant und Kunde vereinbart werden. Verbindlich regelt die ISO 3601-5 allerdings Härte- und Druckverformungsrestwerte an O-Ringen.

Fazit

Der Zugversuch an O-Ringen ist ein relativ einfaches und sehr aussagekräftiges Prüfverfahren. Was für den Schlauchhersteller die ultimative Fertigteilprüfung in Form des Berstdruckes ist, ist für den O-Ring-Hersteller der Zugversuch des O-Ringes. Diese Dichtungsart ist eine der wenigen Elastomerbauteile, die von ihrer Form her zu so einem Fertigteiltest ohne große Vorbehandlung geeignet ist. Da es sich hier – im Gegensatz zu Schulterstäben – um eine Fertigteilprüfung handelt, sind auch schnell Aussagen über die Fertigung selbst möglich. Wenn man den Zugversuch von O-Ringen normgerecht durchführt und richtig bewertet, lassen sich daraus wichtige Erkennt-

nisse ableiten. Deswegen ist dieses Prüfverfahren Stand der Technik in der Automobilindustrie und könnte sicherlich noch vermehrt in anderen Branchen helfen, Mängel in der Rezeptur- oder Fertigungsqualität von O-Ringen aufzudecken.

Literatur

- [1] Dieses Diagramm wurde mit Hilfe folgender Vorlage aus der Fachliteratur erstellt und überarbeitet: MATSCHINSKI, Paul (Hrsg.): Roh- und Hilfsstoffe in der Gummiindustrie, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1968, S. 171
- [2] Blobner, U. und Richter, B.: Fachwissen Prüfverfahren für Elastomere: Zugversuch: Prüftechnische Grundlagen und Empfehlungen für die praktische Anwendung, Ausgabe 10/2014, Onlinepublikation: https://www.o-ring-prueflabor.de/files/fachwissen-zugversuch_10_2014.pdf
- [3] Ecker, R.: Mechanische-technologische Prüfung von Kautschuk und Gummi in: Boström, S (Hrsg.): Kautschuk-Handbuch, Band 5, Stuttgart, Verlag Berliner Union, 1962, S. 119
- [4] Nagdi, Khairi: Gummi-Werkstoffe – Ein Ratgeber für Anwender, Ratingen, 2002, S. 290
- [5] Ecker, R.: Mechanische-technologische Prüfung von Kautschuk und Gummi in: Boström, S (Hrsg.): Kautschuk-Handbuch, Band 5, Stuttgart, Verlag Berliner Union, 1962, S. 120
- [6] Ebd., S. 119
- [7] Reece, W.H.: The Strength of Vulcanised Rubber in: Transactions of the I.R.I (Institution of the Rubber Industry), 11, 1935, S.320f.
- [8] Daten zur Erstellung des Diagramms entnommen aus: Parker Hannifin, O-Ring Division: Effect of O-Ring Cross-Section and Rate of Pull on Physical Properties in: Technical Bulletin, ORT-021, 11/30/92
- [9] Nazeni, Iman: Einfluss der Dicke der Prüfvulkanisate auf die Messwerte der Reißfestigkeit beim Standard-Prüfverfahren nach ASTM, vorgestellt auf der Vortragstagung der Deutschen Kautschuk-Gesellschaft, Berlin, 1960 (Übersetzung: Th. G.F. SCHOON)
- [10] Volkswagen AG: Konzernnorm PV3973 (Ausgabe 2010-11): Elastomer-Runddichtringe Bestimmung von Zugfestigkeit, Reißdehnung und Spannungswerten im Zugversuch, Unterpunkt 4.1.4, S.2f.
- [11] ASTM – International: Designation: D1414 – 15(July 1, 2015): Standard Test Methods for Rubber O-Rings, S.2
- [12] DIN 53504: Prüfung von Kautschuk und Elastomeren – Bestimmung von Reißfestigkeit, Zugfestigkeit, Reißdehnung und Spannungswerten im Zugversuch, Ausgabe: März 2017
- [13] Volkswagen AG: Konzernnorm PV3973 (Ausgabe 2010-11): Elastomer-Runddichtringe Bestimmung von Zugfestigkeit, Reißdehnung und Spannungswerten im Zugversuch, S.3
- [14] Beispiel eines Umlenkprobenhalters eines Herstellers von Zugprüfmaschinen (Webseite abgerufen am 03.07.2019): <http://www.zwick.de/de/produkte/probenhalter-pruefwerkzeuge/spezial-probenhalter.html> und <http://www.zwick.de/de/anwendungen/textilien/faeden-garne-zwirne-rovings/zugversuch-an-zweifachzwirn.html>
- [15] ASTM – International: Designation: D1414 – 15 (July 1, 2015): Standard Test Methods for Rubber O-Rings, S.2, Unterpunkt 8.3.1
- [16] Volkswagen AG: Konzernnorm PV3973 (Ausgabe 2010-11): Elastomer-Runddichtringe – Bestimmung von Zugfestigkeit, Reißdehnung und Spannungswerten im Zugversuch, Unterpunkt 4.4, S.4

[17] vgl. ASTM – International: Designation: D1414 –15 (July 1, 2015)): Standard Test Methods for Rubber O-Rings, Unterpunkt 8.4.2.2, S.3

[18] vgl. ASTM – International: Designation: D412 – 16 (Nov 1, 2016): Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers - Tension, Unterpunkt 17.2.1, S.10

[19] vgl. International Standard ISO 37: Rubber, vulcanized or thermoplastic — Determination of tensile stress-strain properties, Sixth Edition: 2017-11, Kapitel 5, c) 1), S. 4

[20] ISO 3601-5: 2015-04: Fluid power systems- O-rings- Part 5: Specification of elastomeric materials for industrial applications