

FACHWISSEN PRÜFVERFAHREN FÜR ELASTOMERE

Ein Angebot des

 **RING**

PRÜFLABOR

RICHTER

PRÜFEN BERATEN ENTWICKELN

Quelle: www.o-ring-prueflabor.de

Stand der Information: 12/2014



Zugversuch von Ringen (O-Ringe / Rechteckringe)

Prüftechnische Grundlagen und wissenswerte Besonderheiten



Autoren:

Dipl.-Ing. (FH) Ulrich Blobner

Dipl.-Ing. Bernhard Richter

Verwendete Prüfnormen: ASTM D1414 94 (Reapproved 2008), ASTM D412 06a (Reapproved 2013), DIN 53504 (Ausgabe 10-2009), ISO 37 (Ausgabe 12-2011), VDA 675 205 (Ausgabe 12-1992), VW Konzernnorm PV3973 (Ausgabe 11-2010),

In den grundlegenden Normen für den Zugversuch von Elastomeren (DIN 53504, ISO 37, ASTM D412 06a) ist die Prüfung von wenigen genormten Rechteckringen beschrieben.

In der Praxis werden jedoch eher Dichtringe mit einem runden Querschnitt (O-Ringe, Rundringe, Runddichtringe-RDR) als Dichtringe mit einem rechteckigen Querschnitt (Rechteckringe, Schlauchringe, Gummirechteckringe-GRR) verwendet.

Die große Vielfalt der in der Technik eingesetzten O-Ringe verursacht einige Schwierigkeiten bei der Zugprüfung. Die jeweiligen Schwierigkeiten und Problemstellungen und die dazugehörigen Lösungen werden im Folgenden beschrieben:

1. 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 Schnurstärken von bis zu 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) 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 an O-Ringen mit Innendurchmesser kleiner als 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:

Die ASTM D1414¹ erlaubt als kleinste genormte Rollen solche mit einem Durchmesser von 9mm, deren Mittelpunkte bis zu einem von Abstand von 19mm zusammengefahren werden sollten. Die Rollen sollen kugelgelagert sein. Daraus ergibt sich ein Mindestinnendurchmesser der noch normgerecht prüfbar O-Ringe von

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

Das heißt, 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.² 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 25mm lässt die ASTM kleinere Stiftdurchmesser ohne Antrieb zu (Unterpunkt 8.1). Eine Mindestabmessung sieht die ASTM nicht vor.

Die DIN 53504 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 34,8mm.

Wie oben erklärt gibt es für die Prüfung von kleinen O-Ringen keine genauen Normvorgaben. Es sind spezielle Prüfvorrichtungen vonnöten, was in den folgenden Abbildungen gezeigt wird. Wie im allgemeinen Fachartikel über den Zugversuch auf unserer Webseite beschrieben, liegen die üblichen Genauigkeiten der Messung der Längenänderung bei einem Zehntel 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 aber viel Prüferfahrung und ein besonders Maß an Sorgfalt bei der Durchführung um reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen.

¹ ASTM – International: Designation: D1414 – 94 (Reapproved 2008): Standard Test Methods for Rubber O-Rings, S.2
² Ebd., S.2

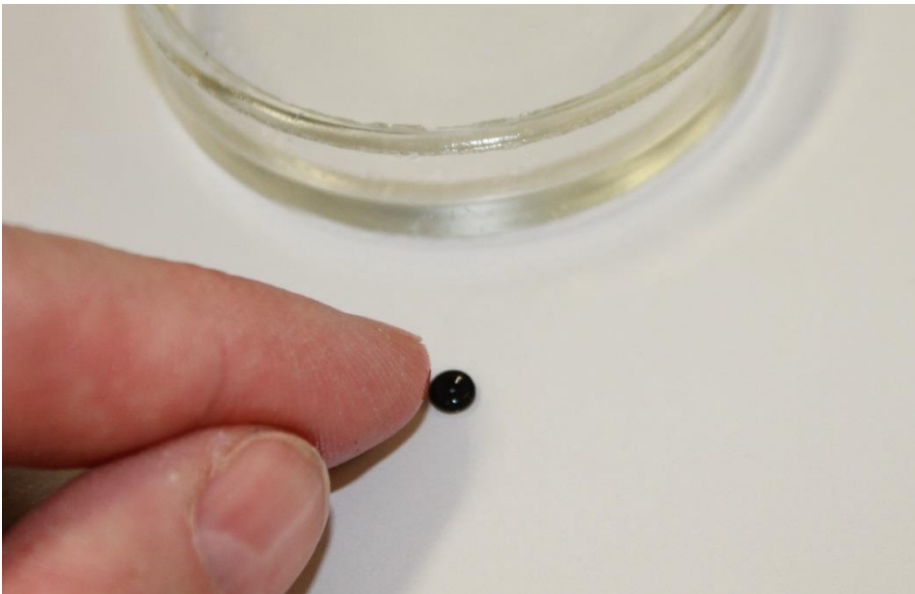


Abb.1: Mikro – O-Ring im Größenvergleich mit einem Finger

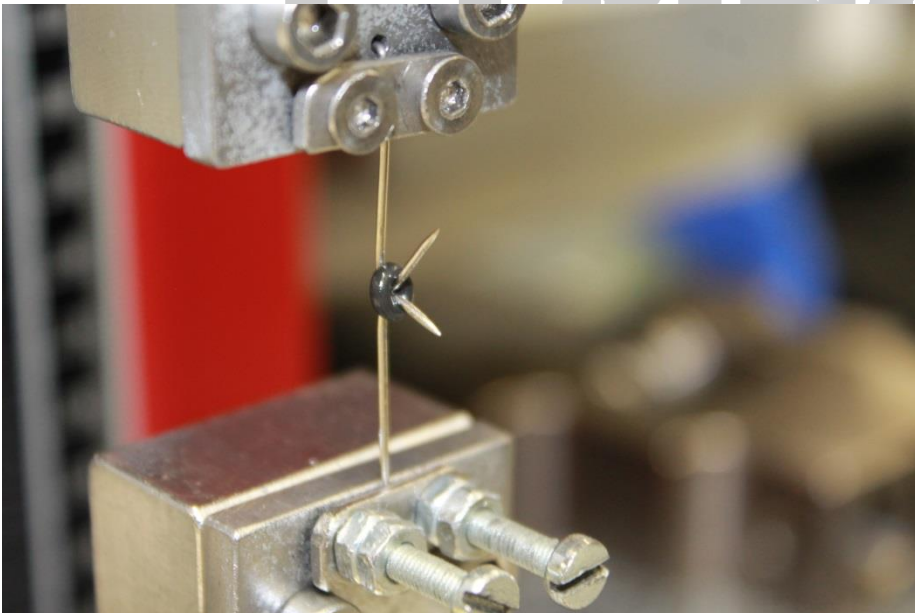


Abb.2: Zugversuch eines Mikro-O-Ringes mit speziellen Nadeln als Probehalter

Bei sehr großen O-Ringen ($d_i > 200 \text{ mm}$) stellt sich das Problem, dass u.U. der Verfahrenweg der Zugprüfmaschine nicht ausreichend ist. Die ASTM D1414 (Unterpunkt 8.2.1) erlaubt, dass in so einem 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. (Unterpunkt 8.3.2)

Die DIN 53504 empfiehlt bei übergroßen Ringen, bei denen kein vollständiges Kraft-Weg-Diagramm aufgenommen werden kann, die Kräfte bei folgenden Dehnungen zu messen: 50%, 100%, 200%, 300% und 500%.³ Bei O-Ringen sind jedoch Reißdehnungen größer 400% selten. Deswegen stellt sich dieses Problem kaum.

Die sehr praxisbezogene Volkswagen Prüfvorschrift 3973 schreibt weder Mindest- noch Maximal-

³ vgl. DIN 53504: Prüfung von Kautschuk und Elastomeren – Bestimmung von Reißfestigkeit, Zugfestigkeit, Reißdehnung und Spannungswerten im Zugversuch (Ausgabe Oktober 2009), S.14

größen vor, jedoch gibt es auf den Innendurchmesser abgestimmte Prüfdorne. Dies wird an der folgenden Tabelle ersichtlich:

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

Tab.1: Geforderte Prüfdorn-Durchmesser der VW PV 3973 ⁴

2. Haltevorrichtungen und Einspannmethode für Normrechteckringe und O-Ringe

Wie bereits oben angesprochen werden O-Ringe standardmäßig auf Rollen geprüft. Diese Rollen sollten nach der ASTM D1414 kugelgelagert sein („ball-bearing spools“, Unterpunkt 8.1). Damit es im O-Ring während des Prüfvorgangs nicht zu lokalen Spannungsspitzen kommt, die das Prüfergebn signifikant beeinflussen würden, soll eine der Rollen angetrieben sein.

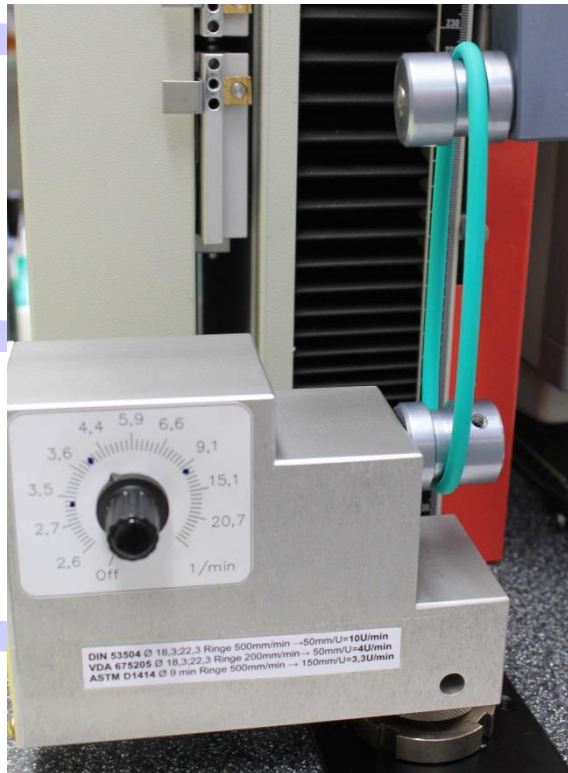


Abb.3: Zugversuch mit angetriebener Rolle: Die Antriebseinheit ist unten links im Bild zu sehen. Die Umdrehungsgeschwindigkeit der Rolle ist variabel einstellbar, je nach Forderung der entsprechenden Norm.

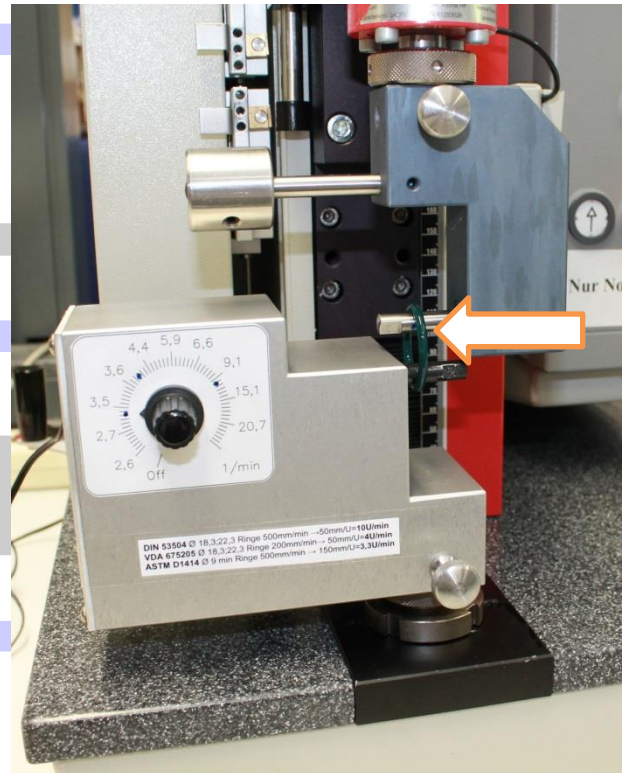


Abb.4: Zugversuch eines kleinen dunkelgrünen O-Rings mit angetriebener Rolle mit kleinerem Durchmesser

⁴ Volkswagen AG: Konzernnorm PV3973 (Ausgabe 2010-11): Elastomer-Runddichtringe Bestimmung von Zugfestigkeit, Reißdehnung und Spannungswerten im Zugversuch, S.3

Es wird aber auch die Möglichkeit erlaubt, Rollen ohne Antrieb zu verwenden 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 und schreibt ebenfalls die Verwendung eines Gleitmittels (Silikonöl) vor.

Da die genannte Prüfvorschrift von VW eine präzise Versuchsdurchführung für den Zugversuch an O-Ringen beschreibt, empfehlen wir bevorzugt diese Norm für den Zugversuch an O-Ringen anzuwenden. Der Inhalt dieser PV entspricht weitgehend der gängigen Praxis im O-Ring Prüflabor Richter. Wir führen seit dem Jahr 2000 regelmäßig O-Ring Prüfungen durch.

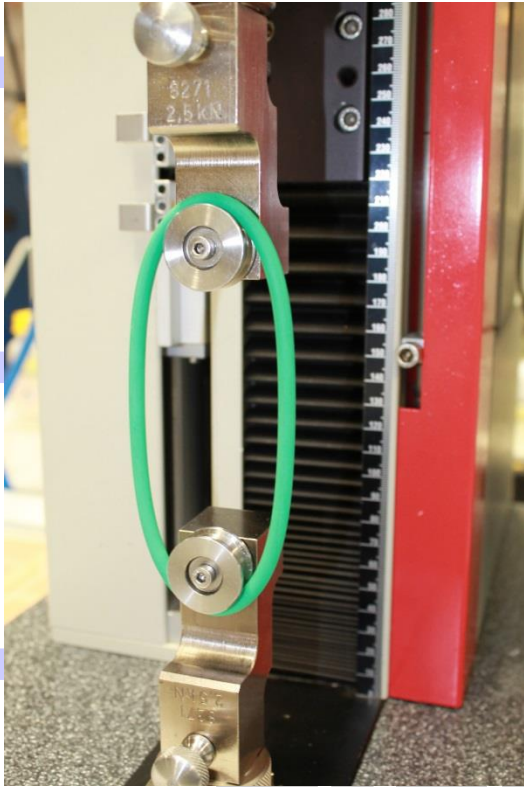


Abb.5: Zugversuch eines O-Rings auf kuggelagerten Rollen (hier nicht angetrieben)

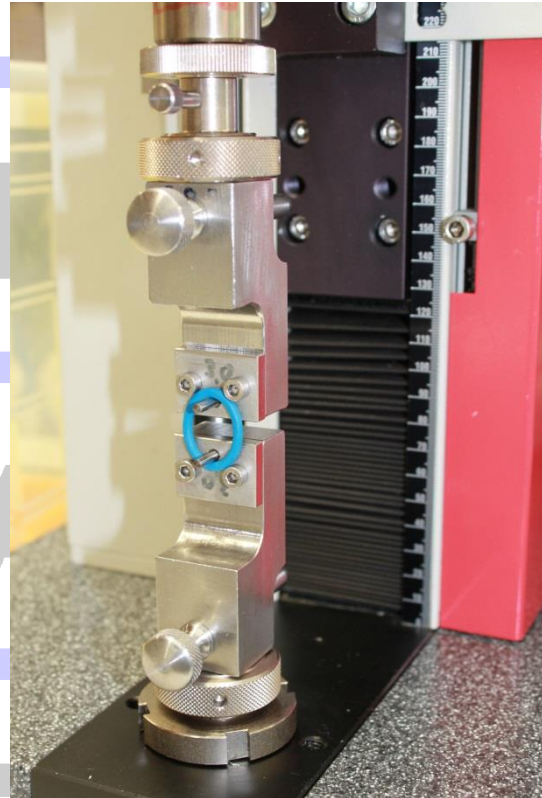


Abb.6: Zugversuch eines kleinen O-Rings: Wenn der Einsatz von kuggelagerten Rollen nicht mehr möglich sind, kommen in der Praxis eingölte feststehende Dorne vor.

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 Umlenkprobenhalter⁵, bei denen kurz vor dem Einspannbereich der Probekörper auf einer Kurve umgelenkt wird, so dass sich die auf die Einspannstelle wirkende Kraft abbaut. Dadurch wird ein Reißen an der Einspannstelle verhindert.

Das O-Ring Prüflabor Richter hat hier 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.

⁵ Beispiel eines Umlenkprobenhalters eines Herstellers von Zugprüfmaschinen (Webseite abgerufen am 23.10.2014):
<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>

Die DIN 53504 gibt nur Anweisungen für die Prüfung von Rechteckringen, aber auch hier wird gefordert, dass diese angetrieben werden. So heißt es auf Seite 7 der Norm:

„Für die Prüfung von Ringen muss die Prüfmaschine mit einer angetriebenen und einer frei drehbaren Rolle (...) ausgerüstet werden können. Der Weg der angetriebenen Rolle muss bei einer Umdrehung etwa 50 mm betragen. Es muss möglich sein, die Rollen so weit zusammenzufahren, dass die Ringe ungedehnt aufgelegt werden können.“⁶

Bei Prüfungen unterhalb der Raumtemperatur empfiehlt die DIN den Austausch der Stahlrollen mit Rollen aus einem Werkstoff mit niedrigerem Reibungskoeffizient (z.B. PTFE). Dadurch wird der Spannungsausgleich am zu prüfenden Ring verbessert.⁷

3. Prüfgeschwindigkeiten

Die ASTM 1414 (Unterpunkt 8.3.1)⁸ schreibt eine Prüfgeschwindigkeit von 500mm/min vor.

Ebenso fordert die DIN 53504 (Unterpunkt 7.4.2)⁹ eine Vorschubgeschwindigkeit von 500 mm/min, nachdem vorab mit einer Geschwindigkeit von 50 mm/min der lose aufgelegte Ring in die Prüfposition gefahren wurde.

Die ISO 37 (Unterpunkt 13.2)¹⁰ fordert für die Prüfung der Normringe zwei unterschiedliche Geschwindigkeiten. Der große Ring (type A) mit 44,6mm Innendurchmesser soll mit den üblichen 500mm/min Vorschubgeschwindigkeit geprüft werden, der kleine Ring (type B, Innendurchmesser = 8mm) mit 100mm/min.

Die Norm von Volkswagen PV 3973 (Ausgabe 2010-11) gibt für alle O-Ring Größen eine einheitliche Prüfgeschwindigkeit von 200mm/min vor.¹¹

Dies ist auch die Empfehlung des O-Ring Prüflabor Richter. In einer großen Versuchsreihe an O-Ringen mit unterschiedlichen Abmessungen hat sich bei dieser Prüfgeschwindigkeit die beste Vergleichbarkeit der Ergebnisse gezeigt. Bei kleineren Prüfgeschwindigkeiten nimmt nämlich der dynamische Einfluss ab, dadurch misst man auch etwas geringere Zugfestigkeiten als bei größeren Prüfgeschwindigkeiten.

4. Berechnung der Ergebnisse / Problem unterschiedlicher Außen-Innenspannung (v.a. bei großen Schnurstärken)

Lange Zeit war die Verwendung des Norm-Ringes im Zugversuch weiter verbreitet als die des Schulterstabes. Vor der Entwicklung von leistungsfähigen und genauen Längenänderungsaufnehmern kam es bei der Prüfung von Schulterstäben zu folgenden Problemen¹²:

⁶ von DIN 53504: Prüfung Kautschuk und Elastomeren – Bestimmung von Reißfestigkeit, Zugfestigkeit, Reißdehnung und Spannungswerten im Zugversuch (Ausgabe Oktober 2009), S.7

⁷ vgl. ebd., S.11

⁸ ASTM – International: Designation: D1414 – 94 (Reapproved 2008): Standard Test Methods for Rubber O-Rings, S.2

⁹ DIN 53504: Prüfung von Kautschuk und Elastomeren – Bestimmung von Reißfestigkeit, Zugfestigkeit, Reißdehnung und Spannungswerten im Zugversuch (Ausgabe Oktober 2009), S.13

¹⁰ International Standard ISO 37: ISO 37: Rubber, vulcanized or thermoplastic — Determination of tensile stress-strain properties, Fifth Edition: 2011-12-15, S.12

¹¹ Volkswagen AG: Konzernnorm PV3973 (Ausgabe 2010-11): Elastomer-Runddichtringe Bestimmung von Zugfestigkeit, Reißdehnung und Spannungswerten im Zugversuch, Unterpunkt 4.4, S.4

¹² vgl. HINRICHSSEN, W.F. und MEMMLER, K.: Der Kautschuk und seine Prüfung, Verl. S.Hirzel, Leipzig, 1910, S.164f.

- Bei alten Einspannvorrichtungen kam es öfter zu einem leichten Herausgleiten der Probekörper. U.a. aus diesem Grund wurde eine Messlänge auf dem Prüfstab festgelegt. Hinzu kommt, dass Prüfstäbe keine einheitliche Querschnittsfläche über ihre ganze Länge besitzen, so dass der gesamte Verfahrensweg der Maschine nicht zur Ermittlung der Prüfergebnisse herangezogen werden kann.
- Diese Messlänge wurde mit zwei Punkten markiert. Die Bewegung diese Messpunkte sollte gleichzeitig beobachtet werden, was für einen Beobachter aber praktisch unmöglich war bzw. nur unter starken Einbußen auf Kosten der Präzision.
- Mit Farbe aufgetragene Messmarken wurden durch die Dehnung verbreitert, was zu Ungenauigkeiten führte.
- Die Dehnung wurde durch sogenannte „Anlagemesstäbe“ bestimmt. Dieser Anlagemesstab musste für jede einzelne Messung auf die Messlänge eingestellt werden.
- Da Brüche oft unerwartet eintreten, war es schwierig die Dehnung im Augenblick des Reißens genau abzulesen.

Bei Ringen traten alle diese oben genannten Probleme nicht auf, da der Innendurchmesser der Ringe und damit die Dehnung direkt über den Traversenweg gemessen werden. Allerdings ergibt sich beim Zugversuch von Ringen ein anderes Problem: Der Innendurchmesser erfährt eine höhere Belastung als der Außendurchmesser des Ringes. Zudem ergeben die im Vergleich zu den Zugprüfstäben meist größeren Probenquerschnitte bzw. -volumina etwas schlechtere Ergebnisse, siehe auch Unterabschnitt 5.2.4 des Fachartikels „Zugversuch: Prüftechnische Grundlagen und Empfehlungen für die praktische Anwendung“ auf unserer Webseite. Daher können die Zugversuchsergebnisse von Schulterstäben zu denen von aus der Prüfplatte geschnittenen Rechteckringen deutlich abweichen. Darüber hinaus weisen Prüfplatten mitunter Orientierungen auf. Darauf wird näher im noch folgenden Unterabschnitt 5.1 eingegangen.

4.1 Vergleich Schulterstäbe – Normringe

Die ISO 37¹³ nennt folgende Unterschiede in den Ergebnissen von Schulterstäben mit Normringen

- Schulterstäbe sollten bevorzugt werden, wenn die *Zugfestigkeit* eines Werkstoffes ermittelt werden soll. Normringe ergeben hier niedrigere Ergebnisse als Schulterstäbe.
- Bei der *Reißdehnung* erhält man ungefähr die gleichen Werte zwischen Zugprüfstäben und Ringen, wenn die Dehnung der Ringe prozentual mit dem anfänglichen Innendurchmesser der Ringe berechnet wird und wenn die Schulterstäbe rechtwinklig zu den Orientierungen der Prüfplatten (sofern vorhanden) ausgeschnitten werden.
- Bei der Dehnung unter einer vorgegebenen Spannung oder bei der Spannung unter einer vorgegebenen Dehnung (=Spannungswert) erhält man ungefähr die gleichen Werte zwischen Zugprüfstäben und Ringen, wenn die Dehnung der Ringe prozentual mit dem anfänglichen mittleren Durchmesser berechnet wird und wenn der Mittelwert von parallel und rechtwinklig zu den Orientierungen ausgeschnittenen Schulterstäben bestimmt wird.

Eigene Vergleichsmessungen von EPDM O-Ringen mit Schnurstärken von 3,53mm 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.

¹³ vgl. International Standard ISO 37: ISO 37: Rubber, vulcanized or thermoplastic — Determination of tensile stress-strain properties, Fifth Edition: 2011-12-15, Kapitel 5, S. 4

4.2 Unterschiedliche Berechnungsmethoden von Ergebnissen bzw. Kennwerten aus dem Zugversuch von Ringen

Die folgenden Überlegungen gelten nur für die Berechnung von 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.¹⁴

Die Berechnung der **Zugfestigkeit** stellt in der Regel kein großes Problem dar. Es wird die zum Reißen benötigte Kraft durch die zweifache Fläche des Ringquerschnitts geteilt:

$$\sigma_{\max} = F_{\max} / A_0$$

Legende:

σ_{\max} = Zugfestigkeit [N/mm²]

F_{\max} = Höchstkraft [N] (Bei Elastomeren meist identisch mit der Kraft im Moment des Reißens F_R .)

A_0 = Anfangsquerschnitt [mm²]

A_0 bei O-Ringen	A_0 bei Rechteckringen
$A_0 = (\pi * (d_2/2)^2) * 2$	$A_0 = (((d_a - d_i)/2) * h) * 2$
d_2 = Schnurstärke	d_a = äußerer Durchmesser des Ringes d_i = innerer Durchmesser des Ringes h = Höhes des Ringes

Tab.2: Berechnung des Anfangsquerschnittes von O-Ringen und Rechteckringen für die Verwendung zur Bestimmung der Zugfestigkeit

Die DIN 53504 erlaubt auch eine Berechnung des Anfangsquerschnittes mit Hilfe der Dichte (bzw. des Volumens und des mittleren Durchmessers), welche zuvor nach dem Archimedisches Prinzip bestimmt wurde. An dieser Stelle sei auf die Beschreibung in der Norm verwiesen.¹⁵

Wenn auch die Berechnung der Zugfestigkeit unproblematisch ist, so ist doch die Bewertung des Ergebnisses schwieriger. Auf Grund 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.

REECE¹⁶ zitierte bereits 1935 in den „Transactions of the Institution of the Rubber Industry“ die „*Publication No. 38 des American Bureau of Standards*“, in welcher mit Hilfe tiefergehender¹⁷ mathematischer Überlegungen das Verhältnis der Dehnung zwischen innerem und äußerem Durchmesser dargestellt wurde. E_1 ist die Dehnung der Innenseite des Ringes, also die Dehnung, welche von der Prüfmaschine automatisch erfasst wird. E_2 ist die mit Hilfe der Formel berechnete Dehnung auf der Außenseite des Ringes.

¹⁴ vgl. ASTM – International: Designation: D1414 – 94 (Reapproved 2008): Standard Test Methods for Rubber O-Rings, Unterpunkt 8.4.2.2, S.3

¹⁵ DIN 53504: Prüfung Kautschuk und Elastomeren – Bestimmung von Reißfestigkeit, Zugfestigkeit, Reißdehnung und Spannungswerten im Zugversuch (Ausgabe Oktober 2009), S.12

¹⁶ REECE, W.H.: The Strength of Vulcanised Rubber in: Transactions of the I.R.I (Institution of the Rubber Industry), 11, 1935, S. 323ff.

¹⁷ So floss bspw. die veränderte Dicke des Ringes während des Dehnvorgangs in die Berechnung mit ein.

Dehnung E_1 am Innen-Ø [%]	Theoret. berechnete Dehnung E_2 am Außen-Ø [%]	Verhältnis E_2 / E_1
100	80,3	0,803
200	163,2	0,816
300	246,6	0,822
400	330,8	0,827
500	415,0	0,830
600	499,2	0,832
700	583,8	0,834
800	668,0	0,835
900	752,4	0,836
1000	837,0	0,837

Tab.3: Berechnung der Dehnung des äußeren Durchmessers eines Rechteckringes bei vorgegebener innerer Dehnung. Der Norm-Ring hat folgende Abmessungen: Innen-Ø = 44,6mm, Außen-Ø = 52,6mm, Dicke = 4mm.

Bei den oben zitierten Normen (ISO / DIN / ASTM / VW-PV) wird die **Reißdehnung** der Ringe immer mit Hilfe des Innendurchmessers ermittelt.

Für die Ermittlung der Ausgangslänge des Rings gibt es zwei verschiedene Möglichkeiten, entweder wird der O-Ring vor der Prüfung vermessen (idealerweise Erfassung des Innendurchmessers mit einer optischen Messmaschine) oder der Ring wird auf die Rollen aufgelegt und mit einer relativ geringen Kraft (z.B. 1N) „angefahren“. Der Ausgangsinnendurchmesser der Ringe wird dann über den gefahrenen Weg bis zum Erreichen der Kraft und dem Umfang der Rollen errechnet. Letztere Methode ist einfacher, da keine Messung des Innendurchmessers erfolgen muss. Jedoch ist sie in keiner Norm beschrieben und wird dennoch mitunter in Praxis fälschlicherweise angewandt. Besonders bei kleinen Ringen aus harten Materialien kann eine kleine Vorkraft nicht ausreichen, um die nicht berührten Teile des Ringes parallel auszurichten. Sobald die Anfahrkraft erreicht ist, wird der Innendurchmesser mit folgender Formel berechnet:

$$d_{IAK} = 2 \times L_{AK} + \pi \times D_{RS}$$

Legende:

d_{IAK} = Innendurchmesser des Ringes, ermittelt durch Anfahren auf eine vorab bestimmte kleine Kraft

L_{AK} = Ausgangslänge (=Abstand der Mittelpunkte der Rollen bzw. Stifte), ermittelt durch Anfahren auf eine vorab bestimmte kleine Kraft

D_{RS} = Umfang einer Rolle bzw. eines Stiftes

Prüfnorm	Ermittlung der Anfangsmesslänge des Innendurchmessers	Bemerkungen, Normverweise
ASTM D 1414	Innendurchmessers des Ringes wird vor der Prüfung gemessen	Keine Anfahrkraft bzw. -geschwindigkeit vorgeschrieben, Ermittlungsmethode ersichtlich durch Formel (6) auf Seite 3 der Norm
DIN 53504	Innendurchmessers des Ringes wird vor der Prüfung gemessen Vorgeschriebener Achsabstand gem. Tabelle und in der Norm beschriebenen Berechnungsformeln wird mit 50mm/min angefahren	Unterabschnitt 7.4.2, S.13 Anfahrwegvorgaben bzw. –berechnung: Tab. 1, S.7 und Tab.3, S.9
ISO 37	Innendurchmessers des Ringes wird vor der Prüfung gemessen	Keine Anfahrkraft bzw. –geschwindigkeit vorgeschrieben, Ermittlungsmethode ersichtlich durch letzte Formel auf S.13
PV 3973	Innendurchmessers des Ringes wird vor der Prüfung gemessen Vorlaufweg wird mit einer Formel berechnet und mit 50mm/min angefahren	Berechnung mit Formel (1), S.4

Tab. 4: Gegenüberstellung der Ermittlung der unterschiedlichen Anfangsmesslängen zur Bestimmung der Reißdehnung in wichtigen Prüfnormen zum Zugversuch von Ringen

Bei der Ermittlung des **Spannungswertes**¹⁸ unterscheiden sich die Normen gravierender. In den meisten Normen¹⁹ 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 Spannungswert²⁰ als wenn man es 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 vergleichbar.²¹ Ist der Spannungswert von O-Ringen eine spezifizierte Größe, also wenn seine Prüfung explizit in einer Spezifikation gefordert wird, sollte man diesen mit Hilfe des mittleren Ringumfangs berechnen. Liegt diese Forderung nicht vor, wird der Spannungswert in der Praxis der Einfachheit halber meist mit Hilfe des inneren Ringumfangs ermittelt.

RICHTER

¹⁸ Früher wurde der Spannungswert fälschlicherweise auch als Modul bezeichnet. Eine genaue Erklärung, warum dies zu vermeiden ist, bietet die DIN 53504: Prüfung Kautschuk und Elastomeren – Bestimmung von Reißfestigkeit, Zugfestigkeit, Reißdehnung und Spannungswerten im Zugversuch (Ausgabe Oktober 2009), S.6, ANMERKUNG 2: „Die Benennung Modul für solche Spannungswerte ist nicht richtig und deshalb zu vermeiden. Die Benennung Modul, z. B. Elastizitätsmodul, gilt in der Regel nur für Stoffe, bei denen zwischen Spannung und Formänderung eine Proportionalität besteht. Dies ist bei Elastomeren auch schon bei kleinen Formänderungen nicht der Fall. Es ist deshalb nicht möglich, „den“ Elastizitätsmodul für ein bestimmtes Elastomer anzugeben.“
oder lesen Sie die Ausführungen im Fachartikel „Zugversuch: Prüftechnische Grundlagen und Empfehlungen für die praktische Anwendung“ auf unserer Webseite (Unterabschnitt 3.5, S.12).

¹⁹ Die meisten Prüfnormen behandeln nur die Prüfung von Norm-Rechteckringen.

²⁰ vgl. ASTM – International: Designation: D412 – 06a (Reapproved 2013): Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers - Tension, Unterpunkt 17.2.1, S.10

²¹ vgl. International Standard ISO 37: ISO 37: Rubber, vulcanized or thermoplastic — Determination of tensile stress-strain properties, Fifth Edition: 2011-12-15, Kapitel 5, c) 1), S. 4

Prüfnorm	Ermittlung des Spannungswertes	Bemerkungen, Normverweise
ASTM D 1414	Bei Ermittlung des Spannungswertes wird die Dehnung auf den inneren Ringumfang bezogen.	Die ASTM D 1414 ist die Prüfnorm für O-Ringe, siehe dort NOTE1, Unterabschnitt 8.4.3, S.3
ASTM D 412	Bei Ermittlung des Spannungswertes wird die Dehnung auf den mittleren Ringumfang bezogen.	Die ASTM D412 ist die allgemeine Prüfnorm für den Zugversuch, in der neben der Prüfung von Schulterstäben auch die von Normringen beschrieben ist. Siehe S.10, Unterabschnitt 17.2.1 Besonderheit dieser Norm: Die Berechnung des Abstandes der Aufnahmedorne vor Beginn der Prüfung erfolgt bei Ringen des „Type 1“ mit Hilfe des inneren Umfangs, bei Ringen des „Type 2“ mit Hilfe des mittleren Ringumfangs.
DIN 53504	Bei Ermittlung des Spannungswertes wird die Dehnung auf den mittleren Ringumfang bezogen.	Siehe S.14, Unterabschnitt 7.5
ISO 37	Bei Ermittlung des Spannungswertes wird die Dehnung auf den mittleren Ringumfang bezogen.	Siehe S.14, 3.Formel
PV 3973	Bei Ermittlung des Spannungswertes wird die Dehnung auf den mittleren Ringumfang bezogen.	Siehe S.6, Anmerkung 2

Tab. 5: Gegenüberstellung der unterschiedlichen Methoden zur Ermittlung des Spannungswertes (Bezug der Dehnung entweder auf inneren oder mittleren Ringumfang) von Ringen. Mit Ausnahme der ASTM D1414 geht es hier um die Prüfung von genormten Rechteckringen.

PRÜFLABOR

5. Einflüsse auf das Ergebnis

5.1 Einfluss der Verarbeitung

Elastomerprüfplatten wie sie für die Erstellung von Schulterstäben und Normprüfringen verwendet werden, können Orientierungen durch das Walzen der Rohmischung aufweisen, obwohl Elastomere eigentlich isotrop sind, d. h. in allen Richtungen dieselben Eigenschaften haben. Je nachdem, ob die Schulterstäbe nun parallel oder rechtwinklig zu den Orientierungen ausgeschnitten wurden, kann es zu leicht unterschiedliche Ergebnissen kommen. Deshalb werden Prüfplatten häufig bezüglich der Walzrichtung gekennzeichnet. In der Regel werden die Schulterstäbe parallel zur Walzrichtung ausgeschnitten. Auch wenn die Walzrichtung nicht gekennzeichnet ist, sollten Prüfstäbe immer nur in ein- und derselben Richtung ausgestanzt werden, wenn die Prüfstäbe für unterschiedliche Einlagerungen verwendet werden. Nur so können die Ergebnisse miteinander verglichen werden.

Will man die Walzrichtung bzw. deren Einfluss herausfinden, kann man auch die Schulterstäbe um 90° zueinander versetzt entnehmen und die Ergebnisse miteinander vergleichen. In den meisten Fällen ist dieser Einfluss aber kleiner 10% des Messergebnisses. Schulterstäbe parallel zur Walzrichtungen ergeben bessere Festigkeitswerte. Bei den Spannungswerten und der Reißdehnung ist ein Einfluss der Walzrichtung nicht bzw. kaum erkennbar. Beim Ausschneiden von Normprüfringen kann keine Rücksicht auf die Walzrichtung genommen werden. Ein Normprüfring hat verschiedenste Anteile im ganzen Bereich zwischen rechtwinklig und parallel zur Walzrichtung auftretenden Orientierungen. Der Ring wird dann meist in dem Orientierungsbereich mit der geringsten Festigkeit reißen. Dies kann u.a. ein Grund sein für die geringere Zugfestigkeit von Normprüfringen im Vergleich zu Schulterstäben.

Bei manchen O-Ringen wird auf Grund schlechter Verarbeitung nicht ein Festigkeitswert des Werkstoffes ermittelt, sondern die niedrigere Festigkeit der Bindaht (= 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 Bindaht 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 5-10%-Punkte 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 diese muss abhängig von der geplanten Anwendung des Elastomerbauteiles ermittelt werden. Ist bspw. der Weiterreißwiderstand der wichtigste Materialkennwert für das Fertigprodukt, so muss ein anderer Vernetzungsgrad erreicht werden als wenn z.B. ein niedriger Druckverformungsrest die wichtigste Bauteileigenschaft wäre. Dies wird am der folgenden Diagramm ersichtlich:

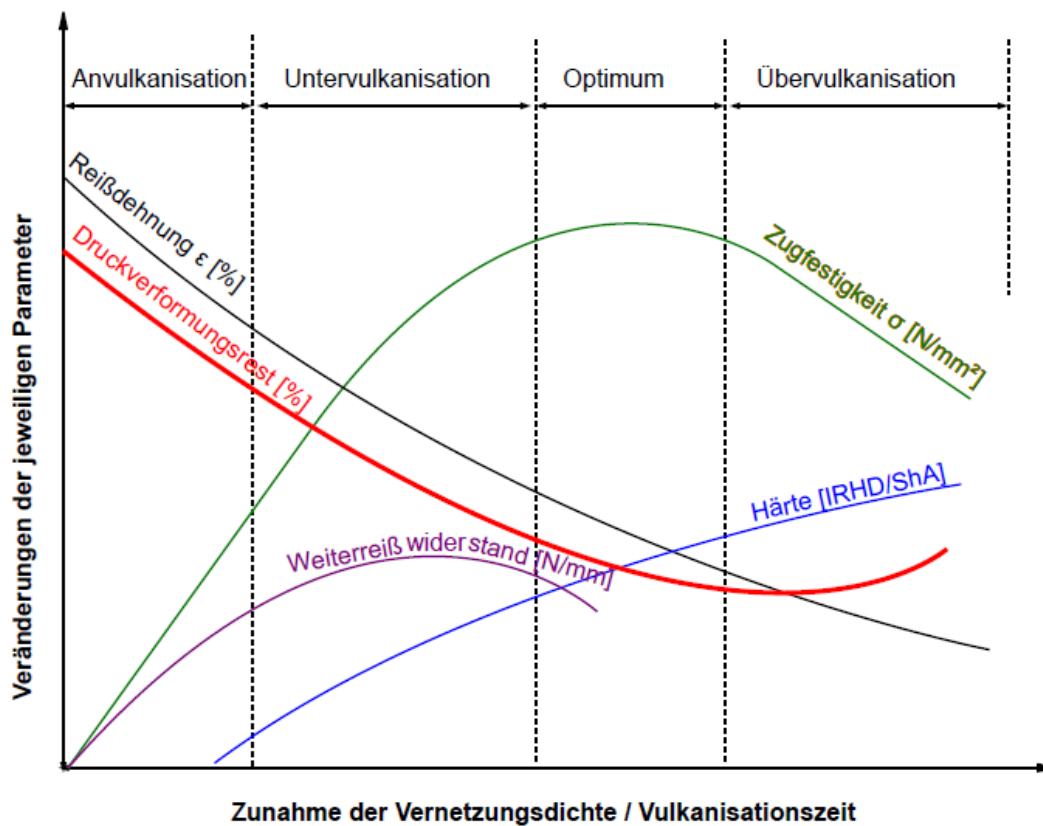


Abb. 7: Die Zugfestigkeit erreicht ihren besten Wert im Bereich der optimalen Vernetzungsdichte, während mit Hilfe der Reißdehnung keine Aussage über die ideale Netzwerkdicke gemacht werden kann.

5.2 Einfluss der Schnurstärke

In unserem Fachartikel „Zugversuch: Prüftechnische Grundlagen und Empfehlungen für die praktische Anwendung“ auf unserer Webseite, gehen wir im Unterabschnitt 5.2.4 auf den Einfluss des Probekörperquerschnitts bzw. -volumens näher ein. Die folgenden Erläuterungen sind z.T. daraus entnommen.

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..²² Dies wird auch an der weiter unten folgenden Abb.8 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 Fehlstellen vorhanden sind.“²³ Auch in noch so sorgfältig hergestellten Elastomermischungen 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.“²⁴ So ist es dann auch zu erklären, dass die reale Festigkeit von Elastomercompounds oft zwei bis drei Zehnerpotenzen unterhalb der molekularen Festigkeit liegt.²⁵

REECE²⁶ gibt hierzu ein sehr 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 oben beschrieben – an Fehlstellen beginnt, ist es logisch, dass ein kleiner Schulterstab weniger bzw. keine kritischen Fehlstellen besitzt als ein größerer. 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 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 Iman NAZENI²⁷ auf einer Vortragstagung der Deutschen Kautschuk Gesellschaft im Jahr 1960 in Berlin am Beispiel von Prüfstäben vorstellte. Dünnere Prüfstäbe wiesen höhere Festigkeiten als dicke Prüfstäbe auf. Er begründet 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 Verpressung weniger anfällig für einen Rissbeginn bzw. –wachstum. Eine genauere Beschreibung der Ergebnisse NAZENI finden Sie in unserem Fachartikel „Zugversuch: Prüftechnische Grundlagen und Empfehlungen für die praktische Anwendung“ auf unserer Webseite (Unterpunkt 5.2.4).

In der Praxis bestätigt sich diese 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. 6,99mm) signifikant bessere Werte auf.

²² vgl. ECKER, R.: Mechanische-technologische Prüfung von Kautschuk und Gummi in: BOSTRÖM, S (Hrsg.): Kautschuk-Handbuch, Band 5, Stuttgart, Verlag Berliner Union, 1962, S. 119

²³ NAGDI, Khairi: Gummi-Werkstoffe Ein Ratgeber für Anwender, Ratingen, 2002, S. 290

²⁴ vgl. ECKER, R.: Mechanische-technologische Prüfung von Kautschuk und Gummi in: BOSTRÖM, S (Hrsg.): Kautschuk-Handbuch, Band 5, Stuttgart, Verlag Berliner Union, 1962, S. 120

²⁵ Ebd., S. 119

²⁶ REECE, W.H.: The Strength of Vulcanised Rubber in: Transactions of the I.R.I (Institution of the Rubber Industry), 11, 1935, S.320f.

²⁷ NAZENI, Iman: Einfluss der Dicke der Prüfvulkanisate auf die Messwerte der Zerreißeigenschaft beim Standard-Prüfverfahren nach ASTM, vorgestellt auf der Vortragstagung der Deutschen Kautschuk-Gesellschaft, Berlin, 1960 (Übersetzung: SCHOON, Th. G.F.)

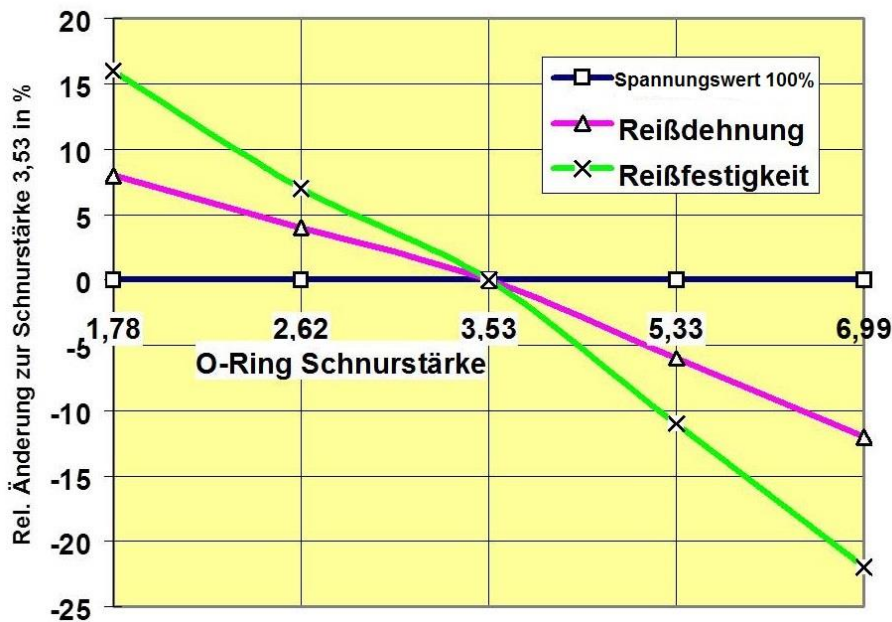


Abb. 8: Relative Änderung des Spannungswertes σ 100%, der Reißdehnung und Reißfestigkeit in Abhängigkeit von der Schnurstärke von O-Ringen^{28, 29}

5.3 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 starre Stifte aufgelegt (vgl. Abb.6). Es gibt sogar – wie oben bereits beschrieben – Normen²⁹, die generell, also auch bei größeren O-Ringen, eine Prüfung auf feststehenden Dornen fordern (vgl. Tab.1).

In einer internen Untersuchung, die nicht den Anspruch einer wissenschaftlichen Studie erhebt, konnten wir nachweisen, dass im untersuchten 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.

Probekörper O-Ring	EPDM (18,77 mm x 1,74 mm)			
	Stiftdurchmesser [mm]	2	3	5
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

Tab. 6: Untersuchung des Einflusses verschiedener Stiftdurchmesser auf die Reißfestigkeit eines EPDM O-Ringes (70ShA) bei einer Prüfungsgeschwindigkeit von 500mm/min

²⁸ Die Daten zur Erstellung des Diagramms wurden entnommen von: 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

²⁹ Volkswagen AG: Konzernnorm PV3973 (Ausgabe 2010-11): Elastomer-Runddichtringe Bestimmung von Zugfestigkeit, Reißdehnung und Spannungswerten im Zugversuch, Unterpunkt 4.1.4, S.2f.

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

Wie bereits oben im Kap.3 beschrieben, werden je nach Norm 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 unserer Erfahrung haben aber unterschiedliche Prüfgeschwindigkeiten, sofern sie sich in dem oben genannten Rahmen bewegen, kaum bzw. keinen Einfluss auf die Ergebnisse.

Folgende Tabelle zeigt dies beispielhaft für einen EPDM-Werkstoff:

Probekörper O-Ring	EPDM (18,77 mm x 1,74 mm)	
	200	500
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

Tab. 7: Untersuchung des Einflusses verschiedener Prüfgeschwindigkeiten auf die Reißfestigkeit eines EPDM-O-Ringes (70ShA) bei einem Stiftdurchmesser von 5mm

Hintergründe zur Wahl der richtigen Prüfgeschwindigkeit siehe Kapitel 3 dieses Fachartikels.

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

Oben in diesem Artikel wurde bereits dargelegt, dass die meisten Normen entweder angetriebene Rollen oder eine Schmierung des Ringes und der Aufnahmestifte im Zugversuch fordern.

Dass man durch eine Schmierung von Ring bzw. Aufnahmestiften reproduzierbarere Prüfergebnisse und höhere Festigkeits- bzw. Dehnungswerte erhält, ist unbestreitbar.

In einer von uns durchgeführten Untersuchung wollten wir eine erste Aussage und Richtung für das Ausmaß dieses Einflusses bekommen.

Die folgende Tabelle entstand aus der Prüfung von 100 O-Ringen mit dem Durchmesser 6mm bei einer Schnurstärke von 2mm. Die O-Ringe wurden auf 3mm Stifte gelegt und mit einer Geschwindigkeit von 200mm/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. Durch diese Ergebnisse wird ersichtlich, dass der Einfluss durch die Verwendung eines Gleitmittels beim Zugversuch höher als die sonstigen Parameter (Dehngeschwindigkeit/ Stiftdurchmesser) bewertet werden muss. Üblicherweise verwenden wir als Gleitmittel ein Silikonöl.

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 6x2mm trocken	10,1	13,2	7,8	11,8	120	153	91	11,1
O-Ring 6x2mm geschmiert	12,9	15	9,5	6,1	156	171	117	4,6

Tab. 7: Interner Vergleich der Zugfestigkeiten und Reißdehnungen an geschmierten und trockenen FKM O-Ringen (80 ShA), Prüfgeschwindigkeit 200mm/min

6. Sinn und Zweck der Zugprüfung an Ringen

Die Zugprüfung von Ringen und besonders von O-Ringen wird aus folgenden Gründen und Nutzen durchgeführt:

- Zur **Qualitätssicherung**:
 - Informationen über die Rezepturqualität (Auswertung der Absolutwerte, Festigkeit des Werkstoffes, Feststellung von Rezepturänderungen³⁰)
 - 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.
 - Aussagen über die Verarbeitungsqualität (mit Hilfe der Standardabweichung, z.B. verfrühtes Reißen durch Bindenähte, Einrisse, Kerben, Vernetzungsgrad³¹ usw.)

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

- Zur **Absicherung von praktischen Anwendungen**:
 - Bei besonders stark physikalisch beanspruchten Bauteilen, bspw. durch Montageaufweitung (>100%), Abrieb oder Spaltextrusion

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 einer der wenigen Elastomerbauteile, die von ihrer Form zu so einem Fertigteiltest ohne große Vorbehandlung geeignet sind. Da es sich hier (im Gegensatz zu Schulterstäben) um eine Fertigteilprüfung handelt, sind auch schnell Aussagen möglich über die Fertigung selbst. Beispielsweise eine Messung gezielt aller Nester eines Werkzeugs zeigt, ob überall die gleichen, vereinbarten Bedingungen (Massefluss, Heizgrad etc.) herrschten.

Wenn man den Zugversuch von Ringen normgerecht durchführt und richtig bewertet, lassen sich daraus wichtige Erkenntnisse ableiten. Deswegen ist dieses Prüfverfahren Stand der Technik in der Automobilindustrie und könnte sicherlich noch vermehrt in anderen Branchen eingesetzt werden.

³⁰ So ist beispielsweise ein Austauschen von Mischungen mit nur unterschiedlicher Molekulargewichtsverteilung (z.B. höherviskose Pressmischung durch niedrigviskose Spritzmischung) nicht über Infrarotspektroskopie (IR) nachweisbar, sondern nur über den Zugversuch.

³¹ Der optimale Vernetzungsgrad ist sehr gut durch die Zugfestigkeit zu bestimmen. Siehe hierzu Abb.8 dieses Fachartikels!