

FACHWISSEN PRÜFVERFAHREN FÜR ELASTOMERE

Ein Angebot des



PRÜFEN BERATEN ENTWICKELN

Quelle: www.o-ring-prueflabor.de

Stand der Information: 10/2014

Zugversuch: Prüftechnische Grundlagen und Empfehlungen für die praktische Anwendung

Autoren:
Dipl.-Ing. (FH) Ulrich Blobner
Dipl.-Ing. Bernhard Richter

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

1. Definition des Zugversuches

Beim Zugversuch werden genormte Prüfkörper (in den meisten Fällen sogenannte „Schulterstäbe“) in eine Zugprüfmaschine eingespannt und mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit bis zum Zerreißen gedehnt. Bei diesem Vorgang wird der Verlauf der benötigten Kraft und der Dehnung aufgezeichnet und daraus ein Zugdehnungsdiagramm erstellt. Wichtige Einzelkennwerte sind die Reißfestigkeit und -dehnung. Er ist ebenso ein hilfreiches Instrument, um vergleichende Aussagen zwischen nicht vorbelasteten, produktionsfrischen und gealterten Werkstoffen zu machen.

2. Sinn und Zweck der Zugversuchsprüfung – praktischer Nutzen

In den folgenden Abschnitten wird gezeigt, warum die Zugversuchsprüfung eine sehr aussagekräftige Prüfmethode ist, mit welcher sehr unterschiedliche, vielfältige und hilfreiche Aussagen über Werkstoffe und Fertigteile gewonnen werden können.

2.1 Aussagen über die mechanische Belastbarkeit (Dehnung, Festigkeit)

Die Ergebnisse aus dem Zugversuch sind in vielen Fällen für den Konstrukteur auf den ersten Blick weniger von Interesse, da Elastomere nur selten dauerhaft auf Zugdehnung beansprucht werden. Jedoch darf aber nicht vergessen werden, dass es während des Montageprozesses zu großen Aufweitungen kommen kann. Hier treten mitunter Dehnungen von über 100% auf. Außerdem ergibt eine hohe Reißdehnung bei stark verpressten Dichtungen eine höhere Sicherheit gegen Spannungsrisse. Sie verhindert nämlich, dass die Dichtung im Inneren auf Grund der hohen Verformung aufplatzt. Hohe Zugfestigkeiten haben aber auch einen anwendungstechnischen Nutzen bzgl. einer verbesserten Abriebfestigkeit und eines größeren Widerstandes gegen Spaltextrusion.¹

Gibt es innerhalb der gleichen Polymerfamilie Mischungen mit höheren Festigkeitswerten, weist dies oft auf bessere und qualitativ hochwertigere Mischungsbestandteile hin. Es muss jedoch im Einzelnen geprüft werden, ob diese höhere Festigkeit im vorliegenden Anwendungsfall überhaupt benötigt wird. Stehen mehrere ähnliche Elastomermischungen für eine Anwendung zur Auswahl, so sollte in den wenigsten Fällen die Zugfestigkeit das ausschlaggebende Auswahlkriterium sein. Viel wichtiger sind andere Kennwerte wie z.B. der Druckverformungsrest oder die Alterung in Heißluft oder Medien, die jedoch auch mit Hilfe des Zugversuches bestimmt werden.

Bei der Erstellung von Werkstoffspezifikationen sollte darauf geachtet werden nicht unnötig hohe Zugfestigkeiten und Reißdehnungen zu fordern. Diese könnten vielleicht durch einen erfahrenen Compoundeur und hoch qualitative Mischungsbestandteile erreicht werden, jedoch meist zu Lasten anderer wichtigerer Materialkennwerte und der Verarbeitbarkeit bzw. des Preises.

2.2 Aussagen über die Mischungs- und Verarbeitungsqualität eines Werkstoffes

Nach DICK² erhält der Qualitätssicherer durch den Zugversuch Aussagen, ob der Compound gründlich gemischt und dispergiert wurde, ob Verunreinigungen durch Fremdpartikel, wie z.B. Schmutz oder Papier vorliegen, ob der Werkstoff über- oder untervernetzt wurde oder ob Porositäten vorliegen. Werden z.B. Rußpartikel nicht genügend dispergiert, kann es zu Rußagglomeraten kommen, die ein vorzeitiges Reißen der Probekörper bewirken können. Porositäten entstehen meist beim Tempern durch flüchtige Mischungsbestandteile. Auf Grund all dieser Fehlermöglichkeiten ist es in der Gummiindustrie üblich eine serienbegleitende Batchprüfung (Zugfestigkeit und Reißdehnung) durchzuführen.

Es ist mitunter nicht immer leicht herauszufinden, ob auftretende Probleme auf eine schlechte Mischungsqualität oder auf eine minderwertige Verarbeitungsqualität (z.B. beim Spritzgießen bzw. Pressen) zurückzuführen ist. Manchmal reicht hier der Zugversuch nicht aus und es müssen noch andere Prüf- und Analysemethoden zu Rate gezogen werden.

Schließlich ist es für den Praktiker noch bedeutsam zu wissen, dass Labormischungen normalerweise bessere Zugfestigkeiten aufweisen als Mischungen im Produktionsmaßstab, da erstere gründlicher dispergiert sind. D.h., dass die an Fertigteilen gemessenen Zugfestigkeiten

¹ Dies gilt aber immer nur in Kombination mit anderen Materialeigenschaften wie z.B. entsprechender Härte, gutem Weiterreißwiderstand und Druckverformungsrest.

² DICK, John S.: Rubber Technology – Compounding and Testing for Performance, München, 2001, S.49

geringer sein können, als die an Prüfplatten zur Materialfreigabe gemessenen Werte, weil Prüfplattenmischungen oft im Labor hergestellt werden.

2.3 Aussagen über die Lebensdauer und mechanische und chemische Beständigkeit / Belastungsgrenzen von Werkstoffen (Alterung)

Um Aussagen über die Lebensdauer von Werkstoffen zu bekommen, werden gealterte Prüfstäbe mit produktionsfrischen verglichen. Die Alterung findet entweder durch Luft oder spezielle Prüfmedien (z.B. Öle, Kraftstoffe, Heißwasser usw.) bei erhöhter Temperatur statt. Hier interessieren in erster Linie die prozentualen Änderungen der Prüfparameter Zugfestigkeit und Reißdehnung, die eine Aussage über das Netzwerk abgeben. Die prozentualen Änderungen zeigen an, inwieweit das dreidimensionale Netzwerk beschädigt ist.

Durch lange Prüfzeiten und entsprechend angepasste Prüftemperaturen können auch Lebensdauerbelastungen simuliert werden.

Diese Prüfungen werden sowohl im Rahmen der Werkstoffentwicklung als auch bei der Freigabeprüfung gemäß den Spezifikationen von Anwendern von Dichtungen (z.B. OEMs im Automobilbereich) durchgeführt.

Der Mischungsentwickler bekommt mit Hilfe des Zugversuches Aussagen über Vernetzungssysteme, Wechselwirkungen verschiedener Mischungsbestandteile, z.B. von aktiven Rußen oder Füllstoffen. Viele Compoundeure arbeiten in der Regel mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung (DoE Design of Experiments). Die Ergebnisse aus dem Zugversuch sind hier meist ein sehr wegweisender Parameter.

2.4 Ermittlung von Werkstoffdaten für numerische Berechnungen

Computersimulationen nehmen auch in der Elastomerindustrie eine immer bedeutendere Stellung ein. Im Gegensatz zu vielen anderen Werkstoffen ist jedoch die Berechnung von Elastomeren ein sehr komplexes Feld, da die Thermoviskoelastizität von Gummiwerkstoffen und wichtige andere Eigenschaften eines Compounds stark von der jeweiligen Mischung und Einsatztemperatur abhängen und rechnerisch nicht einfach zu erfassen und beschreiben sind. Wie an den Kraft-/Dehnungskurven schnell zu erkennen ist, sind die Eigenschaften bei Elastomeren nicht linear, was kompliziertere Rechenalgorithmen verlangt.

Hinzu kommt, dass es im Gegensatz zur Kunststoffindustrie³ eine viel größere Anzahl von unterschiedlichen Elastormischungen gibt, so dass in den wenigsten Fällen für die Berechnung auf rezepturbespezifische Werkstoffdatenbanken zurückgegriffen werden kann.

Um das Materialmodell einer Mischung zu erhalten, ist – ja nach Fragestellung – eine umfangreiche Ermittlung der jeweiligen Werkstoffdaten notwendig. Dabei ist auch der Zugversuch (teilweise auch mit Temperierkammer) eines von mehreren wichtigen Prüfmethoden.^{4 5}

Es können dann strukturmechanische Simulationen (Simulation der Werkstoffalterung⁶ und Lebensdauerabschätzungen)⁷, wie auch Berechnungen durchgeführt werden, die bei der

³ In der Kunststoffindustrie stehen bspw. die Werkstoffdaten der wichtigsten Kunststofftypen im Internet in der CAMPUS-Datenbank zur Verfügung: <http://www.campusplastics.com/campus> Diese Daten können teilweise auch für Berechnungen verwendet werden.

⁴ <http://www.axelproducts.com/pages/hyperelastic.html> (Webseite abgerufen am 09.07.2014)

⁵ <http://www.axelproducts.com/downloads/TestingForHyperelastic.pdf> (Webseite abgerufen am 09.07.2014)

⁶ vgl. ACHENBACH, Manfred: Modellierung der Alterung von Gummi in: STREIT, Gerhard (Hrsg.): Elastomere Dichtungssysteme, Expert Verlag, Renningen, 2011, S.291ff.

⁷ vgl. ACHENBACH, Manfred: Modell zur Thermoviskoelastizität von Elastomeren: Modelle zur Beschreibung des thermo-mechanischen Eigenschaftsprofils von elastomeren Dichtungsmaterialien und ihre Verwendung in Finite

Entwicklung⁸ und Optimierung von Elastomerbauteilen⁹ von hohem Nutzen sind.

2.5 Aussagen über die Polymer-Füllstoff-Wechselwirkungen

In der nichtlinearen, häufig mit einem Wechsellpunkt versehenen Spannungs- / Dehnungskurve zeigen sich u.a. auch die Wirkung der verstärkenden Füllstoffe. Während im ersten, stärker ansteigenden Teil der Kurve im Wesentlichen Polymerketten gestreckt werden, erkennt man im flacher werdenden Teil die teilweise Ablösung des Polymers vom Füllstoff. Weitere Einzelheiten siehe im Gliederungspunkt 5.2.6 dieses Fachartikels.

3. Bedeutende Prüfnormen zum Zugversuch: Beschreibung des Prüfverfahrens und wichtiger Kennwerte

Die in unserem Laboralltag am meisten verwendeten Normen ISO 37 und DIN 53504¹⁰ definieren die Prüfung an Standardprüfkörpern.

3.1 Genormte Probekörper

Am häufigsten kommen hantelförmige Probestäbe, sogenannte Schulterstäbe zum Einsatz. Diese werden in der Regel aus vulkanisierten Elastomerprüfplatten ausgestanzt. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die wichtigsten Eckdaten dieser Prüfstäbe.

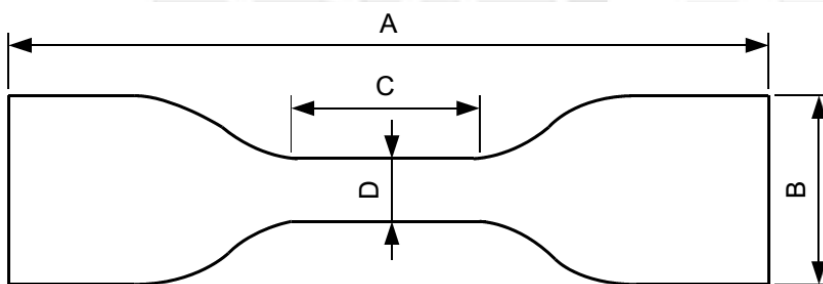


Abb.1: Skizze eines Schulterstabes: Die Bezeichnung der Abstände ist der ISO 37 entnommen.¹¹

Elemente Simulationen von Dichtungssystemen in: STREIT, Gerhard (Hrsg.): Elastomere Dichtungssysteme, Expert Verlag, Renningen, 2011, S.213ff.

⁸ vgl. ACHENBACH, Manfred und BOSCHET, René: Auslegungen von Dichtungen mit der FEM in: STREIT, Gerhard (Hrsg.): Elastomere Dichtungssysteme, Expert Verlag, Renningen, 2011, S.321ff.

⁹ STOMMEL, Markus und STOJEK, Marcus und KORTE, Wolfgang: FEM zur Berechnung von Kunststoff- und Elastomerbauteilen, Carl Hanser Verlag, München, 2011

¹⁰ Der Inhalt der DIN 53504 (Ausgabe 10-2009) wurde zum großen Teil an die ISO 37 aus dem Jahr 2005 angepasst. In diesem Fachartikel wird es hauptsächlich um die ISO 37 gehen, mit Querverweisen auf Besonderheiten und Abweichungen in der DIN 53504. Die englischen Fachbegriffen der ISO 37 werden mit Hilfe der DIN 53504 auf Deutsch wiedergegeben, da es keine offizielle deutsche Übersetzung der ISO 37 gibt. Die Buchstabenkürzel zur Bezeichnung bestimmter Prüfparameter und die Klassifizierung der Prüfstäbe bleiben jedoch wie im englischen Original der ISO 37 erhalten.

¹¹ ISO 37 (Ausgabe 12-2011), S.7

Maße [mm]	Schulterstab				
	Type 1	Type 1A	Type 2	Type 3	Type 4
Gesamtlänge A	115	100	75	50	35
Breite der Köpfe B	25 ± 1	25 ± 1	12,5 ± 1	8,5 ± 0,5	6 ± 0,5
Länge des Stegs C	33 ± 2	21 ± 1	25 ± 1	16 ± 1	12 ± 0,5
Breite des Stegs D	6,2 ± 0,2	5 ± 0,1	4 ± 0,1	4 ± 0,1	2 ± 0,1
Dicke des Schulterstabes	2 ± 0,2	2 ± 0,2	2 ± 0,2	2 ± 0,2	1 ± 0,1
Anfangsmesslänge	25 ± 0,5	20 ± 0,5	20 ± 0,5	10 ± 0,5	10 ± 0,5

Tab.1: Maße der Schulterstäbe der ISO 37¹²

Die Prüfstäbe in der DIN 53504 sind bis auf minimale Unterschiede mit denen in der ISO 37 identisch. Allerdings gibt es verschiedene Benennungen der Prüfstäbe:

ISO 37	DIN 53504	Abweichungen (außer Toleranzbereiche):
Type 1	S1	
Type 1A	S1A	Übergangshalbmesser außen: ISO 37(25mm), DIN 53504 (20mm) Anfangsmesslänge: ISO 37(20mm), DIN 53504 (25mm)
Type 2	S2	
Type 3	S3A	
Type 4	S3	

Tab.2: Gegenüberstellung der unterschiedlichen Bezeichnungen der sich maßlich entsprechenden Schulterstäbe in der ISO 37 und DIN 53504 mit Angabe signifikanter Unterschiede in den Abmessungen

In ISO 37 sind auch zwei verschiedene Ringe mit rechteckigem Querschnitt zur Zugprüfung zugelassen. Ebenso schreibt die DIN 53504 zwei Ringe vor, allerdings haben beide Normen nur einen Normring gemeinsam, wie die folgende Tabelle zeigt:

Maße [mm]	Ring		
	nicht genormt	Type A	Type B
ISO 37	nicht genormt	Type A	Type B
DIN 53504	R1	R2	nicht genormt
Außendurchmesser d ₃	52,6	44,6	10
Innendurchmesser d ₄	44,6	36,6	8
Breite b	4	4	1
Dicke a	4 (od. 6,3 in DIN)	4 (od. 6,3 in DIN)	1

Tab. 3: Genormte Rechteckringe für die Zugprüfung (Erklärung der Indices siehe Abb.2)

¹² Die Daten wurden der ISO 37 (Ausgabe 12-2011), S.5f. entnommen.

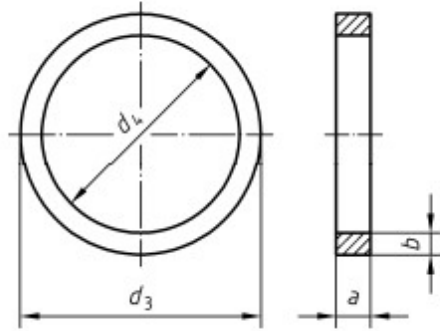


Abb.2: Darstellung eines genormten Rechteckrings aus der DIN 53504¹³

Die Erklärung der Berechnung der Anfangsmesslänge und des mittleren Umfangs für den Spannungswert würde an dieser Stelle zu weit führen. Hier sei auf die Hinweise in den beiden Normen verwiesen.

Die Herstellung der Probekörper erfordert eine hohe Sorgfalt und Erfahrung. Durch Riefen und Kerben beim klassischen Ausstanzen kann es zu einer signifikanten Verschlechterung der Ergebnisse kommen. Darauf wird im Unterpunkt 5.1 näher eingegangen.

Die DIN 53504 gibt auch Hinweise zur Prüfung von Runddichtringen, also O-Ringen. Von ASTM International gibt es sogar eine eigene Norm (ASTM D1414), die sich nur mit der Prüfung von O-Ringen befasst. In einem eigenen Artikel unter der Rubrik „Zugversuch“ wird auf die Besonderheiten beim Zugversuch an O-Ringen eingegangen.

3.2 Bedeutung und Unterschiede Schulterstäbe vs. Normringe

Während in den 1960er Jahren sich der – viele Jahrzehnte zuvor von MARTENS¹⁴ am Staatlichen Materialprüfungsamt in Berlin eingeführte – Ring als der am meisten verwendete Probekörper durchgesetzt hat¹⁵, ist er heute weitestgehend durch den Schulterstab ersetzt worden. Der Ring hatte den Vorteil, dass ein kontinuierliches Abtasten der Längenänderung des Dehnungsbereiches entfiel. Dieses Abtasten ist mit heutigen Prüfmaschinen und ihren Langweg -Längenänderungsaufnehmern kein Problem mehr. Vereinzelt werden die Ringe noch in der Mischungsproduktion zur Batchfreigabe bei Chargenfertigungen verwendet. Für Mischungsfreigaben hat sich aber der Schulterstab aus folgenden weiteren Gründen komplett durchgesetzt:

- Momentan werden die klassischen Stanzwerkzeuge immer mehr von Stanzmessern abgelöst (siehe Unterpunkt 5.1 Probekörperherstellung). In Prüflaboren, die jedoch noch mit klassischen Stanzwerkzeugen arbeiten gilt, dass der große negative Einfluss einer möglichen nicht idealen Schnittkante auf die Prüfergebnisse bei einem 2mm dicken Schulterstab geringer ist als bei einem 4mm dicken Rechteckring.

¹³ Abbildung entnommen aus der DIN 53504 (Ausgabe 10-2009), S.8

¹⁴ Adolf Martens (1850-1914) war Ende des 19. Jahrhunderts einer wichtigsten und herausragendsten Materialforscher und -prüfer im Deutschen Kaiserreich. Besonders verdient machte er sich im Bereich der Werkstoffprüfung von Metallen. Sein Name ist in der Benennung eines Eisen-Kohlenstoff-Gefüges, nämlich im „Martensit“ verewigt worden. Er war lange Jahre Leiter des Königlichen Materialprüfungsamtes in Dahlem bei Berlin. Quelle der Information: http://www.amf.bam.de/de/adolf_martens/index.htm (Zugriff auf Webseite am: 11.04.2014)

¹⁵ vgl. ECKER, R.: Mechanische-technologische Prüfung von Kautschuk und Gummi in: BOSTRÖM, S. (Hrsg.): Kautschuk-Handbuch, Band 5, Stuttgart, 1962, S. 102

- Auf Grund des größeren zu reißen Querschnittes liefern Ringe in der Regel schlechtere Werte als Prüfstäbe. Dieser Effekt wird noch im Unterpunkt 5.4 *Einfluss des Probekörperquerschnitts / -volumens* genauer erklärt.
- Mit Schulterstäben kann der Einfluss der Walzrichtung¹⁶ der Prüfplatte untersucht werden, indem eine Hälfte der zu untersuchenden Prüfstäbe um 90° versetzt aus der Prüfplatte ausgestanzt wird. Die Eigenschaften einer Prüfplatte sind nämlich meist nicht ideal isotrop. Besonders deutlich wird dieser Effekt bei der Prüfung des Weiterreißwiderstandes.
- Es werden weniger Prüfplatten benötigt, da deren Fläche mit Schulterstäbe effizienter ausgenutzt werden kann als mit Ringen.

3.3 Prüfungsgeschwindigkeiten

Als Prüfungsgeschwindigkeit (eigentlich Geschwindigkeit der Dehnung) werden in der ISO 37

- 200 mm/min (für Stabprüfkörper Type 3 und 4 und kleinen Ring Type B)
und
- 500 mm/min (für Stabprüfkörper Type 1, 1A und 2 und großen Ring Type A)

vorgeschrieben.

Die DIN 53504 fordert für die Schulterstäbe S2, S3 und S3A eine Vorschubgeschwindigkeit von 200 mm/min und für die größeren Stäbe S1 und S1A eine Vorschubgeschwindigkeit von 500mm/min. Die beiden Ringe R1 und R2 sollten mit 500mm/min geprüft werden.

3.4. Wissenswertes aus der ASTM D412

Bei der verwandten Prüfnorm ASTM D 412 („Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers – Tension“) gibt es sechs Normprüfstäbe. Deren Abmessungen unterscheiden sich von denen in der ISO 37. Außerdem gibt es vier verschiedene Prüfringe, wovon zwei den Abmessungen der Ringe aus der ISO 37 entsprechen. Die am häufigsten geforderte Prüfungsgeschwindigkeit beträgt 500mm/min. Ansonsten besteht in vielen Punkten eine große technische Vergleichbarkeit zur ISO 37.

3.5 Wichtige Kennwerte¹⁷ aus dem Zugversuch und ihre Bedeutung für die Praxis

Die **Reißfestigkeit** σ_R ist die Kraft im Moment des Reißens F_R der Probe, bezogen auf den Anfangsquerschnitt A_0 . Sie wird in N/mm² oder MPa angegeben, wobei folgendes Verhältnis gilt: 1N/mm² = 1 MPa.

Ein verwandter Materialkennwert ist die **Zugfestigkeit** σ_{max} . Dabei handelt es sich um den Quotient von Höchstkraft F_{max} und Anfangsquerschnitt A_0 . Bei den meisten Elastomeren ist jedoch die Höchstkraft mit der Kraft im Augenblick des Reißens identisch.

Es muss darauf hingewiesen werden, dass die Begriffe Reiß- und Zugfestigkeit oft synonym verwendet werden, weil „bei Elastomeren (...) die beim Reißen auftretende Kraft F_R im Allgemeinen auch die Höchstkraft F_{max} [ist], wenn der Zugversuch bei Raumtemperatur oder bei Temperaturen

¹⁶ vgl. BROWN, Roger: Physical Testing of Rubber, New York, 42006, S. 134

¹⁷ Die Begrifflichkeiten und Abkürzungen sind der DIN 53504 entnommen, S.5f.

oberhalb der Raumtemperatur durchgeführt wird.“¹⁸ Diese fälschliche Gleichsetzung der beiden Kennwerte kann zu Problemen führen, wenn F_R und F_{max} nicht identisch sind.

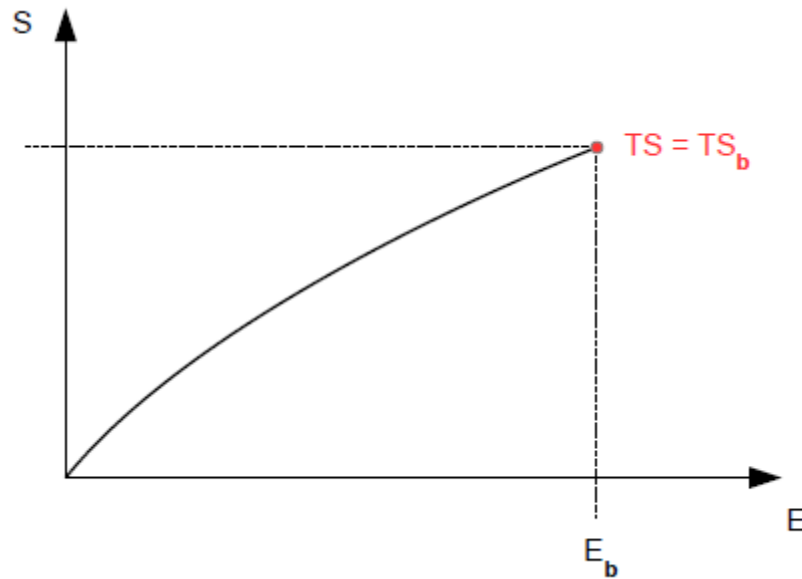


Abb.3: Klassische Zugdehnungskurve eines Elastomeren: Die Höchstkraft F_{max} (=TS) ist gleich der beim Reißen auftretenden Kraft F_R (TS_b)¹⁹

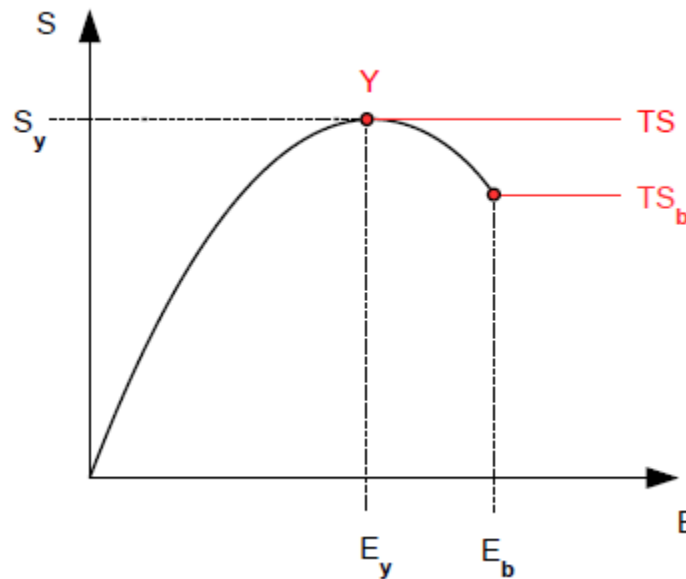


Abb.4: Seltener Sonderfall bei der Zugprüfung von Elastomeren: Die Höchstkraft F_{max} (=TS) fällt nicht mit der beim Reißen auftretenden Kraft F_R (TS_b) zusammen. Es gibt also ein Maximum (=Y), das deutlich vor dem Reißen erreicht wird.²⁰

¹⁸ DIN 53504 (Ausgabe 10-2009), S.6

¹⁹ Das Diagramm wurde nach der Vorlage der ISO 37 (Ausgabe 12-2011), S.3 erstellt. Zur Vereinheitlichung wurden die Bezeichnungen/Abkürzungen der ISO 37 beibehalten.

²⁰ Ebd., S.3

Legende:

E = elongation / Dehnung [%]

E_b = elongation at break / Reißdehnung [%]E_y = elongation at yield / Dehnung bei Maximalkraft

S = stress / Zugspannung

S_y = stress at yield / maximale ZugspannungTS = tensile strength / Zugfestigkeit [N/mm²]TS_b = tensile strength at break / Reißfestigkeit [N/mm²]

Y = yield point / Maximum

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick und eine Klassifizierung der üblichen Festigkeitsbereiche von Elastomeren:

Zugfestigkeitsbereich	Klassifizierung
0 bis 5 N/mm ²	Elastomer mit geringer Festigkeit
5 bis 10 N/mm ²	Elastomer mit mittlerer Festigkeit
10 bis 15 N/mm ²	Elastomer mit hoher Festigkeit
größer 15 N/mm ²	Elastomer mit sehr hoher Festigkeit

Tab. 4: Zugfestigkeitsbereiche von Elastomeren

Vor dem Zugversuch wird eine bestimmte Messlänge bzw. Ausgangslänge L₀ festgelegt. Um die **Reißdehnung** ε_R zu erhalten, wird die Differenz zwischen der Gesamtlänge L_R im Moment des Reißens und der Mess- bzw. der Ausgangslänge L₀ gebildet. Diese Differenz wird dann durch die Messlänge bzw. Ausgangslänge L₀ geteilt. Da die Reißdehnung meist in Prozent ausgedrückt wird, muss das Ergebnis mit 100 multipliziert werden.

Bei Elastomeren kommt es im Verlauf des Zugversuches durch die Dehnung zu einer extremen Verkleinerung des ursprünglichen Querschnittes. Würde man die Spannung mit dem Querschnitt im Moment des Reißens berechnen, würde man mitunter bis zu zehnmal so große Ergebniswerte bekommen.²¹ Dies hat damit zu tun, dass durch die hohe Dehnung u.a. durch Kristallisationseffekte die Festigkeit temporär ansteigt.

In der Fachliteratur werden auch Näherungsformeln zur Berechnung der wahren Reißfestigkeit vorgestellt. SPÄTH leitet eine solche Formel unter der Voraussetzung „einer gleichmäßigen Dehnung über die ganze Prüflänge und eines konstant bleibenden Prüfvolumens“²² her:

$$A \cdot L_0 = A' \cdot L_R$$

A = Anfangsquerschnitt des Probekörpers im zu reißenden Bereich

A' = Querschnitt im Moment des Reißens

L₀ = Anfangslänge der Messstrecke

L_R = Gesamtlänge im Moment des Reißens (L_R = L₀ + ΔL)

ΔL = Zunahme der Länge L während des Reißens

$$A' = A \cdot (1/(1+\epsilon))$$

²¹ vgl. HOUWINK, R.: Grundriss der Technologie der synthetischen Hochmolekularen, Leipzig, 1952, S. 85

²² SPÄTH, Wilhelm: Beiträge zur Technologie der Hochpolymeren: Gummi und Kunststoffe, A.W. Gentner Verlag, Stuttgart, 1956, S.109f.

$$\varepsilon = ((L_R - L_0) / L_0) = \Delta L / L_0 = \text{verhältnismäßige Dehnung}$$

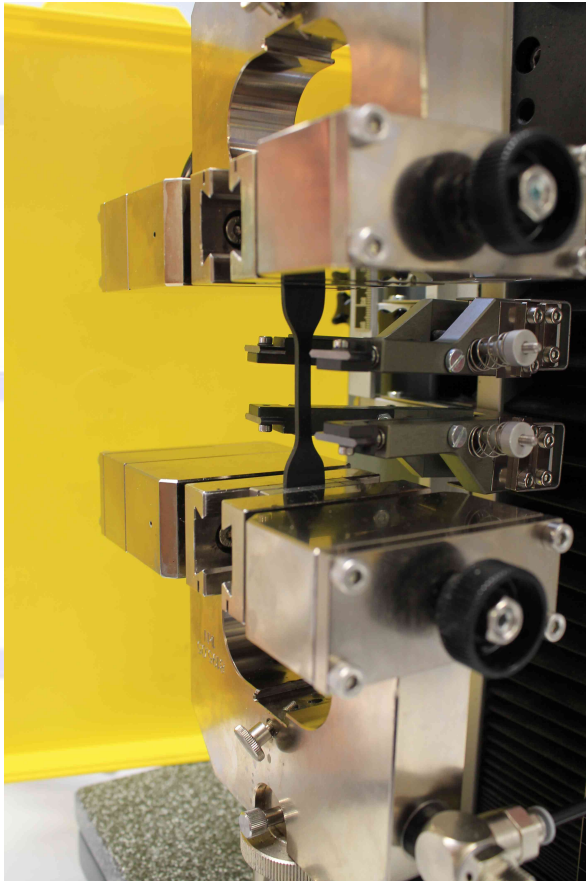
$$L_0 / L_R = (1 / (1 + \varepsilon))$$

$$\sigma_w = F / A' = (F / A) * (1 + \varepsilon) = \sigma_R * (1 + \varepsilon)$$

F = Kraft im Moment des Reißens

σ_w = „wahre“ Reißfestigkeit

σ_R = gemessene Reißfestigkeit



ING
LABOR

Abb.5: In eine Zugprüfmaschine eingespannter Zugprüfstab vor Beginn der Belastung. Die Längenänderungsaufnehmer berühren den Messbereich²³ zwischen den Schultern noch nicht.

²³ Die Anfangsmesslänge ist genormt (siehe Tab.1) und sie ist immer etwas kürzer als die Länge des Steges C (siehe Abb.1).



Abb.6: Gedehnter Schulterstab, kurz vor dem Reißen. Die Längenänderungsaufnehmer liegen nun am Schulterstab an und messen dessen Dehnung im genormten Messbereich. Hier wird ersichtlich, wie sich der Querschnitt des Messbereichs durch die Dehnung verjüngt.

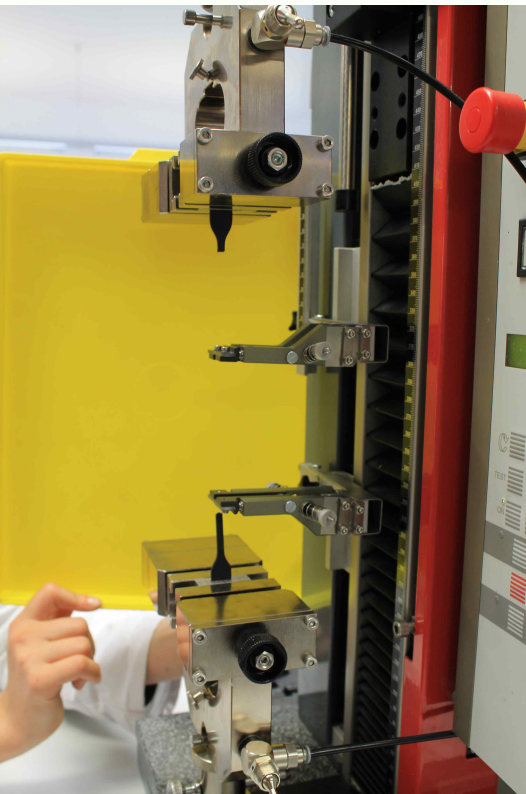


Abb.7: Der gerissene Schulterstab wird aus den Spannbacken entnommen. Dies ist das Ende des Zugversuches.

Bei der Zugprüfung von Metallen gibt es einen relativ großen und ausgeprägten Bereich, in welchem das Hookesche Gesetz gilt, d.h. dass eine direkte Proportionalität zwischen Spannung und Dehnung besteht. Die Einsatzgrenzen von Metallen liegen in der Regel innerhalb dieses Bereiches. Dem Konstrukteur stehen so klare Elastizitätsmoduli zur Verfügung.

Bei Elastomeren hingegen gibt es nur einen sehr kleinen Bereich, in welchem das Hooksche Gesetz gilt. Gummiwerkstoffe werden also so gut wie immer in einem Bereich verwendet, für welchen kein einzelner Elastizitätsmodul mehr angegeben werden kann. ECKER spricht hier vom „differentiellen Elastizitätsmodul E' “. Beim Zugversuch ist es oft üblich, die Spannungswerte bei bspw. 100% bzw. 200% Dehnung anzugeben. Laut DIN 53504 ist der „Spannungswert σ_i “ der Quotient aus der bei Erreichen einer bestimmten Dehnung vorhandenen Zugkraft F_i und dem Anfangsquerschnitt A_0 .²⁴

Mitunter ist noch die früher übliche Bezeichnung „Modulwert“ (z.B. M100 für den Spannungswert bei 100% Dehnung) anzutreffen. Aus den oben genannten Gründen ist dies aber sachlich falsch und deshalb zu vermeiden.

4. Technische Anforderungen an Zugprüfmaschinen und deren Software zur Prüfung von Elastomeren

Während es noch in den 1960er Jahren schwierig war Zugprüfmaschinen zu bekommen, deren Verformungsgeschwindigkeit im Bereich von Zehnerpotenzen variiert werden konnten, die eine relativ trägheitslos arbeitende Kraft- und Weganzeige aufwiesen²⁵ und die eine einfache und genaue Auswertung der Ergebnisse ermöglichten, ist dies heutzutage kein Problem mehr.

Folgende Sonderausstattungen sind bei der Prüfung von Elastomeren hilfreich:

Bei Prüfungen von Elastomeren ist oft mit **hohen Verfahrenwegen** bei relativ geringen Kräften (<500N) zu rechnen, da manche Werkstoffe Reißdehnungen von 700% oder mehr aufweisen. Deswegen werden Zugprüfmaschinen mit langen Traversen benötigt und die Längenänderungsaufnehmer müssen ebenfalls die langen Wege mitfahren können. Maximale Messbereiche bis 750mm sind in unserem Prüfalltag ausreichend.

Die **Längenänderungsaufnehmer** müssen so robust ausgeführt werden, dass sie durch ein mögliches Zurückschlagen beim Reißen der Probe nicht beschädigt werden. Auf der anderen Seite dürfen sie nur mit einer so geringen Kraft an der Probe anliegen, dass es bei empfindlichen Probekörpern nicht zum Einreißen an der Kontaktstelle kommt. Außerdem sollte die Linearführung möglichst reibungsfrei arbeiten, da bei der Prüfung von Elastomeren generell mit geringen Kräften gearbeitet wird.²⁶ Die momentan technisch allgemein verfügbaren Auflösungen ($3\mu\text{m}$ ²⁷ oder besser) und Genauigkeiten (0,1mm oder besser) sind für Prüfungen im Elastomerbereich ausreichend.

Es gibt es auch die Möglichkeit die Längenänderung mit Hilfe eines Lasers oder einer Videoaufzeichnung zu messen. Für diese Methode müssen auf den Prüfstäben Markierungspunkte angebracht werden, was mitunter (z.B. bei in Öl eingelagerten Prüfstäben oder bestimmten

²⁴ DIN 53504 (Ausgabe 10-2009), S.6

²⁵ vgl. ECKER, R.: Mechanische-technologische Prüfung von Kautschuk und Gummi in: BOSTRÖM, S. (Hrsg.): Kautschuk-Handbuch, Band 5, Stuttgart, 1962, S. 102

²⁶ vgl. KÖNIG, Klaus: Präzision unter Spannung in KGK, 05/2013, Artikel abgerufen am 19.06.2014: <http://www.kgk-rubberpoint.de/texte/anzeigen/4344/Praezision-unter-Spannung>

²⁷ vgl. www.en.wikipedia.org/wiki/Extensometer (Zugriff auf Webseite am 04.08.2014)

Materialien) zu Problemen führen kann. Bei der Verwendung eines Lasers kann es bei Prüfungen in Temperierkammern zu einer Ablenkung des Laserstrahles durch die Scheibe der Temperierkammer kommen. Dieses Problem tritt bei den moderneren Videosystemen, welche die Dehnung filmen, mit einem Rechner verarbeiten und auswerten, nicht auf.²⁸

Außerdem benötigen manchmal F&E-Einrichtungen die Anfangssteifigkeiten, also Anfangssteigungen eines Werkstoffes. Da es sich hierbei um relativ kleine Dehnungsbereiche handelt, genügen die oben angesprochenen 1/10mm Genauigkeit nicht. Doch auch für diese seltenen Ausnahmefälle gibt es technische Lösungen.²⁹

Besonderes Augenmerk muss auch auf die Auswahl der Probenhalter bzw. Spannbacken gelegt werden. Durch die hohe Verformbarkeit von Elastomeren kommt es beim Zugversuch zu einem Schwinden der Probe. Dadurch besteht die Gefahr, dass der Probekörper aus der Spannbacke rutscht. Dieses Problem löst man meist durch die Verwendung von **selbstspannenden Spannzeugen**. Diese Art von Spannzeugen, die auch von einem namhaften Zugprüfmaschinenhersteller als „**Keil-Probenhalter**“ bezeichnet werden, haben noch folgende Vorteile:

- Sie „sind sehr gut geeignet für schwindende Proben, da sie automatisch Nachspannen und damit die abnehmende Probendicke ausgleichen.“
- Die Keil-Probenhalter sind symmetrisch schließend. Dadurch wird die Probe automatisch in der Zugachse positioniert und eine Dickeneinstellung entfällt.
- Durch die große Spannlänge und gute Backenführungseigenschaften kann die Flächenpressung an der Probe gering gehalten werden.
- Aufgrund deren hohen Temperaturbeständigkeit und deren geringen Bauhöhe sind sie sehr gut für den Einsatz in Temperierkammern geeignet.“³⁰

Als Alternative gibt es auch **pneumatisch betätigte Spannbacken (Pneumatik-Probenhalter)**. Sie eignen sich für klemmpfeindliche Materialien und durch die Kombination mit Fußrastern wird die Bedienung sehr erleichtert, da nun der Laborant beide Hände während des Einspannvorgangs frei hat. Diese Art von Spannwerkzeugen hat folgende Vorteile:

- „Durch die Trennung von Zug- und Schließkraft wird eine konstante Spannkraft während des gesamten Prüfablaufs gewährleistet.“
- Der Anpressdruck auf die Probe ist reproduzierbar [und über den Lutdruck regelbar].
- Durch eine (...) Kraftkonstanthaltung wird die Probe vor unerwünschten Kräften beim Spannvorgang geschützt.
- Klemmpfeindliche Proben können durch Anpassung des Pneumatikdrucks sicher gehalten und Klemmbrüche vermieden werden.“³¹

Wichtig ist auch die Oberfläche der Spannbacken bzw. Spannbackeneinsätze. Sie muss eine Struktur aufweisen, in welcher sich der schwindende Elastomerprobekörper verhaken kann, ohne dass dadurch Sollbruchstellen oder Risse durch scharfe Kanten entstehen. Mitunter werden auch elastomerbeschichtete Spannbackeneinsätze verwendet.

Die meisten Zugprüfungen erfolgen bei Raumtemperatur (23°C), jedoch lassen sich mit Hilfe einer

²⁸ vgl. BROWN, Roger: Physical Testing of Rubber, New York, 42006, S. 144f.

²⁹ E-mail Mitteilung von Hr. Helmut Fahrenholz, Fa. ZWICK vom 05.08.2014

³⁰ <http://www.zwick.de/de/produkte/probenhalter-pruefwerkzeuge/keil-spannwerkzeuge.html> (Zugriff auf Webseite am 19.06.2014)

³¹ <http://www.zwick.de/de/produkte/probenhalter-pruefwerkzeuge/pneumatik-probenhalter-und-steuereinheiten.html> (Zugriff auf Webseite am 19.06.2014)

Temperierkammer Festigkeitswerte bei erhöhten oder Tieftemperaturen bestimmen. Interessant ist hier der prozentuale Abfall bzw. Anstieg der Festigkeits-/Dehnungswerte durch den Temperaturunterschied. Besonders wichtig können diese Erkenntnisse bei Dichtungen sein, die während ihres Einsatzes durch hohe Temperatur und Zugbeanspruchung belastet werden. Die Temperierkammer kann in den meisten Fällen von hinten an die Zugprüfmaschine herangefahren werden und umschließt die Spannbacken und Längenänderungsaufnehmer samt dem Probekörper. Die Erwärmung erfolgt in der Regel mit einer elektrischen Heizung, die Abkühlung mit flüssigem Stickstoff. Für Elastomere ist ein Prüfbereich von -60°C bis 250°C ausreichend. In unserer täglichen Prüfpraxis spielt jedoch der Einsatz einer Temperierkammer keine Rolle, auch wenn dies aus anwendungstechnischer Sicht manchmal sinnvoll wäre.

Schließlich ist eine gute **Software zur Auswertung** der Prüfergebnisse bedeutend. Neben einer intuitiven und zum großen Teil sich selbst erklärenden Bedienung, ist besonders auch auf Schnittstellen zum Übertragen und Wandeln der Daten in allgemein übliche Formate zu achten. Durch die heutigen Möglichkeiten der EDV entstehen schon bei einfacheren Zugversuchen viele Datensätze, die nur von Nutzen sind, wenn sie so abgelegt werden können, dass sie jederzeit ohne Probleme wieder auffindbar und zum Großteil auch ohne Spezialsoftware wenigstens in ihren Grunddaten auslesbar sind.

Die Besonderheiten beim **Zugversuch von O-Ringen**, einschließlich des dazu benötigten Sonderzubehörs werden in einem eigenen Fachartikel behandelt.

5. Wissenswertes für die Deutung und Bewertung von Prüfergebnissen aus dem Zugversuch

Mit Hilfe des Zugversuches lassen sich u.a. Aussagen über den optimalen Vernetzungsgrad eines Werkstoffes treffen. Auf der anderen Seite ist es aber auch wichtig zu wissen, welche äußeren Einflussfaktoren Prüfergebnisse aus dem Zugversuch signifikant verändern bzw. sogar verfälschen können. Nur mit Hilfe dieses Hintergrundwissens ist es möglich exakt und reproduzierbar zu prüfen und die Ergebnisse für die Praxis sinnvoll zu deuten.

5.1 Einflüsse der Zugfestigkeit bzw. des Vernetzungsgrades auf die Werkstoffeigenschaften

Ähnlich wie der Druckverformungsrest ist auch die Zugfestigkeit ein indirektes Maß für die Vernetzungsdichte eines Werkstoffes. Die Vernetzungsdichte hat einen wichtigen Einfluss auf verschiedene bedeutende Eigenschaften einer Dichtung. Es gibt keine bestimmte Vernetzungsdichte bei der alle Eigenschaften ein Optimum erreichen, sondern es gilt hier für den jeweiligen Anwendungsfall einen Kompromiss zu finden. Dies wird an der folgenden Grafik³² (Abb.8) ersichtlich:

³² 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

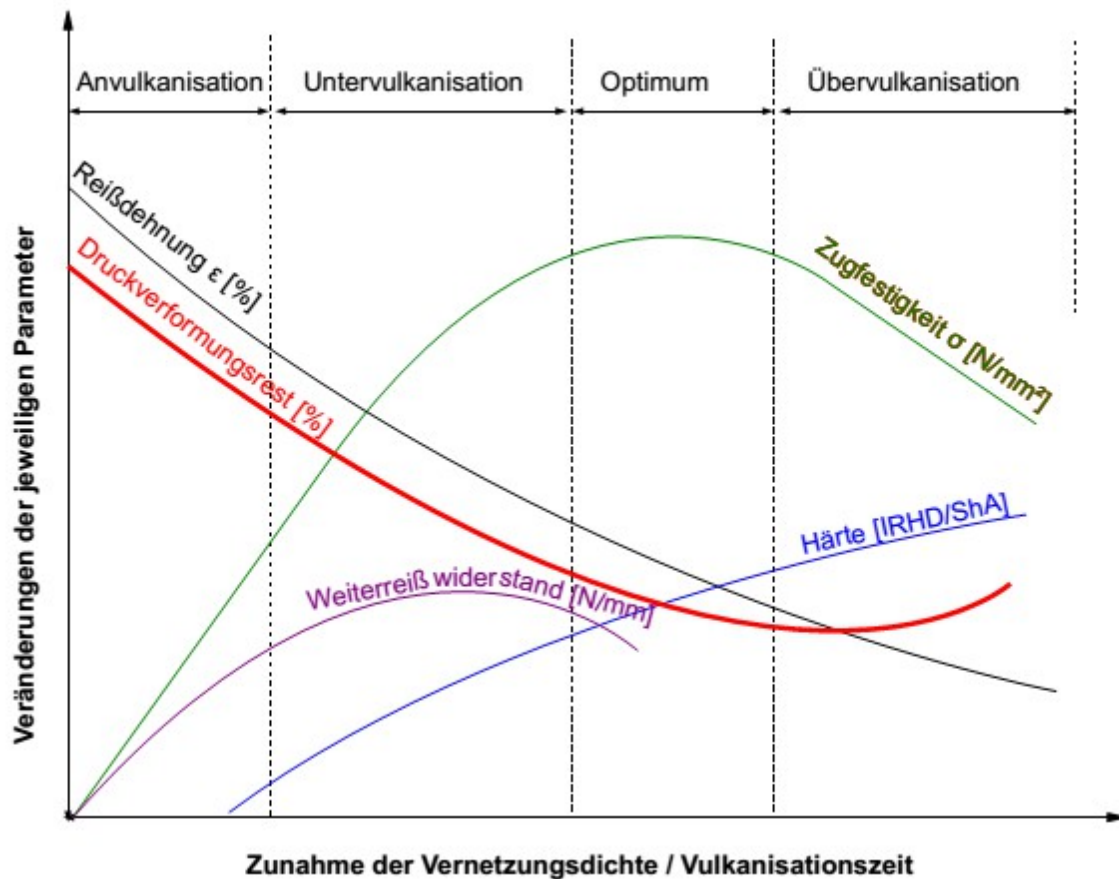


Abb. 8: Die Zugfestigkeit erreicht ihren besten Wert bei der optimalen Vernetzungsdichte, während mit Hilfe der Reißdehnung keine Aussage über die ideale Netzwerkichte gemacht werden kann.

5.2 Einflüsse auf Zugversuch-Prüfergebnisse

Die folgenden Einflussfaktoren sind nach ihrer Wichtigkeit in absteigender Reihenfolge sortiert. Diese Klassifizierung entspringt unserem Alltag im Prüflabor, jedoch kann in Einzelfällen jeder der genannten Einflüsse von großer und damit entscheidender Bedeutung werden.

5.2.1 Einfluss der Probekörperherstellung und der Probenvorbereitung

Prüfstäbe werden aus 2mm starken Prüfplatten ausgestanzt. Beim Stanzen wird die Prüfplatte vor und während dem Abscheren zusammengepresst, was nach der Entspannung zu einer konkaven Geometrie führt. Besonders ausgeprägt ist dieser Effekt bei stumpfen Stanzwerkzeugen. Betrachtet man nun einen solchen Prüfstab im Querschnitt, wird ersichtlich, dass am Beginn bzw. Ende der konkaven Schnittkante eine Spitze entstanden ist. An dieser Stelle kommt es meist zu einem verfrühten Einreißen, das nach unserer Erfahrung die Prüfergebnisse um bis zu 10% verschlechtern kann.



Abb.9: Klassisches Stanzwerkzeug: Das Werkzeug besitzt einen federaktivierten Auswerfer für die Schulterstäbe.

In jüngster Zeit werden auch Stanzmesser angeboten. Diese Werkzeuge besitzen dünne auswechselbare Schneiden, ähnlich einem Teppichmesser. Auf Grund des dünnen Messerquerschnitts wird kaum Material verdrängt. Die Stanzmesser „können problemlos gewechselt werden, somit entstehen keine Ausfallzeiten und Nachschleifkosten. Zu jedem Stanzmesser gehört [außerdem] ein eingebauter Auswerfer“³³ Das Ergebnis ist ein Prüfstab mit einem exakten rechteckigen Querschnitt.



Abb. 10: Stanzmesser: Die Schrauben am Stanzmesser sind notwendig zum Auswechseln der Schneiden. Das Werkzeug besitzt ebenso einen federaktivierten Auswerfer für die Schulterstäbe.

³³ <http://www.hess-mbv.de/kcfinder/upload/files/Dumbbell%20Messer.pdf> (Zugriff auf Webseite am 28.05.2014)
NB: Dieser Anbieter nennt seine Stanzmesser „Dumbbell Meser“. „Dumb-bell test piece“ oder nur „dumb-bell“ ist in der ISO 37 die offizielle Bezeichnung für „Schulterstab“. „Dumb-bell“ ist eigentlich ein Begriff aus dem Sport und bedeutet „Hantel“.

Wir sprechen von gestanzten Prüfstäben, wenn sie mit einem klassischen Stanzwerkzeug hergestellt wurden und von geschnittenen Prüfstäben, wenn sie mit einem Stanzmesser produziert wurden. „Geschnitten“ bedeutet hier kein ziehendes Schneiden, wie man es bspw. bei Lebensmitteln mit einem Messer macht, es ist auch kein Schneiden mit einer kreisrunden rotierenden Klinge, sondern es handelt sich um ein „gestanztes Schneiden“.

Klassische Stanzwerkzeuge (**Abb.9**) kommen in unserem Laboralltag nur noch bei sehr harten Materialien zum Einsatz.

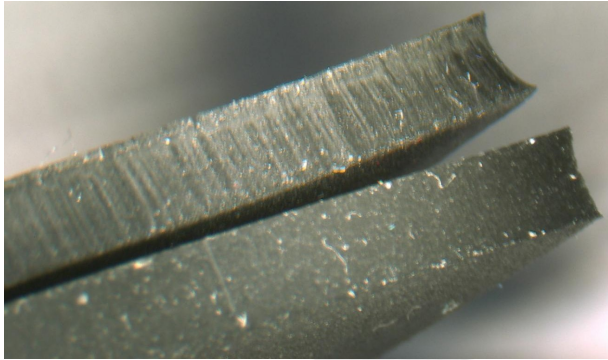


Abb. 11: Vergleich der Schnittflächen an einem S2-Stab: Der obere Schulterstab wurde mit einem klassischen Stanzwerkzeug gestanz, der untere mit einem Stanzmesser.

Dass mit einem Stanzmesser hergestellte Prüfstäbe höhere Festigkeits- und Reißdehnungswerte ergeben, konnte durch interne Versuche an verschiedenen EPDMs und einem TPE nachgewiesen werden, wie folgende Tabelle zeigt:

		Zugfestigkeit [N/mm ²]	Reißdehnung [%]
EPDM 1 Klassisches Stanzwerkzeug	Mittelwert	5,31	330
	Medianwert	5,38	323
	s	1,21	97
EPDM 1 Stanzmesser	Mittelwert	5,75	379
	Medianwert	5,89	403
	s	0,35	42
EPDM 2 Klassisches Stanzwerkzeug	Mittelwert	9,85	439
	Medianwert	10,42	489
	s	1,45	128
EPDM 2 Stanzmesser	Mittelwert	11,57	493
	Medianwert	11,82	524
	s	0,96	54
TPE (TPC-ET) Klassisches Stanzwerkzeug	Mittelwert	5,78	527
	Medianwert	5,98	552
	s	0,72	71
TPE (TPC-ET) Stanzmesser	Mittelwert	6,2	537
	Medianwert	6,06	527
	s	0,7	54

Tab. 5: Einfluss der Stanzmethode auf die Zugfestigkeiten und Reißdehnungen. Die Untersuchungen wurden an fünf S2-Stäben pro Material durchgeführt. (s = Standardabweichung)

5.2.2 Einfluss erhöhter Temperatur

Ab einer bestimmten Verformungsgeschwindigkeit findet im Probekörper eine starke innere Erwärmung statt. Dies wird in der Fachliteratur als „Gough-Joule-Effekt“ bezeichnet.³⁴ Die meisten Zugversuche sind thermodynamisch betrachtet adiabatische und nicht isotherme Vorgänge, da auf Grund der schlechten Wärmeleitfähigkeit von Elastomeren die entstehende Wärme nicht schnell genug abgeleitet werden kann.³⁵

Im Folgenden soll es aber nicht um diese Effekte gehen, sondern um die Aufheizung des Probekörpers, der Längenänderungsaufnehmer und der Spannbacken vor dem eigentlichen Zugversuch mit Hilfe einer Temperierkammer und nicht durch ihn.

Generell gilt, dass bei Elastomeren mit steigender Temperatur die Zugfestigkeit und Reißdehnung abnehmen. Bei hohen Temperaturen sinken die physischen Belastungsgrenzen eines elastomeren Werkstoffes, deswegen sind solche Versuche nicht nur wegen Alterungseffekten interessant, sondern sie geben auch Hinweise auf die wirklichen Belastungsgrenzen eines Werkstoffes im realen Einsatz, der meist unter erhöhter Temperatur stattfindet. Bei Compounds mit einem hohen Füllstoffanteil ist der Temperatureinfluss geringer.

Je nach Elastomerbasis gibt es Compounds, deren Festigkeit in der Wärme prozentual signifikant stärker abnimmt als bei anderen Mischungen. Wie bereits oben beschrieben erreichen die Festigkeitsanforderungen in den meisten Anwendungsfällen bei weitem nicht die tatsächlichen Festigkeitsgrenzen der Compounds. Jedoch beginnen die meisten Risse an Fehlstellen, so dass hier viel niedrigere Kräfte bzw. Verformungen genügen, um einen Dichtungsausfall auszulösen. Durch Prüfungen bei erhöhter Temperatur lässt sich nun besser einschätzen, wie stark dieses Risiko mit steigender Temperatur anwächst.

Folgende Tabelle 6 gibt einen Überblick, wie sich Zugfestigkeit und Reißdehnung mit zunehmender Härte und Temperatur verändern³⁶. Der starke Abfall beider Eigenschaften beginnt bereits bei nur leicht erhöhten Temperaturen; noch weit entfernt von den realen Einsatztemperaturen.

	Prüftemperatur	FKM 55 ShA	FKM 60 ShA	FKM 75 ShA
Zugfestigkeit [N/mm ²]	23°C	8,5	11,1	10,4
	70°C	3,0	4,6	5,4
	120°C	2,1	2,6	3,7
	150°C	1,8	2,2	3,3
Reißdehnung [%]	23°C	282	236	231
	70°C	170	143	140
	120°C	116	99	84
	150°C	90	81	72

Tab. 6: Einfluss der Temperatur und unterschiedlichen Härte auf Zugfestigkeit und Reißdehnung von bisphenolisch vernetzten FKM-Mischungen

³⁴ Bei Entspannung der gedehnten Probe findet eine Abkühlung statt.

Ebenso gibt es beim Gough-Joule-Effekt das Phänomen, dass sich eine belastete Gummiprobe bei Erwärmung zusammen zieht.

³⁵ vgl. ECKER, R.: Mechanische-technologische Prüfung von Kautschuk und Gummi in: BOSTRÖM, S (Hrsg.): Kautschuk-Handbuch, Band 5, Stuttgart, 1962, S. 114

³⁶ Die Ergebnisse stammen aus Versuchen, die bei den Freudenberg Forschungsdiensten (FFD), Weinheim im Auftrag der O-Ring Prüflabor Richter GmbH durchgeführt wurden.

5.2.3 Einfluss veränderter Verformungsgeschwindigkeit

In der ISO 37 ist die Prüfgeschwindigkeit – wie bereits oben beschrieben – auf 200 und 500 mm/min festgelegt.

Nach BROWN hat eine Abweichung von den in den Normen geforderten Prüfgeschwindigkeiten von $\pm 10\%$ in der Regel einen vernachlässigbaren Effekt auf die Zugfestigkeit. Es ist jedoch möglich, dass es bei TPE und tiefen Temperaturen eine höhere Empfindlichkeit gegenüber Veränderungen der Verformungsgeschwindigkeit gibt.³⁷

Bei manchen Anwendungen kommt es in der Realität aber zu viel höheren Belastungen. Am Beispiel des Bungeejumping wird dies deutlich: Bei einer Fallhöhe von 12m wird nach 2 Sekunden Flugzeit eine Geschwindigkeit von ca. 70 km/h erreicht, dies entspricht 19,4m/s, mit welchen dann das aus ca. 880-1400 Latexmonofilen bestehende Seil belastet wird.³⁸ Die Prüfgeschwindigkeiten in der ISO 37 betragen hingegen nur 0,0033 m/s (= 200mm/min) bzw. 0,0083 m/s (= 500mm/min). Eine bedeutende Untersuchung zum Einfluss der Verformungsgeschwindigkeit wurde von FROMANDI und Mitarbeitern erstellt³⁹. Es wurde ein Prüfgerät verwendet, das Deformationsgeschwindigkeiten von bis zu 20m/s erlaubte. Untersucht wurden Mischungen mit folgenden Basiselastomeren: NR, SBR, NBR, IIR und VMQ.

Generell lässt sich sagen, dass bei fast allen Elastomeren (außer CR), der Spannungswert σ_{300} , also die Spannung bei 300% Dehnung mit zunehmender Verformungsgeschwindigkeit anstieg. Die Reißfestigkeit stieg mit zunehmender Deformationsgeschwindigkeit an, außer bei Elastomeren, die bei bestimmten Verformungen zur Kristallisation neigen (z.B. Naturkautschuk und Polychlorbutadien). Sie erreichten ein Minimum bei ca. 10.000%Verformung / sek., um danach wieder anzusteigen.

Die Reißdehnung nahm mit zunehmender Geschwindigkeit in den meisten Fällen leicht ab, außer bei VMQ, der konstante Werte zeigte.

PRÜFLABOR

RICHTER

³⁷ vgl. BROWN, Roger: Physical Testing of Rubber, New York, 42006, S. 140

³⁸ vgl. <http://www.bungeesports.de/springer/faq1.htm> (abgerufen am 27.06.2014)

³⁹ vgl. ECKER, R.: Mechanische-technologische Prüfung von Kautschuk und Gummi in: BOSTRÖM, S (Hrsg.): Kautschuk-Handbuch, Band 5, Stuttgart, 1962, S. 115 ff.

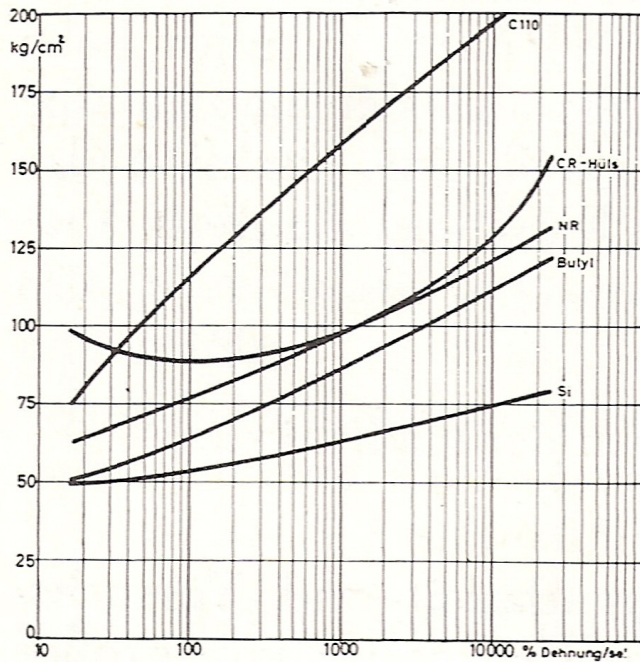


Abb. 12: Spannungswerte bei 300% Dehnung in Abhängigkeit der Verformungsgeschwindigkeit: Die Dehnung ist logarithmisch in Prozent/Sekunde auf der Abszisse aufgetragen.⁴⁰ Untersuchte Werkstoffe (von oben nach unten): C110 = NBR Perbunan C110, CR Hüls = Buna Hüls 150, NR, Butyl = IIR, Si = Silopren

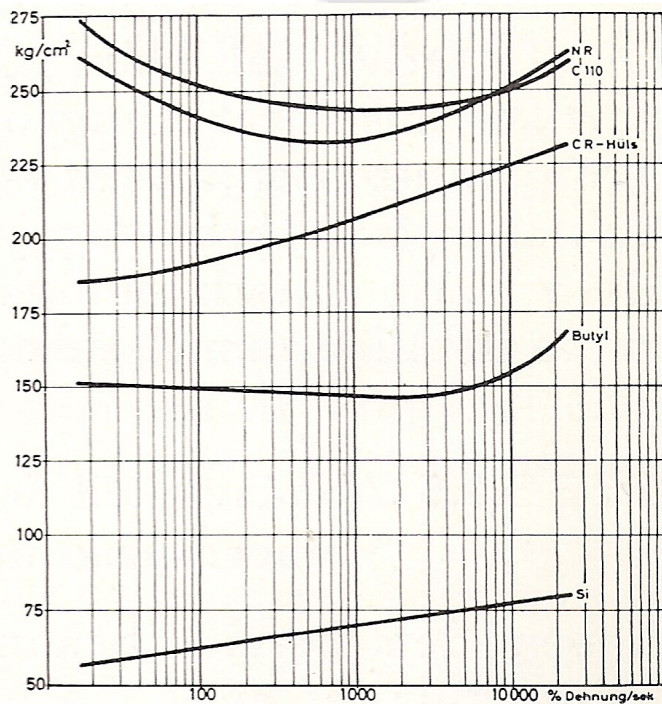


Abb. 13: Reißfestigkeit in Abhängigkeit der Verformungsgeschwindigkeit: Die Dehnung ist logarithmisch in Prozent/Sekunde auf der Abszisse aufgetragen.⁴¹ Untersuchte Werkstoffe (von oben nach unten): NR, C110 = NBR Perbunan C110, CR Hüls = Buna Hüls 150, Butyl = IIR, Si = Silopren

⁴⁰ Das Diagramm wurde entnommen von: ECKER, R.: Mechanische-technologische Prüfung von Kautschuk und Gummi in: BOSTRÖM, S (Hrsg.): Kautschuk-Handbuch, Band 5, Stuttgart, 1962, S. 117
Hinweis zum Umrechnen der alten Einheit: $10\text{kg/cm}^2 = 0,981\text{N/mm}^2 \approx 1\text{N/mm}^2$

⁴¹ Das Diagramm wurde entnommen von: ECKER, R.: Mechanische-technologische Prüfung von Kautschuk und Gummi in: BOSTRÖM, S (Hrsg.): Kautschuk-Handbuch, Band 5, Stuttgart, 1962, S. 117
Hinweis zum Umrechnen der alten Einheit: $10\text{kg/cm}^2 = 0,981\text{N/mm}^2 \approx 1\text{N/mm}^2$

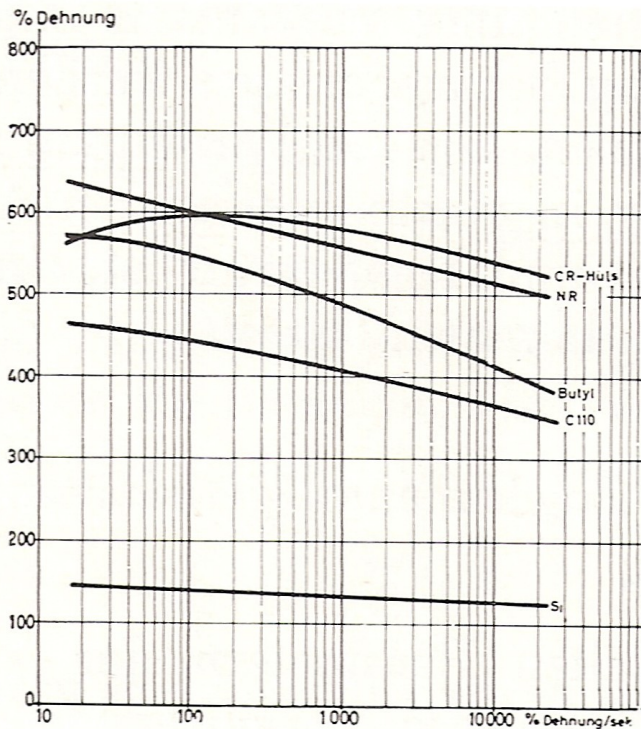


Abb. 14: Reißdehnung in Abhängigkeit der Verformungsgeschwindigkeit: Die Dehnung ist logarithmisch in Prozent/Sekunde auf der Abszisse aufgetragen.⁴² Untersuchte Werkstoffe (von oben nach unten): NR, C110 = NBR Perbunan C110, CR Hüls = Buna Hüls 150, Butyl = IIR, Si = Silopren

Natürlich muss hier die Frage gestellt werden nach der praktischen Relevanz dieser Eigenschaften. Und es ergeben sich solche Beanspruchungen sicherlich kaum bei Dichtungen. Bei hochfrequenter Beanspruchung von Dämpfern mag das schon anders sein.

5.2.4 Einfluss des Probekörperquerschnitts /-volumens

Bereits 1948 führten HIGUCHI⁴³ und Mitarbeiter Zugversuche an verschiedenen Elastomermischungen (NR, SBR u.a.) durch, um Erkenntnisse über den Einfluss verschiedener Probekörpervolumina bei gleichbleibender Mischung zu bekommen.

Sie ermittelten zwei mischungsabhängige Konstanten, so dass man vereinfacht, die Abhängigkeit der Zugfestigkeit vom Volumen wie folgt darstellen kann⁴⁴:

$$\sigma_{\max} = a - b * \ln V$$

σ_{\max} = Zugfestigkeit

a und b = materialabhängige Konstanten

V = Probekörpervolumen

Interessanterweise haben Probekörpervolumina kaum Einfluss auf Spannungswerte (früher

⁴² Das Diagramm wurde entnommen von: ECKER, R.: Mechanische-technologische Prüfung von Kautschuk und Gummi in: BOSTRÖM, S (Hrsg.): Kautschuk-Handbuch, Band 5, Stuttgart, 1962, S. 117

⁴³ HIGUCHI, Takeru; LEEPER, H.M.; DAVIS, D.S.: Determination of Tensile Strength of Natural Rubber and GR-S Effect of Specimen Size in: Analytical Chemistry, 20. Jahrgang, Nr.11, 1948, S.1029-1033

⁴⁴ 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

fälschlicherweise bezeichnet als Modulwerte) und die Reißdehnung.⁴⁵

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.“⁴⁶ 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.“⁴⁷ So ist es dann auch zu erklären, dass die reale Festigkeit von Elastomercompounds oft zwei bis drei Zehnerpotenzen unterhalb der molekularen Festigkeit liegt.⁴⁸

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.

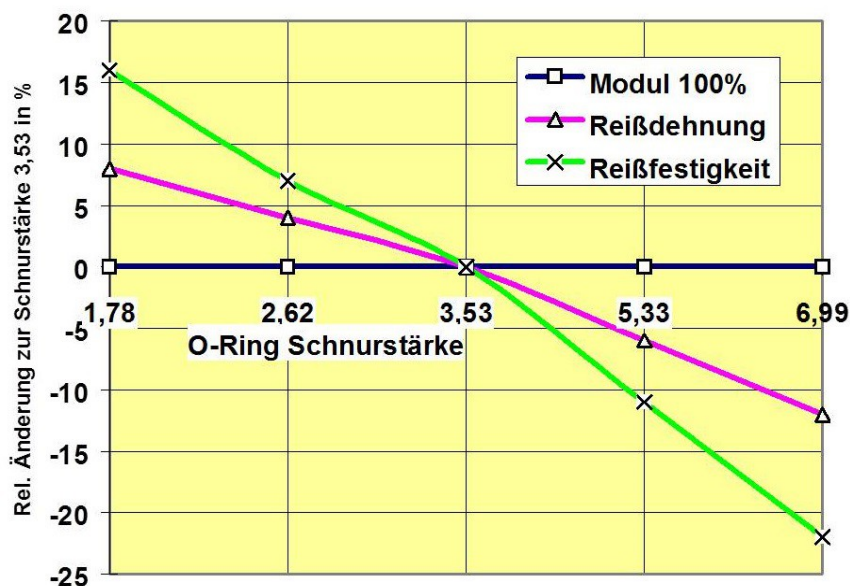


Abb. 15: Relative Änderung des Modul 100%-Wertes, der Reißdehnung und Reißfestigkeit in Abhängigkeit von der Schnurstärke von O-Ringen⁴⁹

Auf einer Vortragstagung der Deutschen Kautschuk Gesellschaft im Jahr 1960 in Berlin stellte

⁴⁵ HIGUCHI, Takeru; LEEPER, H.M.; DAVIS, D.S.: Determination of Tensile Strength of Natural Rubber and GR-S Effect of Specimen Size in: Analytical Chemistry; 20.Jahrgang, Nr.11, 1948, S.1030

⁴⁶ NAGDI, Khairi: Gummi-Werkstoffe Ein Ratgeber für Anwender, Ratingen, 2002, S. 290

⁴⁷ 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

⁴⁸ 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

⁴⁹ 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

Iman NAZENI⁵⁰ vom Indonesischen Kautschuk-Forschungsinstitut (BPPK in Bogor) eine interessante Untersuchung zum Einfluss der Dicke der Prüfstäbe auf das Ergebnis im Zugversuch vor:

Er ging von der Voraussetzung aus, dass für unterschiedlich dicke Prüfplatten jeweils das gleiche Fell von der Walze verwendet wird. Bei der Weiterverarbeitung dieses Fells und der Herstellung von dünnen Prüfplatten wird es an bestimmten Stellen mehr verpresst. Durch den höheren Druck können höchstwahrscheinlich Mikrorisse aus dem Herstellungsprozess auf der Walze verschlossen werden. Die Verteilung der Risse ist dann wahrscheinlich nicht mehr statistisch unregelmäßig, sondern in Abhängigkeit der Dicke der Prüflinge. Dies zeigt sich durch höhere Festigkeitswerte von dünnen Prüfstäben im Vergleich zu dickeren.

Außerdem konnte er nachweisen, dass „eine Verlängerung der Plastizierzeit und die Zugabe von Plastikatoren zum Kautschuk (...) die Dickenabhängigkeit der Zerreißfestigkeit [allerdings] nur bei ungefüllten Mischungen“⁵¹ beseitigt. Ferner konnte gezeigt werden, dass „die Vulkanisationsdauer (...) ohne Einfluss auf die Abhängigkeit der Zerreißfestigkeit von der Prüflingsdicke“⁵² ist.

„Durch die Verwendung einer Spezialform, bei welcher der Vulkanisationsdruck auf die Mischung direkt wirkte, konnte die Abhängigkeit der Zerreißfestigkeit von der Dicke der Prüflinge zum Verschwinden gebracht werden, wenn man zusätzlich den Vulkanisationsdruck standardisierte.“⁵³

5.2.5 Einfluss des Mischungsaufbaus

Insbesondere beim Einsatz von Rezepturen mit mineralischen, hydrophilen Füllstoffen ist bekannt, dass diese bereits nach kurzer Lagerzeit (wenige Tage) bei Raumtemperatur durch die Luftfeuchte einen deutlichen Abfall in der Festigkeit zeigen. Dies lässt sich über eine Trocknung der Proben (z.B. 4h/150°C) wieder rückgängig machen, was deshalb in manchen Prüfvorschriften vorgeschrieben ist. Allerdings werden diese Werkstoffe später meist unter normalen klimatischen Verhältnissen eingesetzt, darum lässt sich über den Sinn solcher Vorschriften sicherlich konträr diskutieren. An dieser Stelle soll lediglich darauf hingewiesen werden, dass sich daraus besonders an farbigen Mischungen erhebliche Ergebnisunterschiede erklären lassen, je nachdem, wie viel Zeit nach der Vulkanisation bzw. nach dem letzten Trocknen der Probe verstrichen ist.

⁵⁰ NAZENI, Iman: Einfluss der Dicke der Prüfvulkanisate auf die Messwerte der Zerreißfestigkeit beim Standard-Prüfverfahren nach ASTM, vorgestellt auf der Vortragstagung der Deutschen Kautschuk-Gesellschaft, Berlin, 1960 (Übersetzung: SCHOON, Th. G.F.)

⁵¹ Ebd., S.10

⁵² Ebd., S.10

⁵³ Ebd., S. 10 (Das Zitat wurde vom Präsens ins Präteritum gesetzt.)

5.2.6 Prüfung nach Vorbelastung: Mullins-Effekt

In der Regel werden fast alle Zugprüfungen an unbelasteten, maximal vorab gealterten Probekörpern vorgenommen, jedoch gilt in der Praxis eine Dichtung schon kurz nach ihrem Ersteinsatz als nicht mehr unbelastet. Und als vorbelastete Dichtung verbringt sie den Großteil ihrer Lebensdauer.

Die Vorbelastung von Elastomeren kann auf verschiedene Werkstoffparameter Einfluss haben, wie bspw. das Knicken einer Elastomerprobe, welches zu einer temporären lokalen Erweichung der Probe führen kann.

In unserem Fall der Zugprüfung geht es um den Einfluss von Dehnungen des Werkstoffes vor der eigentlichen Zugprüfung, also einer Vorbelastung des Werkstoffes. Wenn eine Elastomerprobe aus einer gefüllten Mischung vorab gedehnt wird, nimmt die Steifheit beim darauf folgenden Zugversuch ab. Dieses Phänomen wurde erstmals 1903 von Bouasse und Carrière⁵⁴ entdeckt und 1947 von MULLINS⁵⁵ ausführlich untersucht und beschrieben.

Ebenso kann der sogenannte „Mullins-Effekt“ auch bei Kautschuken, die zur Dehnungskristallisation neigen vorkommen. „Die Kristallite verhalten sich hier wie Füllstoffpartikel (Selbstverstärkung). Die reversiblen Konformationsänderungen des Netzwerkes ermöglichen eine Erholung vom spannungserweichten Zustand, der jedoch nur sehr langsam erfolgt.“⁵⁶

Am folgenden Diagramm⁵⁷ wird dieser Effekt deutlich sichtbar: Die Probe, welche vorab um 280% vorgedehnt wurde, zeigt im zweiten Zugversuch eine weniger steife Materialcharakteristik als die unbelastete Probe. Durch eine noch höhere Vorbelastung (420%) wird die Erweichung verstärkt. Interessant ist auch der Effekt, dass die vorbelastete Mischung in etwa in die Kurve der unbelasteten Mischung einmündet sobald der Grad der Vorbelastung überschritten wird (hier 280% bzw. 420%). Die Steifigkeit des Materials kann durch die Steigung der jeweiligen Spannungs-Dehnungskurven bestimmt werden. „Die Steigung der „erweichten“ Spannungs-Dehnungs-Kurven ist bei kleinen Dehnungen zunächst kleiner, dann aber größer als die Steigung der „jungfräulichen“ Kurve. Die Steifigkeit eines Körpers ist durch die Sekantensteifigkeit DF/Ds zwischen zwei Messpunkten gegeben. Daher ergibt sich je nachdem, ob man im steilen oder flachen Bereich der „erweichten“ Spannungs-Dehnungs-Kurve misst, eine höhere oder niedrigere Steifigkeit gegenüber der „jungfräulichen“ Kurve (Mullins Paradoxon).“⁵⁸

Wird nun die Dehnung mehrfach wiederholt und wird dabei die maximale Dehnung nicht überschritten, stabilisiert sich die Spannungsdehnungskurve und dieser Effekt ist relativ konstant.⁵⁹ Es kommt also nicht zu einer kontinuierlichen Verschlechterung.

RICHTER

⁵⁴ BÖL, M. Und REESE, S.: Simulation of filled polymer networks with reference to the Mullins effect in: AUSTRELL, P.-E. Und KARI, L.: Constitutive Models for Rubber IV, Taylor&Francis Group, London, 2005, S.168

⁵⁵ MULLINS, L.: Effect of stretching on the properties of rubber in: Journal of Rubber Research 16, 1947, S.275-289

⁵⁶ FREUDENBERG Forschungsdienste SE&Co. KG (Hrsg.), ohne Autorenangabe: MULLINS oder PAYNE? Zwei „starke Effekte der Gummielastizität“ in: FFD IM DIALOG, Ausgabe 2_2013, S.25 (Digital abgerufen am 09.07.2014: http://www.fnt-kg.de/pdf/FFDimDialog_2013_2.pdf)

⁵⁷ Das Diagramm wurde entnommen von: ECKER, R.: Mechanische-technologische Prüfung von Kautschuk und Gummi in: BOSTRÖM, S (Hrsg.): Kautschuk-Handbuch , Band 5, Stuttgart, Verlag Berliner Union, 1962, S. 118

⁵⁸ FREUDENBERG Forschungsdienste SE&Co. KG (Hrsg.), ohne Autorenangabe: MULLINS oder PAYNE? Zwei „starke Effekte der Gummielastizität“ in: FFD IM DIALOG, Ausgabe 2_2013, S.23f. (Digital abgerufen am 09.07.2014: http://www.fnt-kg.de/pdf/FFDimDialog_2013_2.pdf)

⁵⁹ vgl. PAIGE, Ryan E. und MARS, Will V.: Implications of the Mullins Effect on the Stiffness of a Pre-loaded Rubber Component vorgetragen bei: 2004 ABAQUS Users' Conference, S.2 (Webseite abgerufen am 09.07.2014: <http://www.axelproducts.com/downloads/PaigeMars.pdf>)

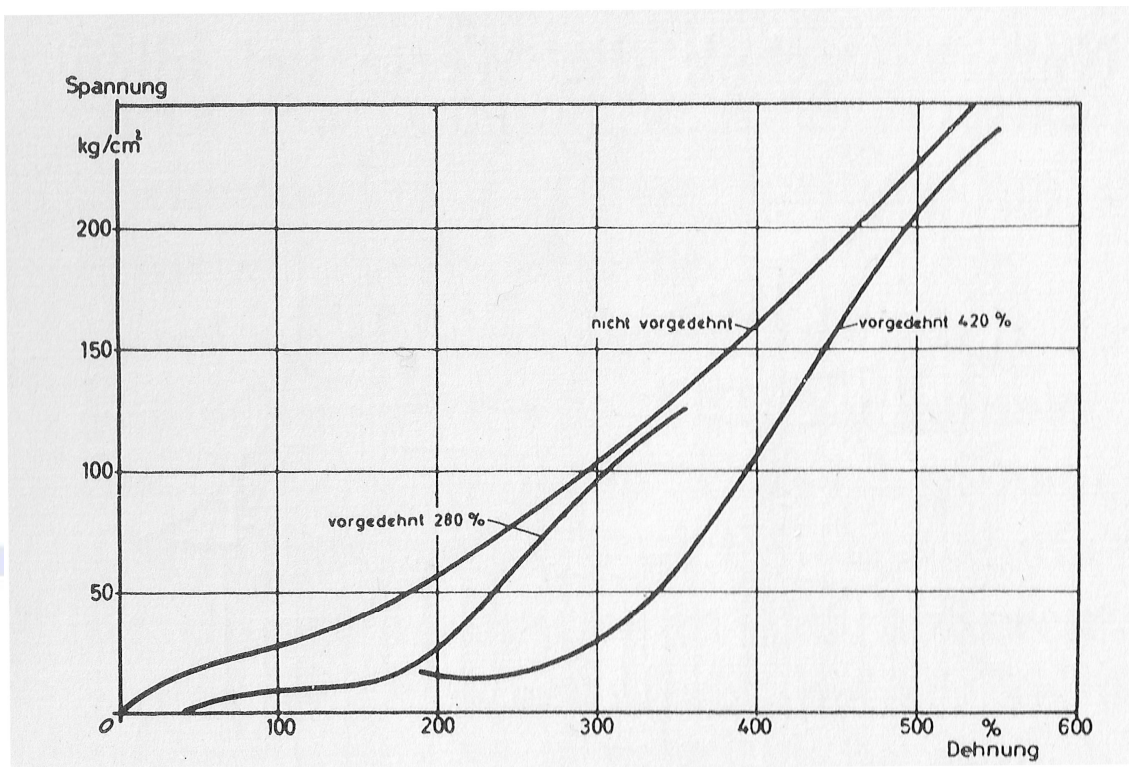


Abb. 16: Zugdehnungskurven von vorgedehnten und einer nicht vorgedehnten Probe am Beispiel einer Reifen-Laufflächenmischung aus Naturkautschuk (Mullins-Effekt)⁶⁰

Die Gründe, die zum Mullins-Effekt führen können sowohl reversible als auch irreversible Vorgänge sein. Die in der Zugprüfung aufgebrachte Kraft induziert folgende Veränderungen in der Polymer-Füllstoff- und Vernetzungsstruktur der Elastomermischungen:

- „Reißen von kurzen Netzbögen (irreversibel)
- Brechen mechanisch instabiler Vernetzungsstellen (irreversibel)
- Verschiebung von Knotenpunkten des Netzwerkes durch kurze, stark gespannte Netzbögen, die nicht reißen
- Gleiten von Verhakungen entlang der Kettenenden bzw. zwischen Vernetzungsstellen
- Diffusion von adsorbierten Polymermolekülen entlang der Rußoberfläche
- Desorption adsorbierter Kettenabschnitte von der Füllstoffoberfläche und Readsorption im spannungsarmen Zustand
- Zusammenbruch lokal vorhandener Agglomerate
- Verschiebung oder Orientierung von Füllstoffpartikeln in Verstreckrichtung⁶¹
- Abnahme der Werkstoffhärte

DICK⁶² beschreibt das Phänomen, dass oft durch Füllstoffe verstärkte Elastomermischungen, die vorgedehnt wurden und dann nach einer Ruhephase bis zum Zerreißen geprüft werden, höhere

⁶⁰ Das Diagramm wurde entnommen von: ECKER, R.: Mechanische-technologische Prüfung von Kautschuk und Gummi in: BOSTRÖM, S (Hrsg.): Kautschuk-Handbuch, Band 5, Stuttgart, 1962, S. 118

⁶¹ FREUDENBERG Forschungsdienste SE&Co. KG (Hrsg.), ohne Autorenangabe: MULLINS oder PAYNE? Zwei „starke Effekte der Gummielastizität“ in: FFD IM DIALOG, Ausgabe 2_2013, S.24 (Digital abgerufen am 09.07.2014: http://www.fnt-kg.de/pdf/FFDimDialog_2013_2.pdf)

⁶² DICK, John S.: Rubber Technology – Compounding and Testing for Performance, München, 2001, S.49

Modulwerte und Zugspannungen aufweisen als nicht vorbelastete Proben. Da in der Praxis häufig Spannungs-Dehnungs-Zyklen an Bauteilen auftreten, ist diese Eigenschaft mitunter von Vorteil.

In der Praxis ist die Kenntnis des Mullins-Effektes besonders wichtig bei der Konstruktion und Auslegung von dämpfenden Elementen, die unter einer ständigen Vorbelastung stehen, wie bspw. Motorlager. Durch die Vorbelastung kann über den Mullins-Effekt die Materialcharakteristik des elastomeren Bauteiles verändert werden.⁶³

Bei der Bestimmung der Federsteifigkeit von Fertigbauteilen wird empfohlen mehrere Belastungszyklen zu fahren, um reproduzierbar messen zu können. Diese Vorgeschichte muss selbstverständlich in der Prüfdokumentation vermerkt werden.⁶⁴

5.2.7 Übliche Genauigkeiten bei Zugversuchen

Gegen Ende der DIN 53504 befindet sich ein Kapitel, das sich mit der Präzision⁶⁵ des Verfahrens befasst. Im Jahr 1989 nahmen 17 Laboratorien an einem Ringversuch zum Zugversuch teil. Verglichen und ausgewertet wurden die Ergebnisse zur Reißfestigkeit, Reißdehnung und zum Spannungswert 100%.

Aussagen zu den untersuchten Werkstoffen gibt es keine, sie werden lediglich in drei Festigkeitsniveaus eingeteilt.

Man kann davon ausgehen, dass Ringversuche für eine DIN-Norm höchsten Anforderungen genügen, sowohl was die verwendeten Mischungen (bekannte Rezepturen, ideale Misch- und Produktionsbedingungen der Prüfplatten usw.) als auch die Laborseite (kalibrierte Prüfgeräte auf dem aktuellen Stand der Technik, geschultes und erfahrenes Personal) betrifft.

Es ist also nicht möglich die folgenden Ergebnisse generell als Maßstab für die Genauigkeiten von Zugversuchen heranzuziehen. Es ist leider davon auszugehen, dass diese Präzision bei Standardprüfungen mit Elastomeren aus einer klassischen Gummiproduktion nicht zu erreichen ist. Hinzu kommt noch, dass es Elastomere gibt, die auf Grund ihres Rezepturaufbaus bzw. Härteniveaus zu größeren Streubreiten neigen. Dieser Effekt wurde in der vorliegenden Untersuchung wohl bewusst ausgeklammert (keine Nennung des Basiselastomers bzw. Härte der untersuchten Mischungen).

RICHTER

⁶³ vgl. PAIGE, Ryan E. und MARS, Will V.: Implications of the Mullins Effect on the Stiffness of a Pre-loaded Rubber Component vorgetragen bei: 2004 ABAQUS Users' Conference, S.1f.

(Webseite abgerufen am 09.07.2014: <http://www.axelproducts.com/downloads/PaigeMars.pdf>)

⁶⁴ FREUDENBERG Forschungsdienste SE&Co. KG (Hrsg.), ohne Autorenangabe: MULLINS oder PAYNE? Zwei „starke Effekte der Gummielastizität“ in: FFD IM DIALOG, Ausgabe 2_2013, S.25 (Digital abgerufen am 09.07.2014: http://www.fnt-kg.de/pdf/FFDimDialog_2013_2.pdf)

⁶⁵ Dieser Begriff wird wie folgt definiert: „Die Präzision ist gemäß DIN ISO 5725 [1] definiert als „Ausmaß der gegenseitigen Annäherung zwischen unabhängigen Ermittlungsergebnissen, die unter festgelegten Bedingungen gewonnen sind“.“ zitiert von: Amtl. Sammlung § 35 LMBG Statistik Mai 2003 „Planung und statistische Auswertung von Ringversuchen zur Methodvalidierung“, Seite 2, Dokument abgerufen am 18.09.2014: http://www.beuth.de/sixcms_upload/media/2359/lmbg35_mai_2003.pdf

Festigkeitsklassen	Wiederholgrenze		Vergleichgrenze	
	r [N/mm ²]	r _{rel} [%]	r [N/mm ²]	r _{rel} [%]
Reißfestigkeit x [N/mm²]				
22,4	2,5	11,2	2,6	11,6
31,9	1,3	4,1	1,9	6,0
33,8	5,2	15,4	5,3	15,7
Reißdehnung x [%]	r [%]	r_{rel} [%]	r [%]	r_{rel} [%]
390	27,5	7,1	53,1	13,6
537	55,6	10,4	76,8	14,3
671	57,4	8,6	97,2	14,5
Spannungswert 100% x [N/mm²]	r [N/mm²]	r_{rel} [%]	r [N/mm²]	r_{rel} [%]
3,5	0,6	17,1	0,9	25,7
2,7	0,5	18,5	0,6	22,2
2,4	0,3	12,5	0,5	20,8

Tab.7: Wiederhol- und Vergleichgrenzen für drei verschiedene Festigkeitsniveaus von Elastomeren⁶⁶

Vereinfacht beschrieben gibt hier die Wiederholgrenze r an, zwischen welchen Grenzbereichen die Messwerte schwanken können, wenn ein und der derselbe Laborant an demselben Gerät mit identischem Prüfmaterial die Prüfung innerhalb einer Woche wiederholt.

Die Wiederholgrenze „r“ drückt die Schwankungen als Absolutwerte aus. Praktisch heißt das für den ersten Fall: Es wurde eine Reißfestigkeit von durchschnittlich 22,4N/mm² ermittelt. Die Wiederholgrenze „r“ beträgt 2,5N/mm². Wenn ein und derselbe Prüfer mit demselben Gerät an identischem Material misst, lagen in diesem Ringversuch seine Ergebnisse in einem Bereich von (22,4 – 2,5) N/mm² bis (22,4 + 2,5) N/mm². Der Wert „r_{rel}“ gibt diese Schwankungsbreite in Prozent, bezogen auf den Ausgangswert (hier: 22,4N/mm²) an.

Ebenso vereinfacht beschrieben gibt die Vergleichgrenze R hier an, zwischen welchen Grenzbereichen die Messwerte schwanken können, wenn zwei verschiedene Laboranten in verschiedenen Laboratorien mit identischem Prüfmaterial durchführen.

Die Vergleichsgrenze ist fast immer höher als die Wiederholgrenze.

Dass es gerade beim Zugversuch innerhalb verschiedener Laboratorien zu deutlichen Unterschieden kommen kann, zeigen Ergebnisse von Ringversuchen, an denen das O-Ring Prüflabor Richter regelmäßig teilnimmt. Dort traten teilweise Unterschiede in den Messergebnissen der Zugfestigkeit von +/-10% auf.

Typische Streuungen bei Zugversuchen liegen zwischen 2 und 10 % (Standardabweichung/ Mittelwert) und können noch als gummitypisch betrachtet werden. Die größten Streuungen erhält meist bei den Reißdehnungswerten, die geringsten Streuungen bei kleinen Modulwerten (z.B. 100%).

Harte Werkstoffe (>85 Shore A) weisen in der Regel deutlich schlechtere Ergebnisse als weichere (50-70 Shore A) auf. Liegen diese Streuungen über 15% ist es ein klarer Hinweis auf einen Herstellungsmängel der Proben.

⁶⁶ Die Daten entstammen der DIN 53504 (Ausgabe 2009-10): Prüfung von Kautschuk und Elastomeren – Bestimmung von Reißfestigkeit, Zugfestigkeit, Reißdehnung und Spannungswerten im Zugversuch, S.17