SUCCESS THROUGH KNOWLEDGE

OPR ELASTOLABS
OUR KNOW-HOW. YOUR SUCCESS.

FACHAUFSATZ

Artikelserie „Prüfverfahren praxisgerecht anwenden“

Maßprüfung von Gummiteilen –

Warum Elastomerteile deutlich größere Toleranzen brauchen als Metallteile

Erstveröffentlichung (Langversion): 04/2025

Abstract

Die Herangehensweise an die Maßprüfung von Gummiteilen ist in der betrieblichen Praxis oft ähnlich wie bei der Maßprüfung im Metallbereich, jedoch kann dies zu Problemen und Missverständnissen zwischen Produzenten und Anwendenden führen. Die besonderen Eigenschaften von Gummi, wie seine ausgeprägte Elastizität – die auch stark Temperatur abhängig ist – und seine organische Alterung, erfordern bei der Maßprüfung spezielle Messtechnik bzw. Lehren zur Fixierung der Elastomerbauteile. Hinzu kommt, dass die Herstellung von Gummiformteilen sehr komplex ist (z.B. Verarbeitungsschwindung, Spritzquellung bei der Extrusion u.v.m.), so dass Maßprüfende spezielles Gummi Werkstoffwissen benötigen, um Abweichungen verstehen und einordnen zu können.

Mechanical tests at low temperatures – Application oriented test methods for the practical use of elastomers

In practice, the approach to the dimensional inspection of rubber parts is often similar to the dimensional inspection of metal parts, but this can lead to problems and misunderstandings between manufacturers and users. The special properties of rubber, such as its pronounced elasticity – which is also strongly dependent on temperature – and its organic ageing, require special measuring technology or gauges for fixing the elastomer components during dimensional inspection. In addition, the production of molded rubber parts is very complex (e.g. molding shrinkage, die swell during extrusion, etc.), so that dimensional inspectors require special rubber material knowledge in order to understand and classify deviations.

1. Technisches Hintergrundwissen

Die Abmessungen und Toleranzen eines Elastomerbauteils werden normalweise in einer Konstruktionsabteilung festgelegt. Die maßliche Überprüfung der Gummibauteile erfolgt in QS-Abteilungen des Herstellers und Anwenders. Die meisten Konstruierenden haben ihre Kernkompetenz im Metallbereich, ebenso haben viele Mitarbeitende in der Qualitätssicherung erste Berufserfahrungen und -ausbildungen ebenso in der metallverarbeitenden Industrie gemacht. Deswegen werden „allzu oft (...) vom Kunden Toleranzen vorgeschrieben, die eher für Metalle geeignet sind. Diese sind in der Regel unnötig eng und erhöhen nur die direkten Kosten, die dann an den Kunden weitergegeben werden. (...) Die Zusammenarbeit mit dem Kunden und fachliche Weiterbildung sind in diesem Bereich von entscheidender Bedeutung.“[1]

So können sinnvolle und technisch machbare Toleranzbereiche festgelegt werden. In der metallverarbeitenden Industrie sind Toleranzen im Mikrometerbereich keine Seltenheit und durch CNC-gesteuertes Fräsen, Drehen oder Schleifen ist dies technisch problemlos realisierbar. Doch welche Abmessungen und Toleranzen sind bei Gummibauteilen überhaupt möglich und sinnvoll?

Autoren:

Dipl.-Ing.
Bernhard Richter,
Geschäftsführer, OPR Group GmbH
E-Mail:
bernhard.richter@oprgroup.de

Dipl.-Ing. (FH)
Ulrich Blobner,
Consultant, OPR Group GmbH

[1] FREAKLEY, Philip K.: Rubber Processing and Production Organization, Plenum Press, New York und London, 1985, S. 191

1.1 Unterschiede zwischen Gummi und Metallen

Warum ist das Messen von Gummibauteilen so anspruchsvoll? Gummi ist ein viskoelastisches Material, bei dem der elastische Anteil deutlich im Vordergrund steht. Durch die hohe Verformbarkeit und Rückstellfähigkeit ist es der ideale Dichtungswerkstoff, da er kleinere Unebenheiten an härteren Gegenstücken (z.B. Gehäusen) problemlos ausgleichen kann. Messtechnisch ist die Viskoelastizität jedoch schwer zu erfassen, da sie abhängig von der Temperatur, Zeit und der Verformungsgeschwindigkeit ist.

Metalle sind zwar auch verformbar, dafür sind aber um mehrere Potenzen höhere Kräfte notwendig als bei Gummi. Eine Rückverformung nach Entlastung findet praktisch nicht statt. Elastizität weisen sie nur in einem sehr engen Bereich auf. Außerdem haben sie eine deutlich höhere Temperaturbeständigkeit als Gummi. Da Metalle zur anorganischen Chemie gehören, weisen sie keine organische Alterung auf, jedoch sind manche Metalle korrosionsanfällig.

Ein wichtiger Einflussfaktor auf die Längenmessung an einer Dichtung ist die Steifigkeit des eingesetzten Elastomerwerkstoffes. Die ShoreA-Härte einer Dichtung gibt indirekt einen Anhaltspunkt für diese Steifigkeit.

1.2 Einflüsse der Elastomerverarbeitung auf die Abmessungen

„Die elastischen Charakteristika von Gummi schränken die möglichen Toleranzen in der Produktion ein. Elastomere können nicht so präzise gefertigt werden wie Metalle. Das erlauben die Eigenschaften des Werkstoffs nicht. In der Metallkonstruktion sind beispielsweise filigrane Geometrien möglich, die den Bruchteil eines Millimeters breit sind. Man denke nur an Messerklingen. Im Elastomerbereich dagegen ist mit viel Mühe eine Breite von 0,5 mm möglich. Darunter ist die Herstellung von Gummi nicht mehr prozesssicher darstellbar.“[2] Diese Grenze von ca. 0,5mm wird durch die Fließfähigkeit einer Mischung und Heißeinreißfestigkeit bei der Entformung bestimmt. Zu feine Bereiche in Kavitäten können nicht in einer akzeptablen Zykluszeit hergestellt werden, da die Mischung dafür erst sehr spät vulkanisieren dürfte, was die Zykluszeit und damit die Kosten in die Höhe treiben würde.

Eine weitere Besonderheit bei der Verarbeitung von Elastomeren ist die Schwindung[3] der Bauteile. Den größten Einfluss auf das Schwundmaß haben die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Gummi und Stahl. Der Wärmeausdehnungskoeffizient α_G von Gummi ist um den Faktor 10 bis 20 höher als der von Stahl.[4] [5] Das Schwundmaß kann theoretisch aus den Wärmeausdehnungskoeffizienten von Basiselastomer und Füllstoffen berechnet werden. Die Ergebnisse sind jedoch immer höher[6] als die in Versuchen an Testprobekörpern ermittelten Schwundmaße[7], welche bei der Formkonstruktion berücksichtigt werden. „Je nach Vulkanisationstemperatur, Art und Menge der Mischungsbestandteile kann das Schwundmaß bei Elastomeren zwischen 0,8 bis 2,5% und höher liegen.“[8]

Wesentliche Einflussfaktoren auf die Schwindung sind das Basiselastomer, die Vulkanisationstemperatur (**Abb. 1**) und der Füllungsgrad, aber auch der Füllstoffanteil (**Abb. 2**). „Da der Ausdehnungskoeffizient der Füllstoffe in der Größenordnung des Stahls liegt, beruht die Verminderung der Schrumpfung mit steigendem Füllstoffzusatz (...) in erster Linie auf der Verminderung des Kautschukanteils der Mischung.“[9] Bei komplexen Fertigteilen kommt noch das Problem hinzu, dass die Schwindung nicht gleichmäßig ist, sondern von der Fließorientierung bei der Herstellung abhängt.[10] Manchmal kann

---

[2] FRÖHNER, Andreas: Gummi & Metall in der Konstruktion – Unterschiede und Gemeinsamkeiten in: JÄGER Business Blog, Jäger Gummi und Kunststoff GmbH, Hannover, Internetpublikation: https://jaeger-gk.com/de/gummi-metall-in-der-konstruktion-unterschiede-und-gemeinsamkeiten/#:~:text=Gummi%20ist%20flexibel%2C%20Metall%20ist,flexibel%20an%20dynamische%20Kr%C3%A4fte%20anpassen. (zuletzt aufgerufen am 02.05.2024)

[3] NB: In der älteren Literatur wird manchmal der Begriff Schrumpf verwendet. Wir verwenden durchgängig den Begriff „Schwindung“ und halten uns an die Definition des Polymerservice Merseburg: „Im Gegensatz zur Schrumpfung ist der Prozess der Schwindung mit einer Volumenabnahme verbunden. Die Masse bleibt hingegen bei diesem Vorgang konstant.“ (Information zuletzt am 06.05.2024 digital abgerufen: https://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/Schwindung)

[4] Vgl. RÖTHEMEYER, Fritz und SOMMER, Franz: Kautschuktechnologie, Hanser Verlag, München, 2001, S.733

[5] NB: Diese großen Unterschiede beim Wärmeausdehnungskoeffizienten stellen auch ein Problem bei Gummi-Metall-Verbindungen dar. Dies kann bspw. durch flexiblere oder festere Klebeschichten überwunden werden.

[6] Vgl. KLEEMANN, Werner: Mischungen für die Elastverarbeitung, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1982, S.343

[7] NB: Im Kunststoffbereich ist dieses Verfahren genormt: DINE EN ISO 294-4: 2019-04 Kunststoffe – Spritzgießen von Probekörpern aus Thermoplasten – Teil 4: Bestimmung der Verarbeitungsschwindung Diese Norm kommt bei TPEs zum Einsatz, wie ein Beispiel aus der Praxis zeigt: https://www.kraiburg-tpe.com/de/schwindungswerte-gemaess-din-en-iso-294-4 (Webseite zuletzt aufgerufen am 06.05.2024)

[8] NAGDI, Khairi: Gummi-Werkstoffe Ein Ratgeber für Anwender, Dr. Gupta Verlag, Ratingen, ²2002, S.70

[9] KLEEMANN, Werner: Mischungen für die Elastverarbeitung, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1982, S.343

[10] Vgl. RÖTHEMEYER, Fritz und SOMMER, Franz: Kautschuktechnologie, Hanser Verlag, München, 2001, S.733

das Schrumpfmaß „auch von Los zu Los derselben Mischung [schwanken]. Teile aus einigen Typen von Silikonkautschuk, Fluorkautschuk und andere Kautschuk-Arten für spezielle Anwendungen ergeben größeren Schwund, deshalb sind die Toleranzklassen M 1 und M 2 (siehe 5.2 [in der DIN ISO 3302-1]) für diese Typen von Kautschuk schwer einzuhalten."[11]

Bei 2K-Bauteilen, wie z.B. Gummi-Metall oder Gummi-Kunststoff werden die Toleranzlage und -breite durch den nicht-elastomeren Bindungspartner beeinflusst.[12]

Je enger die geforderten Toleranzen für ein Elastomerbauteil sind, umso teurer werden die Herstellungskosten, da hochpräzise Produktionswerkzeuge mit einem erhöhten Wartungsaufwand benötigt werden. Auch die Art der Entformung aus dem Werkzeug kann Auswirkungen auf die Abmessungen eines Elastomerbauteiles haben.[13]

Für O-Ringe gibt es auch ein durch ASTM genormtes Verfahren, um die Schwindung zu überprüfen, den sogenannten „O-Ring Mold Shrinkage Test"[14], der im Unterkapitel zur ASTM D 1414 im Bereich Normen näher erläutert wird.

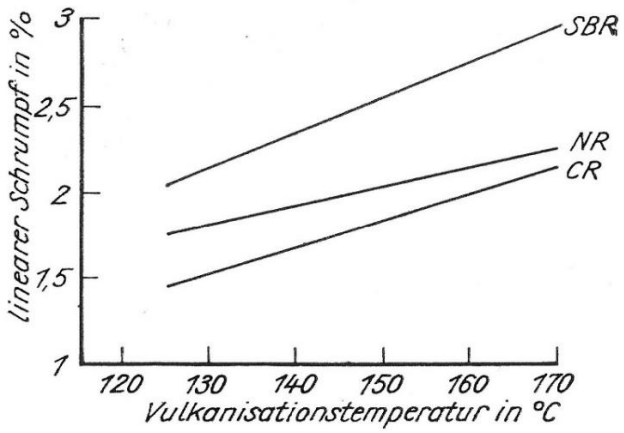

Abb. 1: Schwindungen verschiedener Elastomermischungen mit 20phr Ruß in Abhängigkeit von der Vulkanisationstemperatur[15]

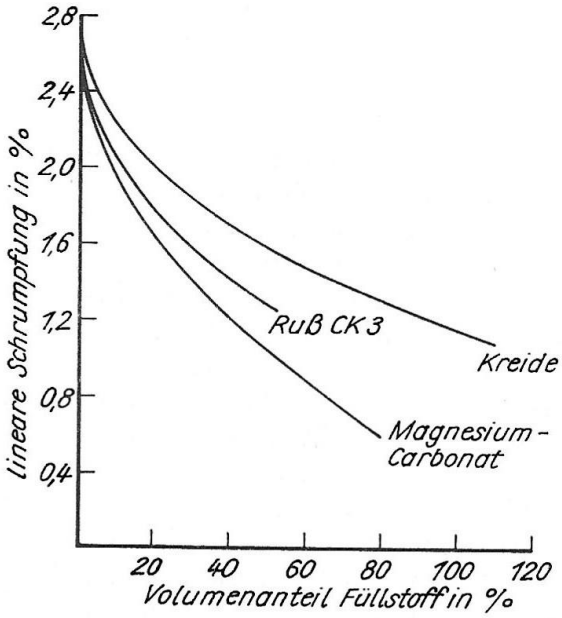

Abb. 2: Schwindungen in Abhängigkeit von verschiedenen Füllstoffgehalten bei einer NR-Mischung welche bei 143°C vulkanisiert wird[16]

Verschieben sich bei lange vom selben Hersteller bezogenen Bauteilen plötzlich die Maße inkl. der Toleranzlage, kann dies neben vielen anderen Ursachen ein Indiz für eine Änderung der Vulkanisationstemperatur (z.B. aus Kostengründen) und/ oder der Mischung sein, in selteneren Fällen für ein neues Werkzeug mit anderen Schwundmaßen.

Der Einfluss des Volumenschwunds auf Grund des Vulkanisationsvorganges spielt eine untergeordnete Rolle.[17] Sie wird in der Literatur (bei Duromeren) manchmal auch als chemische Schwindung bezeichnet, im Gegensatz zur thermischen Schwindung, welche mit den unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten zu tun hat. Die chemische Schwindung „resultiert [bei Duromeren] maßgeblich aus der Volumenkontraktion während der Bildung von kovalenten Bindungen bei der Aushärtungsreaktion gegenüber Van-der-Waals-Kräften bei den monomeren Ausgangskomponenten"[18] Ein ähnlicher Effekt ist bei Elastomeren anzunehmen, jedoch in deutlich geringerem Umfang, da Elastomere – im Gegensatz zu den engmaschig vernetzten

[11] DIN ISO 3302-1: Gummi – Toleranzen für Fertigteile – Teil 1: Maßtoleranzen (ISO 3302-1:2014), Juni 2018, S. 8, Kap. 5.1
[12] Ebd., S. 8, Kap. 5.1
[13] Ebd., S. 8, Kap. 5.1
[14] ASTM D1414 – 22: Standard Test Methods for Rubber O-Rings, approved Oct. 1, 2022, S. 22f., Kap. 25
[15] KLEEMANN, Werner: Mischungen für die Elastverarbeitung, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1982, S.343, Bild 23.4
[16] Ebd., S.344, Bild 23.5
[17] Vgl. BEATTY, J.R.: Effect of Composition on Shrinkage of Mold Cured Elastomeric Compounds. In:*Rubber Chemistry and Technology*, Heft5, November 1978; 51.Jg., S.1044–1059, Abstract, digital verfügbar (zuletzt abgerufen am 06.05.24: https://doi.org/10.5254/1.3535770)
[18] Vgl. WAGNER, Philipp Nicolas: Prozessnahe Schwindungsanalyse mehrkomponentiger duroplastischer Kunststoffe für die Anwendung in Flüssigimprägnierverfahren, Dissertation RWTH Aachen, 2020, S.14 Dissertation digital verfügbar, zuletzt abgerufen am 06.05.2024: https://publications.rwth-aachen.de/record/811550/files/811550.pdf

Duromeren – nur weitmaschig vernetzt sind. „Hauptsächlich durch das Vernetzungssystem bedingt, kann die Vernetzungskontraktion bei Systemen auf Peroxidbasis typischerweise 0,8-1,0 % betragen, während Schwefelvernetzungssysteme typischerweise 0,1-0,3 % betragen, aber es ist nach wie vor der Fall, dass bestimmte Mischungen und bestimmte Polymere außerhalb dieser Richtlinien liegen. Bei Teilen mit engen Toleranzen kann jedoch selbst etwas so scheinbar Geringfügiges wie eine Änderung des Vernetzungssystems die endgültige Größe des Teils beeinflussen."[19]

Neben der Verarbeitungsschwindung gibt es auch eine Nachschwindung. Diese entsteht beispielsweise beim Tempern, wenn flüchtige Mischungsbestandteile ausgasen.

Die Schwindung wird inzwischen auch numerisch simuliert, um so die Fertigteilqualität noch mehr zu verbessern.[20]

Bei extrudierten Profilen tritt das Problem der Spritzquellung auf. Es handelt sich dabei um eine Aufweitung des Extrusionsstranges, es ist eine elastische Rückdeformation auf Grund des Memory Effektes. Aus diesem Grund sind die Abmessungen des Extrusionswerkzeuges nie mit den Abmessungen des Extrudats identisch und „erfordern bei der Herstellung größere Grenzabmaße als formgepresste Teile."[21] Der elastische Anteil der Mischung versucht stückweise wieder in die ursprüngliche Struktur vor der Einengung durch das Extrusionswerkzeug zu kommen. Die Spritzquellung wird durch zahlreiche Faktoren beeinflusst, wie z.B. Spritzdruck, Düsenlänge, Schneckendrehzahl, Mischungsaufbau u.v.m.[22] Vorabinformationen über die Strangaufweitung einer Mischung kann man mit Hilfe eines Hochdruck Kapillarrheometers bekommen. In der Praxis erfolgt aber die Feinabstimmung eines Extrusionswerkzeuges auf eine bestimmte Mischung meist durch mehrere Versuchsschleifen. Um engere Toleranzen bei der Extrusion zu erreichen, kann man entweder Unterstützungen, wie z.B. einen Dorn, verwenden oder die Extrudate in einem Nachbearbeitungsschritt schleifen. Eine Besonderheit bei der Extrusion oder dem Kalandrieren ist, dass in einigen Fällen Dicken bzw. bestimmte Abmessungen bereits inline und zerstörungsfrei während der Produktion erfasst werden. Früher wurden Dicken berührungsfrei mit Beta-Radioisotopen ermittelt.[23] Indirekt wurden und werden auch aktuell noch die Abmessungen teilweise durch ein inline-Gewichtskontrolle überprüft.[24] Durch moderne Sensorik bieten sich heutzutage vielfältige Möglichkeiten der Dickenmessung. Auf Grund der rasanten Entwicklung sei auf die Webseiten der entsprechenden Hersteller verwiesen.[25]

Weitere Abweichungen in den Abmessungen einer Dichtung kann es durch Verformungen geben, welche bei der (zu frühen) Entnahme aus dem Produktionswerkzeug oder bei der Nachbearbeitung (Tempern) entstehen können. Werden z.B. O-Ringe nicht in einem sich kontinuierlich drehenden Temperofen, sondern übereinander geschichtet auf einem Blech getempert, kommt es zu Verformungen. Diese verformten Geometrien prägen sich durch die Nachvernetzung zu einem großen Teil irreversibel ein. Die Verformungen können so stark sein, dass die Gummibauteile nicht planparallel aufliegen und deswegen auch nicht exakt in ihrer Höhe gemessen werden können bzw. das Messinstrument würde einen so hohen Anpressdruck benötigen, dass es schon zu einer Verformung nicht nur der gesamten verformten Dichtung, sondern auch des Dichtungsquerschnittes an sich kommen könnte.

Die meisten Elastomerformteile weisen im Bereich der Trennebene des Produktionswerkzeuges einen mehr oder weniger stark ausgeprägten Grat auf. Dieser kann durch Gleitschleifen (Trovalisieren), manuelles Abschleifen (bei großen Dichtungen), Sandstrahlen oder kryogene Verfahren entfernt werden, im einfachsten Fall durch Auszupfen aus dem Fell. Je nach Verfahren kann

[19] MARTIN'S RUBBER COMPANY: Rubber Shrinkage – what is it and why?, 20.01.2014, Internetinformation (zuletzt abgerufen am 06.05.2024): https://www.martins-rubber.co.uk/blog/rubber-shrinkage-what-is-it-and-why/

[20] Vgl. ZHANG, Zhaoxiang et al.: Effect of vulcanization on deformation behavior of rubber seals: Thermal – mechanical – chemical coupling model, numerical studies, and experimental validation in: Materials & Design, Volume 224, December 2022,111314, Artikel im open access digital verfügbar (zuletzt aufgerufen am 06.05.2024): https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111314

[21] DIN ISO 3302-1: Gummi – Toleranzen für Fertigteile – Teil 1: Maßtoleranzen (ISO 3302-1:2014), Juni 2018, S. 12, Kap. 6.1

[22] Vgl. SCHNETGER, Jochen: Lexikon Kautschuktechnik, Hüthig-Verlag, Heidelberg, ³2004, S.493f., Stichwort „Spritzquellung"

[23] Z.B. MeSys GmbH: Eine Ära geht zu Ende Das Ende von Beta-Radioisotopen in der Inline - Flächengewicht- und Dickenmessung , Internetinformation vom 14.10.2013, digital abrufbar (zuletzt abgerufen am 16.09.2024): https://www.k-online.de/de/Media_News/News/Archiv_Unternehmens-News/Eine_%C3%84ra_geht_zu_Ende_Das_Ende_von_Beta-Radioisotopen_in_der_Inline_-_Fl%C3%A4chengewicht-_und_Dickenmessung

[24] Vgl. FREAKLEY, Philip K.: Rubber Processing and Production Organization, Plenum Press, New York und London, 1985, S. 229

[25] Z.B. Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG, Ortenburg: Internetinformation (Webseite zuletzt aufgerufen am 16.09.2024): https://www.micro-epsilon.de/wiki/dickenmessung/

entweder die Dichtung gesamt oder nur im Bereich des Grates übermäßig an Volumen verlieren und so nicht mehr den Maßvorgaben entsprechen.
Manche Elastomere (z.B. Polyester-Polyurethan, AU-PUR) neigen zur Wasseraufnahme. Gerade bei solchen Bauteilen ist vor einer Messung darauf zu achten, dass die Dichtungen kontinuierlich in trockener Umgebung gelagert wurden, um keine Fehlmessungen durch zu hohe Feuchteaufnahme des Polymers zu bekommen. Evtl. ist eine vorab genau definierte Trocknung sinnvoll, um immer vergleichbare Prüfbedingungen zu haben.
Werden Messungen bei Standardlabortemperaturen durchgeführt, gibt es keine Fehler durch eine zu starke Wärmeausdehnung.

1.3 Einflüsse der Einsatzbedingungen auf die Abmessungen

Beim Vermessen von Elastomerbauteilen denkt man meist an die Qualitätskontrolle produktionsfrischer Bauteile. Doch auch in der Schadensanalyse und der Werkstoffprüfung werden Fertigteile und Normprobekörper nach einem Ausfall oder einer Alterungsprüfung bzgl. ihrer Dimensionen vermessen. Durch Quellung, Extraktion von Weichmachern, Änderungen im Molekulargewicht oder Wassergehalt, können sich die Abmessungen von polymeren Bauteilen ändern. Außerdem ist der thermische Ausdehnungskoeffizient von Polymeren ober- und unterhalb des Glasübergangs stark unterschiedlich.[26]
Kommt es nur zu einer Erwärmung oder Abkühlung eines Polymers und zu keiner Veränderung der Polymerstruktur bzw. -netzwerkes, erfährt das Polymer „eine Ausdehnung oder Kontraktion, die im Allgemeinen proportional zur Temperaturänderung ist. Die Änderung der Abmessungen kann vollständig reversibel sein, wie bei amorphen Polymeren, oder nur teilweise reversibel wie bei einem kristallisierbaren Polymer, wenn sich die Kristallinität während des Erhitzungsprozesses ändert."[27]
Die Ermittlung von Wärmeausdehnungskoeffizienten erfordert hochgenaue Prüfgeräte, welche auch kleinste Längenänderungen reproduzierbar erfassen können. Meist werden dafür Dilatometer[28] oder TMA (Thermomechanische Analyse)-Geräte[29] eingesetzt.

1.4 Wo und warum werden Elastomerbauteile vermessen?

Längenmessungen an Elastomeren finden sich v.a. in den folgenden drei Bereichen:

- Produktion (oft auch als zerstörungsfreie inline Messungen z.B. bei der Extrusion)
- Qualitätssicherung (Warenausgang beim Hersteller und Wareneingang beim Anwender): Hierbei kann nach ASTM D 3767 noch unterschieden werden zwischen Messungen „zur Feststellung der Konformität mit den Anforderungen der Spezifikation an die geometrischen Eigenschaften ganzer Einheiten, wie die Größe von Gummihandschuhen oder der Durchmesser und Umfang von Gummischläuchen [und Messungen] (...) zur Feststellung der Übereinstimmung mit den Anforderungen der Spezifikation an bestimmte Funktionsteile von Einheiten, wie z. B. die Dicke der Sohlen von Stiefeln."[30]
- Werkstoffprüfungen im Labor (Längen-/Höhenänderungen nach Einlagerungen, z.B. DVR)

In den ersten beiden Bereichen werden Fertigteile vermessen und es werden oft Techniken und Erfahrungen angewandt, welche aus der Längenmesstechnik in metallverarbeitenden Bereichen stammen. Im Laborumfeld, wo Normprobekörper vermessen werden, kann man davon ausgehen, dass ausreichend elastomerspezifisches Fachwissen vorhanden ist. In den entsprechenden Normen gibt es mitunter noch genaue Hin-/Verweise, wie bspw. ein Probekörper vor und nach einer Medieneinlagerung oder dem Druckverformungsrest vermessen werden muss.

1.5 Messmethoden und übliche Messmittel

Das Prüfen von Bauteilen kann in die zwei Kategorien subjektives und objektives Prüfen unterteilt werden. Während das subjektive Prüfen v.a. für die Erkennung von Herstellungsfehlern wichtig ist, ist die Maßprüfung ganz dem objektiven Prüfen zuzuordnen. Die objektive Maßprüfung erfolgt entweder mit einem Messmittel (Vergleich einer Dimension, z.B. mm, mit einem Messmittel) oder mit Lehren (nur binäre Auswahlmöglichkeit: i.O. / n.i.O.). Die Maße von O-Ringen oder anderen einfachen Dichtungen können in der Regel zerstörungsfrei geprüft werden. Nur bei komplexen Dichtungsgeome-

[26] Vgl.ROTH, P.I. und MAHMOODI, P.: Special Tests for Temperature Effects on Physical Properties and Dimensions in: SCHMITZ, John V.: Testing of Polymers, Vol. 3, Interscience Publishers, New York, 1967, S. 82f.
[27] Ebd., S. 81
[28] Z.B. Informationen zum Dilatometer der Fa. Waters TM TA Instruments (Webseite zuletzt aufgerufen am 12.09.2024): https://www.tainstruments.com/produkte/dilatometers/?lang=de
[29] Z.B Prospekt der Fa. Netzsch zur TMA 402 F1/F3 Hyperion (Webseite zuletzt aufgerufen am 12.09.2024): https://analyzing-testing.netzsch.com/_Resources/Persistent/0/c/5/4/0c54c26fbc00a87ba7323ed76f48314239bcc319/TMA_402_F1_F3_Hyperion_de_web.pdf
[30] ASTM D3767 – 03 (Reapproved 2020): Standard Practice for Rubber – Measurement of Dimensions, S. 1, Kap. 4

trien oder extrudierten Profilen kann es notwendig sein diese zu zerschneiden, um bestimmte Bereiche zu vermessen, welche mit Standardmessmitteln nicht erreicht werden können.

1.5.1 Berührungsaktive Messmethoden

Das klassische Prüfgerät aus dem Metallbereich, die Schieblehre oder der Messschieber, kann lt. einschlägiger Normen auch für Gummi (z.B. ISO 23529 oder ISO 3601-1) eingesetzt werden. Es ist aber mit Vorsicht zu genießen, da der Anpressdruck nicht klar definiert ist, sondern bei jedem der Prüfenden unterschiedlich sein kann. In der Praxis kommt die Schieblehre dennoch zum Einsatz. Wenn sie nur für eine Vorabeinschätzung verwendet wird, ist nichts dagegen einzuwenden.

Besser geeignet sind Mikrometer- oder (Bügel-)Messschrauben, da sie über eine Gefühlsratsche verfügen, welche einen reproduzierbaren konstanten Anpressdruck ermöglicht. Jedoch muss dieser Anpressdruck relativ niedrig sein, um den O-Ring nicht zu verformen.

Relativ häufig sind in der QS Messuhren (**Abb. 3**) mit geringer Auflagekraft (z.B. 0,4 N) anzutreffen, mit welchen bspw. die Schnurstärken von O-Ringen vermessen werden können.

Bei komplexen Dichtungsgeometrien können i.O./n.i.O.-Lehren ein praktisches Hilfsmittel bei der Qualitätskontrolle sein. Es werden dazu Negativformen mit den min/max-Toleranzen mittels 3D-Drucker hergestellt. Eine zeichnungskonforme Dichtung sollte nun problemlos in die Nut „hineinfallen" können ohne gedehnt oder gestaucht werden zu müssen.[31]

Um bei O-Ringen den Innendurchmesser zu bestimmen, werden häufig Stufenkegel[32] angewandt, welche eine Sonderform einer Lehre darstellen. Es handelt sich hierbei um eine Vergleichsmessung. Der O-Ring wird auf den Stufenkegel gelegt und der Innendurchmesser wird bei der Stufe abgelesen, auf welche der O-Ring gerade noch ohne Aufdehnung passt.

Große O-Ringe können bis zu mehrere Meter Innendurchmesser haben. In solchen Fällen wird mit einem Maßband der innere Umfang gemessen und dann auf den Innendurchmesser umgerechnet.

Abb. 3: Höhenmessung mit einer digitalen Messuhr im Rahmen einer Druckverformungsrestprüfung (Bild: OPR Group GmbH)

Alternativ können große metallische halbrunde Scheiben, die annähernd reibungsfrei zueinander verschoben werden, über den Radius und den Abstand der Halbscheiben präzise und gut reproduzierbare Ergebnisse liefern. Idealerweise weisen die Halbscheiben halbrunde Nuten für eine sichere Positionierung des O-Rings auf.

Auf dem Markt sind auch spezielle Prüfmaschinen für große O-Ringe verfügbar, welche den O-Ring in einer Vorrichtung abrollen, eine Sichtprüfung der Oberfläche durchführen und ihn dabei vermessen.[33] Diese Verfahren sind deutlich besser reproduzierbar als die Vermessung von Hand, allerdings tritt hier auch ein Schlupf auf, was über Referenzproben ermittelt werden sollte.

Komplexe Dichtungsgeometrien können auch mit einer Multisensor-Koordinatenmessmaschine vermessen werden. Bei diesen Geräten können verschiedene Sensoren (neben klassischen taktilen z.B. auch optische

[31] Vgl. Apple Rubber: How To Measure Complex Rubber Shapes with a Go/No Go Gauge, Internetinformation April 17, 2017 (Webseite zuletzt aufgerufen am 17.04.2025): https://www.applerubber.com/hot-topics-for-engineers/how-to-measure-complex-rubber-shapes-with-a-gono-go-gauge/

[32] Z.B. O-Ring Messtürme der Fa. Hänssler Kunststoff- und Dichtungstechnik, Mannheim, online Information verfügbar (zuletzt aufgerufen am 17.04.2025): https://www.dicht.de/de/dichtungstechnik/o-ring-messtuerme/

[33] Z.B. LoringX von UTP Vision, online Information verfügbar (zuletzt aufgerufen am 17.04.2025): https://utpvision.com/en/products/loringx-semi-automatic-visual-inspection-machine-large-o-rings/

oder elektrische) ausgewählt werden und so in den Messzyklus und das Positioniersystem des Koordinatenmessgerätes integriert werden. „Beispielsweise können elastische Gummiprofile mit geringer Messunsicherheit optisch gemessen werden, während bei einer taktilen Messung die Verformung des Werkstücks das Messergebnis verfälschen würde."[34]
Die Längenmessung von Dichtungen aus Schaum- bzw. Moosgummi stellt ein besonderes Problem dar, da diese noch deutlich weicher und verformbarer als massive Elastomerbauteile sein können.
Misst man manuell die Höhe einer Dichtung, welche im zu messenden Bereich konvex gekrümmt ist, wie z.B. ein O-Ring, so muss darauf geachtet werden den höchsten Punkt zu treffen. Deswegen sollten solche Dichtungen nicht mit einer Kugel, sondern mit einem Scheibentaster gemessen werden.
Sind Dichtungen durch die Vulkanisation stark verformt, so dass sie nicht plan aufliegen und kann diese Welligkeit toleriert werden, dann kann die Höhe der Dichtung so bestimmt werden, dass ebene Bereiche aus der Dichtung herausgeschnitten werden. Durch die plane Auflage ist eine berührungsaktive Messung problemlos möglich, allerdings auf Kosten einer zerstörten Dichtung.
Schließlich können dünne Dichtlippen bei einer berührungsaktiven Messung verformt werden. In einmaligen Sonderfällen können filigrane Geometrien auch mit einem Mikroindentor vermessen werden, wie z.B. den LNP® nano touch. Mit diesem Gerät sind Tastkräfte von 1,4 N bis 0,6mN einstellbar. Allerdings lassen sich geometrische Größen nur bis 4mm messen, dafür aber mit Nanometer-Auflösung.[35] Diese Art der Anwendung ist aber ein „Off-Label-Use" für diese Prüfgerät, das eigentlich für tiefergehende Werkstoffanalytik gebaut ist. Auch wenn der LNP® nano touch in der Praxis in der Längenmessung keine Rolle spielt, wurde er erwähnt, da er auf Grund seiner minimalen Tastkräfte eine Art Verbindungsstellung zwischen berührungsaktiver und berührungsloser Messung einnimmt.

1.5.2 Berührungslose Messmethoden[36]

Profilprojektoren sind optische Messgeräte, welche Umrisse eines Gegenstandes in einem bestimmten Maßstab vergrößern. Dadurch können die Abmessungen einer Dichtung relativ exakt und berührungslos bestimmt werden. Jedoch eignen sich Profilprojektoren nur für bestimmte Dichtungsgeometrien, die keine Hinterschneidungen aufweisen. Profilprojektoren werden in der Qualitätssicherung von Dichtungen immer seltener eingesetzt.
Der Vorteil eines ***Laser Scan Mikrometers*** (**Abb. 4**) liegt in der hohen Genauigkeit, es ist einfach zu bedienen und relativ preisgünstig im Vergleich zu anderen berührungslosen Messgeräten. Moderne Geräte erreichen Wiederholpräzisionen von bis zu ±0,03µm.[37] In der Qualitätsicherung wird es überwiegend zur Messung von Schurdurchmessern oder axialenSchnurstärken von O-Ring-Abschnitten eingesetzt, welche zur Messung des Druckverformungsrestes vor und nach der Verformung und Temperaturbeanspruchung ermittelt werden muss. Die Ergebnisse können einfach in eine Excel-Datei oder in ein Labordatenprogramm eingelesen und dokumentiert bzw. gespeichert und ausgewertet werden. Im Vergleich zu Messungen mit Messtastern ist das Messergebnis unabhängig von Einflüssen durch die Auflagekraft, durch den Durchmesser des Messtellers und der Person des Prüfers, zudem sind die Möglichkeiten, Fehler zu machen, erheblich geringer. Der Nachteil eines Laser-Scan-Micrometers liegt darin, dass, bedingt durch das Messprinzip (es wird ja nur der Schatten des Messobjektes gemessen) an ganzen O-Ringen oder an planen Flächen die Abweichung von der idealen Planheit mitgemessen wird. Durch die Vermessung von kleineren Dichtungsabschnitten wird aber dieser negative Einflussfaktor stark reduziert.

[34] WEIDEMEYER, Bernd (Werth Messtechnik GmbH): Taktil und optisch messen – Welcher Sensor sich für welches Werkstück eignet in: QZ Qualität und Zuverlässigkeit, Jg. 61 (2016) 12, Hanser Verlag, München (Artikel online verfügbar, zuletzt aufgerufen am 17.04.2025: https://www.werth.de/fileadmin/import/data/Bilder/ueberwerth/Veroeffentlichungen/Praxistipps/Veroeffentlichungen_Praxistipps_Taktil-und-optisch-messen.pdf)

[35] Vgl. LNP Ludwig Nano Präzision GmbH: LNP® nano touch Mikroindentor zur Analyse von Kunststoff- und Elastomerkenngrößen, Hauptprospekt, März 2018, S. 4 (online verfügbar, zuletzt aufgerufen am 29.08.2024: https://lnp-systems.com/wp-content/uploads/2018/07/Hauptprospekt-LNP-nano-touch-032018.pdf)

[36] Für dieses Unterkapitel wurden Passagen aus folgender Veröffentlichung übernommen: RICHTER, Bernhard: Stand der Technik bei der Prüfung von Gummidichtungen und elastomeren Werkstoffen, 2006

[37] Vgl. Prospekt der Fa. Mitutoyo: Laser Scan Mikrometer: Berührungsloses Messgerät für ultraschnelle Messungen (3200 Scans/s) und hohe Präzision, 08/19 PR1033(4), Dokument online verfügbar (zuletzt aufgerufen am 04.09.20024): https://shop.mitutoyo.eu/media/mitutoyoData/DO/base/PRAT%201033%284%29%20-%20Laser%20Scan%20Mikrometer_WEB.pdf

Abb. 4: Laser Scan Mikrometer (LSM) bei der Höhenmessung eines O-Ring Abschnittes (Bild: Tobias Ehmer)

Optische Messverfahren im Durchlicht *(**Abb. 5**)* bis ca 150-200 mm sind Stand der Technik (z.B. UTP KaliX) und werden seit vielen Jahren mit eingesetzt. Im Einzelfall ist allerdings der Auswertealgorhitmus (Darstellung einer Ellipse mit den senkrecht zueinanderstehenden Halbachsen a und b) zu hinterfragen, wenn das zu messende Objekt mehr als 1-2% Durchmesserschwankungen über den Umfang zeigt. Bei solchen Formabweichungen sollte der Durchmesser dann nicht mehr direkt, sondern über die Umfangslänge am Innen- und Außendurchmesser ermittelt werden.

Abb. 5: Mit einer optischen Durchlichtmessung können auch mehrere Teile in einem Durchgang vermessen werden (Bild: OPR Group GmbH)

Die oben beschriebenen Verfahren der berührungsfreien Messung haben begrenzte Anwendungsgebiete und werden daher überwiegend für O-Ringe, Hydraulik- und Pneumatikdichtungen und für Radialwellendichtringe eingesetzt. Zur Erstmusterprüfung von Formteilen reicht dies aber nicht aus. Hier müssen auch größere Abstände gemessen werden können, ebenso müssen Messungen von konstruierten Punkten möglich sein und natürlich auch Prüfungen im Auflicht. Messungen in der Z-Achse sind ebenso ein wichtiges Auswahlkriterium. Für Erstmusterprüfungen, d.h. für die kavitätenbezogene Vermessung von Formteilen soll dies auch mit einem vertretbaren Aufwand möglich sein. Für diese Zwecke können einfach programmierbare, ***optische 3D-Messmaschinen***[38] (**Abb. 6**) eingesetzt werden. Die Auswerteprogramme lassen auch 3D-Messungen zu. Mit entsprechenden Zusatzvorrichtungen lassen sich auch Probekörper rotieren und rundum vermessen. Die erstellten Datensätze können direkt mit einem CAD-Modell abgeglichen werden.

Eine der modernsten Technologien in der Messtechnik ist die 3D-Computertomografie (CT).[39] Dadurch können auch komplexe Bauteile im Inneren untersucht und vermessen werden. Dieses Verfahren wird aber aufgrund der noch hohen Kosten nur in der Schadensanalyse oder Bauteilentwicklung verwendet.

Die große Bandbreite der dargestellten Geräte und Verfahren für die maßliche Überprüfung von Gummidichtungen ermöglicht dem Anwender das unter technologischen und wirtschaftlichen Aspekten am besten geeignete Prüfverfahren auszuwählen.

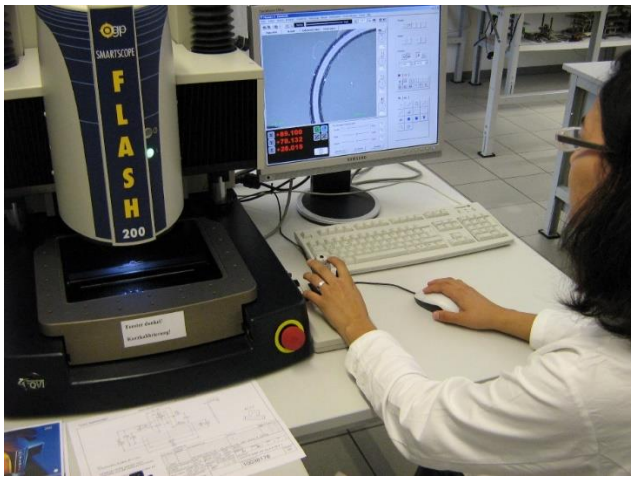

Abb. 6: Beispiel einer programmierbaren optischen 3D-Messmaschine (Bild: OPR Group GmbH)

2. Die Verfahren in Kürze

Die Verfahrensdetails sind stark abhängig vom Messmittel und der zu prüfenden Dichtung. Generell sind folgende Punkte zu bedenken, um reproduzierbare Messergebnisse zu erhalten:

- Ist das Messmittel für die Prüfaufgabe von Elastomeren mit geringem Verformungswiderstand ausreichend geeignet?
- Welche Vorschriften beinhaltet die herangezogene Prüfnorm?
- Gibt es bei komplexen Dichtungen einen Prüfplan?

[38] Beispiel einer optischen 3D-Messmaschine: 3D-Profilometer Modellreihe VR 6000 der Fa. Keyence: Broschüre online verfügbar, zuletzt abgerufen am 17.04.2025: https://www.keyence.de/products/3d-measure/roughness-measure/

[39] Beispiel eines Anbieters für industrielle CT: Fa. SIXIO in Ilsfeld: https://www.sixio.de/leistungen/industrielle-computertomografie

- Gibt es Zusatzvereinbarungen zwischen Dichtungshersteller und -anwender?
- Wie wird die Dichtung zur Messung fixiert bzw. wird hier eine Prüfung mittels Grenzlehren empfohlen?

Berührungslose Messmethoden sind in der Regel berührungsaktiven vorzuziehen, allerdings sollte der Algorithmus der Mess-Software bekannt sein.

Einsatzbereich	Kosten des Prüfverfahrens
Werkstoffprüfung ☒	Bis 100€ ☒
Fertigteilprüfung ☒	100 bis 200 € ☒
Fertigungsqualität ☒	200 bis 500 € ☒ (3D-Scan)
Wareneingangskontrolle ☒	500 bis 2.000 € ☒ (CT)
Schadensanalyse ☒	>2.000 € ☐

„Viel zu oft steht bei Gummiteilen die Maßprüfung im Fokus, weil Konstrukteure die zulässigen Toleranzen zu eng definiert haben. Durch den weit verbreiteten Einsatz optischer Messverfahren gab es allerdings nie zuvor so gute Möglichkeiten, Gummiteile reproduzierbar zu messen."

Bernhard Richter, Geschäftsführer

3. Wichtigste Prüfnormen

Hier muss zwischen drei verschiedenen Normenarten unterschieden werden:

- Normen für klassische Prüfverfahren, welche in Unterkapiteln die Messung von Normprobekörpern beschreiben
- Normen für die allgemeine Messung von Prüfkörpern und Fertigteilen
- Normen für Größen- und Toleranzklassen von Standarddichtungen wie z.B. O-Ringen.

Hinzu kommen noch bauteilspezifische Prüfvorschriften, welche zwischen Dichtungshersteller und -anwender ausgehandelt und schriftlich vereinbart wurden.

3.1 Längenmessung im Rahmen von Standardprüfmethoden

Exemplarisch werden die Vorgaben zur Längenmessung aus den ISO-Normen für die Zugprüfung (ISO 37) und den Druckverformungsrest (ISO 815-1) vorgestellt:

ISO 37 (2024-05)[40]: Determination of tensile stress-strain properties

In Kapitel 7.2 wird das Messgerät zur Prüfung der Dicke der Schulterstäbe und der axialen Dicke der Normprüfringe beschrieben. Es sollte in Übereinstimmung mit dem Prüfgerät für die Methode A in der ISO 23529[41] sein. Die Dicke der Schulterstäbe wird benötigt, um die Fläche des Querschnitts zu berechnen. In der Regel werden drei Dicken gemessen und der Medianwert zur Berechnung verwendet.[42]

Der Prüfkegel für Normprüfringe sollte den Innendurchmesser mit einem Fehler von nicht mehr als 0,01mm messen können. Den flexiblen Eigenschaften von Elastomeren wird mit folgender Forderung Rechnung getragen: „Die Halterung des zu messenden Normprüfrings muss so beschaffen sein, dass eine wesentliche Veränderung der zu prüfenden Abmessung vermieden wird."[43]

Während die meisten Längenmessungen bei Elastomeren statischer Natur sind, wird bei der Zugprüfung eine dynamische Längenmessung, also die Längenänderung während des Zugversuches erfasst. Entweder geschieht dies mit Längenänderungsaufnehmern (berührend oder kontaktlos) oder mit markierten Punkten.

ISO 815-1 (2019-11)[44]: Determination of compression set – Part 1: At ambient or elevated temperatures

Bei der Druckverformungsrestprüfung kommt der Dickenmessung vor und nach der Ofeneinlagerung eine besondere Bedeutung zu. In Kap. 5.4 der Norm wird ein Dickenmessgerät nach ISO 23529:2016, 9.1 mit einer Genauigkeit von ±0,01mm gefordert. Der Scheibentaster soll einen Durchmesser von 4,0mm ± 0,5mm haben und einen Druck von 22 kPa ± 5 kPa bei Elastomeren mit einer Härte >35 IRHD ausüben. Für weichere Elastomere ist ein Druck von 10 kPa ± 2 kPa vorgeschrieben. Die Dicke soll in der Mitte der Probekörper bestimmt werden mit einer Genauigkeit von 0,01mm.[45]

Außerdem wird auf eine Besonderheit von Gummi nach Wärmealterung hingewiesen: Die Oberfläche der Probekörper kann sich durch die Hitze verformt haben, so dass sie nicht mehr planparallel aufliegen.[46]

[40] ISO 37: Rubber vulcanized or thermoplastic – Determination of tensile stress-strain properties, 7th edition, 2024-05

[41] DIN ISO 23529: Elastomere – Allgemeine Bedingungen für die Vorbereitung und Konditionierung von Prüfkörpern für physikalische Prüfverfahren, 2020-10

[42] ISO 37 : Rubber vulcanized or thermoplastic – Determination of tensile stress-strain properties, 7th edition, 2024-05, S. 10, Kap. 13.1

[43] Ebd., S. 6, Kap. 7.3

[44] ISO 815-1: Rubber vulcanized or thermoplastic – Determination of compression set – Part 1: At ambient or elevated temperatures, 3rd edition, 2019-11

[45] Ebd., S.6, Kap. 9.2

[46] Ebd., S.3, Kap. 5.4

3.2 Normen für die Messung von Prüfkörpern und Fertigteilen

DIN ISO 23529 (2020-10)[47]: Elastomere – Allgemeine Bedingungen für die Vorbereitung und Konditionierung von Prüfkörpern für physikalische Prüfverfahren (ISO 23529:2016)

Das Kapitel 9 dieser Norm befasst sich mit der Messung von Probekörpermaßen. Die Verfahren A, B und C sind für jeweils unterschiedliche Größenbereiche der Probekörper. Für das Verfahren A (Maße < 30mm) werden Anpressdrücke für Messtaster festgelegt, analog zur oben beschriebenen ISO 815-1. Die Dicke sollte mit einer max. Abweichung von 1% oder 0,01 mm (es gilt der jeweils kleinere Wert) gemessen werden können. „Es wird empfohlen, ein digitales Messgerät mit einer Auflösung von 0,001mm zu verwenden."[48]

Beim Verfahren B (Maße ≥30mm und ≤100mm) ist ein Messschieber erlaubt, der Abweichung von max. 1% aufweisen darf. In diesen Größenbereichen verursacht die Gummielastizität schon gravierendere Probleme, deswegen „muss der Messschieber so eingestellt werden, dass die Flächen, die die Oberflächen des Probekörpers oder des Fertigteils berühren, diese nicht zusammendrücken."[49]

Das Verfahren C ist für Maße >100mm. Es erlaubt die Verwendung eines Lineals oder eines Bandmaßes, mit einer Abweichung von max. 1mm.

Das Verfahren D behandelt berührungslose Prüfverfahren. Die zulässigen Abweichungen sind wie bei Verfahren A.

DIN EN ISO 1923: Schaumstoffe und Schaumgummis. Bestimmung der linearen Abmessungen[50]

Diese Prüfnorm befasst sich mit der Bestimmung der Abmessungen von weichelastischen und harten Schaumstoffen. Das Hauptproblem bei der berührungsaktiven Messung von Schaumstoffen ist ihre leichte Zusammendrückbarkeit. Deswegen dürfen Messschrauben nur bei harten Schaumstoffen verwendet werden und Messuhren müssen ein Anpressdruck von (100±10) Pa bei einer Prüffläche von ca. 10 cm^2 aufweisen. (Zum Vergleich: Bei massiven Elastomeren mit Standardhärte sind Anpressdrücke von 22 kPa üblich, also das 220-fache!). Die Skaleneinteilung sollte 0,05mm betragen. Bei Abmessungen ≤ 10mm sollte die Genauigkeit 0,05mm aufweisen, im Bereich > 10mm bis ≤100mm sollte sie 0,1mm und bei Abmessungen > 100mm sollte sie 0,5mm betragen.

Bei allen Messmethoden ist genau darauf zu achten, dass der Schaumstoff nicht verformt wird. Im Anhang der Norm wird eine Prüfvorrichtung vorgeschlagen, mit welcher die Verformung durch die Messung minimal gehalten werden kann: Eine Messschraube wird in einen Ständer montiert. Der rechtwinklige Probekörper liegt auf der Grundplatte des Mesständers. Auf den Probekörper wird eine dünne Aluminiumplatte mit bekannter Höhe aufgelegt. Die Aluminiumplatte wird mittels eines Kabels mit einer Stromquelle, einer Lampe und der Messschraube verbunden. Die Messschraube wird nun langsam in Richtung der Aluminiumplatte bzw. des darunter liegenden Probeköpers gedreht. Sobald die Lampe leuchtet, kann der Messwert an der Messschraube abgelesen werden. Für das Ergebnis muss nur noch die Höhe der Aluminiumplatte abgezogen werden.

Die dieser DIN EN zugrunde liegende ISO-Norm stammt aus dem Jahr 1981. Viele der in dieser Norm beschriebenen Vorgehensweisen sind durch moderne berührungslose Messverfahren kaum noch notwendig.

ASTM D3767 – 03 (Reapproved 2020): Standard Practice for Rubber – Measurement of Dimensions[51]

Aus dem DIN/ISO-Normenkreis ist den Autoren keine so umfangreiche und differenzierte Norm zur Längenmessung bekannt, wie diese ASTM.

Es wird zwischen 7 Prüfverfahren unterschieden. Die Größenklassen sind ähnlich wie bei der ISO 23529, jedoch gibt es noch zusätzliche Verfahren für gekrümmte Oberflächen (A1), für Schäume (A2) und für Messungen mit einem Mikroskop (D). Messungen mit einem Prüfkegel sind in dem eigenen Verfahren (E) definiert.

Sind Oberflächen uneben, so dürfen diese leicht poliert werden.

Beim Verfahren A (<30 mm) sind die Anpresskräfte in Abhängigkeit von der Probekörperhärte einzustellen, mit Werten wie bei der ISO 815-1 (siehe oben). Es wird besonders darauf hingewiesen, dass die Führungsstange des Mikrometers rechtwinklig zur Auflageplatte sein sollte (max. Abweichung 0,002 inch = ca. 0,051 mm).

Interessant ist das Verfahren A1, welches näher in Kap.

[47] DIN ISO 23529: Elastomere – Allgemeine Bedingungen für die Vorbereitung und Konditionierung von Prüfkörpern für physikalische Prüfverfahren (ISO 23529:2016), 2020-10

[48] Ebd., S.15, Kap. 9.1

[49] Ebd., S.15, Kap. 9.2

[50] DIN EN ISO 1923: Schaumstoffe und Schaumgummis: Bestimmung der linearen Abmessungen (ISO 1923: 1981), Juni 1995

[51] ASTM D3767 – 03 (Reapproved 2020): Standard Practice for Rubber – Measurement of Dimensions

9.2 der Norm beschrieben wird. Als Tastkörper werden gekrümmte Oberflächen verwendet, allerdings sind diese nur konvex, also nach außen gekrümmt. Es gibt zwei verschiedene Tastkörper, entweder mit einem Radius von 3mm oder 6,25mm. Beim großen Radius ist der Gegenpart ebenfalls mit dem gleichen Radius gekrümmt, beim kleinen Radius ist der Gegenpart eine flache Scheibe mit einem Durchmesser von 9,5mm. Die Kontaktkörper sollen eine Kraft von 0,8±0,1N auf die Prüfobjekte ausüben. Es gibt genormte Vorrichtungen, welche auf die Granitplatte des Mikrometerständers montiert werden können. In diese Vorrichtung („Bradnick-Warner fixture")[52] können dann die benötigten Auflagestücke (flach oder konvex) eingesetzt werden.

ASTM D1414 – 22: Standard Test Methods for Rubber O-Rings[53]

Diese Prüfnorm nimmt eine Sonderstellung ein, da sie sich nicht mit Normprobekörpern, sondern ausschließlich mit der Prüfung von Fertigteilen, nämlich O-Ringen befasst.

Die Schnurstärke soll lt. Kap. 7 der Norm mit einem Mikrometer nach ASTM D3767, Verfahren A an vier – um den Ringumfang gleichmäßig verteilten – Punkten gemessen werden, sowohl in axialer als auch radialer Richtung. Der Innendurchmesser der O-Ringe soll mit einem Stufenkegel oder einer optischen Vergleichseinrichtung bestimmt werden.

Im Kap. 25 wird der „O-Ring Mold Shrinkage Test" beschrieben. Bei dieser Prüfung werden verschiedene Elastomercompounds in einem Presswerkzeug mit repräsentativen O-Ring Abmessungen verarbeitet. Das Werkzeug und die verschiedenen O-Ringe werden in Schnurstärke und Durchmesser vermessen, um so den Verarbeitungsschrumpf feststellen zu können. „Die Vulkanisationszeit und insbesondere -temperatur sind für die Betrachtung der Schrumpfung sehr wichtig."[54]

„Bei einigen Materialien, wie z. B. Silikonen, kann es aufgrund des Schrumpfungsverhaltens zu einem Ungleichgewicht zwischen den beiden Querschnittsachsen kommen, wodurch ein unrunder Querschnitt entsteht."[55]

3.3 Normen für Größen- und Toleranzklassen von Dichtungen

DIN ISO 3302-1: Gummi – Toleranzen für Fertigteile – Teil: Maßtoleranzen [56]

Dies Norm befasst sich mit den Maßänderungen, die Elastomerbauteile während der Verarbeitung und Anwendung erfahren und wirbt für Toleranzen, welche an den Werkstoff und die tatsächliche Anwendung angepasst werden, um nicht die Kosten unnötig in die Höhe zu treiben. So sollte generell kritisch hinterfragt werden, ob Norm-Grenzabmaße bei Elastomerbauteilen verwendet werden müssen.[57] Die ISO 3302-1 gilt für Fertigteile aus Elastomeren oder TPE, nicht jedoch für O-Ringe und kalandrierte Produkte.[58]

Gummifertigteile dürfen erst 16h nach der Vulkanisation vermessen werden, in Konfliktfällen erst nach 72h. Die Messungen sollen bei Normtemperatur mit einer Mikrometermessuhr, optischen Messgeräten, festen Lehren oder anderen Geräten wie z.B. Messschiebern oder Messbändern durchgeführt werden.

In Kap 5.2 werden vier Klassen von Grenzabmaßen festgelegt, M1 (Präzisions-Formteile) bis M4 (unkritische Maße). „Grenzabmaße, die in diesem Teil der ISO 3302 als positive Werte und gleiche negative Werte festgelegt sind (z. B. ± 0,35), können auch als ungleiche positive und negative Werte angegeben werden, wenn die Differenz zwischen den beiden Werten dieselbe ist. Z. B. kann ± 0,35 auch als +0,2/−0,5 oder +0,7/−0 oder 0/−0,7 usw. angegeben werden."[59]

Die ISO 3302-1 geht noch auf eine Besonderheit bei der Gummiherstellung ein, welche besonders beim Pressverfahren auftritt, dem Grat in der Formtrennebene. Beim Pressverfahren wird ein Rohling mit einem größeren Volumen als das Volumen der Kavität des Presswerkezuges eingelegt. Durch den entstehenden Austrieb in der Formtrennebene, kann das Pressenwerkzeug nicht vollständig schließen. Die Norm unterscheidet zwischen zwei Toleranzklassen: F-Toleranzen sind für an die Form gebundene Maße, welche nicht durch die Höhe des Grates beeinflusst werden und C-Toleranzen sind an den Formschluss gebundene Maße, also an die Höhe des Grates, welcher ein vollständiges Schließen der Werkzeughälften verhindert. Zwar treten bei den Verfahren Spritzgießen und Transferpressen auch Grate

[52] Beispiel einer Bradnick-Warner fixture der Fa. CCSi (Dokument zuletzt aufgerufen am 16.09.2024): https://cdn.thomasnet.com/ccp/01139992/331216.pdf

[53] ASTM D1414 – 22: Standard Test Methods for Rubber O-Rings, approved Oct. 1, 2022

[54] Ebd., S. 22, Kap. 25.3.2

[55] Ebd., S. 22, Kap. 25.4.1

[56] DIN ISO 3302-1: Gummi – Toleranzen für Fertigteile – Teil 1: Maßtoleranzen (ISO 3302-1:2014), Juni 2018

[57] Vgl. ebd., S. 8, Kap. 5.1

[58] Vgl. ebd., S. 7, Kap. 1

[59] Ebd., S. 8, Kap. 4

auf, jedoch sind diese meist geringer und deswegen können laut DIN ISO 3302-1 ausschließlich die Grenzabmaße F (an die Form gebundene Maße) für diese Herstellungsverfahren verwendet werden.
Im Kapitel 6 geht es um Grenzabmaße für Extrusionteile. Durch verschiedene Fertigungsmethoden (ohne oder mit Unterstützung mit einem Dorn, nach der Produktion geschliffene Extrudate) ergeben sich 11 Toleranzklassen.
Das letzte Kapitel 7 der Norm befasst sich mit Toleranzklassen für kalandrierte Bahnen.

DIN ISO 3601-1: Fluidtechnik – O-Ringe – Teil 1: Innendurchmesser, Schnurstärken, Toleranzen und Bezeichnung [60]

Diese Norm ist der erste Teil einer fünfteiligen Normenreihe zu O-Ringen (Teil 2: Einbauräume, Teil 3: Form- und Oberflächenabweichungen, Teil 4: Stützringe, Teil 5: O-Ring Werkstoffe für industrielle Anwendungen)
Für Innendurchmesser gibt es zwei Toleranzklassen: die engere Klasse A für Industrie- und Luftfahrtanwendungen und Klasse B mit weiteren Toleranzen für allgemeine Industrieanwendungen. Die Toleranzen werden in zahlreichen Tabellen aufgelistet. Neben Standardinnendurchmessern und -schnurstärken gibt es auch Vorgaben zur Berechnung der Toleranzen für nicht standardisierte Abmessungen.

Personen, die sich neu mit dem Thema O-Ringe befassen, werden meist über die ungeraden Abmessungen von O-Ringen verwundert sein. Dies ist damit zu erklären, dass der O-Ring seinen Siegeszug in den 1940er Jahren in den USA begann, wo Zoll bzw. inch das vorherrschende Längenmaß ist. Aber auch in inch sind viele Maße „ungerade". Blickt man in US-amerikanische O-Ring Kataloge, die sich auf Abmessungen nach der SAE AS 568[61] berufen[62], entdeckt man die Abmessungen von Innendurchmesser und Schnurstärke, einmal als „nominal reference" (Nenngröße) und dann als „actual dimensions" (tatsächliche Größe). Die Nenngröße ist meist in Brüchen angegeben und die Abmessungen bei den Schnurstärken sind minimal kleiner als die tatsächlichen Abmessungen („actual dimensions"). In alter US-amerikanischer Literatur wurde oft mit Brüchen statt mit Dezimalzahlen gerechnet und vor der Verwendung von Messschiebern wurden O-Ringe häufig in Brüchen zur besseren Orientierung angegeben. Diese Brüche waren keine Angabe der exakten O-Ring Abmessungen, sondern dienten als Anhaltspunkt für die Abmessungen der O-Ring-Nut.[63] Dies erklärt, dass viele Standard O-Ring Abmessungen auch nicht mit „geraden" inch-Dezimalzahlen hergestellt werden. Folgende Tabelle soll dies exemplarisch erläutern.
Es wird wie folgt umgerechnet: 1 inch = 25,4 mm bzw. exakter 100/3937m.

Größenbezeichnung lt. DIN ISO 3601-1	Schnurstärke [mm]	Schnurstärke [inch] (actual value)	Nennwert [inch] (nominal value)	Nennwert [inch] (nominal value) Info
004-050	1,78	0,070	1/16" = 0,0625"	1,588
102-178	2,62	0,103	3/32" = 0,0938"	2,383
201-284	3,53	0,139	1/8" = 0,125"	3,175
309-395	5,33	0,210	3/16" = 0,1875"	4,762
425-475	6,99	0,275	1/4" = 0,25"	6,35

Tab. 1: Standardisierter O-Ring in mm und inch in Bezug zum Nennwert („nominal value") nach AS 568

Beim Innendurchmesser des O-Rings ist in den US-amerikanischen Tabellen der Nennwert („nominal value") immer etwas größer als der tatsächliche Innendurchmesser („actual value"). Da der Nennwert für die Abmessungen der Nut steht, ist dadurch – je nach Toleranzlage des O-Rings – eine leichte Vorspannung des O-Rings in der Nut gewährleistet.

Der informative Anhang B befasst sich mit Messverfahren für die Wareneingangskontrolle. Messungen sollten bei Umgebungstemperatur stattfinden, wobei die O-Ringe vorab bei einer Temperatur von 21°C bis 25°C und einer relativen Luftfeuchte von 45% bis 55% konditioniert werden sollen. Als Mindestbeleuchtungsstärke werden 400lx empfohlen.

[60] DIN ISO 3601-1: Fluidtechnik – O-Ringe – Teil 1: Innendurchmesser, Schnurstärken, Toleranzen und Bezeichnung (ISO 3601-1:2012 + Cor. 1:2012), November 2013
[61] SAE AS 568: Aerospace Size Standard for O-Rings, 2020-09-29
[62] Beispiel einer Größentabelle eines O-Ring Herstellers (Gallagher Fluid Seals, Inc.), der sich auf die AS 568 beruft (zuletzt aufgerufen am 17.04.2025): https://www.gallagherseals.com/technical-resources/as-568-sizing-table
[63] Vgl. ERIKS Sealing Elements: Technical Handbook O-rings, 2010, Kap.14, S. 169 Dokument online verfügbar (zuletzt aufgerufen am: 17.04.2025): https://o-ring.info/en/o-ring/Technical%20Handbook/16%20-%20ERIKS%20nv%20-%20O-ring%20Technical%20handbook%20-%20O-ring%20Size%20Chart.pdf

Die Schnurstärke eines O-Rings kann mit einer Messuhr, Messschrauben (mit Kugelbacken), einem Messschieber, einer optischen Vergleichseinrichtung oder einem visuellen oder Lasermessgerät erfasst werden.[64]
Die Schnurstärke soll an vier um 90° versetzten Stellen des O-Rings erfasst werden. Der O-Ring soll so positioniert werden, dass der Trenngrat die Messung der Schnurstärke nicht stört. Messuhren sollten eine max. Skalierung on 0,025mm-Schritten haben und nicht mehr als 28,35g Kontaktgewicht besitzen.
Wenn man die in einer Zeichnung geforderten Abmessungen nachweisen soll, werden eine optische Vergleichseinrichtung (Vergrößerung 10x) oder ein Video- oder Lasersystem empfohlen.
Der Teil B.3 des Anhangs befasst sich mit der Messung des Innendurchmessers. Diese kann mit folgenden Messmitteln ausgeführt werden: „Gut-Schlecht"-Lehrdorn, Abgeflachter Lehrdorn, kegelförmig gestufter Lehrdorn, Messmikroskop, optische Vergleichseinrichtung oder Videosystem. Für die genaue Anwendung eines Lehrdorns sei auf die detaillierten Ausführungen im Anhang der ISO 3601-1 verwiesen.[65]

4. Interpretation der Messergebnisse bzw. Bewertung der Verfahren

Bei der Längenmessung handelt es sich um ein klassisches Standardprüfverfahren, welches in vielen Bereichen der Technik zum Einsatz kommt. Auch bei elastomeren Bauteilen wird es regelmäßig angewandt, um die Zeichnungskonformität (**Abb. 7**) zu überprüfen bzw. um in der Werkstoffprüfung die Einflüsse der Prüfbedingungen zu erfassen. In der Qualitätssicherung werden die Prüfergebnisse meist nur „binär" erfasst (i.O. / n.i.O.), jedoch kann eine tiefergehende Analyse der Messdaten – besonders bei großen Prüflosen über längere Zeiträume – weiterführende Informationen über die Stabilität eines Herstellungsprozesses geben. Dazu werden teilweise bereits bei der Bemusterung Prozessfähigkeitsanalysen durchgeführt. Diese lassen erkennen, wie sicher die Einzelwerte gegen Toleranzabweichungen sind. Dazu wird die Standardabweichung der Messungen ermittelt. Liegt der Mittelwert der Messwerte mindestens 4 s bzw. die vierfache Standardabweichung weg von der näheren Toleranzgrenze (entspricht einem c_{pk} von 1,33), so gilt der Prozess als abgesichert. Diese statistischen Verfahren sollten allerdings nur für funktionsrelevante Maße angewendet werden. Bei O-Ringen wäre das zum Beispiel die Schnurstärke.
Kommt es zu Maßabweichungen an Dichtungen und kann nicht rechtzeitig zeichnungskonforme Ware beschafft werden, kann es u.U. notwendig werden verschiedene Toleranzangaben auf einer Zeichnung nach ihrer Wichtigkeit für die Funktion zu klassifizieren. Generell lässt sich sagen, dass den Maßen von Dichtflächen eine besondere Bedeutung zukommt, aber mitunter können auch Maßtoleranzen für die Montage von Bedeutung sein. In manchen Fällen müssen Dichtungen mit einer leichten Vorspannung montiert werden, um nicht aus dem Gehäuse zu fallen. In jedem Fall sollte aber eine enge Abstimmung zwischen Konstruktion und QS erfolgen, um den Grund für die jeweiligen Toleranzvorgaben zu verstehen.

Maßprüfung O-Ringe Anzahl Prüflinge: 5		**Innendurchmesser und Schnurstärke nach DIN ISO 3601 - 1 Anhang B (11/2013)**		
Radiale Schnurstärke [mm]				
Mittelwert **2,64**	Median 2,63	Größtwert 2,64	Kleinstwert 2,63	Spannweite 0,01
Einzelwerte: 2,63; 2,64; 2,64; 2,63; 2,63				
Innendurchmesser [mm]				
Mittelwert **29,86**	Median 29,89	Größtwert 29,95	Kleinstwert 29,77	Spannweite 0,18
Einzelwerte: 29,77; 29,95; 29,78; 29,90; 29,89				

Abb. 7: Auszug aus einem Ergebnisbericht zur Maßprüfung von O-Ringen (Bild: OPR Group GmbH)

[64] Vgl. DIN ISO 3601-1: Fluidtechnik – O-Ringe – Teil 1: Innendurchmesser, Schnurstärken, Toleranzen und Bezeichnung (ISO 3601-1:2012 + Cor. 1:2012), November 2013, S. 38, Kap. B.2.1

[65] DIN ISO 3601-1: Fluidtechnik – O-Ringe – Teil 1: Innendurchmesser, Schnurstärken, Toleranzen und Bezeichnung (ISO 3601-1:2012 + Cor. 1:2012), November 2013, S. 39, Kap. B.3

5. Zukunft des Verfahrens

Die Maßprüfung ist ein unverzichtbares Prüfverfahren in der Elastomertechnik und wird sicherlich auch in Zukunft nicht an Wichtigkeit verlieren.

Die klassische analoge Längenmesstechnik mit Höhentastern, Prüfdornen u.ä. ist seit Jahren auf dem Rückzug und wird immer mehr durch digitale oder optische Messverfahren ersetzt. Allgemein ist ein deutlicher Trend zu berührungsloser und automatisierter Prüfung erkennbar. Bei großvolumigen O-Ring-Anwendungen in der Automobil- oder Sanitärtechnik ist eine 100 prozentige automatisierte Sichtprüfung auf Oberflächenfehler inzwischen Stand der Technik, in der Regel mit einer integrierten 100 prozentigen Maßprüfung.

6. Praktische Hinweise für eine Auftragsvergabe

Bei Standarddichtungen wie O-Ringen genügt eine Zeichnung mit Toleranzangaben. Außerdem muss mitgeteilt werden, wie groß die zu prüfenden Lose sein sollen und nach welcher Norm die Prüfung erfolgen soll.

Bei speziellen Dichtungen ist eine Absprache zwischen Kunde und Prüfdienstleister notwendig. Es sollte gemeinsam festgelegt werden, welche Maße zu prüfen sind und ob Lehren zur Fixierung der Dichtung erstellt werden müssen.

© by OPR Group GmbH www.oprgroup.de :
OPR Elastolabs www.o-ring-prueflabor.de /OPR Technical Services www.elastomer-institut.de / OPR Training www.elastomer-training.de