FACHWISSEN ELASTOMERPRÜFWESEN

Ein Angebot des

O RING
PRÜFLABOR
RICHTER

PRÜFEN BERATEN ENTWICKELN

Quelle: www.o-ring-prueflabor.de
Stand der Information: 11/2021

Elastomerprüfwesen
Hintergründe – Motivationen – Trends und Perspektiven
(Teile 1 bis 6 der gleichnamigen Artikelserie)

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

„When a product fails unexpectedly, experience has shown that in almost every case the problem can be traced back to lack of, or inadequate, testing, which in turn resulted from an attempt to save money.“[1]
Roger BROWN

Die Prüfung von Gummiwerkstoffen und -erzeugnissen ist ein sehr weites und komplexes Feld. Die folgende Serie soll etwas Licht ins Dunkel bringen und viele Aspekte und Zusammenhänge verständlich und nachvollziehbar erklären.

1. Wie alles begann: Kurzer historischer Rückblick und Einführung

In der Frühzeit der industriellen Kautschukverarbeitung im ausgehenden 19. Jahrhundert wurde die Qualitätsbewertung von Gummiartikeln v.a. von Mischungsentwicklern dominiert, die auf ihre chemischen Prüfverfahren setzten. Der Fokus früher Prüfmethoden wurde besonders auf den Einsatzbereich bestimmter Kautschukartikel gerichtet. Durch den Einzug moderner Materialprüfungsverfahren (z.B. Zugversuche aus der Metallkunde) in die Kautschukindustrie und eine zunehmende Standardisierung wurde es möglich reine Materialparameter zu

[1] BROWN, Roger: Physical Testing of Rubber, Springer, New York, 4. Aufl., 2006, S.7
Dt. Übersetzung des Zitates: „Wenn ein Produkt unerwartet versagt, kann das Problem erfahrungsgemäß in fast allen Fällen auf fehlende oder unzureichende Prüfungen zurückgeführt werden, die wiederum aus dem Versuch resultieren, Geld zu sparen.“

ermitteln und reproduzierbar miteinander zu vergleichen.[2] Eine wegweisende deutschsprachige Veröffentlichung, welche die beiden Prüffelder tiefergehend in einem Werk relativ gleichberechtigt nebeneinander darstellte, war das Buch „Der Kautschuk und seine Prüfung“ aus dem Jahr 1910.[3]
Die Eigenschaften von Gummi sind einzigartig und komplex und daher schwer versuchstechnisch zu erfassen. Gummiwerkstoffe weisen im Gegensatz zu den meisten üblichen Konstruktionswerkstoffe eine relativ niedrige Festigkeit auf, verbunden mit einer extremen Elastizität. Auch nach hohen Dehnungen (> 200% und je nach Basispolymer mitunter deutlich höher), erfolgt nach Entlastung eine fast vollständige Rückverformung. Vor der Einführung der Kunststoffe waren Gummiwerkstoffe sehr gefragte elektrische Isolationsmaterialien. Trotz der hohen Elastizität sind sie inkompressibel. Die Systematik und Verfahren aus der klassischen Werkstoffprüfung nahmen immer mehr Einzug im Gummibereich, aber waren oft ungenügend in der Darstellung und Erfassung dieser besonderen Gummieigenschaften. Deswegen mussten zahlreiche neue Prüfmethoden entwickelt bzw. modifiziert und genormt werden.

Die Analyse von vulkanisierten Elastomerwerkstoffen lässt sich heute in vier große Gruppen aufteilen, wovon sich die ersten drei mit praktischen Prüfungen befassen:

1) Klassische chemische Prüfverfahren (seit dem 19. Jahrhundert eingesetzt), wie z.B. chemische Verträglichkeiten, Quellungen, Extraktionen usw.
2) Klassische mechanisch-technologische Prüfverfahren (seit Ende des 19. Jahrhunderts immer bedeutender), wie z.B. Zugversuche, Härte, Dichte, Alterungen usw.
3) Stark EDV-gestützte Prüfverfahren mit erhöhtem apparativen Aufwand, oft im Grenzbereich zwischen chemischen und physikalischen Verfahren (wie z.B. DSC, DMA, FTIR, Digitalmikroskopie, REM-EDX, NMR, GC-MS usw.) (In der Industrie seit den 1960er Jahren immer stärker eingesetzt.)
4) Numerische Simulation von Elastomer-Werkstoffverhalten (ca. seit den 1980er Jahren)

Diese Artikelserie befasst sich mit Prüfverfahren der Punkte 2 und 3 an vernetzten Mischungen und reflektiert nur Prüfmethoden an vulkanisierten Elastomeren, da die Prüfung von Rohkautschuk und Vernetzungsreaktionen ein eigenes Feld darstellt. Außerdem behandelt sie nicht die Prüfung von Reifen, Schaumgummi, Ebonit (Hartgummi)[4], Gummi-Metallverbindungen und Gummi-/Faserverbundwerkstoffen, die traditionell eigenständige Prüfbereiche bilden, in denen ganz eigene und spezielle Fragenstellungen beantwortet werden müssen. Dennoch bedienen sich diese Sonderbereiche auch einiger Prüfverfahren, welche im Folgenden beschrieben werden.
Die mechanisch-technologischen „Prüfungen umfassen mit einigen Ausnahmen, wie z.B. den elektrischen Untersuchungen, in der Hauptsache die Verformungsvorgänge und deren Auswirkungen auf das strukturelle Gefüge [, mitunter nach Alterung in Heißluft oder Einlagerung in Medien]. Bei jeder Verformung von hochpolymeren Stoffen treten im Innern der Stoffe infolge von Reibung, Verschiebung von Molekülen und Molekülteilen, Energieumwandlungen auf, die sich teils in Wärmeenergie äußern, zum anderen Teil zu bleibenden Gestaltsänderungen führen. Die dabei auftretenden strukturellen Veränderungen können im Grenzfall bis zur

[2] Vgl. MEMMLER, K. und SCHOB, A.: Mechanisch technologische Prüfungsmethodik (Kap. F.) in: MEMMLER, K. (Hrsg.): Handbuch der Kautschukwissenschaft, Verlag von S. Hirzel, Leipzig, 1930, S. 575
[3] HINRICHSEN, F.W. und MEMMLER, K.: Der Kautschuk und seine Prüfung, Verlag von S. Hirzel, Leipzig, 1910
[4] Nach Ansicht der ISO Technical Committees „ISO/TC 45 Rubber and rubber products“ und „ISO/TC 61 Plastics“ sollte Ebonit zu den Duromeren (thermosetting plastics) gerechnet werden. Vgl. BROWN, Roger: Physical Testing of Rubber, Springer, New York, 4. Aufl., 2006, S.3

restlosen thermischen oder mechanischen Zerstörung führen, wie im Falle der Prüfung auf Zermürbung oder Zugfestigkeit.“ [5] Das Besondere bei polymeren Werkstoffen ist die hohe Temperaturabhängigkeit der Verformungsfähigkeit. Je nach Polymerklasse wird das Polymer entweder ober- oder unterhalb des Glasübergangs eingesetzt. Elastomere werden so gut wie immer im elastischen Bereich oberhalb ihres Glasübergangs eingesetzt und so gut wie fast alle Prüfverfahren für Elastomere befassen sich mit Materialeigenschaften in diesem Bereich, maximal noch mit denen im Glasübergangsbereich selbst.
„Die ‚klassischen‘ Methoden der Kautschukprüfung sind fast durchweg Ein-Punkt-Prüfungen. Die meisten Beanspruchungen der gummielastischen Stoffe sind in der Praxis jedoch ganz andere als Ein-Punkt-Beanspruchungen.“[6]
Durch Materialbeschreibungen mit Hilfe numerischer Simulation können Aussagen über das Materialverhalten über größere Temperatur- und Belastungsbereiche gemacht werden. Dadurch wird das Problem der oben beschriebenen „Ein-Punkt-Aussagen“ überwunden. Die numerische Simulation bezieht zum Großteil ihre Materialdaten aus Versuchen des dritten Bereiches, vereinzelt wird sie aber auch mit Kennwerten aus mechanisch-technologischen Verfahren (Gruppe2, z.B. Zugversuche mit Temperierkammer) durchgeführt.
Unter den Polymerprüfungen besitzt die Elastomerprüfung eine um Jahrzehnte längere Tradition als die Kunststoffprüfung, da die Einführung synthetischer Kunststoffe erst Anfang des 20. Jahrhunderts erfolgte. Im Vergleich zu den Elastomeren, wo unzählige Hersteller jeweils eigene Mischungen kreieren, ist das Feld der Kunststoffe – trotz aller Größe – überschaubarer. Wegweisend im Kunststoffbereich war die Einführung der CAMPUS-Datenbank[7] Ende der 1980er Jahre, an welcher sich unzählige Kunststoffhersteller[8] beteiligen. Dadurch ist auch eine große Vergleichbarkeit von Materialeigenschaften gewährleistet. Im Elastomerbereich ist nichts Ähnliches bekannt. Dies bedeutet, dass der Anwender von Elastomermaterialien viel tiefer in die Prüfthematik einsteigen muss, v.a., wenn er eine gute Marktübersicht bekommen möchte und/oder in neuartigen Anwendungen an die Grenzen bestimmter Elastomerwerkstoffe gelangt. Manchen Anwendern bzw. Konstrukteuren und Einkäufer ist nicht ausreichend bewusst, dass der Ersatz von freigeprüften Dichtungswerkstoffen durch günstigere Konkurrenzmaterialien oft ungleich schwerer und komplexer ist als bei Kunststoffbauteilen. Hinzu kommt, dass in den meisten technischen Anwendungsfällen (Ausnahme Reifen), Elastomerbauteile viel geringere Volumina als Kunststoffbauteile aufweisen und somit aus dem Blickwinkel von Einsparungseffekten oft weniger interessant sein dürften. Die verschiedenen Kunststofftypen und TPEs können in der Regel von fast jedem beliebigen Kunststoffverarbeiter eingekauft werden. In der Gummibranche liegt die Mischungsentwicklung und -verarbeitung häufig in einer Hand und Mischungen werden nicht außer Haus verkauft. Möchte bspw. ein Kunde aus Preisgründen den Lieferanten wechseln, macht dies in vielen Fällen die Erprobung und Bemusterung einer neuen Gummimischung notwendig.

Fazit

Das moderne Elastomerprüfwesen ist ein extrem weites Feld, was die heutigen Prüfmöglichkeiten anbelangt. Aber auch wirtschaftlich gesehen ist die Elastomerprüfung oft ein in ihrer

[5] ECKER, R.: Mechanisch-technologische Prüfung von Kautschuk und Gummi (Kap. 5.2) in: BOSTRÖM, S.: Kautschuk-Handbuch, 5. Band, Berliner Union, Stuttgart, 1962, S.82
[6] Ebd., S.97
[7] Weiterführende Informationen zu CAMPUS (**C**omputer **A**ided **M**aterial **P**reselection by **U**niform **S**tandards): https://www.campusplastics.com/campus/about und Informationen über den Inhalt: https://www.campusplastics.com/campushome/coc (Webseiten zuletzt aufgerufen am 15.04.2021)
[8] An CAMPUS Teilnehmende Firmen: https://www.campusplastics.com/campus/members (Webseite zuletzt aufgerufen am 15.04.2021)

Bedeutung unterschätzter Industriezweig. Außerdem ist eine sinnvolle Prüfung der eingesetzten Elastomere eine entscheidende Voraussetzung für die Sicherheit und dauerhaft korrekte Funktion großer Maschinen und Anlagen.
Von allgemeinen Trends zu sprechen ist generell schwierig, da Anwendungen stark vom eigenen Blickwinkel und der jeweiligen Fragestellung abhängen. Aber letztlich ist klar, dass es gerade bei Elastomeren bezüglich der Performance von Fertigteilen nur einen weiteren Fortschritt bezüglich Einsatzbereiche und Lebensdauer geben wird, wenn man die Potentiale und Aspekte der modernen Prüftechnik auch nutzt.
Trotz größerer Bedeutung von Werkstoffsimulationen ist auf absehbare Zeit nicht davon auszugehen, dass Prüfumfänge stark reduziert werden. Stattdessen werden sich die angefragten Parameter mitunter verändern.
Das klassische mechanisch-physikalische Prüfwesen wird voraussichtlich in den kommenden Jahren konstant bleiben, da die damit gewonnen Kennwerte nach wie vor von großer Bedeutung für die Klassifikation und Freigabe von Werkstoffen sind. Hinzu kommt, dass man mit dieser Art von einfach verständlichen Kennwerten fast 100 Jahre Erfahrung in der Übertragung auf Produktanwendungen hat.
Im Bereich der chemischen Analytik ist ein Wachstum zu erwarten, da auf Grund leistungsfähiger Geräte wie bspw. einer GC-MS weitreichende und bisher teils ungeahnte Aussagen über kritische Inhaltsstoffe möglich sind. Auf Grund steigender Umwelt- und Gesundheitsstandards wird der Bereich verbotener Substanzen (z.B. Nitrosaminanalytik) zunehmen.

2. Warum prüft man? – 8 gute Gründe für die Prüfung von Elastomeren

Es gibt viele verschiedene Motivationen für die Prüfung von Elastomeren. Entscheidend für die Auswahl der Prüfmethoden sind die Fragen, warum geprüft werden soll und in welcher Anwendung das Gummibauteil eingesetzt werden wird. Handelt es sich bspw. um eine einfache Wareneingangsprüfung für ein nicht sicherheitsrelevantes Bauteil, können schon einfachste Standardprüfungen ausreichend sein.
Aus Anwendersicht gilt auch heute noch in den meisten Fällen, die von MEMMLER 1930 postulierte Forderung an Prüfmethoden: „Das wichtigste an einem Prüfverfahren [sind] seine Einfachheit, sichere Reproduzierbarkeit und seine eindeutige Sprache des Wertmaßstabes[9] der Prüfungsergebnisse.“[10]
Bei komplexen Fragestellungen bspw. in der Polymerphysik sind einfache Prüfmethoden oft nicht mehr ausreichend. Ihr Einsatz und ihre Deutung erfordert hohes Fachwissen und ist meist mit hohen Investitionskosten für spezielle Prüfgeräte verbunden. Auch ist nur ein Bruchteil dieser Fragestellungen für den typischen Dichtungsanwender relevant.

2.1 Werkstoffentwicklung / Klassifizierung und Vorstellung von neuen Mischungen

Mischungsentwicklungen werden durch steigende Temperaturen in Maschinen, umweltverträglichere Prozessmedien, kompaktere Bauweisen und höhere Qualitäts- und Umweltanforderungen bei sinkenden Kosten immer komplexer. Im besonderen Maße gilt das aktuell für die Anforderungen in der Automobilindustrie in Folge von Downsizing und die Umstellung auf E-

[9] Gemeint ist eine eindeutige Sprache der Prüfergebnisse, welche eine einfache Beurteilung der gewonnen Daten ermöglicht.
[10] MEMMLER, K. und SCHOB, A.: Mechanisch technologische Prüfungsmethodik (Kap. F.) in: MEMMLER, K. (Hrsg.): Handbuch der Kautschukwissenschaft, Verlag von S. Hirzel, Leipzig, 1930, S. 575

mobility. Hinzu kommt eine kontinuierliche Neubewertung der verwendeten Polymere und Mischungschemikalien in Bezug auf gesundheitliche und umwelttechnische Auswirkungen.
Generell erfordern Entwicklungen hochwertiger Compounds einen großen Prüfaufwand (viele Prüfparameter an vielen Versuchsmischungen), der in einigen Fällen auch automatisiert werden kann. Um in der Fülle heutiger Möglichkeiten den Überblick zu behalten und dabei noch kosteneffektiv entwickeln zu können, empfiehlt sich der Einsatz der rechnergestützten statistischen Versuchsplanung (DOE – Design of Experiments).[11] Trotz aller digitalen Hilfe kann ein Mischungsentwickler nicht alle in einer Spezifikation geforderten Werte an allen Versuchsmischungen überprüfen. Deswegen ist hier die Erfahrung des Mischungsentwicklers gefragt, welche Parameter er in die Versuchsplanung mit aufnimmt und welche nicht.
Bei der Einführung von neuen Polymeren, Vernetzungssystemen oder Füllstoffen werden oft ohne besondere Spezifikationsforderungen neue Mischungen eigeninitiativ entwickelt und dem Fachpublikum vorgestellt. Für den wirtschaftlichen Erfolg sind nicht nur gute Prüfergebnisse an sich (sie dienen der Klassifizierung) ausschlaggebend, sondern auch welche Prüfparameter und -methoden ausgewählt wurden, um die neuen Eigenschaften bestmöglich darzustellen (Vorstellung der neuen Mischung).

2.2 Eignungsprüfung für die Anwendung / Aussagen zur Lebensdauer

Mit der Anwendung bspw. einer Dichtung ist in der Regel die Frage nach der Lebensdauer eng verknüpft, welche oft vom Anwender vorgegeben wird. Die Resistenz eines polymeren Bauteiles gegenüber thermischen und chemischen Einwirkungen ist immer abhängig von einer Kombination aus Temperatur und Zeit. „Die Eigenschaften eines Elastomerwerkstoffes ändern sich exponentiell mit der Temperatur (Arrheniusfunktion) und eher linear mit der Expositionszeit. Deswegen ist es wichtig, den Grenzeinsatztemperaturbereich des Elastomers zu kennen (welcher wiederum von der Beanspruchungszeit abhängt), da sich dort kleine Temperaturerhöhungen bereits stark bemerkbar machen können (wenn man die Elastomere im Grenzbereich einsetzt).“[12]
„Generell gilt, je kürzer die geforderte Lebensdauer ist, umso höher kann die maximale Grenztemperatur eines vorgegebenen bzw. zu untersuchenden Werkstoffes sein. In der Praxis tritt jedoch selten eine einzelne Dauertemperatur über den ganzen Gebrauchszeitraum auf. Meistens handelt es sich um Temperaturkollektive.
In der Heißluftalterung im Laborversuch geht es nun darum, diese Temperaturkollektive über vereinfachte Arrheniusmultiplikatoren (auch „Zeit-/Temperatur-Regel“ genannt) in eine isotherme Ersatzbeanspruchung zu überführen. Prüft man bspw. ein Fertigteil nach dieser ermittelten Zeit-/ Temperaturvorgabe (= isotherme Ersatzbeanspruchung), dann kann man mit einem Laborversuch die Praxisanwendung in der Regel ausreichend gut simulieren. Mit Hilfe der Ergebnisse wird nun eine „Alterungs-Masterkurve“ erstellt. Dazu wird die Änderung eines bestimmten Prüfparameters näher betrachtet, z.B. wann die Reißdehnung oder Zugfestigkeit 50% ihres Ausgangswertes erreicht haben oder wann der Druckverformungsrest (**Abb. 1**) einen Wert von 95% erreicht hat.“[13] [14]

---

[11] Weiterführende Informationen: DEL VECCHIO, R.J.: Design of Experiments (DOE): An Excellent Cost Cutting Tool in: GRAF, Hans-Joachim (Hrsg.): Cost Reduction in Rubber Processing, TechnoBiz Communications Co., Ltd., Bangkok, 2014, S. 51-58
[12] BLOBNER, Ulrich und RICHTER, Bernhard: Heißluftalterung von Elastomeren – Prüftechnische Grundlagen und wissenswerte Besonderheiten, 06/2015, S.3, Onlineinformation des O-Ring Prüflabor Richter: https://www.o-ring-prueflabor.de/files/fachwissen_hei__luftalterung_06_2015.pdf
[13] Ebd.
[14] Weiterführende Informationen: BROWN, Roger P.: Practical Guide to the Assessment of the Useful Life of Rubbers, Rapra Technology Limited, 2001 und

Je nach Einsatz können noch andere Alterungsmechanismen hinzukommen, wie z.B. durch starke dynamische oder mechanische Belastung sowie aggressive Medien. Mit Laborprüfungen lässt sich dann vorab erkennen, welche Mischungsmodifikation das beste Ermüdungsverhalten zeigt oder die höchste Zugfestigkeit oder die beste Medienbeständigkeit. Dann gilt es wieder erfahrungsorientiert die aussichtreichste Mischung „ins Rennen zu schicken“.

Abb. 1: Die drei braunen Probekörper werden mit Hilfe von Platten für eine Druckverformungsrestprüfung verpresst: Diese Prüfmethode ist eine Sonderform von Alterungsprüfungen. (Bild: Tobias Ehmer)

Neben standardisierten Prüfungen gibt es noch die Möglichkeit Prüfmethoden bzw. -verfahren für spezielle Anwendungen zu entwickeln. Dies sollte aber nur das letzte Mittel der Wahl sein, da damit meist ein großer Mehraufwand verbunden ist und auch die Vergleichbarkeit zu standardisierten Verfahren fehlt.
Inzwischen sieht man auch ein steigendes Interesse an Prüfungen der Druckspannungsrelaxation (**Abb. 2**). Diese kann kontinuierlich den alterungsbedingten Verlust der Vorspannung der verformten Probekörper ausweisen. Führt man diese bei mindestens drei unterschiedlichen Temperaturen ausreichend lange durch, lässt sich daraus eine belastbare Lebensdauergerade einer Mischung ermitteln.

Abb. 2: Prüfung der Druckspannungsrelaxation: Kontinuierliche Messung der abnehmenden Vorspannung während eines Alterungsprozesses (Bild: Tobias Ehmer)

In den letzten Jahren zeigt sich in manchen Sparten der Dichtungstechnik ein Trend zu einer evolutionären Entwicklung von Eignungsprüfungen und dem vermehrten Einsatz von numerischen Simulationen. Auf Grund immer komplexerer, neuartiger Anforderungen und schnellerer

ISO 11346 (Ausgabe 2014-12): Rubber, vulcanized or thermoplastic – Estimation of life-time and maximum temperature of use

Entwicklungszyklen wird es schwieriger, klar definierte Lastenhefte zu Beginn einer Entwicklung zu erstellen. Um nicht in einem kostenintensiven „trial and error- Prinzip“ stecken zu bleiben, empfiehlt sich eine enge entwicklungsbegleitende Zusammenarbeit mit erfahrenen Lieferanten bzw. Beratungsdienstleistern, die ein tiefes Verständnis werkstofflicher Zusammenhänge haben. Zu Beginn der Industrialisierung wurde fast ausschließlich nach einer „trial and error-Strategie“ entwickelt, bis ausreichendes Wissen über Materialverhalten und -gesetze gesammelt war. Dies barg große Sicherheitsrisiken und verursachte hohe Kosten. Inzwischen stehen dem Ingenieur eine unüberschaubar große Anzahl an Werkstoffen und Lösungsmöglichkeiten bereit, so dass viele Wechselwirkungen dieser Möglichkeiten nur mit einem ähnlichen Prinzip untersucht werden können. Im Gegensatz zu früher hilft die digitale Datenverarbeitung die Risiken und Kosten für „trial and error-Entwicklungen“ in Form von numerischen Simulationen in einem überschaubaren finanziellen Rahmen zu halten, verbunden mit einer großen Zeitersparnis. Grundlage dafür sind entsprechende Materialmodelle, für welche Daten in Werkstoffprüfungen gesammelt werden müssen. Begünstigt wird dieser „trial and error-Entwicklungsstil“ durch ein Zurückfahren von Grundlagenforschung, die Auflösung von Forschungsabteilungen oder Firmenbibliotheken in vielen großen Unternehmen. Lösungen müssen also vermehrt im Kleinen und Konkreten gefunden und erprobt werden.

2.3 Daten für die Simulation (Vorhersage einer Anwendung)

„FEA-Simulationen 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. (…) Um das Materialmodell einer Mischung zu erhalten, ist – je nach Fragestellung – eine umfangreiche Ermittlung der jeweilgen Werkstoffkenndaten notwendig. Dabei ist auch der Zugversuch (teilweise auch mit Temperierkammer) eines von mehreren wichtigen Prüfmethoden. [15] Es können dann strukturmechanische Simulationen (Simulation der Werkstoffalterung[16] und Lebensdauerabschätzungen)[17], wie auch Berechnungen durchgeführt werden, die bei der Entwicklung[18] und Optimierung von Elastomerbauteilen[19] von hohem Nutzen sind.“[20] Das ist aber der vergleichsweise einfache und auch häufig angewendete Bereich der FEA-Analyse, womit Verformungsgrade und daraus

[15] Weiterführende Informationen eines US-amerikanischen Unternehmens, welches Werkstoffdaten für die Simulation ermittelt: http://www.axelproducts.com/downloads/TestingForHyperelastic.pdf (Webseite zuletzt abgerufen am 17.04.2021)

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

[17] Vgl. ACHENBACH, Manfred: Modell zur Thermoviskoelastizität von Elastomeren: Modelle zur Beschreibung des thermo-mechanischen Eigenschaftsprofils von elastomeren Dichtungsmaterialien und ihre Verwendung in Finite Elemente Simulationen von Dichtungssystemen in: STREIT, Gerhard (Hrsg.): Elastomere Dichtungssysteme, Expert Verlag, Renningen, 2011, S.213ff.

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

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

[20] BLOBNER, Ulrich und RICHTER, Bernhard: Zugversuch: Prüftechnische Grundlagen und Empfehlungen für die praktische Anwendung, 10/2014, S. 3f., Onlineinformation des O-Ringprüflabor Richter: https://www.o-ring-prueflabor.de/files/fachwissen-zugversuch_10_2014.pdf

resultierende Spannungen simuliert werden können. Meist wird dies mit verallgemeinerten Materialmodellen getan, also nicht rezepturspezifisch. Das Potential einer FEA-Analyse geht aber weit darüber hinaus. So lassen sich heute Grenzen der Spaltüberbrückung einer Dichtung unter Einfluss von tiefen Temperaturen, einer bezüglich Dynamik und Höhe vorgegebenen Spaltbewegung und Drücke berechnen und damit bereits im Entwicklungsstadium eines Produktes wichtige Informationen über realistische Anwendungsgrenzen liefern.

Werden Materialdaten für viele verschiedene Werkstoffe ermittelt, können in diesem Bereich automatisierte Prüfungen sinnvoll sein. Grundlage für die Modellgleichungen sind mittels DMA ermittelte Multifrequenzanalysen, welche das gummielastische Verhalten von unterhalb der Glasübergangstemperatur bis oberhalb der maximalen Gebrauchstemperatur in einem Frequenzbereich bis 200 Hz beschreiben.

2.4 Freigabeprüfungen

Große Anwender von Elastomeren schreiben in der Regel in hauseigenen Spezifikationen Sollwerte vor, welche der jeweilige Werkstoff in genormten Prüfverfahren erreichen soll. Je sicherheitsrelevanter die Anwendung, desto umfangreicher und anspruchsvoller sind meist die Vorgaben.
Mitunter werden bei weniger erfahrenen Anwendern die Begriffe Normen und Spezifikationen verwechselt bzw. nicht klar voneinander abgegrenzt. Darauf wird in Teil 4 der Serie näher eingegangen.
Ziel eines jeden Elastomerverarbeiters ist es, möglichst viele seiner Mischungen „frei zu bekommen“, d.h. eine Freigabe nach einer Werkstoffspezifikation eines Endabnehmers (z.B. Automobilhersteller) zu bekommen. Hier gibt es viele individuell verschiedene Freigabeverfahren. Manchmal werden schon die Laborwerte des Compoundherstellers bzw. -verarbeiters akzeptiert, in den meisten Fällen erhält man eine Freigabe erst mit Prüfergebnissen eines zertifizierten/akkreditierten Labors und in seltenen Fällen schreibt der Endkunde ein bestimmtes Labor vor.
Die werkstoffliche Freigabeprüfung erfolgt an genormten Probekörpern, welche aus 2 bzw. 6mm starken Laborprüfplatten ausgestanzt wurden. Diese Prüfplatten werden unter Idealbedingungen vulkanisiert und weisen oft bessere Eigenschaften als Gummiformteile aus dem gleichen Werkstoff einer Serienproduktion auf. Deswegen empfiehlt es sich – sowohl aus Verarbeiter- als auch Anwendersicht – parallel zur werkstofflichen Freigabe an Prüfplatten auch werkstoffliche Kennwerte an Fertigteilen festzulegen. Sind die Prüfbedingungen und veränderten Toleranzbereiche bestimmter Parameter an Gummiformteilen von vornherein klar geregelt, kann man sich viele unnötigen Qualitätsdiskussionen im laufenden Produktionsprozess sparen.
Die meisten Firmenspezifikationen sind nicht öffentlich und werden nur mit den Lieferanten und prüfenden Laboren kommuniziert. Ebenso sind die Daten freigegebener Mischungen so gut wie nie öffentlich einsehbar. Im Gegensatz zu den Kunststoffen wird im Elastomerbereich sehr viel Prüfaufwand betrieben, dessen Früchte leider nur einem kleinen Kreis zur Verfügung stehen. Aktuelle Bemühungen zur Vereinheitlichung von Werksspezifikationen verwandter Industriezweige, was zu einer Reduktion des Prüfaufwandes führen könnte, sind den Autoren dieses Textes nicht bekannt. Im Bereich der Normung liegt mit der ISO 3601-5 ein neuer interessanter Ansatz vor. Darin werden Sollwerte von Werkstoffkennwerten wichtiger O-Ring Materialien erstmalig vorgeschrieben, die einem guten Stand der Technik entsprechen (siehe Teil 4 der Serie).

2.5 Untersuchung von Produkten von Marktbegleitern (Funktionelle Nachbildung / Reverse Engineering)

Produkte von Marktbegleitern werden aus den unterschiedlichsten Motivationen heraus untersucht. Die wichtigste ist sicherlich den Qualitätsstandard der eigenen Produkte mit denen des Wettbewerbers zu vergleichen. Sind die Wettbewerbsprodukte technisch bzw. preislich bedeutend besser, haben viele Unternehmen das Interesse solche Produkte nachzubauen.
Bei einer funktionellen Nachbildung versucht man Mischungen herzustellen, welche in den signifikanten Eigenschaften dem Vorbild nahekommen. Die Mischungsbestandteile können dann zum Vorbild stark abweichen.
Beim Reverse Engineering versucht man so weit wie möglich die Mischungsbestandteile und ihre jeweiligen Anteile herauszufinden. Dadurch spart man sich viele Entwicklungsschleifen einer funktionalen Nachbildung. Diese Art der Analyse wird nicht nur in der Gummiindustrie regelmäßig eingesetzt. Es empfiehlt sich, den unbekannten Werkstoff im Vergleich mit einem passenden Kontrollreferenzwerkstoff zu analysieren. Dadurch lassen sich leichter quantitative Aussagen machen. Außerdem kommen neben physikalischen und chemischen Analysemethoden v.a. neuere Verfahren in deren Grenzbereich zum Tragen, wie z.B. DSC, TGA, FTIR, GC-MS (**Abb. 3**) u.v.m.

Abb. 3: Besonders für das Reverse Engineering ist die Pyrolyse GC-MS ein wichtiges Instrument (Bild: O-Ring Prüflabor Richter GmbH)

Das Problem des Reverse Engineering von Gummicompounds – im Vergleich zu bspw. einfach erkennbaren mechanischen Strukturen einer Maschine – ist, dass Elastomermischungen aus vielen unterschiedlichen Bestandteilen bestehen. Manche dienen nur zur Verarbeitung, wieder andere für spezifische Materialeigenschaften. Im Laufe der Compoundherstellung, -verarbeitung und -anwendung kommt es zu Umsetzungen und Veränderungen bestimmter Mischungsbestandteile. Hinzu kommt, dass wichtige Mischungsbestandteile (z.B. Polymer, Ruße, Weichmacher) ölbasiert sind, was eine Unterscheidung zusätzlich erschwert.[21] All dies erklärt, dass das „Reverse Engineering“ von Elastomerprodukten ein sehr komplexes Feld darstellt.

[21] Vgl. DAS GUPTA, Saikat; MUKHOPADHYAY, Rabindra; BARANAWAL, Krishna C. und BHOWMICK, Anil K.: Reverse Engineering of Rubber Products Concepts, Tools and Techniques, CRC Press, 2013, chapter 4

2.6 Qualitätskontrolle

Es muss unterschieden werden zwischen produktionsbegleitenden Elastomerprüfungen beim Hersteller und solchen im Wareneingang eines Anwenders.
Für einen Elastomerverarbeiter ist es besonders wichtig, durch Prüfungen klare Aussagen über den Vulkanisationsgrad seiner Erzeugnisse zu bekommen. Hierzu gibt es eine Vielzahl an Möglichkeiten von zerstörenden, aber auch zerstörungsfreien Prüfungen.[22] Im laufenden Produktionsprozess sind Prüfmethoden mit kurzfristigen Ergebnissen bzw. Inline-Prüfungsmethoden sinnvoll. Je nach Elastomerprodukt, Sicherheitsrelevanz, Werkstoff und bewährten Firmentraditionen werden hier meist individuelle Lösungen entwickelt. Im Interesse des Verarbeiters ist auch eine Bauteilhärte, welche sich konstant im vorgegebenen Toleranzbereich bewegt. Andernfalls kommt es auch bei kleinen Abweichungen oft zu Diskussionen mit Kunden, wenn diese bspw. neben der Dichte nur die Härte im Wareneingang prüfen und sich der tatsächlichen Bedeutung der Härte in ihrem Anwendungsfall nicht bewusst sind und diesen Parameter möglicherweise überbewerten.
Bei Kleinteilen können zerstörende Prüfmethoden eingesetzt werden. Bei Großteilen bzw. sehr teuren Werkstoffen (z.B. FFKM) wird man versuchen möglichst mit zerstörungsfreien Prüfungen auszukommen.
In der Wareneingangsprüfung gibt es verschiedene Prüflevel:

- Das Minimum für technische Elastomerartikel sollte die Überprüfung der Maße, Härte, Dichte (Absicherung gegen Werkstoffverwechslung) und des Druckverformungsrestes (Aussage über Vernetzungsgrad) sein. Da man an Fertigteilen nicht normgerecht prüfen kann, sollten die Prüfmethoden und die Sollwerte inkl. Toleranzbereiche im Vorfeld mit dem Hersteller abgestimmt werden. Hinweise erhält man in den einschlägigen Normen und der Fachliteratur.[23] In diesem unteren Prüflevel sind einfache Prüfmethoden gefragt, welche auch gut reproduzierbar sind und bezüglich des ausführenden Prüfers keine spezifischen Qualifikationen erfordern. Hier genügen meist klassische Einpunktprüfungen.
- Beim mittleren Prüflevel können je nach Einsatz des Elastomerartikels weitere Prüfungen hinzukommen, wie z.B. Kurzzeitquellungen, Zugversuche oder Prüfungen der Viskoelastizität. Mitunter gibt es eigenentwickelte Prüfmethoden, die direkt auf den späteren Einsatz des Gummiartikels Bezug nehmen. Dieser Level erfordert eine spezielle Qualifizierung des Mitarbeiters (z.B. Laborant oder CTA/PhyTA) und die Anschaffung spezieller Apparaturen (z.B. Zugprüfmaschine, Einlagerungsöfen, selbst gebaute Prüfvorrichtungen usw.)
- Im oberen Prüflevel kommen meist moderne und teure Analysegeräte zur Verwendung, wie z.B. DSC (**Abb. 4**), FTIR (**Abb. 5**), TGA (**Abb. 6**), REM-EDX oder NMR. Da

[22] Vgl. BLOBNER, Ulrich und RICHTER, Bernhard: Ausfall durch falschen Vulkanisationsgrad – Auf das richtige Netzwerk kommt es an! Fachartikel aus der Serie: Fachwissen Schadensanalyse von Elastomerbauteilen, Onlineinformation des O-Ring Prüflabor Richter, 04/2021: https://www.o-ring-prueflabor.de/files/fachwissen_schaden_vulkanisationsgrad_04_2021.pdf
[23] Z.B. BLOBNER, Ulrich und RICHTER, Bernhard: Qualitätssicherung an O-Ringen – Wie geht das? Wichtige Hinweise zur Theorie und Praxis von Härte- und Druckverformungsrestprüfungen an O-Ringen, Onlineinformation des O-Ring Prüflabor Richter, 08/2018: https://www.o-ring-prueflabor.de/files/fachwissen_o_ringe_qs_an_o_ringen_lang__08_2018_1.pdf
Eine Kurzform dieses Artikels erschien in der Fachzeitschrift „KGK Kautschuk Gummi Kunststoffe“ des Hüthig-Verlages, Doppelausgabe 07/08 2018, S. 12-15 : „Qualitätssicherung an O-Ringen“: https://www.kgk-rubber-point.de/22967/qualitaetssicherung-an-o-ringen/ (Webseite zuletzt am 17.04.2021 aufgerufen)

dies hohe Anschaffungskosten bedeutet und die Geräte einen hohen Qualifizierungsgrad (z.B. Chemiker, Ingenieur) erfordern, ist dieses Prüfniveau in der Regel nur in sehr großen Unternehmen oder bei spezialisierten Dienstleistern zu finden.

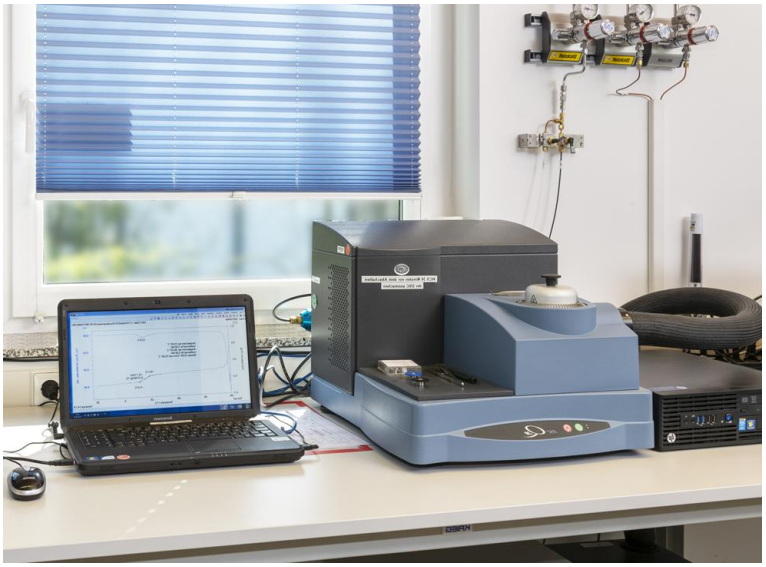

Abb. 4: Manche Wareneingänge verwenden eine DSC zur Bestimmung der Glasübergangstemperatur
(Bild: Johann Schrauf)

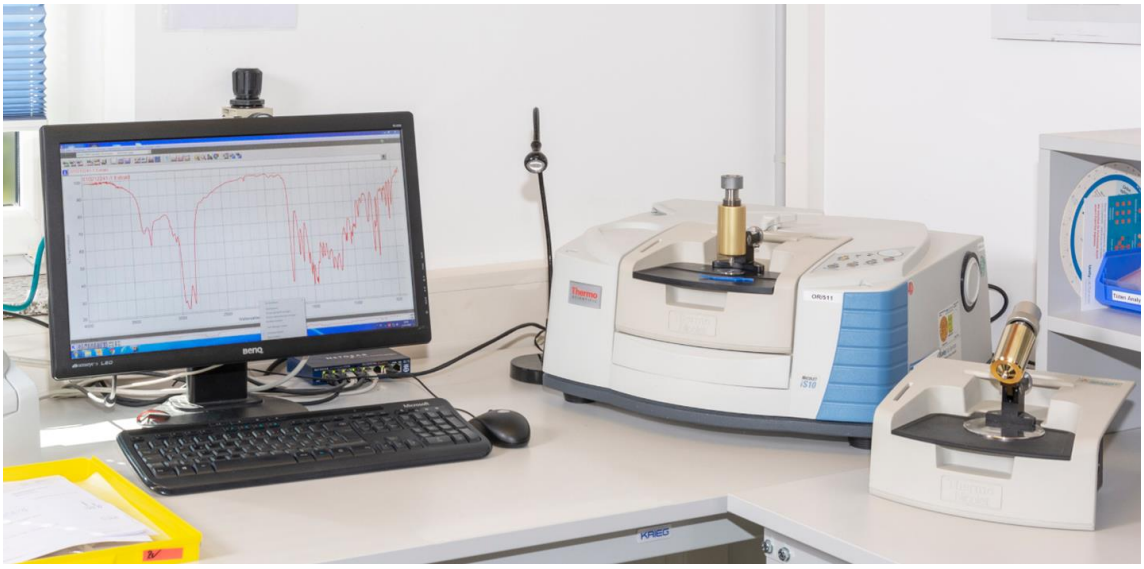

Abb. 5: Mit Hilfe der FT Infrarotspektroskopie lassen Polymere bestimmen und Rezepturen miteinander vergleichen, weshalb sie auch in manchen Wareneingängen zum Einsatz kommt
(Bild: Johann Schrauf)

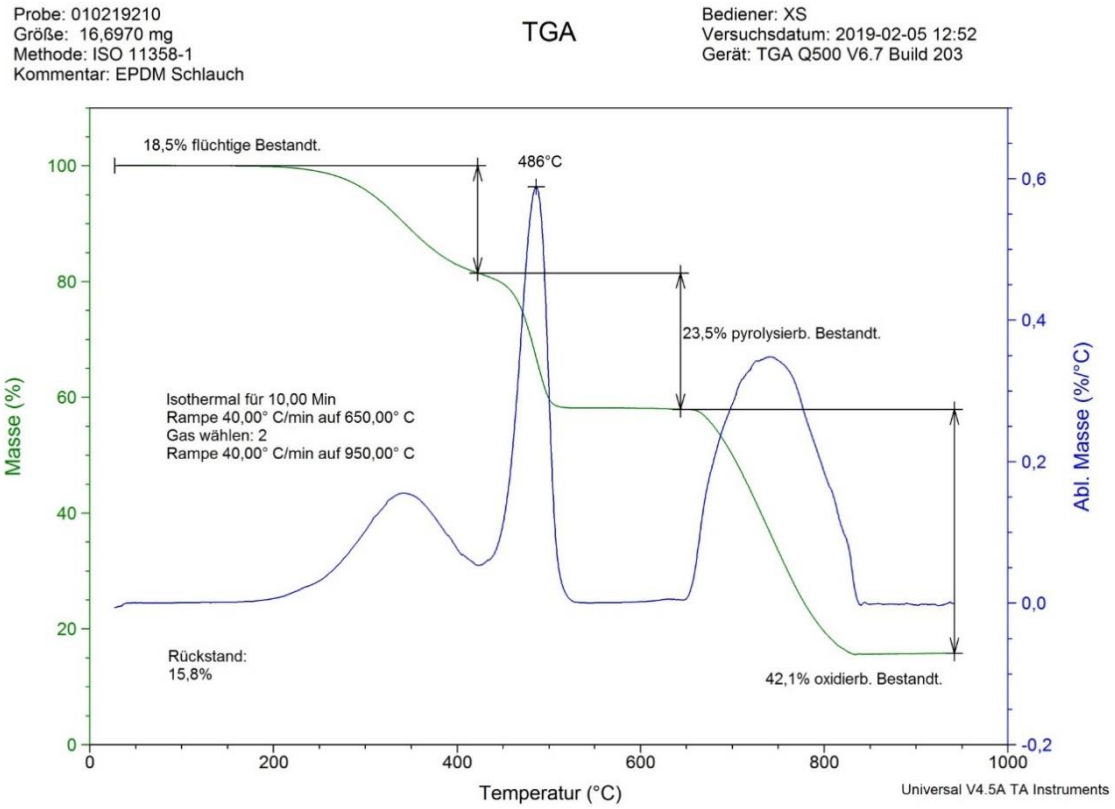

Abb. 6: Auswertung einer thermogravimetrischen Analyse (TGA): Die erste Stufe der grünen Kurve steht für die flüchtigen Bestandteile, Weichmacher, Restmonomere, Alterungsschutz- und Verarbeitungshilfsmittel, die darunterliegende Stufe („pyrolysierb. Bestandt.“) stellt den Anteil des Polymers dar, die Stufe darunter steht für die oxidierbaren Bestandteile, wie Ruß und am Ende verbleibt ein Rückstand (Ascherest) (Bild: O-Ring Prüflabor Richter GmbH)

2.7 Schadensanalyse

So vielfältig Schäden an Elastomerbauteilen sein können, so vielfältig sind auch die Prüfmethoden, welche zu ihrer Detektion eingesetzt werden können. Ihre Auswahl erfolgt lösungsorientiert. Die Tiefe der Analyse ist meist auch abhängig von der genauen Fragestellung und des freigegebenen Budgets des Auftraggebers.
Generell wird in den meisten Fällen mit Standardprüfungen wie Härte und Dichte begonnen. Besondere Bedeutung haben in der Schadensanalyse optische Untersuchungen bzw. bildgebende Verfahren (Lupe, Digitalmikroskop, REM-EDX). Die Auswahl weiterer Prüfmethoden erfolgt evolutionär, d.h. anhand der ersten Schadenshypothesen werden weitere geeignete Prüfverfahren ausgewählt. Wichtig ist, dass die Prüfverfahren gut Unterschiede aufzeigen können.[24]
In den letzten Jahren haben immer mehr innovative Mikroprüfverfahren in der Schadensanalyse Einzug gehalten, mit welchen auch an kleinsten Schadteilen abgesicherte Aussagen gemacht werden können, wie z.B.

- Viskoelastische Eigenschaften mittels LNP® nanotouch
- GC-MS für Nachweis von chemischem Angriff

[24] BROWN, Roger: Physical Testing of Rubber, Springer, New York, 4. Aufl., 2006, S.8

- REM-EDX (**Abb. 7**) für Nachweis von chemischen Elementen, v.a. Ablagerungen an Oberflächen

Abb. 7: Das REM-EDX eignet sich sehr gut für die anspruchsvollere Schadensanalyse, hier die Arbeit und Bildanalyse an einem sogenannten curved monitor (Bild: Tobias Ehmer)

In der Schadensanalyse werden oft sehr komplexe Prüfmethoden mit hohem apparativem Aufwand eingesetzt. Der Schadensanalytiker benötigt eine sehr gute Fachausbildung – was sowohl die Anwendung der Prüfgeräte als auch sein Elastomerfachwissen betrifft – verbunden mit einer großen Praxiserfahrung.
Mit Hilfe einer Schadensanalyse lassen sich auch Prüfmethoden für die Zukunft festlegen, als präventive Maßnahme gegen ein Wiederauftreten des Schadensfalles.

2.8 Prüfungen in der Polymerforschung

Prüfverfahren in der Forschung sind oft hochkomplex. Verlässlichkeit, Schnelligkeit und Kosteneffektivität, wie im Produktionsalltag gefordert, müssen sie in der Regel nicht aufweisen.
Viele der aktuellen Fragestellungen sind für einen praktischen Dichtungsanwender kaum mehr relevant, sondern dienen eher zum tieferen und besseren Verständnis von polymerphysikalischem Verhalten und Vorgängen.

Fazit

Der zielgerichtete Einsatz von Prüfverfahren führt zu Produktlösungen, die das vorhandene Potential an Möglichkeiten ausschöpfen, und schützen vor Qualitätsrisiken. Darüber hinaus helfen sie Entwicklungszeiten zu verkürzen und tragen erheblich zu belastbaren Schadensanalysen bei, wenn es zu Überlastungen gekommen ist. Darum leisten effizient eingesetzte Prüfverfahren einen erheblichen Beitrag zum langfristigen Erfolg eines Unternehmens.

3. Wie prüft sich's am besten: Normprobekörper oder Fertigteil?
(Prüfung von Materialkennwerten vs. Fertigteilprüfung)

In der Frühzeit der Gummitechnologie – bevor Probekörper genormt wurden – lag der Fokus auf der Prüfung des fertigen Erzeugnisses. Auf Grund noch unzureichender Kenntnis der Materialeigenschaften und ihrer Zusammenhänge, versuchte man das Prüfverfahren so nah wie möglich an den späteren Einsatzbereich des Gummiformteils anzupassen. Mit dem Aufkommen genormter Prüfungen und der Möglichkeit geometrieunabhängig Materialkennwerte zu ermitteln, kamen Fertigteilprüfungen etwas in Verruf. So schrieb MEMMLER bspw. im Jahr 1930: „Man darf aber nicht vergessen, daß es sich (…) [bei der Fertigteilprüfung] nicht mehr um eine reine Materialprüfung handelt, sondern um gleichzeitige Prüfung der Konstruktion *und* des Materials; der Anteil jedes dieser beider Faktoren ist dabei natürlich nicht zu ermitteln, es handelt sich gewissermaßen um *eine* Gleichung mit *zwei* Unbekannten."[25]
Diese negative Sicht auf die Fertigteilprüfung lässt sich heute so nicht mehr aufrechterhalten. Bei der Fertigteilprüfung muss man zwischen zwei Bereichen unterscheiden:
In der Qualitätssicherung geht es meist nicht um normgerecht gemessene Materialkennwerte, sondern um vergleichende Prüfungen. Bei der Erstbemusterung können in einer Absprache zwischen dem Lieferanten und Dichtungsanwender genaue Prüfverfahren und -punkte am Fertigteil inkl. zulässiger Abweichungen festgelegt werden, da in vielen Fällen die an Normprobekörpern ermittelten Freigabewerte so am Produktionsteil nicht erreicht bzw. gemessen werden können. Wichtig ist hierbei eine hohe Reproduzierbarkeit der festgelegten Sonderprüfungen. Es sollten v.a. Prüfverfahren gewählt werden, die zum einen eine Materialverwechslung ausschließen (z.B. Härte, Dichte) und die einfach eine korrekte Verarbeitung (Nachweis des korrekten Vulkanisationsgrades z.B. mit Druckverformungsrestprüfung) des Compounds nachweisen können.
Durch die Miniaturisierung und/oder spezielle Vorrichtungen in der modernen Prüftechnik können heute an vielen Fertigteilen belastbare Materialkennwerte ermittelt werden. Diese sind zwar bisher auf Grund der kleinen Probekörper (**Abb. 8**) (noch) nicht genormt, aber durch Versuchsreihen wird immer wieder die Verlässlichkeit solcher Verfahren im Vergleich zu klassischen genormten Standardverfahren nachgewiesen. So lassen sich bspw. durch spezielle Probehalter (Haken, siehe **Abb. 9**) Zugversuche an Mikro O-Ringen mit einem Innendurchmesser von bis zu 0,8 mm durchführen.

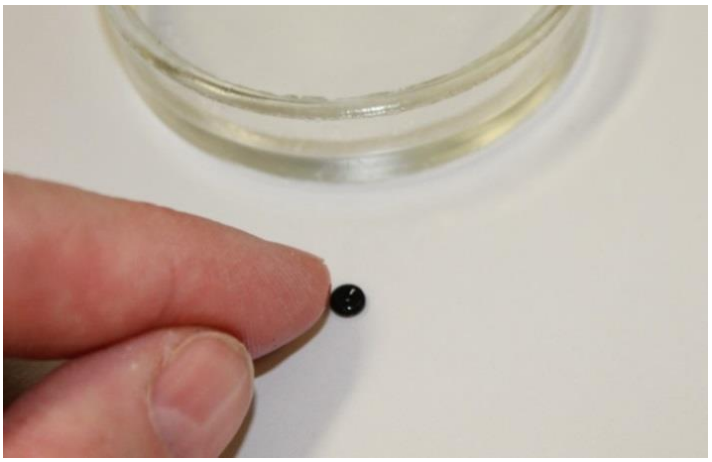

Abb. 8: Mikro O-Ring im Vergleich zu einem Finger (Bild: O-Ring Prüflabor Richter)

[25] MEMMLER, K. und SCHOB, A.: Mechanisch technologische Prüfungsmethodik (Kap. F.) in: MEMMLER, K. (Hrsg.): Handbuch der Kautschukwissenschaft, Verlag von S. Hirzel, Leipzig, 1930, S. 575

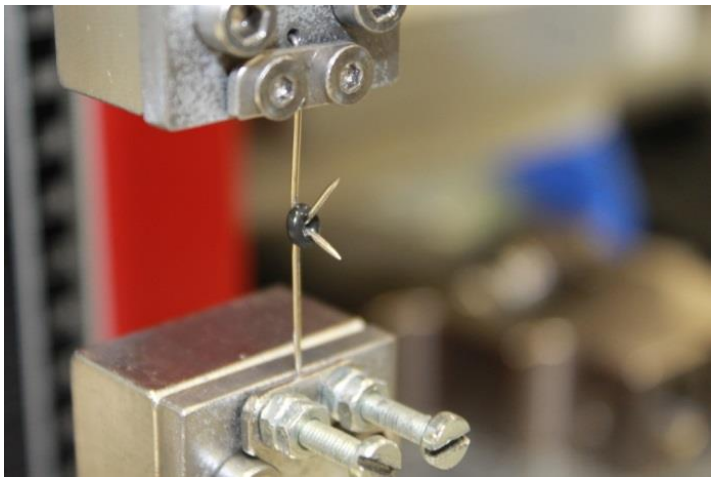

Abb. 9: Zugversuch an dem gleichen O-Ring mit speziellen Probehaltern (Bild. O-Ring Prüflabor Richter)

Mit Hilfe eines Mikroindentors (z.B. LNP® nanotouch) können Härte und viskoelastische Eigenschaften an Elastomerbauteilen (**Abb. 10**) reproduzierbar erfasst werden, z.B. an O-Ringen mit einer Schnurstärke von 0,5 mm (**Abb. 11**).

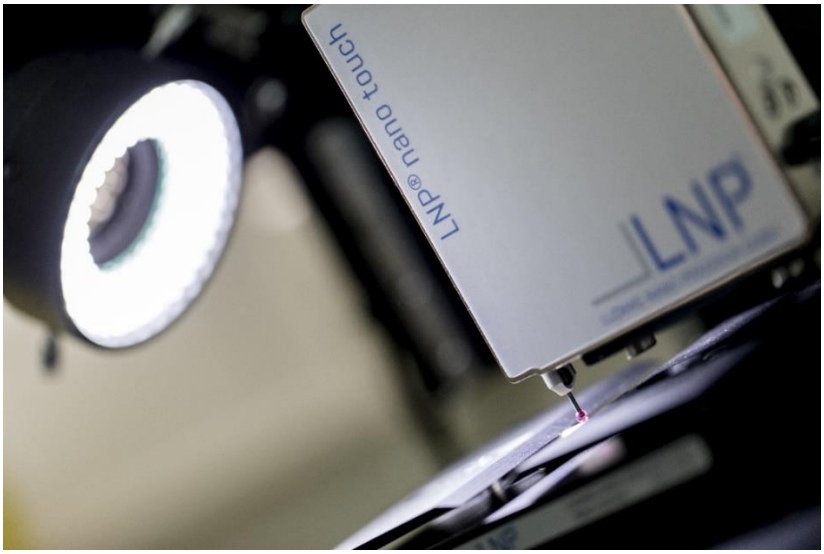

Abb. 10: Prüfung mit dem Mikroindentor (rosa Kugel, rechts unten im Bild) LNP® nano touch (Bild: Tobias Ehmer)

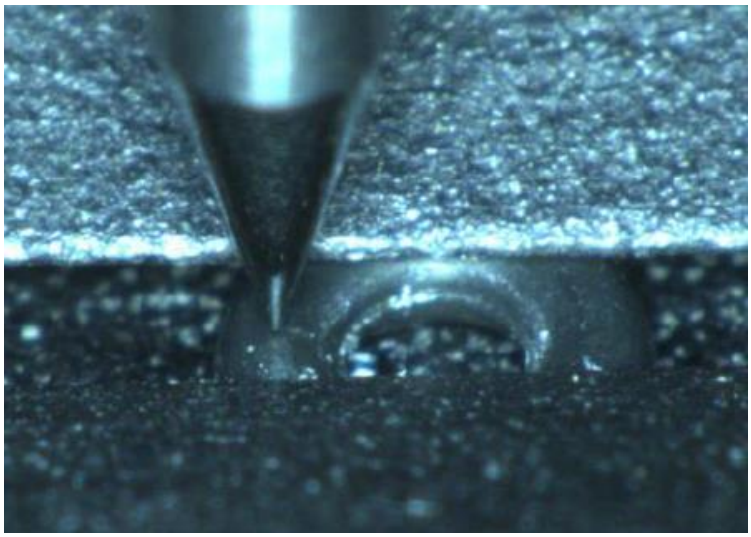

Abb. 11: Härtemessung eines O-Ringes mit einem Durchmesser von 0,5 mm mit Hilfe des LNP® nano touch (Bild. O-Ring Prüflabor Richter)

Moderne Prüfverfahren im Grenzbereich zwischen physikalischer und chemischer Analytik (z.B. TGA, DSC, FTIR, GC-MS) kommen mit kleinsten Probekörpern aus. Die Probekörper müssen nicht genormten Vorgaben entsprechen, so dass Analysematerial problemlos aus Fertigteilen entnommen werden kann.

Auch wenn heute sehr viele Parameter an Fertigteilen geprüft werden können, gibt es nach wie vor Spezifikationen mit Forderungen, welche nur an Normprobekörpern (z.B. Schulterstäbe) überprüft werden können. Der Dichtungsanwender sollte immer im Hinterkopf behalten, dass die Prüfplatten, aus welchen die Normprobekörper ausgestanzt werden, unter idealen Bedingungen vulkanisiert werden, welche so an Fertigteilen aus geometrischen oder Kostengründen meist nicht erreicht werden können.
Zum Vergleich verschiedener Mischungen bzw. Materialkennwerte sind Normprobekörper nach wie vor unerlässlich, weil durch sie der Einfluss unterschiedlicher Bauteilgeometrien, die unterschiedliche Diffusionsgeschwindigkeiten (z.B. bei Quellungen, Sauerstoffzutritt bei Alterungen) verursachen, entfällt. Wenn im Vergleich zum Fertigteil aber dann auch nur eine Komponente bezüglich Qualität (z.B. Polymerviskosität) oder Quantität (z.B. Menge an Ozonschutzwachsen) geändert wird, verliert dieser Vergleich an Aussagekraft.

Fazit
In einer globalen Beschaffungswelt schließt sich eine direkte Überwachung der Herstellungsprozesse beim Lieferanten weitgehend aus. Da sich, bedingt durch die erforderliche Vulkanisation, bei Gummiteilen die Prozessbedingungen der Herstellung sehr viel stärker auf die Materialeigenschaften abbilden als bei anderen Werkstoffen, ist eine Fertigteilprüfung unerlässlich. Effektiver, pragmatischer, das heißt kostenbewusster Umgang mit dieser Thematik bedeutet, an Fertigteilen Prüfvorgaben zu spezifizieren und zu überwachen.

4. Wie behalte ich da den Durchblick: Normen und Spezifikationen?

Normen werden von übergeordneten nationalen, staatlichen oder internationalen Gremien erstellt. Sie definieren Verfahren, Abläufe und Eigenschaften bestimmter Systeme und Werkstoffe. Die meisten Normen im Elastomerbereich befassen sich mit Prüfverfahren. Normen beruhen auf anerkannten Regeln der Technik. Sie dienen einer Vereinfachung durch Standardisierung, sie schaffen Qualitätsstandards und werden in langwierigen Verhandlungen in einem Konsensverfahren erstellt.
Spezifikationen werden in der Regel von Firmen, Verbänden oder Organisationen herausgegeben und schreiben bestimmte Eigenschaften (Vorgabe von Sollwerten) eines Produktes vor. Sie werden meist Teil eines Vertrages, wenn Produkte nach ihren Vorgaben bestellt werden.

4.1 Prüfnormen[26]

In Prüfnormen oder -standards werden bestimmte Prüfverfahren (z.B. Zugversuch, Druckverformungsrestprüfung) genau beschrieben und geregelt. Dies umfasst alle Bereiche von der Herstellung der Probekörper, über deren Konditionierung, die Prüfungsdurchführung bis zur

[26] Weiterführende Informationen zur Entwicklungsgeschichte von Normen: BROWN, Roger: 50 Years of Polymer Testing, iSmithers, 2009, S. 57ff.

Berechnung und Auswertung der Prüfergebnisse. Nach mehreren Jahren werden Normen überarbeitet und neu herausgegeben.
Bis in die 1990er Jahre waren im Elastomerbereich nationale Normen die am häufigsten eingesetzten: in Deutschland die DIN-Normen, in der DDR die TGLs, in Großbritannien der BS (British Standard), in der Sowjetunion und Russland die GOST-Normen und in den USA die ASTM-Normen.
Inzwischen werden für Elastomerprüfungen vornehmlich internationale ISO-Normen herangezogen. Diese sind meist auf Englisch, deutsche Übersetzungen werden als DIN ISO-Normen (mit der gleichen Nummer, aber anderes Ausgabedatum) bezeichnet. Die Internationale Organisation für Normung (engl. International Organization for Standardization, Kurzbezeichnung ISO von griech. „isos“ = gleich) wurde 1946 gegründet und begann 1947 ihre Arbeit. Die Fachgruppe ISO TC45 für Gummi und Gummiprodukte wurde 1947 gegründet und kam zum ersten Mal 1948 in London zusammen. Durch langwierige Abstimmungsprozesse kam es erst im Jahr 1957 zur Herausgabe von ersten ISO Recommendations, der damaligen Bezeichnung für die heutigen ISO Standards.[27] Bis auf wenige Ausnahmen wurden bis ca. 1980 alle wichtigen Prüfmethoden für Elastomere durch die ISO standardisiert.[28]
In den USA werden ISO Normen relativ selten angewendet, dort wird das Prüfwesen von ASTM-Standards dominiert. Diese stimmen in vielen Punkten mit ISO-Normen überein. Die kleineren Abweichungen oder eigene Prüfverfahren sind meist der jeweils eigenen historischen Entwicklung geschuldet. So wird bspw. bei der Druckverformungsrestprüfung in der ASTM D395 neben des Druckverformungsrestes (DVR) mit konstantem Verformungsweg auch die Variante des DVR mit konstanter Verformungskraft beschrieben. Letztere Variante ist in Europa nicht üblich und wird auch in der entsprechenden ISO 815-1 nicht aufgeführt.

4.2 Werkstoffnormen

Es wurden und werden immer wieder Versuche unternommen auf Normungsebene Werkstoffe zu spezifizieren.
Eines der prominentesten Beispiele ist das US-amerikanische Klassifizierungssystem ASTM D2000.[29] Ein Konstrukteur kann mit diesem System einen „line call-out“ erstellen. Mit Hilfe von Buchstaben und Zahlen kann er so die Eigenschaften eines elastomeren Werkstoffes definieren (z.B. Härte, Festigkeit, Quell- und Hitzebeständigkeit u.v.m.). Ein Dichtungshersteller muss diesen Code wieder auflösen, um einen Werkstoff zu finden bzw. zu entwickeln, der diese Vorgaben erfüllt. Dieses System hat sich in Europa nicht durchgesetzt, da es einige Nachteile aufweist: Ein Konstrukteur muss ein sehr tiefes Gummifachwissen besitzen, um nicht zwingend notwendige Eigenschaften zu fordern, die zu einem starken Kostenanstieg führen würden. Durch die vielen Spezifikationsvarianten wird das allgemeine Ziel die Anzahl von Mischungen zu reduzieren, konterkariert. Kritisch werden auch zu große Toleranzbereiche bei der Quellung gesehen. Zur Klassifizierung der Hitze- und Quellbeständigkeit werden Kurzzeitprüfungen herangezogen, welche keine ausreichende Aussage über das Langzeitverhalten liefern.[30]
Ein ISO -Versuch (ISO 4632-1) eines Klassifizierungssystems für Elastomere basierte mit kleineren Abweichungen auf dem ASTM D 2000-System und wurde im August 1982 herausgege-

[27] Vgl. Ebd., S. 8
[28] Vgl. Ebd., S. 130
[29] ASTM D 2000:2018 Standard Classification System for Rubber Products in Automotive Applications
[30] Vgl. NAGDI, Khairi: Gummi-Werkstoffe Ein Ratgeber für Anwender, Dr. Gupta Verlag, Ratingen, ²2002, S. 365

ben. Jedoch wurde diese Norm im Januar 2001 ersatzlos zurückgezogen. Ein deutscher Versuch war die DIN 78078 (Ausgabe: 1986-08), die sich an der ISO 4632-1 orientierte. Diese Norm wurde ebenso zurückgezogen. [31]
Ein wegweisender Ansatz im Bereich einer Werkstoffnorm ist die ISO 3601-5[32], welche Vorgabewerte für wichtige Parameter von O-Ring Werkstoffen gibt. Außerdem werden auch Sollwerte für fertige Dichtungen (O-Ringe) angegeben. Setzt ein Konstrukteur O-Ringe nach dieser Norm ein, kann er sicher sein, einen guten Stand der Technik zu bekommen, sowohl was die Rezepturqualität (Sollwerte für die Materialien) als auch was die Verarbeitungsqualität (Sollwerte am fertigen Erzeugnis O-Ring) angeht. Diese Werte lassen sich teilweise auch auf andere Dichtungsgeometrien übertragen. Im Gegensatz zum ASTM D 2000-System muss sich ein Konstrukteur nicht tief in die Thematik einarbeiten, sondern bekommt bei Bestellung nach dieser Norm gute bis sehr gute Dichtungswerkstoffe geliefert. Hat er eine ganz spezielle Anforderung, kann er dies abweichend bzw. ergänzend in der Zeichnung in Textform vermerken. Somit bleiben die Änderungen für jedermann einfach nachvollziehbar.

4.3 Werkstoffspezifikationen

Werkstoffspezifikationen werden in der Regel von den Anwendern von Dichtungen oder sonstigen Elastomerbauteilen erstellt. Während mitunter noch in den 1950er Jahren Materialspezifikationen wie „Gummi, schwarz“ auf der Zeichnung anzutreffen waren, ist eine so geringe Werkstoffspezifikation heute undenkbar. Wegen immer höherer chemischer und thermischer Anforderungen an den Werkstoff, einer stetig zunehmenden Mischungsvielfalt und wegen neuer Einsatzfelder, ist es nicht mehr sinnvoll und teilweise unmöglich, dass ein Konstrukteur die Materialanforderungen als Zeichnungstext angibt. Deswegen wird in großen Unternehmen die Materialspezifikation in Fachabteilungen erstellt und firmenweit in Hausnormen bzw. Liefervorschriften festgelegt. „Bei der Aufstellung von Werkstoffspezifikationen ist es unbedingt erforderlich, nur die *tatsächlich* herrschenden Einsatzbedingungen anzugeben. Schraubt man eine Anforderung *unnötig* hoch, muss man u.U. Einbußen an anderer, vielleicht wichtigerer Stelle in Kauf nehmen. (…) Es gibt eine Reihe von Eigenschaften, die miteinander verknüpft sind. (…) So ist es z.B. nicht möglich, sehr geringen Druckverformungsrest und sehr hohe Weiterreißfestigkeit in einem Werkstoff zu vereinen.“[33]
Besonders wegweisend für Werkstoffspezifikation sind seit Jahrzehnten die Luftfahrt- und Automobilindustrie, deren Spezifikationssysteme durch praktische Anwendungserfahrung – mitunter in neuen Grenzbereichen – immer ausgefeilter wurden.
Exemplarisch werden im Folgenden drei Ansätze von Werkstoffspezifikationen aus dem Automobilbereich beschrieben.

4.3.1 „Best in class“ - Ansatz

Bei diesem System lässt sich die Werkstoffabteilung Muster neuentwickelter Gummicompounds verschiedener potenter Lieferanten vorstellen. Diese werden vergleichend untersucht und die Spezifikation wird um den oder die besten Werkstoffe herum geschrieben. Die Fachabteilung weist dann dieser neuen spezifizierten Type in der Hausnorm einen Anwendungs-

[31] Vgl. Ebd., S. 368f.
[32] ISO 3601-5, Second Edition 2015-04-01: Fluid power systems — O-rings — Part 5: Suitability of elastomeric materials for industrial applications
[33] NAGDI, Khairi: Gummi-Werkstoffe Ein Ratgeber für Anwender, Dr. Gupta Verlag, Ratingen, ²2002, S.374

bereich zu. In der Regel haben Neuentwicklungen bessere Eigenschaften als die Vorgängermischungen. Werden aber Neuentwicklungen durch Umweltvorgaben (z.B. bleifreies ECO) notwendig, die ein reduziertes Eigenschaftsbild ergeben, müssen diese neuen Mischungen noch in den jeweiligen bisherigen Anwendungen erprobt werden.
Mit diesem System stellt die Werkstoffabteilung sicher, dass Konstrukteure die besten Werkstoffe auf dem Markt erhalten. Außerdem lässt sich so die Anzahl der spezifizierten Werkstoffe relativ geringhalten, da man mit den besten Werkstoffen große Anwendungsbereiche abdecken kann. Nachteil dieses Systems ist der Einsatz von sehr hochwertigen und kostenintensiven Werkstoffen auch in Bereichen, welche einen solchen Qualitätsstandard gar nicht benötigen. Diese Art der Spezifizierung erfordert oft aufwändige interne Freigabeverfahren, so dass dieses System meist auch träge ist und nicht besonders schnell auf aktuelle Forderungen reagieren kann. Allerdings wird die Flexibilität dieses Systems wesentlich höher, sofern prinzipiell die Bereitschaft da ist, anwendungsbezogen abzuwägen, wo Abweichungen zulässig sind.

4.3.2 Flexibles Tabellensystem

Dieser Ansatz zeichnet sich durch eine Spezifikation aus, welche einen Rahmen vorgibt und die durch eine kontinuierlich erweiterte Tabelle ergänzt wird. Die Rahmenspezifikation folgt den üblichen aufwändigen firmeninternen Freigabeprozeduren, während die Freigabetabelle mit ähnlichen Werkstoffprofilen für dieselbe Anwendung erweitert werden kann.
So können Werkstoffe passgenau für bestimmte Anwendungen schnell und gut nachvollziehbar zugeschnitten werden. In der Spezifizierung und Erprobung liegt hier ein größerer Aufwand und größeres Risiko als im oben beschriebenen System, aber es ist individueller, flexibler, schneller und meist kosteneffizienter. Nachteilig ist aber eine Zunahme von spezifizierten Werkstofftypen, wenn die herausgebende Fachabteilung nicht regelmäßig Spezifikationen aussortiert oder zusammenfasst.

4.3.3 Edukatives System („Hilfe zur Selbsthilfe“)

Durch Globalisierung, Fusionen und Kooperationen entstehen immer größere Automobilhersteller. Während früher einige Firmenphilosophien auf das Subsidiaritätsprinzip setzten, d.h. zugekaufte Firmen lösen Werkstofffragen weiterhin soweit wie möglich selbst, geht heute der Trend zur Zentralisierung. Um Kosten einzusparen werden viele Fachabteilungen zugekaufter Unternehmen geschlossen und die Lösungen werden von der Fachabteilung der Konzernmutter vorgegeben. Trotz moderner Kommunikationsmöglichkeiten nimmt auf Grund der Größe fusionierter Unternehmen der Austausch zwischen Konstrukteur und Werkstofffachabteilung ab. Hier ist ein Trend hin zu erklärenden Spezifikationen erkennbar. Der Konstrukteur bekommt z.B. in übersichtlichen Schaubildern nähere Informationen zu Zusammenhängen. So kann er bspw. einen passenden FKM anhand von seiner benötigten Kälteflexibilität und der max. zulässigen Volumenquellung in Medien auswählen. Er erhält mit dem Schaubild dann Aussagen über die geeignete Polymerart, den Fluorgehalt und das Vernetzungssystem.
Die Möglichkeiten an Dichtungslösungen nehmen immer mehr zu und werden für einen normalen Konstrukteur eigentlich unüberschaubar. Auf der anderen Seite sollte er nicht veraltete Dichtungslösungen einsetzen, eben nur, weil der diese kennt oder sich auf die Expertise eines einzelnen Lieferanten verlassen muss, der seine bereits bestehenden Lösungen verkaufen möchte. Deswegen ist das Thema Weiterbildung im Bereich Elastomer- und Dichtungsfachwissen sehr empfehlenswert. Dieser edukative Spezifikationsansatz macht einen Schritt in diese Richtung.

4.4 Prüfvorschriften im Rahmen von Spezifikationen

In heutigen Werkstoffspezifikationen werden als Prüfverfahren meist ISO-Normen herangezogen. Jedoch gibt es in Sonderfällen oder aus langjährigen Unternehmenstraditionen heraus firmeneigene Prüfvorschriften (z.B. Prüfvorschriften PV des VW-Konzerns). Aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit und des globalen Kostendrucks empfiehlt es sich, wo immer möglich, auf ISO-Standards zu wechseln.
Eine Sonderrolle spielen die Prüfvorschriften des VDA 675[34]. Hier handelt es sich um Prüfvorschriften eines Branchenverbandes, welche früher (1990er[35] und 2000er Jahre) oft in Werkstoffspezifikationen von Automobilzulieferern und -herstellern herangezogen wurden. Bei Standardprüfmethoden werden aber heute meist ISO Standards eingesetzt und Prüfvorschriften der VDA 675 kommen nur noch bei Sondermethoden zum Einsatz.

Fazit
Ohne Spezifikationen oder den Bezug auf Werkstoffnormen geht es praktisch kaum. Die Pflege und die Anpassung an neue Anforderungen erfordert einen Werkstoffspezialisten. Für viele Anwender reicht es allerdings schon aus, einen allgemeinen Stand der Technik für Dichtungswerkstoffe einzusetzen. Für diese Anwendergruppe wird die ISO 3601-5 empfohlen, also nicht nur O-Ring Anwendern.

5. Wie erkenne ich gute Elastomerprüfung? – Tradition und Innovation

Moderne elastomere Dichtungen weisen eine hohe Komplexität auf. Dies hat mit der globalen Verfügbarkeit von unüberschaubar vielen Polymertypen je Basispolymer und vielen tausend Möglichkeiten an weiteren Mischungschemikalien zu tun. Aber auch die Prozessbedingungen bei der Verarbeitung haben einen immensen Einfluss. Und schließlich sind die prüftechnischen Möglichkeiten begrenzt, die sich daraus ergebenden Eigenschaften ausreichend abzubilden. All diese Schwierigkeiten haben bei Anwendern eher zu einem konservativen Ansatz geführt. Deswegen rücken Anwender ungern von bewährten Lieferanten, Werkstoffen und Prüfverfahren ab. Nur wo der immense Kostendruck oder die Erweiterung der Einsatzgrenzen der Dichtungen dies erfordert, ist man dazu bereit, neue Wege zu gehen.
Das klassische Prüfwesen basierte hauptsächlich auf der korrekten und reproduzierbaren Durchführung lang eingeführter, v.a. physikalischer Prüfverfahren. Im Bereich der heutigen Elastomerprüftechnik geht es nicht darum, klassische, lang eingeführte Prüfverfahren gänzlich abzuschaffen, aber es ist wichtig, immer wieder aus heutiger Warte die Aussagekraft und Reproduzierbarkeit bestimmter Prüfmethoden kritisch zu hinterfragen. Das wohl am häufigsten eingesetzte Prüfverfahren in der Gummiindustrie ist die Shore A - Härteprüfung, die bereits 1915 eingeführt wurde. Inzwischen gibt es viel leistungsfähigere und aussagekräftigere Härteprüfverfahren mit einer höheren Reproduzierbarkeit. Jedoch ist das Shore A -Verfahren so weit verbreitet und zur Klassifizierung von Gummimischungen etabliert, dass es auf absehbare Zeit nicht durch andere Verfahren ersetzt werden wird.
Im modernen Prüfwesen geht es in erster Linie nicht um das Ersetzen traditioneller Prüfverfahren, sondern um einen ganzheitlichen Blick auf das Thema Elastomerprüfung, in welchem

[34] Bezugsquelle für noch aktuell verwendete VDA-Empfehlungen: https://webshop.vda.de/VDA/de/vda-empfehlungen?pagenumber=31 (Webseite zuletzt aufgerufen am 26.10.2021)
[35] Ursprünglich bestand die Richtlinie 67 aus einer Loseblattsammlung aus dem Jahr 1992 mit Ergänzungen in den Folgejahren: https://d-nb.info/95773445X (Webseite zuletzt aufgerufen am 26.10.2021)

sich traditionelle und moderne Verfahren ergänzen. Dieser ganzheitliche Ansatz umfasst neben den „hard skills“ bzw. der „hardware“ der Prüftechnik auch „soft skills“ wie z.B. Mitarbeiterqualifizierung, Akkreditierung u.v.m.

5.1 Mitarbeiterqualifizierung und Kommunikation

Auf absehbare Zeit wird der Mensch nach wie vor im Zentrum der Elastomerprüfung stehen. Gerade in Laboren mit vielen verschiedenen Kunden- und Prüfanforderungen ist eine weitreichende Automatisierung momentan aufgrund der Vielfalt an Prüfungsarten nur schwer vorstellbar.
Um möglichst Fehler durch Mitarbeiter auszuschließen, ist die Motivation von Mitarbeitern eine wichtige Aufgabe des Managements. Einige Prüftätigkeiten verleiten auf Grund ihrer Monotonie zum Abstumpfen und zur Unachtsamkeit. Durch eine Kommunikation mit Mitarbeitern auf Augenhöhe, durch Einsatz von KVP (**K**ontinuierlicher **V**erbesserungs**p**rozess) -Systemen und gemeinsamer Analyse von aufgetretenen Fehlern, werden Mitarbeiter in den großen Arbeitsprozess aktiv eingebunden. Gemeinsam entstehen bessere Lösungen, die den Laboralltag verbessern. Interne Weiterbildung und -qualifizierung sind ein weiterer Baustein zu einer verbesserten Qualität. Es macht einen Unterschied, ob man einen einfachen O-Ring prüft oder ob man weiß, dass die Prüfung dieses O-Rings wichtig für die korrekte Funktion einer komplexen Maschine ist. Auch eine vermehrte Wertschätzung werkstofftechnischer Kompetenz durch das Management wird sich hier positiv auswirken. Diese Kompetenz ist nämlich eine wichtige Voraussetzung für Innovationen.

5.2 Zertifizierung und Akkreditierung

Zertifizierung und Akkreditierung sind wichtige Bausteine für einen hohen Qualitätsstandard in der Werkstoffprüfung. „Die Zertifizierung wird von einer unabhängigen Zertifizierungsstelle (z.B. TÜV, DQS u.a.) durchgeführt und ist zeitlich befristet. Die meisten Industrieunternehmen sind heute nach ISO 9001 (Qualitätsmanagement) und ISO 14001 (Umweltmanagement) zertifiziert. In der europäischen und nordamerikanischen Automobilbranche sind Zertifizierungen nach der ISO/TS 16949 üblich. Generell ausgedrückt handelt es sich um Managementsysteme, die sicherstellen sollen, dass bestimmte festgelegte Anforderungen für ein Produkt, einen Prozess, für Mitarbeiter oder ein System erfüllt werden. Es wird also in erster Linie die Richtigkeit von Abläufen untersucht, nicht ob deren Inhalte sachlich korrekt oder in jedem speziellen Einzelfall sinnvoll sind. Vereinfacht ausgedrückt könnte man sagen, dass die Zertifizierung eine Art Vorstufe zur Akkreditierung ist.
Ein Prüflabor ist dann akkreditiert, wenn es die Forderungen der DIN ISO/IEC 17025 erfüllt und dies auch von einer dafür qualifizierten Prüfstelle bestätigt wird. Diese Norm beschreibt die Anforderungen an die fachliche Kompetenz und an das QM-System eines Prüflabors [und] wird weltweit anerkannt (…). Sich dem Verfahren einer Akkreditierung zu unterziehen und die dabei gestellten Anforderungen zu erfüllen bedeutet einen hohen internen Arbeits- und Organisationsaufwand und verlangt enorme fachliche Kompetenz (…). Eine erfolgreiche Akkreditierung ist ein klares Zeichen für und ein eindeutiges Bekenntnis zu gelebter Qualität.“ [36] Auf der Webseite der Akkreditierungsstelle können in der Anlage zur Akkreditierungsurkunde die

[36] Internetinformation: „Qualitätssicherung im O-Ring Prüflabor Richter: Akkreditierung“, Webseite zuletzt aufgerufen am 02.05.2021: https://www.o-ring-prueflabor.de/de/prueflabor/akkreditierung/

Prüfmethoden und zugehörigen Prüfnormen eingesehen werden, nach welchen das jeweilige Labor akkreditiert wurde.

5.3 Digitalisierung

In so gut wie allen Bereichen der Technik ist die Digitalisierung eines der wichtigsten Entwicklungsfelder und auch ein bedeutender Innovationstreiber. Seit den 1960er Jahren wird die elektronische Datenverarbeitung bei der Elastomerprüfung eingesetzt.[37] Anfänglich nur in großen Forschungslaboren, so ist ihr Einsatz inzwischen auch in kleinen Betrieben zum Standard geworden. Entscheidend ist also heutzutage nicht mehr, ob man EDV im Prüfwesen einsetzt, sondern wie man es macht.
Der Trend im modernen Prüfwesen geht immer mehr zum papierlosen Labor. Das Prüfpersonal erhält seine Arbeitsaufträge nicht mehr in Papierform, sondern per Tablet. Durch Eingabemasken wird sichergestellt, dass der Mitarbeiter wichtige Arbeitsschritte nicht mehr vergessen oder unvollständig ausführen kann. Andernfalls kommt er mit seiner Eingabemaske nicht weiter. Gleichzeitig können dabei Probekörper, Prüfgefäße oder verwendete Medien ohne signifikanten Mehraufwand fotografisch dokumentiert werden, was letztlich die Prüfungsdurchführung noch transparenter und damit belastbarer macht.
Moderne Datenverarbeitungssysteme, aber auch Prüfgeräte, einschließlich der Einlagerungsöfen sind zu hundert Prozent von elektrischer Energie abhängig. Um Datenausfälle, aber auch um Störungen in Prüfabläufen durch kürzere Stromausfälle abzusichern, empfiehlt sich der Einsatz einer unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV). Bei diesem System werden alle Verbraucher aus Akkumulatoren gespeist, die ununterbrochen vom Stromnetz nachgeladen werden können. Bei Stromausfällen kann eine solche Anlage mehrere Stunden überbrücken. Dies ist genügend Zeit zum Überbrücken kurzer Stromausfälle oder zum kontrollierten Herunterfahren bei längeren Stromunterbrechungen.[38]

5.4 Integration und Vernetzung

Besonders bei der Produktion von Elastomerartikeln ist das Interesse an zerstörungsfreien Inline-Prüfverfahren groß (z.B. Vulkanisationsgrad, Maßhaltigkeit bei der Extrusion u.v.m.).
Aber auch in anderen Bereichen, wie z.B. der Wareneingangsprüfung geht es darum, notwendige Prüfungen sinnvoll in Prozesse zu integrieren. Je besser die Integration in bestehende Abläufe, um so bereitwilliger werden die Prüfungen angenommen. Integration bedeutet nicht zwangsläufig, dass Prüfungen an Ort und Stelle integriert werden müssen. Sind bspw. im eigenen Hause nicht die Möglichkeiten für eine Wareneingangsprüfung vorhanden, so kann diese Dienstleistung auch an externe Labore vergeben werden. Durch genaue Absprachen über zeitliche Abläufe können auch externe Prüfdienstleistungen planbar und verlässlich in die eigenen firmeninternen Abläufe integriert werden.
Manchmal sind in einem innovativen Prüfverfahren die Aussagen mehrerer bisheriger Qualitätsprüfungen integriert und können so entfallen (siehe Artikelserie Teil 5, Kap.8).

---

[37] Vgl. CLAMROTH, R. und PICHT, W.: Electronic data processing and automation in elastomer testing in: Polymer Testing, Vol. 2, Issue 1, January-March 1981, S. 3-27, Artikel online verfügbar, zuletzt aufgerufen am 02.05.2021: https://doi.org/10.1016/0142-9418(81)90019-2

[38] Vgl. Internetinformation des O-Ring Prüflabor Richter: „USV-Anlage in Betrieb genommen“, Webseite zuletzt aufgerufen am 02.05.2021: https://www.o-ring-prueflabor.de/de/aktuelles/unterbrechungsfreie-stromversorgung-usv-fuer-das-gesamte-labor-in-betrieb/

Die meisten modernen Elastomerprüfgeräte besitzen Schnittstellen, so dass eine Vernetzung und eine Integration in eine Labordatensoftware möglich ist. Dadurch werden Übertragungsfehler durch den Prüfer ausgeschlossen und es kommt zu Zeiteinsparungen.
Zur Sicherstellung konstanter Prüfbedingungen werden wichtige Parameter an bestimmten Prüfgeräten fortlaufend digital erfasst und durch Vernetzung zentral gespeichert. So empfiehlt es sich bspw. die Temperaturen der Einlagerungsöfen mitzuschreiben. Wird neben den Temperaturen aus der Ofenregelung auch die Temperatur eines zusätzlichen Ofentemperaturfühlers erfasst, erhält man eine hohe Redundanz und Sicherheit.

5.5 Automatisierung

Beim Schlagwort Automatisierung denkt man unweigerlich an den Roboter, welcher den prüfenden Labormitarbeiter ersetzen soll. Es gibt solche stationären Robotersysteme, die bei Großserienprüfungen programmiert werden können. Dies macht aber nur in besonderen Nischeneinsätzen Sinn.[39] Aber inzwischen gibt es auch Ansätze mit leicht anzulernenden Robotern für die Prüfung von Kleinserien.[40] Wann und inwieweit sich dies in der Laborpraxis durchsetzen wird, bleibt abzuwarten.
Kleinere Automatisierungslösungen werden bereits in vielen Laboren eingesetzt und führen zu großen Zeitersparnissen. Besonders in der Härteprüfung kann durch den Einsatz von Drehtellern (**Abb. 12**) die Prüfung mehrerer Dichtungen automatisiert erfolgen. Gerade bei Messungen mit der zeitintensiven Messmethode IRHD,M (Messzeit 30 Sekunden) kann – bei größeren Dichtungsanzahlen mit vielen Messpunkten – der Prüfer zwischenzeitlich anderen Tätigkeiten nachgehen.
In der chemischen oder physikalischen Analytik gehören Autosampler zum Stand der Technik. Damit können beispielweise GC-MS- oder TGA-Messungen auch nachts automatisiert durchgeführt werden. Dies führt neben der Zeitersparnis zusätzlich zu einer besseren Geräteauslastung auch außerhalb üblicher Arbeitszeiten.

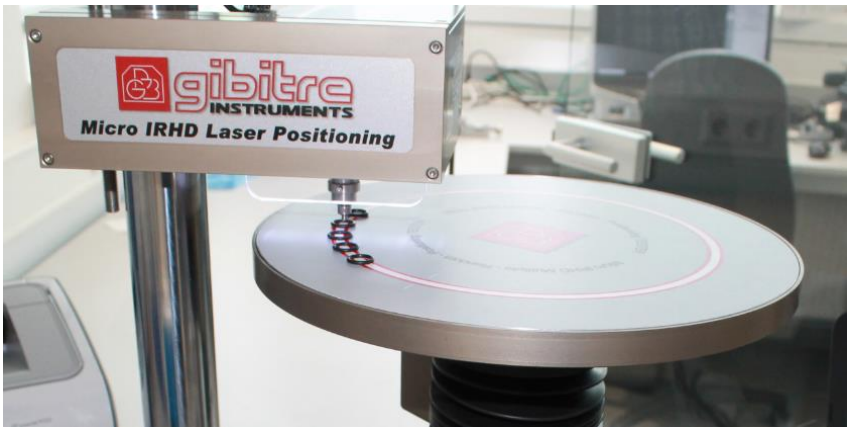

Abb. 12: Der Drehteller wird manuell bestückt. Das IRHD,M-Prüfgerät fährt die O-Ringe automatisch an, um deren Härte zu prüfen (Foto: O-Ring Prüflabor Richter GmbH)

[39] Beispiel aus dem Metall- und Kunststoffprüfbereich der Firma Tinius Olsen (Webseite zuletzt aufgerufen am 13.05.2021): https://www.schooloftesting.com/download/Tinius%20Olsen%20Literature/automated_system_-_de/AS0000DE01-Automated-System-DE.pdf
[40] Vgl. Internetinformation von ZWICK /ROELL: „Automatisierungstrends in der Materialprüfung “, Webseite zuletzt aufgerufen am 02.05.2021: https://www.zwickroell.com/de/news-events/news/automatisierungstrends-in-der-materialpruefung/

5.6 Miniaturisierung

Durch die Mikropräzisionstechnik wurden in den letzten Jahren in der Elastomerprüfung immer mehr Möglichkeiten eröffnet, um auch mit kleinsten Probekörpern geometrieunabhängige Materialkenndaten zu ermitteln.
Mit Hilfe einer TGA (Thermogravimetrische Analyse) lassen sich an kleinsten Proben von wenigen Milligramm quantitative Aussagen über Mischungsbestandteile machen. Um qualitative Aussagen zum Compound geben zu können, genügen kleinste Materialmengen für die Analyse in einem Gaschromatographen (GC-MS) (**Abb. 13**), kleinste Proben genügen auch für die DSC-Analyse (Aussagen über das Kälteverhalten).

Abb. 13: Mit Hilfe eines Gaschromatographen mit Massenspektrometer (GC-MS) lassen sich Aussagen über die qualitative Zusammensetzung einer Gummimischung machen. (Foto: Tobias Ehmer)

Durch Einsatz eines Mikroindentors (LNP nanotouch®) können bisher nicht mögliche Messungen von Härte und viskoelastischen Eigenschaften an kleinsten Probekörpern bzw. Dichtungen durchgeführt werden.

5.7 Künstliche Intelligenz

In der industriellen Prüfpraxis von Elastomeren ist der Einsatz von Künstlicher Intelligenz (KI) momentan noch schwer vorstellbar. Dennoch gibt es in der Forschung bereits interessante Ansätze, so z.B. zur Vorhersage mechanischer Eigenschaften gealterter und nicht gealterter Gummimischungen[41], zur sensorbasierten Echtzeitüberwachung von Vulkanisationsprozessen [42], zur Reduzierung von Schleifen in der Mischungsentwicklung[43] oder einer verbesserten

[41] Ružiak, Ivan; Koštial, Pavel; Jančíková, Zora; Gajtanska, Milada: Artificial Neural Networks Prediction of Rubber Mechanical Properties in Aged and Nonaged State in: Improved Performance of Materials, Springer Nature, May 2018, Artikel digital verfügbar, zuletzt aufgerufen am 02.05.2021: https://www.researchgate.net/profile/Lubos-Kristak/publication/317889383_Artificial_Neural_Networks_Prediction_of_Rubber_Mechanical_Properties_in_Aged_and_Nonaged_State/links/5cadcbc9299bf193bc2dd0f5/Artificial-Neural-Networks-Prediction-of-Rubber-Mechanical-Properties-in-Aged-and-Nonaged-State.pdf
[42] Jonghyuk Kim und Hyunwoo Hwangbo: Sensor-Based Real-Time Detection in Vulcanization Control Using Machine Learning and Pattern Clustering in:Sensors 2018, 18(9), 3123, Artikel digital verfügbar, zuletzt aufgerufen am 02.05.2021: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6163192/pdf/sensors-18-03123.pdf
[43] Cooper Standard and uncountable: Artificial Intelligence for Material Development, Internetinformation, zuletzt aufgerufen am 02.05.2021: https://uploads-ssl.webflow.com/5dd1ef5e033682a6f0f8926f/5de5839121eea775f623fdd4_Case%2BStudy%2B-%2BCooper%2BStandard%2B%26%2BUncountable.pdf

Mischungsentwicklung mit Hilfe sogenannter „Materials Informatics Technology“ (MI), welche u.a. auf KI basiert.[44]

5.8 Reduzierung des Prüfaufwandes

Noch bis vor wenigen Jahren ging es bei der Beschaffung von Fachliteratur darum möglichst alles zu sammeln, was einem „über den Weg lief“. Durch die breite Nutzung des seit den 2000er Jahren verfügbaren World Wide Web geht es weniger um das Sammeln, sondern mehr um das sinnvolle Auswählen von Informationen.
Ähnlich ist es in der Prüftechnik. Es stehen immer mehr und komplexere Prüfverfahren zur Verfügung, dass man bei den meisten Fragestellungen vorab überlegen muss, welches Verfahren im jeweiligen Zusammenhang Sinn ergibt. Nicht alles, was zu prüfen möglich ist, ist auch gut und sinnvoll.
Wie eine große Bibliothek Bücher ähnlichen oder sich überschneidenden Inhaltes besitzt, sollten auch große Prüflabore möglichst umfassend alle wichtigen Prüfmethoden abdecken können. Aus der Sicht eines Dichtungsanwenders geht es aber darum mit wenigen Prüfungen bzw. Prüfmethoden und geringem Aufwand möglichst viele Antworten auf seine Fragen zu bekommen.
In der Regel hat ein Dichtungsanwender mit drei Prüfbereichen zu tun: Prüfungen zur Werkstofffreigabe, zur internen QS und zur Ermittlung von Daten für die Simulation. Der Umfang von Freigabeprüfungen wird in den jeweiligen Spezifikationen fest vorgegeben und auf diese hat ein Anwender keinen Einfluss. Diese Prüfungen erfolgen entweder beim Mischungshersteller oder in unabhängigen Prüflaboren. Am interessantesten ist der Bereich der Qualitätssicherung. In diesem Bereich ist es lohnenswert mit fachlich kompetenten Beratern für die eigenen Produkte einen sinnvollen und aussagekräftigen Prüfumfang festzulegen. Inzwischen führen nicht nur sehr große Unternehmen numerische Bauteilsimulationen durch, deswegen stellt sich für immer mehr Anwender die Frage, wie sie mit wenigen Prüfmethoden zu den Materialkennwerten kommen, welche sie für ihre Berechnungen benötigen.
Besonders im Bereich der Kraft-Verformungsmessungen gibt es mehrere Prüfgeräte, welche mit einem Prüfdurchgang vielfältige Aussagen zu den elastischen Eigenschaften eines Werkstoffes geben können, wie die dynamisch-mechanische Analyse (DMA), die Mikroindentorprüfung (LNP nanotouch®) oder das Prüfgerät Jidoka S101 II.
Vor der Einführung komplexerer neuer Prüfmethoden bei Dichtungsanwendern sollte sichergestellt sein, dass intern das nötige Fachwissen vorhanden ist, um diese Methode auch richtig einsetzen und verstehen zu können. Nur so kann sie helfen mehr Aussagen und Fakten für Entscheidungen bei möglicherweise weniger Prüfaufwand zu bekommen.

Fazit

Effizient prüfen bedeutet heute zunächst einmal das große Portfolio an Prüfgeräten aus einer Kombination an klassischen („Old School“) und modernen („New School“) Verfahren zu kennen, und diese gezielt einzusetzen. Hier wurden in den letzten 20 Jahren erstaunliche Fortschritte erzielt. Akkreditierung und Digitalisierung haben darüber hinaus zu einer Erhöhung der Belastbarkeit der Ergebnisse geführt. Damit Materialspezialisten auf der Höhe der Zeit bleiben, sind kontinuierliche Fortbildungen notwendig. Damit können sie für ihre Arbeitgeber zum Innovationstreiber werden.

44 TOYO TIRES: Advancing the Processing Technology for Rubber Materials Using Materials Informatics Technology, Press Release, Apr. 22, 2020, Webseite zuletzt aufgerufen am 02.05.2021: https://www.toyotires-global.com/press/2020/200422_e.html

6. Welche neuen innovativen Prüfverfahren helfen mir weiter? – Trends und Entwicklungen

Laut der indischen Marktforschungsgesellschaft Mordor Intelligence wird der weltweite Markt für Elastomerprüftechnik für 2020 auf 12,4 Milliarden US$ geschätzt, für 2026 wird eine Steigerung auf 16,09 Milliarden US$ prognostiziert.[45]
Diese hohen Werte mögen auf den ersten Blick überraschen, erklären sich aber dadurch, dass die Reifenindustrie großen Prüfbedarf besitzt und stetig wächst, hinzu kommen immer mehr Einsätze von Elastomeren in der Baubranche (z.B. Dachfolien aus Elastomeren). Als bedeutendste Prüffirmen nennt dieser Bericht v.a. Hersteller von Analytikgeräten und rheologischen Prüfungen (Alpha Technologies, TA Instruments, U-Can Dynatex Inc., Montech Rubber Testing Instruments und Goettfert Inc.).
Viele der in dieser Artikelserie vorgestellten Prüfverfahren verwenden Apparaturen von kleineren Herstellern, unter welchen es einen lebendigen Wettbewerb gibt. Außerdem befasst sich diese Artikelserie mit der Prüfung einer großen Bandbreite an Werkstoffen, während die Reifen- und Bauindustrie zwar sehr große Mengen, aber nur wenige verschiedene Polymertypen einsetzt.

6.1 Reflexionen über Trends der letzten Jahrzehnte in der Elastomerprüftechnik[46]

Einer der profiliertesten Elastomerprüfer Roger BROWN hat in seinem Lebensrückblick „50 Years of Polymer Testing“ ein kompaktes Resümee über Trends in der Prüftechnik gezogen:

Ein wichtiger Treiber für die Entwicklung neuer Prüfmethoden war die Qualitätskontrolle. Außerdem kamen immer mehr Prüfverfahren in den Blick, welche Materialdaten für die numerische Simulation ermitteln können. Großes Interesse bestand auch an zerstörungsfreien Prüfungen (NDT Non-destructive testing). Diese Verfahren konnten sich aber bis auf wenige Ausnahmen nicht durchsetzen, was wohl auch mit den hohen Anschaffungskosten zu tun haben könnte. Es wird aber immer Prüfaufgaben geben, welche nur zerstörend durchgeführt werden können, wie z.B. die Alterung. In solchen Fällen sind aber Prüfungen interessant, welche für Mehrpunktprüfungen mit einem Probekörper auskommen. BROWN bezeichnet dies als „zerstörungsfreie Überwachung eines zerstörenden Prozesses“[47].
Komplexe Prüfungen sind zwar oft teurer, aber aussagekräftiger. Deswegen muss immer sorgfältig zwischen dem Aussagewert und den Prüfkosten abgewogen werden. Die Automatisierung der Elastomerprüfung – wie sie noch in den 1970er und 1980er Jahren vorhergesagt wurde – kam nicht in diesem Ausmaß. Durch den modernen Aufbau und das Design von Prüfgeräten – im Vergleich zu ihren handwerklich anmutenden Vorgängern – wird oft eine Perfektion vorgetäuscht, die es so nicht gibt. Besonders mechanisch-physikalische Prüfverfahren haben ihre Schwachstellen und Ungenauigkeiten. Es geht also nicht um die perfekte Präsentation, sondern um einen Anwender, der um die Schwierigkeiten der jeweiligen Prüfmethoden weiß und dies in die Bewertung der Ergebnisse einfließen lassen kann. Die Bedienerfreundlichkeit moderner Prüfgeräte kann auch manchmal dazu verleiten zu wenig Achtsamkeit der Prüfdurchführung zu schenken. Neben der zerstörungsfreien Prüfung, der Automatisierung, wurde auch der dynamischen Prüfung von Elastomeren einen großes Wachstumspotential

[45] Mordor Intelligence: Rubber Testing Equipment Market – Growth, Trends, COVID-19 Impact, Forecasts (2021-2026), Webseite zuletzt aufgerufen am 13.05.2021: https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/rubber-testing-equipment-market
[46] Die Informationen dieses Unterkapitels stammen größtenteils aus folgender Quelle: BROWN, Roger: 50 Years of Polymer Testing, iSmithers, 2009, S.130ff.
[47] BROWN, Roger: 50 Years of Polymer Testing, iSmithers, 2009, S.131

vorhergesagt, was sich aber so nicht erfüllt hat. Früher hatte dies vermutlich mit den hohen Kosten solcher Prüfsysteme zu tun, heute ist vermutlich dem typischen Anwender noch nicht das Potential dynamischer Prüfungen in vollem Umfang bewusst bzw. es fehlt in einigen Betrieben das nötige Fachwissen, um solche Prüfergebnisse für die Praxis sinnvoll zu deuten.
Trotz immer größerer Fortschritte in der Simulation von Materialverhalten konnte Roger BROWN keinen Trend feststellen, dass auf Grund dessen Polymerprüfungen abnahmen. Vermutlich werden dadurch v.a. komplexere Anwendungen abgesichert und Entwicklungsschleifen reduziert. Physikalisch-mechanische Kennwerte haben nach wie vor eine sehr bedeutende Rolle bei der Vorstellung und Klassifizierung neuer Werkstoffe. Dies ist eigentlich verwunderlich, da bekannt ist, dass diese Einpunktmessungen relativ wenig zu den Einsatzmöglichkeiten eines Werkstoffes unter dynamischen Beanspruchungen in Kombination mit Temperatur und Vorspannungen aussagen und aussagekräftigere Prüfmethoden zur Verfügung stehen würden. Eine Änderung dieser Praxis ist aber nicht abzusehen.
Besonders wegweisend war und ist der Einsatz moderner Analysegeräte in der Elastomerprüftechnik, wie z.B. DSC (Differential Scanning Calorimetry), die Thermogravimetrie (TGA), die Infrarotspektroskopie (FTIR), die Gaschromatographie (GC-MS) oder die Kernspinresonanz (NMR). Generell ist die klassische Nass-Chemie im Bereich der Elastomeranalytik immer mehr auf dem Rückzug. Für die Schadensanalyse ist das Digitalmikroskop revolutionär gewesen. Das REM-EDX ist ebenfalls hilfreich bei der Detektierung von Schadensablagerungen und der Darstellung von Oberflächenstrukturen, aber auch bei Forschungen zu Polymerstrukturen.
In manchen Fällen kann die Standardisierung in Normen die Weiterentwicklung von Prüfungen behindern. So könnte bspw. der in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts eingeführte DeMattia Test durch servohydraulische Prüfgeräte ersetzt werden, mit welchen Spannungen und Kräfte in einem weiten Bereich individuell eingestellt werden können.
Roger BROWN beobachtete über die letzten Jahrzehnte einen stetigen Rückgang beim Bau von eigenen Prüfgeräten. Dies hat wohl zum einen mit der großen weltweiten Verfügbarkeit verschiedenster Prüfapparaturen zu tun, aber auch mit der Komplexität mancher Prüfgeräte, welche eine einfache mechanische Werkstätte nicht mehr selbst herstellen kann.
Im Laborwesen zeigt sich auch ein steigender Platzbedarf, was mehrere Ursachen hat. Die Zahl der verschiedenen Prüfgeräte nimmt zu. Moderne Prüfgeräte besitzen meist einen Bildschirm mit Tastatur, die Prüfung an größeren Fertigteilen (im Vergleich zu relativ kleinen Normprobekörpern) steigt. Moderne Qualitätssysteme fordern außerdem längere Aufbewahrungsfristen der Probekörper. Und schließlich entsorgt man ältere noch funktionsfähige Prüfgeräte ungern, auch wenn es dafür schon Ersatz gab.
Nach wie vor gibt es viele ähnliche Prüfmethoden bzw. Probekörper, von denen sich einige nur auf Grund von Traditionen halten. So ist fraglich, warum so viele verschiedene Probekörper für den Weiterreißwiderstand oder warum es so viele Prüfmethoden zum Kälteverhalten von Elastomeren gibt. Eine Vereinfachung oder Rationalisierung ist hier nicht in Sicht.

6.2 Beispiele innovativer Prüfgeräte für Elastomere

Die im Folgenden beschriebenen Geräte greifen exemplarisch Beispiele von neuen Methoden heraus, welche in unserem Laboralltag in den letzten Jahren bedeutende Verbesserungen sowohl in der Arbeitseffektivität als auch in der Aussagekraft brachten. Die Prüfapparaturen werden technisch nicht im Detail in ihrer Funktion erklärt, sondern nur aus dem Blickwinkel eines Anwenders beschrieben.

6.2.1 Bildgebende Verfahren

Eigentlich wird der Begriff „Bildgebende Verfahren“ hauptsächlich in der Medizintechnik verwendet, aber dieser Oberbegriff wird bei uns auch im Feld der Elastomerprüfung bzw. -analyse angewandt.[48] „Bildgebende Verfahren erzeugen aus Messgrößen eines realen Objektes ein Abbild, wobei die Messgröße oder eine daraus abgeleitete Information ortsaufgelöst und über Helligkeitswerte oder Farben kodiert visualisiert wird.“[49] In der klassischen Mikroskopie wird dieser Begriff kaum noch angewendet. Wir setzen jedoch keine klassischen Mikroskope, sondern moderne Digitalmikroskope ein, welche mehr Informationen bieten, wie z.B. eine Vermessung von Bauteilen, welche farblich kodiert werden kann. Ebenso fallen Mikroindentorprüfungen unter diese Kategorie, da sie anhand einer Messgröße (z.B. Veränderung des Härtewertes) ein Abbild bspw. eines Querschnittes einer untersuchten Dichtung geben können.

Digitalmikroskopie

Gegenüber der klassischen analogen Lichtmikroskopie bietet der Stand der Technik der Digitalmikroskopie neben den bekannten Vorteilen der digitalen Speicherung und Weiterverarbeitung eine Vielzahl an weiteren Möglichen für die alltägliche Laborarbeit und Schadensanalyse[50]:

- 3D-Bilddarstellung
- Vergrößerungen bis 6000-fach
- Verschiedene optische Effekte, z.B. zur Reduktion von Reflexionen oder zur punktuellen Ausleuchtung bestimmter Bildbereiche
- Panoramabilddarstellung größerer Objektbereiche
- 3D-Vermessung
- Optischer Schatteneffekt Modus zur Darstellung geringster Unebenheiten bzw. Strukturen
- Rauheitsmessungen an Oberflächen
- Restschmutzanalysen

Diese ganzen Möglichkeiten ergeben sich bei einer intuitiven und einfachen Bedienung ohne aufwendige Probenaufbereitung. Damit kann sich der Einsatz eines Digitalmikroskops auf dem neuesten Stand der Technik schon in kurzer Zeit amortisieren und gleichzeitig die Qualität der Ergebnisse verbessern. Im O-Ring Prüflabor werden aktuell 3 Generationen von Digitalmikroskopen je nach Aufgabenstellung eingesetzt.

Mikroindentor LNP nanotouch®

Durch eine hochauflösende Kraft- und Wegmessung und der Verwendung von stark miniaturisierten Eindringkörpern ist es möglich, ortsaufgelöste Härtewerte gemäß der verallgemeinerten Formel aus der IRHD-Norm ISO 48-2 an sehr kleinen Probekörpern zu ermitteln. So sind Messungen an kleinen O-Ring Schnurstärken von 0,4 mm ebenso möglich wie Messungen an

[48] Vgl. BLOBNER, Ulrich: Bilddiagnostik in der Schadensanalyse: Die unterschiedlichen Ursachen hinter rissigen O-Ringen, Vortrag auf dem zweiten O-Ring Forum der ISGATEC GmbH, Mannheim, 17.-18.11.2020 (Onlineveranstaltung)
[49] Definition aus dem Artikel „Bildgebende Verfahren“ in der Wikipedia, Webseite zuletzt aufgerufen am 13.05.2021: https://de.wikipedia.org/wiki/Bildgebendes_Verfahren
[50] Quelle der Informationen: Fa. KEYENCE: VHX70000Catalog-KD-C-DE

Dichtkanten von Radialwellendichtringen oder an Profilschnitten von Dichtungen. Darüber hinaus bieten sich noch weitere Einsatzmöglichkeiten. So kann zum Beispiel über eine erzeugte Kraftrampe und einer daraus resultierenden Eindringung und anschließender Rückstellung des Indentors über die dissipierte Energie eine Kenngröße für den Vernetzungsgrad einer Probe ortsaufgelöst ermittelt werden. (**Abb. 10 und 11**)

6.2.2 Weitere innovative Prüfverfahren

Gaschromatographie (GC-MS)

Bei dieser hochauflösenden Prüfung werden die niedermolekularen Bestandteile einer Probe durch thermische Einwirkung unterhalb der Zersetzungstemperatur des Polymers in die Gasphase überführt und durch eine Chromatographie-Säule aufgetrennt. Anschließend werden die Einzelbestandteile der Gasphase mittels Massenspektrometer untersucht und durch Datenbankabgleich der jeweiligen Massenspektren identifiziert. Auf diese Art lassen sich selbst minimale Mengen an Rezepturbestandteilen sowie Rückstände eines in die Elastomerprobe eindiffundierten Kontaktmediums nachweisen. Wird anschließend noch eine Pyrolyse durchgeführt, lassen sich die Zersetzungsprodukte des Polymers damit identifizieren und gegebenenfalls auch Unterschiede zu Referenzproben erkennen. (**Abb. 3 und 13**)

Dynamisch-mechanische Analyse (DMA)

Die dynamisch mechanische Analyse hat den Zweck, die Viskoelastizität von Elastomeren im gesamten Temperatureinsatzbereich abzubilden. Indem man Probekörper zyklisch in einem vorgegebenen Frequenz- und Temperaturbereich verformt, lassen sich daraus Hinweise auf den temperaturabhängigen Verlauf des Speicher- und Verlustmoduls sowie der Phasenverschiebung δ zwischen Kraft und Weg ermitteln. Bei entsprechender Ergebnisdarstellung können damit FEA-Analysen durchführt werden, welche zum Beispiel aufzeigen können, ob die Dichtung den geforderten Spaltänderungen bei tiefen Temperaturen noch folgen kann.

Fazit

Neue innovative Prüfverfahren in Ergänzung zu bewährten Prüfverfahren, Digitalisierung von Prüfabläufen bzw. der Ergebnisübermittlung und Akkreditierung erhöhen den Nutzen und die Effektivität von Materialuntersuchungen für unterschiedliche Aufgabenstellungen. Diesbezüglich breit aufgestellte Dienstleister wie das O-Ring Prüflabor Richter können damit kompetente Partner sein zur Bewältigung der vielseitigen Aufgaben in einem Material- bzw. QS-Labor, wenn es um das Thema Elastomere oder thermoplastische Elastomere geht.