

Schadensanalyse von Elastomerbauteilen: Einwirkung von Kautschukgiften

DIPL.-ING. BERNHARD RICHTER, DIPL.-ING. (FH) ULRICH BLOBNER

Der vorliegende Fachbericht behandelt das Schadensbild der „Autoxidation“ von Elastomerbauteilen. Vor allem in Heißwasseranwendungen können Dichtungen, durch die Entzinkung von Messing, gravierende Schädigungen erfahren. Im Folgenden soll die Thematik detailliert vorgestellt werden. Mit Blick auf durchgeführte Schadensanalysen und lange praktische Erfahrung, geben die Autoren konkrete Hilfestellung.

1. EINORDNUNG UND HÄUFIGKEIT DES SCHADENSBILDES

Von den vier Hauptschadensmechanismen wird die Autoxidation der zweiten Hauptgruppe zugerechnet:

- 1. Medien
- 2. Temperatur / Alterung
- 3. Mechanisch / physikalische Einwirkungen
- 4. Herstellungsfehler

Die zweite Hauptgruppe lässt sich in vier Untergruppen aufteilen: Überhitzung, falscher Werkstoff für die jeweilige Anwendung, schlechte Rezeptur und Alterung. Die Alterung kann durch äußere Faktoren wie Ozon, Ermüdung, aber auch durch Schwermetalle ausgelöst werden. Letztere Ursache, also Schwermetallionen wie Mangan oder Kupfer sind die Hauptursache der Autoxidation. Dieses Fehlerbild verursachte Ausfälle an ca. 50 von über 2000 im O-Ring Prüflabor Richter untersuchten elastomeren Dichtungen. Damit hat dieser einzelne Schadensmechanismus durchaus eine wichtige praktische Bedeutung, wenngleich dieser in der technischen Literatur über Dichtungsschadensfälle kaum zu finden ist.

2. FACHLICHES HINTERGRUNDWISSEN ZUM SCHADENSBILD

2.1 Begriffsklärung Oxidation / Autoxidation

Die Autoxidation ist ein Phänomen, das in der Literatur über die Chemie der Elastomere bereits seit langem beschrieben wird [1]. Wie der Name schon sagt, handelt

es sich um eine selbstständige Aufnahme von Sauerstoff. Während der Alterung eines Gummiwerkstoffes wird Sauerstoff aus der Umgebungsluft aufgenommen und „teilweise im Vulkanisat gebunden, teils in Form von Kohlendioxyd, Wasser und anderen niedermolekularen Oxidationsprodukten wieder freigesetzt. [2]“

Bereits kleine Mengen von Sauerstoff haben eine schädliche Wirkung auf Elastomere, was besonders leicht an der starken Abnahme der Zugfestigkeit und Reißdehnung erkennbar ist. Die Alterungstemperatur beeinflusst die Reaktionsgeschwindigkeit des Sauerstoffs mit dem Gummiwerkstoff, je höher diese ist, umso schneller läuft die Alterungsreaktion ab.

Der Mechanismus der Oxidation, also der Zerstörung des Elastomernetzwerkes wird in der Regel durch Radikale begonnen, die sich z. B. durch hohe Temperaturen, mechanische Belastung, Strahlung und sonstige Ursachen bilden können. „Als Startreaktion der Autoxidation wird die Bildung von Peroxi-Radikalen ($R\cdot + O_2 \rightarrow ROO\cdot$ weiter $ROO\cdot + RH \rightarrow ROOH + R\cdot$) angenommen, die durch Abstraktion eines H-Atoms Hydroperoxide und Polymerradikale bilden. [3]“ Die Zerstörung des vorhandenen Elastomernetzwerkes findet durch eine radikalische Kettenreaktion statt, die durch zerfallene Peroxide oder sonstige Radikale initiiert wird.

Bei schwefelvernetzten Elastomeren, können Hydroperoxide auch die Vernetzungsbrücken angreifen. „Die Spaltprodukte (Sulfoxide, Sulfensäure) nehmen an der Kettenreaktion nicht teil und wirken als Antioxidans. [4]“

Bei der Autoxidation kann es sowohl zu einer Verhärtung durch eine engmaschigere Nach- bzw. Neuvernetzung (Zyklisierung), als auch zu einer Erweichung durch Ketenspaltung kommen. Entweder überwiegt einer dieser Effekte oder sie treten relativ gleichberechtigt auf. Dies erklärt auch den Umstand, dass an ein und derselben geschädigten Dichtung beide Effekte auftreten können. Langfristig führen diese Effekte zu einer Depolymerisation des Elastomers.

2.2 Kautschukgifte und ihre Wirkung

Der Begriff der Autoxidation ist eng mit den sogenannten Kautschukgiften verbunden. Es handelt sich dabei um Schwermetallverbindungen, die als Katalysator für den an sich relativ langsamen Hydroperoxidzerfall wirken. Damit kann eine komplette Depolymerisation im typischen Temperatureinsatzbereich eines Elastomers in wenigen Monaten stattfinden.

Da dieser Schaden am ausgeprägtesten bei der Kombination Naturkautschuk mit Mangan auftritt, wurde er relativ früh erkannt und wurde seit Ende des 19. Jahrhunderts fortlaufend wissenschaftlich erforscht [5].

Bereits kleinste Mengen von Kupfer und Mangan beschleunigen vor allem bei Elastomeren aus NR und IR die Autoxidation sehr stark und zerstören somit den Werkstoff oft innerhalb kurzer Zeit. Dagegen haben gesättigte synthetische Kautschuke eine geringere Anfälligkeit für Autoxidation. Beträgt der Kupfer- bzw. Mangangehalt in der Mischung 0,001 % des Gewichts oder weniger [6], ist in den meisten Fällen keine schädigende Wirkung zu erwarten.

Zweiwertige Eisensalze sind besonders schädlich für SBR-Elastomere. Kobalt und Nickel gelten auch als Kautschukgifte, jedoch werden sie erst in höheren Konzentrationen als Kupfer- und Manganverbindungen für Elastomere gefährlich.

Entscheidend ist die Form, in welcher die Schwermetalle vorliegen. Je löslicher sie im Kautschuk sind, umso gefährlicher sind sie [7]. „So sind Kupferstearat (Tabelle 1) und -oleat als lösliche Verbindungen stark alterungsbeschleunigend; es folgen in einer Reihe abnehmender Aktivität Kupfersulfat und -chlorid, Kupferoxyd und Kupfermetall.[8]“ Es gibt aber auch Kupferverbindungen, die ohne schädigende Wirkung auf Kautschuk sind, wie das Kupferdimethyldithiocarbamat.

2.3 Kontaktmöglichkeiten mit Kautschukgiften

Kautschukgifte können entweder durch die natürliche Umgebung (z. B. manganbelastete Böden in Gummiplantagen [10]) oder durch Mischungsbestandteile (oft unbewusst) in den Compound gelangen. In der Frühzeit

Tabelle 1: Einfluss von Kupferstearat auf eine NR-Mischung nach Alterung in der Sauerstoffbombe [9]

Anteil Kupferstearat [%]	0	0,05	0,1	0,2
Ungealtert				
Zugfestigkeit [N/mm ²]	16,2	17,8	17,1	15,7
Reißdehnung [%]	551	564	554	554
Spannungswert bei 300 % Dehnung [N/mm ²]	5,0	5,1	5,1	4,9
Zugestigkeit nach Alterung in der Sauerstoffbombe bei 70°C und 20,7bar				
Nach 2 Tagen	8,9	8,5	8,3	4,0
Nach 4 Tagen	8,6	6,3	3,6	0
Nach 6 Tagen	7,8	0	0	0
Nach 8 Tagen	7,6	0	0	0

der Gummifertigung waren mineralische Füllstoffe, wie z. B. Kreide, mit Kautschukgiften verunreinigt. Ebenso waren mit natürlichen mineralischen oder kupferhaltigen Farben eingefärbte Gewebe belastet, so dass eine Gummibeschichtung dadurch gestört wurde [11]. Schließlich kann auch das fertige Elastomerprodukt mit Kautschukgiften in Berührung kommen und dadurch geschädigt werden.

2.4 Aktuelle Dichtungsschäden durch Autoxidation

Durch das Aufkommen von zahlreichen Synthesekautschuken ist die technische Bedeutung von Naturkautschuk immer mehr in den Hintergrund gerückt. Hinzu kommt eine immer größere Reinheit bei Füllstoffen und synthetischen Geweben, so dass das Problemfeld Naturkautschuk-Mangan immer mehr an Bedeutung verloren hat.

Heute ist die Autoxidation ein Phänomen, das hauptsächlich bei peroxidisch vernetzten Heißwasserdichtungen aus EPDM auftritt. Auf den ersten Blick scheint dies verwunderlich, dass bei dem als stabil geltenden peroxidisch vernetzten EPDM der Schaden auftritt. Dies ist aber der Tatsache geschuldet, dass schwefelvernetzter EPDM bei Heißwasseranwendungen nicht eingesetzt wird. Hinzu kommt, dass Alterung immer durch Temperatur beschleunigt wird, wie im vorliegenden Fall die Heißwasseranwendungen. Dieses Schadensbild tritt nur lokal auf, da hierfür eine bestimmte Wasserqualität nötig ist, die eine Entzinkung der Messingarmaturen herbeiführt. Kupfer und Zink ergibt als Legierung Messing, dessen Korrosionsbeständigkeit durch Zugabe weiterer Elemente (z. B. Al, Sn) verbessert werden kann.

Messing, das mehr als 20 % Zink enthält und bestimmten Umgebungsbedingungen (stark chloridhaltiges, meist weiches Wasser) ausgesetzt ist, kann der Entzinkung

unterliegen, die eine Form der selektiven Korrosion [12] ist. Die Entzinkung kann auf einen kleinen Bereich des Messingbauteiles begrenzt sein oder sich auch auf der Oberfläche ausbreiten. Ebenso kann diese Art der Korrosion auch in das Bauteil eindringen [13]. Bei der Entzinkung wird das Kupfer als schwammige Masse ausgeschieden, aber auch das Zink löst sich auf. „Nach Auflösung des Messings wird allerdings das Kupfer aufgrund seines edleren Potentials in schwammiger Form wieder abgeschieden, während das Zink in gelöster Form weggeführt wird.[14]“ Oder das Zink wird als basisches Salz über der Korrosionsstelle abgelagert [15].

Das freiwerdende Kupfer greift dann als Kautschukgift Elastomerdichtungen an. Durch die erhöhten Temperaturen im Heißwasserbereich wird dieser Prozess deutlich beschleunigt.

Bei Kupfergehalten von weniger als 62,5 % im Messing, kommt zur α -Phase auch die β -Phase hinzu, die mehr Zink enthält. Bei der Entzinkung wird vor allem die β -Phase angegriffen.

Mit Hilfe einer geeigneten Wärmebehandlung des

Messings kann man die β -Phase verringern, dadurch wird der Werkstoff entzinkungsbeständig. Beim sogenannten D(Z)R-Messing („dezincification resistant“) ist die stabilere α -Phase vorherrschend [16]. „Der Trick der DR Messinge ist, dass die α -Phase durch Zulegieren geringer Mengen Arsen recht effektiv gegen Entzinkung inhibiert wird. Bei der β -Phase, die man für die Heißumformung braucht, ist das leider nicht möglich. Die abschließende Wärmebehandlung dient dazu die β -Phase nach der Umformung wieder in eine α -Phase umzuwandeln.[17]“

Entzinkung kann nur stattfinden, wenn bestimmte Werkstoff-Wasserqualität Paarungen auftreten. Bereits 1961 wurde von dem Briten M. Turner [18] das nach ihm benannte Diagramm veröffentlicht (Bild 1). Es stellt den Chloridgehalt über der Karbonathärte dar. Ursprünglich wurde dieses Diagramm in England aus empirischen Daten erstellt. Es ist in zwei Bereiche aufgeteilt: Einer mit Kombinationen dieser Parameter, die eine Entzinkung hervorrufen können und ein anderer Bereich, der unkritische Kombinat-

Turner Diagram CW617 and DZR brass

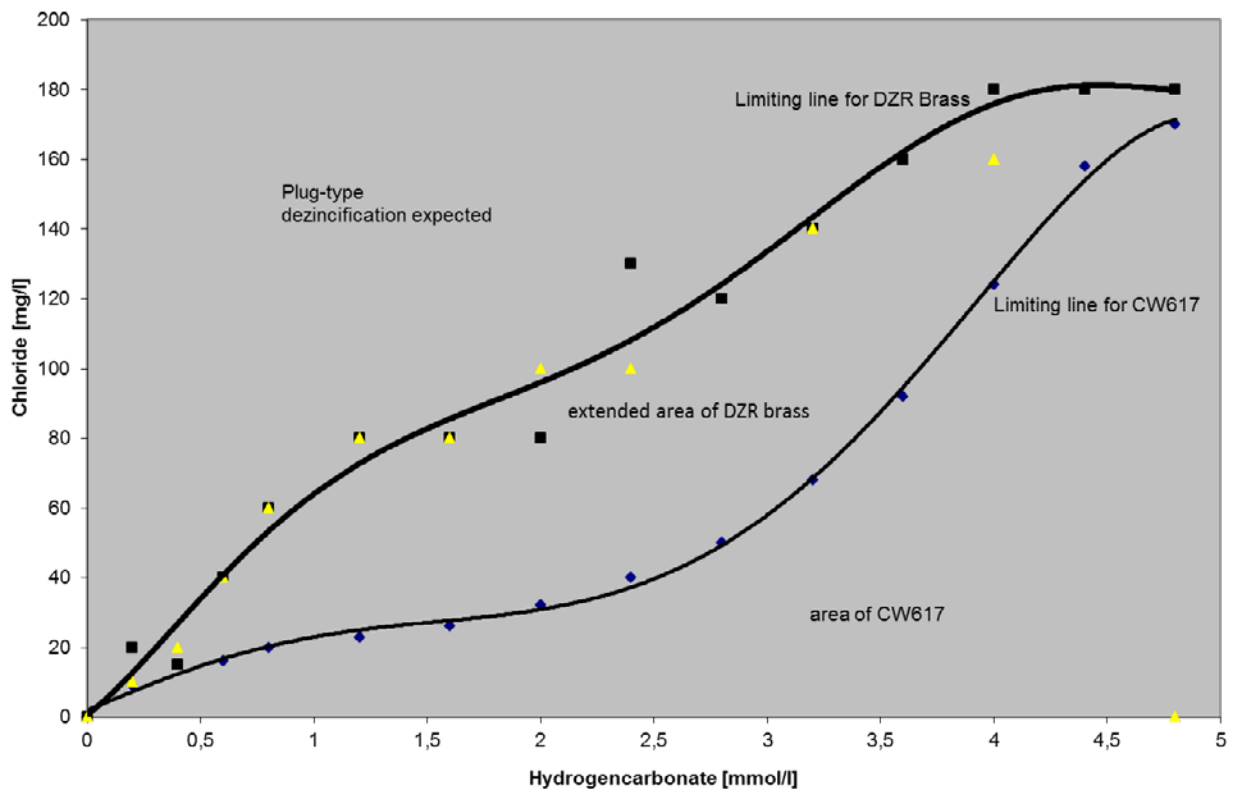


Bild 1: Turner Diagramm mit Grenzbereichskurven zweier unterschiedlicher Messingqualitäten: Die obere Kurve steht für ein entzinkungsstabiles Messing (DZR); oberhalb dieser Kurve kommt es zur Entzinkung auch dieses stabileren Werkstoffes. Die untere Kurve steht für ein Automatenmessing (CW 617N = ähnlich der inzwischen unzulässigen Bezeichnung Ms 58), unterhalb dieser Kurve kommt es bei beiden Werkstoffen zu keiner Entzinkung (Abbildung: Werkstoffberatung Dr. Peter Dierschke, 52445 Titz [20])

nen dieser Parameter enthält. Turners Diagramm wurde ursprünglich für Ms58 (CuZn40Pb2) erstellt, eine Legierung, die jedoch viel entzinkungsanfälliger als heutige D(Z)R-Qualitäten (CW602N) ist.

In Heizungsanlagen treten Entzinkungsprobleme kaum auf, da diese Systeme faktisch frei von Sauerstoff sind [19].

Bei EPDM-Elastomeren können sich die Rezepturen je nach Aufbau erheblich bezüglich der Anfälligkeit für diesen Schadensmechanismus unterscheiden.

3. SCHADENSILD

3.1 Beschreibung des Schadensbildes und problematischer Bereiche

Durch Autoxidation ausgelöste Schäden haben oft ein vielfältiges Erscheinungsbild. Elastomere Werkstoffe können durch diesen Mechanismus erweichen, rissig (Bild 2), klebrig oder glänzend werden. Diese Ausprägungen können an ein und derselben Dichtung in verschiedenen Bereichen auftreten. In extremen Fällen von Autoxidation kann es zur vollständigen Depolymerisation der Dichtung kommen, also einer Zersetzung bis hin zum Ruß. Eine Vorstufe vor der kompletten Depolymerisation ist das Auftreten von glänzenden Bereichen, die oft mit einer lokalen Erweichung einhergehen. Diese glänzenden Bereiche erinnern an einen angeschmolzenen Thermoplast (Bilder 3 und 4), obwohl ein dreidimensionales Elastomer nicht aufschmelzbar ist.

Autoxidation kann nach langer Exposition zu Schwermetallen bzw. zu schwermetallhaltigen Fluiden und nach höheren Temperaturen an der gesamten Dichtung auftreten. Häufig findet sich der Schaden sowohl im Kontaktbereich zu Gehäuseteilen aus Messing (in Heißwasser-Sanitärinstallationen) als auch zur Fluidseite (Bild 5). An einer Dichtung können bei der Autoxidation unterschiedliche Schadensbilder auftreten, wie die Bilder 6, 7 und 8, drei Mikroskopaufnahmen ein und desselben O-Rings, belegen.

3.2 Auswirkungen des Schadens

Autoxidative Schäden im Bereich von Heißwasseranwendungen führen zu Undichtigkeiten und Leckagen, die in jedem Fall zu vermeiden sind. Bei höherem Mangankontakt können Bauteile aus Naturkautschuk fast vollständig zerstört werden.

3.3 Abgrenzung zu ähnlichen Schadensbildern

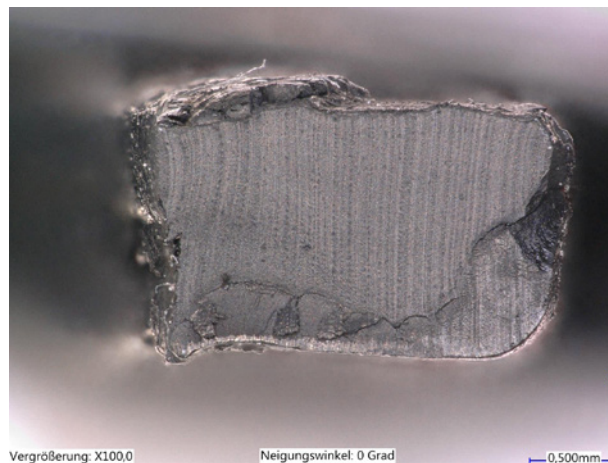
Durch den chemischen Angriff starker Reinigungsmittel (mit Chlor) werden bei bestimmten Elastomeren rußende Oberflächen verursacht. Diese Schadensausprägung kann einer autoxidativen Alterung ähneln.



Vergrößerung: X100,0
Neigungswinkel: 0 Grad

0,500mm

Bild 2: EPDM O-Ring, peroxidisch vernetzt nach einem Einsatz in einem überwachten Dauerversuch für eine Wasserarmatur (Schadensursache: Entzinkung von Messing, zyklische Temperaturwechsel von 25 °C bis 95 °C in Wasser, Versuchsdauer 4500 h)



Vergrößerung: X100,0

Neigungswinkel: 0 Grad

0,500mm

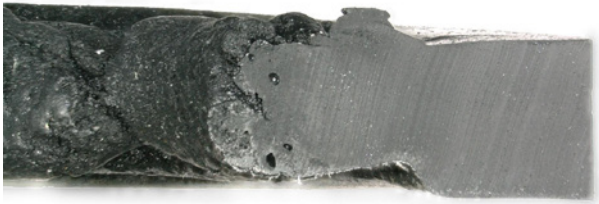
Bild 3: Querschnitt des O-Rings aus Bild 2, die autoxidative Schädigung fand hauptsächlich in den Randbereichen statt, der Kern ist noch nicht depolymerisiert.



Vergrößerung: X20,0
Neigungswinkel: 0 Grad

0,50mm

Bild 4: Ein durch Autoxidation geschädigtes Elastomer (peroxidisch vernetztes EPDM), das im Innenbereich des Dichtringes ganz deutlich aufgeschmolzene Bereiche wie bei einem Thermoplast oder TPE aufweist.



Vergroßerung: X30,0
Neigungswinkel: 0 Grad

0,50mm

Bild 5: Dichtung aus Bild 4 im Querschnitt: Links ist deutlich der geschädigte Bereich zu erkennen, der Kontakt mit Kautschukgiften hatte. Der rechte Bereich ist noch vollständig intakt, da er durch das Gehäuse geschützt war.

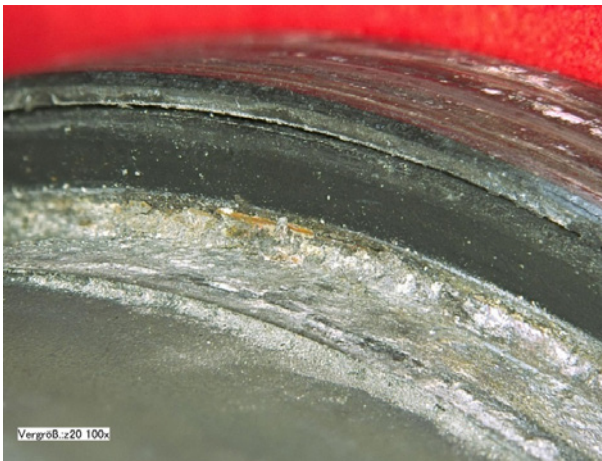


Bild 6: EPDM- O-Ring nach Autoxidation im eingebauten Zustand, bleibend verformt und mit rußender Oberfläche

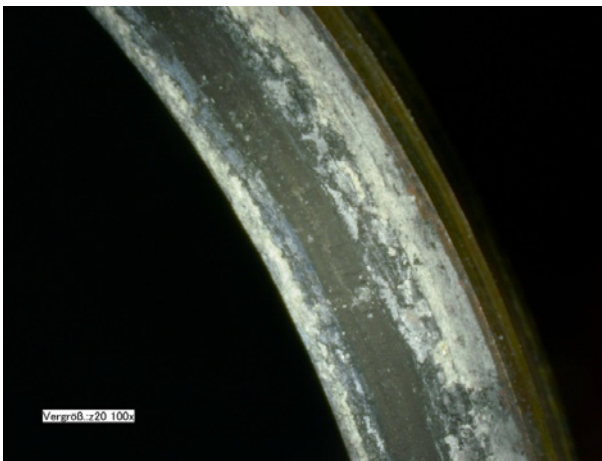


Bild 7: Gegenfläche des EPDM O-Rings aus Abb. 6, bei den weißen Bereichen handelt es sich vermutlich um Kalkablagerungen

Um diese sich ähnelnde Schäden voneinander abzugrenzen, muss man den Einsatz der Dichtung rückverfolgen und Ausschlusskriterien anwenden.

Lässt sich mit Hilfe dieser Methodik immer noch keine klare Aussage treffen, ist auch eine REM EDX-Analyse der beschädigten Oberflächen sinnvoll. Werden dann im Schadensbereich Kupferionen gefunden, kann man von einer Autoxidation ausgehen.

4. PRÄVENTIONSMASSNAHMEN

Bei der Herstellung von Compounds ist der Kontakt mit kritischen Schwermetallen zu vermeiden, außerdem muss auch sichergestellt sein, dass alle Mischungsbestandteile in der Summe kritische Stoffe unterhalb der empfohlenen maximalen Prozentsätze enthalten.

In der Anwendung ist der Kontakt mit den oben beschriebenen kritischen Schwermetallen bereits konstruktiv, aber auch anwendungstechnisch zu meiden. Lässt er sich nicht vermeiden, dann müssen spezielle Werkstoffe (z. B. D(Z) R-Messing) und gegen Autoxidation stabilere Elastomertypen eingesetzt werden. Antioxidantien, die gegen Autoxidation wirken, können auch bei der durch Schwermetalle beschleunigten Autoxidation verwendet werden. Jedoch gibt es auch noch zusätzliche Mischungszutaten, die speziell gegen Kautschukgifte wirken (z. B. DNPD), also beispielsweise die Wirkung von Kupfer- und Manganverbindungen größtenteils inaktivieren. „Wenigstens teilweise beruht der positive Einfluss von Antioxidantien gegen Kautschukgifte auf einer Komplexbindung (Chelatierung) des schädlichen Ions.[21]“

Auch im Bereich der Werkstoffprüfung muss das Thema Autoxidation berücksichtigt werden, um eine künstliche Alterung nicht ungewollt durch Kautschukgifte zu beschleunigen und dadurch zu verfälschen. So wird zum Beispiel in der ISO-Norm 188 zur Heißluftalterung von Elastomeren die Verwendung von Kupfer und seinen Legierungen im Bereich der Ofenkammer verboten [22].

5. PRAXISTIPPS (PRÜFMÖGLICHKEITEN / NORMEMPFEHLUNGEN)

Da es keine nationale bzw. internationale Norm zur Überprüfung der Beständigkeit gegenüber Kautschukgiften gibt, wurde im O-Ring Prüflabor Richter eine laborinterne Prüfanweisung entwickelt. Diese befasst sich nur mit dem Element Kupfer, da die Kupferverträglichkeit von EPDM in Heißwasseranwendungen im Bereich der Autoxidation momentan die häufigste Fragestellung für Dichtungsanwender darstellt.

Der Elastomerprobekörper (Fertigteil oder Prüfplattenabschnitt) wird zwischen einer Glas- und Kupferplatte mit einem vorab definierten prozentualen Wert verpresst

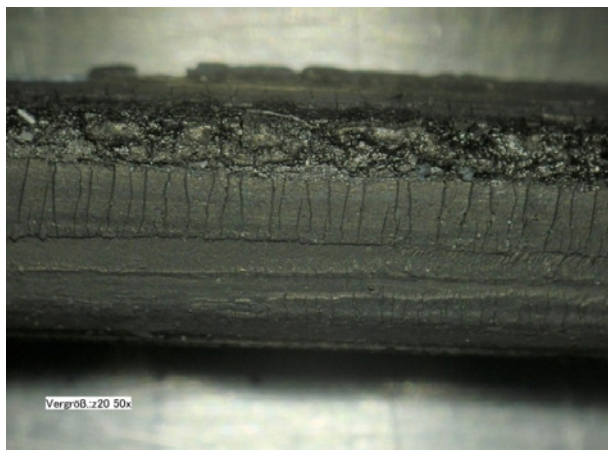


Bild 8: Draufsicht auf ausgebauten EPDM O-Ring aus Abb. 6, gut zu erkennen sind die scheinbar angeschmolzenen Bereiche im oberen Bereich. Diese hatten Wasserkontakt, in welchem das Kautschukgift gelöst war. Die Seite mit den feinen Rissen ist die Kontaktfläche zum Gehäuse



Bild 9: Überreste einer großflächigen Verklebung eines Probekörpers auf einer Kupferplatte: Ein solches Elastomer gilt als anfällig für Autoxidation.

und über einen bestimmten Zeitraum in Heißluft gelagert (Bild 9). Kommt es zu den in der Prüfanweisung definierten großflächigen Verklebungen des Elastomers auf der Kupferplatte und einer starken Härteabweichung, ist der Elastomer für kritische Anwendungen mit Kupferkontakt ungeeignet.

6. DANK

Besonderer Dank geht an Dr. rer. nat. Peter Dierschke [23] von der „Werkstoffberatung Dr. Peter Dierschke“ in Titz für die fachliche Unterstützung im Abschnitt Entzinkung und das zur Verfügung stellen eines Turner Diagramms.

LITERATUR

[1] Andere deutsche Schreibweisen: Autooxidation, Autoxydation,

frühere englische Schreibweise: autoöxidation

[2] KEMPERMANN, Th.: Alterungsschutzmittel in: BOSTRÖM, Siegfried (Hg.): Kautschuk-Handbuch, Berliner Union, Stuttgart, Bd. 4, 1961, Kap. 2.8, S.355

[3] RÖTHEMEYER, Fritz und SOMMER, Franz: Kautschuktechnologie, Hanser Verlag, München, 2001, S.339

[4] RÖTHEMEYER, Fritz und SOMMER, Franz: Kautschuktechnologie, Hanser Verlag, München, 2001, S.340

[5] Z.B. LASCELLES- SCOTT, India Rubber Journal, 1888, 4, 169 oder THOMSON, W. und LEWIS, F.: On the action of different Metals, Metallic Salts, Acids, and Oxidising Agents on India-rubber, in: Memoirs and proceedings of the Manchester Literary & Philosophical Society, 1891, 4 (4) S.266 (Permalink zu dieser Veröffentlichung: <http://biodiversity-library.org/page/35486586>)

[6] KEMPERMANN, Th.: Alterungsschutzmittel in: BOSTRÖM, Siegfried (Hg.): Kautschuk-Handbuch, Berliner Union, Stuttgart, Bd. 4, 1961, Kap. 2.8, S. 357

[7] Vgl. SEEBERGER, D.: Alterung und Alterungsschutzmittel (Anti-oxidantien) (Kap. 7.4), in: HOFMANN, Werner und GUPTA, Heinz (Hrsg.): Handbuch der Kautschuk-Technologie, Ratingen, 2001, Kap. 7, S. 74, NB: Aus dieser Literaturstelle sind auch die davor aufgeführten Informationen zur Wirkung der jeweiligen Schwermetalle auf bestimmte Elastomere entnommen.

[8] KEMPERMANN, Th.: Alterungsschutzmittel in: BOSTRÖM, Siegfried (Hg.): Kautschuk-Handbuch, Berliner Union, Stuttgart, Bd. 4, 1961, Kap. 2.8, S. 357, nach VILLAIN, H., Rubber Chemistry and Technology, 23 (1950), S. 352

[9] Untersuchungen von B.N. Leyland in: BUIST, J.M. in Ageing and Weathering of Rubber, W.Heffer & Sons Ltd., Cambridge, 1956, S.30

[10] Devi Dwi Siskawardani, Jumpen Onthong, Khwunta Khawmee, Chakkrit Poonpakdee: Manganese status in upland and lowland rubber-growing soils in Songkhla province, southern Thailand, in: Agriculture and Natural Resources, July 2016, S. 321-325, Open Access: https://ac.els-cdn.com/S2452316X16301120/1-s2.0-S2452316X16301120-main.pdf?_tid=d68736f6-9168-4517-a6ac-b1e037cf748e&acdnat=1536681391_18ff00f4685c7562c29a9ee10fd1e501 (Zugriff am 11.09.2018)

[11] Vgl. KLUCKOW, Paul: Technische Gummiwaren in: HAUSER, E.A.: Handbuch der gesamten Kautschuktechnologie, Union Deutsche Verlagsgesellschaft, Berlin, 1935, Band I, S.400ff.

[12] Überblick über die Korrosionsformen: <https://www.kupferinstitut.de/de/werkstoffe/system/korrosionsverhalten-kupferwerkstoffe/korrosionsformen.html> (Webseite abgerufen am 14.09.2018)

[13] Vgl. <https://de.wikipedia.org/wiki/Entzinkung>

[14] Korrosionsbeständigkeit verschiedener Kupferwerkstoffe, Rubrik „Kupfer-Zink (Messing)“, Webseite abgerufen am 14.09.2018: <https://www.kupferinstitut.de/de/werkstoffe/system/korrosionsverhalten-kupferwerkstoffe/korrosionsbestaendigkeit-verschiedener-werkstoffe.html>

[15] Nach <https://de.wikipedia.org/wiki/Entzinkung>

[16] Nach DEUTSCHES KUPFERINSTITUT. Messing ja – Entzinkung muss nicht sein!, S.1f. Zweiseitige Internetveröffentlichung (abge-

rufen am 14.09.2018): https://www.sonderlote.de/WebRoot/Store4/Shops/62173412/MediaGallery/DKI_Infos/Messing/DKI_Messing__Entzinkung_muss_nicht_sein.pdf

[17] Schriftliche Mitteilung von Dr. Peter Dierschke vom 11.10.2018, <https://gfkorr.de/Forschung/Experten/Dierschke.html>

[18] TURNER, M. E. D.: The Influence of Water Composition on the Dezincification of Fittings, in: Proceedings of the Society for Water Treatment and Examination, 1961, S. 162-179

[19] Nach DEUTSCHES KUPFERINSTITUT. Messing ja – Entzinkung muss nicht sein!, S.1

Zweiseitige Internetveröffentlichung (abgerufen am 14.09.2018): https://www.sonderlote.de/WebRoot/Store4/Shops/62173412/MediaGallery/DKI_Infos/Messing/DKI_Messing__Entzinkung_muss_nicht_sein.pdf

[20] <https://gfkorr.de/Forschung/Experten/Dierschke.html>

[21] SEEBERGER, D.: Alterung und Alterungsschutzmittel (Antioxidantien) (=Kap. 7.4), in: HOFMANN, Werner und GUPTA, Heinz (Hrsg.): Handbuch der Kautschuk-Technologie, Ratingen, 2001, Kap. 7, S.83

[22] Vgl. International Standard ISO 188: ISO 188: Rubber, vulcanized or thermoplastic — Accelerated ageing and heat resistance tests, Fifth Edition: 2011-10-01, S.2, Unterabschnitt 4.1.1

[23] <https://gfkorr.de/Forschung/Experten/Dierschke.html>

Autoren

DIPL.-ING. BERNHARD RICHTER

O-Ring Prüflabor Richter GmbH

71723 Großbottwar

Tel.: +49 7148 16602-0

bernhard.richter@o-ring-prueflabor.de

DIPL. ING. (FH) ULRICH BLOBNER

O-Ring Prüflabor Richter GmbH

71723 Großbottwar

Tel.: +49 7148 16602-0

ulrich.blobner@o-ring-prueflabor.de
