

FACHWISSEN SCHADENSANALYSE VON ELASTOMERBAUTEILEN

Ein Angebot des

O RING

PRÜFLABOR

RICHTER

PRÜFEN BERATEN ENTWICKELN

Quelle: www.o-ring-prueflabor.de

Stand der Information: 07/2020

Ermüdungsrisse – Fehlstellen und Ozon – die unterschätzten Auslöser

Autoren:

Dipl.-Ing. (FH) Ulrich Blobner,

Dipl.-Ing. Bernhard Richter

1. Einordnung und Häufigkeit des Schadensbildes

Von den vier Hauptschadensmechanismen werden Risschäden durch Ermüdung meist 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, ungeeigneter Werkstoff, Alterung und schlechte Rezeptur. Die Ermüdungsrisse gehören zur dritten Untergruppe, die auch die Alterung durch Ozon und Schwermetalle (Autoxidation) beinhaltet.

Der Schadensmechanismus der Ermüdungsrisse kann aber auch zur dritten Hauptgruppe gerechnet werden.

So beschreibt KLEEMANN bereits 1982 diese zwei möglichen Hauptschadensmechanismen: „Man kann sicher annehmen, daß die Ausbildung von Ermüdungsrissen nicht nur einen physikalischen Prozeß darstellt, sondern daß gleichzeitig eine oxydativ chemische Veränderung einhergeht. Diesen Schluß lassen die höhere Sauerstoffabsorption und der schnellere Verbrauch an Alterungsschutzmitteln zu.“¹

Schadensfälle auf Grund von Ermüdungsrissen haben eine besondere Bedeutung bei größeren technischen Gummibauteilen, z.B. Reifen, Gummiwalzen oder Förderbändern. Bei Dichtungen kommen sie seltener vor und sind daher nicht ganz so wichtig. Ermüdungsrisse findet man an zyklisch beanspruchten Gummiformteilen, wie z.B. Membranen oder Faltenbälgen, oder dieser Schadensmechanismus wird bei Dichtungen unter anderen Bezeichnungen erfasst. So sind beispielsweise die Spiralarisse an O-Ringen eine Sonderform von Ermüdungsrissen.

Mitunter werden Ermüdungsrisse (*engl. fatigue cracks*) auch als Biegerisse (*engl. flexcracking*) bezeichnet. Wir bevorzugen den Begriff „(dynamische) Ermüdungsrisse“, da er nach unserem Verständnis umfassender als der Begriff „Biegerisse“ ist und auch Materialermüdungsrisse erfasst, die nicht nur durch Biegung entstanden sind.² Das Phänomen reiner „Biegerisse“ ist somit im Begriff „Ermüdungsrisse“ beinhaltet.

PRÜFLABOR

RICHTER

¹ KLEEMANN, Werner: Mischungen für die Elastverarbeitung, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1982, S. 247

² Vgl. CARPENTER, Arthur, W.: Physical Testing and Specifications in: DAVIS, Carroll, C. und BLAKE, John T. (Hrsg.): The Chemistry and Technology of Rubber, Reinhold Publishing Corporation, New York, 1937, S. 833

2. Fachliches Hintergrundwissen zum Schadensbild

In Hydraulikanwendungen werden Dichtungsschäden bekanntermaßen schon seit vielen Jahren mit einer großen wissenschaftlichen Tiefe analysiert. Ein mindestens ebenso breit und zeitlich noch länger erforschtes Gebiet ist das der Ermüdungsrisse. Treibende Kraft war hier zweifellos die Reifenindustrie, vermutlich weniger aus dem reinen Interesse an einer Schadensanalyse heraus, sondern eher, um langlebigere und qualitativ hochwertigere Produkte herstellen zu können. Nichtsdestotrotz sind diese Erkenntnisse eine unschätzbare Grundlage für die Schadensanalyse auch von Ermüdungsrissen an Dichtungen und Elastomerbauteilen.

Die Alterung von Elastomeren (**Abb. 1**) ist ein „Sammelbegriff für Eigenschaftsänderungen, die an Werkstoffen ohne Einwirkung von Chemikalien im Verlauf längerer Zeiträume eintreten und zur teilweisen oder völligen Zerstörung führen.“³

Hauptursachen für Elastomeralterung					Chem.-physikalische Auswirkungen	Auf tretende Schadensbilder
Dynam. Verformung	Erhöhte Temperatur	Sauerstoff	Ozon und stat. Verformung	Licht		
					Nachvernetzung, Kettenabbau	Verhärtung oder Erweichung, bleibende Verformung
					Autoxidation	Verhärtung oder Erweichung, Risse
					Kettenabbau (Zerstörung von Doppelbindungen)	Gerichtete Risse
					Oberflächenoxidation	Orangenhaut („crazing“), Elefantenhaut, Abkreiden
					Netzwerkveränderung	Verhärtung oder Erweichung
					Netzwerkzerstörung	Ermüdungsrisse

Abb. 1: Die Alterung von Elastomeren kann viele verschiedene Ursachen haben, die miteinander wechselwirken und sich mitunter verstärken können.⁴

Ermüdungsrisse sind Risse, die primär als Folge der Einwirkung einer zyklischen Verformung (Alterung im Inneren des Materials) eintreten und der zusätzlichen Einwirkung von Sauerstoff, Ozon und Licht (Alterung von außen, also von der Oberfläche nach innen). Die Erwärmung des Bauteils durch erhöhte Umgebungstemperaturen und/oder durch innere Erwärmung mittels der Verlustenergie der Wechselverformung können sich zusätzlich negativ auf den Schadensmechanismus auswirken, da Belastungsgrenzen bei Elastomeren mit zunehmenden Temperaturen abnehmen. Die Erwärmung „kann im Übrigen zusammen mit hoher mechani-

³ SCHNETGER, Jochen: Lexikon der Kautschuktechnik, Hüthig Verlag, Heidelberg, ²1991, S. 40

⁴ Die Abbildung wurde nach folgender Vorlage erstellt und erweitert: LEIBBRANDT, Friedrich: Mischungsbestandteile in Elastomeren (Kapitel 2) in: STREIT, Gerhard (Hrsg.): Elastomere Dichtungssysteme Werkstoffe – Anwendungen – Konstruktionen – Normen, expert verlag, 4. Auflage, 2011, Bild 2.14, S. 90

scher Belastung und / oder hoher Dämpfung des Elastomers wegen der geringen Wärmeleitfähigkeit des Stoffes bis zu seiner völligen Zerstörung durch Verkohlen durch Überhitzung von innen her führen.“⁵

Die Risse sind senkrecht zur größten Spannung, deswegen nahm KLEEMANN an, „daß im Vulkanisat bei der Verstreckung in einer Richtung die Moleküle eine Ausrichtung erfahren und damit in der Streckrichtung eine Festigkeitserhöhung erfolgt, während in der Querrichtung dazu dann eine mindere Festigkeit vorhanden ist.“⁶

Die Thematik der Ermüdungsrisse ist ein äußerst komplexes Thema, an welchem bereits seit Jahrzehnten intensiv geforscht wird. Es gibt drei große Bereiche, die sich diesem Thema widmen. Der älteste Bereich ist das optische Erkennen und analytische Eingrenzen von Ermüdungsrissen, sozusagen der Ausgangspunkt jeder Schadensanalyse. Um die Schadensmechanismen besser zu verstehen und positiv zu beeinflussen, entstand der zweite Bereich der **Versuche zur Ermüdungslebensdauer und zur Rissentstehung/-wachstum**, um die gefundenen Schadensbilder nachzustellen und besser zu verstehen. Und schließlich gibt es noch den dritten, stark theoretischen Bereich, der sich mit der FEM Simulation von Ermüdung und Risswachstum befasst. Auf Grund der vielen Randbedingungen und des komplexen Elastomerverhaltens ein sehr weites Feld.

Dieser Artikel verfolgt einen praxisorientierten Ansatz und befasst sich v.a. mit dem ersten Bereich und zieht Erfahrungen und Erkenntnisse aus dem zweiten Bereich zu Rate, wo diese **zu einer praktischen Problemlösung notwendig sind**. Dieses Kapitel zum „*Fachlichen Hintergrundwissen*“ stellt in erster Linie eine Literaturübersicht dar mit dem Versuch, Wissen aus oftmals sehr theoretischer Forschung für den praktischen Anwender verstehbar und nutzbar zu machen. Um nicht durch Umschreibungen die gewisse Schärfe und Präzision wissenschaftlicher Publikationen zu verwischen, haben wir uns entschieden relativ viel aus den Originalquellen zu zitieren.

2.1 Wichtige Ansätze zur Untersuchung von Materialermüdung: Wöhlerkurve vs. bruchmechanisches Konzept⁷

Aus dem Metallbereich sind Dauerschwing- Dauerfestigkeitsversuche bekannt. Seit Ende der 1850er Jahre befasste sich August Wöhler mit (Dauer)festigkeitsversuchen an Eisen und Stahl⁸, v.a. ausgelöst durch Schadensfälle an der noch jungen Eisenbahn. Durch diese Schadensfälle reifte die Einsicht, dass die Festigkeit eines Werkstoffes unter dynamischer Wechselbelastung nicht so hoch ist wie seine Festigkeit unter statischer Belastung. Beim **Wöhlerversuch** wird eine genormte Probe bei einer konstanten Mittelspannung σ_m und Spannungsamplitude σ_a so vielen Schwingspielen unterworfen, bis die Probe bricht. Innerhalb einer Versuchsreihe bleibt die Mittelspannung unverändert, während die Spannungsamplitude immer

⁵ Ebd., S. 89

⁶ KLEEMANN, Werner: Mischungen für die Elastverarbeitung, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1982, S. 247

⁷ Umfangreiche Literaturübersicht zu verschiedenen Forschungen über Ermüdungsschadensanalyse an Gummi: MARS, W.V. und FATEMI, A.: A literature survey on fatigue analysis approaches for rubber in: International Journal of Fatigue 24 (2002) S. 949–961 (Artikel online verfügbar, zuletzt abgerufen am 23.08.2020: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.466.9090&rep=rep1&type=pdf>)

⁸ WÖHLER, August: Ueber Festigkeits-Versuche mit Eisen und Stahl in: Zeitschrift für Bauwesen, Ausgabe XX., 1870, S. 73-106 (Artikel online verfügbar, zuletzt abgerufen am 01.07.2020: https://digital.zlb.de/viewer/image/15239363_1870/53/)

weiter verkleinert wird, bis kein Bruch mehr auftritt. Trägt man nun auf der y-Achse die eingestellte Spannungsamplitude und auf der x-Achse die mit dieser Amplitude erreichte Bruchlastspielzahl auf, erhält man eine Wöhlerkurve. Mit zunehmenden Schwingspielen mündet die Kurve in die Horizontale, unter welcher sich der Bereich der Dauerfestigkeit befindet, allerdings gilt dies nur für die eingestellten Parameter. Wegen der vielen Lastspiele bis zum Bruch verwendet man eine logarithmische Darstellung. Spätestens beim Erstellen der Kurve wird das Problem einer großen Streuung sichtbar, die in der Regel nicht auf eine schlechte Versuchsdurchführung, sondern auf das Problem von Fehlstellen (z.B. Lunker, Verunreinigungen o.ä.) im Metall zurückzuführen ist. Jeder noch so gut produzierte Werkstoff enthält Fehlstellen, die als Ausgangspunkte für einen Riss dienen und unter dynamischer Belastung zu einem verfrühten Ausfall führen können.

Hier setzt die Bruchmechanik an. In den 1930er und 40er kam es zu katastrophalen Schadensfällen an geschweißten Brücken und Schiffen. Alan Arnold GRIFFITH⁹ befasste sich bereits über ein Jahrzehnt früher mit dem Einfluss von Oberflächenverletzungen auf die Festigkeit. „Er argumentierte, ein Riss wachse genau dann, wenn die bei einem Anwachsen der Risslänge und damit der Rissfläche freigesetzte Energie größer ist als diejenige Energie, die für die Erzeugung einer neuen Rissfläche oder Risslänge eingesetzt werden muss.“¹⁰ GRIF-FITH arbeitet also mit Energien und verwendet hier den Begriff der Energiefreisetzungsrate (Abk. T oder G¹¹), die entscheidend für das Risswachstum wird.

Beim Auftreten von Ermüdungsrissen, ist auch eine Betrachtung der Weiterreißenergie wichtig. Sie „ist eine stoffspezifische Größe, die von Hysterese-Effekten bei der Rissfortpflanzung bestimmt wird. Durch die Hysterese-Eigenschaften wird ein Teil der eingebrachten Energie dissipiert und steht für das Risswachstum nicht mehr zur Verfügung.“¹²

Im Elastomerbereich wurden wegweisende bruchmechanische Forschungen von RIVLIN und THOMAS¹³ an NR durchgeführt, welche anfangs der 1950er Jahre experimentell nachweisen konnten, dass die Energiefreisetzungsrate (engl. „tearing energy“) unabhängig von der Belastungsart (engl. „loading mode“) und der Probekörpergeometrie (engl. „specimen geometry“) ist.¹⁴

Heute werden zur Lebensdauervorhersage eines Bauteils beide Konzepte verwendet, die aber mitunter zu unterschiedlichen Ergebnissen und Aussagen führen, da sie auf verschiedenen Annahmen und Ausgangspunkten basieren. „Beim bruchmechanischen Konzept wird von Oberflächen-Mikrorissen oder inneren Fehlstellen ausgegangen, die sich durch Risswachstum vergrößern und schließlich zum Versagen führen. Beim Wöhler-Konzept wird von einem mehr

⁹ GRIFFITH, Alan Arnold and TAYLOR, Geoffrey Ingram VI. The phenomena of rupture and flow in solids Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical **221**: 1920, S. 163-198 Artikel online verfügbar, abgerufen am 27.06.2020: <https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rsta.1921.0006>

¹⁰ GIESE, Ulrich: Aufklärung ermüdungs- und schädigungsrelevanter Mechanismen bei dynamisch belasteten technischen Gummiwerkstoffen, Schlussbericht zum AIF IGF-Vorhaben Nr. 15694 N, Hannover, 2011, S. 37

¹¹ NB: Die Energiefreisetzungsrate G wird mitunter auch als Energieanlieferungsrate, spezifische Bruchenergie oder Rissausbreitungsenergie bezeichnet. Der Buchstabe G erinnert an den Begründer der Bruchmechanik, den Engländer Alan A. GRIFFITH. Weiterführende Informationen: <https://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/Energiefreisetzungsrate> (Webseite zuletzt am 01.07.2020 abgerufen)

¹² RÖTHEMEYER, Fritz und SOMMER, Franz: Kautschuktechnologie, Hanser Verlag, München, 2001, S.507

¹³ RIVLIN, R.S. und THOMAS, A.G.: Rupture of rubber.I.Characteristic energy for tearing in: Journal of Polymer Science, Vol. 10, No. 3 (März 1953) S: 291-318 Abstract des Artikel, online verfügbar, abgerufen am 28.Juni 2020: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pol.1953.120100303>

¹⁴ Vgl. BUSFIELD, J.J.C. und NG W.H.: Using FEA Techniques to Predict Failure in Elastomers in: COVENEY, V.A. (Hrsg.): Elastomers and Components: Service Life Prediction; Progress and Challenges, Woodhead Publishing in Materials, S. 180

oder weniger homogenen Werkstoff ausgegangen, der eine gewisse Ermüdung zeigt, die unter unterschiedlichen Lasten nach unterschiedlichen Belastungszyklen zum Ausfall führt.“¹⁵

2.2 Äußere Einflussfaktoren auf Ermüdungsrisse (Art der zyklischen Belastung, Kontaktmedien u.ä.)¹⁶

Da in praktischen Schadensfällen Einflüsse auf die Schadensentstehung nicht immer eindeutig auseinander zu halten und in ihrer jeweiligen Bedeutung zu erkennen sind, hilft der Blick in genormte Prüfverfahren zur Materialermüdung. Dort können entweder Werkstoffe in Dauerschwingversuchen bis zum Ausfall oder einer Grenzschwingspielzahl getestet werden oder es werden Rissentstehung und Risswachstumsraten unter zyklischer Belastung gemessen und ausgewertet. In der Schadensanalyse werden alle drei Effekte, Durchriss (Komplettausfall), Rissentstehung und Rissgröße untersucht und bewertet.

2.2.1 Dehnungsamplitude

Je größer die Amplitude gewählt wird, um so früher kommt es zu einem Materialbruch. In der Prüftechnik arbeitet man mit folgender Formel¹⁷:

$$N = \left(\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_0} \right)^k$$

Legende:

N = Anzahl der Lastzyklen bis zum Probenbruch

ε_a = Dehnungsamplitude

ε_0 = Konstante

k = Konstante

BAUMAN empfiehlt bei der Prüfung eines neuen Werkstoffes mit Hilfe von Tabellen oder Erfahrungswerten eine Amplitude zu wählen, die zu einem schnellen Bauteilausfall führt (< 1h). In einem zweiten Schritt muss nur die Steigung k geschätzt werden. Mit Hilfe dieser Prüfung kann nun eine erste Kurve gezeichnet werden, die nun mit weiteren Untersuchungen mit höheren Schwingspielen „gefüllt“ werden kann.¹⁸

2.2.2 R-Verhältnis, Bedeutung der Unterspannung

Der Buchstabe R bezeichnet das Verhältnis von minimaler (ε_{\min} entspricht der Unterspannung) zu maximaler (ε_{\max} entspricht der Oberspannung) Dehnung innerhalb eines Schwingungszyklus.

¹⁵ GIESE, Ulrich: Aufklärung ermüdungs- und schädigungsrelevanter Mechanismen bei dynamisch belasteten technischen Gummiwerkstoffen, Schlussbericht zum AIF IGF-Vorhaben Nr. 15694 N, Hannover, 2011, S. 6

¹⁶ Einige Parameter sind entnommen aus: BAUMAN, Judson T.: Fatigue, Stress, and Strain of Rubber Components Guide for Design Engineers, Carl Hanser Verlag, München, 2008, S. 117ff.

¹⁷ Ebd., S. 118

¹⁸ Vgl. ebd., S. 118

$$R = \frac{\varepsilon_{min}}{\varepsilon_{max}}$$

Ist $R > 0$ heißt es, dass die Unterspannung nicht gänzlich auf 0 abfällt. Von Metallen ist der eigentlich logisch nachvollziehbare Effekt bekannt, dass bei Anheben der Unterspannung (bei gleichbleibender Amplitude, wobei sich dadurch auch die Oberspannung erhöht) die Lebensdauer einer Probe verkürzt wird. Elastomere zeigen hier aber ein anderes Verhalten. Durchlaufen Elastomere bei dynamischen Werkstoffprüfungen im Minimum der Schwingungskurve nicht den Wert von 0% Dehnung, also wenn immer noch eine positive Vordehnung vorhanden ist, dann spricht man von nicht relaxierenden („norelaxing“¹⁹) Verformungen. Dadurch kann bei Gummiwerkstoffen die Lebensdauer in Bezug auf Ermüdungsrissse verbessert werden.

Viele praktische dynamische Elastomeranwendungen sind nicht relaxierend, da zu einer großen statischen Vorkraft/Verformung, verhältnismäßig kleine Schwingungen dazu kommen (z.B. Motorlager). Bei Elastomeren, die zur Dehnungskristallisation neigen, zeigen nicht relaxierende Anwendungen sehr gute Rissbeständigkeiten. ELLUL²⁰ nimmt an, dass durch Dehnungskristallisation gerade an der Riss Spitze ein großer Widerstand entsteht, der weiteres Risswachstum verhindert bzw. wenigstens behindert.

Aber auch bei Werkstoffen, die nicht zur Dehnungskristallisation neigen (z.B. SBR), kommt es in nicht relaxierenden Anwendungen zu einer gewissen Verbesserung der Ermüdungsrissbeständigkeit.²¹ Am DIK wurden von ABRAHAM, ALSHUTH und JERRAMS Versuche zur Ermüdungsbeständigkeit von gefülltem und ungefülltem EPDM durchgeführt. EPDM wurde gewählt, um mögliche Effekte durch Dehnungskristallisation auszuschließen, da EPDM unter Dehnung zu keiner Kristallisation neigt. Obwohl die Unterspannung bei gleichbleibender Amplitude erhöht wurde, konnte die Ermüdungsbeständigkeit um mehr als das 10-fache gesteigert werden, allerdings nur bei gefülltem EPDM. Der ungefüllte EPDM zeigte diesen Effekt nicht. Da Dehnungskristallisation ausgeschlossen werden kann, gingen die Forscher von „von einer charakteristischen Eigenschaft des Systems Kautschuk – Füllstoff“²² aus, welche sich für diesen Effekt verantwortlich zeigt.

Diese Erkenntnisse können in der Praxis die Ermüdungsbeständigkeit von Bauteilen signifikant verbessern helfen. „Allerdings setzt dies präzise Vorausberechnungen der Lebensdauer – z.B. mit Hilfe der Finite-Element-Methode – unter Kenntnis von Kriterien und Kennwerten der Ermüdung voraus.“²³ Anhand der Ergebnisse der Untersuchungen von ABRAHAM und Kollegen „sind sowohl Maximalspannungskriterien als auch Verformungskriterien als problematisch einzuordnen. Dagegen haben sich Energiekriterien als überlegen herausgestellt, da sie ein einheitliches Bild der Ermüdung in Abhängigkeit sowohl von der Unterspannung als auch der Spannungsamplitude ergeben.“²⁴

¹⁹ Vgl. ELLUL, Maria D.: Mechanical Fatigue in: GENT, Alan N. (Ed.): Engineering with Rubber, Carl Hanser Verlag, München, 2012, S. 174

²⁰ Vgl. ebd., S. 174

²¹ Vgl. ebd., S. 175

²² ABRAHAM, F. und ALSHUTH, T. und JERRAMS, S.: Ermüdungsbeständigkeit von Elastomeren in Abhängigkeit von der Spannungsamplitude und der Unterspannung, DIK Publikation 133, 2002 (?), S.9 (Online verfügbar, abgerufen am 26.06.2020: https://www.dikautschuk.de/fileadmin/files/leseproben/p_0135.pdf)

²³ Ebd., S. 9

²⁴ Ebd., S. 10

2.2.3 Kombinierte Spannungszustände

„Komplexe Verformungen, wie sie im Seitenwandgummi von Autoreifen vorhanden sind, erweisen sich besonders schädlich auf die Ausbildung von Ermüdungsrisen.“²⁵ Diese Kombinationen machen die Thematik sehr kompliziert. Sind erst einmal alle Spannungszustände, welche auf das Bauteil wirken, erkannt, müssen sie noch in ihrem Verhältnis zueinander abgeschätzt bzw. mittels FEM berechnet werden. Am häufigsten kommt eine Scherbeanspruchung kombiniert mit einer Verpressung vor. „Die Verpressung von Gummibauteilen erhöht die Ermüdungslebensdauer signifikant und muss bei der Prüfung [und bei der Bewertung von Ermüdungsrisen] berücksichtigt werden.“²⁶

2.2.4 Schwingungsform

Unbewusst denkt man meist bei Schwingungen an sinusförmige. Jedoch kommen in der Realität auch andere Formen vor, wie Sägezahn- oder Rechteckwellen. Nach BAUMAN wurden im Metallbereich Untersuchungen zum Einfluss unterschiedlicher Wellenformen auf die Dauerfestigkeit durchgeführt. Für Elastomere gibt es (Stand 2008) solche Untersuchungen nicht, jedoch sollte Folgendes bedacht werden: „Angesichts der internen Wärmeentwicklung von Elastomeren bei hohen Dehnungsgeschwindigkeiten kann es sein, dass bei gleichen Frequenzen rückwärts geneigte [also mit einem fast senkrechten Anstieg] Sägezahn- oder Rechteckwellen eine kürzere Ermüdungslebensdauer erzeugen können.“²⁷

Auch ELLUL berichtet, dass dieser Bereich bei Elastomeren noch nicht erforscht ist und nimmt Folgendes an: „Da sich wechselnde Wellenformen in Schwankungen der Dehnungsgeschwindigkeit niederschlagen, würden wir erwarten, dass [sich bei] Synthetikgummi größere Auswirkungen als [bei einem] NR zeigen, da ihre Festigkeit stark von der Viskoelastizität abhängt.“²⁸

Ein interessantes Praxisbeispiel für herausfordernde dynamische Belastung eines Elastomerbauteils stellt ALSHUTH vor. Er berichtet von Zahnriemen, welche in Dieselmotoren mehrere Funktionen erfüllen: Antrieb der Nockenwelle, Wasserpumpe und Einspritzpumpe. „Die Analyse eines großen Automobilherstellers ergibt, dass die höchste Belastung auf einen Zahn in Schub durch die Hübe der Einspritzpumpe erfolgt, die auf Basis der auftretenden Antriebsdrehmomente zumindest in ihrem zeitlichen Verlauf abgeschätzt werden kann. Der Drehmomentverlauf ist annähernd dreieckig mit Pulsen von etwa 1,8 ms. (...) Ein Charakteristikum von Pulsen ist im Vergleich zum Sinus die relativ lange Phase niedriger Belastungen und der Steilanstieg.“²⁹

²⁵ KLEEMANN, Werner: Mischungen für die Elastverarbeitung, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1982, S. 247 mit Verweis auf folgende Literaturstellen: CHROMOV, M.K. und LAZAREVA, K.N.: Kaučuk i Rezina, 1978, 11, 40 und MICHALAK, H.: GAK 26, 1973, 10, 844

²⁶ BAUMAN, Judson T.: Fatigue, Stress, and Strain of Rubber Components Guide for Design Engineers, Carl Hanser Verlag, München, 2008, S. 120

²⁷ Ebd., S. 121f.

²⁸ ELLUL, Maria D.: Mechanical Fatigue in: GENT, Alan N. (Ed.): Engineering with Rubber, Carl Hanser Verlag, München, 2012, S. 172

²⁹ ALSHUTH, Thomas: Dynamische Eigenschaften von Kautschuk und Elastomeren – Ermüdungseigenschaften und Kriterien in: DIK aktuell Nr. 6, November 2000, S. 14 (Online verfügbar, zuletzt abgerufen am 30.06.2020: https://www.dikautschuk.de/fileadmin/files/leseproben/po_0181.pdf)

2.2.5 Frequenz und Dehnungsrate³⁰

Die Frequenz einer auf ein Elastomer wirkenden Wechselbelastung kann zu einer Bauteilerwärmung auf Grund von Hysterese und innerer Reibung führen. Je höher die Frequenz und/oder die Dehnungsrate, umso höher die Erwärmung. Ein Bauteilausfall kann dann v.a. durch Hitzealterung oder einen Gewaltbruch infolge einer aus der Viskoelastizität bedingten temperaturabhängigen Abnahme der Zugfestigkeit und der Reißdehnung als Hauptursache und nicht durch Ermüdungsrisse – welche begleitend mit auftreten können – ausgelöst werden. Dies passiert in extremen Anwendungen und besonders bei großvolumigen Bauteilen, die einen guten Wärmeabtransport verhindern, wie z.B. Vollgummireifen oder Gummikettenpolster für Panzergleisketten.³¹ „Bei den bisherigen Ermüdungsversuchen [Stand 2008] war es nicht möglich, den Effekt der Temperaturzunahme durch die Umgebung von dem durch die Hysterese-Erwärmung hervorgerufenen zu unterscheiden. Um diesen Effekt bei Ermüdungsprüfungen zu behandeln, betrachten Sie daher die Frequenz einfach als eine Möglichkeit, die Temperatur zu erhöhen.“³² Um diesen Effekt möglichst gering zu halten, werden Ermüdungsversuche an Elastomerbauteilen bei Frequenzen von 1 Hz oder weniger durchgeführt, wodurch sich aber die Prüfzeit extrem verlängert.³³

Die Veränderung der Frequenz hat bei nicht kristallisierenden Elastomeren einen bedeutenden Einfluss. Dies hat mit „dem zeitabhängigen kontinuierlichen Risswachstum, das dem dynamischen Risswachstum überlagert ist“³⁴, zu tun. Dieses kontinuierliche Risswachstum tritt besonders bei einer niedrigeren Dynamik (Frequenzen < 0,2 Hz) aufgrund viskoelastischer Effekte auf. Bei NR hat eine Frequenz im Bereich von 0,001 bis 50 Hz wenig Einflüsse auf Ermüdungsrisse.³⁵

2.2.6 Temperatureinfluss

Einen großen Einfluss auf die Entstehung von Ermüdungsrisse stellt die Temperatur dar. Aus klassischen Lebensdauerabschätzungen ist bekannt, dass bereits eine Erhöhung der Umgebungstemperatur um 10 K die Lebensdauer des Elastomerbauteils halbieren kann. In der klassischen Ermüdungsprüfung wird die tatsächliche Temperatur am Bauteil durch Sensoren erfasst. In der Schadensanalyse stellt sich das Problem, dass eine mögliche unzulässige Temperaturerhöhung durch extreme Dynamik nur geschätzt werden kann. Extreme Temperaturerhöhungen können – wie bereits oben erwähnt – durch den Begleitschaden einer Überhitzung (Versprödung) erkannt werden.

³⁰ BAUMAN, Judson T.: Fatigue, Stress, and Strain of Rubber Components Guide for Design Engineers, Carl Hanser Verlag, München, 2008, S. 122f.

³¹ Vgl. ELLUL, Maria D.: Mechanical Fatigue in: GENT, Alan N. (Ed.): Engineering with Rubber, Carl Hanser Verlag, München, 2012, S. 172

³² BAUMAN, Judson T.: Fatigue, Stress, and Strain of Rubber Components Guide for Design Engineers, Carl Hanser Verlag, München, 2008, S. 123

³³ Vgl. MILLER, Kurt: Fatigue and Failure Testing of Elastomers for Analysis, Internetinformation der Axel Products, Inc., S. 3 (Webseite aufgerufen am 23.06.2020:

<http://www.axelproducts.com/downloads/FatigueAndFailureTestingOfElastomers.pdf>)

³⁴ ELLUL, Maria D.: Mechanical Fatigue in: GENT, Alan N. (Ed.): Engineering with Rubber, Carl Hanser Verlag, München, 2012, S. 172 darin werden Ergebnisse zitiert aus: LAKE, G.J., Prog. Rubber Technol., **45**, 89 (1983)

³⁵ Ebd., S. 172 darin werden Ergebnisse zitiert aus: LAKE, G.J., Prog. Rubber Technol., **45**, 89 (1983) und LAKE, G.J. und THOMAS, A.G. in ROBERTS, A.D. (Ed.): Natural Rubber Science and Technology, Oxford University Press, Oxford, 1988, S. 731-772

Die Auswirkungen von Temperaturänderungen sind bei nicht dehnungskristallisierenden Elastomeren am größten, da diese ihre Festigkeit über die Viskoelastizität erhalten. LAKE und LINDLEY verglichen das Verhalten von ungefülltem SBR mit ungefülltem NR über einen Temperaturbereich von 0° bis 100°C. Beim nicht bzw. kaum dehnungskristallisierende SBR nahm die Beständigkeit gegen Ermüdungsrisse ca. um den Faktor 10.000 ab, während der NR nur eine Abnahme um den Faktor 4 aufwies.³⁶

YOUNG untersuchte mit Ruß verstärkte Mischungen aus NR und synthetischen Kautschuken und zeigte mit seinen Ergebnissen, dass in den meisten Fällen die Risswachstumsrate mit steigender Temperatur zunimmt. Jedoch bei NR und chloriertem Butylkautschuk war die Risswachstumsrate bei 0°C höher als bei 25°C.³⁷

Für die Schadensanalyse von Ermüdungsrisse ist die praktische Erfahrung von KLEEMANN mitunter hilfreich, dass „die Zahl der Risse (...) mit zunehmender Temperatur [steigt], wobei die Tiefe geringer wird.“³⁸

2.2.7 Einflüsse durch Kontaktmedien³⁹

Kontaktmedien können mehrere, mitunter auch gegenläufige Effekte bewirken. Im Idealfall sorgen sie für einen Wärmeabtransport, so dass die durch Schwingungen entstandene Erwärmung im Elastomerbauteil abgeführt wird. Zum anderen kann es aber auch zu Unverträglichkeiten zwischen Elastomer und Schmierstoff kommen (z.B. Fett bei Achsmanschetten), die Alterungseffekte, wie Ermüdungsrisse verstärken. Vertragen sich hingegen Elastomer und Medium chemisch und umfasst das Medium die Gummidichtung möglichst vollständig, so kann das Kontaktmedium den Werkstoff vor schädigendem Sauerstoffkontakt schützen und somit die Lebensdauer verlängern.

In **Tab. 1** wird in eindrücklicher Weise der schädigende Einfluss des Kontaktmediums Sauerstoff deutlich.

Prüftemperatur [°C]	Biegungen bis zum Bruch	
	In Sauerstoff (O ₂)	In Stickstoff (N ₂)
20	90.000	180.000
40	45.000	190.000
60	20.000	200.000
80	7.000	195.000
100	2.000	210.000

Tab. 1: Untersuchungen zu Ermüdungsrisse an SBR-Reifenlaufflächenmischungen in unterschiedlichen Gasen (Testfrequenz: 250/min \approx 4,2 Hz)⁴⁰

³⁶ ELLUL, Maria D.: Mechanical Fatigue in: GENT, Alan N. (Ed.): Engineering with Rubber, Carl Hanser Verlag, München, 2012, S. 172f. darin werden Ergebnisse zitiert aus: LAKE, G.J. und LINDLEY, P.B.: J. Appl. Polym. Sci., **8**, 707 (1964)

³⁷ Ebd., S. 173 darin werden Ergebnisse zitiert aus: YOUNG, D.G., Rubber Chem. Technol., **59**, 809 (1986)

³⁸ KLEEMANN, Werner: Mischungen für die Elastverarbeitung, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1982, S. 241

³⁹ BAUMAN, Judson T.: Fatigue, Stress, and Strain of Rubber Components Guide for Design Engineers, Carl Hanser Verlag, München, 2008, S. 124f.

⁴⁰ KLEEMANN, Werner: Mischungen für die Elastverarbeitung, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1982, S. 248

In der Sauerstoffatmosphäre kann man sehr gut erkennen wie der Werkstoff SBR ab ca. 80°C überproportional schneller ausfällt. Dies korreliert in etwa mit seiner Dauertemperaturbeständigkeit. In der Stickstoffatmosphäre ist mit Zunahme der Temperatur sogar eine größere Widerstandsfähigkeit des Werkstoffes auszumachen. Bei 100°C zeigt sich sogar der höchste Wert. Dies hat vermutlich mit der Zunahme der Kettenbeweglichkeit bei hohen Temperaturen zu tun. Auf Grund der kurzen Prüfzeit (210.000 Zyklen bei 250/min entsprechen 14h) sind außerdem kaum andere Alterungseffekte außer der Sauerstoffalterung, welche bei der zweiten Versuchsreihe ausgeschlossen wurde, zu erwarten.

Untersuchungen von WINN und SHELTON haben gezeigt, dass bereits kleinste Mengen von Sauerstoff eine schädigende Wirkung auf GR-S (=SBR) haben. Die Forscher „stellten fest, dass bei der Biegeprüfung in reinem Stickstoff die Risswachstumsrate von GR-S-Mischungen sich stark reduzierte und dass bereits 0,4 Prozent Sauerstoff eine merklich beschleunigende Wirkung [auf das Risswachstum] hatten.“⁴¹

2.2.8 Einfluss der Unterbrechung zyklischer Belastung

In der Ermüdungsprüfung von Elastomeren kann es immer wieder zu kurzen Unterbrechungen kommen. „Die unmittelbare Folge einer Pause in einem Prüf-Dehnungszyklus ist ein allmählicher Spannungsabfall, wenn die Dehnung gehalten wird, und eine Zunahme der Spannung, wenn die Maschine die Dehnung wieder aufnimmt.“⁴² Nach Erfahrungen von BAUMAN pendelt sich nach der Wiederaufnahme der Prüfung die Kurve innerhalb weniger Minuten wieder auf ihren ursprünglichen Weg ein, so dass kurze Unterbrechungen nach seiner Meinung vernachlässigt werden können. Dies ist jedoch kritisch zu hinterfragen, da HARBOUR et al.⁴³ beobachteten, dass „das Einbringen von Erholungsphasen zwischen Belastungsblöcken konstanter Amplitude (...) zu erheblich höheren Rissausbreitungsraten [führt] als bei dem gleichen Belastungssignal ohne Erholungsphasen. Sie erklären das Phänomen ebenfalls durch eine zeitabhängige Erholung in der Mikrostruktur des Elastomers. Die stark beanspruchten Moleküle an der Rissspitze werden durch molekulare Umlagerungsvorgänge während der kontinuierlich wiederkehrenden Belastung entlastet. In den Erholungsphasen bewegen sich die Moleküle in ihre Ausgangslage zurück, weshalb es bei erneuter Belastung zu kurzzeitigen lokalen Spannungsüberhöhungen an der Rissspitze kommt.“⁴⁴

Dieser Effekt wurde auch in einem einfachen Experiment von WESCHE⁴⁵ aufgezeigt, welches SPITZ⁴⁶ in seiner Dissertation wiedergibt. Streifenförmige Probekörper mit einer Breite von 4mm und einer Dicke von 1,5 mm aus NR wurden mit einem so großen Gewicht belastet, dass

⁴¹ JUVE, A.E.: Physical Test Methods and Polymer Evaluation in: WHITBY, G.S. (Hrsg.): Synthetic Rubber, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1954, S. 467. Darin wird folgende Literaturstelle zitiert: WINN, H. und SHELTON, J.R. Ind. Eng. Chem., 37, 67-70 (1945)

⁴² BAUMAN, Judson T.: Fatigue, Stress, and Strain of Rubber Components Guide for Design Engineers, Carl Hanser Verlag, München, 2008, S. 125

⁴³ HARBOUR, R. J.; FATEMI, A.; MARS, W. V.: Fatigue crack growth of filled rubber under constant and variable amplitude loading conditions, Journal of Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Volume 30, Issue 7, S. 640-652 (2007)

⁴⁴ SPITZ, Martin: Modellbasierte Lebensdauerprognose für dynamisch beanspruchte Elastomerbauteile, Dissertation, Uni Duisburg-Essen, 2012, S. 24 (Online verfügbar, zuletzt abgerufen am 30.07.2020: https://duepublico2.uni-due.de/servlets/MCRFileNodeServlet/duepublico_derivate_00030832/Spitz_Diss.pdf)

⁴⁵ WESCHE, H.: Untersuchung der dynamischen Ermüdung von Vulkanisaten, Kautschuk Gummi Kunststoffe 33. Jahrgang, Nr. 2/1980, S. 103-116

⁴⁶ SPITZ, Martin: Modellbasierte Lebensdauerprognose für dynamisch beanspruchte Elastomerbauteile, Dissertation, Uni Duisburg-Essen, 2012 (Online verfügbar, zuletzt abgerufen am 30.07.2020: https://duepublico2.uni-due.de/servlets/MCRFileNodeServlet/duepublico_derivate_00030832/Spitz_Diss.pdf)

nach vier Stunden zerrissen. Nun entfernte WESCH das Gewicht nach fünf Minuten Belastungszeit für einen bestimmten Zeitraum. Unabhängig von der Dauer der Entlastungszeiten hielt die Probe nur noch etwa 20 Minuten. „Er erklärt dies mit einer durch Fließvorgänge begründeten Deformationsretardation. Bei Belastung werden die Molekülketten des Elastomers unterschiedlich stark gestreckt. Manche tragen eine hohe Last, andere eine nur geringe. Die Deformationsretardation bewirkt, dass die wenig belasteten Ketten immer mehr Last übernehmen und die stark belasteten Molekülketten entlastet werden. So verteilt sich die Gesamtlast mit der Zeit nahezu homogen auf alle Ketten. Bei Entlastung wird durch Erholungseffekte diese Lastverteilung rückgängig gemacht. Eine erneute Belastung führt dann dazu, dass einige wenige Ketten wieder sehr stark beansprucht werden.“⁴⁷ Und dies führt zu einem verfrühten Reißen des Probekörpers.

In der praktischen Anwendung von Elastomeren kommt es, z.B. in einem Kraftfahrzeug, zu relativ langen Pausen während des Stillstandes, die dann zu den oben beschriebenen Erholungsphänomenen führen können. Wo möglich sollte vermieden werden die Spannung auch im Stillstand ganz auf Null fallen zu lassen, da dies Ermüdungsprozesse beschleunigen kann.⁴⁸

2.2.9 Art der dynamischen Belastung (konstante Last vs. konstante Verformung)

Gerade für einen Praktiker ist es wichtig zu wissen, ob in seiner Anwendung das dynamisch belastete Elastomerbauteil einer konstanten Verformung oder einer konstanten Last ausgesetzt ist, da dies zu unterschiedlichen Auswirkungen auf den Werkstoff Gummi führt.

Für eine konstante Verformung gilt: „Je höher der dynamische Modul (die dynamische „Steifheit“) des Materials ist, um so höher ist die Energieaufnahme pro Beanspruchungszyklus und folglich um so rascher die Ermüdung. Man muß daher die Vulkanisate bei vergleichenden Prüfungen vorher jeweils auf den gleichen dynamischen Modul einstellen. Der höhere Vulkanisationsgrad entspricht stets einer ungünstigeren Ermüdung.

Wird bei dynamischer Beanspruchung unter konstanter Last verformt, so ist der Einfluß der dynamischen Steifheit in der Regel gerade umgekehrt, da härtere Vulkanisate entsprechend weniger verformt werden. (...) Eine Parallelmessung der Dämpfungs- und der Ermüdungseigenschaften eines Vulkanisates ist in jedem Falle aufschlussreich.“⁴⁹

2.2.10 Einflüsse von Retardation (Kriechen) und Relaxation⁵⁰

Werden Elastomere einer dauerhaften zyklischen Belastung ausgesetzt, kommt es zu einem zyklischen Kriechen, das viel höher als bei Metallen ist. Wird nun die Dauerfestigkeit mit einer konstanten Spannung geprüft, muss die Maschine immer nachregeln und die Amplitude wird größer, um die Ausgangsspannung zu halten.

⁴⁷ SPITZ, Martin: Modellbasierte Lebensdauerprognose für dynamisch beanspruchte Elastomerbauteile, Dissertation, Uni Duisburg-Essen, 2012, S. 23 f. (Online verfügbar, zuletzt abgerufen am 30.07.2020: https://duepublico2.uni-due.de/servlets/MCRFileNodeServlet/duepublico_derivate_00030832/Spitz_Diss.pdf)

⁴⁸ Vgl. KEMPERMANN, Th.: Alterungsschutzmittel (Kap. 2.8) in: BOSTRÖM, S. (Hrsg.): Kautschuk-Handbuch, 4. Band, Berliner Union, Stuttgart, 1961, S.359

⁴⁹ KEMPERMANN, Th.: Alterungsschutzmittel (Kap. 2.8) in: BOSTRÖM, S. (Hrsg.): Kautschuk-Handbuch, 4. Band, Berliner Union, Stuttgart, 1961, S.359

⁵⁰ Vgl. BAUMAN, Judson T.: Fatigue, Stress, and Strain of Rubber Components Guide for Design Engineers, Carl Hanser Verlag, München, 2008, S. 122

Prüft man mit einer konstanten Amplitude, kommt es zu einer zyklischen Spannungsrelaxation, d.h. die maximale zyklische Last nimmt mit der Anzahl der Prüfzyklen ab.

2.3 Werkstoffliche Einflussfaktoren auf Ermüdungsrisse⁵¹

2.3.1 Basispolymer

In der Forschung⁵² wurden Konstanten für einzelne Polymerarten ermittelt, die eine Klassifizierung ermöglichen. Hierzu muss man aber tief in die Theorie einsteigen, weshalb dem Praktiker bzw. dem Konstrukteur empfohlen wird, Elastomere über ihre Rissenergie/Energiefreisetzungsrates („tearing energy G“) zu vergleichen und zu bewerten. Die in der jeweiligen Anwendung auftretenden Rissenergien sollten deutlich unterhalb kritischen Rissfestigkeit liegen.⁵³

Grob vereinfacht kann man sagen, dass es kein Elastomer gibt, das alle dynamischen Belastungsbedingungen ideal abdeckt. Mischungen aus CR haben bei einer großen Anzahl kleiner Amplituden eine bessere Ermüdungsrisssbeständigkeit als NR oder NBR. Bei hohen Reißenergien dreht sich das Ganze ins Gegenteil um. Die Risswachstumsgeschwindigkeit nimmt für Compounds mit diesen Basispolymeren wie folgt zu (in aufsteigender Reihenfolge): NR, CR/EPDM, NBR. Es gibt meist einen zentralen Belastungsbereich, in welchem die Ermüdungsrisssbeständigkeit fast aller Polymere sehr ähnlich ist. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Polymeren werden also erst bei niedrigen bzw. hohen Belastungsfrequenzen sichtbar.⁵⁴

Allgemein ermöglichen Polymere mit einer engen Molekulargewichtsverteilung ermüdungsrisssresistentere Werkstoffe als solche mit einer breiten Molekulargewichtsverteilung. Breite Molekulargewichtsverteilungen haben eine hohe Langkettenverzweigung, dadurch wird der Heat-build-up verstärkt, was wiederum das Ermüdungsverhalten des Elastomers verschlechtert.^{55 56}

Häufig finden sich in der Literatur praktische detailliertere Informationen zu NR und SBR, da diese in großen Mengen in der Reifenindustrie zum Einsatz kommen. Dort wird auch ihr spezifisches Ermüdungsrisssverhalten beschrieben, das durch ihre hohe Anfälligkeit für Sauerstoff und Ozon verstärkt wird. „Bei NR-Vulkanisaten entstehen die Risse [schon bei kleineren Dehnungen als bei SBR]⁵⁷ verhältnismäßig schnell, aber anschließend wachsen sie nur langsam

⁵¹ Die Parameter sind größtenteils entnommen aus: BAUMAN, Judson T.: Fatigue, Stress, and Strain of Rubber Components Guide for Design Engineers, Carl Hanser Verlag, München, 2008, S. 117ff.

⁵² Z.B. CLAMROTH, R. und EISELE, U.: Untersuchungen zur Weiterreißfestigkeit und Beständigkeit gegen Reißbildung in: Kautschuk Gummi Kunststoffe KGK, 28, S.433-440, 1975 und KLÜPPEL M., HUANG G., BANDOW B.: Evaluation of Tearing Energy of Elastomer Materials in: Kautschuk Gummi Kunststoffe KGK, Dezember 2008, S. 656-659 (Artikel online frei verfügbar, zuletzt aufgerufen am 01.07.2020: https://www.kgk-rubberpoint.de/wp-content/uploads/migrated/paid_content/artikel/815.pdf)

⁵³ Vgl. ELLUL, Maria D.: Mechanical Fatigue in: GENT, Alan N. (Ed.): Engineering with Rubber, Carl Hanser Verlag, München, 2012, S. 178

⁵⁴ Vgl. SMITH, Len: The Language of Rubber, Butterworth Heinemann, Oxford, 1993, S. 61

⁵⁵ SCHNETGER, Jochen: Lexikon der Kautschuktechnik, Beuth-Verlag, Berlin, 2004, S. 280f., Stichwort: „Langkettenverzweigung“

⁵⁶ Detaillierte Informationen zum Einfluss der Molekulargewichtsverteilung auf das Ermüdungsrisssverhalten von SBR finden sich bei: ZHAO, Junling und GHEBREMESKEL, Gabe: A Review of Some of the Factors Affecting Fracture and Fatigue in SBR and BR Vulcanizates. In: Rubber Chemistry and Technology. 74, 2001, S. 411 ff. Artikel online verfügbar, zuletzt abgerufen am 10.08.2020:

https://www.researchgate.net/publication/274578975_A_Review_of_Some_of_the_Factors_Affecting_Fracture_and_Fatigue_in_SBR_and_BR_Vulcanizates

⁵⁷ Vgl. KLEEMANN, Werner: Mischungen für die Elastverarbeitung, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1982, S. 241

weiter. SBR-Vulkanisate weisen dagegen ein späteres Einsetzen der Rissbildung auf; aber wenn sie erst einmal entstanden sind, dann wachsen sie schneller weiter. Dies hängt mit dem niedrigen Weiterreißwiderstand von SBR-Vulkanisaten zusammen.⁵⁸ Hinzu kommt dass Ermüdungsrissse an synthetischen Kautschuken tiefergehend sind.⁵⁹

Dies lässt sich vermutlich dadurch erklären, dass NR auf Grund seiner geringeren Ozonbeständigkeit früher als SBR Mikroozonrisse zeigt, die dann als Ausgangspunkt für Ermüdungsrissse dienen können (siehe Ausführungen unter Kap. 2.6). Das langsamere Risswachstum bei NR kann wohl durch die Fähigkeit der Dehnungskristallisation erklärt werden. Dadurch kommt es an der Riss Spitze zu Verfestigungen. SBR dagegen neigt nicht zur Dehnungskristallisation. (siehe Ausführungen unter Kap. 2.3.5)

2.3.2 Füllstoffe

Wird der Füllstoffanteil in einem Elastomer vergrößert, erhöht sich damit auch sein Modul, also seine Festigkeit. Vergleicht man nun bei gleicher Dehnung einen ungefüllten mit einem gefüllten Werkstoff (sonst identische Mischung) in der Ermüdungsrissprüfung, zeigt der gefüllte Werkstoff eine geringere Ermüdungsrissbeständigkeit als der ungefüllte. Dies hat damit zu tun, dass der gefüllte Werkstoff steifer ist und eine höhere Dehnungsenergiedichte (engl. „*strain energy density*“) besitzt. Wird eine solche Vergleichsprüfung nicht über die Dehnung, sondern über die Spannung gesteuert (lastgeregelt), gilt natürlich das Gegenteil (siehe hierzu auch die Ausführungen in Kap. 2.2.9). Gerade aus solchen Gesichtspunkten heraus ist es für einen Anwender extrem wichtig zu wissen, ob sein Elastomerbauteil in einer last- oder verformungsabhängigen Anwendung eingesetzt wird.⁶⁰

Die verstärkenden Eigenschaften von Füllstoffen hängen v.a. von ihrer Form, Größe und ihrer Fähigkeit, mit ihrer Umgebung in Verbindung zu treten (z.B. Oberflächenbeschaffenheit), ab. Bedeutende Verbesserungen liefern v.a. sehr kleine Partikel mit einem Durchmesser von 10-15nm. „Die entsprechenden Kautschuk-Füllstoff-Grenzflächen liegen hier bei 300-400 m²/cm³. Dadurch wird die Phasenbindung pro Volumeneinheit wesentlich erhöht, wodurch Festigkeitseigenschaften, Risswachstumsbeständigkeit (...)“⁶¹ und andere Eigenschaften verbessert werden. Eine große Bedeutung kommt der Grenzfläche zwischen dem Kautschuk und dem Ruß zu, aber auch zwischen den Füllstoffpartikeln gibt es Wechselwirkungen, die eine Verstärkungswirkung haben. Diese beiden Wechselwirkungen „tragen dazu bei, die Rissinitiierung und -ausbreitung durch Energiedissipation zu verzögern.“⁶² Kommt es zu Ablösungen der Füllstoffoberfläche von der Matrix, so kann dies nach SCHUSTER – neben den bekannten Fehlstellen – als Anfangspunkt eines Risses bzw. Risskeim dienen.⁶³

„Bei gleichbleibender Mischgüte, d. h. Dispersion des Füllstoffes, steigt die Zugfestigkeit umgekehrt proportional zu der Primärteilchengröße an. Bei konstanter Rußdosierung tragen die extensive Phasenbindung und der verminderte Interaggetabstand dazu bei, dass die

⁵⁸ SEEBERGER, D.: Kautschukchemikalien (Kap. 7.1 bis 7.4) in: HOFMANN, Werner und GUPTA, Heinz: Handbuch der Kautschuk-Technologie, Dr. Gupta Verlag, Ratingen, 2001, S. 7-75

⁵⁹ Vgl. KLEEMANN, Werner: Mischungen für die Elastverarbeitung, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1982, S. 241

⁶⁰ Vgl. ELLUL, Maria D.: Mechanical Fatigue in: GENT, Alan N. (Ed.): Engineering with Rubber, Carl Hanser Verlag, München, 2012, S. 177

⁶¹ SCHUSTER, R.: Füllstoffe in: HOFMANN, Werner und GUPTA, Heinz: Handbuch der Kautschuk-Technologie, Dr. Gupta Verlag, Ratingen, 2001, S. 8-2

⁶² Ebd., S. 8-28

⁶³ Ebd., S. 8-61

Rissinitiierung erschwert und der mittlere Rissweg, der von inneren Fehlstellen ausgeht, verkleinert wird.“⁶⁴

Neben der Verbesserung der physikalischen Elastomereigenschaften verbessern Ruße auch die Beständigkeit gegen UV-Licht. Dadurch wird eine mögliche Quelle von Mikroanrissen, die Ausgangspunkt eines Ermüdungsrisses werden können, reduziert. Aktive HAF-Ruße verbessern bei vielen Mischungen die Ermüdungsrissbeständigkeit nachhaltig. Und sogar der inaktive MT-Ruß zeigt positive Effekte bei SBR, IIR und CR. „Ruß sorgt für eine zusätzliche Quelle von Hysterese und eine erhöhte Neigung zur Abstumpfung und Verzweigung der Riss Spitze.“⁶⁵ Mischungen mit hellen Füllstoffen sind rissanfälliger als die meisten rußgefüllten Mischungen. Der Einfluss des Füllungsgrades auf eine Rissentwicklung ist bei hellen Füllstoffen auffälliger.⁶⁶

2.3.3 Vulkanisationssystem

In der Regel haben schwefelvernetzte Elastomere eine bessere Ermüdungsrissbeständigkeit als mit anderen Systemen vernetzte Elastomere. Bei kurzen Vernetzungsbrücken, also 0 bis 2 Schwefelatome sind die Molekülketten in ihrer Beweglichkeit eingeschränkt. Bei Vernetzungsbrücken mit 3 oder mehr Schwefelatomen „kann die Bindung entlang der Kautschukmolekülkette wandern, ohne jedoch zurückzuspalten, d.h. die Vernetzungsdichte bleibt dabei gleich. Dieser „slipping effect“ bewirkt erstens den erwähnten ziemlich ungünstigen compression set von Schwefel-Vulkanisationen. Zweitens aber verursacht er den Abbau lokaler Spannungsspitzen, bringt also eine auf molekulare Dimension begrenzte Relaxation zustande. Das wiederum mindert die Wahrscheinlichkeit der Entstehung von „Riß-Keimen“, und somit wird die Rißbildung überhaupt wirkungsvoll zurückgedrängt.“⁶⁷

Es gibt auch eine andere Theorie nach THOMAS et al., die besagt, „dass die Polysulfid-Vernetzungen unter den hohen Spannungen um die Riss Spitze [zeitlich] vor der Haupt[molekül]kette brechen. Die Spannung wird daher über ein größeres Materialvolumen umverteilt. Bei Kohlenstoff-Kohlenstoff-Vernetzungen, die relativ stark sind, ist dieser Effekt vermutlich nicht vorhanden.“⁶⁸ Deswegen sind polysulfidische Schwefelvernetzungen sowohl bei der Prüfung nach DeMattia als auch bei der Kettenermüdungsprüfung monosulfidischen überlegen.⁶⁹

Kritisch ist aber die geringere Wärmebeständigkeit von Schwefelvernetzungen im Vergleich zu anderen Vernetzungssystemen zu betrachten.⁷⁰ Hohe Temperaturanforderungen können mit schwefelvernetzten Systemen oft nicht mehr erfüllt werden, so dass deren Vorteile nicht mehr zum Tragen kommen können.

⁶⁴ Ebd., S. 8-61

⁶⁵ ELLUL, Maria D.: Mechanical Fatigue in: GENT, Alan N. (Ed.): Engineering with Rubber, Carl Hanser Verlag, München, 2012, S. 177

⁶⁶ Vgl. KLEEMANN, Werner: Mischungen für die Elastverarbeitung, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1982, S. 241

⁶⁷ KEMPERMANN, Th.: Teil D Bayer Kautschukchemikalien 2. Vulkacit in: BAYER AG (Hrsg.): Handbuch für die Gummi-Industrie, Leverkusen, 1991, S. 364

⁶⁸ ELLUL, Maria D.: Mechanical Fatigue in: GENT, Alan N. (Ed.): Engineering with Rubber, Carl Hanser Verlag, München, 2012, S. 179f. darin wird zitiert: LAKE, G.J. und THOMAS, A.G. in ROBERTS, A.D. (Ed.): Natural Rubber Science and Technology, Oxford University Press, Oxford, 1988, S. 731-772 und BROWN, P. und PORTER, M. und THOMAS, A.G. in: KGK, 40, 17 (1987)

⁶⁹ Vgl. SEEBERGER, D.: Kautschukchemikalien (Kap. 7.1 bis 7.4) in: HOFMANN, Werner und GUPTA, Heinz: Handbuch der Kautschuk-Technologie, Dr. Gupta Verlag, Ratingen, 2001, S. 7-14

⁷⁰ Ebd., S. 7-14

2.3.4 Ermüdungsschutz- und Alterungsschutzmittel, Antioxidantien und Antiozonantien

Für die Mischungsherstellung steht eine größere Anzahl von Alterungsschutzmitteln zur Verfügung, während Ermüdungsschutzmittel nicht in solcher Vielfalt angeboten werden. „In der Regel ist ein Ermüdungsschutzmittel gleichzeitig gegen statische Autoxidation wirksam, während das Umgekehrte nicht gilt. (...) In gewissem Maße gibt es Parallelität zwischen Ermüdungs- und Ozonschutzwirkung.“⁷¹ Nachteilig ist, dass die wirksamen Ermüdungsschutzmittel verfärbend sind, die Verfärbung nimmt mit der Wirkung zu. Häufig werden zum Ermüdungsschutz aryl-alkyl-substituierte p-Phenylendiamine (z.B. 6PPD) eingesetzt. Mischungen mit 6PPD werden v.a. bei dynamischer Ozonbelastung eingesetzt und behalten eine gute Ermüdungsrisssbeständigkeit auch nach einer Wärmealterung, im Gegensatz zu Mischungen mit dem Antioxidant PBN. Der Antiozonant 77PD hingegen ist hilfreich bei der Verbesserung der statischen Ozonbelastung, weshalb einige Compoundentwickler 6PPD mit 77PD kombinieren, um die Vorteile beider Systeme zu verbinden. Obwohl der Antioxidant TMQ allein keine Ozon- oder Ermüdungsschutzwirkung verbessert, kann er in Kombination mit 6PPD die Ermüdungsbeständigkeit eines Compounds – v.a. nach thermischer Alterung – spürbar verbessern.⁷²

2.3.5 Dehnungskristallisation

Durch Kristallisation werden amorphe Molekülketten in eine geordnete Struktur gebracht, wodurch sich die Eigenschaften des Polymers verändern, wie z.B. eine Verringerung der Elastizität. Damit eine Kristallisation im größeren Umfang möglich ist, müssen die Molekülketten gewisse Voraussetzungen erbringen, wie z.B. eine lineare, wenig verzweigte Kettenstruktur. Besonders Naturkautschuk, IR, CR und teilweise HNBR sind für ihre Kristallisationsneigung bekannt, die mitunter zu Verarbeitungsproblemen führt. Zum einen kann es bei tiefen Temperaturen im entspannten Zustand zu einer Kristallisation kommen und zum anderen zeigen sie den Effekt der Dehnungskristallisation. Bei höheren Dehnungen setzt dann eine verstärkte Kristallisation ein. „Offenbar wirken dabei einige der gestreckten Moleküle als Keimbildungslinien, an welche die weniger stark gespannten Ketten z.T. unter Rückfaltung seitlich ankrystallisieren können (nach Hofmann).“⁷³ Bei Naturkautschuk erreicht die Kristallisation in der Kälte ein Maximum bei -26°C und die Kristallisationsgeschwindigkeit steigt bei einer Dehnung um 100% auf den Faktor 10, bei 200% Dehnung um den Faktor 100.⁷⁴

„Auch die Weiterreißigenschaften von Elastomeren werden von der Neigung zu Dehnungskristallisation positiv beeinflusst [159]. Der Grund liegt an den sehr hohen Zugdehnungen in einer Rissspitze, die das Material örtlich durch den Kristallisationsvorgang stark verfestigen.“⁷⁵ Bei der Begutachtung von Ermüdungsrissen muss zwischen Elastomeren unterschieden werden, die zur Dehnungskristallisation neigen und zu solchen, die diesen Effekt nicht aufweisen.

⁷¹ Ebd., S. 7-83

⁷² Vgl. IGNATZ-HOOVER, Fred: Antidegradants (chap. 19) in: DICK, John S. (Hrsg.): Rubber Technology Compounding and Testing for Performance, Carl Hanser Verlag, München, 2001, S. 458-461

⁷³ SCHNETGER, Jochen: Lexikon der Kautschuktechnik, Hüthig Verlag, Heidelberg, ²1991, S. 354 (Schlagwort: „Kristallisation-Makromoleküle“)

⁷⁴ Nach HEINISCH, Kurt F.: Kautschuk-Lexikon, Gentner Verlag, Stuttgart, 1996, S. 297 (Schlagwort: „Kristallisation“)

⁷⁵ KAINDL, Stefan: Simulation der Schwingfestigkeit von Elastomerbauteilen, Dissertation, Uni Halle-Wittenberg, 2014, S. 17 (Online verfügbar: <https://d-nb.info/1058104780/34> Zugriff auf Webseite am 24.06.2020) Zitat [159] = Röthemeyer, F., Sommer, F.: Kautschuk-Technologie. Werkstoffe, Verarbeitung, Produkte. München: Hanser 2006

„[Risse durch] Fehlstellen in [dehnungskristallisierenden] Elastomeren (...) wachsen nur, während sie gedehnt werden. Wenn die Dehnung nicht ausreicht, um während des Dehnungsvorgangs einen Bruch zu verursachen, hören die Risse auf zu wachsen, sobald die Dehnung aufhört.“⁷⁶

Bei Elastomeren, welche die Eigenschaft der Dehnungskristallisation nicht besitzen, wachsen Risse „auch dann weiter, wenn die Dehnungswirkung aufgehört hat, das Elastomer aber immer noch gespannt ist. Bei einer zyklischen Verformung profitieren die dehnungskristallisierenden Kautschuke ebenfalls stark, wenn der Dehnungszyklus nicht durch die Nulldehnung geht. Die Ermüdungslebensdauer kann um das Hundertfache verlängert werden, indem man einfach sicherstellt, dass die Mindestdehnung über 50% liegt. Bei nicht dehnungskristallisierenden Elastomeren treten solche Vorteile nicht auf. Bei diesen Elastomeren verkürzt die [erhöhte] minimale Dehnung (...) [eher] die Lebensdauer, da während der ganzen Zeit, in der das Elastomer beansprucht wird, Risse wachsen.“⁷⁷

2.3.6 Sonstige relevante physikalische Gummieigenschaften

Die schlechte Wärmeleitung von Elastomeren kann in Fällen, in welchen eine innere Erwärmung nicht schnell genug bzw. in ausreichendem Maße abgeführt werden kann, eine vorzeitige Alterung begünstigen. Die innere Erwärmung führt zu einem temperaturbedingten Abfall der Zugfestigkeit und der Reißdehnung infolge der erhöhten Kettenbeweglichkeit. Gleichzeitig findet bei Anwesenheit von Sauerstoff ein erhöhter oxidativer Angriff statt. Deswegen gilt: „Vulkanisate mit hoher innerer Reibung (Dämpfung) geben (...) [unter sonst gleichen Bedingungen] wegen der stärkeren Wärmeentwicklung schlechtere Ergebnisse im Ermüdungstest als (dynamisch) hochelastische.“⁷⁸

Mitunter wird das Ermüdungsverhalten von Elastomeren auch mithilfe der Prüfung der Wärmeentwicklung⁷⁹ („Heat build up“) beurteilt.⁸⁰ „Der Begriff ‚heat build-up‘ ist in der Tat nicht besonders gut geeignet, da [unter diesem Begriff] auch der Bruch des Prüfkörpers, die Verformung und Steifigkeitsänderungen gemessen werden können, aber er dient zur Unterscheidung der Prüfungen von solchen, bei denen nur Oberflächenrisse von Interesse sind und die Prüfkörpergeometrie so beschaffen ist, dass der Temperaturanstieg minimiert wird.“⁸¹

⁷⁶ SOUTHERN, E.: Principles of Product Design in: WHELAN, A. und LEE, K.S.: Developments in Rubber Technology -1 Improving Product Performance, Applied Science Publishers Ltd., London, 1979, S. 274

⁷⁷ Ebd., S. 274

⁷⁸ KEMPERMANN, Th.: Alterungsschutzmittel (Kap. 2.8) in: BOSTRÖM, S. (Hrsg.): Kautschuk-Handbuch, 4. Band, Berliner Union, Stuttgart, 1961, S.359

⁷⁹ Vgl. ISO 4666-1: Rubber, vulcanized -Determination of temperature rise and resistance to fatigue in flexometer testing – Part 1: Basic principles, 2010-10 siehe auch weitere Teile dieser ISO

⁸⁰ Weiterführende Informationen zu dieser Thematik, siehe: BROWN, Roger: Physical Testing of Rubber, Springer Verlag, 4. Aufl., 2006, S. 254-256 (chapter 12.2 Fatigue – Heat Build-up)

⁸¹ BROWN, Roger: Physical Testing of Rubber, Springer Verlag, 4. Aufl., 2006, S. 254

2.4 Verarbeitungstechnische Einflussfaktoren auf Ermüdungsrisse

2.4.1 Vulkanisationsgrad / Vernetzungsdichte⁸²

Es ist allgemein bekannt, dass eine leichte Untervernetzung bzw. eine eher niedrige Vernetzungsdichte den Widerstand eines Elastomers gegen dynamisches Risswachstum, Weiterreißen und Abrieb verbessert. Durch die weitmaschigere Vernetzung behält das dreidimensionale Elastomernetzwerk eine höhere Flexibilität. „Übervulkanisierte Mischungen sind anfälliger für Risse.“⁸³

Praktiker berichten auch, dass ein Indikator – neben einigen anderen – für eine gute Ermüdungsrisssbeständigkeit eine verhältnismäßig hohe Reißdehnung sein kann.⁸⁴ Diese wird ebenfalls durch eine leichte Untervernetzung bzw. eine eher niedrige Vernetzungsdichte erzielt.

2.4.2 Fehlstellen im Elastomer, Mischungsherstellung, Dispergierung

Es verdichtet sich in der Forschung immer mehr, dass die Ermüdungsrisssbeständigkeit und damit die Lebensdauer von dynamisch belasteten Bauteilen sehr stark durch das Vorhandensein von Fehlstellen (in einer Größe von ca. 100 µm und mehr) im Bauteil, durch Mikrorisse an der Oberfläche⁸⁵ und durch Ablösungen des Füllstoffes von der Elastomermatrix⁸⁶ bestimmt wird.

Die Betrachtung von Fehlstellen ist der Dreh- und Angelpunkt in bruchmechanischen Konzepten. Bis in die 1930er Jahre legte man Elastomerbauteile so aus, dass keine Spannung in der Anwendung den elastischen Materialgrenzwert überschritt. In damaligen Schadensfällen, u.a. an Brücken, in denen die Materialgrenzwerte nicht überschritten wurden, kam es dennoch zum Ausfall. „Dadurch wurde die überragende Bedeutung lokaler Spannungskonzentrationen um strukturelle Fehlstellen herum erkannt.“⁸⁷

Jedes produzierte Elastomerbauteil besitzt eine gewisse Anzahl von Fehlstellen, die bis zu einem gewissen Maß auch von der Qualität der Mischungsbestandteile, -herstellung und -verarbeitung ist. Diese Fehlstellen können zum Ausgangspunkt eines Risswachstums werden. Als Fehlstellen können schlecht dispergierte Füllstoffe (Füllstoffagglomerate), Verarbeitungshilfsmittel, Vernetzungskemikalien u.v.m. fungieren. Allerdings stehen diese Erkenntnisse – insbesondere was den Einfluss der Füllstoffdispersion betrifft – im Widerspruch zu anderen Untersuchungen, siehe unten. Das wird als Hinweis darauf gewertet, dass im Einzelfall auch die Art und Höhe der Beanspruchung eine wichtige Rolle spielt und natürlich auch die Rezeptur

⁸² Versuch einer Abgrenzung der Begriffe „Vulkanisationsgrad“ vs. „Vernetzungsdichte“: Der Vulkanisationsgrad ergibt sich durch die Prozessbedingungen beim Vulkanisieren, die Vernetzungsdichte kann sich aber auch aus dem Rezepturaufbau ergeben, je nachdem wie der Vernetzer dosiert wird. Daher lässt das Wort Vernetzungsdichte es offen, ob diese getrieben wird vom Vulkanisationsprozess oder der Rezeptur.

⁸³ KLEEMANN, Werner: Mischungen für die Elastverarbeitung, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1982, S. 241

⁸⁴ Vgl. STUDEBAKER, M.L. und BEATTY, J.R.: The Rubber Compound and Its Composition in: EIRICH, F.: Science and Technology of Rubber, Academic Press Inc., 1978, S. 385

⁸⁵ Vgl. GIESE, Ulrich: Aufklärung ermüdungs- und schädigungsrelevanter Mechanismen bei dynamisch belasteten technischen Gummiwerkstoffen, Schlussbericht zum AIF IGF-Vorhaben Nr. 15694 N, Hannover, 2011, S. 56f.

⁸⁶ Vgl. SCHUSTER, R.: Füllstoffe in: HOFMANN, Werner und GUPTA, Heinz: Handbuch der Kautschuk-Technologie, Dr. Gupta Verlag, Ratingen, 2001, S. 8-61

⁸⁷ ELLUL, Maria D.: Mechanical Fatigue in: GENT, Alan N. (Ed.): Engineering with Rubber, Carl Hanser Verlag, München, 2012, S. 160

selbst. Aber auch Verletzungen auf der Dichtungsoberfläche oder Hohlräume im mikroskopischen Maßstab sind als kritisch zu betrachten.⁸⁸ Um ein Gefühl für die Größe rissauslösender Fehlstellen zu bekommen, sei auf die Untersuchungen von LAKE verwiesen, der diese für NR bei ungefähr 25 µm angibt.⁸⁹

GIESE untersuchte EPDM und NR Werkstoffe unter dynamischer Belastung, um ermüdungs- und schädigungsrelevante Mechanismen aufzuklären. Es wurde NR gewählt, wegen dessen Dehnungskristallisation und EPDM wegen dem Thema Kettenbeweglichkeit. Bei Fehlstellen in einer Größenordnung von ca. 50 bis max. 100 µm konnte rechnerisch noch eine ausreichende Ermüdungsbeständigkeit ermittelt werden. Ferner wurde mit Hilfe dieser Rechenmodelle festgestellt, „dass sich aus den Fehlstellen heraus langsam und zunächst nicht bemerkbar Mikrorisse ausbreiten können. (...) Schließlich ist mit zunehmender Risslänge eine Beschleunigung des Risswachstums zu erwarten.“⁹⁰ Durch das zunehmende Risswachstum kann es dann zu einem Bauteilausfall bzw. einem Schadensfall kommen. Bei größeren Fehlstellen treten oben genannte Mechanismen schon bei geringerer dynamischer Belastung und zeitlich früher auf.

Die Einschätzung von Fehlstellen, wann und ob sie in der Praxis einen Riss auslösen, ist schwierig. Führt man Ermüdungsprüfungen an unbehandelten Standardserienteilen durch, erhält man eine sehr große Streuung. Deswegen behilft man sich in der Ermüdungsrissprüfung mit dem Aufbringen genau definierter Schnitte, Verletzungen („precracks“), an denen dann das Risswachstum unter dynamischer Belastung beobachtet werden kann. So bekommt man die für den Anwender relevante Aussage, „wie schnell sich der Riss einer bestimmten Größe unter bestimmten Lastbedingungen ausbreiten wird.“⁹¹ Allein schon an diesem Zusammenhang wird deutlich, dass die Behebung von Schäden durch Ermüdungsrisse oft Veränderungen an mehreren Stellschrauben und auf mehreren Ebenen erfordert, um sicher zu gehen, dass auf Grund der großen Streuung die Ausfälle nicht wieder auftreten.

Eigentlich würde man vermuten, dass eine gute Dispergierung der Inhaltsstoffe zu einer erhöhten Ermüdungsrissbeständigkeit führen würden. Untersuchungen zeigten, dass in einem Fall das Gegenteil zutrifft und in einem anderen Fall, dass die Art der Dispergierung keinen signifikanten Einfluss auf die Ermüdungsrissbeständigkeit hat.

„Insbesondere bei SBR's wird die Lebensdauer für Biegebeanspruchungen durch die Füllstoffdispersion und den Vernetzungsgrad deutlich beeinflusst. Eine schlechte Dispergierung führt oft zu verbesserten Eigenschaften in Bezug auf das Risswachstum, da die Ausbreitung des Risses durch die Agglomerate gestört wird und es zu einer Nachbildung eines „Knotenrisses“ kommt.“⁹²

MARVIN untersuchte den Dispersionseinfluss, indem er die Ruß-Einmischzeit von sonst identischen EPDM- und NR-Mischungen variierte. „In der Risswachstumscharakteristik zeigt sich kein signifikanter Unterschied zwischen den kurz und den länger gemischten Materialvarianten (...). Zieht man die Ergebnisse der computertomographischen Untersuchungen [zur Fehlstel-

⁸⁸ Vgl. ELLUL, Maria D.: Mechanical Fatigue in: GENT, Alan N. (Ed.): Engineering with Rubber, Carl Hanser Verlag, München, ³2012, S. 163

⁸⁹ LAKE, G.J.: Prog. Rubber Technol., **45**, 89 (1983) zitiert in: ELLUL, Maria D.: Mechanical Fatigue in: GENT, Alan N. (Ed.): Engineering with Rubber, Carl Hanser Verlag, München, ³2012, S. 163

⁹⁰ GIESE, Ulrich: Aufklärung ermüdungs- und schädigungsrelevanter Mechanismen bei dynamisch belasteten technischen Gummiwerkstoffen, Schlussbericht zum AIF IGF-Vorhaben Nr. 15694 N, Hannover, 2011, S. 55

⁹¹ ELLUL, Maria D.: Mechanical Fatigue in: GENT, Alan N. (Ed.): Engineering with Rubber, Carl Hanser Verlag, München, ³2012, S. 164

⁹² STUDEBAKER, M.L. und BEATTY, J.R.: The Rubber Compound and Its Composition in: EIRICH, F.: Science and Technology of Rubber, Academic Press Inc., 1978, S.384f.

lendetektion] mit in Betracht, wird deutlich, dass sich der Unterschied in der Dispersion offenbar nicht auf das Risswachstumsverhalten auswirkt. Dominant ist offensichtlich die Festigkeit des Polymers, sowie dessen Wechselwirkung mit dem Füllstoff. Diese Annahme wird durch die quasistatischen Untersuchungen bestätigt, bei denen sich, wie in den Risswachstumsexperimenten, kein Unterschied zwischen der jeweils kurz und der länger gemischten Variante zeigte. Im Material vorliegende Risse wachsen, in der jeweiligen Materialpaarung, bei gleichen Belastungen somit auch mit gleicher Risswachstumsrate an.“⁹³

2.4.3 Probleme im Herstellungsprozess, Nachbearbeitungsschritte, Montage

Ermüdungsrisse können auch durch werkzeugbedingte Gründe, z.B. scharfe Kanten oder ungleichmäßige Wanddicken von Membranen ausgelöst werden. Ebenso können raue Oberflächen durch Nachbearbeitungsschritte (z.B. unsachgemäße Entgratung), einvulkanisierte Gratreste und Probleme in der Montage (z. B. Schiefstellung oder Außermittigkeit bei rotierenden Teilen) der Auslöser von ermüdungsbedingten Ausfällen sein.

2.5 Konstruktive Einflussfaktoren

Ermüdungsrisse treten eher selten an klassischen Dichtungsformen, sondern v.a. an Reifen und komplexen technischen Gummiformteilen auf. Es ist heute Stand der Technik die Spannungen und Dehnungen in einem komplizierten Bauteil bereits in der Entwicklungsphase mittels FEM zu berechnen. Ermüdungsrissen treten öfter an Faltenbälgen bzw. sogenannten Achsmanschetten auf, „die große Winkelbewegungen zulassen müssen. (...) Die auf das axialsymmetrische Bauteil wirkenden Lasten sind nicht axialsymmetrisch. Daher muss bei der Berechnung eine Kombination von Axial- und Querlasten berücksichtigt werden. In der Simulation werden Spannungsspitzen im Bauteil sichtbar. Durch geeignete Anpassung des Bauteildesigns oder teilweise durch Optimierung des Werkstoffs können die Spannungsspitzen reduziert werden.“⁹⁴ Dadurch wird die Lebensdauer solcher Bauteile erhöht, da Ermüdungsrisse zeitlich später auftreten.

Neben Achsmanschetten sind des Öfteren auch Membranen von Ermüdungsrissen betroffen. Normalerweise erfahren Membranen im Einspannbereich die höchsten Spannungen. Deswegen ist besonders in diesen Bereichen eine gummigerechte Konstruktion notwendig (große Radien statt scharfkantiger Übergänge).⁹⁵ Ermüdungsrisse sind meist ein sehr lokal, auf kleinste Bereiche begrenztes Phänomen, das gerade bei komplexen, neuartigen Bauteilen nicht immer durch die Erfahrung des Konstrukteurs erkannt werden kann, weshalb FEM-Berechnungen zur Schadensvermeidung sehr zu empfehlen sind.⁹⁶

⁹³ LUDWIG, Marvin: Entwicklung eines Lebensdauer-Vorhersagekonzepts für Elastomerwerkstoffe unter Berücksichtigung der Fehlstellenstatistik, Dissertation, Uni Hannover, 2017, S. 56

(Online verfügbar, zuletzt abgerufen am 30.06.2020: <https://www.repo.uni-hannover.de/bitstream/handle/123456789/9075/898248361.pdf?sequence=1&isAllowed=y>)

⁹⁴ RINNBAUER, Meike: Technische Elastomerwerkstoffe, Die Bibliothek der Technik Band 293, Verlag moderne Industrie, 2006, S. 50f.

⁹⁵ Vgl. FLITNEY, R.: Seals and Sealing Handbook, Butterworth Heinemann / Elsevier, Oxford, 2014, S. 360

⁹⁶ Beispiel eines US-amerikanischen Unternehmens zur Analyse von Gummi-Materialermüdung mittels FEA: <https://endurica.com/>

Beispielfilm, welcher die Berechnung eines Faltenbalges zeigt: <https://youtu.be/K2MS1P1eEZI>

2.6 Abgrenzung zu Ozonrissen

Sowohl Ermüdungs- als auch Ozonrisse fallen unter den Bereich der Oberflächenrisse und treten auf, wenn ein Elastomerbauteil unter Spannung steht. Ermüdungs- und Ozonrisse werden zwar durch unterschiedliche Ursachen ausgelöst und „in der Praxis und in der Literatur (...) als getrennte Phänomene betrachtet. Die Einflüsse lassen sich jedoch besonders bei Reifen nicht trennen. Unter den Einsatzbedingungen muß ein komplexer Mechanismus angenommen werden.“⁹⁷ Dies lässt sich auch daran erkennen, dass Mischungen für diese Anwendungen meist eine Kombination von Antioxidantien und Antiozonantien erhalten.

In einer frühen Untersuchung von NEAL und NORTHAM⁹⁸ (1932) wurde auch über die mögliche Entstehung minimaler Ozonmengen durch statische elektrische Entladung bei Dauerknickversuchen im Bereich der Biegung nachgedacht. In späterer Literatur wurde dieser Punkt nicht mehr gefunden.

Kleinste Ozonrisse auf der Oberfläche eines Gummiformteils können auch als jene Fehlstellen fungieren, die als Ausgangspunkt für Risse durch eine mechanische Materialermüdung dienen.⁹⁹ LAKE und THOMAS formulieren den Einfluss von Ozonrissen noch präziser: „Unter zyklischer Belastung, wenn das mechanische Risswachstum sehr langsam oder gar nicht stattfindet, kann der Ozonangriff der vorherrschende Prozess des Risswachstums sein, bis die Risse groß genug sind, um ein mechanisches Wachstum zu ermöglichen, d.h. bis G_0 ¹⁰⁰ erreicht ist.“¹⁰¹

Nicht nur bei Reifen, sondern auch bei technischen Gummiformteilen und Dichtungen gibt es bei diesem Schadensbild komplexe ineinander verwobene Mechanismen. In jeder Schadensanalyse wird neben der Begutachtung der geschädigten Dichtung auch das Umfeld, in welchem der Schaden auftrat, zusammen mit dem Auftraggeber untersucht. In den meisten Fällen ergibt sich dann ein klareres Bild, ob Materialermüdung oder Ozoneinwirkung die Hauptursache für den Schadensfall waren. Die Eingruppierung des Schadens, welche auch für eine Problemlösung entscheidend ist, erfolgt dann nach der für den Ausfall relevanten Hauptursache.

2.7 Sonderform von Ermüdungsrisen an O-Ringen: Spiralarisse¹⁰²

Bei den Spiralarissen an O-Ringen handelt es sich um eine Sonderform von Ermüdungsrisen. Durch eine zyklisch auftretende Torsionsbeanspruchung infolge von Axialbewegungen kommt es dabei zu meist nur lokal auftretenden Verdrillungen. Der dadurch erzeugte dreidimensionale

⁹⁷ KLEEMANN, Werner: Mischungen für die Elastverarbeitung, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1982, S. 247f.

⁹⁸ NEAL, A.M und NORTHAM, A.J., Ind. Eng. Chem., 23, 1449 (1932) zitiert in: SOMERVILLE, A.A.: Effect of Oxygen Absorbers in Rubber in: Industrial and Engineering Chemistry, 28. Jg., Heft 1, 1936, S. 13

⁹⁹ ELLUL, Maria D.: Mechanical Fatigue in: GENT, Alan N. (Ed.): Engineering with Rubber, Carl Hanser Verlag, München, 2012, S. 163

¹⁰⁰ NB: G_0 ist die Energie, die benötigt wird, um mechanisches Risswachstum zu initiieren.

¹⁰¹ LAKE, Graham J. und THOMAS, Alan G.: Strength (chapter 5) in: GENT, Alan N. (Ed.): Engineering with Rubber, Carl Hanser Verlag, München, 2012, S. 138

¹⁰² Vgl. RICHTER, Bernhard und BLOBNER, Ulrich: Spiralarisse an O-Ringen – „Verdrehte Dichtungswelt“ Serie Fachwissen Schadensanalyse von Elastomerbauteilen, Januar 2020, Artikel online verfügbar: https://www.o-ring-prueflabor.de/files/fachwissen_schaden_spiralarisse_01_2020.pdf Dieser Artikel erscheint im Druck unter dem Titel: „Verdrehte Dichtungswelt“ – Spiralarisse an O-Ringen in: BERGER, Karl-Friedrich und KIEFER, Sandra (Hrsg.): Jahrbuch 2021 Dichten.Kleben.Polymer (vormals Dichtungstechnik Jahrbuch), Verlag ISGATEC GmbH

Spannungszustand erzeugt dann eine linienförmige Einschnürung, welche sich in einem ungefähr 45° Winkel um die O-Ring-Schnur herumwickelt und schließlich zu Einrissen entlang dieser Spannungslinie führen kann. Der Schadensmechanismus der Spirallisse begrenzt den dynamischen Einsatz von O-Ringen und wird daher auch von vielen O-Ring Hersteller beschrieben.

In einem einfachen Experiment des O-Ring Prüflabors wurde ein O-Ring verdreht, in diesem Zustand eingespannt und dann unter dem Digitalmikroskop betrachtet und vermessen. Die sichtbaren Einschnürungen sind die Linien größter örtlicher Dehnungen. Genau senkrecht dazu, d. h. entlang dieser Linien, wird der O-Ring bei zyklischer Beanspruchung einreißen. Es ist die Folge eines zweiachsigen Spannungszustandes (Zug- und Torsionsspannung).



Abb. 2: Künstlich nachgestellte, umlaufende Einschnürung an einem O-Ring wie bei einem Spiralliss; durch Einspannung wird die Verdrillung gehalten

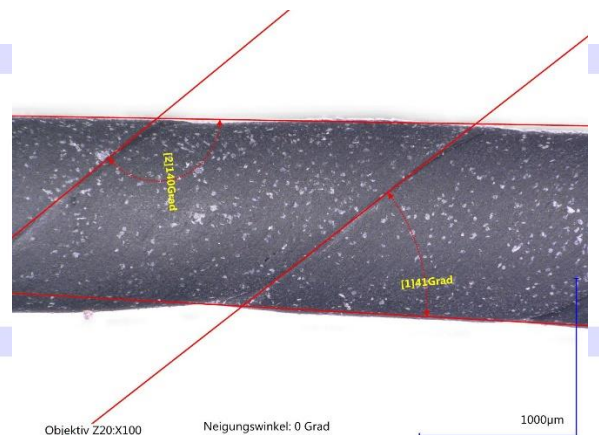


Abb. 3: Die Vermessung des Winkels der Einschnürung ergab hier mit dem Digitalmikroskop einen Winkel von ca. 41°.

Aus der Festigkeitslehre ist bekannt, dass „bei Torsion die größten Dehnungen unter 45° zur Wellenachse auftreten“. ¹⁰³ Deswegen werden auch Dehnungsmessstreifen bei der Untersuchung der Torsion metallischer Wellen immer in einem 45°-Winkel aufgeklebt.

Spirallisse an O-Ringen beginnen so gut wie immer an der Oberfläche der Dichtung. Sobald also erste Anzeichen an der Oberfläche eines O-Ringes erkennbar sind, ist der Kern des O-Ringes immer noch intakt. Dies lässt sich theoretisch erklären: „Die elastische Spannungsverteilung bei reiner Torsion ist an der Oberfläche maximal und in der Mitte der Welle Null. Daher entsteht der Bruch bei reiner Torsion normalerweise an der Oberfläche, die der Bereich der höchsten Spannung ist.“ ¹⁰⁴

¹⁰³ BÜRGELE, Ralf: Festigkeitslehre und Werkstoffmechanik: Lehr- und Übungsbuch Festigkeitslehre, Band 1, Springer Vieweg Verlag, 2005, S. 74

¹⁰⁴ GEITNER, Fred K. und BLOCH, Heinz P.: Machinery Failure Analysis and Troubleshooting: Practical Machinery Management For Process Plants, Butterworth-Heinemann, 4. Auflage, 2012, S. 31

3. Schadensbild

3.1 Beschreibung des Schadensbildes und problematischer Bereiche

Das wesentliche Schadensmerkmal sind gerichtete/orientierte Risse, die im Vergleich zu chemisch bedingten Rissen tiefer sind und nicht flächig in Erscheinung treten, sondern nur in begrenzten Oberflächenzonen, in denen die größten Spannungen bzw. Verformungen aufgetreten sind.

„Die ersten Folgen der Ermüdung sind meist visuell nicht zu erkennen, da im allgemeinen der Zerstörungsprozeß von innen nach außen fortschreitet, häufig sogar so, daß die Risse unter Oberfläche eine andere Richtung zeigen als die direkt an der Oberfläche befindlichen.“¹⁰⁵

Es gibt unterschiedliche Ansätze bei der Untersuchung von Ermüdungsrissen. Wir arbeiten vorzugsweise mit einer Beurteilung des Rissbildes und weniger bzw. seltener mit der Beurteilung von Bruchflächen, da sich die Bruchfläche von Elastomeren mit der Temperatur ändert. Nimmt die Temperatur zu, nimmt der Widerstand des Materials ab und die Bruchfläche wird glatter. Ebenso verhält es sich bezüglich Rissfortpflanzungsgeschwindigkeiten, wo hohe Rissgeschwindigkeiten eine eher glatte Bruchfläche hinterlassen, und langsame eine raue.¹⁰⁶

Die **Abb. 4 bis 8** zeigen typische Erscheinungsbilder von Ermüdungsrissen. Allerdings lässt sich die Vorgeschichte bei realen Anwendungen im Feld eben nicht so detailliert beschreiben wie dies bei den an Versuchsständen erzeugten Fehlerbildern ist. Der Ausfall aus **Abb. 4** geht auf eine fehlerhafte Montage zurück, die Fehlerbilder aus den **Abb. 5 bis 8** gehen letztlich auf eine Überbeanspruchung (zu hohe zyklische lokale Verformungen) zurück, das heißt sie erklären sich anwendungsbezogen.

Eine Bewertung bzw. Eingruppierung des Ausmaßes von Ermüdungsrissen an realen Schadensbauteilen ist sehr schwierig, da selbst bei genormten Laborversuchen, bspw. mit dem DeMattia Gerät eine solche Eingruppierung je nach Prüfer unterschiedlich vorgenommen werden kann. Roger BROWN schreibt hierzu: Jedes Bewertungsverfahren, das zur üblichen Auswertung des längsten Risses noch zusätzlich „die Messung von Länge, Tiefe und Anzahl der Risse beinhaltet, ist im Allgemeinen nicht akzeptabel, und in jedem Fall wird jede gewonnene Präzision normalerweise durch die Variabilität zwischen den Probekörpern überdeckt.“¹⁰⁷

¹⁰⁵ ECKER, R.: Mechanisch-technologische Prüfung von Kautschuk und Gummi (Kap. 5.2) in: BOSTRÖM, Siegfried (Hrsg.): Kautschuk-Handbuch, Berliner Union, Stuttgart, 5.Bd., 1962, S. 155

¹⁰⁶ Vgl. HORST, Thomas.: Spezifische Ansätze zur bruchmechanischen Charakterisierung von Elastomeren, TU-Dpress, 2011 (Dissertation) zitiert in: STOČEK, Radek und KRATINA, Ondřej und KUŘITKA, Ivo: Focus on Future Trends in Experimental Determination of Crack Initiation in Reinforced Rubber in: Chemicke listy 108, S. 75 (Artikel online verfügbar, zuletzt abgerufen am 09.08.2020:
http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2014_s1_s71-s77.pdf

¹⁰⁷ BROWN, Roger: Physical Testing of Rubber, Springer Verlag, 4. Aufl., 2006, S. 248

Abb. 4: Fehlerhaft montierte Manschette aus Polyesterurethan (AU) mit Ermüdungsrissen

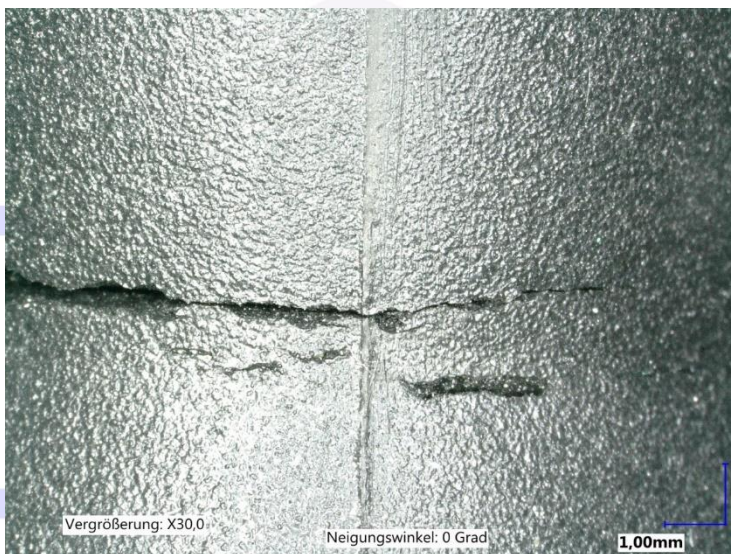


Abb. 5: Ermüdungsriss durch zyklische Knickbeanspruchung an einem HNBR-Schlauchabschnitt

Abb. 6: Ermüdungsrisse an einer EPDM-Membran, ausgelöst durch Überbeanspruchung bzw. zu hohe Drücke

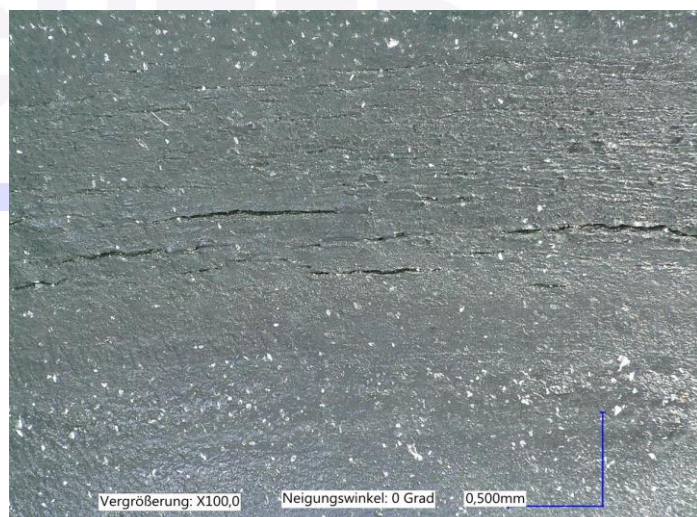




Abb. 7: Hutmembran aus FKM mit Gewebeeinlage mit übermäßig hohen lokalen Verformungen: Die Membran wurde nach der Vulkanisation auf „links“ gestülpt, also von innen nach außen



Abb. 8: Sonderform von Ermüdungsrissen an O-Ringen: Spirallrisse, hier einem weit fortgeschrittenen Stadium

3.2 Auswirkungen des Schadens

Kleine Ermüdungsrisse werden im Anfangsstadium meist nicht bemerkt. Solche Risse werden oft nur durch Zufall entdeckt oder bei der systematischen Auswertung von Rückläufern aus dem Versuch oder der Bauteilerprobung.

Größere Ermüdungsrisse zeigen sich durch Leckagen oder Funktionsausfälle.

Einige Bauteile, die von Ermüdungsrissen betroffen sein können (z.B. Achsmanschetten), gehören nicht zur höchsten Sicherheitsklasse. Deswegen empfiehlt sich für jede Anwendung individuell festzulegen, welche Form von Ermüdungsrissen und in welchem Ausmaß nach welcher Einsatzzeit tolerierbar sind.

Als Richtschnur zum besseren Verständnis und als Hilfe zur Erstellung eines Bauteillastenheftes bzw. einer Materialspezifikation können die vier Bewertungskriterien für Ermüdungsprüfungen nach BAUMAN¹⁰⁸ dienen:

1. Kompletter Durchriss der Probe wie in der Metallprüfung

¹⁰⁸ BAUMAN, Judson T.: Fatigue, Stress, and Strain of Rubber Components Guide for Design Engineers, Carl Hanser Verlag, München, 2008, S. 118f.

2. Spannungsabnahme über einen bestimmten Grenzwert hinaus (unabhängig von der zyklischen Stressrelaxation)
3. Beginn des Risswachstums
4. Rissgröße

In manchen Fällen können Ermüdungsrisse ein *Folgeschaden* von rissinitiierendem Ozonangriff sein.

Als *Begleitschaden* bezeichnet man einen Schaden, der häufig parallel in Gegenwart eines bestimmten Schadensmechanismus auftritt, aber durch eine andere Ursache ausgelöst wurde. Bei Ermüdungsrissen können dies verschiedene Formen der Alterung sein (siehe Diagramm in Abb. 1).

Allerdings werden in den meisten Dichtungsanwendungen jegliche Art von Rissen als eine Vorstufe zu einem Ausfall und damit als erhebliches Sicherheitsrisiko eingestuft.

3.3 Abgrenzung zu ähnlichen Schadensbildern

Ermüdungsrisse ähneln Ozonrissen (**Abb. 9**) und sind – wie bereits oben mehrfach beschrieben – eng mit diesen verbunden.



Abb. 9: Ozonrisse an einem statisch vorgedehnten Faltenbalg aus einem BR/IR-Elastomer

Auf den ersten Blick könnte man auch Risse durch chemischen Angriff (**Abb. 10**) mit Ermüdungsrissen verwechseln. Ein chemischer Angriff verursacht aber nicht zwangsläufig orientierte Risse, die senkrecht zur Spannung sind. Diese Art von Rissen kann großflächig verteilt sein, eben auf alle Bereiche, welche mit dem kritischen Kontaktmedium in Berührung kamen.



Abb. 10: Flächige Risse infolge chemischen Angriffs (Vergrößerung 30-fach, Probe leicht gedehnt, daher trotzdem mit leichter Orientierung)

Eine Untersuchung von EDMOND et al. aus dem Jahr 2003 befasste sich mit Ermüdungsprüfungen an Elastomeren, um Vorhersagen zur zyklischen explosiven Dekompression zu machen. Sie verglichen die Bruchflächen von Probekörpern aus Ermüdungsprüfungen (durchgeführt mit einem Instron Prüfgerät) mit Bruchflächen von Dichtungen, welche nach mehrfachen explosiven Dekompressionen ausgefallen waren und konnten eine Ähnlichkeit zwischen beiden Bruchflächen feststellen. „Dies bestätigt die Annahme, dass Ermüdung ein wesentlicher Versagensmechanismus in Situationen mit zyklischen explosiven Dekompressionen ist.“¹⁰⁹ Auch wenn der Schadensmechanismus eine Materialermüdung ist, so werden dennoch solche durch Gase verursachten Schäden unter dem Mechanismus der Explosiven Dekompression geführt, da man über diese Einordnung am schnellsten zu einer Problemlösung und -behebung kommt. Zudem tritt der Schadensmechanismus der explosiven Dekompression teilweise auch als Gewaltbruch auf, das heißt bereits nach einem Zyklus.

4. Präventionsmaßnahmen

Wie oben dargestellt, können spezielle Polymereigenschaften und Details in der Rezepturgestaltung (Alterungsschutzmittel, Füllstoffe) die Resistenz gegenüber Ermüdungsrissen erheblich beeinflussen. Daher ist es bei komplexen Beanspruchungen im Grenzbereich der Leistungsfähigkeit von Elastomeren zur Vermeidung von Ermüdungsrissen unabdingbar mit Dichtungslieferanten zusammenzuarbeiten, welche die Rezepturkonstanz auch sicherstellen können. Das setzt in der Regel eine eigene Werkstoffentwicklung und die Herstellung der Mischung im eigenen Haus voraus. Darüber hinaus ist es für Freigabeversuche wichtig, die Prüfbedingungen bis ins Detail zu spezifizieren, um reproduzierbare Bedingungen abzusichern. Seitens des Anwenders sollten auch ausreichende Möglichkeiten vorhanden sein, die angelieferten Dichtungen bzw. Gummiteile analytisch (TGA und FTIR) und physikalisch (Zugversuch und DMA) mit dem Freigabemuster zu vergleichen.

Bei komplexen Elastomerbauteilen ist es hilfreich FEM-Berechnung in der Konstruktionsphase zu erstellen, um maximale Spannungszustände in den Bauteilen zu lokalisieren und gegebenenfalls durch konstruktive Änderungen zu eliminieren.

5. Praxistipps (Prüfmöglichkeiten / Normempfehlungen)

Die Prüfung der Ermüdungsbeständigkeit von Elastomeren ist ein sehr weites Feld und hat eine lange Tradition. In der frühen Literatur werden sie u.a. als „Hin- und Herbiegeversuche“¹¹⁰ beschrieben, die jedoch noch nicht genormt waren.

Mit der rapiden Zunahme der Krafffahrzeuge und dem damit erhöhten Bedarf an Reifen, wurden genormte Prüfverfahren immer notwendiger. In der Ermüdungsbeständigkeitsprüfung von

¹⁰⁹ EDMOND, K.; HO, E.; FLITNEY, R.; GROVES, S.; EMBUURY, P.; RIVEREAU, J.-M.: Elastomer fatigue testing for explosive decompression cycling prediction, 17th International conference on fluid sealing (Tagungsband), York, BHR Group, 2003, S. 249

¹¹⁰ MEMMLER, K. Handbuch der Kautschukwissenschaft, Verlag von S. Hirzel. Leipzig, 1930, S. 660 f.

Elastomeren hat sich eine Vielzahl von Methoden entwickelt. Bereits 1951 wurden schon 19 dynamische Prüfverfahren in einer US-amerikanischen Veröffentlichung genannt.^{111 112}

5.1 Klassifizierung der üblichen Ermüdungsprüfungen für Gummi

Die Prüfungen lassen sich anhand der gängigen Normen in drei Gruppen unterteilen¹¹³:

1. Biegeprüfung (engl. „Flex cracking“):

- ISO 132 (2017-07): Rubber, vulcanized or thermoplastic – Determination of flex cracking and crack growth (De Mattia)
- ASTM D430 (2006, reapprov. 2018) Standard Test Methods for Rubber Deterioration – Dynamic Fatigue

und Risswachstum (engl. „Cut growth“)

- ISO 133 (1983) ersetzt durch ISO 132
- ASTM D813 (2007, reapprov. 2019): Standard Test Method for Rubber Deterioration – Crack Growth
- ASTM D1052 (2009, reapprov. 2019): Standard Test Method for Measuring Rubber Deterioration – Cut Growth Using Ross Flexing Apparatus

2. Flexometerprüfung (engl. „Flexometer testing“)

- ISO 4666-1 (2010-10): Rubber, vulcanized – Determination of temperature rise and resistance to fatigue in flexometer testing – Part 1: Basic principles
- ISO 4666-2: Part 2: Rotary flexometer zurückgezogen
- ISO 4666-3 (2016-11): Rubber, vulcanized – Determination of temperature rise and resistance to fatigue in flexometer testing – Part 3: Compression flexometer (constant-strain type)
- ISO 4666-4 (2018-09): Rubber, vulcanized - Determination of temperature rise and resistance to fatigue in flexometer testing – Part 4: Constant-stress flexometer
- ASTM D623 (2007, reapprov. 2019): Standard Test Methods for Rubber Property – Heat Generation and Flexing Fatigue In Compression

3. Ermüdungsprüfung unter Zugbeanspruchung (engl. „Tension fatigue“)

- ISO 6943 (2017-08): Rubber, vulcanized – Determination of tension fatigue

Bei den Biegeprüfungen ist eine Vielzahl von Variationen auf dem Markt, da viele Anwender von Elastomeren jeweils den eigenen Anwendungsfall möglichst exakt nachstellen wollten. Am bekanntesten sind wohl die folgenden drei Geräte: Die Knickermüdung nach DeMattia ist die in Europa am meisten verbreitete Methode und wird deswegen im Folgenden (Kap. 5.3) noch detaillierter dargestellt.

In der DuPont-Kettenermüdungsmaschine werden einzelne Elastomerproben zu einer endlosen Kette zusammengefügt. Die Probekörper weisen unterschiedliche Rillen auf. Die Kette

¹¹¹ MARVIN, R.S.: Report of Standards on the Cooperative Program on Dynamic Testing. April 1951 in: Ind. Eng. Chem. 44, 1952, S. 696 zitiert in: SPÄTH, Wilhelm: Beiträge zur Technologie der Hochpolymeren: Gummi und Kunststoffe, A.W. Gentner Verlag, Stuttgart, 1956, S. 153

¹¹² Eine gute Übersicht findet sich unter: BUIST, J.M. und WILLIAMS, G.E.: A Review of the Mechanism of Flex-Cracking and Flex-Cracking Tests -I in: India Rubber World, n3 June 1951, S. 320-322 und n4 July, 1951, S. 447-449 und S. 567ff.

¹¹³ Vgl. SMITH, Len: The Language of Rubber, Butterworth Heinemann, Oxford, 1993, S. 58

wird mit einem Motor über eine bestimmte Anzahl von Rollen angetrieben. Durch die spezielle Anordnung der Rollen bekommt man bestimmte Biegungen der Probekörper.

In der Flipper-Maschine werden Probekörper in eine sich drehende Scheibe eingespannt. Bei der Drehung dieser Scheibe schlagen die Probekörper an eine drehbare Rolle und werden dabei geknickt (Knickerermüdung).

Im British Standard 903 von 1950 wird die damalige Anwendung und Zuordnung dieser drei schon damals länger eingesetzten Prüfmethode gut beschrieben: „Es ist vorzuziehen, die Maschine zu verwenden, die die Betriebsbedingungen am besten simuliert (z.B. die DeMattia-Maschine für Reifenlaufflächen und Seitenwände, die DuPont-Maschine für ein Antriebs- oder Förderband und die Flippermaschine für Schuhe).“¹¹⁴

Flexometer arbeiten mit Kompressionbeanspruchung oder Rotationsscherbeanspruchung bzw. einer Kombination aus beidem, die zyklisch auf den zylindrischen Probekörper aufgebracht wird. Eine wichtige damit ermittelte Kenngröße ist der Zermübwiderstand eines Werkstoffes. Durch eine vorgegebene dynamische Beanspruchung entsteht im Inneren des Elastomers eine starke Erwärmung. Kann diese nicht abgeführt werden, kommt es zu einer Zerstörung des Elastomers im Inneren (Zermübung). Mit Hilfe der ISO 4666 kann eine Lebensdauer ermittelt werden. Sie „ergibt sich aus der Laufzeit bis zum Beginn der Zerstörung des Prüfkörpers, sie wird als Bruchschwingzahl angegeben. Das Auftragen der Beanspruchungsamplitude gegen den Logarithmus der Bruchschwingzahl ermöglicht die Erstellung einer Wöhler-Kurve.“¹¹⁵

5.2 Kritik an Ermüdungsprüfungen und Empfehlungen zur Werkstoffauswahl

Bei den Biegemethoden besteht das allgemeine Problem, dass die auftretenden Dehnungen nicht exakt definiert werden können. Bei zyklischen Prüfungen unter einfacher Zugbeanspruchung (siehe Kap. 5.4) kann dieses Problem einfach gelöst werden.¹¹⁶ Diese Methodik zielt auf den bruchmechanischen Ansatz ab und ist auch aus solchen Überlegungen heraus entstanden.

Hinzu kommt, dass in der Realität die meisten Spannungszustände viel komplexer als in den klassischen Versuchen zu Rissentstehung und -wachstum sind. „Mit vielen dieser [Biege-] Testmethoden sind mehrere Nachteile verbunden. Das Hauptproblem ist die Schwierigkeit, die Biegebelastung/-spannung zu kontrollieren, die mit dem Modul des Elastomers variieren kann. Daher können irreführende Ergebnisse erzielt werden, da die Ermüdungslebensdauer von Gummi sowohl von der Größe als auch von der Art der angewandten Dehnung abhängt. Dies erklärt zum Teil, warum Ergebnisse, die im Labor z.B. mit der de Mattia-Prüfmaschine erzielt wurden, selten mit der Leistungsfähigkeit in der Anwendung korrelieren.“¹¹⁷

Es stellt sich die Frage auf welcher Grundlage ein Anwender von Elastomerbauteilen Werkstoffe auswählen soll, um den rissbeständigsten für seinen Einsatz zu finden. ELLUL empfiehlt „die experimentelle Bestimmung der Wachstumsrate von Ermüdungsrissen über einen breiten Bereich von Reißenergien. Eine Beziehung zwischen Risswachstumsrate und Ermüdung kann

¹¹⁴ British Standard 903: Part 26 : Section 26.1 1950 in: BRITISH STANDARDS INSTITUTION (Ed.): British Standard Methods of Testing Vulcanized Rubber, London, 1950, S. 167

¹¹⁵ RÖTHEMEYER, Fritz und SOMMER, Franz: Kautschuktechnologie, Hanser Verlag, München, 2001, S. 508f.

¹¹⁶ Vgl. BROWN, Roger: Physical Testing of Rubber, Springer Verlag, 4. Aufl., 2006, S. 249f.

¹¹⁷ ELLUL, Maria D.: Mechanical Fatigue in: GENT, Alan N. (Ed.): Engineering with Rubber, Carl Hanser Verlag, München, 2012, S. 165 mit Verweis auf BROWN, Roger: Physical Testing of Rubber, Applied Science Publishers, London, 1979, S. 214-223

dann leicht hergestellt werden. Ein Praktiker sollte bruchmechanische Tests verwenden, um die Empfindlichkeit gegenüber Belastungsniveaus zu charakterisieren, und er sollte Versuche zu rissauslösenden Fehlstellen verwenden, um initiale Fehlstellen zu charakterisieren.“¹¹⁸

5.3 Prüfgerät nach DeMattia

Da dieses Prüfgerät relativ verbreitet ist, soll es stellvertretend für die vielen anderen älteren Prüfmethode zur Rissbeständigkeit von Elastomeren näher erläutert werden. Die Anfänge des DeMattia¹¹⁹ Prüfgerätes gehen bis in die 1920/30er Jahre zurück. Die Erstausgabe einer ASTM-Norm zu diesem Prüfgerät stammt aus dem Jahr 1935 (ASTM D430-35T, first approved 28th September 1935¹²⁰), im Jahr 1944 kam die ASTM D 813 (first approved 13th December 1944¹²¹) hinzu.

Ursprünglich wurde das DeMattia-Gerät v.a. für die Prüfung von Reifenlaufflächen und -seitenwänden¹²² eingesetzt. Mit diesem Apparat können Dauerknickversuche durchgeführt werden, die eine Aussage über die Beständigkeit gegen Rissbildung geben. Das Prüfverfahren ist auch in der ISO 132 genormt. Diese ISO Norm ersetzte die DIN 53522, die mehrere Teile umfasste, welche Anfang 1960 zum ersten Mal herausgegeben wurden.¹²³ Die Probekörper haben eine Größe von 150 x 25 x 6,3mm und besitzen eine querlaufende Nut mit einem Radius von 2,38mm. In dieser Nut konzentriert sich die Spannung und deshalb beginnt in der Regel dort der Riss. Durch Stauchen wird der Probekörper im Bereich der Nut geknickt, üblicherweise 300mal pro Minute (5 Hz). Der maximale Abstand zwischen den Einspannungen beträgt 75mm, der maximale Hubweg 57mm. Es gibt 6 unterschiedliche Rissklassen. Es wird die Anzahl der Verformungszyklen notiert, sobald die ersten Risse auftreten. Nach verschiedenen Unterbrechungen läuft die Prüfung weiter, wobei immer wieder das Rissbild bewertet und zusammen mit der Zyklenanzahl notiert wird. Nach ISO 132 ist für die Bewertung die Länge des größten Risses ausschlaggebend, die Tiefe des Risses fließt nicht in die Bewertung ein. Ein Hauptproblem ist die Bewertung des Rissbildes, welche stark vom jeweiligen Prüfer und seiner Einschätzung abhängt. „Die Beurteilung anhand eines Standardsatzes von Fotografien ist nur dann sinnvoll, wenn der zu prüfende Gummi dem gleichen Muster folgt wie der abgebildete.“¹²⁴

¹¹⁸ Ebd., S. 166

¹¹⁹ Wie öfters in der Elastomerprüfung liegen die Anfänge dieses Verfahrens bzw. sein(e) Erfinder im Dunkeln. Bisherige Recherchen des Autors legen nahe, dass das Prüfgerät im Umfeld der US-amerikanischen Reifenindustrie entwickelt und zuerst eingesetzt wurde. Es könnte einen Zusammenhang mit den Erfindern Barthold und Peter DeMattia geben, von denen ab den 1910er Jahren Patente u.a. zur Reifenherstellung erhalten sind (z.B. <https://patents.google.com/?inventor=Mattia+Barthold+De>) In Gerichtsakten aus dem Jahr 1941 (vgl. <https://cite.case.law/f-supp/38/260/>) tauchen die Firmen DeMattia Brothers, Inc. und die De Mattia Foundry & Machine Company auf. Am 1. April 1928 erwarb die National Rubber Machinery Co. den gesamten Grundbesitz, alle Vermögenswerte, das Geschäft und den Firmenwert der DeMattia Firmen. (<https://books.google.de/books?id=tlkdAQAAMAAJ&pg=PA344&lpg=PA344&dq=Barthold+and+Peter+DeMattia&source=bl&ots=qBQkuM0ose&sig=ACfU3U3XjUEiQkDWDifLGE0ZES970YSMLw&hl=de&sa=X&ved=2ahUKewjYs-XI7u3qAhUJLewKHUJaC-kQ6AEwAXoECAoQAQ#v=onepage&q=Barthold%20and%20Peter%20DeMattia&f=false> , siehe S. 341) Nachfolger der National Rubber Machinery Co. ist die Firma „McNeil & NRM Inc.“ (<http://www.mcneilnrm.com/index.htm>), die jedoch keine Informationen mehr zu den DeMattia Firmen besitzt. Eventuell wurde dieses Prüfgerät bereits in den 1920er Jahren in einer dieser oben genannten DeMattia Firmen entwickelt und/oder gebaut bzw. von Barthold und Peter DeMattia entwickelt.

¹²⁰ E-Mail Mitteilung von ASTM.org vom 03.08.2020

¹²¹ E-Mail Mitteilung von ASTM.org vom 03.08.2020

¹²² Vgl. British Standard 903: Part 26 : Section 26.1 1950 in: BRITISH STANDARDS INSTITUTION (Ed.): British Standard Methods of Testing Vulcanized Rubber, London, 1950, S. 167

¹²³ E-Mail Mitteilung des Beuth-Kundenservices vom 09.08.2020

¹²⁴ BROWN, Roger: Physical Testing of Rubber, Springer Verlag, 4. Aufl., 2006, S. 248

Außerdem werden an dieser Prüfmethode undefinierte Oberflächendehnungen und lange Prüfzeiten kritisiert.¹²⁵

5.4 Tear and Fatigue Analyzer (TFA), System Bayer-Coesfeld

Im Jahr 1992 wurde in der Zeitschrift KGK¹²⁶ der Tear Analyzer (heute meist als „Tear and Fatigue Analyzer (TFA)“ bezeichnet) erstmalig vorgestellt. Es handelt sich um eine Entwicklung der damaligen Bayer AG in Zusammenarbeit mit dem Prüfgerätehersteller Coesfeld. Er lässt sich keiner der in Kap. 5.1 genannten Prüfnormen zuordnen. Nach Aussage der Fa. Coesfeld kann man den TFA am ehesten der ISO 27727 (2008-09: Rubber, vulcanized – Measurement of fatigue crack growth rate) zuordnen. Diese Norm lässt aber an einigen Stellen zu viele Freiräume und wird daher nicht als Prüfnorm empfohlen.¹²⁷ Mit Hilfe des TFA lassen sich differentielle Wachstumsraten von Rissen in dynamisch belasteten Elastomeren ermitteln. Das Gerät zeichnet sich durch die vielen möglichen Parametervariationen aus (Prüfung bei unterschiedlichen Temperaturen oder Gasen (Luft oder N₂), auch mit erhöhter Ozonkonzentration). Es können Prüffrequenzen von 0,1 bis 50 Hz bei Dehnungsamplituden von bis zu 50 mm realisiert werden. Der TFA misst die Anzahl der Belastungszyklen, die Risskonturlänge, Kraft- und Spannungsmaximum und erstellt eine Videoaufnahme der Rissentwicklung. Das Gerät kontrolliert die Dehnung, das Kraft- und Dehnungsminimum und die Temperatur der Prüfkammer. Als Ergebnis erhält man die gesamte, die elastische und die dissipierte Energiedichte, die Risslänge und die Risswachstumsrate.¹²⁸ Daraus lässt sich ein sogenannter Paris-Erdogan-Plot¹²⁹ erstellen, „welcher das Material anwendungs- und geometrieunabhängig charakterisiert.“¹³⁰ „Das Risswachstum als Funktion der elastischen Energiedichte ermöglicht quantitative Vergleiche von Vulkanisaten unterschiedlicher Alterungs- und Ermüdungsbeständigkeit, Einfluss von Vernetzungssystemen (...), Alterungsschutzmitteln, Polymermodifikationen, Verschnitten.“¹³¹

RICHTER

¹²⁵ Vgl. HÄRTEL, V., SCHREIBER, F. und THEISEN, D.: Kurz- und Langzeitprüfungen von Werkstoffen bzw. Bauteilen und die Korrelation zur Praxis in: KGK-Kautschuk Gummi Kunststoffe, 40. Jg., Nr. 7, 1987, S. 659

¹²⁶ EISELE, U.; KELBCH, S. und ENGELS, H.-W.: The tear analyzer: a new tool for quantitative measurements of the dynamic crack growth of elastomers in: Kautschuk Gummi Kunststoffe KGK, 45, S. 1064-4069, 1992

¹²⁷ E-Mail Mitteilung von Dr. Christian Kipscholl, Geschäftsführer der Coesfeld GmbH & Co. KG vom 31.07.2020

¹²⁸ Vgl. COESFELD Materialtest (Hrsg./ Firmenschrift): Tear Analyser System Bayer, S: 5

PDF-Dokument online verfügbar, zuletzt abgerufen am 03.08.2020:

http://products.coesfeld.com/WebRoot/WAZ/Shops/44402782/5238/4E95/81BE/D2E4/ECD2/D472/521A/7669/61-471-..._TA_ProdInf_engl.pdf

¹²⁹ Vgl. https://en.wikipedia.org/wiki/Paris%27_law

¹³⁰ E-Mail Mitteilung von Dr. Christian Kipscholl, Geschäftsführer der Coesfeld GmbH & Co. KG vom 31.07.2020

¹³¹ SCHNETGER, Jochen: Lexikon der Kautschuktechnik, Beuth-Verlag, 3. Auflage, 2004, S. 521 (Schlagwort: Tear Analyser)

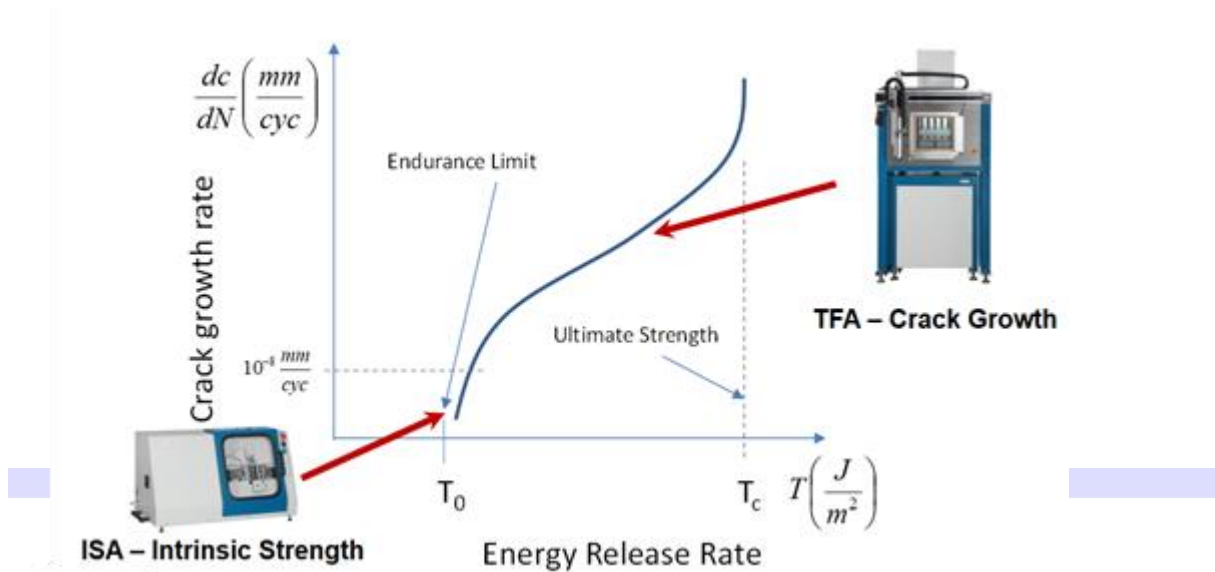


Abb. 11: Risswachstumsrate in Abhängigkeit der Energiefreisetzungsrate: Mit dem TFA wird v.a. der mittlere Bereich der Kurve erfasst, während der relativ neue ISA den Rissbeginn analysiert. Bild: Coesfeld GmbH & Co.KG

Seit kurzem wird der TFA durch ein weiteres Gerät ergänzt, den „Intrinsic Strength Analyser“ (ISA), „welches die gezielte und zeiteffiziente Messung der kleinsten risstreibenden Energie (Endurance Limit, [siehe **Abb. 11**]) ermöglicht. Dieser Wert ist als Einzelwert interessant, da unterhalb des Endurance Limit gar kein Risswachstum stattfinden kann. Dieser Wert kann mit dem TFA nur zeitaufwendig ermittelt werden.“¹³² Dieses Prüfgerät wurde ebenfalls von der Fa. Coesfeld in Zusammenarbeit mit Endurica LLC¹³³ entwickelt.

5.5 Einsatz von industrieller Computertomografie

Bei kritischen Schadensfällen ist auch eine Detektierung von Fehlstellen im Elastomer mit Hilfe von industrieller Computertomografie möglich. Im Gegensatz zur klassischen Mikroskopie lassen sich mit der CT große Volumina prüfen und diese Prüfmethode hat somit eine „höhere Repräsentativität im Falle sehr seltener großer Fehlstellen.“¹³⁴

6. Sonstiges

Dieser Artikel erscheint in einer Kurzfassung in der Zeitschrift DICHT!, Ausgabe 03/2020.

Link zu den Digitalausgaben dieser Zeitschrift:

<https://dichtdigital.isgatec.com/de/profiles/1d1042c9c353/editions>

¹³² E-Mail Mitteilung von Dr. Christian Kipscholl, Geschäftsführer der Coesfeld GmbH & Co. KG vom 31.07.2020

¹³³ Siehe auch Kurzinformation zu ISA: <https://endurica.com/getting-a-quick-read-on-durability-with-the-intrinsic-strength-analyser/> (Webseite zuletzt abgerufen am 03.08.2020)

¹³⁴ GIESE, Ulrich: Aufklärung ermüdungs- und schädigungsrelevanter Mechanismen bei dynamisch belasteten technischen Gummiwerkstoffen, Schlussbericht zum AIF IGF-Vorhaben Nr. 15694 N, Hannover, 2011, S. 55