

Ermüdungsbeständigkeit von Elastomeren in Abhängigkeit von der Spannungsamplitude und der Unterspannung

F. Abraham, T. Alshuth, Hannover, (Deutschland)

S. Jerrams, Dublin, (Irland)

Ermüdung, Wöhlerkurve, Unterspannung, EPDM, Dehnungskristallisation,

Diese Arbeit befaßt sich mit der Ermüdungsbeständigkeit von Elastomeren am Beispiel von ungefülltem und gefülltem EPDM. Die Ermüdungsbeständigkeit wurde an Hantelprüfkörpern ermittelt, indem die Prüfkörper bis zur Zerstörung kraftgesteuert harmonisch bei 1 Hz belastet wurden. Es wurden sowohl Versuche zur Erstellung einer Wöhlerkurve durch Steigerung der Spannungsamplitude durchgeführt, als auch der Einfluß der Unterspannung bei konstanter Spannungsamplitude untersucht. Die Ergebnisse der Versuche zeigen den bekannten Einfluß der Amplitude, jedoch darüber hinaus eine ebenso ausgeprägte Abhängigkeit der Lebensdauer von der Unterspannung bei gefüllten Elastomeren. Die Abhängigkeit der Lebensdauer von der Unterspannung ist nicht Folge dehnungsinduzierter Kristallisation und kann in gewissen Grenzen konstruktiv zur Erhöhung der Lebensdauer von Bauteilen genutzt werden.

Fatigue Resistance of Elastomers in Dependence of Stress Amplitude and Minimum Stress

Fatigue, Woehler-Curve, Minimum Stress, EPDM, Strain Crystallisation

This paper describes the dependence on test parameters of the fatigue resistance of EPDM. Fatigue was investigated using dumbbell specimens under load control at 1Hz until failure. Tests were made in order to create a common Woehler $-(s-n)$ -curve while increasing the stress amplitude and also to show the influence of increasing minimum stress at constant stress amplitude on fatigue properties. The results of these tests confirmed the well-known amplitude dependence of fatigue life in filled rubbers. An additional significant influence on fatigue life is seen to be the minimum stress in the cycles applied to these materials. Fatigue life is not dependent on strain crystallisation in EPDM and the results of this research can be used to increase the fatigue lives of components made from this material.

1. Einführung

Ogleich Elastomerwerkstoffe zu außerordentlich hohen Dehnungen bei relativ geringen Spannungen fähig sind und diese Eigenschaft konstruktiv vielfältig genutzt wird, zeigen sie wie alle anderen Werkstoffe auch ein gewisses Festigkeitsniveau und Ermüdung.

Mechanische Ermüdung von Elastomeren zeigt sich in einer fortschreitenden Verringerung bestimmter physikalischer Eigenschaften – unter Umständen infolge langsamen Rißfortschritts – während andauernder dynamischer Belastungen. Wie ausgedehnte Untersuchungen an Metallen [1,2] gezeigt haben tragen eine Reihe atomarer und molekularer Prozesse zur Ermüdung bei. Erklärungen dieser Art stecken im Falle von Elastomeren mit ihren komplexen Wechselwirkungsgefüge zwischen Polymer, Füllstoff, Weichmacher etc. eher in den Anfängen. Vorhersagen der Ermüdungseigenschaften von Elastomerwerkstoffen und Elastomerbauteilen sind damit auch heute von teils empirischer Natur. Selbst die Frage, welche dauernden Belastungen Elastomere unbeschadet überstehen können, ist nicht gänzlich klar, da Wöhlerkurven [3] wegen des experimentellen Aufwandes in der Literatur nur selten zu finden sind und auch in diesen Beispielen Dauerstandsbereiche nicht deutlich zutage treten. Die betriebsfeste Auslegung von Elastomerbauteilen – trotz Nutzung moderner Verfahren wie Finite-Elemente-Methode – ist deshalb auch heute noch eine Herausforderung. Dies nicht zuletzt aufgrund der Tatsache, daß die Frage eindeutiger Kriterien der Ermüdung wie Spannung, Verformung oder Verformungsenergiegedichte nicht abschließend geklärt ist.

Im wesentlichen sind zwei Gründe für die Sonderstellung von Elastomeren im Vergleich zu anderen Werkstoffen hinsichtlich der Charakterisierung der Bruch- und Ermüdungseigenschaften und der quantitativen Umsetzung zur Vorhersage der Bauteilermüdung zu nennen: Erstens hängen die Ermüdungseigenschaften von Elastomerwerkstoffen nicht allein von der Basisrezeptur (Polymer, Füllstoff, Weichmacher), sondern in ausgeprägtem Maße von der Feineinstellung über das Vernetzungssystem und den Alterungsschutz ab. Zweitens reagieren Elastomere aufgrund der nichtlinearen Eigenschaften und der typischen Viskoelastizität relativ empfindlich auf unterschiedliche Belastungsmoden, Dehnungsgeschwindigkeiten sowie Temperaturen. Beide Gründe ziehen die Notwendigkeit einer gezielten Abstimmung der Rezeptur auf die Praxisbelastungen der Bauteils, jedoch darüber hinaus der Randbedingungen während Laboruntersuchungen zur Ermittlung von Ermüdungskennwerten nach sich.

2. Zielsetzung

Das Ermüdungsverhalten linearelastischer Materialien wie von Metalle und Keramikwerkstoffen ist gut erforscht und beschrieben in der Literatur. Insbesondere findet man dort experimentelle Untersuchungen der Ermüdungseigenschaften sowohl unter Variation der Spannungsamplitude als auch der Unterspannung mit den dazugehörigen Wöhler-Kurven bzw. Haigh-Diagrammen. Für Elastomere, die ein nicht linearelastisches Verhalten zeigen, sind nur wenige Untersuchungen bekannt. Speziell der Einfluß der Unterspannung ist kaum oder nur für Naturkautschuk (NR) untersucht worden. In der Veröffentlichung von André et al [4] wird der Einfluß der Unterspannung und der Spannungsamplitude für einen Naturkautschuk-Werkstoff in einem Haigh-Diagramm

dargestellt. Die gefundene Lebensdauererhöhung infolge der Unterspannungserhöhung und damit einhergehend der Maximalspannung wurde schon früher von Gent [5] mit der Dehnungskristallisation des Naturkautschuk erklärt.

Eigene Untersuchungen zur Abhängigkeit der Rißfortschrittsgeschwindigkeit in dynamischen Versuchen zeigten eine Reduzierung der Rißfortschritts mit steigender Unterspannung im Falle nicht dehnungskristallisierender Werkstoffe.

Konsequenterweise ist es ein Kernziel dieser Arbeit, die Abhängigkeit der Ermüdung im Falle nicht zur Dehnungskristallisation befähigter Elastomere in Abhängigkeit der Spannungsamplitude und der Unterspannung eingehend zu charakterisieren. Weiter erscheint es sinnvoll, in diese Untersuchung Werkstoffe mit und ohne Füllstoff einzubeziehen, um gleichzeitig Auswirkungen der Verstärkung und der bei gefüllten Systemen auftretenden Spannungserweichung sowie des Payne-Effektes zu studieren. Ein zweites Ziel ist es, zu mehr Klarheit bezüglich der Frage zu gelangen, welche Kriterien (Spannung, Dehnung Energie) und Kennwerte die Ermüdungseigenschaften von Elastomerwerkstoffen charakterisieren können. Zuverlässige Vorhersagen der Lebensdauer dynamisch beanspruchter Bauteile unter Nutzung bruchmechanischer Konzepte sowie der Finite-Elemente-Methode hängen entscheidend von der Anlegung der richtigen Kriterien und Kennwerte ab.

3. Methoden und Materialien

Die Untersuchungen wurden an ungefüllten und gefüllten EPDM-Vulkanisaten durchgeführt. Das ungefüllte Vulkanisat besteht aus handelsüblichen EPDM und einem beschleunigten Vernetzungssystem. Im Falle des gefüllten Vulkanisats wurden zusätzlich 110 Teile niederaktiven Rußes und 70 Teile Weichmacher eingemischt. Für die Untersuchung wurden Hantelprüfkörper (freie Einspannlänge 25mm, Durchmesser 15mm) verwendet, wie in Abb 1 gezeigt. Diese Prüfkörper zur Realisierung eines uniaxialen Dehnungszustandes eignen sich für Messungen in Zug und Druck.

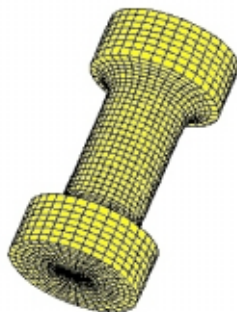


Abb. 1: Graphik eines Hantelprüfkörper

Dynamische Ermüdungsuntersuchungen wurden mit Hilfe eines servohydraulischen Prüfsystems (MTS 831.50) bei Raumtemperatur und harmonischer Beanspruchung mit 1 Hz durchgeführt (Abb. 2). Die Versuche wurden kraftgesteuert (spannungsgesteuert) bis zum

Ausfall des Prüfkörpers gefahren, wobei jeweils mindestens drei Prüfkörper pro Prüfbedingung benutzt wurden, um eine ausreichende Statistik sicherzustellen. Während der Ermüdungsversuche wurden laufend der dynamische Elastizitätsmodul und der Verlustfaktor sowie bei festgelegten Lastspielzahlen komplette Hystereseschleifen für weitergehende Auswertungen aufgezeichnet.



Abb. 2: Foto der Servohydraulikmaschine mit eingespanntem Prüfkörper

An dem ungefüllten und gefüllten EPDM-Werkstoff sind jeweils Versuchsreihen unter Variation der Kraft- bzw. Spannungsamplitude bei einer Unterkraft bzw. Unterspannung von 0N (0MPa) sowie unter Variation der Unterkraft bzw. Unterspannung bei verschiedenen Amplituden gefahren worden (Abb. 3 und 4).

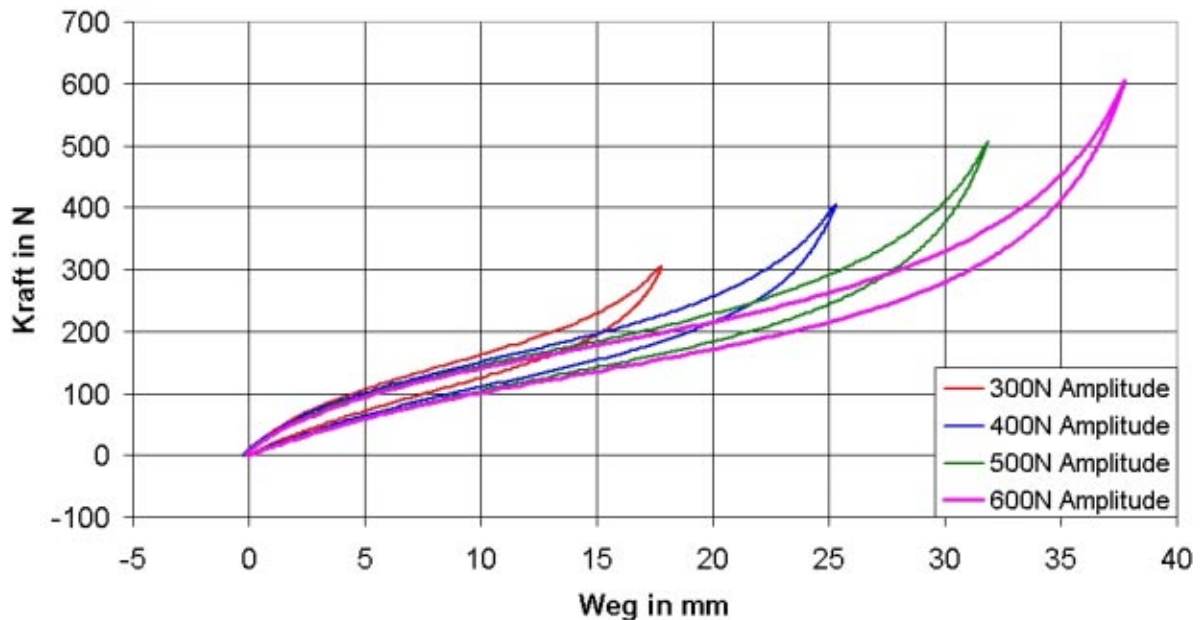


Abb. 3: Darstellung von 4 Testbedingungen zur Erzeugung einer Wöhlerkurve (0N Unterspannung)

Die Versuchsreihen mit verschwindender Unterspannung repräsentieren dabei näherungsweise voll relaxierende Bedingungen, wie sie ähnlich auch bei

Pulsbeanspruchungen auftreten. Im Falle der Reihen mit Variation der Unterspannung wird dagegen keine vollständige Relaxation zugelassen.

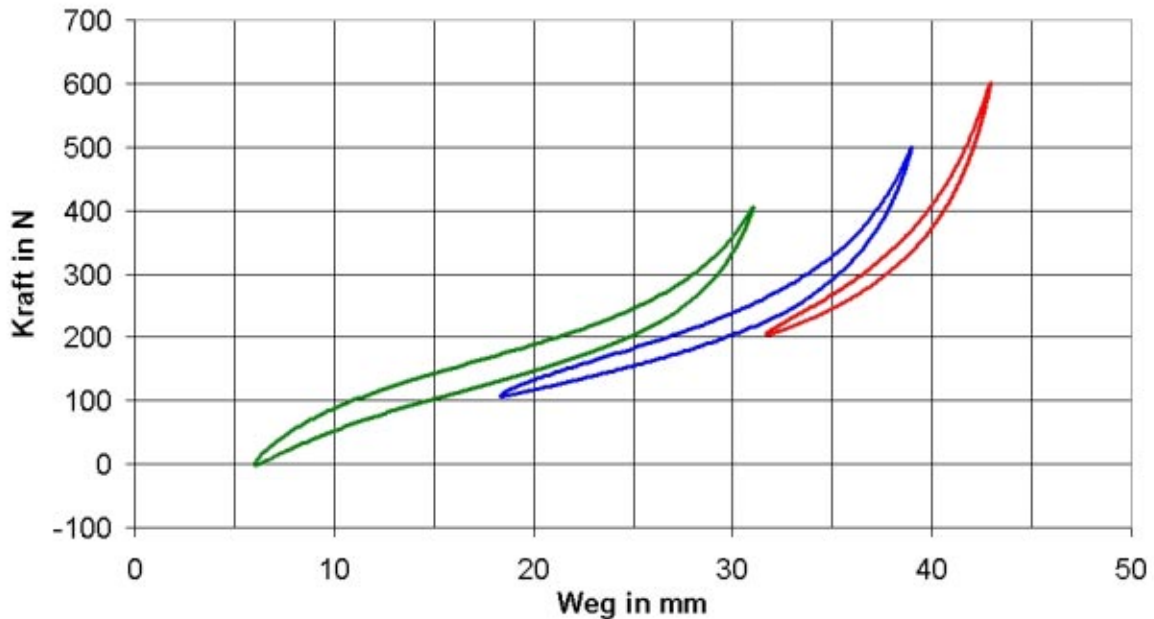


Abb. 4: Darstellung von 3 Testbedingungen zur Bestimmung der Unterspannungsabhängigkeit (konstante Spannungsamplitude)

Die Versuchsreihen unter Variation der Spannungsamplitude und der Unterspannung sind jeweils so angelegt worden, daß die vielfach als Kriterium für Ermüdung angenommene Maximalspannung durch unterschiedliche Kombinationen der zwei Regelgrößen eingestellt wurde.

4. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Ermüdungsuntersuchungen an den ungefüllten EPDM-Werkstoffen sind in den Abb. 5 bis 7 dargestellt. Abbildung 5 zeigt die wohlbekannte Abhängigkeit der Ermüdungseigenschaften von der Maximalspannung (Wöhler-Kurve). Dabei ist es offenbar unerheblich, ob die Maximalspannung über eine hohe Spannungsamplitude oder eine hohe Unterspannung zustandekommt. Relaxierende und nichtrelaxierende Versuchsbedingungen führen zu identischen Abhängigkeiten. Damit kann für Vorhersagen der Lebensdauer ein Maximalspannungskriterium herangezogen werden.

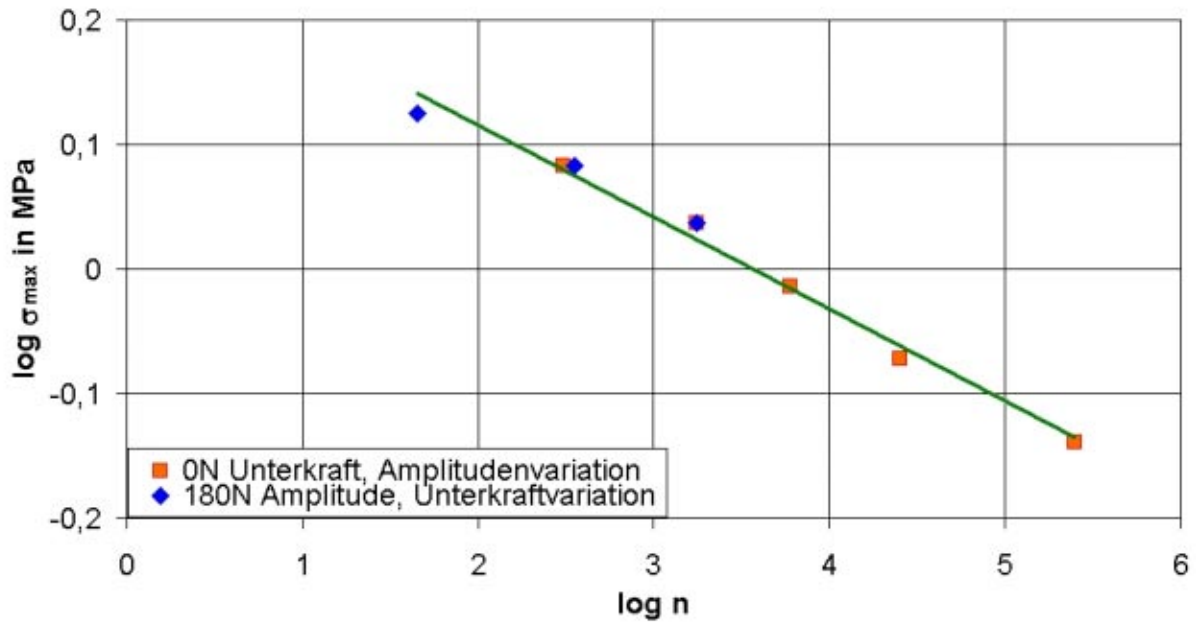


Abb. 5: Ermüdungseigenschaften von ungefülltem EPDM (Maximalspannungseinfluß)

Ein ebenso einheitliches Bild liefert die experimentelle Abhängigkeit der Ermüdungseigenschaften von der dynamischen Verformung der Abb. 6 im Falle des ungefüllten EPDM-Elastomers.

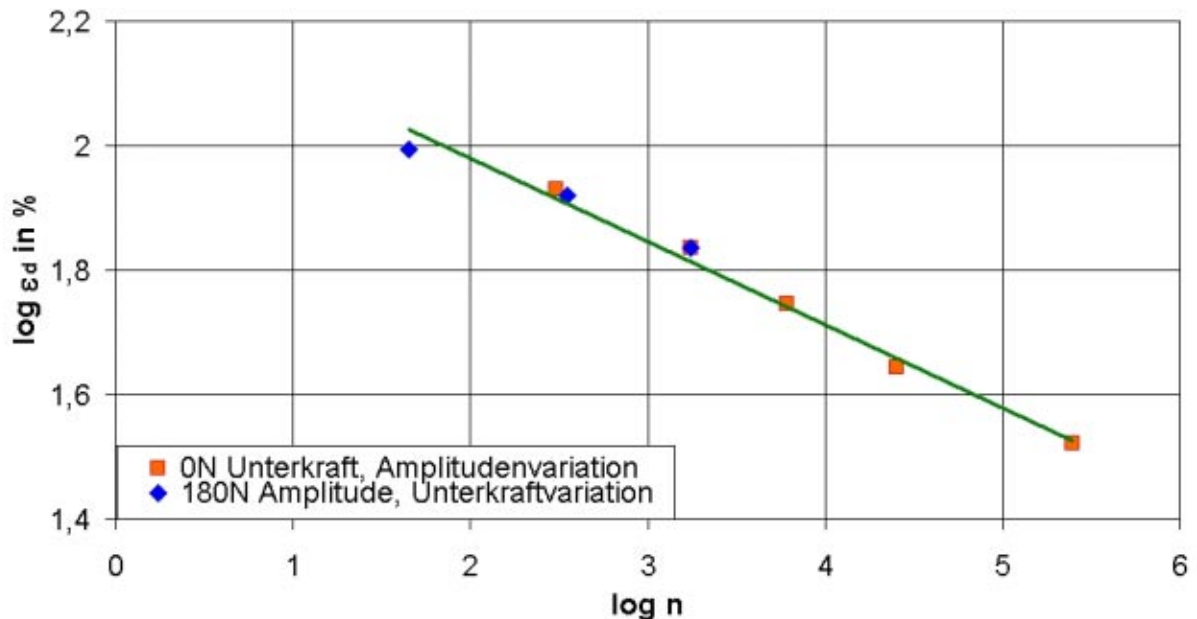


Abb. 6: Ermüdungseigenschaften von ungefülltem EPDM (Verformungsamplitudeneinfluß)

Eine Berücksichtigung der detaillierten Versuchs- bzw. Betriebsparameter ist offenbar für präzise Vorhersagen nicht erforderlich. Mit diesen Ergebnissen verwundert es nicht, daß eine Darstellung der Abhängigkeit der Ermüdung von der dynamischen Energie ebenfalls unabhängig von den eingestellten Versuchsparametern (Unterspannung und Spannungsamplitude) zu einem einheitlichen Bild im Falle von ungefüllten EPDM führt, wie Abb. 7 zeigt.

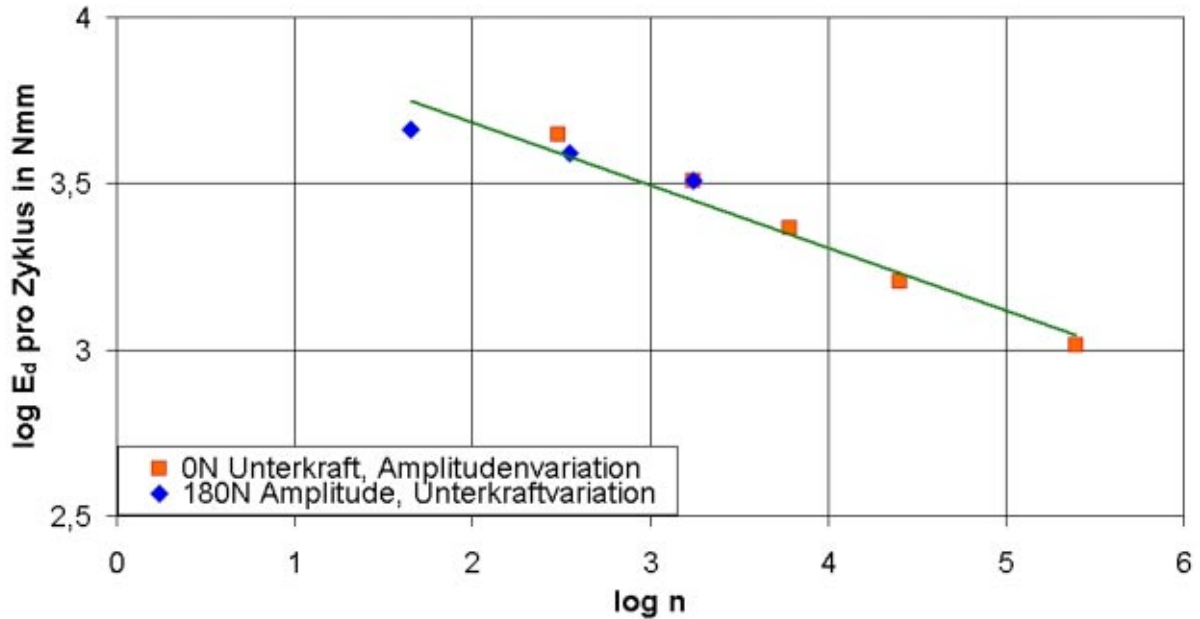


Abb. 7: Ermüdungseigenschaften von ungefülltem EPDM (Energieabhängigkeit)

Grundlegend hiervon abweichend verhält sich der untersuchte gefüllte Elastomerwerkstoff (Abb. 8 bis 10). Bei Variation der Spannungsamplitude ergibt sich eine Abhängigkeit der Ermüdung bzw. der Lebensdauer in Form einer Wöhler-Geraden (Abb. 8). Mit steigender Maximalspannung reduziert sich erwartungsgemäß die Lebensdauer, sofern eine konstante Unterspannung von 0MPa aufgebracht wird. Bei steigender Unterspannung und konstant gehaltener Spannungsamplitude steigt jedoch die Lebensdauer trotz steigender Maximalspannung. Damit existieren in der Kurvenschar der Abb. 8 Bedingungen mit gleicher Maximalspannung, jedoch deutlich unterschiedlicher Ermüdung. Einerseits kann das Maximalspannungskriterium für Ermüdung nicht angelegt werden, andererseits resultiert hieraus die experimentelle Feststellung, daß unter bestimmten Parametern eine steigende Maximalspannung im Falle gefüllter Elastomere einen Anstieg der Lebensdauer um einen Faktor >10 zur Folge haben kann.

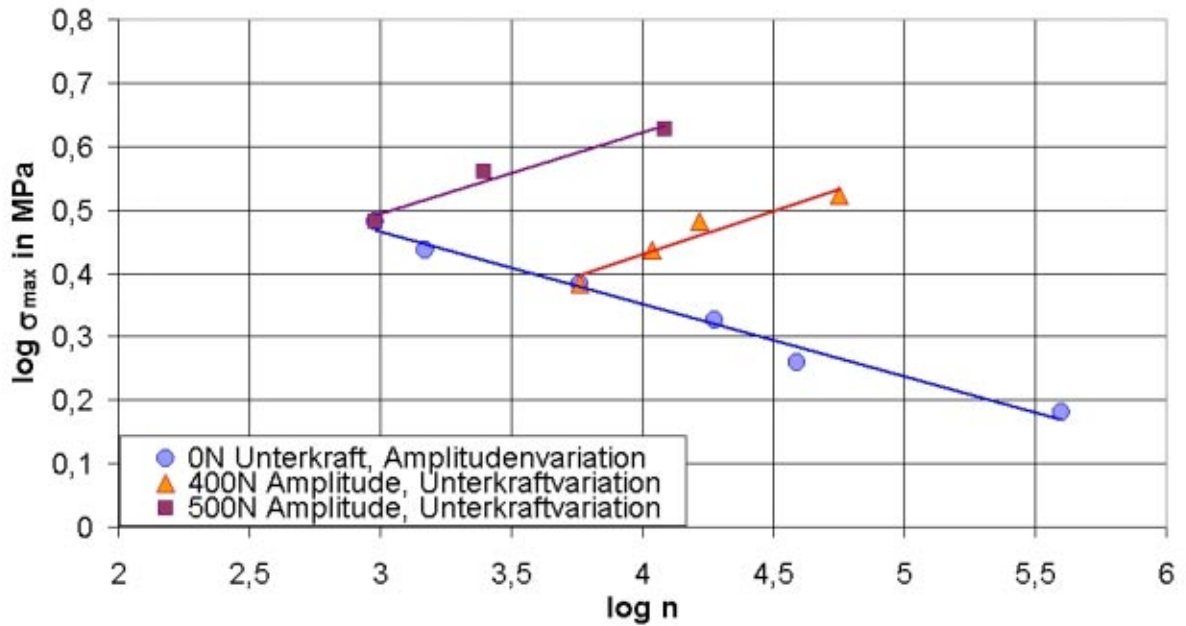


Abb. 8: Ermüdungseigenschaften von gefülltem EPDM (Maximalspannungsabhängigkeit)

Die Darstellung des Einflusses der dynamischen Verformungsamplitude auf die Ermüdungseigenschaften der Abb. 9 zeigt ein ähnliches Bild wie im Falle der Spannungsabhängigkeit. Bei Variation der Amplitude erhält man eine Wöhler-Gerade, wohingegen die Variation der Minimalverformungen zu davon abzweigenden Geraden führt. Dieses uneinheitliche Verhalten läßt das Anlegen auch eines Dehnungskriteriums nicht sinnvoll erscheinen.

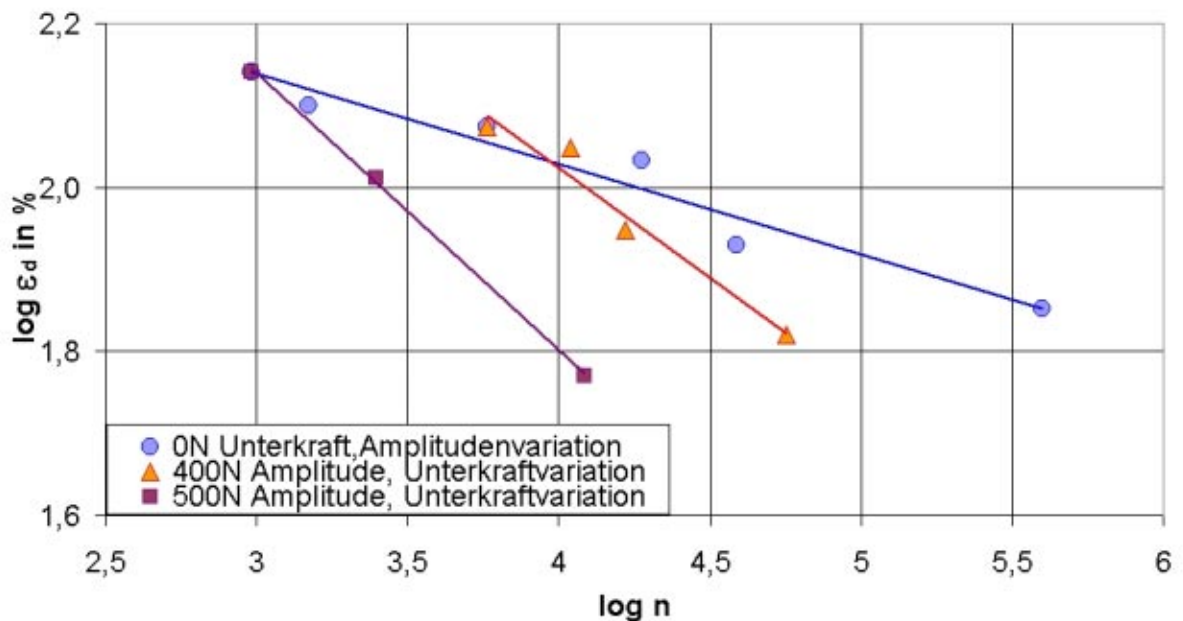


Abb. 9: Ermüdungseigenschaften von gefülltem EPDM (Verformungsabhängigkeit)

Abbildung 10 schließlich zeigt den Zusammenhang von dynamisch gespeicherter Energie und Ermüdung für den gefüllten EPDM-Werkstoff. Hier ergibt sich eine einheitliche Gerade sowohl bei Variation der Unterspannung als auch der Spannungsamplitude. Damit erscheint die Energie als aussichtsreiches Kriterium zur Vorhersage der Lebensdauer von Bauteilen selbst bei komplizierten Lastfällen unter Betriebsbedingungen.

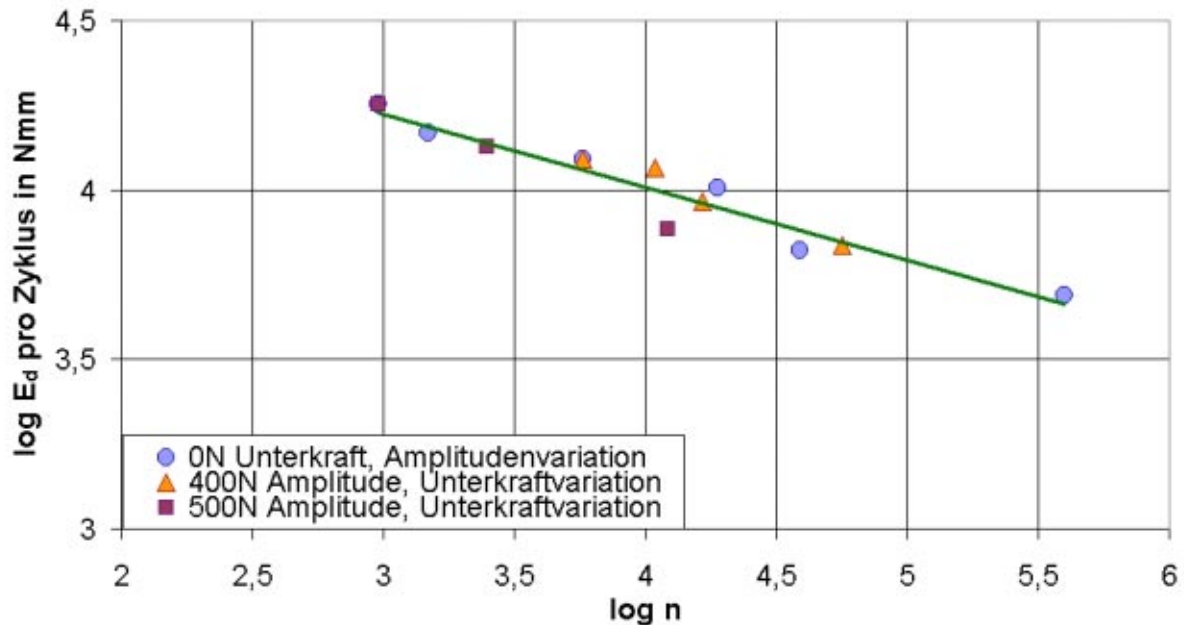


Abb. 10: Ermüdungseigenschaften von gefülltem EPDM (Energieabhängigkeit)

Im Übrigen stützen diese Ergebnisse die schon früh entwickelten, auf Energien gestützten bruchmechanischen Konzepte [6-11].

5. Zusammenfassung

Die experimentellen Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, daß die dynamischen Ermüdungseigenschaften von gefüllten Elastomeren unter sonst identischen Bedingungen (Temperatur, Frequenz, usw.) sowohl von der aufgebrachten Spannungsamplitude als auch von der Unterspannung abhängen. Steigende Unterspannungen bei konstanter Spannungsamplitude können die Lebensdauer von Laborprüfkörpern trotz steigender Maximalspannungen erheblich anwachsen lassen (Faktoren >10). Dieser Effekt tritt im Falle des ungefüllten Elastomers nicht auf. Da hier EPDM verwendet wurde, kann Dehnungskristallisation nicht der Grund für die Erhöhung der Lebensdauer sein, es ist vielmehr von einer charakteristischen Eigenschaft des Systems Kautschuk – Füllstoff auszugehen.

Die Verbesserung der Ermüdungseigenschaften unter Vorspannung kann unter Umständen konstruktiv genutzt werden, um die Lebensdauer von Bauteilen zu steigern. Allerdings setzt dies präzise Vorausberechnungen der Lebensdauer – z.B. mit Hilfe der Finite-Element-Methode – unter Kenntnis von Kriterien und Kennwerten der Ermüdung voraus. An dieser

Stelle haben die hier durchgeführten Untersuchungsergebnisse mehr Klarheit gebracht. Danach 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.

Für die Zukunft ist vorgesehen, unter ähnlichen Untersuchungsparametern das Rißwachstum zu erforschen. Weiter ist geplant, unter Pulsbedingungen zu prüfen. Schließlich sind die Ergebnisse an weiteren Werkstoffen zu bestätigen.

6. Literatur

- [1] K.-H. Schwalbe, Bruchmechanik metallischer Werkstoffe, Carl Hanser Verlag (1980).
- [2] J.W. Bergmann, R. Heidenreich, H. Bügler, W. Oberparleiter, IABG-Bericht B-TF-2355 (1988).
- [3] A. Wöhler, Zeitschrift Bauwesen **20**, (1870) Spalten 73-106.
- [4] N. André, G. Cailletaud and R. Piques, Kautschuk Gummi Kunststoffe **52** (1999) 120.
- [5] A.N. Gent, Science and Technology of Rubber, 2nd Edition, Chapter No. 10 (1994) 471.
- [6] A.A. Griffith, Phil. Trans. R. Soc. London, Ser. **A 221** (1920) 163.
- [7] G.J. Lake, Prog. Rubber Technol., **45** (1983) 89.
- [8] G.J. Lake, A.G. Thomas, in A.D. Roberts, Ed., Natural Rubber Science and Technology, Oxford University Press, (1988) 731.
- [9] G.J. Lake, P.B. Lindley, Rubber J.; *ibid.* (1964) 24.
- [10] R.S. Rivlin and A.G. Thomas, Journal of Polymer Science, **10** (1953) 291.
- [11] G.J. Lake, P.B. Lindley, Journal of Applied Polymer Science, **9** (1965) 1233.

Danksagung

Die Autoren und das Deutsche Institut für Kautschuktechnologie e.V. (DIK) danken der Deutschen Kautschuk-Gesellschaft e.V. (DKG) für die Unterstützung dieser Arbeit.

Die Autoren

Dipl.-Ing. Frank Abraham ist Doktorand am Deutschen Institut für Kautschuktechnologie e.V. und beschäftigt sich mit Fragen der Lebensdauer und dem Verschleiß von Elastomeren.

Dr. Thomas Alshuth ist Leiter der Abteilung Elastomerphysik des DIK.

Dr. Steve Jerrams ist Senior Research Fellow am Dublin Institute of Technology (DIT) und dort zuständig für die Forschung graduerter Ingenieure im Fachbereich Maschinenbau.

Korrespondenz

Dr. Thomas Alshuth

Deutsches Institut für Kautschuktechnologie e.V.

Eupener Straße 33

D-30519 Hannover