

Der Mittelspannungseinfluss bei zugschwellbeanspruchten Seildrähten

Bei Zugschwellversuchen kann sowohl die Amplituden- als auch die Mittelspannung frei eingestellt werden. Für eine zusammenfassende Auswertung müssen Amplituden- und Mittelspannungen durch eine einzige sogenannte äquivalente Spannung ersetzt werden. Die Bestimmung dieser äquivalenten Spannung setzt die Kenntnis des sogenannten Mittelspannungseinflusses voraus. Im Folgenden werden geeignete Modelle vorgestellt, die eine zusammenfassende Auswertung von Zugschwellversuchen mit Seildrähten und damit eine allgemeine Beschreibung ihres Materialermüdungsverhaltens erlauben.

1 Einleitung

Das Materialermüdungsverhalten von Seildrähten kann durch zwei verschiedene Versuche bestimmt werden, den Umlaufbiege- und den Zugschwellversuch. Sie werden in den nächsten beiden Abschnitten beschrieben. Die Drahtanordnung in den Versuchen, die Zonen maximaler Belastung im Drahtquerschnitt sowie die Amplituden- und Mittelspannungen sind in Bild 1 angegeben. Beim Umlaufbiegeversuch tritt die höchste Belastung an der Drahtoberfläche auf und nimmt linear von der Drahtoberfläche bis zur Drahtachse ab, wogegen beim Zugschwellversuch der gesamte Drahtquerschnitt gleich belastet ist. Die Theorie der Stützwirkung besagt, dass die weniger belasteten Querschnittsbereiche die höher belasteten stützen. Daraus folgt, dass die Dauerfestigkeit im Umlaufbiegeversuch wesentlich höher sein muss als im Zugschwellversuch. Dies ist aber nicht der Fall. Unterberg [1] stellte daher fest, dass bei Seildrähten keine Stützwirkung auftritt. Daraus folgt, dass die Ergebnisse beider Versuche zusammenfassend ausgewertet werden können.





	Umlaufbiegeversuch	Zugschwellversuch
Drahtanordnung beim Versuch		
Zone der maximalen Belastungsamplitude		
Amplitudenspannung	$\sigma_a = \sigma_b$	$\sigma_a = \sigma_{t,a}$
Mittelspannung	$\sigma_m = 0$	$\sigma_m = \sigma_{t,m}$

Abb. 1: Drahtanordnung in den Ermüdungsversuchen, Bereiche maximaler Belastungsamplitude im Drahtquerschnitt sowie Amplituden- und Mittelspannung.

2 Umlaufbiegeversuch

Beim Umlaufbiegeversuch wird der Draht ungefähr halbkreisförmig in die Prüfmaschine eingespannt und um seine Achse tordiert. Dadurch entsteht eine wechselnde Biegebeanspruchung. Die Mittelspannung ist Null. Die meist verwendete Prüfmaschine ist vom Typ IFT-Stuttgart. Aufbau und Wirkungsweise haben Wolf [2] und Feyrer [3] ausführlich beschrieben. Der Autor [4] hat das Lebensdauerverhalten der Drähte im Umlaufbiegeversuch umfangreich untersucht. Bild 2 zeigt einen typischen Verlauf der erreichten Biegewechselzahlen in Abhängigkeit von der eingestellten Biegespannung.

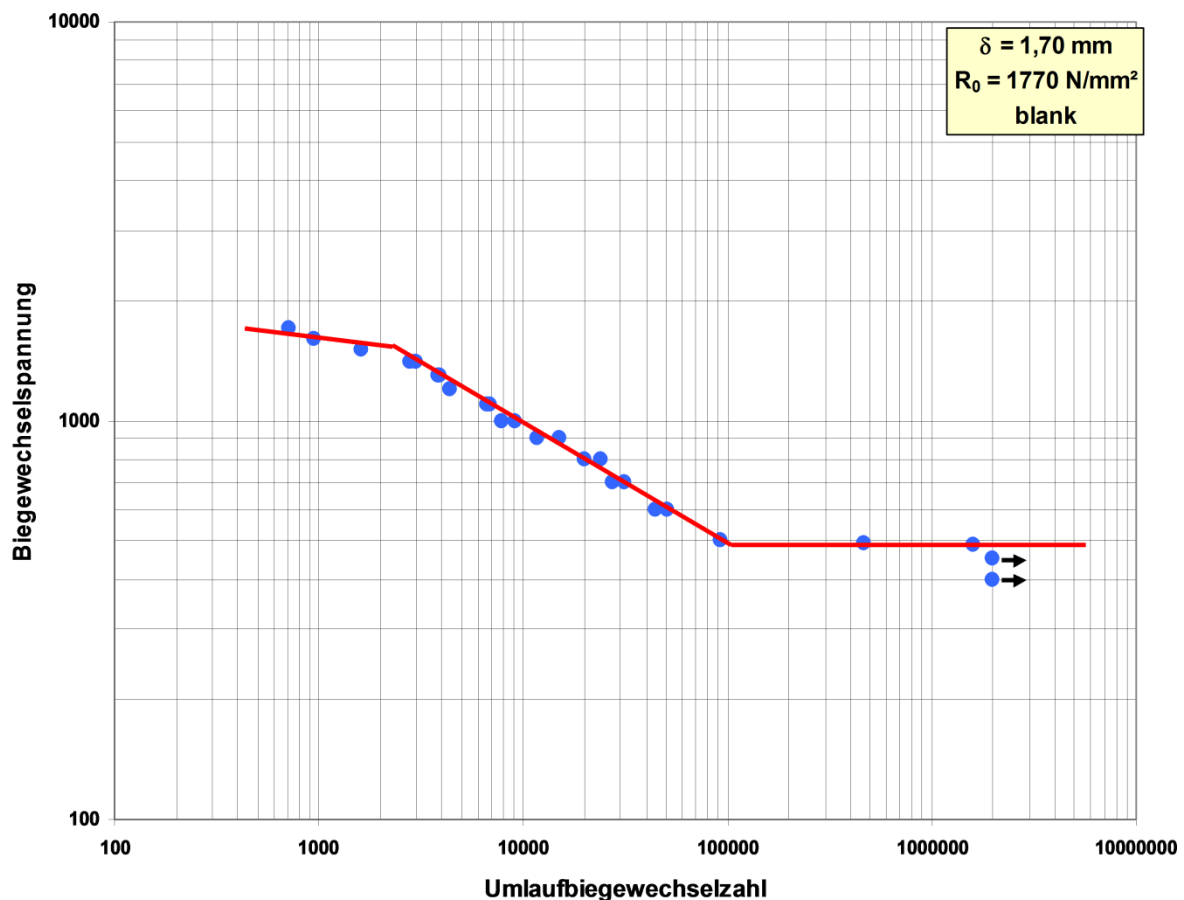


Abb. 2: Typische Wöhlerkurve eines Seildrahts bei Umlaufbiegebelastung, [4]

Der Zeitfestigkeitsbereich ist im Mittel begrenzt durch die Biegespannungen (Amplituden) $\sigma_{b,\min} = 0,31 \cdot R_m$ und $\sigma_{b,\max} = 0,77 \cdot R_m$, wobei R_m die Zugfestigkeit des Drahts ist. Die zu erwartenden Biegewechsel in diesem Zeitfestigkeitsbereich lassen sich für blanke Drähte durch Gl. (1) beschreiben:

$$\lg N = 1,374 - 3,243 \cdot \lg \sigma_b - 0,30 \cdot \lg \delta - 0,74 \cdot \lg \frac{R_0}{1770} \quad (1)$$

Darin heißen σ_b Biegespannung, δ Drahtdurchmesser und R_0 Drahtnennfestigkeit. Verzinkte Drähte erreichen im Mittel etwa 19% geringerer Biegewechselzahlen als blanke Drähte, [4].

Ziegler, Vogel und Wehking [5] haben für die erreichbaren Beigewechselzahlen eine ähnliche Gleichung wie Gl. (1) gefunden. Sie haben auch festgestellt, dass die Ergebnisse der Umlaufbiegeversuche mit dem Biegewechselverhalten der Seile korrelieren, die aus diesen Drähten hergestellt wurden.

3 Zugschwellversuch

Beim Zugschwellversuch wird der Draht durch eine schwellende Zugspannung belastet. Eine Lebensdauergleichung für zugschwellbelastete Drähte existiert bisher nicht. Unterberg [1] hat den Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit untersucht und die Ergebnisse in Bild 3 zusammengefasst.

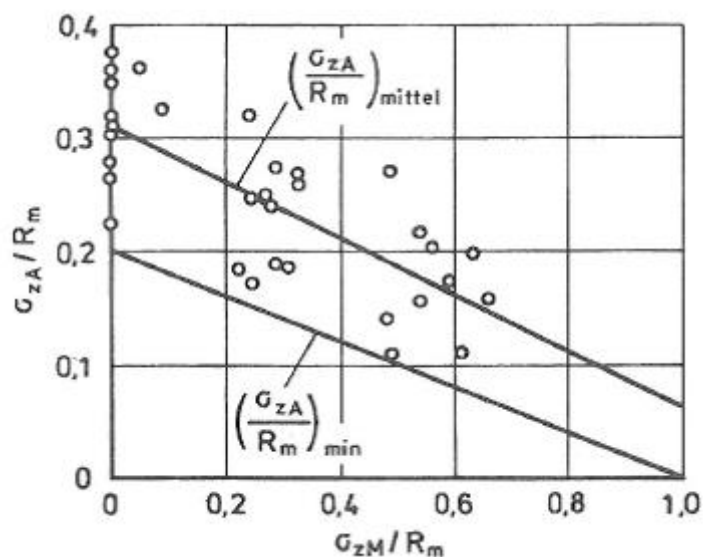


Abb. 3: Zug-Druck-Dauerfestigkeit $\sigma_{z,A}$, Unterberg [1]

Bei der Mittelspannung Null beträgt die Amplitudenspannung $\sigma_{z,A}(\sigma_{z,m} = 0) = 0,313 \cdot R_m$ und ist damit genauso groß wie die Biegespannung $\sigma_{b,min}$ beim Umlaufbiegeversuch, woraus Unterberg folgerte, dass bei Seildrähten keine Stützwirkung besteht.

Mit dem im Folgenden ermittelten Mittelspannungseinfluss wird es möglich sein, die zu erwartende Schwingspielzahl in Abhängigkeit von den Belastungsparametern Amplituden- und Mittelspannung abzuschätzen.

4 Mittelspannungseinfluss

Es existiert eine ganze Reihe von Modellen zur Beschreibung des Mittelspannungseinflusses bei metallischen Werkstoffen. Alle diese Modelle ersetzen die Amplitudenspannung σ_a und Mittelspannung σ_m durch eine äquivalente Amplitudenspannung σ_q und eine Mittelspannung σ_m gleich Null. σ_q bei σ_m gleich Null führen zur gleichen ertragbaren Lastwechselzahl wie die Kombination aus den ersetzten Spannungen σ_a und σ_m . Aus der Literatur werden zehn Modelle vorgestellt und diskutiert.

$$\text{Gerber (1874), [6]} \quad \frac{\sigma_a}{\sigma_q} + \left(\frac{\sigma_m}{R_m} \right)^2 = 1 \quad (2)$$

Darin heißt R_m Zugfestigkeit. Gerbers Modell eignet sich besonders für zähe Materialien. Für Druckbelastungen und für spröde Materialien ist es weniger geeignet.

$$\text{Goodman (1930), [7]} \quad \frac{\sigma_a}{\sigma_q} + \frac{\sigma_m}{R_m} = 1 \quad (3)$$

Goodmans Modell ist für spröde Materialien eher geeignet.

$$\text{Soderberg (1930), [8]} \quad \frac{\sigma_a}{\sigma_q} + \frac{\sigma_m}{R_e} = 1 \quad (4)$$

Gegenüber Goodman nutzt Soderberg die Fließgrenze R_e anstatt der Zugfestigkeit R_m .

$$\text{Morrow (1968), [9]} \quad \frac{\sigma_a}{\sigma_q} + \frac{\sigma_m}{\sigma_f} = 1 \quad (5)$$

Gegenüber Goodman nutzt Morrow die tatsächliche Bruchspannung σ_f anstatt der (nominalen) Zugfestigkeit R_m . Bei Seildrähten besteht zwischen beiden Größen allerdings kein Unterschied, weil Seildrähte durch die Drahtnennfestigkeit R_0 und nicht durch eine nominale Zugfestigkeit R_m klassifiziert werden.

$$\text{Dowling (1972), [10]} \quad \frac{\sigma_a}{\sigma_q} + \frac{\sigma_m}{\sigma_f'} = 1 \quad (6)$$

Gegenüber Goodman nutzt Dowling eine spezielle Spannung σ_f' anstatt der Zugfestigkeit R_m , wobei sich σ_f' durch Verlängerung der Zeitfestigkeitsgerade bis zur Lastwechselzahl $N = 1$ ergibt.

$$\text{Smith, Watson, Topper (1970), [11]} \quad \sigma_q = \sqrt{(\sigma_m + \sigma_a) \cdot \sigma_a} \quad (7)$$

Dieses Modell (Kurzform SWT) unterscheidet sich von den vorherigen Modellen. Es nutzt ausschließlich Lastgrößen und keine Werkstoffkenngrößen.

Walker (1979), [12]
$$\sigma_q = (\sigma_m + \sigma_a)^{1-\gamma} \cdot \sigma_a^\gamma \quad (8)$$

Walkers Modell ist die Verallgemeinerung des SWT-Modells. Die Exponenten ergeben zusammen 1. Der Parameter γ muss durch Auswertung von Versuchsergebnissen bestimmt werden.

Die nächsten beiden Modelle wurden für die Auswertung von Zugschwellversuchen mit Seilen vorgeschlagen. Die äquivalente Spannung korrespondiert hier mit der Schwellfestigkeit anstatt der Wechselfestigkeit wie bei den vorherigen Modellen.

Yeung and Walton (1985), [13]
$$\frac{2 \cdot \sigma_a}{\sigma_q} + \frac{\sigma_m - \sigma_a}{R_0} = 1 \quad (9)$$

Das Modell von Yeung und Walton nutzt Kräfte anstatt von Spannungen. Zum besseren Vergleich wird ihr Modell in Form von Goodmans Modell (Gl. (3)) dargestellt. Die von Yeung und Walton genutzte Mindestbruchkraft der Seile ist hier durch die Drahtnennfestigkeit R_0 ersetzt.

Matzukawa et al (1985), [14]
$$\frac{2 \cdot \sigma_a}{\sigma_q} + \frac{\sigma_m - \sigma_a}{R_m} = 1 \quad (10)$$

Gegenüber Yeung und Walton nutzen Matzukawa et al die auf den wirklichen metallischen Querschnitt bezogene wirkliche Bruchkraft anstatt der Mindestbruchkraft (ersetzt durch die Drahtnennfestigkeit R_0).

Einen komplett anderen Ansatz in Form einer Exponentialgleichung verwendet Kwofie.

Kwofie (2001), [15]
$$\frac{\sigma_a}{\sigma_q} = e^{\left(-\alpha \cdot \frac{\sigma_m}{R_m}\right)} \quad (11)$$

Der Parameter α muss durch Auswertung von Versuchsergebnisse bestimmt werden. Für kleine Zahlenwerte von α kann diese Gleichung in eine Taylorreihe entwickelt werden. Sie lautet dann:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_q} + \alpha \cdot \frac{\sigma_m}{R_m} = 1. \quad (11a)$$

Gl. (11a) zeigt, dass sich für $\alpha = 1$ das Modell von Goodman und für $\alpha = \sigma_m/R_m$ das Modell von Gerber ergibt. Mit $\alpha = 1$ und R_e , σ_f or σ_f' anstatt R_m ergeben sich die Modelle von Soderberg, Morrow oder Dowling.

Die Modelle von Gerber, Goodman, Soderberg, Morrow, Dowling und Kwofie können – in Anlehnung an Bild 3 – in ein gemeinsames Diagramm mit den Achsen σ_m/R_m und σ_a/σ_q eingezeichnet werden. Bild 4 zeigt den Vergleich. Gerbers Modell führt zu einer Parabel, die Modelle von Goodman, Soderberg, Morrow und Dowling zu Geraden. Kwofies Exponentialkurve ist beispielhaft für den Parameter $\alpha = 0,5$ eingezeichnet. Die Gleichungen der anderen vier Modelle können nicht nach σ_a/σ_q aufgelöst werden. Aufgrund der Tatsache, dass für Seildrähte praktisch kein Unterschied zwischen den Modellen von Goodman und Morrow besteht, sind die beiden Geraden in Bild 4 beispielhaft mit einem sehr geringen Unterschied eingezeichnet.

5 Versuche und Auswertung

Die Versuche wurden mit Mustern von zwei Drähten, einem verzinkten und einem blanken Draht durchgeführt. Beide Drähte hatten den Durchmesser $\delta = 1,00$ mm und Zugfestigkeiten von $R_m = 2273$ N/mm² für den verzinkten Draht und $R_m = 2196$ N/mm² für den blanken Draht. Mit beiden Drähten wurden 61 Umlaufbiege- und 20 Zugschwellversuche durchgeführt [16, 17 und 18].

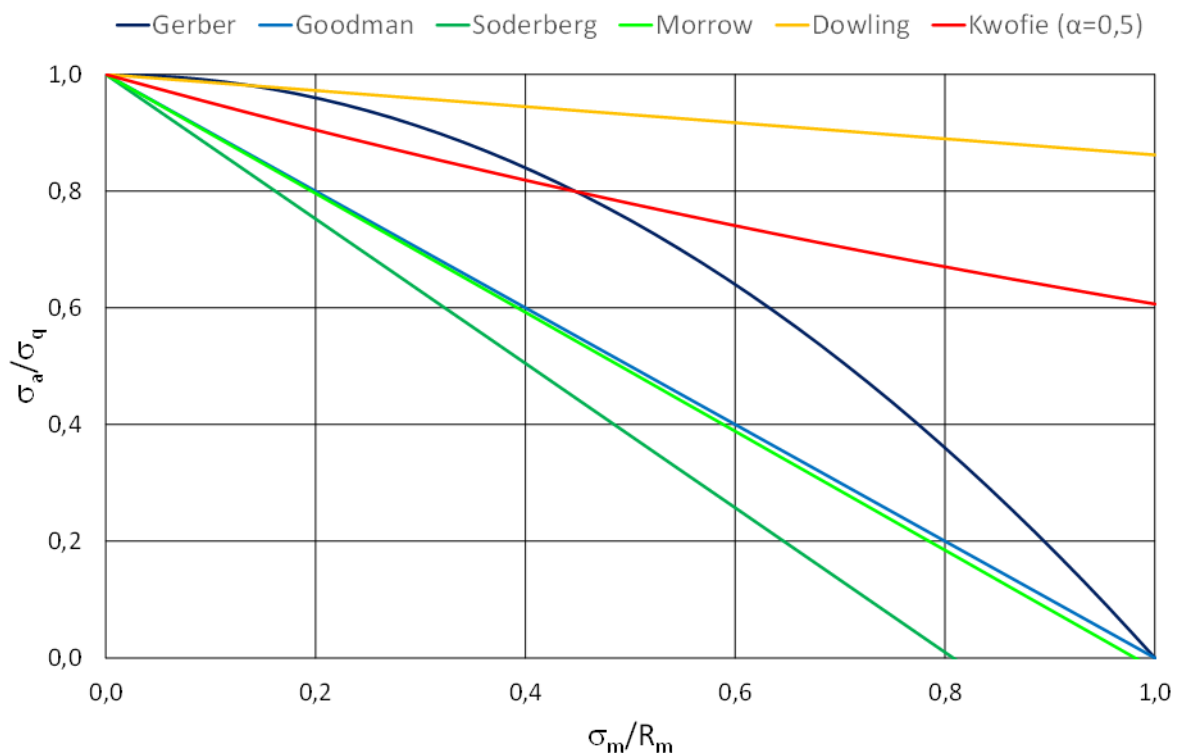


Abb. 4: Verschiedene Modelle des Mittelspannungseinflusses

Aufgrund der Tatsache, dass die Mittelspannung beim Umlaufbiegeversuch Null ist, kann für eine erreichte Lastwechselzahl die Biegespannung σ_b im Umlaufbiegeversuch als äquivalente Amplitudenspannung σ_q im Zugschwellversuch interpretiert und nach Gl. (1) berechnet werden. Zugschwellversuche werden damit

auf Umlaufbiegeversuche zurückgeführt. Aufgrund dessen ist für die Zugschwellversuche aber auch nur ein begrenzter Bereich von Mittel- und Amplitudenspannungen möglich. Um in jedem Fall innerhalb des Zeitfestigkeitsbereichs im Umlaufbiegeversuch zu sein, werden Spannungen zwischen $\sigma_m = 0.45 R_m / \sigma_a = 0.27 R_m$ und $\sigma_m = 0.59 R_m / \sigma_a = 0.23 R_m$ gewählt. Die daraus möglichen minimalen und maximalen Spannungen betragen $\sigma_{\min} = 0,18 R_m$ und $\sigma_{\max} = 0,82 R_m$. Dieser Bereich ist in Bild 5 durch Begrenzungslinien eingezeichnet. Eine Zurückführung der Zugschwellversuche auf Umlaufbiegewechselversuche erscheint dadurch möglich.

Die Ergebnisse der Umlaufbiegeversuche (Mittelspannung gleich Null) und der Zugschwellversuche (Mittelspannung innerhalb der Begrenzungslinien) sind ebenfalls in Bild 5 eingezeichnet. Die ebenfalls eingezeichnete Gerber-Parabel und Goodman-Gerade zeigen, dass die Versuchsergebnisse offensichtlich durch einen mit Gerber und Goodman vergleichbaren Ansatz beschrieben werden können, wobei der Exponent der auf die Bruchfestigkeit bezogenen Mittelspannung zwischen 1 und 2 liegen muss. Durch Ausgleichsrechnung wurde der Exponent zu $x = 1,58$ und die Standardabweichung zu $s(x) = 0,16$ berechnet. Die Standardabweichung $s(\sigma_a/\sigma_q)$ beträgt 0,039. Mit der Standardabweichung $s(x)$ und bei angenommener Normalverteilung von x kann die Goodman-Gerade als statistische 0,01%-Kurve und die Gerber-Parabel als statistische 99,6%-Kurve interpretiert werden. Für Zugschwellversuche mit Seildrähten kann die äquivalente Spannung daher mit Gl. (12) berechnet werden.

$$\sigma_q = \frac{\sigma_a}{1 - \left(\frac{\sigma_m}{R_m}\right)^{1.58}} \quad (12)$$

Als zweiter Ansatz wird der Exponentialansatz von Kwofie untersucht. Für jeden Zugschwellversuch wird mit Hilfe von Gl. (11) ein Faktor α berechnet. Für alle 20 Zugschwellversuche ergibt sich ein Mittelwert von $\alpha = 0,85$ mit der Standardabweichung $s(\alpha) = 0,074$. Die Standardabweichung $s(\sigma_a/\sigma_q)$ beträgt 0,030. Für Zugschwellversuche mit Seildrähten kann die äquivalente Spannung daher auch mit Gl. (13) berechnet werden.

$$\sigma_q = \sigma_a \cdot e^{\left(\alpha \cdot \frac{\sigma_m}{R_m}\right)} \quad (13)$$

Beide Ausgleichskurven sind ebenfalls in Bild 5 eingezeichnet. Beide Gleichungen beschreiben die Versuchsergebnisse sehr gut, Gl. (13) sogar etwas besser. Wird die äquivalente Spannung σ_q nach Gl. (12) oder Gl. (13) in Gl. (1) eingesetzt ergibt sich die zu erwartende Schwingspielzahl.

Seildrähte können als feste Balkenelemente betrachtet werden. Ein Drahtseil aber ist aus vielen helixförmigen Drähten aufgebaut, die sich gegeneinander verschieben können. Aufgrund dessen können die Ergebnisse von Ermüdungsversuchen von Seildrähten, insbesondere von Zugschwellversuchen, nicht auf Drahtseile übertragen werden. Das Zugschwellverhalten von Drahtseilen ist in der Literatur umfangreich beschrieben worden. Exemplarisch sind hier [19], [20] und [21] genannt.

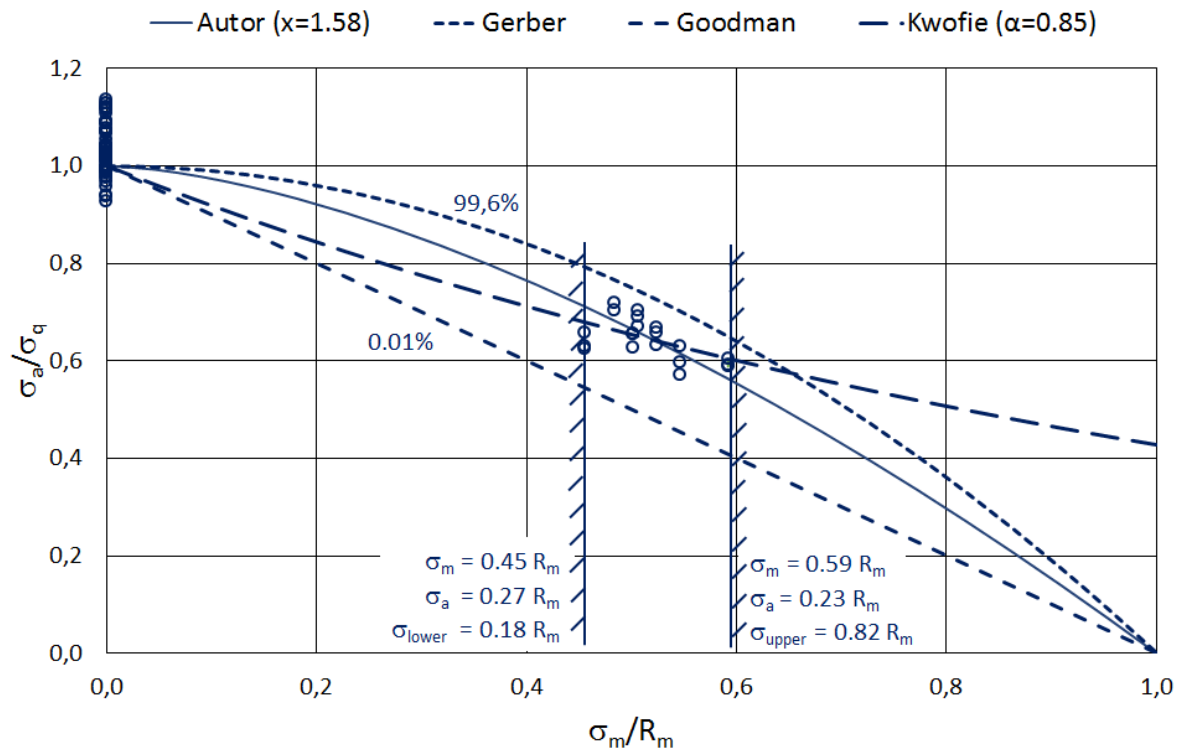


Abb. 5: Bereich der gewählten Mittelspannungen, Versuchsergebnisse und Ausgleichskurve des Autors sowie die Einflusskurven von Gerber, Goodman und Kwofie

6 Zusammenfassung

Zur Beschreibung des Mittelspannungseinflusses bei Seildrähten wurden zwei Ansätze untersucht, ein mit Gerber und Goodman vergleichbarer Ansatz und der auf Seildrähte angepasste Ansatz von Kwofie. Mit beiden Ansätzen lassen sich die Versuchsergebnisse sehr gut beschreiben. Mit Hilfe der gewonnenen Ansätze und der Lebensdauergleichung für Umlaufbiegeversuche lassen sich die ertragbaren Lastwechselzahlen bei Zugschwellversuchen erstmals zuverlässig abschätzen.

7 Literaturverzeichnis

- [1] Unterberg, H.-W.: Die Dauerfestigkeit von Seildrähten bei Biegung und Zug. Diss. TH Karlsruhe, 1967
- [2] Wolf, E.: Seilbedingte Einflüsse auf die Lebensdauer laufender Drahtseile. Diss. Universität Stuttgart, 1987
- [3] Feyrer, K.: Drahtseile. Bemessung, Betrieb, Sicherheit. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2000, ISBN 3-540-67829-8
- [4] Briem, U.: Umlaufbiegewechselzahl von Seildrähten. DRAHT 21 (2000) 3, S. 73-76
- [5] Ziegler, S.; Vogel, W.; Wehking, K.-H.: Influence of wire fatigue strength on rope lifetime. WIRE (2005) 3, pp. 44-48
- [6] Gerber, W.: Bestimmung der zulässigen Spannungen in Eisenkonstruktionen. Z. Bayer Arch. Ing Ver. 6 (1874), pp. 101-110
- [7] Goodman, J.: Mechanics Applied to Engineering, Vol. 1, 9th edition. Longmans Green and Co., London 1930
- [8] Soderberg, C. R.: ASME Transactions 52, APM-52-2 (1930), pp. 13-28
- [9] Morrow, J.: Fatigue properties of metals, section 3.2. In: fatigue Design Handbook, Pub. No. AE-4. SAE, Warrendale 1968
- [10] Dowling, N.: Fatigue failure Predictions for complicated Stress-Strain Histories. Journal of Materials 7 (1), pp. 71-87. American Society for Testing and Materials, Philadelphia 1972
- [11] Smith, K. N.; Watson, P. and Topper, T. H.: A stress-strain function for the fatigue of materials. J. Mater. 5 (1970), pp. 767-778
- [12] Walker, K.: The effect of stress ratio during crack propagation and fatigue for 2024-T3 and 7075-T6 aluminium. In: Effects of Environment and Complex Load History on Fatigue Life, ASTM STP 462. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, pp. 1-14
- [13] Yeung, Y. T.; Walton, J. M.: Accelerated Block Tension Fatigue Testing of Wire Ropes for Offshore Use. OIPEEC Round Table 1985, East Kilbride Glasgow, Scotland, pp. 2.5.1-2.5.14
- [14] Matzukawa, A.; Kamei, M.; Fukui, Y.; Sasaki, Y.: Fatigue Resistance Analysis of Parallel Wire Strand Cables Based on Statistical Theory of Extreme. Stahlbau 54 (1985) 11, S. 326-335
- [15] Kwofie, S.: An exponential stress function for prediction fatigue strength and life due to mean stresses. Intern. Journal of Fatigue 23 (2001), pp. 829-836
- [16] Preischl, A.: Dynamisches Verhalten von Seildrähten unter extremer Kälte. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. OTH Regensburg 2015
- [17] Moser, F.: Dynamisches Verhalten von Seildrähten unter extremer Kälte. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. OTH Regensburg 2016
- [18] Forster, P.: Ermüdungsverhalten von Seildrähten unter extremer Kälte. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. OTH Regensburg 2016

- [19] Feyrer, K.: Seillebensdauer unter Zugschwellbeanspruchung. DRAHT 47 (1996) 3, S. 230 – 233
- [20] Klöpfer, A.: Untersuchung zur Lebensdauer von zugschwell-beanspruchten Drahtseilen. Diss. Universität Stuttgart 2002
- [21] Briem, U.: Tension-tension behaviour of 8-strand ropes. OIPEEC Conference Athens 2006, ISBN 0-9552500-0-5, S. 223 – 230

*) Prof. Dr.-Ing. Ulrich Briem

OTH Regensburg

Galgenbergstr. 30, 93053 Regensburg

Tel.: +49 941 943-5191

Fax: +49 941 943 1428

E-Mail: ulrich.briem@oth-regensburg.de

Internet: <http://www.oth-regensburg.de>