

Schädigungsparameter bei der Lebensdauerabschätzung von Schraubendruckfedern

Das Maschinenelement Schraubendruckfeder ist eines der wichtigsten Bauteile in technischen Produkten. Die Auslegung der Federn erfolgt häufig auf Basis von Schädigungsparametern. Diese werden meist für bestimmte Lastwechselzahlen aus bereits durchgeführten Dauerschwingversuchen abgeleitet. In der Praxis findet hauptsächlich der Schädigungsparameter nach Smith, Watson und Topper (P_{SWT} -Wert) Verwendung. Der folgende Artikel soll die Grenzen dieses Schädigungsparameters anhand von Ergebnissen aus Dauerschwingversuchen an Federn bei unterschiedlichen Last- und Mittelspannungen darlegen. Weiterhin wird ein neu entwickelter Schädigungsparameter eingeführt, der eine deutlich bessere Vergleichbarkeit von Dauerschwingversuchen bei unterschiedlichen Mittelspannungen erlaubt.

Motivation

Das Maschinenelement Schraubendruckfeder (SDF) ist eines der wichtigsten Bauteile in technischen Produkten. Das von Federn und ihrer zuverlässigen Funktion abhängige Wertvolumen ist im Regelfall um ein Vielfaches höher als die Kosten für die Feder selbst. Nach wie vor ist die Berechnung einer Lebensdauer dieses zunächst „einfach anmutenden Bauteils“ nicht möglich. Gründe dafür liegen in den Besonderheiten des Materials Federstahldraht, in der Geometrie des räumlich gekrümmten Drahtes bzw. der sich daraus ergebenden räumlichen Bereiche, an denen Spannungsüberhöhungen auftreten sowie beim Herstellungsprozess gezielt eingestellten Eigenspannungstiefenprofil. Aus diesem Grund sind musterprozess- und serienbegleitende Dauerschwingversuche zur sicheren Auslegung der Federn erforderlich. Häufig erfolgt eine vorläufige Auslegung von Schraubendruckfedern mittels Schädigungsparametern. Zulässige Schädigungsparameter können für den jeweiligen Einsatzfall und das für die Herstellung der Feder verwendete Material aus bereits durchgeführten Dauerschwingversuchen an Federn aus gleichem

Material mit gleichen bzw. vergleichbaren Herstellungsparametern ermittelt werden.

Durch Schädigungsparameter wird die Schädigung eines Bauteils durch eine dynamische Beanspruchung des Materials definiert. Deren Betrag steht im direkten Zusammenhang mit der Schädigung eines Bauteils während eines einzelnen Schwingspiels und somit mit der zu erwartenden Lebensdauer bis zum technischen Versagen. Der industriell gebräuchlichste Schädigungsparameter ist der P_{SWT} -Wert, der nach Smith, Watson und Topper sowohl die Auswirkungen der Schwingbreite, als auch der maximal während der Belastung vorhandenen Spannungen berücksichtigt.

Schädigungsparameter nach Smith, Watson und Topper (P_{SWT})

Bei Dauerschwingversuchen an Bauteilen haben sowohl die Spannungsamplitude (Dehnungsamplitude) als auch die Mittelspannung (Mitteldehnung) Einfluss auf die Lebensdauer. Ebenso trifft dies auf das Bauteil Schraubendruckfeder zu. Die Schädigung wird nach Smith, Watson und Topper durch die Wurzel des Produktes aus Ober-

spannung σ_o , der Gesamtdehnung $\epsilon_{a,t}$ und dem E-Modul beschrieben. Als schädigend wird dabei das Produkt $\sigma_o \cdot \epsilon_{a,t}$, das als Formänderungsenergiegedichte interpretiert werden kann, angesehen. Der Federstahldraht in Schraubendruckfedern wird überwiegend auf Torsion beansprucht. Schub- und Biegespannungen sind im Allgemeinen, bezogen auf die vorhandenen Torsionsspannungen, vernachlässigbar gering. Um eine Anwendung auf Schraubendruckfedern zu ermöglichen, ist eine Übertragung von Normal- in Tangentialspannungen erforderlich. Da weiterhin während des Schwingspiels von Schraubendruckfedern keine plastischen Verformungsanteile zulässig sind, ergibt sich nach Übertragung ein $P_{SWT,r}$ -Wert, der sich durch die Wurzel des Produktes aus Oberspannung σ_o und Spannungsamplitude σ_a beschreiben lässt. Das Verhältnis zwischen dem P_{SWT} -Wert für Normal- und Schubspannungen beträgt unter Berücksichtigung der Gestaltänderungsenergiehypothese $1/\sqrt{3}$.

Durch Dauerschwingversuche ist die Ermittlung von Schädigungsparameter-Wöhlerlinien möglich. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Versuchspunkte unabhängig von der Mittelspannung bei gleichem Schädigungsparameter in einem Streuband zusammenfallen.

Bei SDF entstehen aufgrund der räumlich-gekrümmten Geometrie Bereiche im Draht mit einer örtlichen Spannungsüberhöhung. Im Allgemeinen werden diese Überhöhungen durch den Spannungsbeiwert k berücksichtigt, indem eine Multiplikation mit den vorhandenen Nennspannungen erfolgt. Die Spannungsüberhöhungen treten an der Windungsinenseite der Feder auf, so dass dort der Bruch mit hoher Wahrscheinlichkeit initiiert wird. Aus diesem Grund werden in den folgenden Ausführungen ausschließlich die Spannungen an der Windungsinenseite betrachtet.

Bei SDF entstehen aufgrund der räumlich-gekrümmten Geometrie Bereiche im Draht mit einer örtlichen Spannungsüberhöhung. Im Allgemeinen werden diese Überhöhungen durch den Spannungsbeiwert k berücksichtigt, indem eine Multiplikation mit den vorhandenen Nennspannungen erfolgt. Die Spannungsüberhöhungen treten an der Windungsinenseite der Feder auf, so dass dort der Bruch mit hoher Wahrscheinlichkeit initiiert wird. Aus diesem Grund werden in den folgenden Ausführungen ausschließlich die Spannungen an der Windungsinenseite betrachtet.

Autoren / Ansprechpartner

Prof. Dr.-Ing. Ulf Kletzlin
Dipl.-Ing. René Reich
beide:
Institut für Maschinen- und
Gerätekonstruktion PF 100565
Technische Universität Ilmenau
Fakultät für Maschinenbau
98684 Ilmenau
Tel.: 0 36 77/69 18 18
Fax: 0 36 77/69 12 59
E-Mail: rene.reich@tu-ilmenau.de
www.tu-ilmenau.de

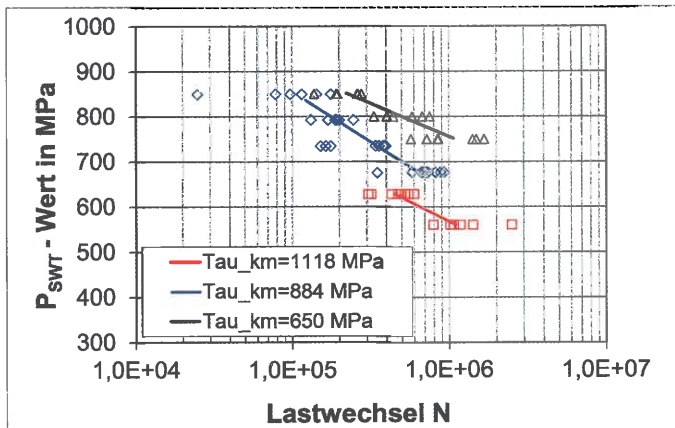


Bild 1

P_{SWT}-Wert: Dauerschwingversuche an Achsfedern gleicher Geometrie und Herstellung

In Bild 1 wurden die Ergebnisse von Dauerschwingversuchen an 70 Achsfedern bei unterschiedlicher korrigierter Mittelspannung τ_{km} dargestellt. Dabei wurde der während der Prüfung vorhandene Betrag des $P_{SWT,\tau}$ -Wertes über der ertragbaren Lastwechselzahl abgetragen.

Wie in Bild 1 ersichtlich ist, fallen die Versuchspunkte nicht in einem Streuband zusammen. Zwischen den ertragbaren Lastwechselzahlen liegt bei gleichem P_{SWT} -Wert ein Faktor von circa 10. Durch den P_{SWT} -Wert findet keine ausreichende Berücksichtigung des Mittelspannungseinflusses M statt. Nach Haibach [1] erfasst der P_{SWT} -Wert im Bereich eines Spannungsverhältnisses R zwischen -1 und 0 nur eine maximale Mittelspannungsempfindlichkeit $M = 0,4$. Mit zunehmendem Spannungsverhältnis bzw. mit zunehmender Mittelspannung sinkt die durch den P_{SWT} -Wert abgebildete Mittelspannungsempfindlichkeit ab.

Wird die durch Dauerschwingversuche an 316 Achsfedern ermittelte Mittelspannungsempfindlichkeit von $M_\tau = 0,52$ mit der durch den P_{SWT} -Wert berücksichtigten Mittelspannungsempfindlichkeit verglichen, werden die Grenzen des P_{SWT} -Wertes deutlich. Vor allem in dem für SDF entscheidenden Bereich des Spannungsverhältnisses $R > 0$ wird der Einfluss der Mittelspannung deutlich unterschätzt. Werden z. B. identisch hergestellte Achsfedern bei gleichem Betrag des Schädigungsparameters mit unterschiedlichen Mittelspannungen Dauerschwingversuchen unterzogen, so wird die zulässige Spannungsamplitude bei der Feder, die mit der höheren Mittelspannung geprüft wird, überschätzt. Das technische Versagen tritt frühzeitig ein (vgl. Bild 1). Aus gleichem Grund wurde von Bergmann [2] die Erweiterung des ursprünglichen P_{SWT} -Wertes durch einen Kennwert $a_{z/d}$ vorgeschlagen. Durch diesen kann der Mittelspannungseinfluss innerhalb der Grenzen von $M = 0$ bis $M = 1$ zwischen $-1 < R < 0$ vorgegeben werden. Allerdings kann auch durch diesen erweiterten Schädigungsparameter die real vorhandene Mittelspannungsempfindlichkeit für den Bereich $R > 0$ für Schraubendruckfedern nicht adäquat abgebildet werden, sodass ebenfalls deutliche Abweichungen in der prognostizierten Lebensdauer bei verschiedenen Mittelspannungen entstehen.

Mittelspannungsunabhängiger Schädigungsparameter

Um eine bessere Vergleichbarkeit von Dauerschwingversuchen bei unterschiedlichen Mittelspannungen zu erreichen, wurde auf Basis der Grundidee des Schädigungsparameters nach Smith, Watson und Topper ein neuer Parameter abgeleitet, der eine gezielte Anpassung und direkte Angabe der Mittelspannungsempfindlichkeit erlaubt. Die prinzipielle Herangehensweise soll durch Bild 2 verdeutlicht werden. Hier wurde für eine konstante Lebensdauer die ertragbare Spannungsamplitude über der Mittelspannung abgetragen. Weiterhin wurden der Anstieg von Mittel- und Oberspannung beispielhaft für eine Mittelspannungsempfindlichkeit $M_\tau = 0,6$ abgebildet.

Der Betrag des Schädigungsparameters bei der Mittelspannung $\tau_m = 0$ MPa ist Ausgangspunkt für die weiteren Betrachtungen. Durch Ersetzen der Oberspannung τ_o und Spannungsamplitude τ_a in der ursprünglichen Gleichung des $P_{SWT,\tau}$ -Wertes durch eine über die Mittelspannungsempfindlichkeit angepasste Oberspannung τ_o' und Spannungsamplitude τ_a' folgt die Gleichung für den neuen Schädigungsparameter nach Reich, Kletzin und Kobelev P_{RKK} .

$$P_{RKK} = \sqrt{(\tau_o - (1 - M_\tau) \cdot \tau_m) \cdot (\tau_a + M_\tau \cdot \tau_m)}$$

In Bild 3 wurden ebenso wie in Bild 1 die Ergebnisse von Dauerschwingversuchen an 70 Achsfedern bei unterschiedlicher korrigierter Mittelspannung τ_{km} dargestellt. Dabei wurde der während der Prüfung vorhandene Betrag des Schädigungsparameters über der ertragbaren Lastwechselzahl abgetragen.

Der neue Schädigungsparameter P_{RKK} realisiert, wie in Bild 3 ersichtlich, eine deutlich bessere Vergleichbarkeit von bei unterschiedlichen Mittelspannungen durchgeführten Dauerschwingversuchen an Achsfedern, als der bisher in der federherstellenden Industrie gebräuchliche P_{SWT} -Wert (vgl. Bild 1). Die Abweichungen der ertragbaren Lastwechselzahlen bei konstantem P_{RKK} -Wert im angegebenen Mittelspannungsbereich sind kleiner als Faktor 2.

Voraussetzung für die Nutzung des P_{RKK} -Wertes ist die Kenntnis der Mittelspannungsempfindlichkeit des jeweiligen Werkstoffes. Diese kann aus Veröffentlichungen zur Betriebsfestigkeit entnommen, nach FKM berechnet oder durch Dauerschwingversuche ermittelt werden. Prinzipiell ist bei steigender Zugfestigkeit mit steigender Mittelspannungsempfindlichkeit zu rechnen.

Fortsetzung auf Seite 66

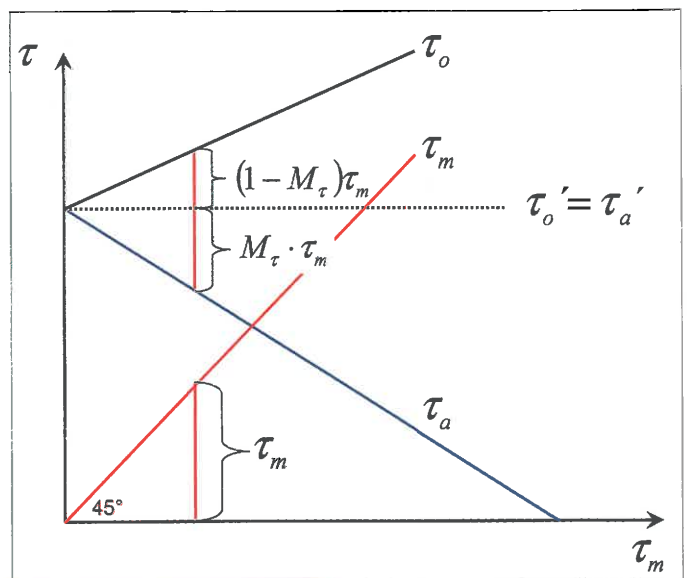


Bild 2

Phänomenologische Ableitung des P_{RKK} -Schädigungsparameters

Ein Bericht der WiGeP

Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktentwicklung WiGeP – Berliner Kreis & WG MK c/o Prof. Dr. Jürgen Gausemeier Heinz Nixdorf Institut Fürstenallee 11 33102 Paderborn Tel.: 0 52 51/60 62 67 Fax: 0 52 51/60 62 68 E-Mail: info@wigepe.de www.wigepe.de