

Neue Erkenntnisse in der Zugfederauslegung

Die Auslegung zylindrischer Zugfedern ist in der Praxis trotz vorhandener Norm DIN EN 13906-2 nur sehr eingeschränkt für statische Anwendungen und gar nicht für dynamische Anwendungen rechnerisch durchführbar.



Abb. 1. Christian Otto zeigt Beispiele der betrachteten Zugfedern. V.l.n.r.: Ganze deutsche Öse seitlich, halbe deutsche Öse, englische Öse. © TU Ilmenau

Im IGF-Forschungsvorhaben 011F22762N „ZugFeDa“ (01/2023 – 09/2025) entwickelte die Forschungsgruppe „Draht und Federn“ der TU Ilmenau unter Leitung von Prof. Ulf Kletzin gemeinsam mit dem Verband der Deutschen Federnindustrie e.V. (VDFI) und zahlreichen Mitgliedsunternehmen neue Ansätze und Methoden für Zugfedern, um bislang nicht berechenbare vorhandene Spannungen an den Ösen und Ösenübergängen und federspezifische zulässige Spannungen, analog zu Druckfedern, in Form von Schaubildern zu ermitteln und in Festigkeitsnachweisen zusammenzuführen.

Motivation zur Überarbeitung der Zugfederauslegung

Bei der Herstellung von Zugfedern wird Federstahldraht zu einem Federkörper gewunden bzw. gewickelt. Um eine möglichst kurze Einbaulänge zu erzielen, liegen die Windungen in der Regel mit Vorspannung unmittelbar aneinander, sodass die Feder bereits in Ausgangslänge eine Vorspannkraft F_0 aufweist. Die Federkraft wird anschließend durch Ziehen an den Federenden eingestellt.

Die Zugkraft muss dabei geeignet in den Federkörper eingeleitet werden. In der industriellen Anwendung haben sich hier-

für verschiedene Gestaltungsvarianten der Federenden etabliert, unter anderem halbe oder ganze deutsche Ösen (HDÖ, GDÖ) sowie englische Ösen (EÖ) (vgl. Abbildung 1) oder Einschraubstücke. Durch Formgebung, Wärmebehandlungen sowie optionale Fertigungsschritte wie Kugelstrahlen oder Oberflächenbehandlungen entsteht im Draht ein komplexer Eigenspannungszustand, der die Bewertung der Beanspruchung zusätzlich beeinflusst.

Für Auslegung und Berechnung zylindrischer Zugfedern bildet die Norm DIN EN 13906-2 [1] die zentrale Grundlage. Jedoch gibt es erhebliche Defizite durch fehlende Berechnungsansätze für die Ösen und Ösenübergänge, die in der Praxis oftmals die versagenskritischen Bereiche darstellen.

Bei Zugfedern ist also im dynamischen und/oder statischen Festigkeitsnachweis je nach Ausführung der Kraftereinleitung die Betrachtung mehrerer kritischer Bereiche notwendig (vgl. Abbildung 2 nach Norm, rot ergänzt). Für übliche Ösen sind das neben dem Federkörper FK die Öse A selbst und insb. der Übergangsbereich B von der Öse zum Federkörper. Gerade im Übergang B überlagern sich Normal- und Schubspannungen. Zusätzlich ist dieser Bereich durch Fertigungseinflüsse häufig stark plastisch verformt (Eigenspannungen, Werkzeugangriffe), und der kleine Biegeradius führt zu ausgeprägter Kerbwirkung. Die normative Auslegung bei statischer Beanspruchung erfolgt im Wesentlichen über die Beziehung $\tau_{zul} = 0,45 \cdot R_m$, also über eine zulässige Schubspannung im Federkörper bezogen auf die Drahtzugfestigkeit R_m . Normalspannungsanteile, die in den Bereichen A und B meist vorliegen oder gar dominieren, bleiben damit unberücksichtigt. Lediglich der gegenüber Druckfedern (DIN EN 13906-1: $\tau_{zul} = 0,56 \cdot R_m$) verringerte Faktor 0,45 weist pauschal auf die Auswirkungen der Ösen in der Auslegung hin.

Zudem können zulässige Spannungen für die zyklische Belastung nicht analog zu Druckfedern aus etablierten Schwingfestigkeitsschaubildern abgelesen werden, da vergleichbare Diagramme für Zugfedern fehlen. Für die laut Norm „eigen-tümlichen“ Ösenformen existieren in der Norm keine tragfähigen Empfehlungen für einen rechnerischen Nachweis. Stattdessen wird im Wesentlichen auf Lebensdauerprüfungen unter realen Betriebsbedingungen verwiesen.

Einerseits fehlen also für die vorhandenen Spannungen in Öse und Ösenübergang in der Norm allgemeingültige Formeln, weiter hängen die vorhandenen Spannungen von zahlreichen Parametern ab: u. a. Ösenstellung und -position sowie Federparameter. Für den Federkörper werden in der Regel dieselben Grundgleichungen wie bei Druckfedern verwendet, die allerdings nur bei mittig positionierten Ösen zum Einsatz kommen dürfen. In der Praxis sind daher bisher numerische Berechnun-

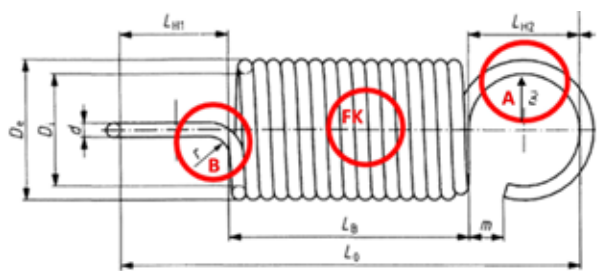


Abb. 2. Versagenskritische Bereiche einer Zugfeder mit halber deutscher Öse nach Norm [1] (eigene Ergänzungen rot).
© TU Ilmenau

gen erforderlich. Eine einheitliche, insbesondere KMU-taugliche rechnerische Auslegung war damit bislang deutlich erschwert oder in Teilen nicht möglich.

An dieser Stelle setzte das Forschungsvorhaben an, mit dem Ziel: Entwicklung eines vollständigen Nachweises auf der Basis einfach anwendbarer Schwingfestigkeits-Diagramme für Zugfedern unter Nutzung der im Vorgängerprojekt für Druckfedern entwickelten Methoden sowie von neuen analytischen Methoden für die Berechnung der vorhandenen Spannungen, differenziert für die unterschiedlichen Ösen und für die versagenskritischen Bereiche.

Berechnung vorhandener und zulässiger Spannungen sowie praktische Validierung

Im Vorhaben wurden mehrere Ansätze erarbeitet, um in den kritischen Bereichen lokal vorhandene Spannungsanteile, also inkl. der Überlagerungen von Normal- und Schubspannungen, zu bestimmen und konsistent in den Nachweis einzubinden. Zunächst wurden dafür auf analytischem Wege die Spannungen berechnet. Es zeigte sich im Abgleich mit FE-Simulationen, dass diese für die Bereiche A und FK mit guter Genauigkeit anwendbar sind. Für die halbe deutsche Öse wurde für den Ösenübergang B zusätzlich eine neue Herangehensweise auf Basis einer Parameterstudie von FE-Simulationen entwickelt. Ergebnis war ein neuer Übertragungsfaktor $K_{\bar{U}}$, mit dem die maximal im Bereich B vorhandene Vergleichsspannung sehr einfach und konservativ aus der im Federkörper vorhandenen Torsionsnennspannung ermittelt werden kann. Für die Federhersteller wird dadurch der Auslegungsprozess deutlich vereinfacht, da weder mit aufwändigen FE-Simulationen gearbeitet, noch mit den einzelnen Spannungsanteilen die Vergleichsspannung ermittelt werden muss.

Als methodische Basis zur Ermittlung der zulässigen Spannungen dient die von der Forschungsstelle maßgeblich mitentwickelte FKM-Richtlinie Federn [2]. Diese

ermöglicht die Berechnung lokal ertragbarer Spannungsamplituden bei gegebener Mittelspannung unter Berücksichtigung relevanter Einflussfaktoren (zum Beispiel Wärmebehandlung, Oberfläche, Abmessungen, Eigenspannungen). Über ein Sicherheitskonzept werden die ertragbaren in zulässige Spannungen überführt.

Auf diese Weise können die zulässigen Spannungen für ganz konkrete Federn rechnerisch ermittelt werden. Eine Verallgemeinerung in Form eines einzelnen Schwingfestigkeits-schaubilds ist damit nicht möglich – stattdessen wurden neue Schaubildtafeln für Referenzfedern berechnet, die im Einzelnen Festigkeitsdiagramme für zulässige Normal- und Schubspannungen enthalten und damit prinzipiell so einfach anwendbar sind wie die bekannten Goodman-Diagramme für Druckfedern (alt: in der EN 13906-1, neu: in der FKM-RL Federn).

Ergänzend wurde ein breit angelegtes Versuchsprogramm abgeprüft: Es umfasst die Dokumentation statischer Kennwerte von Drähten und Federn anhand von Zug- und Torsionsversuchen, die exakte Vermessung der Geometrien und Federkennlinien sowie – im Schwerpunkt – die experimentelle Ermittlung ertragbarer Spannungen verschiedener Zugfedervarianten in zahlreichen zyklischen Versuchen. Damit konnten die Berechnungsansätze validiert und die Parameter des Sicherheitskonzepts gezielt ausgewählt werden. Zusätzlich wurden externe, von Firmen ermittelte und bereitgestellte, Schwingergebnisse ebenfalls zur Validierung herangezogen, sodass den Berechnungen insgesamt eine breite Versuchsdatenbasis gegenübersteht.

Überblick über die neuen Zugfeder-Festigkeitsnachweise

Es ist der Forschungsstelle ein Hauptanliegen, eine möglichst praktische Anwendung der wissenschaftlichen Ergebnisse zu ermöglichen. Dafür wurde mit Abbildung 3 ein Überblick über die nötigen Nachweise je Ösentyp erstellt und mit Kurzinformationen versehen. Die schematisch abgebildeten Haigh-Diagramme sind analog zu Goodman-Diagrammen anwendbar und verweisen auf die jeweils zu benutzenden neu entwickelten





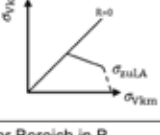
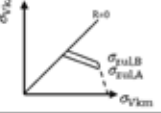

	Halbe/Ganze deutsche Öse	Englische Öse	Öse seitlich aufgestellt
Federkörper FK	 Torsion Ösen mittig → Kraftangriff zentrisch $\tau_{k1,2} = k_t \cdot \tau_{nenn1,2} = k_t \cdot \frac{B \cdot F_{1,2} \cdot D}{\pi \cdot d^3}$ mit $k_t = \frac{w+0,5}{w-0,75}$; $w = \frac{D}{d}$ Schubspannungsnachweis: $\alpha_{BK,\tau} = \frac{(\tau_{k2} - \tau_{k1})/2}{\tau_{kA}}$	  Torsion Ösen seitlich, Kraftangriff nichtzentrisch Ösenstellung 180° $\tau_{k1,2} = 2 \cdot k_t \cdot \tau_{nenn1,2}$ Ösenstellung 0° $\tau_{k1,2} = k_t \cdot \frac{16 \cdot F_{1,2} \cdot (D - \frac{D \cdot h}{L_0})}{\pi \cdot d^3}$	 Torsion Ösen seitlich, Kraftangriff nichtzentrisch Ösenstellung 180° $\tau_{k1,2} = 2 \cdot k_t \cdot \tau_{nenn1,2}$ Ösenstellung 0° $\tau_{k1,2} = k_t \cdot \frac{16 \cdot F_{1,2} \cdot (D - \frac{D \cdot h}{L_0})}{\pi \cdot d^3}$
Bereich A	Biegung + Zug + Torsion + Schub Vereinfachte Herangehensweise 1. Ermittlung $K_0(w; w_B)$ 2. Abschätzung der vorh. Vergleichsspannung im Übergangsbereich auf Basis der Torsionsnennspannung im Federkörper $\sigma_{vk1,2} = K_0(w; w_B) \cdot \tau_{nenn1,2} \cdot \sqrt{3}$ Damit Normalspannungsnachweis: $\alpha_{BK,\sigma} = \frac{(\sigma_{vk2} - \sigma_{vk1})/2}{\sigma_{vKA}}$	Biegung + Zug $\sigma_{vk1,2} = k_{b,0} \cdot \frac{16 \cdot F_{1,2} \cdot D_0}{\pi \cdot d^3} + \frac{4 \cdot F_{1,2}}{\pi \cdot d^2}$ mit $k_{b,0} = \frac{\sigma_0 / \sigma_{0,75} + 0,07}{\sigma_0 / \sigma_{0,75}}$ Normalspannungsnachweis: $\alpha_{BK,\sigma,A} = \frac{(\sigma_{vk2} - \sigma_{vk1})/2}{\sigma_{vKA}}$ Berücksichtigung von Zugeigenspannungen an Öseninnenseite in Lastspannungsrichtung	 Torsion $\tau_{k1,2} = k_{t,B} \cdot \frac{B \cdot F_{1,2} \cdot D}{\pi \cdot d^3}$ mit $k_{t,B} = \frac{w_B + 0,5}{w_B - 0,75}$ und $w_B = \frac{2r_B}{d}$ Schubspannungsnachweis: $\alpha_{BK,\tau,B} = \frac{(\tau_{k2} - \tau_{k1})/2}{\tau_{kA(B)}}$
Bereich B	zul. Spannung aus Schaubild 	zul. Spannung aus Schaubild 	Kein kritischer Bereich in B Da lediglich Querkraftschub im Drahtquerschnitt (ggf. Eigenspannungen je nach Ösenherstellung berücksichtigen)

Abb. 3. Übersicht zur Nachweisführung an Zugfedern. © TU Ilmenau

Schaubildtafeln. Die Tabelle ist von oben nach unten zu lesen, denn für alle Federn muss der Nachweis im Federkörper FK erbracht werden. Für die HDÖ wurde die Ermittlung der vorhandenen Spannungen in B so zusammengefasst, dass keine Unterscheidung mehr erfolgen muss, ob die Spannung bei A oder B kritisch ist. Der Nachweis erfolgt, wie zuvor beschrieben, auf Basis der Torsionsnennspannung im FK, die mit dem neuen Übertragungsfaktor K_U in eine Vergleichsspannung σ_v überführt wird. Damit wird ein Normalspannungsnachweis möglich, was ebenfalls die Benutzung von Vergleichsspannungen aus FE-Simulationen begünstigt.

Bei der EÖ sind 3 Nachweise zu erbringen: für den Nachweis in Punkt A sind die vorhandenen Normalspannungen, in Punkt B die vorhandenen Schubspannungen und im Federkörper ebenfalls die vorhandenen Schubspannungen mit den jeweils zulässigen Spannungen in Relation zu setzen.

Bei der seitlich aufgestellten ganzen deutschen Öse (GDÖs) ist zu unterscheiden, wie die Ösen zueinander stehen, da dies die Spannungsverteilung und -höhe im Federkörper maßgeblich beeinflusst. Wenn dieser Nachweis erbracht ist, folgt nur noch ein Nachweis in A. Da der Draht von der Öse zum Federkörper tangential übergeht, entsteht im Bereich B keine Spannungskonzentration und damit an sich keine kritische Nachweisstelle.

Neue Schaubildtafeln und Übertragungsmethode

Anhand von Annahmen und festgelegten Parametervariationen wurden 24 Schaubildtafeln berechnet. Dabei enthält eine solche Schaubildtafel im Einzelnen zwei Goodman Diagramme für Normalspannungen (für die Stelle A und für die Stelle B(HDÖ)) sowie für Schubspannungen (für den FK und für die Stelle B(EÖ)). Zusätzlich sind die ebenso anwendbaren Haigh-Diagramme enthalten. Eine Schaubildtafel ist jeweils für einen Werkstoff (nicht kugelgestrahlt), eine Schwingspielzahl N , eine Ösenform sowie ein Wickelverhältnis w und ein Krümmungsverhältnis im Ösenübergang w_B gültig. Sie enthält jeweils 4 Schwingfestigkeitskennlinien mit zulässigen Spannungen (also inkl. Sicherheitsfaktor) für Federn mit 4 verschiedenen Drahtdurchmessern. Horizontale Strichlinien weisen konservativ auf die statische Auslastbarkeit der vier Drähte entsprechend ihrer Zugfestigkeit hin. Diese zahlreichen Varianten dienen dazu, für die üblichen Ösen sowie Anwendungsfälle direkt das passende Schaubild bereitzustellen.

Die Schaubildtafeln sind also auf Referenzfedern zugeschnitten, deren Parameter jeweils mitgeliefert werden. In der Praxis weichen die Federparameter jedoch häufig von den beschriebenen Referenzfedern und Standardanwendungen ab (Geometrie, Festigkeit, Oberfläche, Eigenspannungen), durch andere Schwingspielzahlenforderungen (Arbeitspunkte, Lebensdauer) oder durch spezifische Sicherheitsanforderungen (Überlebenswahrscheinlichkeit). Im Rahmen des Projektes wurde eine Übertragungsmethode analog zu der für Druckfedern entwickelt, um die Schwingfestigkeiten aus den Schaubildtafeln auf andere, ähnliche Zugfedern zu ermöglichen. Die Idee für diese Übertragungsmethode liegt in der Vereinfachung zweier FKM-Berechnungsabläufe, je für Referenzfeder und Wunschfeder. Die Richtlinie ist zwar teilweise erforderlich, um manche Faktoren und Summanden zu bestimmen, jedoch ist die Handhabung der Methode deutlich einfacher: der Weg von der Schwingfestigkeit einer Referenzfeder laut Schaubild führt nun nicht mehr durch den vollständigen FKM-Berechnungsablauf,

sondern über einfachere Verhältnisgleichungen zu der Schwingfestigkeit der gewünschten Feder.

Fazit und Ausblick

Ziel der Arbeiten war es, die Auslegung von Zugfedern methodisch auf ein Niveau zu heben, das die Anwendung ähnlich unkompliziert macht wie die etablierten Goodman-Diagramme bei Druckfedern – zugleich jedoch die für Zugfedern charakteristischen Spannungsüberlagerungen und Fertigungseinflüsse sachgerecht abbildet. Die entwickelten Nachweise und Schaubilder sind für Standard-Zugfedern direkt nutzbar, denn es ist bereits ein sinnvoller Sicherheitsfaktor enthalten. Bei Bedarf kann die Sicherheit für von den Referenzfedern abweichende eigene Zugfedern mithilfe einer Übertragungsmethode noch weiter verbessert werden.

Langfristiges Ziel ist es, in Analogie zum Vorgängerprojekt für Druckfedern, die erarbeiteten Ansätze und Ergebnisse in bestehende Regelwerke zu integrieren. Insbesondere wird angestrebt, die neuen Methoden, Kennwerte, Spannungen und Schaubilder in die FKM-Richtlinie Federn einzubringen und eine Überarbeitung der Norm DIN EN 13906-2 fachlich zu untermauern. Damit sollen die vorgeschlagenen Nachweise mittelfristig als anerkannter Stand der Technik etabliert werden und zu einer Harmonisierung der Auslegungspraxis für Zugfedern beitragen. Darüber hinaus eröffnet die modulare Struktur der Ansätze die Möglichkeit, zukünftige Entwicklungen in das bestehende Rahmenwerk zu integrieren und so eine nachhaltige Weiterentwicklung der Auslegungsmethodik zu gewährleisten.

Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 01IF22762N der Forschungsgesellschaft Stahlverformung e.V. (FSV) wurde über das DLR im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Langfassung des Abschlussberichtes kann bei der FSV, Goldene Pforte 1, 58093 Hagen, angefordert werden.

Literatur

- [1] Deutsches Institut für Normung e.V.: Zylindrische Schraubenfedern aus runden Drähten und Stäben - Berechnung und Konstruktion. Teil 2: Zugfedern; 21.160 (13906-2). Berlin: Beuth Verlag; 2013. <https://doi.org/10.31030/2036244>.
- [2] FKM Forschungskuratorium Maschinenbau e.V. (ed.): Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Federn und Federelemente. FKM-Richtlinie für Federn und Federelemente. 2nd ed. Frankfurt am Main: VDMA-Verlag; 2023.

Die Autoren des Beitrags sind Dr.-Ing. Martin Petrich und Prof. Dr.-Ing. Ulf Kletzin.

Technische Universität Ilmenau

Fachgebiet Maschinenelemente
Max-Planck-Ring 12
98693 Ilmenau
Ansprechpartner ist Martin Petrich
Tel.: +49 3677 69-1865
martin.petrich@tu-ilmenau.de
www.tu-ilmenau.de/maschinenelemente