Auslegung zyklisch beanspruchter Druck-, Zug- und Drehfedern

Wie lassen sich Federn so auslegen, dass sie unter realen Betriebsbedingungen dauerhaft sicher funktionieren? Neue Forschungsarbeiten zeigen, wie sich Berechnung, Versuch und Normung besser verzahnen lassen – und warum das besonders für kleine und mittlere Unternehmen wichtig ist: zwischen Kraft, Moment und Bauraum sowie FKM-Richtlinie Federn und EN 13906.

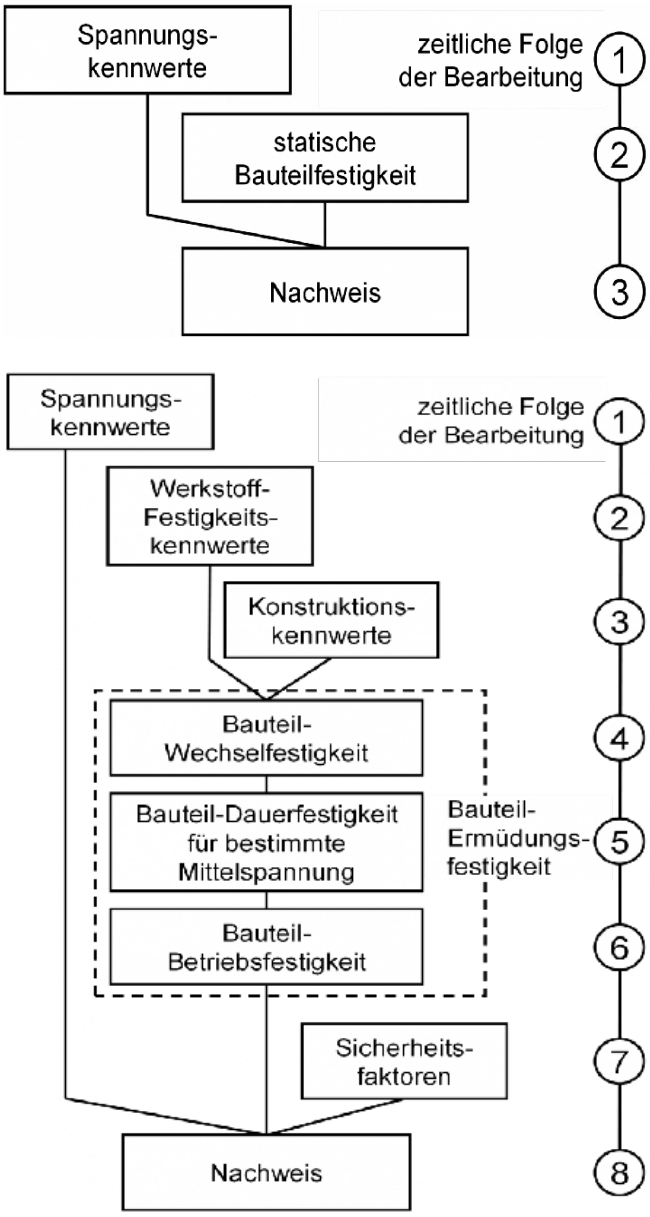


Bild 1. Die Nachweisführung kombiniert Werkstoffkennwerte, Konstruktion und Beanspruchungscharakteristik zu einem konsistenten Auslastungsnachweis.
© TU Ilmenau

Federn zählen zu den klassischen Maschinenelementen. Ihre Auslegung ist in der Praxis jedoch anspruchsvoller, als es die oft einfache Geometrie vermuten lässt. Die zu dimensionierende Feder soll, bei oft stark begrenztem Bauraum, vorgegebene Arbeitspunkte, Lebensdauer bzw. Anforderungen an geringe Relaxation erreichen. Die Auswahl des Werkstoffs und der verschiedenen Arbeitsschritte des Fertigungsprozesses soll zu wirtschaftlich herstellbaren betriebssicheren Federn führen. Für die Federbranche – geprägt von kleinen und mittelgroßen Unternehmen – und für die zahlreichen Anwender von Federn aller Art sind daher praxistaugliche, nachvollziehbare und normennahe Auslegungsmethoden von zentraler Bedeutung.
Die Auslegung statisch und zyklisch beanspruchter Federn wurde in mehreren Forschungsprojekten der Forschungsgruppe „Draht und Federn“ der TU Ilmenau methodisch weiterentwickelt. Im Mittelpunkt stehen dabei neue Festigkeitsnachweise, experimentell validierte werkstoffabhängige Auslastbarkeitsgrenzen und Dauerfestigkeitsschaubilder sowie die konsistente Anwendung der FKM-Richtlinie Federn auf Druckfedern, Zugfedern und Drehfedern. Auf der Jahreshauptversammlung des VDFI am 21./22. Mai 2026 stellte Ulf Kletzin wesentliche Ergebnisse der Projekte „DruckFeDa“ und „ZugFeDa“ vor, erläuterte den Forschungsansatz des Projektes „DrehFeDa“ und gab einen Ausblick auf ein neues Projekt „ZugfeNorm“ als vorbereitende Richtlinien- und Normungsinitiative für Zugfedern.

FKM-Richtlinie als methodische Grundlage

Die Forschungsgruppe „Draht und Federn“ an der TU Ilmenau hat in der Vergangenheit zahlreiche Projekte zur Bestimmung von Drahtkennwerten und deren Veränderung durch die Federherstellschritte bearbeitet, welche 2020 zur Entwicklung der FKM-Richtlinie „Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Federn und Federelemente“ führten, die von der Forschungsstelle maßgeblich mitverfasst und bis heute weiterentwickelt wird (2. Auflage: [FKM23]). Sie bildet die methodische Basis der neu entwickelten Festigkeitsnachweise. Der Berechnungsablauf (Bild 1) folgt sowohl für den statischen Festigkeitsnachweis als auch für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis einem modularen Schema und bildet die Versuchsdaten aus Forschungsprojekten der vergangenen 30 Jahre ab. Ausgehend von Werkstoffkennwerten und deren Veränderung durch Federherstellschritte, geometrischen Einflussgrößen sowie der Beanspruchungscharakteristik

wird schrittweise die Bauteilfestigkeit der Feder unter Einsatzbedingungen bestimmt. Zusammen mit der vorhandenen Beanspruchung und einem an die jeweilige Überlebenswahrscheinlichkeit angepassten Sicherheitsfaktor ergibt sich daraus der Auslastungsgrad. Der Vorteil dieses Ansatzes liegt in seiner Systematik. Die analytisch oder numerisch (FEM) ermittelten vorhandenen Spannungen und die mit der FKM-Richtlinie berechneten ertragbaren Spannungen lassen sich unter Berücksichtigung von Sicherheitskennwerten in einem konsistenten Nachweiskonzept zusammenführen. Dauerfestigkeitsschaubilder können abgeleitet werden. Genau diese methodische Geschlossenheit ist Voraussetzung dafür, dass Ergebnisse aus Forschungsprojekten später auch in Richtlinien und Normen überführt werden können.

Druckfedern: Dauerfestigkeitsschaubilder methodisch erneuert

Für kaltgeformte Schraubendruckfedern bilden die in der DIN EN 13906-1 enthaltenen Methoden, Gleichungen und Goodman-Diagramme seit Jahrzehnten die Grundlage der statischen und zyklischen Auslegung. Die enthaltenen Dauerfestigkeitsschaubilder sind europaweit und international verbreitet, in Dimensionierungssoftware verarbeitet und damit in der Praxis, insbesondere bei KMU und Federanwendern, fest verankert, obwohl sie nicht mehr in allen Punkten dem heutigen Stand der Werkstoff- und Fertigungstechnik entsprechen und darin nur wenige schwingfestigkeitsbeeinflussende Größen berücksichtigt werden. Angaben zu den zugrundeliegenden Federn, zu Statistik und der enthaltenen Sicherheit fehlen gänzlich.

An diesem Punkt setzte das Forschungsprojekt „DruckFeDa (IGF 19693 BR)“ an. Ziel war die Entwicklung neuer, methodisch abgesicherter Dauerfestigkeitsschaubilder für übliche kaltgeformte Schraubendruckfedern nach EN 13906-1 (Bild 2). Die neuen Schaubilder enthalten zulässige Spannungen für Referenzfedern (Ausführung als Goodman und Haigh-Schaubilder in jeweils einer Schautafel) und berücksichtigen moderne Werkstoffe und Fertigungsverfahren. Sie basieren auf einer breiten Datenbasis aus Ergebnissen von Ermüdungsversuchen der vergangenen Jahrzehnte. Im Projekt selbst wurden sie durch weitere 342 statistisch ausgewertete Schwingversuche an mehreren tausend Federn experimentell validiert. Ausgelegt sind sie für zylindrische Referenzfedern mit Wickelverhältnis $w = 6$ und Windungszahl $n_t = 6{,}5$ beziehungsweise $n = 4{,}5$. Die zugrunde gelegten Zugfestigkeitswerte $R_{m,W}$ gelten nach Wärmebehandlung. Die Diagramme wurden für eine Überlebenswahrscheinlichkeit $P_{ü} = 99{,}9$ % und für leicht vorgesetzte Federn erstellt.

Für die Bestimmung vorhandener Spannungen können die bekannten Verfahren nach dem Stand der Technik in EN 13906-1 verwendet oder in Ausnahmefällen durch FEM ergänzt werden. Ein wesentliches Projektergebnis ist darüber hinaus die Aufbereitung numerischer Methoden mit frei verfügbarer Software, um ihre Anwendung in der Praxis zu erleichtern. Die entwickelten Dauerfestigkeitsschaubilder wurden bereits in die 2. Auflage der FKM-Richtlinie Federn übernommen. Die Überführung in die EN 13906-1 erfordert dagegen aktuell deutlich größeren Abstimmungsaufwand auf europäischer Ebene unter Koordinierung der European Spring Federation (ESF).

Zugfedern: erstmals zyklische Nachweise für Ösen und Ösenübergänge

Bei Schraubenzugfedern war der Entwicklungsbedarf noch größer. Die DIN EN 13906-2 bildet in ihrer bisherigen Form im Wesentlichen eine Grundlage für die Auslegung statisch beanspruchter Zugfedern. Für den zyklischen Festigkeitsnachweis des Federkörpers fehlen jedoch normativ abgesicherte Verfahren. Noch gravierender ist, dass für Ösen und Ösenübergänge – also die typischen versagenskritischen Bereiche einer Zugfeder – bislang keinerlei belastbare Nachweismethoden vorlagen. Hier setzte das IGF-Forschungsprojekt „ZugfeDa (01IF22762N)“ an. Im Fokus standen halbe und ganze deutsche Ösen sowie englische Ösen. Der kritische Bereich bei halben und ganzen deutschen Ösen ergibt sich aus der Überlage-

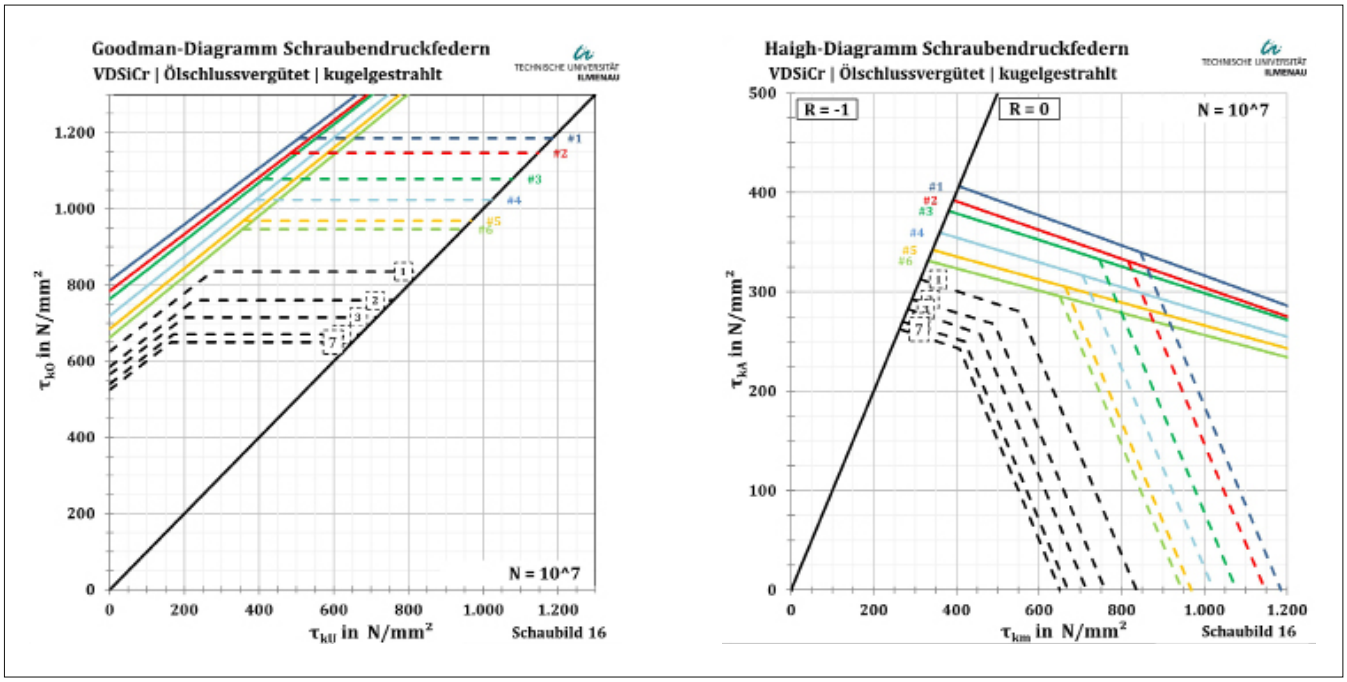


Bild 2. Die in DruckFeDa entwickelten Goodman- und Haigh-Diagramme wurden experimentell validiert und bereits in die 2. Auflage der FKM-Richtlinie Federn [FKM23] übernommen. *© TU Ilmenau*

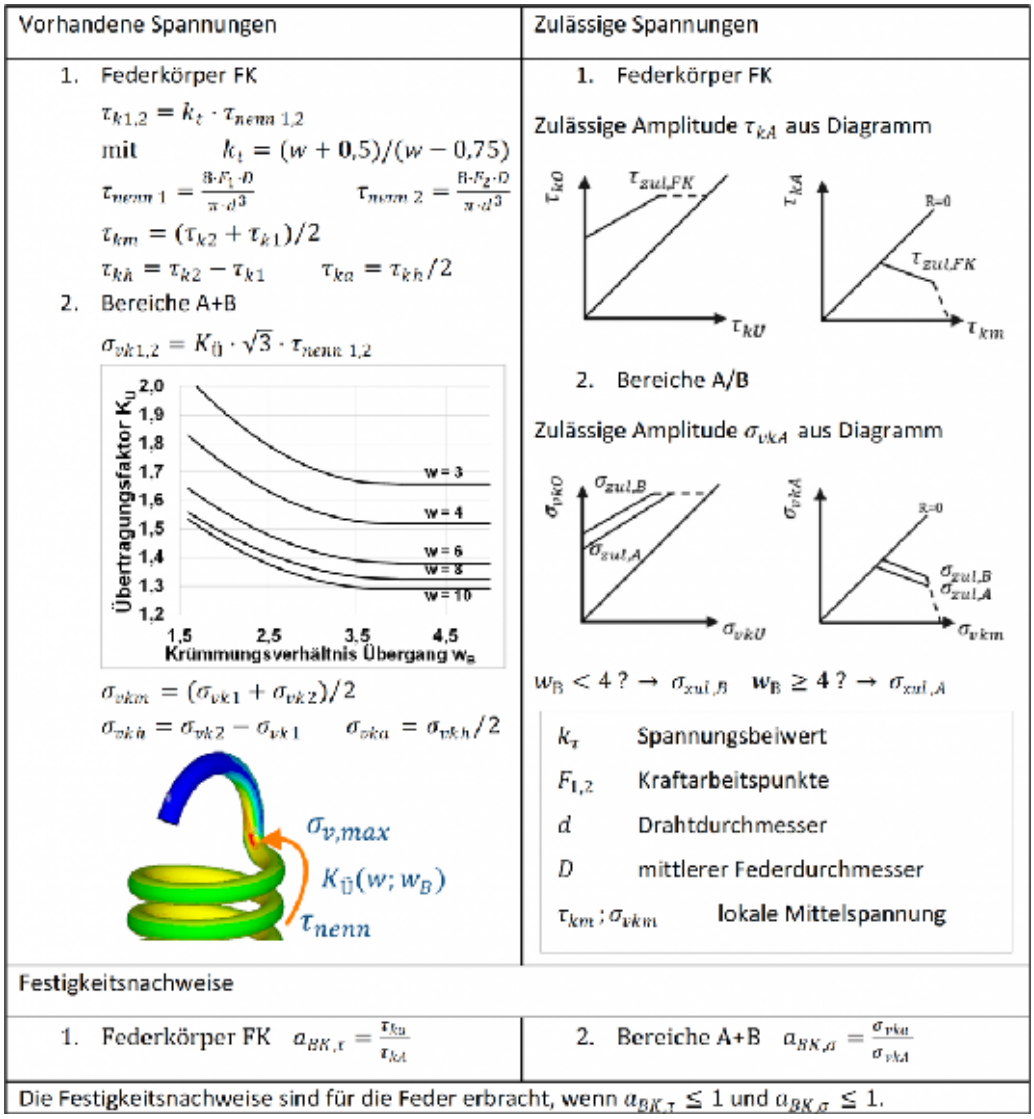


Bild 3. Kritisch an Zugfedern sind die Ösenübergänge: Kleine Übergangsradien erzeugen hohe lokale Spannungen ($K_{\ddot{U}}$ groß) und erfordern neue Nachweismethoden. © TU Ilmenau

rung von hauptsächlich Biege- und Torsionsspannungen in Verbindung mit kleinen Übergangsradien und führt dort häufig zu hohen lokalen Spannungen. Exakte, rein analytische Berechnungsmöglichkeiten sind für diesen Bereich nicht verfügbar.

Die Vorgehensweise im Projekt kombinierte daher analytische Betrachtungen und FEM-gestützte Parameterstudien für die Ableitung einfacher analytischer Bemessungsgleichungen. Die daraus entwickelte Methode überführt die Torsionsspannung im Federkörper über einen Übertragungsfaktor $K_{\ddot{U}}$ in die maximal vorhandene Vergleichsspannung in Öse oder Ösenübergang (Bild 3). Damit können Ermüdungsfestigkeitsnachweise sowohl für den Federkörper als auch für die kritischen Anschlussbereiche durchgeführt werden.

Zur Validierung wurden 34 Versuchsfedervarianten untersucht. Brüche entstanden nur bei Überschreiten der im Rahmen der Auslegung definierten zulässigen Spannungsamplituden. Die analysierten Schadensfälle zeigten durchweg Ermüdungsbrüche. Insgesamt wurden erstmals 24 Dauerfestigkeits-Schautafeln mit zulässigen Normal- und Schubspannungen für Zugfedern berechnet und validiert. Diese gelten jeweils für eine bestimmte Schwingspielzahl, einen Werkstoff, eine Ösenform, ein Wickelverhältnis w = 6 und ein Krümmungsverhältnis im Ösenübergang w_B. Die Tafeln enthalten zulässige Spannungen für Referenzfedern mit vier Drahtdurchmessern; horizontale Linien weisen werkstoffspezifisch auf die statische Auslastbarkeit hin.

Weitere Projektergebnisse sind ein Freeware Zugfedergenerator und ein FEM Berechnungsmodul samt Videotutorials, die den Entwurf und die numerische Simulation erleichtern und insbesondere KMU bei der praktischen Anwendung unterstützen sollen. Darüber hinaus können damit gegenüber Kunden und Lieferanten auch anschauliche Variantenvergleiche durchgeführt und fundierte Design-Empfehlungen gegeben werden.

Drehfedern: Schenkelübergänge als nächster Entwicklungsschritt

Für die Auslegung von Drehfedern ist die DIN EN 13906-3 ebenfalls unzureichend. Zwar existieren Methoden für den Festigkeitsnachweis des Federkörpers sowie ein Dauerfestigkeitsschaubild für Drehfedern aus DH-Draht, doch für die Schenkelübergänge und die vielfältigen Einbausituationen sowie den Einsatz von Dornen, die sich typischerweise durch Reibung und veränderte Krafteinleitungsstellen deutlich auf die Spannungsverteilung auswirken und so die Versagensbereiche maßgeblich beeinflussen, fehlen belastbare Nachweismethoden.

Das laufende IGF-Projekt „DrehfeDa (01IF23524N)“ soll diese Lücke schließen. Ziel ist es, vorhandene Spannungen in Federkörper, Schenkeln und Schenkelübergängen analytisch und numerisch zu erfassen, einfache Berechnungsverfahren für die Praxis abzuleiten, numerische Methoden mit Freeware zugänglich aufzubereiten sowie Dauerfestigkeitsschaubilder für Schenkelfedern zu entwickeln und durch Schwingversuche zu validieren (Bild 4).

Ausblick: VDFI-Richtlinie Zugfedern als Brücke zur neuen EN 13906-2

Die Ergebnisse aus ZugFeDa machten deutlich, dass für Zugfedern eine einfache Fortschreibung der bestehenden EN 13906-2 nicht ausreichen wird, da die statische Dimensionierung von Zugfedern fundamental erneuert und die zyklische Dimensionierung erstmals überhaupt ermöglicht wurde und zwar differenziert für Zugfedern mit drei verschiedenen Ösenformen. Der erzielte Wissenszuwachs erfordert deshalb eine substanzielle Weiterentwicklung der Normungsgrundlagen.

Daher wurde aktuell das IGF-Folgevorhaben ZugfeNorm beantragt. Vorgesehen ist zunächst eine VDFI-Richtlinie Zugfedern als Vorstufe für einen Entwurf zur Erweiterung der FKM-Richtlinie Federn und für eine grundlegend erneuerte EN 13906-2. Geplant ist unter anderem eine Erweiterung der Datenbasis für Zugfedern mit schräg aufgestellten bzw. eingezogenen Ösen sowie für die Werkstoffe 1.4310 und 1.4568, für kugelgestrahlte Federn und für größere Drahtdurchmesser von etwa 6 mm bis 8 mm sowie für kleinere und damit für hochfeste Drähte mit R_m > 2000 MPa. Der geplante Projektbeginn ist Q1/2027.

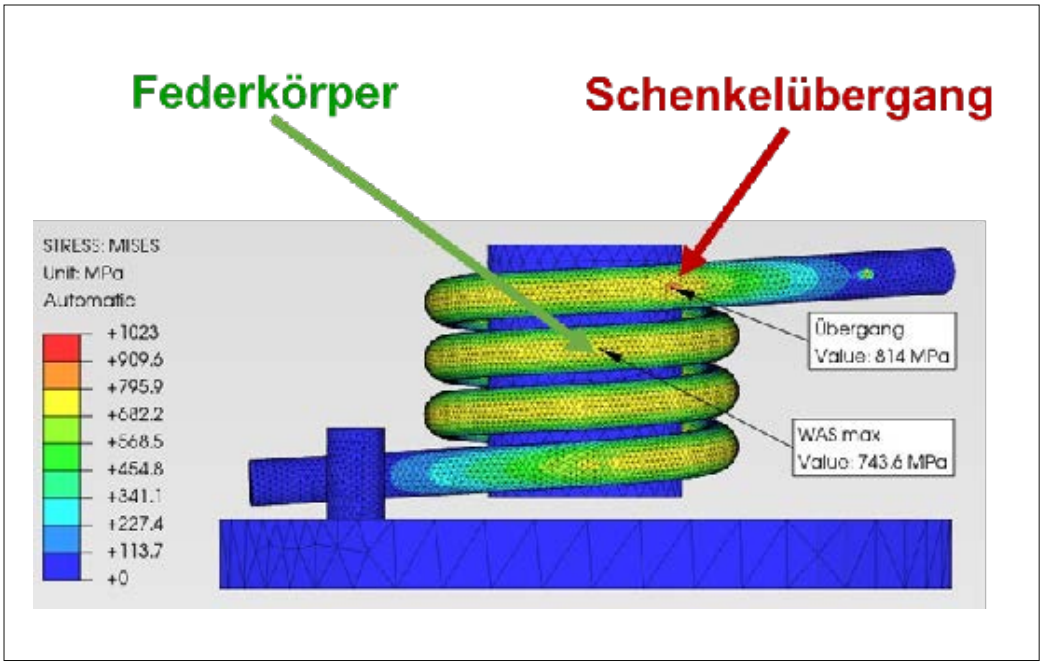


Bild 4. DrehFeDa adressiert einen bislang normativ nur unzureichend beschriebenen Bereich: die zyklische Auslegung versagenskritischer Schenkelübergänge. *© TU Ilmenau*

Fazit

Die vorgestellten Ergebnisse markieren einen wesentlichen Fortschritt in der Auslegung der wichtigsten Federtypen. Für Druckfedern liegen methodisch erneuerte und experimentell validierte Dauerfestigkeitsschaubilder bereits vor und sind in die FKM-Richtlinie Federn eingeflossen. Für Zugfedern wurden erstmals konsistente Nachweise für den zyklischen Betrieb von Federkörper, Ösen und Ösenübergängen entwickelt. Mit „DrehFeDa“ wird dieser Ansatz nun auf Schenkelfedern erweitert.

Damit entsteht schrittweise ein durchgängiges Auslegungskonzept für Federn, das analytische, numerische und experimentelle Methoden verbindet und sowohl für die Wettbewerbsfähigkeit in der industriellen Praxis als auch für Richtlinien- und Normungsarbeit höchste Relevanz besitzt.

Projekte im Überblick

DruckFeDa
Erneuerung der Dauerfestigkeitsschaubilder für kaltgeformte Schraubendruckfedern in DIN EN 13906-1 mit methodisch rechnerischer Herangehensweise
AiF-Forschungsprojekt IGF 19693 BR
Laufzeit: 01.10.2017 – 30.09.2020

ZugFeDa
Innovative Zugfederauslegung durch Entwicklung neuer Festigkeitsnachweise und Dauerfestigkeitsschaubilder
AiF-Forschungsprojekt IGF 22762 BR
Laufzeit: 01.01.2023 – 30.09.2025

DrehFeDa
Innovative Drehfederauslegung durch Entwicklung neuer Festigkeitsnachweise und Dauerfestigkeitsschaubilder
AiF-Forschungsprojekt 01IF23524N
Laufzeit: 01.07.2025 – 30.09.2027

ZugfeNorm
Weiterentwicklung der Auslegung von Zugfedern und Vergrößerung der Datenbasis mit dem Ziel der Erneuerung der Norm EN 13906-2
Antrag in Begutachtung
Geplanter Beginn: Q1/2027

Literatur

[FKM23] FKM Forschungskuratorium Maschinenbau e.V. (Hrsg.): Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Federn und Federelemente – FKM-Richtlinie für Federn und Federelemente. 2. Auflage, VDMA-Verlag, Frankfurt am Main, 2023

[Pet21] Petrich, M.; Kletzin, U.: Erneuerung der Dauerfestigkeitsschaubilder für kaltgeformte Schraubendruckfedern in DIN EN 13906-1 mit methodisch rechnerischer Herangehensweise – Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben IGF 19693 BR. Ilmenau, 2021

[Pet26] Petrich, M.; Kletzin, U.; Geinitz, V.; Reich, R.; Otto, C.: Innovative Zugfederauslegung durch Entwicklung neuer Festigkeitsnachweise und Dauerfestigkeitsschaubilder – Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben ZugFeDa 1IF22762N., 2026

Die Autoren des Beitrages sind Ulf Kletzin, Martin Petrich, René Reich, Veronika Geinitz und Christian Otto.

Technische Universität Ilmenau
Fakultät für Maschinenbau
Fachgebiet Maschinenelemente
Ansprechpartner ist Ulf Kletzin
Max-Planck-Ring 12
98693 Ilmenau
Tel.: +49 3677 69-2471
ulf.kletzin@tu-ilmenau.de
www.tu-ilmenau.de/maschinenelemente