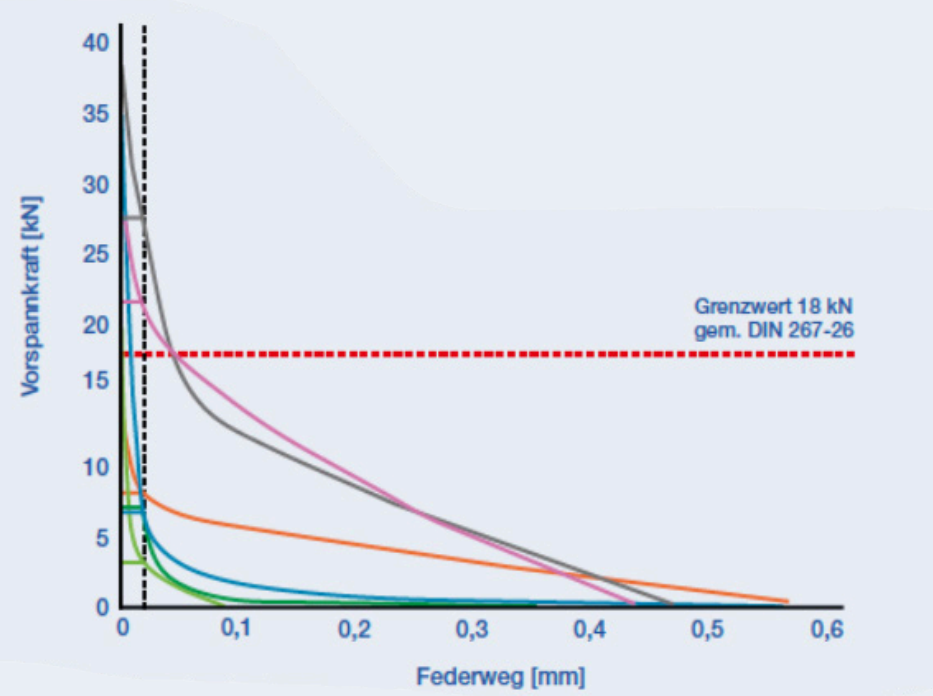
Elastische Nachgiebigkeit
von Schraubverbindungen



Elastische Nachgiebigkeit als Schlüssel zur Schraubensicherheit.

Autor: Dipl.-Ing., Dipl.-Wirt.-Ing. Thomas Volborth

Datum: 13.11.2025

Agenda

1. Einleitung und Motivation
2. Folgen für Konstruktion und Auslegung
3. Bedeutung der elastischen Nachgiebigkeit
4. Neuer Ansatz: Nummerische Erfassung der Federwirkung
5. Geeignete federnde Verbindungselemente
6. Vorteile der Berücksichtigung federnder Verbindungselemente
7. Wirksame Schraubensicherungen
8. Fazit
9. Kontakt und Download

Elastische Nachgiebigkeit als Schlüssel zur Schraubensicherheit.

Einfluss federnder Verbindungselemente auf Klemmkraft und Gleitfestigkeit

Neue Erkenntnisse zeigen: Elastische Nachgiebigkeit stabilisiert die Klemmkraft, reduziert Gewicht und steigert die Gleitfestigkeit – nachweisbar nach VDI 2230.

Einleitung und Motivation

Der Erhalt der Klemm- bzw. Vorspannkraft und die elastische Nachgiebigkeit bilden den Kern jeder funktionierenden Schraubenverbindung.
Nur wenn die Verbindung in der Lage ist, auftretende Setz-, Relaxations- oder Temperaturveränderungen elastisch zu kompensieren, bleibt die erforderliche Klemmkraft über die gesamte Betriebsdauer erhalten.

Bei der Schraubenberechnung wird die elastische Wirkung federnder Verbindungselemente in der Praxis bislang weitgehend vernachlässigt. Schraubenverbindungen werden in der Regel nur aus Schraube und verspannten Bauteilen modelliert – ohne den Beitrag von Spannscheiben, NSK-Scheiben oder anderen Elementen mit einer relevanten Restfederwirkung zur Steigerung der Gesamtnachgiebigkeit zu berücksichtigen.

Folgen für Konstruktion und Auslegung

Die fehlende rechnerische Berücksichtigung führt zu mehreren technischen und wirtschaftlichen Nachteilen:

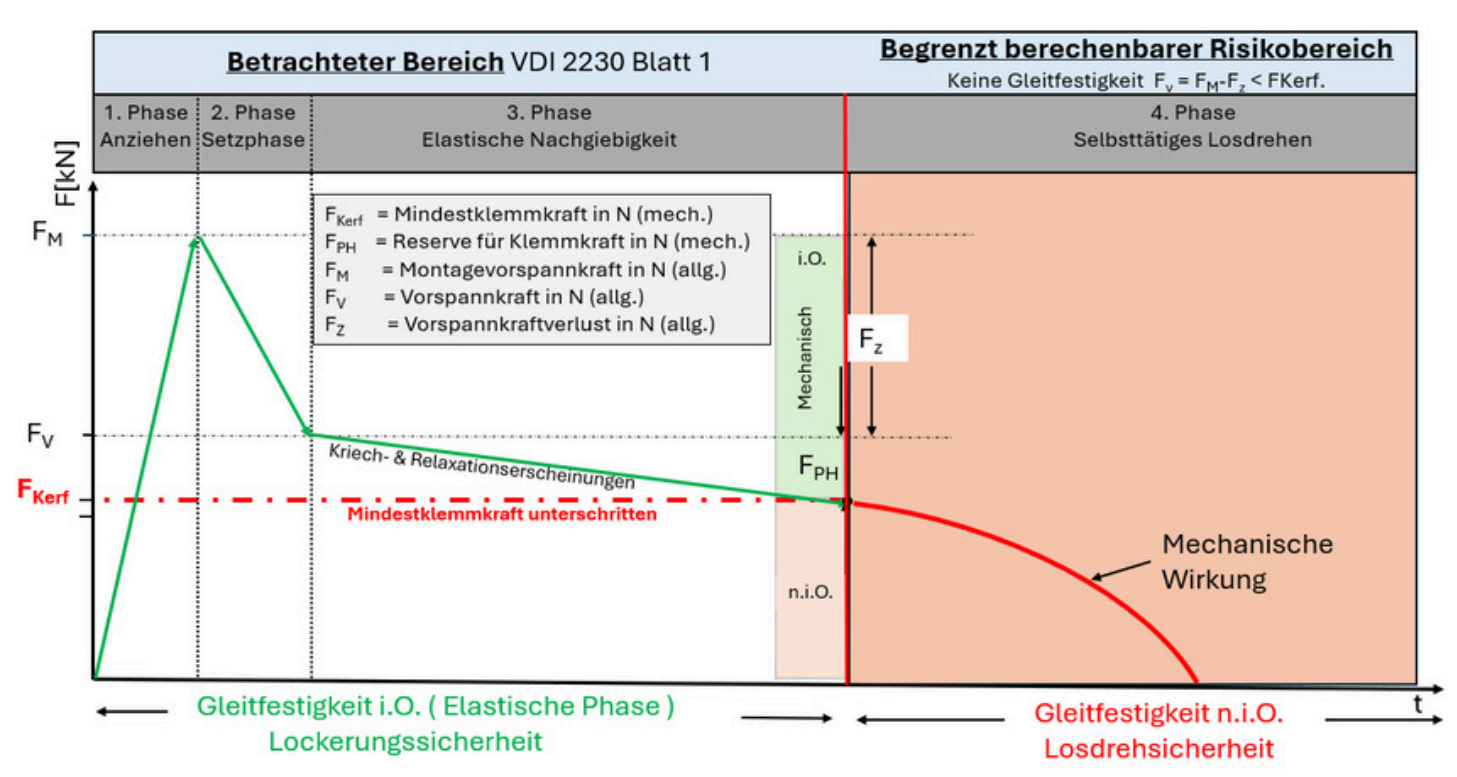
- Überdimensionierung: Schrauben, Flansche und Bauteildicken werden größer ausgelegt als notwendig.
- Material- und Energieaufwand: Höherer Ressourceneinsatz und Gewichtszuwachs, besonders kritisch im Leichtbau.
- Fehleinschätzung der Sicherheit: Das Risiko von Vorspannkraftverlusten und Losdrehvorgängen wird nicht realitätsnah abgebildet.
- Unterschätzte Gleitfestigkeit: Die Fähigkeit zur elastischen Kraftaufnahme wird rechnerisch ignoriert.

Damit bleibt ein zentrales Optimierungspotenzial der Verbindung ungenutzt – nämlich die gezielte Erhöhung der Nachgiebigkeit zur Sicherung der Klemmkraft über die Betriebsdauer.

Bedeutung der elastischen Nachgiebigkeit

Eine Schraubenverbindung verliert ihre Funktionssicherheit nicht primär durch ein spontanes „Herausdrehen“ der Schraube, sondern durch eine kontinuierliche Reduktion der Klemmkraft infolge zeitabhängiger Werkstoff- und Oberflächenveränderungen. Erhöhte elastische Nachgiebigkeit sorgt dafür, dass diese Verluste abgefedert werden.

Das 4-Phasen-Modell des Vorspannkraftverlaufs



Bei der Auslegung einer Schraubenverbindung wird unterstellt, dass die Kräfte mittels Klemmung über die eingespannten Platten übertragen werden. Nach den beiden Phasen, 1. Phase Anziehen und der 2. Phase des Setzens, folgt die 3. Phase der Elastischen Nachgiebigkeit.

In dieser Phase werden Relaxations- und Kriecheffekte sowie statische und dynamische Belastungen kompensiert und die Kräfte in der berechneten Art und Weise mittels Klemmung übertragen.

Wenn die elastische Nachgiebigkeit einer Schraubenverbindung nicht ausreicht, fällt die vorhandene Klemmkraft infolge von Setz-, Kriech- oder Relaxationsvorgängen unter die erforderliche Mindestklemmkraft ab. In diesem Zustand wird der Kraftfluss nicht mehr primär über den Reibschluss in der Trennfuge übertragen, sondern zunehmend direkt über den Schraubenquerschnitt. Dadurch steigt die Beanspruchung der Schraube von einer überwiegend axialen Vorspannbelastung hin zu einer zulässigkeitskritischen Scher- und Biegebeanspruchung.

Dieser Übergang markiert einen ausgeprägten Risikobereich:
Die Schraube kann aufgrund der kombinierten Zusatzbeanspruchung einen Dauerfestigkeits- oder spontan versagensbedingten Bruch erleiden, was zum vollständigen Funktionsausfall des Gesamtsystems führt.
Dieser Versagensmechanismus lässt sich durch Losdrehsicherungselemente nicht verhindern, da diese lediglich das Rotationsmoment begrenzen, nicht aber die fehlende elastische Kompensation der Klemmkraftverluste ersetzen können.
Insofern ist die elastsiche Nachgiebigkeit und der Erhalt von zentraler Bedeutung.

Neuer Ansatz: Numerische Erfassung der Federwirkung

Rechnerische Berücksichtigung federnder Verbindungselemente

In einer gegenüber der VDI 2230 Blatt 1 erweiterten Formel wird die Nachgiebigkeit um den Anteil des federnden Verbindungselementes ergänzt.

$$F_z = \frac{f_z}{\delta_p + \delta_s + \delta_v}$$

Hierbei wird δ_v auf folgende Weise berechnet:

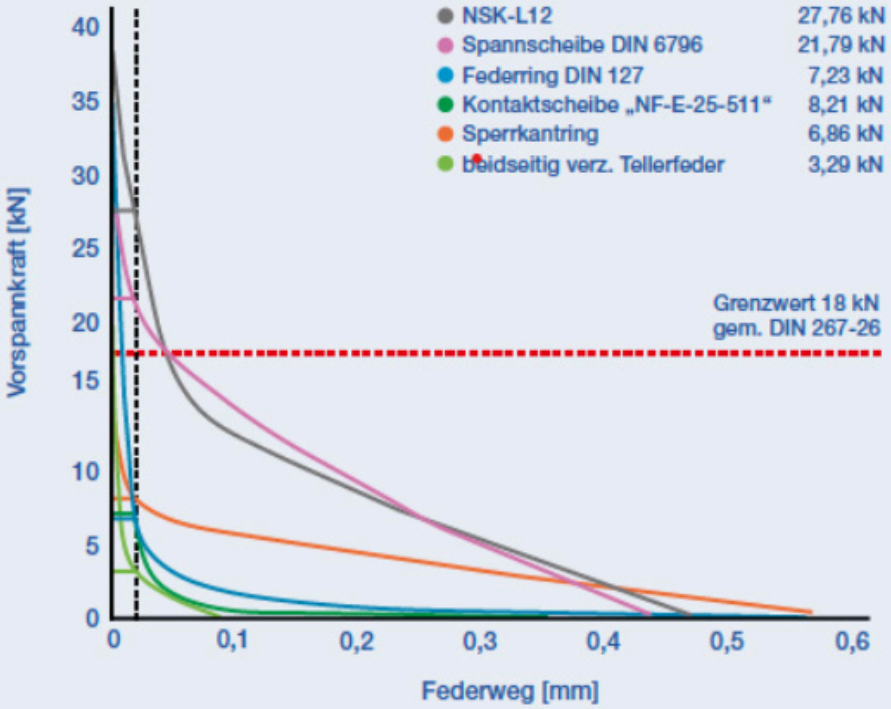
$$\frac{f_{z\,real}}{F_v - F_{fz\,real}}$$

$f_{z\,real}$: Ermittelter Setzbetrag gem. VDI 2230 Blatt 1 für die jeweilige Schraubverbindung

$F_{Rest\,real}$: Restkraft des / der federnden Verbindungselemente bei dem ermittelten Setzbetrag $f_{z\,real}$

Nachgiebigkeiten können für federnde Verbindungselemente anhand der DIN EN 16984 „Tellerfedern-Berechnung" für Spannscheiben (DIN 6796) oder anhand von Restfederkurven für spezifische Federelemente, wie z.B. NSK-Scheiben ermittelt werden.

Gegenüberstellung von Restfederkraftkurven verschiedener Sicherungselemente M12 / 8.8

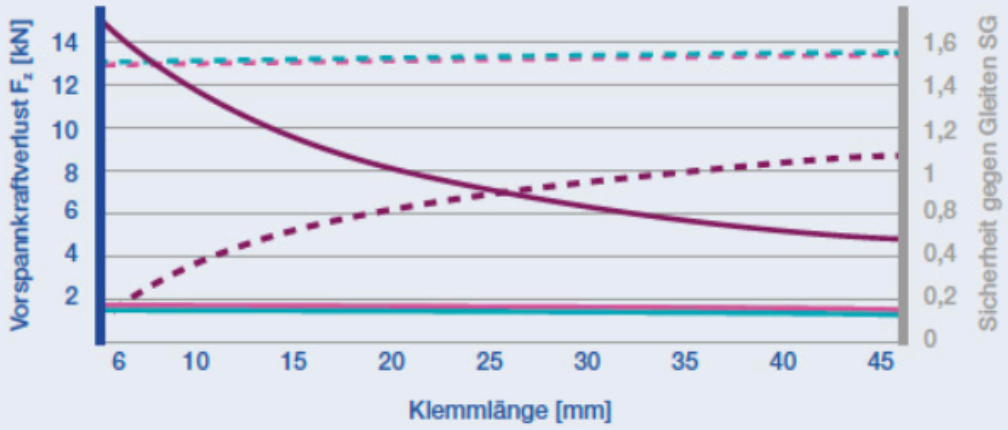


Ergebnisse und Auswirkungen

Die rechnerische Berücksichtigung der Restfederwirkung zeigt deutliche Effekte:

- Der Vorspannkraftverlust F_z reduziert sich signifikant bei kurzen Klemmlängen (< 5x Durchmesser).
- Die Sicherheit gegen Gleiten (SG) steigt deutlich.
- Spannscheiben und NSK-L zeigen nahezu identisches Verhalten beim Vorspannkraftverlust.
- Die Ergebnisse belegen, dass Federelemente nicht nur das Setzverhalten stabilisieren, sondern auch die Funktionssicherheit der Schraubenverbindung erhöhen.

Vorspannkraftverlust F_z Durchsteckschraubverbindung M12/8.8 ohne und mit federnden Verbindungselementen



Sicherheit gegen Gleiten von Durchsteckverbindung M12/8.8
Anziehfaktor a_A = 1,8 ohne / mit federnden Verbindungselementen

● ohne Verbindungselement ● mit Spannscheibe DIN 6796 ● NSK-L
Vorspannkraftverlust Sicherheit gegen Gleiten

Die VDI 2230 als auch die DIN EN 17976 empfehlen federnde Verbindungselemente einzusetzen, damit deren Wirkung rechnerisch berücksichtigt werden kann. Dies eröffnet neue Möglichkeiten zur präziseren Abbildung des realen Schraubenverhaltens – und zur konstruktiven Optimierung in Richtung Leichtbau, Funktionssicherheit und Energieeffizienz.

Geeignete federnde Verbindungselemente

Neben Spannscheiben (DIN 6796) und NSK-Scheiben kommen alle federnden Verbindungselemente zum Einsatz, die den Anforderungen der DIN 267 Teil 26 entsprechen.

Vorteile der Berücksichtigung federnder Verbindungselemente

Konstruktive und funktionale Vorteile:

- Erhalt der Klemm- und Vorspannkraft auch bei Setz- und Relaxationsvorgängen.
- Gezielte Erhöhung der elastischen Nachgiebigkeit für gleichmäßigere Kraftverteilung.
- Potential zur Reduzierung der Schraubenanzahl oder des Nenndurchmesser der Schrauben bei gleicher Funktionssicherheit.
- Reduzierte Bauteilquerschnitte und kompaktere Bauweisen.
- Verbesserte Gleitfestigkeit durch konstantere Klemmkraft auch unter dynamischer Belastung.
- Federnde Wirkung ist normativ zulässig und nachweisfähig.

Wirtschaftliche und ökologische Effekte:

- Leichtbaupotenziale durch kleinere Schrauben und reduzierte Flanschgeometrien.
- Ressourceneffizienz durch geringere Materialmengen.
- Energieeinsparung in Fertigung, Transport und Betrieb.
- Senkung des CO_2-Footprints durch material- und prozessoptimierte Verbindungssysteme.

Wirksame Schraubensicherungen

In der Praxis werden Schraubensicherungen traditionell in zwei Wirkprinzipien unterteilt:

Lockerungssicherungen, die den Verlust der Vorspannkraft verhindern sollen, und Losdrehsicherungen, die eine Relativbewegung zwischen Schraube und Mutter aktiv blockieren.

Viele marktübliche Elemente wirken jedoch nur gegen eines dieser beiden Phänomene – sie sichern entweder gegen Lockern oder gegen Losdrehen. Die kombinierte Verwendung von Elementen zur Lockerungs- und Losdrehsicherung beider Sicherungsarten führen häufig zu großen Bauhöhen, ungünstiger Kraftverteilung und im schlimmsten Fall sogar zur Aufhebung einer der Sicherungsfunktionen.

Multifunktionale Sicherungselemente lösen dieses Dilemma:
Sie verbinden federnde Nachgiebigkeit mit einer mechanisch wirksamen Sperrfunktion, wodurch sowohl das Lockern als auch das Losdrehen zuverlässig verhindert wird.
Gleichzeitig erhöhen sie durch ihre Restfederwirkung die Gesamtnachgiebigkeit der Verbindung, stabilisieren die Klemmkraft und verbessern damit die Gleitfestigkeit über die gesamte Lebensdauer.

Fazit

Die Berücksichtigung federnder Verbindungselemente in der Schraubenberechnung ist ein entscheidender Schritt zur leichteren, sichereren und effizienteren Verbindung.

Die Zukunft der Schraubensicherheit liegt in der kontrollierten Elastizität. Federnde Verbindungselemente sichern die Vorspannkraft, erhöhen die Resilienz und öffnen den Weg zu einer neuen Generation nachhaltiger Schraubenverbindungen.

Kontakt und Download

Dieses Whitepaper ist Teil der Forschungsarbeit von teckentrup SLI – Screw Locking Innovations

Themenfelder:

- Restfederkraft nach **DIN 267-26**
- Nachgiebigkeitsberechnung nach **VDI 2230**
- Multifunktionale Sicherungselemente (**NSK®-Scheiben**)
- Mechanisch-elektrische Resilienzbewertung (**MER-Method**)

Mehr Erfahren? Einfach den QR-Code scannen!

teckentrup SLI

info@teckentrup-sli.de
www.teckentrup-sli.de
+49 (0)2391 / 9993930