



Schraubensicherung

Federnde Verbindungselemente einfach berechnen

30.03.2026 · Von Thomas Volborth, Geschäftsführer von Teckentrup SLI GmbH & Co. KG; Jan Hebig, Projekt- und Entwicklungsingenieur bei DriveConcepts GmbH · 6 min Lesedauer · 

Die elastische Nachgiebigkeit erweist sich als zentrale Kenngröße für die Funktionssicherheit moderner Schraubenverbindungen. Bisher ließ sie sich schwer berechnen. Mit Mdesign 2026 wird ihre Wirkung erstmals vollständig und normkonform nach VDI 2230 rechnerisch integrierbar.



Die Nachgiebigkeit von federnden Elementen in der Praxis rechnerisch meist unberücksichtigt. Mit Mdesign 2026 wird dies nun normkonform berechenbar.

(Bild: Teckentrup SLI)

Die Vorspannkraft gilt als Maß aller Dinge bei Schraubenverbindungen – doch ihre Stabilität wird maßgeblich durch die elastische Gesamtnachgiebigkeit bestimmt. Obwohl die VDI 2230 diesen Zusammenhang klar adressiert, bleibt die Nachgiebigkeit (federnder Elemente) in der Praxis rechnerisch meist unberücksichtigt. Das Resultat sind überdimensionierte Verbindungen und verschenkte Leichtbaupotenziale. Mit Mdesign 2026 wird die elastische Nachgiebigkeit erstmals vollständig normkonform berechenbar – und damit zur gezielten nutzbaren Auslegungsgröße.

So haben die Nachgiebigkeit (Elastizität) der Schraube und der verspannten Bauteile in einer Schraubenverbindung maßgeblichen Einfluss auf die Funktionalität der Verbindung. Die beiden Haupteinflüsse lassen sich gut am Federmodell und an dem davon abgeleiteten Verspannungsdreieck einer vorgespannten Schraubenverbindung erläutern. Unabhängig von der Anwendung ist die grundsätzliche Aufgabe einer Befestigungsschraube, unter allen Betriebszuständen ausreichend Klemmkraft für die Funktionalität der Verbindung, bereitzustellen. Wie viel Montagevorspannkraft (F_M) eine Schraube zur Verfügung stellen kann, ist zunächst nur vom Schraubendurchmesser und der Festigkeitsklasse abhängig. Erst mit dem Vorspannkraftverlust im Berechnungsschritt R4 der VDI 2230 Blatt 1, wird der Einfluss der Gesamtnachgiebigkeit deutlich. Die Nachgiebigkeit der Schraube und Platte stellt

den Anstieg der beiden zugehörigen Geraden im Verspannungsdreieck ein. Eine hohe Nachgiebigkeit führt zu einem geringen Anstieg.

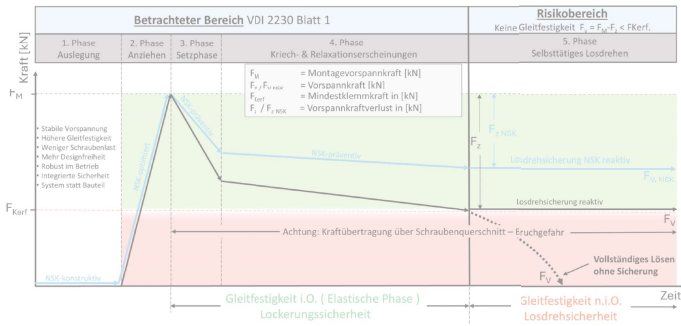


Abb. 1: Das 5-Phasenmodell stellt den Vorspannkraftverlauf über den Lebenszyklus einer Schraubenverbindung dar. Der schwarze Graph zeigt den Vorspannkraftverlauf ohne Berücksichtigung eines wirksam federnden Sicherungselementes und der blaue Graph den Verlauf unter Berücksichtigung von federnden Verbindungselementen bei kurzen Klemmlängen. (Bild: Teckentrup SLI)

NORMATIVER HINTERGRUND

Die VDI 2230 Blatt 1 ist weltweit die zentrale Bemessungsrichtlinie für hochbelastete Schraubenverbindungen und beschreibt Nachgiebigkeit als Schlüsselgröße. Die Nachgiebigkeit der Schraube und Platten wird exakt ermittelt. Federnde Elemente werden empfohlen, jedoch oft nicht explizit modelliert. Federkennlinien sind spezifisch und in der Regel nichtlinear. Die DIN EN 17976 fordert für Schienenfahrzeuge wirksame Restfederkraft zur Stabilisierung der Vorspannkraft. Die DIN 267-26 liefert die Prüfvorschrift zur Ermittlung dieser Restfederkräfte.

Einfluss der Gesamtnachgiebigkeit auf die Funktion

Am Beispiel des Vorspannkraftverlustes durch Setzen ist der Einfluss der Gesamtsteifigkeit zu erkennen. Bei gleichem Setzbetrag f_z ist die Auswirkung auf den Setzkraftverlust (F_z) in der steifen Verbindung deutlich größer als in der Verbindung mit größerer Nachgiebigkeit (Abb. 2). So reduziert sich die real zur Verfügung stehende Vorspannkraft F_V erheblich. Analog verhalten sich Verluste durch thermische Dehnung. Federwegverluste durch

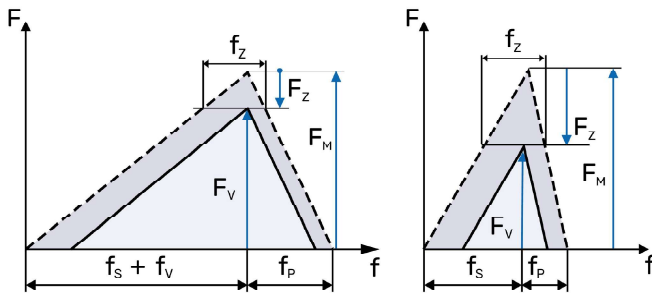


Abb. 2: Verspannungsdreieck – links: hohe Nachgiebigkeit Schraube + elastisches Element, rechts: steife Verbindung (Bild: Mdesign)

Setzerscheinungen lassen sich in der Regel nicht vermeiden. Doch den daraus resultierenden Vorspannkraftverlust kann beeinflusst werden, indem eine elastische Verbindung gestaltet wird. Gefährdet sind insbesondere Verbindungen mit sehr kurzen Klemmlängen. Hier helfen beispielsweise Dehnhülse, die die Klemmlänge und Nachgiebigkeit deutlich erhöhen. Alternativ können federnde

Elemente mit verspannt werden, die bei kleinerem Bauraum noch mehr Nachgiebigkeit in die Verbindung bringen können. Um die Nachgiebigkeit eines federnden Elementes in der Berechnung nach VDI 2230 Blatt 1 zu integrieren, kann die Formel (R 4/1) folgendermaßen erweitert werden. Im Fall von mehreren federnden Elementen muss zunächst die Gesamtnachgiebigkeit aller federnden Elemente bestimmt werden.

$$F_Z = \frac{f_z}{(\delta_S + \delta_P)} \rightarrow F_Z = \frac{f_z}{(\delta_S + \delta_P + \delta_{VE})}$$

(Bild: Teckentrup SLI)

Die Zusatznachgiebigkeit des federnden Elementes kann, insbesondere bei steifen Verbindungen, die Summe der Schrauben – und Plattennachgiebigkeit deutlich übersteigen.

So beeinflusst das Nachgiebigkeitsverhältnis die Kraftaufteilung

Das Verhältnis aus Schrauben- und Plattennachgiebigkeit bestimmt maßgeblich die Aufteilung der axialen Kraft auf Schraubenzusatzkraft und Plattentlastungskraft (Abb. 3).

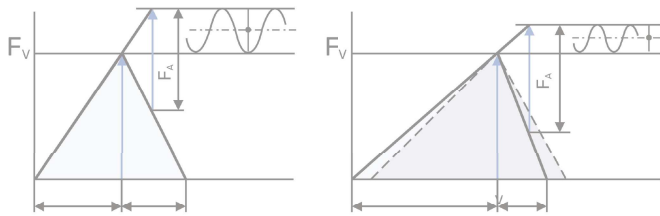


Abb. 3: Dynamische Last bei großem Kraftverhältnis (links) und niedrigen Kraftverhältnis (rechts)
(Bild: Mdesign)

Dabei wird die Last proportional zum Anstieg (Nachgiebigkeit) der Schrauben und Platten-Gerade aufgeteilt. Bei gleicher Nachgiebigkeit von Schraube und Platte wirkt die Hälfte der axialen Betriebslast als dynamische Schraubenzusatzkraft. Das Risiko eines Ermüdungsbruchs ist hoch. In der Regel ist die Schraubennachgiebigkeit erheblich größer als die Plattennachgiebigkeit, die Ermüdungsbelastung sinkt erheblich.

EINFACH GUTE VERBINDUNGEN

Die regionale Fachmesse für Schraubverbindungen



(Bild: Bild: VCG)

Die SchraubTec ist Ihr schnellster Weg zu sicheren Schraubverbindungen. Ob in der Ausstellung oder in kostenlosen Fachvorträgen: In persönlicher Atmosphäre können Sie sich über Schraubverbindungen, Schraubtechnik, Schraubwerkzeuge sowie Beschaffung, Einkauf und Management von C-Teilen informieren. Der Eintritt ist kostenfrei.

Nun stellt sich die Frage zu welcher Nachgiebigkeit die Nachgiebigkeit des federnden Elementes gezählt werden muss. Diese Frage beantwortet der Krafteinleitungsfaktor, welcher die Plattennachgiebigkeit auf den inneren Anteil der Platten zwischen den Kraftangriffspunkten reduziert. Der außerhalb liegenden Anteil wird rechnerisch der

Schraubennachgiebigkeit zugeordnet. Federnde Element werden unter dem Schraubenkopf und der Mutter platziert, sodass in Analogie die gesamte Zusatznachgiebigkeit der Schraubennachgiebigkeit zugeordnet werden muss. Die Formel für das Kraftverhältnis wird um die Zusatznachgiebigkeit des federnden Elementes (δ_{VE}) erweitert:

$$\phi_n = \frac{n \cdot (\delta_p + \delta_{PZu})}{(\delta_S + \delta_p)} \rightarrow \phi_n = \frac{n \cdot (\delta_p + \delta_{PZu})}{(\delta_S + \delta_p + \delta_{VE})}$$

(Bild: Teckentrup SLI)

Der Krafteinleitungsfaktor bleibt unverändert, und wird für die Plattenkonstellation mit dem vorliegendem Kraftangriff gewählt. Federnde Element mit hoher Nachgiebigkeit können somit einen erheblichen Einfluss auf das Kraftverhältnis haben. Gerade bei Verbindungen mit, aus Ermüdungssicht, ungünstigem Kraftverhältnis, kann die Schraubenzusatzkraft um ein Vielfaches gesenkt werden. Die Sicherheit gegen Dauerbruch erhöht sich um das Vielfache.

Nachgiebigkeit federnder Elemente berechnen

Federnde Elemente wie Spannscheiben und NSK-Scheiben haben eine nichtlineare Federkennlinie. Um das federnde Element in der Berechnung zu berücksichtigen, muss zunächst die Kennlinie messtechnisch erfasst werden. Aus der Federkennlinie wird anschließend die Nachgiebigkeit als Funktion von der Vorspannkraft abgeleitet. Eine einfache Integration als fixe Nachgiebigkeit in den Berechnungsalgorithmus der VDI 2230 ist somit nicht möglich. Um nämlich die Nachgiebigkeit des federnden Elementes im Berechnungsschritt R3 der VDI 2230 zu berechnen, wird die reale Klemmkraft in der Verbindung benötigt. Diese wird aber erst mit dem Vorspannkraftverlust durch Setzen und thermischen Verlust ermittelt, wofür wiederum die Gesamtnachgiebigkeit benötigt wird. Eine

iterative Anwendung der Berechnungsschritte kann hier Abhilfe schaffen. Der reale Einfederungsprozess wird mittels Iteration simuliert.

Neuer Ansatz: Federnde Verbindungselemente rechnerisch erfassen

Mit Mdesign 2026 steht erstmalig ein kommerzielles Tool zur Verfügung, welches die Vorteile federnder Elemente rechnerisch belegen kann. Hierfür wurden herstellerübergreifend Sicherungselemente in die Mdesign Datenbank aufgenommen. So stehen dem Anwender sofort die Geometrie-Parameter zur Verfügung. Auch die zur Berechnung notwendige Federkennlinie sowie die Reibungskoeffizienten an der Kopfauflage, wurden messtechnisch vom Hersteller erfasst, und für die Mdesign – Datenbank bereitgestellt. Die im Versuch ermittelte Federkraft – Federweg Kennlinie wird im ersten Schritt in eine Nachgiebigkeits-Vorspannkraft Kennlinie umgerechnet. So kann zur anliegenden Vorspannkraft die passende Nachgiebigkeit ermittelt werden. Weitere Schritte zur Implementierung im VDI 2230 Berechnungsalgorithmus:

- Iterative Anwendung der Berechnungsschritte der VDI 2230 zur Berücksichtigung der nichtlinearen Nachgiebigkeit
- Simulation des Einfederungsprozesses zur Ermittlung der Nachgiebigkeit bei minimaler und maximaler Vorspannkraft
- Automatisierte Berechnung der kombinierten Gesamtnachgiebigkeit.

Zudem lässt sich mithilfe des simulierten Einfederungsprozesses das Verhalten bei hohen Setzbeträgen realitätsnah abbilden. Näherungen, wie die Reduktion der zu erwartenden Setzbeträge, beim Einsatz federnder Elemente kann mittels realer [Simulation](#) substituiert werden. Die iterative Anwendung der Berechnungsschritte der VDI 2230 ermöglicht die Erweiterung hinsichtlich nichtlinearen Verhaltens (Plattenwerkstoff, lastabhängige Setzbeträge).

GEEIGNETE FEDERENDE VERBINDUNGSELEMENTE

Klassische federnde Elemente aus Federstahl, etwa Spannscheiben oder Tellerfedern, stellen primär Nachgiebigkeit bereit. Bei Ausführungen aus nicht rostendem Stahl sind Korrosionsverhalten und Restfederwirkung im Einzelfall kritisch zu bewerten. Moderne Multifunktionselemente wie die NSK-Scheibe –

auch in nicht rostendem Stahl – vereinen definierte Restfederwirkung, erhöhte Gleitfestigkeit sowie kombinierte Lockerungs- und Losdrehicherung. Die Auswahl erfolgt nach Werkstoff, Federkennwerten, Einbauraum und Auslegungszielen.

Konstruktionstechnische Vorteile

Die Berücksichtigung wirksam federnder Verbindungselemente, wie Spannscheiben oder NSK-Scheiben, verbessern das Systemverhalten von Schraubenverbindungen grundlegend. Durch die erhöhte elastische Nachgiebigkeit wird der Vorspannkraftabbau infolge von Setzen, Kriechen und Relaxation reduziert, wodurch die Klemmkraft über die Betriebsdauer stabiler bleibt. Insbesondere bei kurzen Klemmlängen und weichen Gegenlagen ermöglichen federnde Elemente erstmals eine belastbare Auslegung. Sie führen zu einer gleichmäßigeren Kraftverteilung, einer geringeren Zusatzbelastung der Schraube und einer verbesserten Gleit- und Ermüdungssicherheit. Multifunktionale Elemente kombinieren diese Effekte zusätzlich mit einer wirksamen Lockerungs- und Losdrehicherung. Konstruktiv ergeben sich dadurch neue Freiheitsgrade, etwa durch kleinere Schraubendurchmesser, reduzierte Bauteilquerschnitte und kompaktere Bauweisen bei gleicher Sicherheit. Diese Effekte münden in Leichtbaupotenzialen, geringerem Material- und Energieeinsatz sowie reduzierten Kosten und CO₂-Emissionen. Federnde Elemente werden damit zu einem zentralen Hebel für funktionssichere, wirtschaftliche und nachhaltige Schraubenkonstruktionen.