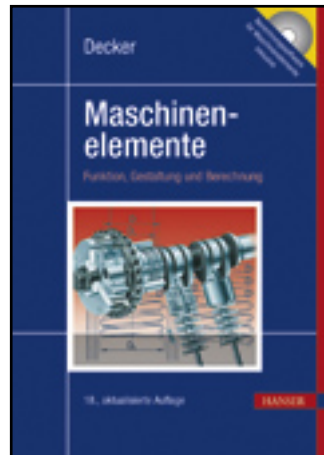




Leseprobe

Karl-Heinz Decker, Karlheinz Kabus

Decker Maschinenelemente

Funktion, Gestaltung und Berechnung

Überarbeitet von Frank Rieg, Gerhard Engelken, Frank Weidemann,
Reinhard Hackenschmidt

ISBN: 978-3-446-42608-5

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser.de/978-3-446-42608-5>

sowie im Buchhandel.

14 Federn

Federn dienen als elastische Verbindungselemente beispielsweise zur Rückführung von Ventiltellern oder Steuergestängen, zum Antrieb von Wickeltrommeln, als Stoßdämpfer, zur Kraftbegrenzung, zur Kraftmessung u. dgl. Ihrer Form nach kennt man **Schrauben-, Teller-, Blatt-, Stabfedern** usw., ihrer Verformung nach **Druck-, Zug-, Biege- und Drehfedern**.

14.1 Kennlinien, Federarbeit

Die Eigenschaften der Federn werden nach ihrer **Kennlinie** beurteilt. Die **Kennlinien** in Bild 14.1 sind progressiv, linear und degressiv. Viele technische Federn haben lineare Kennlinien.

Man definiert die **Federsteifigkeit** als Verhältnis von Federkraft F zu Federweg s bzw. als Verhältnis von Federdrehmoment M_t zum Drehwinkel φ bei Drehfedern.

Lineare Kennlinie:

Federsteifigkeit bei
Zug-, Druck- und Biegefedern
$$c = \frac{F}{s} \quad (14.1)$$

Federsteifigkeit bei Drehfedern
$$c_t = \frac{M_t}{\varphi} \quad (14.2)$$

c in N/mm,
 c_t in Nmm/rad,
 s in mm,
 M_t in Nmm,
 φ in rad

Die Benennung der Federrate ist uneinheitlich. In manchen Federnormen heißt sie R , in anderen, z. B. DIN 2095, jedoch c . Da sind im allgemeinen technisch-physikalischen Gebrauch der Buchstabe c durchgesetzt hat, wird hier c bzw. c_t verwendet (wie auch in DIN 740). Es sei aber ausdrücklich darauf hingewiesen, dass in manchen DIN-Normen auch R bzw. R_t benutzt wird.

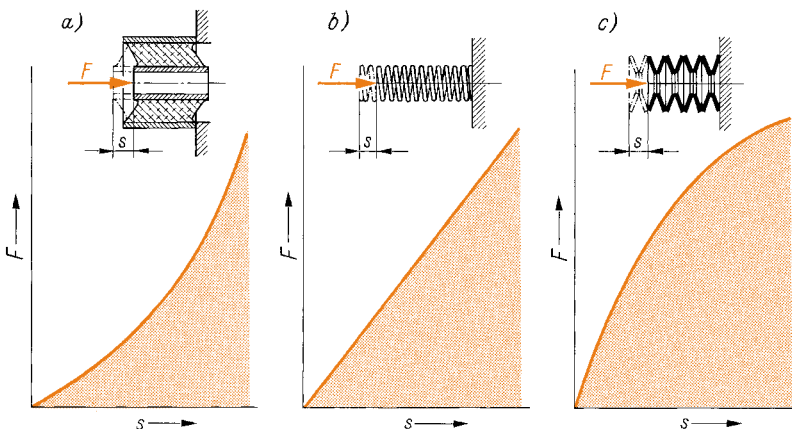


Bild 14.1 Federkennlinien

a) progressive einer Gummifeder, b) gerade einer zylindrischen Schraubenfeder, c) degressive einer Tellerfedersäule

Bei nichtlinearen Federkennlinien gilt:

$$c = \frac{dF}{ds}, \quad c_t = \frac{dM_t}{d\varphi}$$

Ggf. wird die Federkennlinie abschnittsweise berechnet. Der Kehrwert der Federsteifigkeit heißt **Federnachgiebigkeit** δ . Es gilt:

$$\delta = \frac{1}{c} \quad \text{bzw.} \quad \delta_t = \frac{1}{c_t} \quad (14.1a) \quad (14.2a)$$

Eine Feder muss so dimensioniert werden, dass die gewünschte Federsteifigkeit erreicht und die zulässige Beanspruchung nicht überschritten wird. Hierzu sind oftmals mehrere Berechnungen und wiederholte Abmessungsannahmen notwendig, um beide Forderungen zu erfüllen. Ohne diese Angleichung ist eine optimale Gestaltung nicht möglich.

Beim Spannen einer Feder wird Arbeit verrichtet, die die Feder, abgesehen von inneren oder äußeren Reibungsverlusten, beim Entspannen wieder abgibt. Da die Arbeit das Produkt von Kraft und Weg ist, kennzeichnet die in Bild 14.1 farbig angelegte Fläche die **Federarbeit**. Es gilt:

$$W = \int_0^{s_{\max}} F \cdot ds \quad \text{bzw.} \quad W_t = \int_0^{\varphi_{\max}} M_t \cdot d\varphi$$

Bei gerader Kennlinie ist sie das Produkt aus der durchschnittlichen Federkraft $F/2$ und dem zurückgelegten Weg s bzw. aus dem durchschnittlichen Federdrehmoment $M_t/2$ und dem zurückgelegten Winkel φ :

$$\text{Federarbeit von Zug-, Druck- und Biegefedern} \quad W = \frac{F}{2} s \quad (14.3)$$

$$\text{Federarbeit von Drehfedern} \quad W_t = \frac{M_t}{2} \varphi \quad (14.4)$$

W, W_t	in Nmm	Federarbeit,	M_t	in Nmm	Federdrehmoment,
F	in N	Federkraft,	φ	in rad	Federdrehwinkel.
s	in mm	Federweg,			

14.2 Schwingverhalten

Eine mit einer Feder beweglich verbundene Masse gerät bei einem Kraftanstoß in gedämpfte Eigenschwingungen (Bild 14.2). Mitunter wird von derartigen Schwingssystemen eine be-

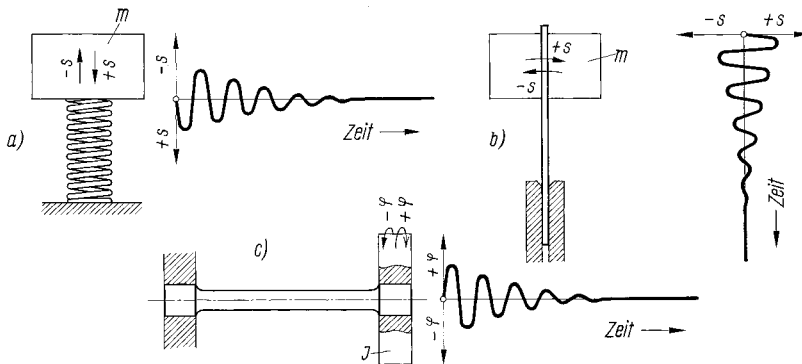


Bild 14.2 Feder-Schwingungssysteme, gedämpfte Schwingung

a) mit einer Druckfeder, b) mit einer Biegefeder, c) mit einer Drehfeder

stimmte Eigenfrequenz gefordert, wie z. B. von Schwingsieben, Schüttelrutschen, Schwingtischen, Rüttlern, Waggon- und Kraftwagenfedern.

$$\text{Eigenfrequenz eines Schwingsystems mit Zug-, Druck- oder Biegefeder} \quad f_e = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{m}} \quad (14.5)$$

f_e in $s^{-1} = \text{Hz}$ Eigenfrequenz des Federschwingsystems (Hz = Hertz),
 c in N/m Federsteifigkeit,
 m in kg abgefederte Masse.

Bei Drehfedern (Bild 14.2c) tritt an die Stelle der Masse m die Drehmasse J als Summe der Produkte aller Massenteilchen und dem Quadrat ihres Radius zur Drehachse. Man kann sich nämlich die Drehmasse J als eine Masse am Radius 1 und den Drehwinkel φ als Bogen mit dem Radius 1 vorstellen, sodass sich eine prinzipiell zur Gl. (14.5) identische Gleichung ergibt:

$$\text{Eigenfrequenz eines Schwingsystems mit Drehfeder} \quad f_e = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c_t}{J}} \quad (14.6)$$

c_t in Nm/rad Federrate = Federkonstante,
 J in $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ Drehmasse oder Trägheitsmoment der abgefederten Masse zur Drehachse.

In den Gln. (14.5) und (14.6) ist die Eigenmasse der Feder, die ja mitschwingt, nicht berücksichtigt. Auch ohne abgefederte Masse besitzen die elastischen Federn eine Eigenfrequenz.

14.3 Zusammenwirken mehrerer Federn

Aus konstruktiven Gründen müssen mitunter mehrere Federn zur Aufnahme von Kräften und Ausführung von Bewegungen dienen. Man unterscheidet:

1. Parallelschaltung von Federn (Bild 14.3a)

Die Federn werden so eingebaut, dass sich die äußere Belastung F anteilmäßig auf die einzelnen Federn aufteilt, aber der Weg der einzelnen Federn gleich groß ist. Somit wird $F = c_1 \cdot s + c_2 \cdot s + c_3 \cdot s = (c_1 + c_2 + c_3) s$. Daraus folgt die

$$\text{Gesamtfedersteifigkeit} \quad c_{\text{ges}} = c_1 + c_2 + c_3 + \dots \quad (14.7)$$

Es addieren sich also die Federsteifigkeiten.

2. Hintereinanderschaltung von Federn (Bild 14.3b)

Die Federn werden so miteinander gekoppelt, dass die äußere Belastung F an jeder einzelnen Feder angreift und die einzelnen Federwege s_i und Federsteifigkeiten c_i verschieden groß sind. Somit ist $s_{\text{ges}} = s_1 + s_2 + s_3$ oder $F \cdot \delta_{\text{ges}} = F \cdot \delta_1 + F \cdot \delta_2 + F \cdot \delta_3 = F(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3)$. Daraus folgt die

$$\text{Gesamtfedernachgiebigkeit} \quad \delta_{\text{ges}} = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \dots \quad (14.8)$$

Es addieren sich also die Federnachgiebigkeiten.

3. Mischschaltung von Federn (Bild 14.3c)

Es werden mehrere Federn parallel und hintereinander geschaltet. Aus dem Bild ist zu sehen, dass für den dargestellten Fall gilt:

a) Federsteifigkeit c_{12} der Federn 1 und 2 = Parallelschaltung

$$c_{12} = c_1 + c_2, \quad \delta_{12} = \frac{1}{c_{12}} = \frac{1}{c_1 + c_2}$$

b) Federsteifigkeit c_{34} der Federn 3 und 4 = Parallelschaltung

$$c_{34} = c_3 + c_4, \quad \delta_{34} = \frac{1}{c_{34}} = \frac{1}{c_3 + c_4}$$

c) die „Federn“ 12 und 34 sind hintereinandergeschaltet:

$$\delta_{\text{ges}} = \delta_{12} + \delta_{34}, \quad c_{\text{ges}} = \frac{1}{\delta_{\text{ges}}}$$

$$c_{\text{ges}} = \frac{1}{\frac{1}{c_1 + c_2} + \frac{1}{c_3 + c_4}} \quad (14.9)$$

Entsprechend diesem Vorgehen werden Mischschaltungen in Parallel- und Hintereinanderschaltungen gedanklich zerlegt und Schritt für Schritt berechnet.

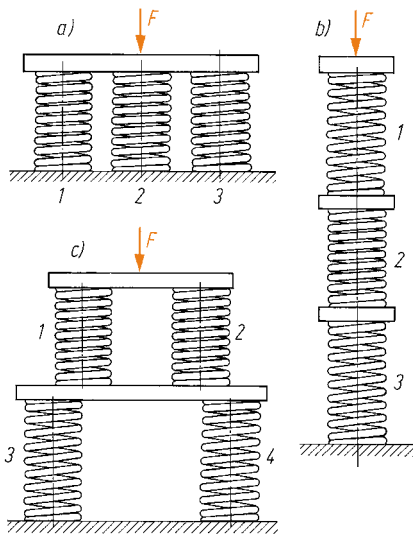


Bild 14.3 Zusammenwirken mehrerer Federn

- a) Parallelschaltung
- b) Hintereinanderschaltung
- c) Mischschaltung

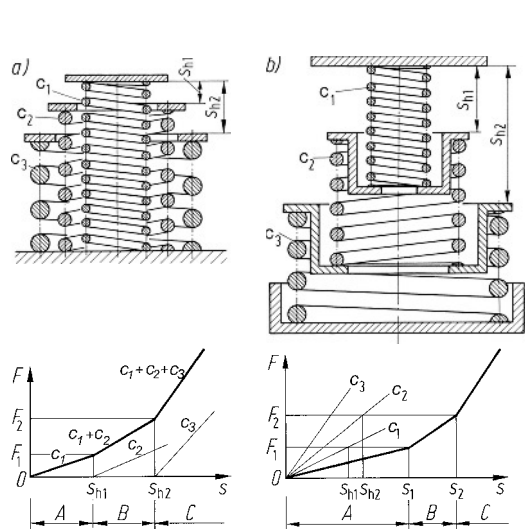


Bild 14.4 Zusammenwirken mehrerer Federn mit

- a) Parallelschaltung,
- b) Hintereinanderschaltung

4. Schaltung von Federn mit Anschlagbegrenzung (Bild 14.4)

Bei dem in Bild 14.4a gezeigten System mit drei parallelgeschalteten Federn ist im Bereich A die Gesamtfedersteifigkeit $c_{\text{ges}} = c_1$, im Bereich B ist $c_{\text{ges}} = c_1 + c_2$, und im Bereich C ist $c_{\text{ges}} = c_1 + c_2 + c_3$. Damit ergibt sich eine geknickte Kennlinie.

Bei dem in Bild 14.4b gezeigten System mit hintereinandergeschalteten Federn ist im Bereich A bis zum Anschlag der Feder 1: $1/c_{\text{ges}} = 1/c_1 + 1/c_2 + 1/c_3$, im Bereich B bis zum Anschlag der Feder 2 ist $1/c_{\text{ges}} = 1/c_2 + 1/c_3$, und im Bereich C ist bis zum Anschlag der Feder 3: $1/c_{\text{ges}} = 1/c_3$, d. h. $c_{\text{ges}} = c_3$. Damit ergibt sich ebenfalls eine geknickte Kennlinie.

14.4 Werkstoffe, Halbzeuge

Übliche Federwerkstoffe sind: härtbare Kohlenstoffstähle, Chrom-, Silicium-, Silicium-Mangan-, Chrom-Vanadium- und nichtrostende Stähle. Hinzu kommen die Nichteisenmetalle Messing, verschiedene Bronzen, Neusilber u. a.

Die hohe Festigkeit erhalten die Federstähle durch Härten und ggf. anschließendes Anlassen oder anschließende Sonderbehandlungen. Dünne Drähte zeigen eine hohe Streckgrenze, wenn sie niedrig angelassen werden. Hohe Anlasstemperaturen und nochmaliges Abschrecken steigern die Dauerfestigkeit. Eine Dauerfestigkeitserhöhung tritt auch durch Überschleifen nach den Härten ein, das die entkohlte, kerbwirkungsbildende Oberflächenschicht entfernt. Kugelstrahlen verdichtet die Oberflächenschicht und erhöht ebenfalls die Dauerfestigkeit. Ein Polieren mildert die Kerbwirkungen, die durch die Oberflächenrauigkeit entstehen. Es ist ratsam, höchstbeanspruchte Federn einem Dauerversuch zu unterziehen, falls nicht ausreichende Erfahrungswerte zur Verfügung stehen. Die Dauerfestigkeit der Federn nimmt wie bei jedem Maschinenteil mit zunehmender Dicke ab.

In den Tabn. 14.1 bis 14.13 sind genormte Federwerkstoffe mit Festigkeitswerten, Anwendungshinweisen und Halbzeugabmessungen aufgeführt. Die Eigenschaften von Federdraht und Federband von Kupferlegierungen CuZn, CuSn, CuNi, CuMn, CuCr und CuBe vgl. die entsprechenden DIN-Normen.

Die Federsteifigkeit von Metallfedern hängt bei Zug- und Biegebeanspruchung vom **Elastizitätsmodul E** , bei Torsionsbeanspruchung vom **Schubmodul G** ab. Werte für E und G siehe Tab. 14.8 und 14.9.

14.5 Zylindrische Schraubenfedern aus runden Drähten oder Stäben

Aus Runddraht gewickelte zylindrische Druckfedern kommen am häufigsten vor, Bild 14.5. **Das sind Federn aus runden Drähten, die nach der Kaltformgebung nur einem Anlassen zum Abbau von Eigenspannungen unterworfen werden.** Sie können bis zu einem Drahtdurchmesser von etwa $d = 17$ mm hergestellt werden, Windungsdurchmesser $D \leq 200$ mm, Federlänge $L_0 \leq 630$ mm, Anzahl der federnden (wirksamen) Windungen $n \geq 2$, Wickelverhältnis $w = D/d = 4 \dots 20$.

Die zur Überleitung der Federkraft auf die Anschlusskörper dienenden Federenden sind so auszubilden, dass bei jeder Federstellung ein möglichst axiales Einfedern bewirkt wird. Dies wird im Allgemeinen durch Verminderung der Steigung an je einer auslaufenden Windung erreicht. Um rechtwinklig zur Federachse ausreichende Auflageflächen zu erhalten, werden die Drahtenden entspr. Bild 14.5a plangeschliffen. Bei Drahtdurchmessern unter 1 mm oder bei einem Wickelverhältnis $w = D/d > 15$ werden die Enden meistens nicht geschliffen (Bild 14.5b).

Da die angelegten Enden nicht federn, ist zwischen der Anzahl n der federnden Windungen und n_t der Gesamtwindungen zu unterscheiden. Bei den Ausführungen nach Bild 14.5 ist

$$n = n_t - 2 \quad \text{kaltverformte Federn.}$$

Werkstoffe und Drähte siehe die Tabn. 14.1 bis 14.13.

Für die kaltgeformten Federn sind **drei Gütegrade** vorgesehen, wobei der Gütegrad 1 die gerinsten Abweichungen zulässt. Ohne Angaben eines Gütegrades gilt der Gütegrad 2. Der Gütegrad 1 ist nur bei zwingender Notwendigkeit vorzuschreiben, hierbei brauchen nicht alle Größen dem Gütegrad 1 anzugehören.

In der Tab. 14.12 sind die **genormten Baugrößen** von Druckfedern mit $d = 0,5 \dots 10$ mm aufgeführt, auf die möglichst zurückzugreifen ist.

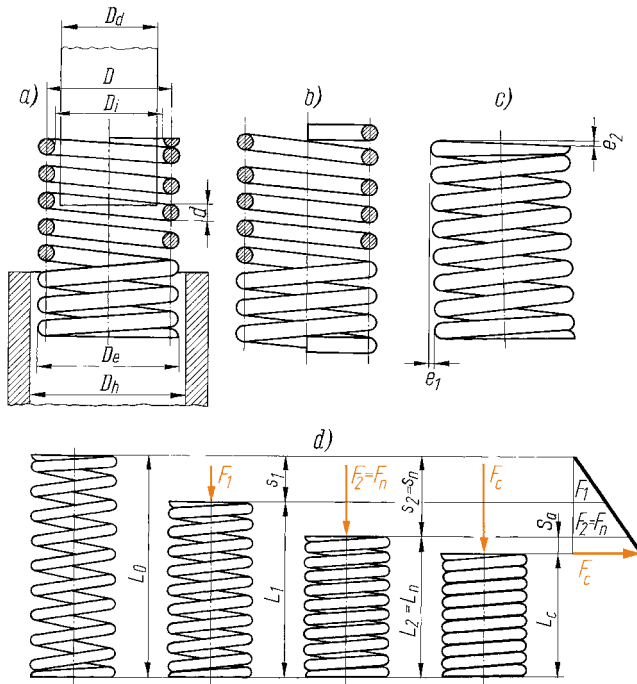


Bild 14.5 Kaltgeformte Druckfedern nach DIN EN 15800

- a) Endwindungen angelegt und geschliffen,
- b) Endwindungen angelegt,
- c) Formabweichungen,
- d) Kräfte und Federlängen

In Bild 14.6 sind **warmgeformte Druckfedern aus Rundstäben** gezeigt. Sie werden nach der Formgebung vergütet. Die Federn werden entweder aus warmgewalzten Stäben oder nach dem Warmwalzen bearbeiteten (geschälten, gedrehten oder geschliffenen) Stäben hergestellt.

Bis zu $d = 14$ mm werden die Federn meistens nach Bild 14.6a, ab $d > 14$ mm nach Bild 14.6b ausgeführt. Bei Ausführungen mit unbearbeitet bleibenden Federenden nach Bild 14.6c müssen die Federenden in Steigungstellern entspr. Bild 14.6d aufgenommen werden (üblich in der

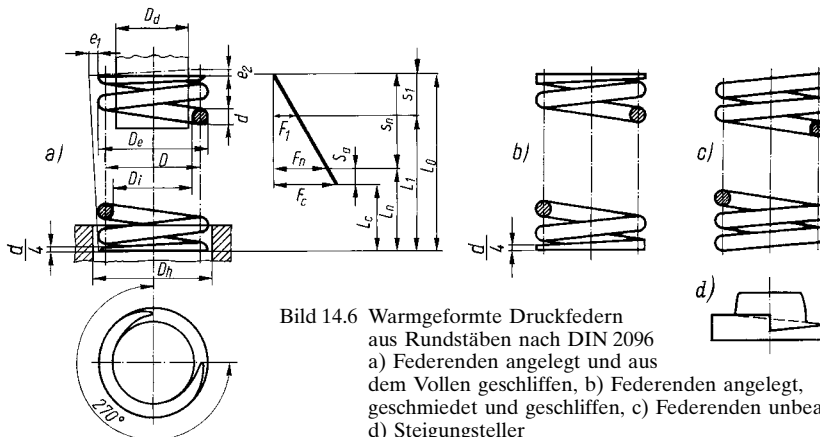


Bild 14.6 Warmgeformte Druckfedern aus Rundstäben nach DIN 2096
a) Federenden angelegt und aus dem Vollen geschliffen, b) Federenden angelegt, geschmiedet und geschliffen, c) Federenden unbearbeitet, d) Steigungsteller