



Leseprobe

Karlheinz Kabus

Decker Maschinenelemente - Formeln

ISBN (Buch): 978-3-446-44229-0

ISBN (E-Book): 978-3-446-43997-9

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-44229-0>

sowie im Buchhandel.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Konstruktionstechnik</b> . . . . .	9
Festigkeitsberechnung . . . . .	9
<b>2 Maße, Toleranzen und Passungen</b> . . . . .	19
Maße, Abmaße und Toleranzen . . . . .	19
ISO-Toleranzsystem . . . . .	19
Passungen . . . . .	19
<b>3 Gestaltabweichungen der Oberflächen</b> . . . . .	21
Rauheit der Oberflächen . . . . .	21
<b>4 Schmelzschweißverbindungen</b> . . . . .	22
Berechnung der Spannungen in Schweißnähten . . . . .	22
Schweißverbindungen im Maschinen- und Gerätebau . . . . .	25
Schweißverbindungen im Stahlbau und Kranbau . . . . .	26
Schweißverbindungen im Stahlbau mit Hohlprofilen . . . . .	29
<b>5 Pressschweißverbindungen</b> . . . . .	31
Punktschweißverbindungen . . . . .	31
Buckelschweißverbindungen . . . . .	32
<b>6 Lötverbindungen</b> . . . . .	33
Berechnung von Lötverbindungen . . . . .	33
<b>7 Klebverbindungen</b> . . . . .	34
Berechnung von Klebverbindungen . . . . .	34
<b>8 Nietverbindungen</b> . . . . .	36
Berechnung von Nietverbindungen . . . . .	36
<b>9 Reibschlüssige Welle-Nabe-Verbindungen</b> . . . . .	39
Grundlagen der Berechnung zylindrischer Pressverbände . . . . .	39
Berechnung bei rein elastischer Beanspruchung . . . . .	40
Berechnung bei elastisch-plastischer Beanspruchung . . . . .	45
Einpresskraft und Füge temperaturen . . . . .	46
Spannelementverbindungen . . . . .	47
Klemmverbindungen . . . . .	48
<b>10 Befestigungsschrauben</b> . . . . .	50
Gewinde . . . . .	50
Berechnung: Vordimensionierung und Überschlag . . . . .	50
Schraubenanziehmoment, Anziehungsfaktor . . . . .	50
Berechnung: Nachgiebigkeit von Schraube und Bauteilen . . . . .	52
Berechnung: Bleibende Verformung durch Setzen . . . . .	53
Vorgespannte Schraubenverbindungen mit Betriebslängskraft . . . . .	54
Haltbarkeit der Schraubenverbindungen . . . . .	55
Standardisierte Vorgehensweise . . . . .	56
Berechnung querbeanspruchter Schraubenverbindungen . . . . .	57
<b>11 Bewegungsschrauben</b> . . . . .	58
Gewinde, Wirkungsgrad . . . . .	58
Berechnung der Haltbarkeit und der Stabilität . . . . .	59
<b>12 Formschlüssige Welle-Nabe-Verbindungen</b> . . . . .	61
Längskeilverbindungen . . . . .	61
Passfederverbindungen . . . . .	61
Keilwellenverbindungen . . . . .	61
Zahnwellenverbindungen . . . . .	62
Polygonwellenverbindungen . . . . .	62
Kegelverbindungen . . . . .	62
Stirnzahnverbindungen . . . . .	63

<b>13 Stift- und Bolzenverbindungen</b>	64
Gelenkstifte oder Bolzen	64
Steckstifte unter Biegekraft	64
Querstifte unter Drehmoment	65
Längsstifte unter Drehmoment	65
<b>14 Federn</b>	66
Federsteifigkeit, Federarbeit, Schwingverhalten	66
Zusammenwirken mehrerer Federn	67
Zylindrische Schraubenfedern aus runden Drähten oder Stäben	68
Tellerfedern als Druckfedern	73
Spannungen in den Punkten OM, I bis IV	74
Gewundene Schenkelfedern als Drehfedern	76
Stabfedern als Drehfedern	79
Spiralfedern als Drehfedern	80
Blattfedern als Biegefedern	81
Ringfedern als Druckfedern	82
Luftfedern	83
Gummifedern	84
<b>15 Achsen und Wellen</b>	86
Biegemomente, Längskräfte und Torsionsmomente	86
Überschlagsrechnung auf Torsion und Biegung	86
Achsen und Wellen gleicher Biegebeanspruchung	87
Berechnung auf Gestaltfestigkeit (Dauerhaltbarkeit)	87
Durchbiegung	90
Verdrehwinkel	95
Kritische Drehzahl	95
Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen nach DIN 743	96
<b>16 Tribologie: Reibung, Schmierung und Verschleiß</b>	101
Schmieröle	101
<b>17 Gleitlager</b>	103
Berechnung der Radiallager	103
Berechnung der Axiallager	111
<b>18 Wälzlager</b>	114
Tragfähigkeit und Lebensdauer	114
Berechnung von Kegelrollen- und Schrägkugellagern	115
Besondere Belastungsfälle	116
Grenzdrehzahl	116
Schmierung der Wälzlager	116
<b>19 Lager- und Wellendichtungen</b>	118
<b>20 Wellenkupplungen und -bremsen</b>	119
Kupplungsmomente bei Ausgleichkupplungen	119
Reibungskupplungen	124
<b>21 Grundlagen für Zahnräder und Getriebe</b>	129
Übersetzung	129
Evolventenverzahnung	129
<b>22 Abmessungen und Geometrie der Stirn- und Kegelräder</b>	131
Null-Außenverzahnung	131
Null-Innenverzahnung	131
Null-Schrägverzahnung	132
Profilverschiebung	133
Geometrische Grenzen	135
Profilüberdeckung	136
Geradverzahnnte Kegelräder	136
Schräg- und bogenverzahnnte Kegelräder	138

<b>23 Gestaltung und Tragfähigkeit der Stirn- und Kegelräder</b>	141
Zahnkräfte an Stirnrädern	141
Zahnkräfte an Kegelrädern	141
Wirkungsgrad und Gesamtübersetzung	143
Gestaltung der Räder aus Stahl und aus Gusseisen	144
Gestaltung der Räder aus Kunststoffen	146
Schmierung, Schmierstoffe	147
Allgemeine Einflussfaktoren für die Tragfähigkeit	148
Zahnfußtragfähigkeit der Stirnräder	150
Grübenchtragfähigkeit der Stirnräder	151
Zahnfußtragfähigkeit der Kegelräder	153
Grübenchtragfähigkeit der Kegelräder	154
Berechnung der Räder aus thermoplastischen Kunststoffen auf Tragfähigkeit und Verformung	155
<b>24 Zahnradpaare mit sich kreuzenden Achsen</b>	158
Eingriffsverhältnisse von Schraub-Stirnradpaaren	158
Wirkungsgrad und Zahnkräfte an Schraub-Stirnradpaaren	158
Tragfähigkeit von Schraub-Stirnradpaaren, Schmierung	159
Geometrie der Schneckenradsätze	159
Wirkungsgrad und Zahnradkräfte an Schneckenradsätzen	161
Gestaltung der Schnecken und Schneckenräder	162
Schmierung von Schneckenradsätzen	163
Tragfähigkeit von Schneckenradsätzen	163
<b>25 Kettentriebe</b>	165
Kettenräder	165
Auswahl von Rollenketten und deren Berechnung	165
Schmierung der Kettentriebe	167
<b>26 Flachriementriebe</b>	168
Theoretische Grundlagen für Riementriebe	168
Riemenscheiben	168
Geometrie der Flachriementriebe	169
Übersetzung, Riemengeschwindigkeit, Biegefrequenz	170
Berechnung der Antriebe mit Leder- und Geweberiemen	171
Berechnung von Antrieben mit Mehrschichtriemen	172
Spannrollentrieb	173
<b>27 Keilriementriebe</b>	174
Berechnung der Antriebe mit Keilriemen und Keilrippenriemen	174
<b>28 Synchron- oder Zahnriementriebe</b>	176
Übersetzung und Geometrie der Synchronriementriebe	176
Berechnung von Antrieben mit Synchron- oder Zahnriemen	178
<b>29 Rohrleitungen</b>	180
Temperaturbedingte Längenänderung	180
Berechnung von Rohrleitungen	180

# Vorwort

Diese Formelsammlung ist eine Ergänzung zu der im gleichen Verlag erschienenen 19. Auflage des tausendfach bewährten Lehrbuches „Decker, Maschinenelemente“. Sie enthält in einer übersichtlichen Anordnung alle wichtigen Gleichungen zur Berechnung von Maschinenelementen. Bei der Vielzahl an Formeln für die Bemessung und den Festigkeitsnachweis von Maschinenelementen ist es zweckmäßig, eine Zusammenfassung in kompakter Form zur Verfügung zu haben, was auch von vielen Benutzern des Lehrbuches gewünscht wurde. Mit der Formelsammlung kann ohne das Lehrbuch gearbeitet werden.

Die Systematik und die Gleichungsnummern stimmen vollständig mit dem Lehrbuch überein, ebenso die Bezeichnungen der zu berechnenden Größen. Ihre Bedeutung ist erläutert, die vorzugsweise anzuwendenden Einheiten sind angegeben. Zum besseren Verständnis der Zusammenhänge wurden Bilder eingefügt. Die Angabe von Normen und andere wichtige Hinweise, die beim Berechnen von Maschinenelementen zu beachten sind, ergänzen das Angebot der Berechnungsunterlagen.

Auf die Tabellen und Diagramme für erforderliche Werte von Festigkeiten, Sicherheiten, zulässigen Spannungen, Berechnungsfaktoren, Reibzahlen, Normteil- und Profilabmessungen, Toleranzen und dergleichen wird hingewiesen. Alle für die Berechnungen benötigten Werte befinden sich ausnahmslos im Tabellenband, der dem oben genannten Lehrbuch beigelegt ist.

Mit dieser Formelsammlung liegt eine Arbeitshilfe vor, die eine rationelle Lösung von Aufgabenstellungen zur Berechnung von Maschinenelementen während des Studiums und in der Praxis ermöglicht. Sie ist deshalb besonders geeignet für Klausuren und Prüfungsarbeiten. Auch für das Durchrechnen von Übungsaufgaben bietet sie Vorteile, da ein aufwendiges Blättern im Lehrbuch entfällt.

Hierzu wird auf die im gleichen Verlag erschienene Aufgabensammlung „Decker/Kabus, Maschinenelemente – Aufgaben“ hingewiesen. Dieses bewährte Buch mit Übungsaufgaben zur Berechnung von Maschinenelementen ist vollständig auf das Lehrbuch abgestimmt. Zur Abrundung kann eine Vielzahl von Informationen und Zusatzmaterialien zum Decker Gesamtwerk unter **[www.hanser-fachbuch.de/decker](http://www.hanser-fachbuch.de/decker)** nachgeschlagen werden.

Verfasser und Bearbeiter hoffen, dass die Formelsammlung allen Benutzern eine wertvolle Hilfe sein wird. Allen Kolleginnen und Kollegen sagen wir hiermit herzlichen Dank für ihre Ratschläge, auch Frau *Ute Eckardt* vom Carl Hanser Verlag für die gute Zusammenarbeit.

*Frank Rieg  
Frank Weidemann  
Gerhard Engelken  
Reinhard Hackenschmidt*

# 14 Federn

## Federsteifigkeit, Federarbeit, Schwingverhalten

### Federn mit

Linearer Kennlinie:

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

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

$c$  in N/mm,  $c_t$  in Nmm/rad,  $s$  in mm,  $M_t$  in Nmm,  $\varphi$  in rad. Die Benennung der Federate 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.

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 (auch Federate genannt) heißt **Federnachgiebigkeit**  $\delta$ . Es gilt:

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

### Federarbeit bei linearer Kennlinie

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

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

$W, W_t$  in Nmm Federarbeit,  $M_t$  in Nmm Federdrehmoment,  
 $F$  in N Federkraft,  $\varphi$  in rad Federdrehwinkel,  
 $s$  in mm Federweg,

### allgemein gilt für die Federarbeit:

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

### Federschwingssysteme

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

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

14

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

$c_t$  in Nm/rad Federrate = Federkonstante,

$J$  in  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$  Drehmasse oder Trägheitsmoment der abgefederten Masse zur Drehachse.

## Zusammenwirken mehrerer Federn

### Parallelschaltung von Federn (Bild 14.1a)

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

Es addieren sich also die Federsteifigkeiten.

### Hintereinanderschaltung von Federn (Bild 14.1b)

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

Es addieren sich also die Federnachgiebigkeiten.

### Mischschaltung von Federn (Bild 14.1c)

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

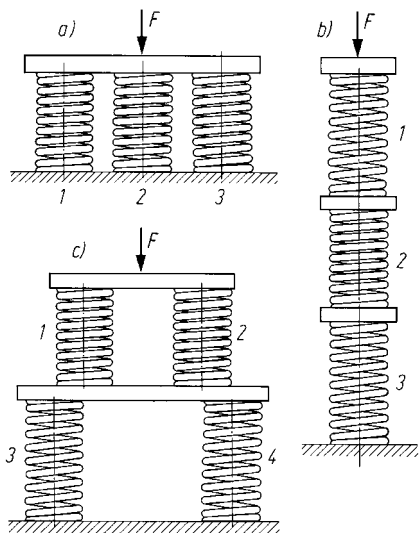


Bild 14.1 Zusammenwirken mehrerer Federn

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

## Zylindrische Schraubenfedern aus runden Drähten oder Stäben

### Druckfedern

Mit  $n$  als Anzahl der federnden Windungen (wirksamen Windungen) beträgt bei **kaltgeformten Druckfedern** aus runden Drähten entspr. Bild 14.2 die

Gesamtwindungszahl  $n_t = n + 2$ , d. h.  $n = n_t - 2$ .

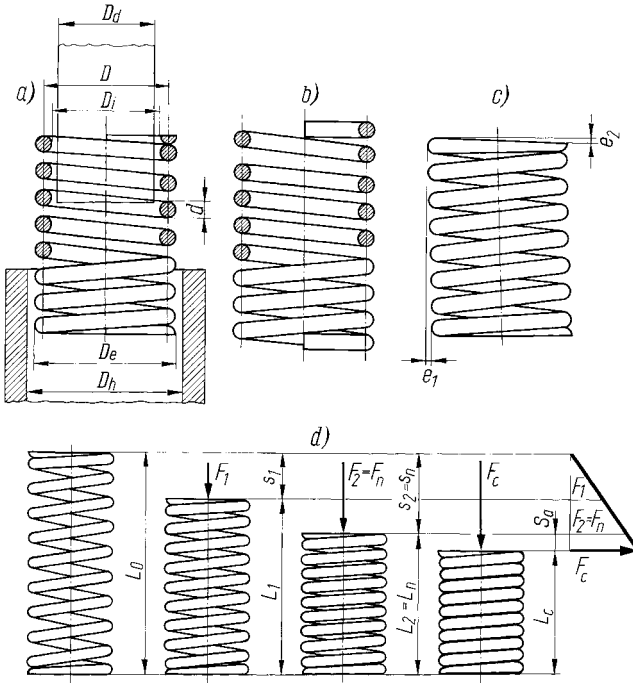


Bild 14.2 Kaltgeformte Druckfedern nach DIN EN 15800

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

und bei **warmgeformten Druckfedern** aus runden Stäben entspr. Bild 14.3:

Gesamtwindungszahl  $n_t = n + 1,5$ , d. h.  $n = n_t - 1,5$ .

Die Gesamtwindungszahl einer Druckfeder soll auf 0,5 enden ( $n_t = 5,5, 6,5, 7,5$  usw.). Bei der kleinsten, zulässigen Federlänge  $L_n = L_c + S_a$  soll die *Summe der lichten Mindestabstände zwischen den einzelnen wirksamen Windungen* betragen für

$$\text{kaltgeformte Federn} \quad S_a = \left( 0,0015 \frac{D^2}{d} + 0,1d \right) n \quad (14.10)$$

$$\text{warmgeformte Federn} \quad S_a = 0,02(D + d) n \quad (14.11)$$

$D$  in mm mittlerer Windungsdurchmesser  
 $d$  in mm Drahtdurchmesser,  
 $n$  Anzahl der wirksamen Windungen.



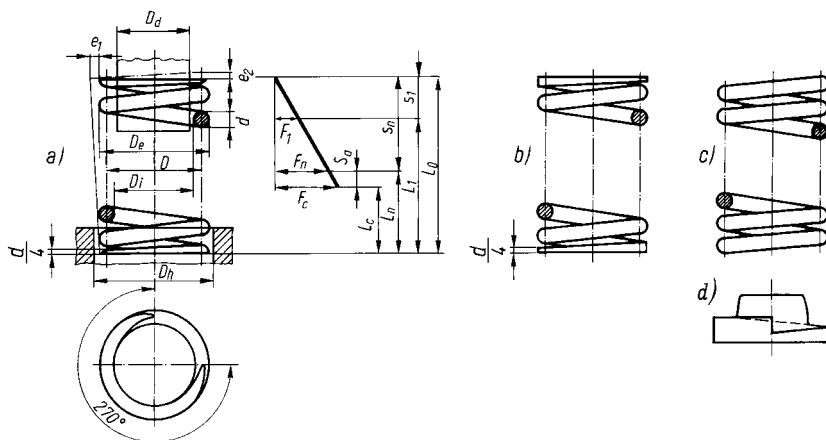


Bild 14.3 Warmgeformte Druckfedern aus Rundstäben nach DIN 2096

- a) Federenden angelegt und aus dem Vollen geschliffen,
- b) Federenden angelegt, geschmiedet und geschliffen,
- c) Federenden unbearbeitet,
- d) Steigungsteller

Bei dynamischer Beanspruchung der Federn ist der  $S_a$ -Wert bei warmgeformten Federn zu verdoppeln, bei kaltgeformten Federn muss er das 1,5fache betragen.

Im zusammengedrückten Zustand, wenn alle Windungen aneinander liegen, beträgt die größtmögliche

14

$$\text{Blocklänge der Druckfeder } L_c = k_n \cdot d_{\max} \tag{14.12}$$

- $k_n$  Windungszahlbeiwert  
bei kaltgeformten Federn mit angelegten, geschliffenen Federenden =  $n_t$ ,  
bei kaltgeformten Federn mit angelegten, unbearbeiteten Federenden =  $n_t + 1,5$ ,  
bei warmgeformten Federn mit angelegten, planbearbeiteten Federenden =  $n_t - 0,3$ ,  
bei warmgeformten Federn mit unbearbeiteten Federenden =  $n_t + 1,1$ .
- $n_t$  Gesamtzahl der Windungen,
- $d_{\max}$  in mm Nennmaß des Draht- bzw. Stabdurchmessers (Tab. 14.4 bis 14.6), vermehrt um das obere Abmaß (Tab. 14.13).

Damit beträgt die

$$\text{kleinste zulässige Länge der mit } F_n \text{ belasteten Druckfeder } L_n = L_c + S_a \tag{14.13}$$

Beim Zusammendrücken einer Schraubendruckfeder wird der Windungsdurchmesser geringfügig größer. Bei der Blocklänge  $L_c$  und freier Lagerung der Federenden beträgt die

$$\text{Vergrößerung des äußeren Windungsdurchmessers } \Delta D_e = 0,1 \frac{m^2 - 0,8m \cdot d - 0,2d^2}{D} \tag{14.14}$$

- $m$  in mm Windungsabstand (Steigung)  
für Federn mit angelegten, planbearbeiteten Enden =  $\frac{L_0 - d}{n}$ ,  
für Federn mit unbearbeiteten Enden =  $\frac{L_0 - 2,5 d}{n}$
- $L_0$  in mm Länge der ungespannten Feder,
- $n$  Anzahl der wirksamen Windungen,
- $d, D$  siehe Legende zur Gl. (14.11).