

1. Hydrodynamische Radialgleitlagerlager

relative Lagerbreite

b Lagerbreite [mm]

d_L Lagerdurchmesser [mm]

$$\frac{b}{d_L}$$

hohe Drehzahl + niedrige Lagerkraft = 0,5 ... 1
niedrige Drehzahl + hohe Lagerkraft = 0,2 ... 0,5

spezifische Lagerbelastung [N/mm²]

F Lagerkraft [N]

A_{proj} projizierte Lauffläche [mm²]

b Lagerbreite [mm]

d_L Lagerdurchmesser [mm]

$p_{L,zul}$ zul. spez. Lagerbelastung aus TB15-7 [N/mm²]

$$p_L = \frac{F}{A_{proj}} \leq p_{L,zul} \quad \text{mit } A_{proj} = b \cdot d_L$$

(zur Beurteilung der mechanischen Belastung)

Einbaulagerspiel (bei 20°C) [mm]

e_i unteres Abmaß Welle [mm]

e_s oberes Abmaß Welle [mm]

E_i unteres Abmaß Bohrung [mm]

E_s oberes Abmaß Bohrung [mm]

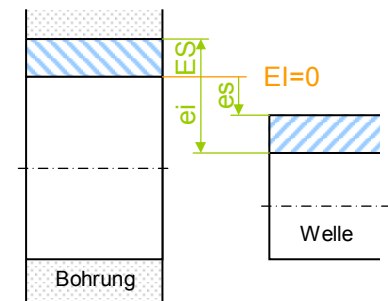
d_L Lagerdurchmesser [mm]

d_w Wellendurchmesser [mm]

$$s_E = \frac{s_{E_{max}} + s_{E_{min}}}{2}$$

$$s_{E_{max}} = (d_L + E_s) - (d_w + e_i)$$

$$s_{E_{min}} = (d_L + E_i) - (d_w + e_s)$$



Passungsauswahl nach DIN 31698
aus TB15-11 mit ψ_E

Betriebslagerspiel (bei >50°C) [mm]

s_E Einbaulagerspiel (bei 20°C) [mm]

Δs Änderung des Lagerspiels [mm]

α_L Längenausdehnungskoeffizienten
des Lagers nach TB15-6 [1/K]

α_w Längenausdehnungskoeffizienten
der Welle nach TB12-6 [1/K]

ϑ_{eff} effektive Temperatur [°C]

ϑ_u Umgebungstemperatur (meist 20°C) [°C]

$$s_B = \frac{(s_{E_{max}} + \Delta s_{max}) + (s_{E_{min}} + \Delta s_{min})}{2}$$

$$\Delta s_{max} = [(d_L + E_s) \cdot \alpha_L - (d_w + e_i) \cdot \alpha_w] \cdot (\vartheta_{eff} - \vartheta_u)$$

$$\Delta s_{min} = [(d_L + E_i) \cdot \alpha_L - (d_w + e_s) \cdot \alpha_w] \cdot (\vartheta_{eff} - \vartheta_u)$$

relatives Einbaulagerspiel

s_E Einbaulagerspiel [mm]

d_L Lagerdurchmesser [mm]

$$\psi_E = \frac{s_E}{d_L}$$

relatives Betriebslagerspiel

ψ_E relatives Einbaulagerspiel

$\Delta \psi$ Änderung des relativen Lagerspiels

α_L Längenausdehnungskoeffizienten
des Lagers nach TB15-6 [1/K]

α_w Längenausdehnungskoeffizienten
der Welle nach TB12-6 [1/K]

ϑ_{eff} effektive Temperatur [°C]

ϑ_u Umgebungstemperatur (meist 20°C) [°C]

u_w Gleitgeschwindigkeit [m/s]

! u_w dimensionslos in Formel einsetzen !

$$\psi_B = \psi_E + \Delta \psi$$

$$\Delta \psi = (\alpha_L - \alpha_w) \cdot (\vartheta_{eff} - \vartheta_u)$$

$$0,5 \cdot 10^{-3} \leq \psi_B \leq 3 \cdot 10^{-3}$$

hohe Drehzahl + niedrige Lagerkraft $\psi_B = 3 \cdot 10^{-3}$

niedrige Drehzahl + hohe Lagerkraft $\psi_B = 0,5 \cdot 10^{-3}$

Näherung:

> bei unbekannter Geschwindigkeit $\psi_B = 1 \cdot 10^{-3}$

> bei bekannter Geschwindigkeit $\psi_B \approx 0,8 \cdot \sqrt[4]{u_w} \cdot 10^{-3}$

Gleitgeschwindigkeit [m/s]

d_w Wellendurchmesser [m]

n_w Drehzahl der Welle [1/s]

$$u_w = d_w \cdot \pi \cdot n_w$$

Winkelgeschwindigkeit [1/s]

n_w Drehzahl der Welle [1/s]

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n_w$$

Sommerfeldzahl

p_L spez. Lagerbelastung [N/mm²]

ψ_B relatives Betriebslagerspiel

η_{eff} dynamische Viskosität nach TB15-9 [Ns/mm²]

ω Winkelgeschwindigkeit [1/s]

$$S_0 = \frac{p_L \cdot \psi_B^2}{\eta_{\text{eff}} \cdot \omega}$$

$$0,001 \leq S_0 \leq 200$$

$S_0 < 0,7$ im Schnelleaufbereich als Eigenschwingungsgefährdet

$S_0 < 1$ im Schnelleaufbereich als leicht beansprucht (ggf. unstabil)

$1 \leq S_0 \leq 3$ im Mittellastbereich als mittel beansprucht

$S_0 > 3$ im Schwerlastbereich als schwer beansprucht

$S_0 > 10$ kann Mischreibung (Verschleiß) eintreten

} Bereich A

} Bereich B

} Bereich C

relative Exzentrizität

e absolute Exzentrizität [mm]

ψ relatives Lagerspiel

d_L Lagerdurchmesser [mm]

s mittleres absolutes Lagerspiel [mm]

h_0 kleinste Schmierspalthöhe [mm]

ε mit S_0 aus TB15-13 bestimmen

oder

$$\varepsilon = \frac{e}{0,5 \cdot s} = \frac{e}{0,5 \cdot d_L \cdot \psi}$$

$$0,1 \leq \varepsilon \leq 0,5$$

$$e = 0,5 \cdot s - h_0$$

Verlagerungswinkel [°]

ε relative Exzentrizität ggf. aus TB15-13

$\frac{b}{d_L}$ relatives Lagerbreite

β aus Tb15-15 mit ε und $\frac{b}{d_L}$

Reibungszahl μ

S_0 Sommerfeldzahl

ε relative Exzentrizität ggf. aus TB15-13

β Verlagerungswinkel aus TB15-15

$\frac{b}{d_L}$ relatives Lagerbreite

$$\frac{\mu}{\psi_B} = \frac{\pi}{S_0 \cdot \sqrt{1 - \varepsilon^2}} + \frac{\varepsilon}{2} \cdot \sin \beta$$

oder

$\frac{\mu}{\psi_B}$ aus Tb15-14 mit ε und $\frac{b}{d_L}$

Näherung:

$S_0 < 1$: $\frac{\mu}{\psi_B} = \frac{3}{S_0}$ bei schwach belastete und/oder schnell laufende Lager

$S_0 > 1$: $\frac{\mu}{\psi_B} = \frac{3}{\sqrt{S_0}}$ bei stark belastete und/oder langsam laufende Lager

kleinste Schmierspalthöhe [mm]

d_L Lagerdurchmesser [mm]

ψ_B relatives Betriebslagerspiel

ε relative Exzentrizität ggf. aus TB15-13

$h_{0,zul}$ kleinste zul. Schmierspalthöhe nach TB15-16 [mm]

$$h_0 = 0,5 \cdot d_L \cdot \psi_B \cdot (1 - \varepsilon) \geq h_{0,zul}$$

Bed.:

$R_{zw} \leq 4 \mu m$

$R_{zl} \leq 1 \mu m$

zur Bestimmung der Verschleißgefahr

Reibungsverlustleistung [W]

- μ Reibungszahl
- F Lagerkraft [N]
- u_w Gleitgeschwindigkeit [m/s]
- ψ_B relatives Betriebslagerspiel
- d_w Wellendurchmesser [m]
- n_w Drehzahl der Welle [1/s]
- P_α durch Konvektion abgeführter Wärmestrom
- P_C durch Schmierstoff abgeführter Wärmestrom

$$P_R = \mu \cdot F \cdot u_w$$

$$= \frac{\mu}{\psi_B} \cdot F \cdot d_w \cdot \pi \cdot n_w \cdot \psi_B$$

$$P_R = P_\alpha + P_C$$

durch Konvektion abgeführte Wärme [W]

- α Wärmeübertragungszahl $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$
- A_G Wärmeabgebende Oberfläche [m²]
- g_m mittlere Lagertemperatur [°C]
- g_u Umgebungstemperatur [°C]
- w Luftgeschwindigkeit [m/s]

$$P_\alpha = \alpha \cdot A_G \cdot (g_m - g_u)$$

$$w \leq 1,2 \frac{m}{s} \Rightarrow \alpha = 15 \text{ bis } 20 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

$$w > 1,2 \frac{m}{s} \Rightarrow \alpha = 7 + 12 \cdot \sqrt{w} \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

Wärmeübertragende Oberfläche [m²]

- D Gehäuseaußendurchmesser [m]
- d_L Lagerdurchmesser [m]
- b_L Gehäusebreite [m]
- L Gehäuselänge [m]
- H Stehlager-Gesamthöhe [m]

Für zylindrisches Lager

$$A_G = \pi \cdot \left[\frac{D^2 - d_L^2}{2} + D \cdot b_L \right]$$

für Stehlagergehäuse

$$A_G = \pi \cdot H \cdot \left(L + \frac{H}{2} \right)$$

für Lager im Maschinenverband

$$A_G = (15 \text{ bis } 20) \cdot b_L \cdot d_L$$

durch Schmierstoff abgeführte Wärme [W]

- \dot{V} Schmierstoffdurchsatz [m³/s]
- $\varphi \cdot c$ raumspezifische Wärme = $1,8 \cdot 10^6 \frac{N}{m^2 \cdot ^\circ C}$
- g_a Austrittstemperatur $\leq 100^\circ C$ (Beachte $g_{L,zul}$)
- g_e Eintrittstemperatur 30 bis 90°C
- $g_{L,zul}$ max. zul. Lagertemperatur nach TB15-17
besser $g_{L,zul} = 80^\circ C$

$$P_C = \dot{V} \cdot \varphi \cdot c \cdot (g_a - g_e)$$

Beachte:

$$g_a - g_e = \max. 20^\circ C$$

Schmierstoffdurchsatz [m³/s]

- \dot{V}_D Volumenstrom infolge Drehung der Welle [m³/s]
- \dot{V}_{pZ} Volumenstrom infolge Zusatzüberdruck p_Z [m³/s]
- $\dot{V}_{D,rel}$ rel. Durchsatz infolge Drehung der Welle
- $\dot{V}_{pZ,rel}$ rel. Durchsatz infolge Überdruck aus TB15-18b
- d_L Lagerdurchmesser [m]
- ψ_B relatives Betriebslagerspiel
- ω Winkelgeschwindigkeit [1/s]
- $\frac{b}{d_L}$ relative Lagerbreite
- ε relative Exzentrizität ggf. aus TB15-13
- p_Z Zusatzüberdruck [Pa]
- η_{eff} dynamische Viskosität nach TB15-9 [Ns/mm²]

$$\dot{V} = \dot{V}_D + \dot{V}_{pZ}$$

$$\dot{V}_D = \dot{V}_{D,rel} \cdot d_L^3 \cdot \psi_B \cdot \omega$$

$$\dot{V}_{D,rel} = \frac{1}{4} \cdot \left[\frac{b}{d_L} - 0,223 \cdot \left(\frac{b}{d_L} \right)^3 \right] \cdot \varepsilon$$

$$\dot{V}_{pZ} = \frac{\dot{V}_{pZ,rel} \cdot d_L^3 \cdot \psi_B^3 \cdot p_Z}{\eta_{eff}}$$

Lagertemperatur bei natürlicher Kühlung (Konvektion)

P_R Reibungsverlustleistung [W]

α Wärmeübertragungszahl $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$

A_G Wärmeabgebende Oberfläche [m²]

ϑ_m mittlere Lagertemperatur [°C]

ϑ_u Umgebungstemperatur [°C]

w Luftgeschwindigkeit [m/s]

$$w \leq 1,2 \frac{m}{s} \Rightarrow \alpha = 15 \text{ bis } 20 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

$$w > 1,2 \frac{m}{s} \Rightarrow \alpha = 7 + 12 \cdot \sqrt{w} \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

Lagertemperatur bei Rückführung des Schmierstoffes (Druckschmierung)

P_R Reibungsverlustleistung [W]

V Schmierstoffdurchsatz [m³/s]

$\varphi \cdot c$ raumspezifische Wärme = $1,8 \cdot 10^6 \frac{N}{m^2 \cdot ^\circ C}$

ϑ_a Austrittstemperatur $\leq 100^\circ C$ (Beachte $\vartheta_{L,zul}$)

ϑ_e Eintrittstemperatur 30 bis 90°C

$\vartheta_{L,zul}$ max. zul. Lagertemperatur nach TB15-17
besser $\vartheta_{L,zul} = 80^\circ C$

dynamische Viskosität [Ns/mm²]

ϑ_{eff} effektive Temperatur [°C]

ϑ_0 Richttemperatur [°C]

ϑ_a Austrittstemperatur $\leq 100^\circ C$ (Beachte $\vartheta_{L,zul}$)

ϑ_e Eintrittstemperatur 30 bis 90°C

$$\vartheta_L \square \vartheta_m = \vartheta_u + \frac{P_R}{\alpha \cdot A_G}$$

1.Näherung

$\vartheta_0 = \vartheta_u + \Delta\vartheta = 40^\circ C \dots 100^\circ C$ (üblich $\Delta\vartheta \approx 20^\circ C$)

Iteration

$$\vartheta_{0,neu} = \frac{\vartheta_{0,alt} + \vartheta_L}{2} \text{ bis } |\vartheta_L - \vartheta_0| \leq 2^\circ C$$

Bei Iterationsabbruch prüfen:

$$\text{Bed.: } \vartheta_L \leq \vartheta_{L,zul}$$

Kühlung bei reiner Konvektion

$$\Rightarrow P_C = 0$$

$$\vartheta_L \square \vartheta_a = \vartheta_e + \frac{P_R}{V \cdot \varphi \cdot c}$$

1.Näherung

$\vartheta_a = \vartheta_e + \Delta\vartheta$ (üblich $\Delta\vartheta \approx 20^\circ C$)

Iteration

$$\vartheta_{a,neu} = \frac{\vartheta_{a,alt} + \vartheta_L}{2} \text{ bis } |\vartheta_L - \vartheta_a| \leq 2^\circ C$$

Bei Iterationsabbruch prüfen:

$$\text{Bed.: } \vartheta_L \leq \vartheta_{L,zul}$$

Kühlung durch Konvektion wird vernachlässigt wenn

$$P_\alpha < 0,25 \cdot P_R \Rightarrow P_\alpha = 0$$

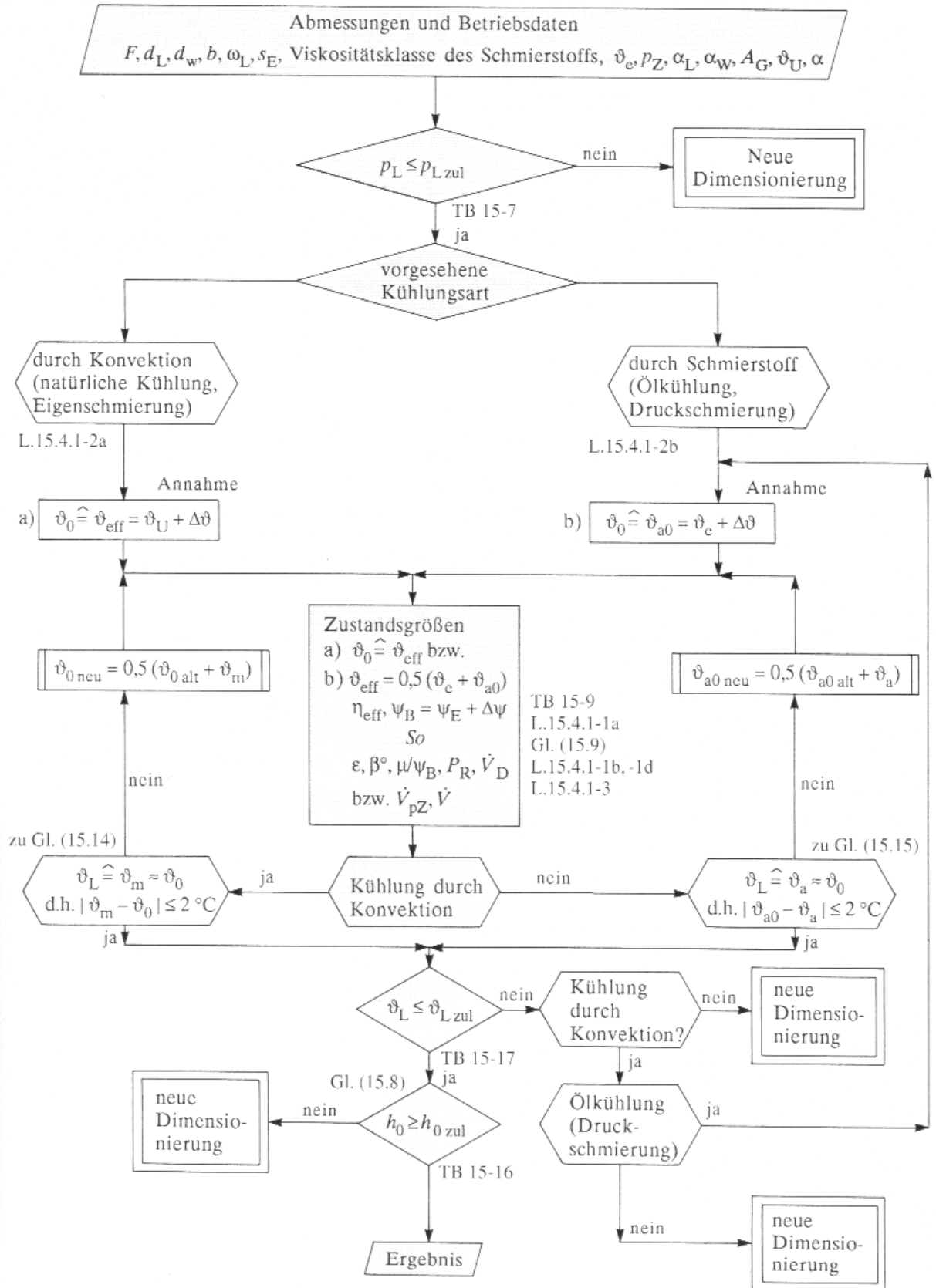
Bestimmung von η_{eff} mit ϑ_{eff} aus TB15-9

▷ Bei reiner Konvektion $\vartheta_{eff} = \vartheta_0$

▷ Bei reiner Konvektion $\vartheta_{eff} = \frac{\vartheta_a + \vartheta_e}{2}$

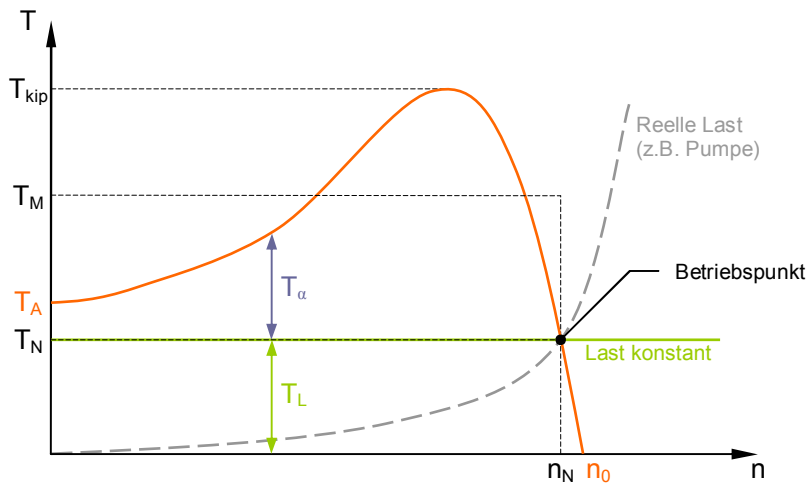
$$1 \text{ mPas} \square 10^{-9} \frac{Ns}{mm^2}$$

Ablaufplan zur Radialgleitlagerberechnung



2. Kupplungen

2.1. Allgemeines



- T_N Nenn Drehmoment [Nm]
- T_A Anlaufmoment [Nm] ($\approx 1,5 \dots 2 \cdot T_N$)
- T_{kip} Kippmoment [Nm] ($\approx 2 \dots 3 \cdot T_N$)
- T_M mittleres Anlaufmoment [Nm]
- T_L Lastmoment [Nm]
- T_α Beschleunigungsmoment [Nm]
- n_N Nenn Drehzahl [1/min]
- n_0 Leerlaufdrehzahl [1/min]

Anlaufmoment [Nm] T_L Lastmoment [Nm] T_α Beschleunigungsmoment [Nm]	$T_A = T_L + T_\alpha$
Beschleunigungsmoment [Nm] T_L Lastmoment [Nm] T_α Beschleunigungsmoment [Nm] α Winkelbeschleunigung [rad/s ²] J_A Summe der Trägheitsmomente der Antriebsseite [kgm ²] J_L Summe der Trägheitsmomente der Lastseite [kgm ²]	$T_\alpha = T_A - T_L = \alpha \cdot (J_A + J_L)$
Winkelbeschleunigung [rad/s²] T_L Lastmoment [Nm] T_α Beschleunigungsmoment [Nm] J_A Summe der Trägheitsmomente der Antriebsseite [kgm ²] J_L Summe der Trägheitsmomente der Lastseite [kgm ²]	$\alpha = \frac{T_A - T_L}{J_A + J_L}$
	$\alpha = \frac{d\omega}{dt}$
Drehwinkel beim Anfahren [rad] α Winkelbeschleunigung [rad/s ²] t_A Anlaufzeit [s]	$\varphi_A = \frac{\alpha}{2} \cdot t_A^2$
Verhältnis der Winkelgeschwindigkeiten n_1, n_2 Drehzahlen [1/min] i Übersetzungsverhältnis	$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} = i$
Reduziertes Trägheitsmoment [kgm²] J_0 auf Kupplungswelle bezogenes Trägheitsmoment [kgm ²] J_1, J_2 auf Kupplungswelle zu beziehende Trägheitsmomente [kgm ²] m_1, m_2 bewegte Massen [kg] v_1, v_2 Geschwindigkeiten der bewegten Massen [m/s] ω_0 Winkelgeschwindigkeit der Kupplungswelle [1/s] ω_1, ω_2 Winkelgeschwindigkeiten der zu beziehenden Trägheitsmomente [1/s]	$J_{red} = J_0 + J_1 \cdot \left(\frac{\omega_1}{\omega_0}\right)^2 + J_2 \cdot \left(\frac{\omega_2}{\omega_0}\right)^2 + \dots$ $+ m_1 \cdot \left(\frac{v_1}{\omega_0}\right)^2 + m_2 \cdot \left(\frac{v_2}{\omega_0}\right)^2 + \dots$
Summe der Trägheitsmomente der Lastseite, bezogen auf die Kupplungswelle [kgm²] $J_{L,red}$ reduziertes Trägheitsmomente der Lastseite [kgm ²] J_K Trägheitsmomente der Kupplung [kgm ²]	$J_L = J_{L,red} + \frac{1}{2} \cdot J_K$
Summe der Trägheitsmomente der Antriebsseite, bezogen auf die Kupplungswelle [kgm²] $J_{A,red}$ reduziertes Trägheitsmomente der Antriebsseite [kgm ²] J_K Trägheitsmomente der Kupplung [kgm ²]	$J_A = J_{A,red} + \frac{1}{2} \cdot J_K$

2.2. Auslegung nachgiebiger Kupplungen

<p>Fiktives Drehmoment [Nm]</p> <p>T_N Nennmoment [Nm]</p> <p>K_A Betriebsfaktor aus TB3-5b [1]</p> <p>T_{KN} dauernd übertragbares Nennmoment aus TB13-2 bis TB13-5 [Nm]</p>	$T_K' = T_N \cdot K_A \leq T_{KN}$
<p>Nennmoment [Nm]</p> <p>P_N Nennleistung [kW]</p> <p>ω_N Kreisfrequenz bei Nenndrehzahl [1/s]</p>	$T_N = \frac{P_N}{\omega_N}$

2.3. Auslegung nachgiebiger Kupplungen nach DIN740

2.3.1. Belastung durch Nennmoment

<p>Fiktives Drehmoment [Nm]</p> <p>T_{LN} Nennmoment der Lastseite [Nm]</p> <p>S_L Temperaturfaktor aus TB13-8b [1]</p> <p>T_{KN} dauernd übertragbares Nennmoment aus TB13-2 bis TB13-5 [Nm]</p>	$T_K' = T_{LN} \cdot S_L \leq T_{KN}$
--	---------------------------------------

2.3.2. Belastung durch Drehmomentstöße

<p>Fiktives Drehmoment [Nm]</p> <p>T_{AS} Stoßmoment der Antriebsseite [Nm] (bei Drehstrommotoren $T_{AS} \approx T_{Kp}$)</p> <p>T_{LS} Stoßmoment der Lastseite [Nm]</p> <p>T_{Kmax} max. übertragbares Drehmoment aus TB13-2 bis TB13-5 [Nm]</p> <p>J_A, J_L Summe der Trägheitsmomente der Antriebs- bzw. Lastseite [kgm²]</p> <p>S_A, S_L Stoßfaktor der Antriebs- bzw. Lastseite [1] $S_A = S_L = 1,8$</p> <p>S_Z Anlauffaktor aus TB13-8a [1]</p> <p>S_t Temperaturfaktor aus TB13-8b [1]</p>	<p>bei antriebsseitigem Stoß</p> $T_K' = \frac{J_L}{J_A + J_L} \cdot T_{AS} \cdot S_A \cdot S_Z \cdot S_t \leq T_{Kmax}$
	<p>bei lastseitigem Stoß</p> $T_K' = \frac{J_A}{J_A + J_L} \cdot T_{LS} \cdot S_L \cdot S_Z \cdot S_t \leq T_{Kmax}$
	<p>bei beidseitigem Stoß</p> $T_K' = \left(\frac{J_L}{J_A + J_L} \cdot T_{AS} \cdot S_A + \frac{J_A}{J_A + J_L} \cdot T_{LS} \cdot S_L \right) \cdot S_Z \cdot S_t \leq T_{Kmax}$

2.3.3. Belastung durch ein periodisches Wechseldrehmoment

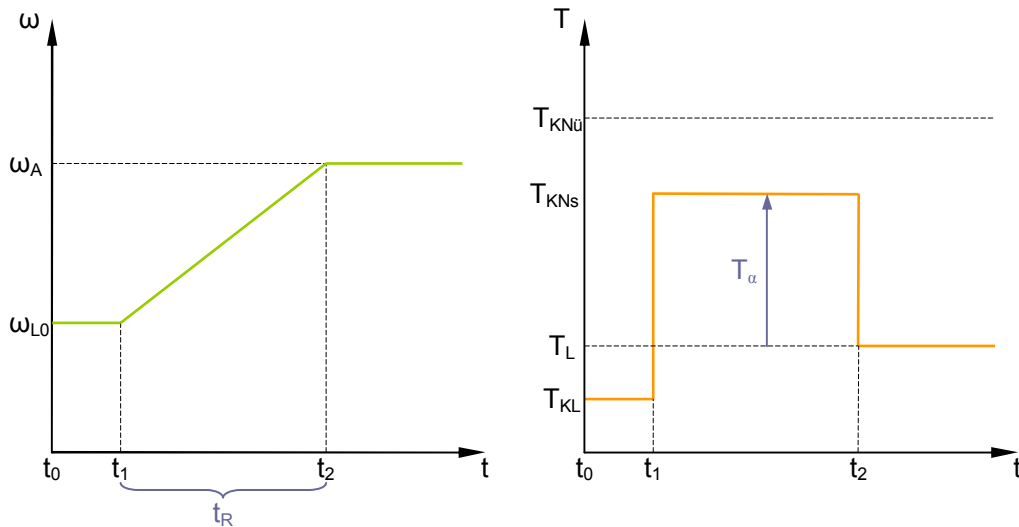
<p>Linearisierung der dyn. Drehfedersteifigkeit von elastischen Kupplungen [Nm/rad]</p> <p>$C_{T_{KN}}$ Drehfedersteifigkeit bei T_{KN} aus TB13-4 und TB13-5 [Nm/rad]</p> <p>$C_{0,5T_{KN}}$ Drehfedersteifigkeit bei $\frac{1}{2}T_{KN}$ aus TB13-4 und TB13-5 [Nm/rad]</p> <p>T_K' Fiktives Kupplungsdrehmoment [Nm]</p> <p>T_{KN} dauernd übertragbares Nennmoment aus TB13-2 bis TB13-5 [Nm]</p>	$C_T = (C_{T_{KN}} - C_{0,5T_{KN}}) \cdot \frac{2 \cdot T_K' - T_{KN}}{T_{KN}} + C_{0,5T_{KN}}$
<p>Eigenkreisfrequenz der Anlage [1/s]</p> <p>C_T Drehfedersteifigkeit [Nm/rad]</p> <p>J_A, J_L Summe der Trägheitsmomente der Antriebs- bzw. Lastseite [kgm²]</p>	$\omega_e = \sqrt{C_T \cdot \left(\frac{1}{J_A} + \frac{1}{J_L} \right)}$
<p>Resonanzkreisfrequenz der Anlage [1/s]</p> <p>ω_e Eigenkreisfrequenz der Anlage [1/s]</p> <p>i Ordnung der Schwingung [1]</p>	$\omega_k = \frac{\omega_e}{i}$ <p>Zweitakter: $i = \text{Anzahl der Zylinder}$ Viertakter: $i = \frac{\text{Anzahl der Zylinder}}{2}$</p>

Vergrößerungsfaktor ψ relative Dämpfung ω Betriebskreisfrequenz der Anlage [1/s] ω_k Resonanzkreisfrequenz der Anlage [1/s] V_R Resonanzfaktor [1]	$V = \frac{1 + \left(\frac{\psi}{2\pi}\right)^2}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_k}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{\psi}{2\pi}\right)^2}}$
Als Näherung in Resonanznähe Bed: $\frac{\omega_k}{\sqrt{2}} < \omega < \sqrt{2} \cdot \omega_k$	$V = V_R \approx \frac{2\pi}{\psi}$
Als Näherung außerhalb Resonanz wenn obige Bedingung nicht gültig ist!	$V \approx \frac{1}{\left \left(\frac{\omega}{\omega_k}\right)^2 - 1\right }$
Fiktives Drehmoment bei Betriebsfrequenz [Nm] T_{Ai} erregendes Drehmoment auf der Antriebsseite [Nm] T_{Li} erregendes Drehmoment auf der Lastseite [Nm] T_{KW} zul. Dauerwechsellastmoment aus TB13-2 bis TB13-5 [Nm] J_A, J_L Summe Trägheitsmomente der Antriebs- bzw. Lastseite [kgm ²] V Vergrößerungsfaktor [1] S_t Temperaturfaktor aus TB13-8b [1] S_f Frequenzfaktor aus TB13-8c [1]	bei antriebsseitige Schwingungserregung (z.B. Dieselmotor) $T'_K = \frac{J_L}{J_A + J_L} \cdot T_{Ai} \cdot V \cdot S_t \cdot S_f \leq T_{KW}$ bei lastseitige Schwingungserregung (z.B. Kolbenverdichter) $T'_K = \frac{J_A}{J_A + J_L} \cdot T_{Li} \cdot V \cdot S_t \cdot S_f \leq T_{KW}$
Fiktives Drehmoment beim Durchfahren der Resonanzstelle [Nm] T_{Ai} erregendes Drehmoment auf der Antriebsseite [Nm] T_{Li} erregendes Drehmoment auf der Lastseite [Nm] T_{Kmax} max. übertragbares Drehmoment aus TB13-2 bis TB13-5 [Nm] J_A, J_L Summe Trägheitsmomente der Antriebs- bzw. Lastseite [kgm ²] V_R Resonanzfaktor [1] S_z Anluffaktor aus TB13-8a [1] S_t Temperaturfaktor aus TB13-8b [1]	bei antriebsseitige Schwingungserregung (z.B. Dieselmotor) $T'_K = \frac{J_L}{J_A + J_L} \cdot T_{Ai} \cdot V_R \cdot S_z \cdot S_t \leq T_{Kmax}$ bei lastseitige Schwingungserregung (z.B. Kolbenverdichter) $T'_K = \frac{J_A}{J_A + J_L} \cdot T_{Li} \cdot V_R \cdot S_z \cdot S_t \leq T_{Kmax}$

2.3.4. Belastung durch Wellenverlagerungen

zul. axialer Versatz der Kupplungshälften [mm] aus TB13-2, TB13-4 und TB13-5 ΔW_a maximal auftretende axiale Verlagerung [mm] S_t Temperaturfaktor aus TB13-8b [1]	$\Delta K_a \geq \Delta W_a \cdot S_t$
zul. radialer Versatz der Kupplungshälften [mm] aus TB13-2, TB13-4 und TB13-5 ΔW_r maximal auftretende radiale Verlagerung [mm] S_t Temperaturfaktor aus TB13-8b [1] S_f Frequenzfaktor aus TB13-8c [1]	$\Delta K_r \geq \Delta W_r \cdot S_t \cdot S_f$
zul. winkliger Versatz der Kupplungshälften [°] aus TB13-2, TB13-4 und TB13-5 ΔW_w maximal auftretende winklige Verlagerung [°] S_t Temperaturfaktor aus TB13-8b [1] S_f Frequenzfaktor aus TB13-8c [1]	$\Delta K_w \geq \Delta W_w \cdot S_t \cdot S_f$
axiale Rückstellkraft [N] ΔW_a maximal auftretende axiale Verlagerung [mm] C_a Axialfedersteifigkeit TB13-2 und TB13-5 [N/mm]	$F_a = \Delta W_a \cdot C_a$
radiale Rückstellkraft [N] ΔW_r maximal auftretende radiale Verlagerung [mm] C_r Radialfedersteifigkeit TB13-2 und TB13-5 [N/mm]	$F_r = \Delta W_r \cdot C_r$
winkliges Rückstellmoment [Nm] ΔW_w maximal auftretende winklige Verlagerung [rad] C_w Winkelfedersteifigkeit TB13-2 und TB13-5 [Nm/rad]	$M_w = \Delta W_w \cdot C_w$ Achtung ΔW_w muß in rad umgewandelt werden!

2.4. Auslegung schaltbarer Reibkupplungen



2.4.1. schaltbares Drehmoment (beim Anlaufen)

<p>Erforderliches schaltbares Drehmoment [Nm]</p> <p>J_L Summe Trägheitsmomente der Lastseite [kgm²] ω_A Winkelgeschwindigkeit auf der Antriebsseite [1/s] ω_{L0} Winkelgeschwindigkeit der Last vor dem Schaltvorgang [1/s] t_R Rutschzeit [s] T_L Drehmoment der Lastseite beim Anlaufen [Nm] T_{KNs} schaltbares Nennmoment der Reibkupplung [Nm] aus TB13-6 und TB13-7</p>	$T_{Ks} = J_L \cdot \frac{\omega_A - \omega_{L0}}{t_R} + T_L \leq T_{KNs}$
<p>Tatsächliche Rutschzeit [s]</p> <p>J_L Summe Trägheitsmomente der Lastseite [kgm²] ω_A Winkelgeschwindigkeit auf der Antriebsseite [1/s] ω_{L0} Winkelgeschwindigkeit der Last vor dem Schaltvorgang [1/s] T_L Drehmoment der Lastseite beim Anlaufen [Nm] T_{KNs} schaltbares Nennmoment der Reibkupplung [Nm] aus TB13-6 und TB13-7</p>	$t'_R = J_L \cdot \frac{\omega_A - \omega_{L0}}{T_{KNs} - T_L}$

2.4.2. übertragbares Drehmoment (im Betrieb)

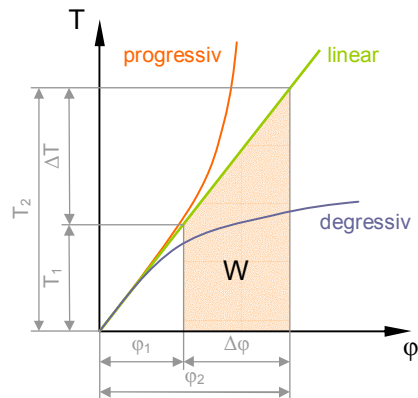
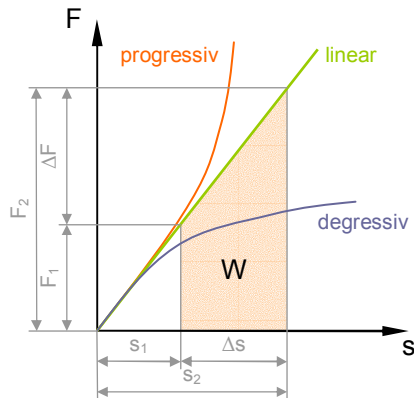
<p>Zu übertragendes Drehmoment im Betrieb [Nm]</p> <p>$T_{KNü}$ max. übertragbares Drehmoment der Reibkupplung [Nm] aus TB13-6 und TB13-7</p>	$T_{Lb} \leq T_{KNü}$
<p>Verhältnis der Drehmomente</p> <p>T_{KNs} schaltbares Nennmoment der Reibkupplung [Nm] aus TB13-6 und TB13-7 $T_{KNü}$ max. übertragbares Drehmoment der Reibkupplung [Nm] aus TB13-6 und TB13-7 μ Gleitreibungszahl μ_0 Haftreibungszahl</p>	$\frac{T_{KNs}}{T_{KNü}} = \frac{\mu}{\mu_0}$

2.4.3. Wärmebelastung

<p>Schaltarbeit bei einmaliger Schaltung [Nm]</p> <p>J_L Summe Trägheitsmomente der Lastseite [kgm²] ω_A Winkelgeschwindigkeit auf der Antriebsseite [1/s] ω_{L0} Winkelgeschwindigkeit der Last vor dem Schaltvorgang [1/s] T_L Drehmoment der Lastseite beim Anlaufen [Nm] T_{KNs} schaltbares Nennmoment der Reibkupplung [Nm] aus TB13-6 und TB13-7 W_{zul} zul. Schaltarbeit bei einmaliger Schaltung [Nm] aus TB13-6 und TB13-7</p>	$W = \frac{J_L \cdot T_{KNs}}{T_{KNs} - T_L} \cdot \frac{(\omega_A - \omega_{L0})^2}{2} < W_{zul}$
<p>Schaltarbeit pro Stunde [Nm/h]</p> <p>W Schaltarbeit bei einmaliger Schaltung [Nm] z_h Schaltzahl pro Stunde [1/h] W_{hzul} zul. Schaltarbeit pro Stunde [Nm/h] aus TB13-6 und TB13-7</p>	$W_h = W \cdot z_h < W_{hzul}$

3. Federn

3.1. Allgemeines



<p>Federsteifigkeit [N/mm] ΔF Differenzkraft [N] Δs Federhub [mm]</p>	$C = \frac{\Delta F}{\Delta s}$
<p>Torsionsfedersteifigkeit [Nmm/°] ΔT Differenzmoment [Nmm] $\Delta \varphi$ Federhub [°]</p>	$C_T = \frac{\Delta T}{\Delta \varphi}$
<p>Parallelschaltung von Federn (gleicher Weg) C_{ges} Federsteifigkeit des Federsystems [N/mm] C Federsteifigkeit der Einzelfedern [N/mm]</p>	$C_{ges} = C_1 + C_2 + \dots + C_n \quad (x = \text{konst})$
<p>Reihenschaltung von Federn (gleiche Kraft) C_{ges} Federsteifigkeit des Federsystems [N/mm] C Federsteifigkeit der Einzelfedern [N/mm]</p>	$\frac{1}{C_{ges}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (F = \text{konst})$
<p>Federarbeit [Nmm] F_{max} maximale Federkraft [N] s_{max} maximaler Federweg [mm]</p>	$W = \int_0^{s_{max}} F(x) dx$ <p>bei linearer Kennlinie:</p> $W = \frac{F_{max} \cdot s_{max}}{2}$
<p>Relative Dämpfung W_D Dämpfungsarbeit (disipierte Energie) [Nmm] W_{pot} potentielle Energie (gespeicherte Energie) [Nmm]</p> <p>$\psi = 0,5 \dots 3$ für Gummifedern $\psi = 0,05 \dots 0,3$ für Stahlfedern</p>	$\psi = \frac{W_D}{W_{pot}}$
<p>Formnutzzahl (beschreibt die Materialausnutzung) W Federarbeit [Nmm] W_{max} maximal speicherbare Arbeit [Nmm]</p>	$\eta_A = \frac{W}{W_{max}}$
<p>Maximal speicherbare Arbeit [Nmm] σ_{max} maximale Biegespannung [N/mm²] V Volumen der Feder [mm³] E Elastizitätsmodul [N/mm²]</p>	$W_{max} = \frac{\sigma_{max}^2 \cdot V}{2 \cdot E} \quad \text{bzw.} \quad W_{T,max} \approx \frac{\tau_{max}^2 \cdot V}{2 \cdot G}$

3.2. Zug-/Druckbeanspruchte Federn

3.2.1. Einfacher Zugstab

<p>Federsteifigkeit [N/mm]</p> <p>A Querschnittsfläche des Zugstabes [mm²]</p> <p>E Elastizitätsmodul aus TB10-1 [N/mm²]</p> <p>ℓ Länge der Feder [mm]</p>	$C = \frac{F}{s} = \frac{A \cdot E}{\ell}$ $F = \sigma \cdot A$ $s = \frac{\sigma \cdot \ell}{E}$
<p>Federarbeit [Nmm]</p> <p>F angreifende Kraft [N]</p> <p>s Federweg [mm]</p> <p>σ Zugspannung [N/mm²]</p> <p>V Volumen der Feder [mm³]</p> <p>E Elastizitätsmodul aus TB10-1 [N/mm²]</p>	$W = \frac{F \cdot s}{2} = \frac{\sigma^2 \cdot V}{2 \cdot E}$
<p>Formnutzzahl</p>	$\eta_A = 1$

3.2.2. Ringfeder

<p>Berechnung nach Herstellerangaben</p>	<p>Formnutzzahl</p> $\eta_A \approx 1,6$
--	--

3.3. Biegebeanspruchte Federn

3.3.1. Einfache Blattfeder

<p>Federsteifigkeit [N/mm]</p> <p>E Elastizitätsmodul aus TB10-1 [N/mm²]</p> <p>I Flächenwiderstandsmoment [mm⁴]</p> <p>ℓ Länge der Feder [mm]</p>	$C = \frac{F}{s} = \frac{3 \cdot E \cdot I}{\ell^3}$ $I_{\square} = \frac{b \cdot h^3}{12}$
<p>Maximale Biegespannung (Randfaser) [N/mm²]</p> <p>F angreifende Kraft [N]</p> <p>ℓ Länge der Feder [mm]</p> <p>h Höhe der Feder [mm]</p> <p>I Flächenwiderstandsmoment [mm⁴]</p> <p>σ_{zul} zulässige Biegespannung aus TB10-1 [N/mm²]</p>	$\sigma_{\max} = \frac{F \cdot \ell \cdot h}{2 \cdot I}$ $\sigma_{\max} = \frac{M_b}{I} \cdot e_{\max}$ <p>Bed: $\sigma_{\max} \leq \sigma_{\text{zul}}$</p>
<p>Federarbeit [Nmm]</p> <p>F angreifende Kraft [N]</p> <p>ℓ Länge der Feder [mm]</p> <p>I Flächenwiderstandsmoment [mm⁴]</p> <p>V Volumen der Feder [mm³]</p> <p>E Elastizitätsmodul aus TB10-1 [N/mm²]</p> <p>σ_{max} maximale Biegespannung (Randfaser) [N/mm²]</p>	$W = \frac{F^2 \cdot \ell^3}{6 \cdot E \cdot I}$ $W = \frac{2 \cdot \sigma_{\max}^2 \cdot \ell \cdot I}{3 \cdot h^2 \cdot E}$ <p>Bei Rechteckprofil:</p> $W = \frac{\sigma_{\max}^2 \cdot V}{18 \cdot E}$
<p>Formnutzzahl bei Rechteckprofil</p>	$\eta_A = \frac{1}{9}$

3.3.2. Schenkelfeder (Drehfeder)

3.3.3. Spiralfeder

3.3.4. Tellerfeder DIN2092/DIN2093

--	--

3.4. Torsionsbeanspruchte Federn

3.4.1. Einfache Dehnstabfeder

Federsteifigkeit [N/mm°] G Schubmodul aus TB10-1 [N/mm ²] I _P Torsionsflächenwiderstandsmoment [mm ⁴] ℓ Länge des Stabes [mm]	$C_T = \frac{T}{\varphi} = \frac{I_P \cdot G}{\ell} \cdot \frac{360^\circ}{2\pi}$	Für Kreisquerschnitt $I_P = \frac{\pi \cdot d^4}{32}$
Maximale Torsionsspannung (Randfaser) [N/mm²] T angreifendes Torsionsmoment [Nmm] I _P Torsionsflächenwiderstandsmoment [mm ⁴] r Außenradius des Stabes [mm] τ _{zul} zulässige Torsionsspannung aus TB10-1 [N/mm ²]	$\tau_{\max} = \frac{T}{I_P} \cdot r$	$\tau_{\max} = \frac{T}{W_P}$
Federarbeit [Nmm] T angreifendes Torsionsmoment [Nmm] ℓ Länge der Feder [mm] I _P Torsionsflächenwiderstandsmoment [mm ⁴] V Volumen des Stabes [mm ³] G Schubmodul aus TB10-1 [N/mm ²] τ _{max} Maximale Torsionsspannung (Randfaser) [N/mm ²] r Außenradius des Stabes [mm]	$W = \frac{T^2 \cdot \ell}{2 \cdot G \cdot I_P}$	Bei Rechteckprofil: $W = \frac{\tau_{\max}^2 \cdot V}{4 \cdot G}$
Formnutzzahl	$\eta_A = 0,5$	

3.4.2. Schraubendruckfeder DIN2089T1

	Kaltgeformte
	Drahtdurchmesser $d \leq 17\text{mm}$
	Mittlerer Durchmesser $D_m \leq 200\text{mm}$
	Länge, ungespannte Feder $L_0 \leq 630\text{mm}$
	Wickelverhältnis $W = \frac{D_m}{d} = 4 \dots 20$
	Werkstoff - Patentierte gezogene unlegierte Federstahldrähte nach DIN17223T1 Sorten A,B,C,D - Vergütbarer Federstahldraht nach DIN17223T2 Sorten FD,VD
	Warmgeformte
	Drahtdurchmesser $d = 8 \dots 60\text{mm}$
	Außendurchmesser $D_e \leq 460\text{mm}$
	Länge, ungespannte Feder $L_0 \leq 800\text{mm}$
	Wickelverhältnis $W = \frac{D_m}{d} = 3 \dots 12$
	Werkstoff - Vergütbarer Federstahldraht nach DIN17221 z.B. 55Cr3, 50CrV4
Vorauswahl des Drahtdurchmessers k ₁ Beiwert zur angenäherten Vorwahl der Drahtstärke F geforderte max. Kraft [N] D _e Außendurchmesser [mm] D _i Innendurchmesser [mm] τ _{c,zul} zul. Schubspannung bei Blocklänge aus TB10-11b,c [N/mm ²]	Bei gegebenem Außendurchmesser $d \approx k_1 \cdot \sqrt[3]{F \cdot D_e}$
Drahtsorten A,B,C,D k ₁ = 0,15 bei d < 5mm k ₁ = 0,16 bei d = 5...14mm	Bei gegebenem Innendurchmesser $d \approx k_1 \cdot \sqrt[3]{F \cdot D_i} + \frac{2 \cdot (k_1 \cdot \sqrt[3]{F \cdot D_i})^2}{3 \cdot D_i}$
Drahtsorten FD, VD k ₁ = 0,17 bei d < 5mm k ₁ = 0,18 bei d = 5...14mm	
Vorauswahl der Anzahl der federnden Windungen D _m mittlerer Durchmesser [mm] d Drahtdurchmesser [mm] C _(soll) geforderter Federrate (Federsteifigkeit) [N/mm] G Schubmodul aus TB10-1 [N/mm ²]	$n \approx \frac{G \cdot d^4}{8 \cdot D_m^3 \cdot C_{(soll)}}$

Federweg [mm] F angreifende Kraft [N] D _m mittlerer Durchmesser [mm] d Drahtdurchmesser [mm] n Anzahl der federnden Windungen G Schubmodul aus TB10-1 [N/mm ²]	$s = \frac{8 \cdot D_m^3 \cdot n \cdot F}{G \cdot d^4}$
Federrate (Federsteifigkeit) [N/mm] D _m mittlerer Durchmesser [mm] d Drahtdurchmesser [mm] n Anzahl der federnden Windungen G Schubmodul aus TB10-1 [N/mm ²]	$C = \frac{F}{s} = \frac{G \cdot d^4}{8 \cdot D_m^3 \cdot n}$
Federarbeit [Nmm] V Volumen des Stabes [mm ³] G Schubmodul aus TB10-1 [N/mm ²] τ Torsionsspannung [N/mm ²]	$W = \frac{F \cdot s}{2} = \frac{\tau^2 \cdot V}{4 \cdot G}$
Gesamtzahl der Windungen n Anzahl der federnden Windungen	Kaltgeformte $n_t = n + 2 \quad n \geq 2$ Warmgeformte $n_t = n + 1,5 \quad n \geq 3$
Summe der Mindestabstände [mm] D _m mittlerer Durchmesser [mm] d Drahtdurchmesser [mm] n Anzahl der federnden Windungen S' _a Summe der Mindestabstände bei dynamischer Beanspruchung [mm]	Kaltgeformte Statische Beanspruchung $S_a = \left[0,0015 \cdot \frac{D_m^2}{d} + 0,1 \cdot d \right] \cdot n$ dynamische Beanspruchung $S'_a \approx 1,5 \cdot S_a$ Warmgeformte Statische Beanspruchung $S_a = 0,02 \cdot (D_m + d) \cdot n$ dynamische Beanspruchung $S'_a \approx 2 \cdot S_a$
Blocklänge [mm] n _t Gesamtanzahl der Winungen d Drahtdurchmesser [mm]	Kaltgeformte Federenden angelegt und planbearbeitet $L_c \leq n_t \cdot d$ Federenden angelegt und unbearbeitet $L_c \leq (n_t + 1,5) \cdot d$ Warmgeformte Federenden angelegt und planbearbeitet $L_c \leq (n_t - 0,3) \cdot d$ Federenden unbearbeitet $L_c \leq (n_t + 1,1) \cdot d$
Kleinste zulässige Federlänge [mm] L _c Blocklänge [mm] S _a Summe der Mindestabstände zwischen den Windungen [mm]	$L_n = L_c + S_a$ bzw. bei dynamischer Belastung $L'_n = L_c + S'_a$
Länge der unbelasteten Feder [mm] s _n Federweg bei angreifender Kraft F _n [mm] L _n Kleinste zulässige Federlänge [mm] L _c Blocklänge [mm] S _a Summe der Mindestabstände zwischen den Windungen [mm]	$L_0 = s_n + L_n = s_n + L_c + S_a$ bzw. bei dynamischer Belastung $L'_0 = s_n + L'_n = s_n + L_c + S'_a$
Torsionsmoment [Nmm] F angreifende Kraft [N] D _m mittlerer Durchmesser [mm]	$M_t = F \cdot \frac{D_m}{2} \qquad \tau = \frac{M_t}{W_t} \qquad W_t = \frac{\pi \cdot d^3}{16}$

<p>Schubspannungsnachweis [N/mm²] F angreifende Kraft [N] D_m mittlerer Durchmesser [mm] d Drahtdurchmesser [mm] τ_{zul} zulässige Torsionsspannung aus TB10-1 [N/mm²] k Spannungskorrekturfaktor aus TB10-11d τ_{kO} Oberspannung aus TB10-13 bis TB10-16 [N/mm²]</p>	<p>Bei Statische Beanspruchung</p> $\tau = \frac{8 \cdot F \cdot D_m}{\pi \cdot d^3} \leq \tau_{zul}$ <p>Bei dynamischer Beanspruchung</p> $\tau_{k1,2} = \frac{8 \cdot F_{1,2} \cdot D_m}{\pi \cdot d^3} \cdot k \leq \tau_{kO}$
<p>Hubspannung τ_{k1} vorhandene Schubspannung bei F₁ (dynamischer Fall) [N/mm²] τ_{k2} vorhandene Schubspannung bei F₂ (dynamischer Fall) [N/mm²] τ_{kh} Hubfestigkeit aus TB10-13 bis TB10-16 [N/mm²]</p>	$\tau_{kh} = \tau_{k2} - \tau_{k1} \leq \tau_{kh}$
<p>Schubspannung bei Blocklänge [N/mm²] F_c theo. Kraft um Feder auf Blocklänge zu bringen [N] D_m mittlerer Durchmesser [mm] d Drahtdurchmesser [mm] τ_{c,zul} zul. Schubspannung bei Blocklänge aus TB10-11b,c [N/mm²]</p>	$\tau_c = \frac{8 \cdot F_c \cdot D_m}{\pi \cdot d^3} \leq \tau_{c,zul}$