

Vereinbarte Konstanten:

Normaleingriffswinkelwinkel:	Schrägungswinkel:	Überschlägiger Belastungswert:	Anwendungsfaktor:
$\alpha_n := 20^\circ$	$\beta := 20^\circ$	$B_{zul} := 4 \frac{N}{mm^2}$	$K_A := 2.0$
Druckkraft vom Boden:	Schaltdrehzahl:	Dauerfestigkeitsschubspannung:	
$F_B := 1500 \text{ N}$	$n_s := 1400 \text{ rpm}$	$\tau_{Tzul} := 50 \frac{N}{mm^2} \quad (42CrMo4)$	
Antriebsdrehzahl:			
$n_{Antrieb} := 2000 \frac{1}{min}$			

Übersetzungsverhältnis:

Antriebsmoment:		
$T_{an} := 50 \text{ N} \cdot m$		
Theoretisch benötigte Übersetzungen:		orientiert an TB 21-11
$i_1 := 3.40$	$i_2 := 2.95$	
$i_{Gesamt} := i_1 \cdot i_2$	$i_{Gesamt} = 10.03$	
Errechnete Übersetzungen (siehe Zahnradaten):		
$i'_1 := 3.381$	$i'_2 := 2.964$	
$i'_{Gesamt} := i'_1 \cdot i'_2$	$i'_{Gesamt} = 10.021$	
Moment der Vorgelegewelle:		
$T_{Vorgelege} := T_{an} \cdot i'_1$	$T_{Vorgelege} = 169.05 \text{ N} \cdot m$	
Abtriebsmoment:		
$T_{ab} := T_{an} \cdot i'_{Gesamt}$	$T_{ab} = 501.064 \text{ N} \cdot m$	

Fliehkraftkupplung:

$$N_{FK} := 2 \quad F_F := 15 \text{ N} \quad n_s := 1400 \frac{1}{\text{min}} \quad \omega_s := 2 \pi \cdot n_s = 146.608 \frac{1}{s}$$

$$r_{FK} := 50 \text{ mm} \quad \mu_0 := 0.9$$

$$m_{FK} := 1 \text{ kg} \quad \Delta l := 2.5 \text{ mm}$$

$$d_R := 140 \text{ mm}$$

Federsteifigkeit:

$$C := \frac{F_F}{\Delta l} \quad C = 6 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

Bei Schaltdrehzahl:

Fliehkraft:

$$F_{Flieh} := m_{FK} \cdot r_{FK} \cdot \omega_s^2 \quad F_{Flieh} = 1.075 \text{ kN}$$

Kontaktkraft:

$$F_N := (F_{Flieh} - 2 \cdot F_F) \quad F_N = 1.045 \text{ kN}$$

Reibkraft eines Fliehkörpers:

$$F_R := \mu_0 \cdot F_N \quad F_R = 940.221 \text{ N}$$

Reib-/Schaltmoment:

$$T_R := N_{FK} \cdot F_R \cdot \frac{d_R}{2} \quad T_R = 131.631 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Entwurfsdurchmesser:

Antriebswelle:	Vorgelegewelle:	Abtriebswelle:
$d_{min1} := \sqrt[3]{\frac{(16 \cdot T_{an} \cdot K_A)}{\pi \cdot \tau_{Tzul}}}$	$d_{min2} := \sqrt[3]{\frac{(16 \cdot T_{Vorgelege} \cdot K_A)}{\pi \cdot \tau_{Tzul}}}$	$d_{min3} := \sqrt[3]{\frac{(16 \cdot T_{ab} \cdot K_A)}{\pi \cdot \tau_{Tzul}}}$
$d_{min1} = 21.677 \text{ mm}$	$d_{min2} = 32.535 \text{ mm}$	$d_{min3} = 46.735 \text{ mm}$
Gewählt: $d_{W1} := 25 \text{ mm}$	Gewählt: $d_{W2} := 35 \text{ mm}$	Gewählt: $d_{W3} := 50 \text{ mm}$

Zahnradraten:

Ritzelzähnezahlen:

$z_1 := 21$	$z_3 := 28$
$z_2 := 71$	$z_4 := 83$
$i'_1 := \frac{z_2}{z_1} = 3.381$	$i'_2 := \frac{z_4}{z_3} = 2.964$
Damit ist $i'_1 \sim i_1$ und $i'_2 \sim i_2$	$i'_{ges} := i'_1 \cdot i'_2 = 10.022$
orientiert an TB 21-12	

Modul 1,2:

$m_{n12} := \frac{(1.8 \cdot d_{W1} \cdot \cos(\beta))}{z_1 - 2.5}$	$m_{n12} = 2.286 \text{ mm}$	nach Gl. 21-63
Gerundet:	$m_{n12} := 3.0 \text{ mm}$	nach TB 21-1

Teilkreisdurchmesser 1,2:

$d_1 := \frac{(z_1 \cdot m_{n12})}{\cos(\beta)}$	$d_1 = 67.043 \text{ mm}$	nach Gl. 21-38
$d_2 := \frac{(z_2 \cdot m_{n12})}{\cos(\beta)}$	$d_2 = 226.67 \text{ mm}$	

Zahnradbreite 1,2:

$$\text{Zahnrad Z1: } b_1 := \frac{(2 \cdot T_{an})}{d_1^2 \cdot B_{zul}} \quad b_1 = 5.562 \text{ mm} \quad \text{nach Vereinbarung}$$

$$\text{Gewählt: } b_1 := 25 \text{ mm} \quad \text{gewählt nach TB-21-13 a/b.)}$$

$$b_2 := b_1$$

Null-Achsabstand 1,2:

$$a_{d1} := \frac{(d_1 + d_2)}{2} \quad a_{d1} = 146.857 \text{ mm} \quad \text{nach Gl. 21-8}$$

Modul 3,4:

$$m_{n34} := \frac{(2 \cdot a_{d1} \cdot \cos(\beta))}{(1 + i_2) \cdot z_3} \quad m_{n34} = 2.495 \text{ mm} \quad \text{nach Gl. 21-64}$$

$$\text{Gerundet: } m_{n34} := 2.5 \text{ mm} \quad \text{nach TB 21-1}$$

Teilkreisdurchmesser 3,4:

$$d_3 := \frac{(z_3 \cdot m_{n34})}{\cos(\beta)} \quad d_3 = 74.492 \text{ mm}$$

nach Gl. 21-38

$$d_4 := \frac{(z_4 \cdot m_{n34})}{\cos(\beta)} \quad d_4 = 220.817 \text{ mm}$$

Zahnradbreite 3,4:

$$\text{Zahnrad Z3: } b_3 := \frac{(2 \cdot T_{\text{Vorgelege}})}{d_3^2 B_{zul}} \quad b_3 = 15.232 \text{ mm} \quad \text{nach Vereinbarung}$$

$$\text{Gewählt: } b_3 := 25 \text{ mm} \quad \text{gewählt nach TB-21-13 a/b.)}$$

$$b_4 := b_3$$

Null-Achsabstand 3,4:

$$a_{d2} := \frac{(d_3 + d_4)}{2} \quad a_{d2} = 147.655 \text{ mm} \\ a_{d1} = 146.857 \text{ mm} \quad \text{nach Gl. 21-8}$$

$$a_{d1} - a_{d2} = -0.798 \text{ mm}$$

Die Nullachsabstände sind verschieden, a_{d1} wird angeglichen. D.h. eine **negative** Profilverschiebung wird an den Zahnradern z_1 und z_2 vorgenommen, damit keine Schwächung des Ritzels entsteht.

Profilverschiebung:

Stirneingriffswinkel:

$$\alpha_t := \arctan\left(\frac{\tan(\alpha_n)}{\cos(\beta)}\right) \quad \alpha_t = 21.173^\circ \quad \text{nach Gl. 21-35}$$

Betriebeingriffswinkel:

$$\alpha_{wt} := \arccos\left(\cos(\alpha_t) \cdot \frac{a_{d1}}{a_{d2}}\right) \cdot \frac{360^\circ}{2 \cdot \pi} \quad \alpha_{wt} = 21.959^\circ \quad \text{nach Gl. 21-21}$$

Summe Profilverschiebungsfaktoren:

$$\text{inv}\alpha_{wt} := \tan(\alpha_{wt}) - \alpha_{wt} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{360^\circ} \quad \text{inv}\alpha_t := \tan(\alpha_t) - \alpha_t \cdot \frac{2 \cdot \pi}{360^\circ}$$

$$\text{inv}\alpha_{wt} = 0.02$$

$$\text{inv}\alpha_t = 0.018$$

$$\Sigma x := \frac{\text{inv}\alpha_{wt} - \text{inv}\alpha_t}{2 \cdot \tan(\alpha_n)} \cdot (z_1 + z_2) \quad \text{nach Gl. 21-56}$$

$$\Sigma x = 0.271$$

Ersatzzähnezahlen:

$$\beta_b := \arccos \left(\cos(\beta) \cdot \frac{\cos(\alpha_n)}{\cos(\alpha_t)} \right) \quad \beta_b = 18.747^\circ \quad \text{nach Gl. 21-36}$$

$$\cos^2(\beta_b) := \frac{1}{2} (1 + \cos(2 \cdot \beta_b)) \quad \cos^2(\beta_b) = 0.897 \quad \text{Additionstheorem}$$

$$z_{n1} := \frac{z_1}{\cos^2(\beta_b) \cdot \cos(\beta)} \quad z_{n2} := \frac{z_2}{\cos^2(\beta_b) \cdot \cos(\beta)} \quad \text{nach Gl. 21-47}$$

$$z_{n1} = 24.922 \quad z_{n2} = 84.26$$

Sinnvolle Wahl von x_1 nach Gl. 21.33 im Roloff/Matek

$$x_1 := \frac{\Sigma x}{2} + \left(0.5 - \frac{\Sigma x}{2} \right) \cdot \frac{\log \left(\frac{z_2}{z_1} \right)}{\log \left(\frac{z_{n1} \cdot z_{n2}}{100} \right)} \quad \text{nach Gl. 21-33}$$

$$x_1 = 0.281$$

$$x_2 := \Sigma x - x_1$$

$$x_2 = -0.01$$

Verschiebungen:

$$V_1 := x_1 \cdot m_{n12} \quad V_1 = 0.844 \text{ mm} \quad \text{nach Gl. 21-49}$$

$$V_2 := x_2 \cdot m_{n12} \quad V_2 = -0.031 \text{ mm}$$

$$V_3 := 0 \text{ mm}$$

$$V_4 := 0 \text{ mm}$$

Maße der Zahnräder nach Profilverschiebung:

Kopfhöhenänderung:

$$k := a_{d2} - a_{d1} - m_{n12} \cdot (x_1 + x_2) \quad k = -0.014 \text{ mm} \quad \text{nach Gl. 21-23}$$

Kopfspiel (Soll):

$$c_{12} := 0.25 \cdot m_{n12} \quad c_{12} = 0.75 \text{ mm} \quad \text{nach S.769}$$

$$c_{34} := 0.25 \cdot m_{n34} \quad c_{34} = 0.625 \text{ mm}$$

Kopfkreisdurchmesser nach Profilverschiebung:

$$d_{a1} := d_1 + 2 \cdot m_{n12} + 2 \cdot V_1 + 2 \cdot k \quad d_{a1} = 74.702 \text{ mm} \quad \text{nach Gl. 21-24}$$

$$d_{a2} := d_2 + 2 \cdot m_{n12} + 2 \cdot V_2 + 2 \cdot k \quad d_{a2} = 232.578 \text{ mm}$$

$$d_{a3} := d_3 + 2 \cdot m_{n34} \quad d_{a3} = 79.492 \text{ mm} \quad \text{nach Gl. 21-40}$$

$$d_{a4} := d_4 + 2 \cdot m_{n34} \quad d_{a4} = 225.817 \text{ mm}$$

Fußkreisdurchmesser nach Profilverschiebung:

$$d_{f1} := d_1 - 2 \cdot ((m_{n12} + c_{12}) - V_1) \quad d_{f1} = 61.231 \text{ mm} \quad \text{nach Gl. 21-25}$$

$$d_{f2} := d_2 - 2 \cdot ((m_{n12} + c_{12}) - V_2) \quad d_{f2} = 219.107 \text{ mm}$$

$$d_{f3} := d_3 - 2.5 \cdot m_{n34} \quad d_{f3} = 68.242 \text{ mm} \quad \text{nach Gl. 21-41}$$

$$d_{f4} := d_4 - 2.5 \cdot m_{n34} \quad d_{f4} = 214.567 \text{ mm}$$

Kopfspiel nach Profilverschiebung:

$$c := a_{d2} - 0.5 \cdot (d_{a1} + d_{f2}) \quad c = 0.75 \text{ mm} \quad \text{nach Gl. 21-22c}$$

Prüfen der Zahndicke am Kopfkreis:

tangentiales Modul: $m_{t12} := \frac{m_{n12}}{\cos(\beta)}$

min. Kopfdicke des Zahnes: $s_{a12min} := 0.2 \cdot m_{n12}$ nach S.791

$$s_{a12min} = 0.6 \text{ mm}$$

Stirnteilung: $p_{t12} := m_{t12} \cdot \pi$ nach Gl. 21-34

Stirnzahndicke: $s_{t1} := \frac{p_{t12}}{2} + 2 \cdot V_1 \cdot \tan(\alpha_t)$ nach Gl. 21-51

" s_{t1} " ist in Bezug auf den tangentialen Stirnschnitt (S-S) durch das Zahnrad.
(S.802 - Bild 21-14)

" s_{a1} " ist auf den Kopfkreis bezogen

Profilwinkel am Kopfkreis: $\alpha_{at1} := \arccos\left(\frac{d_1 \cdot \cos(\alpha_t)}{d_{a1}}\right)$ nach S.806
" α_{at1} " entspricht
" α_{yt1} " aus Roloff Matek

$$\text{inv}\alpha_{at1} := \tan(\alpha_{at1}) - \alpha_{at1} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{360^\circ}$$

aus Vorlesung

Kopfdicke des Zahnes an den gewählten Zahnrädern (nach Profilverschiebung):

$$s_{a1} := d_{a1} \cdot \left(\frac{s_{t1}}{d_1} + \text{inv}\alpha_t - \text{inv}\alpha_{at1} \right) \quad s_{a1} = 2.055 \text{ mm} \quad \text{nach Gl. 21-53}$$

Stirnzahndicke: $s_{t2} := \frac{p_{t12}}{2} + 2 \cdot V_2 \cdot \tan(\alpha_t)$

Profilwinkel am Kopfkreis: $\alpha_{at2} := \arccos\left(\frac{d_2 \cdot \cos(\alpha_t)}{d_{a2}}\right)$

$$\text{inv}\alpha_{at2} := \tan(\alpha_{at2}) - \alpha_{at2} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{360^\circ}$$

Kopfdicke des Zahnes an den gewählten Zahnrädern (nach Profilverschiebung):

$$s_{a2} := d_{a2} \cdot \left(\frac{s_{t2}}{d_2} + \text{inv}\alpha_t - \text{inv}\alpha_{at2} \right) \quad s_{a2} = 2.583 \text{ mm}$$

Sowohl s_{a1} als auch s_{a2} sind $> s_{a12min}$. Die Zahndicke am Kopfkreis ist damit ausreichend. Zusätzliche Prüfung über TB 21-8 R/M führt zum gleichen Ergebnis.

Grundkreisdurchmesser db:

(Der Durchmesser welcher von der Normalen N-N, die durch den Berührungspunkt der Zahnflanken geht, tangiert wird - Bild 21.3)

$$d_{b1} := d_1 \cdot \cos(\alpha_t) \quad d_{b1} = 62.517 \text{ mm}$$

$$d_{b2} := d_2 \cdot \cos(\alpha_t) \quad d_{b2} = 211.369 \text{ mm}$$

nach Gl. 21-2

$$d_{b3} := d_3 \cdot \cos(\alpha_t) \quad d_{b3} = 69.464 \text{ mm}$$

$$d_{b4} := d_4 \cdot \cos(\alpha_t) \quad d_{b4} = 205.911 \text{ mm}$$

Profilüberdeckung:

Profilüberdeckung des ersten Zahnradpaares:

$$\varepsilon_{\alpha 12} := \frac{\left(0.5 \cdot \left(\sqrt{d_{a1}^2 - d_{b1}^2} + \frac{z_2}{|z_2|} \cdot \sqrt{d_{a2}^2 - d_{b2}^2} \right) - a_{d2} \cdot \sin(\alpha_{wt}) \right)}{\pi \cdot m_{t12} \cdot \cos(\alpha_t)} \quad \text{nach Gl. 21-57}$$

$$\varepsilon_{\alpha 12} = 1.47$$

$$\varepsilon_{\beta 12} := \frac{b_1 \cdot \tan(\beta)}{p_{t12}}$$

$$\varepsilon_{\beta 12} = 0.907$$

nach Gl. 21-44

$$\varepsilon_{\gamma 12} := \varepsilon_{\alpha 12} + \varepsilon_{\beta 12}$$

$$\varepsilon_{\gamma 12} = 2.377$$

nach Gl. 21-46

-> Profilüberdeckung des ersten Zahnradpaares ist ausreichend (nach Erklärung S. 804)

Profilüberdeckung des zweiten Zahnradpaares:

$$\varepsilon_{\alpha 34} := \frac{\left(0.5 \cdot \left(\sqrt{d_{a3}^2 - d_{b3}^2} + \frac{z_2}{|z_2|} \cdot \sqrt{d_{a4}^2 - d_{b4}^2} \right) - a_{d2} \cdot \sin(\alpha_{wt}) \right)}{\pi \cdot m_{t12} \cdot \cos(\alpha_t)}$$

$$\varepsilon_{\alpha 34} = 1.119$$

$$\varepsilon_{\beta 34} := \frac{b_3 \cdot \tan(\beta)}{p_{t12}}$$

$$\varepsilon_{\beta 34} = 0.907$$

$$\varepsilon_{\gamma 34} := \varepsilon_{\alpha 34} + \varepsilon_{\beta 34}$$

$$\varepsilon_{\gamma 34} = 2.026$$

-> Profilüberdeckung des zweiten Zahnradpaares ist ausreichend (nach Erklärung S. 804)

Betriebswälzkreisdurchmesser:

$$d_{w1} := \frac{d_1 \cdot \cos(\alpha_t)}{\cos(\alpha_{wt})}$$

$$d_{w1} = 67.408 \text{ mm}$$

nach Gl. 21-22a

$$d_{w2} := \frac{d_2 \cdot \cos(\alpha_t)}{\cos(\alpha_{wt})}$$

$$d_{w2} = 227.902 \text{ mm}$$

nach Gl. 21-22b

$$d_{w3} := d_3$$

$$d_{w3} = 74.492 \text{ mm}$$

$$d_{w4} := d_4$$

$$d_{w4} = 220.817 \text{ mm}$$

Kontrolle Achsabstand:

$$a := \frac{d_{w1} + d_{w2}}{2} = 147.655 \text{ mm}$$

identisch mit:

$$a_{d2} = 147.655 \text{ mm}$$

$$a := \frac{d_{w3} + d_{w4}}{2} = 147.655 \text{ mm}$$

Zusammenfassung:

$$d_1 = 67.043 \text{ mm}$$

$$d_{b1} = 62.517 \text{ mm}$$

$$d_{a1} = 74.702 \text{ mm}$$

$$d_{f1} = 61.231 \text{ mm}$$

$$d_2 = 226.67 \text{ mm}$$

$$d_{b2} = 211.369 \text{ mm}$$

$$d_{a2} = 232.578 \text{ mm}$$

$$d_{f2} = 219.107 \text{ mm}$$

$$d_3 = 74.492 \text{ mm}$$

$$d_{b3} = 69.464 \text{ mm}$$

$$d_{a3} = 79.492 \text{ mm}$$

$$d_{f3} = 68.242 \text{ mm}$$

$$d_4 = 220.817 \text{ mm}$$

$$d_{b4} = 205.911 \text{ mm}$$

$$d_{a4} = 225.817 \text{ mm}$$

$$d_{f4} = 214.567 \text{ mm}$$

$$b_1 = 25 \text{ mm}$$

$$d_{w1} = 67.408 \text{ mm}$$

$$z_1 = 21$$

$$m_{n12} = 3 \text{ mm}$$

$$b_2 = 25 \text{ mm}$$

$$d_{w2} = 227.902 \text{ mm}$$

$$z_2 = 71$$

$$b_3 = 25 \text{ mm}$$

$$d_{w3} = 74.492 \text{ mm}$$

$$z_3 = 28$$

$$m_{n34} = 2.5 \text{ mm}$$

$$b_4 = 25 \text{ mm}$$

$$d_{w4} = 220.817 \text{ mm}$$

$$z_4 = 83$$

$$V_1 = 0.844 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_{\alpha 12} = 1.47$$

$$\varepsilon_{\alpha 34} = 1.119$$

$$x_1 = 0.281$$

$$\begin{array}{llll}
 V_2 = -0.031 \text{ mm} & \varepsilon_{\beta 12} = 0.907 & \varepsilon_{\beta 34} = 0.907 & x_2 = -0.01 \\
 V_3 = 0 \text{ mm} & \varepsilon_{\gamma 12} = 2.377 & \varepsilon_{\gamma 34} = 2.026 & \\
 V_4 = 0 \text{ mm} & & &
 \end{array}$$

Passfederberechnung:

Werkstoff Passfeder E295 GC

$$\begin{array}{llll}
 S_F := 1.1 & Re := 420 \frac{N}{mm^2} & p_{fzul} := \frac{Re}{S_F} & p_{fzul} = 381.818 \frac{N}{mm^2} \\
 \text{nach TB 12-1b} & & &
 \end{array}$$

$$\varphi := 1 \quad \text{für } n=1 \quad n_{Pass} := 1 \quad K_\lambda := 1 \quad K_A = 2$$

Antriebswelle - Fliehkraftkupplung

für Wellendurchmesser 25mm:

-Passfeder DIN 6885 - A8x7x28

$$h_{Pass} := 7 \text{ mm} \quad l_{Pass} := 28 \text{ mm} \quad h := 3.0 \text{ mm}$$

$$b_{Pass} := 8 \text{ mm} \quad l'_{Pass} := l_{Pass} - b_{Pass} \quad d_{Kritisch1} := 25 \text{ mm}$$

$$p_m := \frac{2 \cdot K_A \cdot T_{an} \cdot K_\lambda}{d_{Kritisch1} \cdot h \cdot l'_{Pass} \cdot n_{Pass} \cdot \varphi} = 133.333 \frac{N}{mm^2} \quad p_m < p_{fzul} \quad \text{nach Gl. 12-1}$$

Werkstoff Passfeder E295 GC

$$\begin{array}{llll}
 S_F := 1.1 & Re := 420 \frac{N}{mm^2} & p_{fzul} := \frac{Re}{S_F} & p_{fzul} = 381.818 \frac{N}{mm^2} \\
 \text{nach TB 12-1b} & & &
 \end{array}$$

$$\varphi := 1 \quad \text{für } n=1 \quad n_{Pass} := 1 \quad K_\lambda := 1 \quad K_A = 2$$

Abtriebswelle - Rutschkupplung

für Wellendurchmesser 50mm:

-Passfeder DIN 6885 - A14x9x70

$$h_{Pass} := 9 \text{ mm} \quad l_{Pass} := 70 \text{ mm} \quad h := 3.5 \text{ mm}$$

$$b_{Pass} := 14 \text{ mm} \quad l'_{Pass} := l_{Pass} - b_{Pass} \quad d_{Kritisch1} := 50 \text{ mm}$$

$$p_m := \frac{2 \cdot K_A \cdot T_{ab} \cdot K_\lambda}{d_{Kritisch1} \cdot h \cdot l'_{Pass} \cdot n_{Pass} \cdot \varphi} = 204.516 \frac{N}{mm^2} \quad p_m < p_{fzul} \quad \text{nach Gl. 12-1}$$

Vorauswahl der Lagergrößen:

(Vorauswahl erfolgte durch Schätzung der wirklichen Lagerbelastungen, Anpassung der Lagerung erfolgte nach Ermittlung der Lagerkräfte)

Festlager Abtriebswelle:

$$P := 6 \text{ kN}$$

$$p := 3$$

$$n_{Antrieb} = (2 \cdot 10^3) \frac{1}{min}$$

$$n := \frac{n_{Antrieb}}{i'_{Gesamt}}$$

$$L_{10h} := 10000 \text{ hr}$$

$$C_{erf} := P \cdot \sqrt[p]{\frac{n \cdot L_{10h}}{10^6}}$$

nach Gl. 14.1
(Faktor 60
weggelassen
wegen den
Einheiten)

$$C_{erf} = 29.574 \text{ kN}$$

Festlager Antriebswelle:

$$P := 2.5 \text{ kN}$$

$$p := 3$$

$$n := n_{Antrieb}$$

$$L_{10h} := 10000 \text{ hr}$$

$$C_{erf} := P \cdot \sqrt[p]{\frac{n \cdot L_{10h}}{10^6}}$$

$$C_{erf} = 26.566 \text{ kN}$$

Festlager Vorgelegewelle:

$$P := 4 \text{ kN}$$

$$p := 3$$

$$n := \frac{n_{Antrieb}}{i'_1}$$

$$L_{10h} := 10000 \text{ hr}$$

$$C_{erf} := P \cdot \sqrt[p]{\frac{n \cdot L_{10h}}{10^6}}$$

nach Gl. 14.1

$$C_{erf} = 28.321 \text{ kN}$$

Loslager An-/Abtriebswelle:

$$P := 6 \text{ kN}$$

$$p := 3$$

eig.:
3,3333

$$n := n_{Antrieb} - \frac{n_{Antrieb}}{i'_{Gesamt}}$$

$$L_{10h} := 10000 \text{ hr}$$

$$C_{erf} := P \cdot \sqrt[p]{\frac{n \cdot L_{10h}}{10^6}}$$

$$C_{erf} = 61.564 \text{ kN}$$

Loslager Vorgelegewelle:

$$P := 6.5 \text{ kN} \quad p := 3 \quad \text{eig.: } 3,3333 \quad n := \frac{n_{\text{Antrieb}}}{i'_1} \quad L_{10h} := 10000 \text{ hr}$$

$$C_{\text{erf}} := P \cdot \sqrt[p]{\frac{n \cdot L_{10h}}{10^6}} \quad C_{\text{erf}} = 46.021 \text{ kN}$$

Ermittlung der Lagerkräfte aus Freischnitt:

Lagerkräfte an der Antriebswelle:

Antriebsmoment $T_{an} = 50 \text{ N} \cdot \text{m}$

Wälzkreisdurchmesser $d_{w1} = 67.408 \text{ mm}$

Wirkabstände $X_1 := 33 \text{ mm} \quad X_2 := 26 \text{ mm}$

Zahnrad Z1 $F_{tZ1} := \frac{2 \cdot T_{an}}{d_{w1}}$ Umfangskraft nach Gl. 21.70 $F_{tZ1} = 1.484 \text{ kN}$

$F_{aZ1} := F_{tZ1} \cdot \tan(\beta)$ Axialkraft nach Gl. 21.72 $F_{aZ1} = 0.54 \text{ kN}$

$F_{rZ1} := \frac{(F_{tZ1} \cdot \tan(\alpha_n))}{\cos(\beta)}$ Radialkraft nach Gl. 21.71 $F_{rZ1} = 0.575 \text{ kN}$

Loslager $F_{L1y} := \frac{F_{tZ1} \cdot X_2}{X_1 + X_2}$ $F_{L1y} = 0.654 \text{ kN}$

$F_{L1z} := \frac{-F_{aZ1} \cdot \frac{d_{w1}}{2} + F_{rZ1} \cdot X_1}{X_1 + X_2}$ $F_{L1z} = 0.013 \text{ kN}$

Festlager $F_{F1x} := F_{aZ1}$ $F_{F1x} = 0.54 \text{ kN}$

$F_{F1y} := F_{tZ1} - F_{L1y}$ $F_{F1y} = 0.83 \text{ kN}$

$F_{F1z} := F_{rZ1} - F_{L1z}$ $F_{F1z} = 0.562 \text{ kN}$

Lagerkräfte an der Vorgelegewelle:

Moment an der Vorgelegewelle: $T_{Vorgelege} = 169.05 \text{ N} \cdot \text{m}$

Wälzkreisdurchmesser $d_{w2} = 227.902 \text{ mm}$ $d_{w3} = 74.492 \text{ mm}$

Wirkabstände $X_3 := 38 \text{ mm}$ $X_4 := 33 \text{ mm}$ $X_5 := 49 \text{ mm}$

Zahnrad Z2 $F_{aZ2} := -F_{aZ1}$ $F_{tZ2} := -F_{tZ1}$ $F_{rZ2} := -F_{rZ1}$

Zahnrad Z3

$$F_{tZ3} := \frac{2 \cdot T_{Vorgelege}}{d_{w3}} \quad F_{tZ3} = 4.539 \text{ kN}$$

$$F_{aZ3} := F_{tZ3} \cdot \tan(\beta) \quad F_{aZ3} = 1.652 \text{ kN}$$

$$F_{rZ3} := \frac{F_{tZ3} \cdot \tan(\alpha_n)}{\cos(\beta)} \quad F_{rZ3} = 1.758 \text{ kN}$$

Loslager

$$F_{L2y} := -\frac{F_{tZ2} \cdot X_3 + F_{tZ3} \cdot (X_3 + X_4)}{X_3 + X_4 + X_5} \quad F_{L2y} = -2.216 \text{ kN}$$

$$F_{L2z} := \frac{-F_{rZ2} \cdot X_3 + F_{aZ2} \cdot \frac{d_{w2}}{2} + F_{rZ3} \cdot (X_3 + X_4) + F_{aZ3} \cdot \frac{d_{w3}}{2}}{X_3 + X_4 + X_5}$$

$$F_{L2z} = 1.222 \text{ kN}$$

Festlager

$$F_{F2x} := F_{aZ3} + F_{aZ2} \quad F_{F2x} = 1.112 \text{ kN}$$

$$F_{F2y} := -F_{tZ2} - F_{tZ3} - F_{L2y} \quad F_{F2y} = -0.84 \text{ kN}$$

$$F_{F2z} := F_{rZ2} - F_{rZ3} + F_{L2z} \quad F_{F2z} = -1.11 \text{ kN}$$

Die Lagerkräfte F_{L2y} , F_{F2y} und F_{F2z} wurden im Freischnitt falsch herum orientiert angenommen, daraus resultiert ihr negativer Wert. Für die weitere Berechnung wird die Orientierung der Kraftvektoren positiv angenommen daher folgt:

$$F_{L2y} := 4.707 \text{ kN}$$

$$F_{F2y} := 0.051 \text{ kN}$$

$$F_{F2z} := 1.303 \text{ kN}$$

Lagerkräfte an der Abtriebswelle:

Bodenkraft	$F_B := 1.5 \text{ kN}$		
Abtriebsmoment	$T_{ab} = 501.064 \text{ N} \cdot \text{m}$		
Wälzkreisdurchmesser	$d_{w4} = 220.817 \text{ mm}$		
Wirkabstände	$X_6 := 42 \text{ mm}$	$X_7 := 52 \text{ mm}$	
Zahnrad Z4	$F_{aZ4} := -F_{aZ3}$	$F_{tZ4} := -F_{tZ3}$	$F_{rZ4} := -F_{rZ3}$
	$F_{tZ4} := \frac{2 \cdot T_{ab}}{d_{w4}}$		$F_{tZ4} = 4.538 \text{ kN}$
	$F_{aZ4} := F_{tZ4} \cdot \tan(\beta)$		$F_{aZ4} = 1.652 \text{ kN}$
	$F_{rZ4} := \frac{F_{tZ4} \cdot \tan(\alpha_n)}{\cos(\beta)}$		$F_{rZ4} = 1.758 \text{ kN}$
Loslager	$F_{L3y} := \frac{-F_{tZ4} \cdot X_7}{X_6 + X_7}$		$F_{L3y} = -2.511 \text{ kN}$
	$F_{L3z} := \frac{-F_{rZ4} \cdot X_7 - F_{aZ4} \cdot \frac{d_{w4}}{2}}{X_6 + X_7}$		$F_{L3z} = -2.913 \text{ kN}$
Festlager	$F_{F3x} := -F_{aZ4} + F_B$		$F_{F3x} = -0.152 \text{ kN}$
	$F_{F3y} := -F_{tZ4} - F_{L3y}$		$F_{F3y} = -2.028 \text{ kN}$
	$F_{F3z} := -F_{rZ4} - F_{L3z}$		$F_{F3z} = 1.155 \text{ kN}$
<p>Die Lagerkräfte F_{L3y}, F_{L3z} und F_{F3y} wurden im Freischnitt falsch herum orientiert angenommen, daraus resultiert ihr negativer Wert. Für die weitere Berechnung wird die Orientierung der Kraftvektoren positiv angenommen daher folgt:</p> <p>$F_{L3y} := 3.564 \text{ kN}$ $F_{L3z} := 3.176 \text{ kN}$ $F_{F3y} := 3.406 \text{ kN}$</p>			

Wälzlagerberechnung:

Festlager Antriebswelle:

$$C_0 := 14.3 \text{ kN}$$

aus WLK

$$F_a := |F_{F1x}| = 0.54 \text{ kN}$$

aus Freischnitt

$$F_r := \sqrt{F_{F1y}^2 + F_{F1z}^2} = 1.002 \text{ kN}$$

$$\frac{F_a}{C_0} = 0.038$$

$$\frac{F_r}{F_r} = 0.539$$

nach Seite 538

daraus ergibt sich nach TB
14-3a X und Y zu:

$$X := 1$$

$$Y := 0.55$$

$$e := 1.14$$

aus TB14-3a

$$P := X \cdot F_r + Y \cdot F_a = 1.299 \text{ kN}$$

nach Gl. 14.6

$$p := 3 \text{ für Kugellager}$$

nach Seite 563

$$C := 21.6 \text{ kN}$$

nach WLK

$$L_{10h} := \frac{10^6}{n_{\text{Antrieb}}} \cdot \left(\frac{C}{P} \right)^p = 38317 \text{ hr}$$

nach Gl. 14.5a (Faktor 60
weggelassen wegen den
Einheiten)

Loslager Antriebswelle:

$$F_a := 0 \text{ kN} \text{ aus Freischnitt}$$

$$F_r := \sqrt{(F_{L1y} + F_{L1z})^2} = 0.667 \text{ kN}$$

$$P := F_r = 0.667 \text{ kN}$$

Seite 538

$$p := \frac{10}{3}$$

für Rollenlager

$$C := 14 \text{ kN}$$

aus WLK

$$L_{10h} := \frac{10^6}{n_{\text{Antrieb}} - \frac{n_{\text{Antrieb}}}{i'_{\text{Gesamt}}}} \cdot \left(\frac{C}{P} \right)^p = 236491 \text{ hr}$$

Die Drehzahl am Loslager ergibt sich
durch die gleiche Drehrichtung der Wellen

$$\text{zu: } n_{\text{Antrieb}} - \frac{n_{\text{Antrieb}}}{i'_{\text{Gesamt}}} = (1.8 \cdot 10^3) \frac{1}{\text{min}}$$

$$\text{mit } i'_{\text{Gesamt}} = 10.021$$

Festlager Vorgelegewelle:

$$C_0 := 28 \text{ kN} \quad \text{aus WLK}$$

$$F_a := |F_{F2x}| = 1.112 \text{ kN} \quad \text{aus Freischnitt}$$

$$F_r := \sqrt{F_{F2y}^2 + F_{F2z}^2} = 1.304 \text{ kN}$$

$$\frac{F_a}{C_0} = 0.04 \quad \frac{F_r}{F_r} = 0.853$$

weil $0.02 < \frac{F_a}{C_0} \leq 0.5$ ergibt sich e zu:

$$e := 0.51 \cdot \left(\frac{F_a}{C_0} \right)^{0.233} = 0.241 \quad \text{aus TB14-3a Fußnote}$$

daraus ergibt sich nach TB 14-3a X und Y zu:
(weil $F_a/F_r > e$ ist, siehe Fußnote)

$$X := 0.56$$

$$Y := 0.866 \left(\frac{F_a}{C_0} \right)^{-0.229} = 1.813$$

$$P := X \cdot F_r + Y \cdot F_a = 2.746 \text{ kN}$$

$$p := 3 \quad \text{für Kugellager}$$

$$C := 40 \text{ kN} \quad \text{aus WLK}$$

$$L_{10h} := \frac{10^6}{\frac{n_{\text{Antrieb}}}{i'_1}} \cdot \left(\frac{C}{P} \right)^p = 87072 \text{ hr}$$

$$\text{mit } i'_1 = 3.381$$

$$n_{\text{Antrieb}} = (2 \cdot 10^3) \frac{1}{\text{min}}$$

Loslager Vorgelegewelle:

$$F_a := 0 \text{ kN}$$

aus Freischnitt

$$F_r := \sqrt{F_{L2y}^2 + F_{L2z}^2} = 4.863 \text{ kN}$$

$$P := F_r = 4.863 \text{ kN}$$

$$p := \frac{10}{3}$$

für Zylinderrollenlager

$$C := 35.8 \text{ kN}$$

aus WLK

$$L_{10h} := \frac{10^6}{\frac{n_{\text{Antrieb}}}{i'_1}} \cdot \left(\frac{C}{P} \right)^p = 21866 \text{ hr}$$

Festlager Abtriebswelle:

$$C_0 := 47.5 \text{ kN}$$

aus WLK

$$F_a := |F_{F3x}| = 0.152 \text{ kN}$$

aus Freischnitt

$$F_r := \sqrt{(F_{L1y} + F_{L3y})^2 + (F_{L1z} + F_{L3z})^2} = 5.288 \text{ kN}$$

$$\frac{F_a}{C_0} = 0.003 \quad \frac{F_r}{C_0} = 0.029 \quad \text{Seite 538}$$

daraus ergibt sich nach TB 14-3a X und Y zu:

$$X := 1$$

$$Y := 0.55$$

$$e := 1.14$$

aus TB14-3a

$$P := X \cdot F_r + Y \cdot F_a = 5.371 \text{ kN} \quad \text{nach Gl. 14.6}$$

$$p := 3 \quad \text{für Kugellager} \quad \text{nach Seite 563}$$

$$C := 60 \text{ kN} \quad \text{nach WLK}$$

$$L_{10h} := \frac{10^6}{n_{\text{Abtrieb}}} \cdot \left(\frac{C}{P} \right)^p = 116409 \text{ hr}$$

$$\text{mit } n_{\text{Abtrieb}} := \frac{n_{\text{Antrieb}}}{i'_{\text{Gesamt}}}$$

nach Gl. 14.5a

Loslager Abtriebswelle:

$$F_a := 0 \text{ kN} \quad \text{aus Freischnitt}$$

$$F_r := \sqrt{F_{L3y}^2 + F_{L3z}^2} = 4.774 \text{ kN}$$

$$P := F_r = 4.774 \text{ kN} \quad \text{Seite 538}$$

$$p := 3 \quad \text{für Kugellager}$$

$$C := 69.5 \text{ kN} \quad \text{aus WLK}$$

$$L_{10h} := \frac{10^6}{n_{\text{Antrieb}} - \frac{n_{\text{Antrieb}}}{i'_{\text{Gesamt}}}} \cdot \left(\frac{C}{P} \right)^p = 28565 \text{ hr}$$

mit $i'_{\text{Gesamt}} = 10.021$

Die Drehzahl am Loslager ergibt sich durch die gleiche Drehrichtung der Wellen zu: $n_{\text{Antrieb}} - \frac{n_{\text{Antrieb}}}{i'_{\text{Gesamt}}} = (1.8 \cdot 10^3) \frac{1}{\text{min}}$

Zusammenfassung Lebensdauern:

Antriebswelle - Loslager	$L_{10h} := 21221 \text{ hr}$
Antriebswelle - Festlager	$L_{10h} := 19374 \text{ hr}$
Vorgelegewelle - Loslager	$L_{10h} := 15981 \text{ hr}$
Vorgelegewelle - Festlager	$L_{10h} := 36486 \text{ hr}$
Abtriebswelle - Loslager	$L_{10h} := 28568 \text{ hr}$
Abtriebswelle - Festlager	$L_{10h} := 80256 \text{ hr}$

Festigkeitsnachweis der Wellen:

Antriebswelle:

Kraft- und Momentenverläufe (siehe auch Isometrie der Antriebswelle):

Y-Z-Ebene:

X-Y-Ebene:

X-Z-Ebene:

Schnitt entlang s_1 (positives Schnittufer)

$$M_t(s_1) := 0$$

$$s_{1max} := 45.3 \cdot \text{mm}$$

$$N_x := 0$$

$$Q_y(s_1) := -F_{L1y} = -0.654 \text{ kN}$$

$$M_{b_z}(s_1) := -F_{L1y} \cdot s_1$$

$$M_{b_z}(s_{1max}) = -29.615 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$M_{b_z}(s_{1min}) = 0 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$s_{1min} := 0 \cdot \text{mm}$$

$$N_x := 0$$

$$Q_z(s_1) := -F_{L1z} = -0.013 \text{ kN}$$

$$M_{b_y}(s_1) := -F_{L1z} \cdot s_1$$

$$M_{b_y}(s_{1max}) = -0.586 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$M_{b_y}(s_{1min}) = 0 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Schnitt entlang s_2 (negatives Schnittufer)

$$s_{2max} := 52.5 \cdot \text{mm} \quad s_{2min} := 0 \cdot \text{mm}$$

$$M_t(s_2) := 50 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$N_x := -F_{F1x} = -0.54 \text{ kN}$$

$$N_x := -F_{F1x} = -0.54 \text{ kN}$$

$$Q_y(s_2) := F_{F1y} = 0.83 \text{ kN}$$

$$Q_z(s_2) := F_{F1z} = 0.562 \text{ kN}$$

$$Mb_z(s_2) := -F_{F1y} \cdot s_2$$

$$Mb_y(s_2) := -F_{F1z} \cdot s_2$$

$$Mb_z(s_{2max}) = -43.562 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$Mb_y(s_{2max}) = -29.487 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$Mb_z(s_{2min}) = 0 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$Mb_y(s_{2min}) = 0 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Statischer & dynamischer Festigkeitsnachweis Antriebswelle:

$$R_z := 6.3 \text{ } \mu\text{m}$$

$$d_{Kritisch1} := 25 \text{ mm}$$

$$R_m := 1100 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$W_{b1} := \frac{\pi}{32} \cdot (d_{Kritisch1})^3 = 1533.98 \text{ mm}^3$$

$$W_{t1} := \frac{\pi}{16} \cdot (d_{Kritisch1})^3 = 3067.96 \text{ mm}^3$$

Flächenträgheitsmoment aus TB11-3

$$Mb_{res1} := \sqrt{Mb_z(s_{2max})^2 + Mb_y(s_{2max})^2}$$

$$T_{max} := T_{an} \quad \text{da das Anfahren mit Anlaufkupplung erfolgt}$$

$$R_{p0.2N} := 900 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

nach TB 1-1

$$K_t := 1 - 0.34 \cdot \log\left(\frac{d_{Kritisch1}}{16 \text{ mm}}\right) = 0.934$$

nach TB 3-11

Biegung:

$$\sigma_{bmax} := \frac{Mb_{res1}}{W_{b1}} = 34.293 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

nach Bild 3-2

$$\sigma_{ba} := \frac{K_A \cdot Mb_{res1}}{W_{b1}} = 68.585 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Torsion:

$$\tau_{tmax} := \frac{T_{an}}{W_{t1}} = 16.297 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\tau_{ta} := \frac{K_A \cdot T_{an}}{W_{t1}} = 32.595 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{bF} := 1.2 \cdot R_{p0.2N} \cdot K_t = 1008.829 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

nach Flowchart Bild 3-31

$$\tau_{tF} := \frac{1.2 \cdot R_{p0.2N} \cdot K_t}{\sqrt{3}} = 582.448 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{bWN} := 550 \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_{tWN} := 330 \frac{N}{mm^2}$$

aus TB 1-1

$$\beta_{kb} := 2.5$$

$$\beta_{kt} := 2.2$$

aus TB 3-8 mit $R_m = 1100 N/mm^2$, wegen Passfeder

$$K_g := 1 - 0.2 \cdot \frac{\log\left(\frac{d_{Kritisch1}}{7.5 \text{ mm}}\right)}{\log(20)} = 0.92$$

aus TB 3-11c

$$K_{0\sigma} := 1 - 0.22 \log\left(\frac{R_z}{\mu m}\right) \cdot \left(\log\left(\frac{R_m}{20 \frac{N}{mm^2}}\right) - 1\right) = 0.87$$

aus TB 3-10

aus TB 3-10

$$K_{0\tau} := 0.575 \cdot K_{0\sigma} + 0.425 = 0.925$$

$$K_V := 1$$

aus TB 3-12

$$K_{Db} := \left(\frac{\beta_{kb}}{K_g} + \frac{1}{K_{0\sigma}} - 1\right) \cdot \frac{1}{K_V} = 2.868$$

$$K_{Dt} := \left(\frac{\beta_{kt}}{K_g} + \frac{1}{K_{0\tau}} - 1\right) \cdot \frac{1}{K_V} = 2.473$$

aus Bild 3-27

nach Gl. 3-16

$$\sigma_{bGW} := K_t \cdot \frac{\sigma_{bWN}}{K_{Db}} = 179.121 \frac{N}{mm^2}$$

nach Gl. 3-17

$$\tau_{tGW} := K_t \cdot \frac{\tau_{tWN}}{K_{Dt}} = 124.637 \frac{N}{mm^2}$$

nach Gl. 3-17

$$S_F := \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_{bmax}}{\sigma_{bF}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{tmax}}{\tau_{tF}}\right)^2}} = 22.7$$

nach Bild 3-30

$$S_D := \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_{ba}}{\sigma_{bGW}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{ta}}{\tau_{tGW}}\right)^2}} = 2.2$$

nach Bild 3-31

Ergebnis: Die Antriebswelle ist dauerfest.

Vorgelegewelle:

Kraft- und Momentenverläufe (siehe auch Isometrie der Vorgelegewelle):

Y-Z-Ebene:

X-Y-Ebene:

X-Z-Ebene:

Schnitt entlang s_3 (positives Schnittufer)

$s_{3max} := 49.85 \cdot \text{mm}$

$s_{3min} := 0 \cdot \text{mm}$

$Mt(s_3) := 0$

$N_x := 0$

$N_x := 0$

$Q_y(s_3) := -F_{L2y} = -4.707 \text{ kN}$

$Q_z(s_3) := F_{L2z} = 1.222 \text{ kN}$

$Mb_z(s_3) := -F_{L2y} \cdot s_3$

$Mb_y(s_3) := F_{L2z} \cdot s_3$

$Mb_z(s_{3max}) = -234.644 \text{ N} \cdot \text{m}$

$Mb_y(s_{3max}) = 60.922 \text{ N} \cdot \text{m}$

$Mb_z(s_{3min}) = 0 \text{ N} \cdot \text{m}$

$Mb_y(s_{3min}) = 0 \text{ N} \cdot \text{m}$

Schnitt entlang s_4 (positives Schnittufer)

$s_{4max} := 104.15 \cdot \text{mm}$

$s_{4min} := 0 \cdot \text{mm}$

$N_x := -F_{aZ3} = -1.652 \text{ kN}$

$N_x := -F_{aZ3} = -1.652 \text{ kN}$

$Q_y(s_4) := -F_{L2y} + F_{tZ3} = -0.168 \text{ kN}$

$Q_z(s_4) := F_{L2z} - F_{rZ3} = -0.536 \text{ kN}$

$Mb_z(s_4) := -F_{L2y} \cdot (s_{3max} + s_4) + F_{tZ3} \cdot s_4$

$Mb_y(s_4) := F_{L2z} \cdot (s_{3max} + s_4) - F_{rZ3} \cdot s_4 - F_{aZ3} \cdot \frac{d_{w3}}{2}$

$Mb_z(s_{4max}) = -252.171 \text{ N} \cdot \text{m}$

$Mb_y(s_{4max}) = -56.419 \text{ N} \cdot \text{m}$

$Mb_z(s_{4min}) = -234.644 \text{ N} \cdot \text{m}$

$Mb_y(s_{4min}) = -0.607 \text{ N} \cdot \text{m}$

Y-Z-Ebene:

$Mt(s_4) := T_{Vorgelege} = 169.05 \text{ N} \cdot \text{m}$

Schnitt entlang s_5 (negatives Schnittufer)

$s_{5max} := 48.5 \cdot \text{mm}$

$s_{5min} := 0 \cdot \text{mm}$

$Mt(s_5) := 0$

$N_x := -F_{F2x} = -1.112 \text{ kN}$

$N_x := -F_{F2x} = -1.112 \text{ kN}$

$Q_y(s_5) := -F_{F2y} = -0.051 \text{ kN}$

$Q_z(s_5) := -F_{F2z} = -1.303 \text{ kN}$

$Mb_z(s_5) := -F_{F2y} \cdot s_5$

$Mb_y(s_5) := F_{F2z} \cdot s_5$

$Mb_z(s_{5max}) = -2.474 \text{ N} \cdot \text{m}$

$Mb_y(s_{5max}) = 63.196 \text{ N} \cdot \text{m}$

$Mb_z(s_{5min}) = 0 \text{ N} \cdot \text{m}$

$Mb_y(s_{5min}) = 0 \text{ N} \cdot \text{m}$

Statischer & dynamischer Festigkeitsnachweis Vorgelegewelle:

$$R_z := 6.3 \text{ } \mu\text{m}$$

$$d_{Kritisch2} := 35 \text{ mm}$$

$$R_m := 1100 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$W_{b2} := \frac{\pi}{32} \cdot (d_{Kritisch2})^3 = 4209.24 \text{ mm}^3$$

$$W_{t2} := \frac{\pi}{16} \cdot (d_{Kritisch2})^3 = 8418.49 \text{ mm}^3$$

$$M_{b_{res2}} := \sqrt{M_{b_z}(s_{3max})^2 + M_{b_y}(s_{3max})^2}$$

$$R_{p0.2N} := 900 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{nach TB 1-1}$$

$$K_t := 1 - 0.34 \cdot \log\left(\frac{d_{Kritisch2}}{16 \text{ mm}}\right) = 0.884$$

Biegung

Torsion

$$\sigma_{bmax} := \frac{M_{b_{res2}}}{W_{b2}} = 15.443 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\tau_{tmax} := \frac{T_{Vorgelege}}{W_{t2}} = 20.081 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{ba} := \frac{K_A \cdot M_{b_{res2}}}{W_{b2}} = 30.886 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\tau_{ta} := \frac{K_A \cdot T_{Vorgelege}}{W_{t2}} = 40.162 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{bF} := 1.2 \cdot R_{p0.2N} \cdot K_t = 955.171 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\tau_{tF} := \frac{1.2 \cdot R_{p0.2N} \cdot K_t}{\sqrt{3}} = 551.468 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{bWN} := 550 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\tau_{tWN} := 330 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\beta_{kb} := 2.8$$

$$\beta_{kt} := 2.6 \quad \begin{array}{l} \text{aus TB 3-8 mit} \\ R_m = 1100 \text{ N/mm}^2, \text{ wegen} \\ \text{Sicherungsring} \end{array}$$

$$K_g := 1 - 0.2 \cdot \frac{\log\left(\frac{d_{Kritisch2}}{7.5 \text{ mm}}\right)}{\log(20)} = 0.897$$

aus TB 3-11c

$$K_{0\sigma} := 1 - 0.22 \log\left(\frac{R_z}{\mu\text{m}}\right) \cdot \left(\log\left(\frac{R_m}{20 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}\right) - 1\right) = 0.87$$

aus TB 3-10

$$K_{0\tau} := 0.575 \cdot K_{0\sigma} + 0.425 = 0.925$$

$$K_V := 1 \quad \text{aus TB 3-12}$$

$$K_{Db} := \left(\frac{\beta_{kb}}{K_g} + \frac{1}{K_{0\sigma}} - 1\right) \cdot \frac{1}{K_V} = 3.271$$

$$K_{Dt} := \left(\frac{\beta_{kt}}{K_g} + \frac{1}{K_{0\tau}} - 1\right) \cdot \frac{1}{K_V} = 2.979$$

$$\sigma_{bGW} := K_t \cdot \frac{\sigma_{bWN}}{K_{Db}} = 148.726 \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_{tGW} := K_t \cdot \frac{\tau_{tWN}}{K_{Dt}} = 97.973 \frac{N}{mm^2}$$

$$S_F := \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_{bmax}}{\sigma_{bF}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{tmax}}{\tau_{tF}}\right)^2}} = 25.1$$

$$S_D := \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_{ba}}{\sigma_{bGW}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{ta}}{\tau_{tGW}}\right)^2}} = 2.176$$

Ergebnis: Die Vorgelegewelle ist dauerhaft.

Abtriebswelle:

Kraft- und Momentenverläufe (siehe auch Isometrie der Abtriebswelle):

Y-Z-Ebene:

X-Y-Ebene:

X-Z-Ebene:

Schnitt entlang s_6 (positives Schnittufer)

$$Mt(s_6) := -T_{ab}$$

$$N_x := -F_B = -1.5 \text{ kN}$$

$$N_x := -F_B = -1.5 \text{ kN}$$

$$Q_y(s_6) := 0$$

$$Q_z(s_6) := 0$$

$$Mb_z(s_6) := 0$$

$$Mb_y(s_6) := 0$$

Schnitt entlang s_7 (positives Schnittufer)

$$Mt(s_7) := -T_{ab}$$

$$N_x := -F_B - F_{F3x} = -1.348 \text{ kN}$$

$$N_x := -F_B - F_{F3x} = -1.348 \text{ kN}$$

$$Q_y(s_7) := F_{F3y} = 3.406 \text{ kN}$$

$$Q_z(s_7) := -F_{F3z} = -1.155 \text{ kN}$$

$$Mb_z(s_7) := F_{F3y} \cdot s_7$$

$$Mb_y(s_7) := F_{F3z} \cdot s_7$$

$$Mb_z(s_{7max}) = 175.92 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$Mb_y(s_{7max}) = 59.651 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$Mb_z(s_{7min}) = 0 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$Mb_y(s_{7min}) = 0 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Schnitt entlang s_8 (negatives Schnittufer)

$$s_{8max} := 49.35 \cdot \text{mm} \quad s_{8min} := 0 \cdot \text{mm}$$

$Mt(s_8) := 0$	$N_x := 0$	$N_x := 0$
$Q_y(s_8) := -F_{L3y} = -3.564 \text{ kN}$	$Q_z(s_8) := -F_{L3z} = -3.176 \text{ kN}$	
$Mb_z(s_8) := F_{L3y} \cdot s_8$	$Mb_y(s_8) := -F_{L3z} \cdot s_8$	
$Mb_z(s_{8max}) = 175.883 \text{ N} \cdot \text{m}$	$Mb_y(s_{8max}) = -156.736 \text{ N} \cdot \text{m}$	
$Mb_z(s_{8min}) = 0 \text{ N} \cdot \text{m}$	$Mb_y(s_{8min}) = 0 \text{ N} \cdot \text{m}$	

Statischer & dynamischer Festigkeitsnachweis Abtriebswelle:

$R_z := 6.3 \text{ } \mu\text{m}$	$d_{Kritisch3} := 55 \text{ mm}$	$R_m := 1100 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
$Wb_3 := \frac{\pi}{32} \cdot \left(\frac{d_{Kritisch3}^4 - (42 \text{ mm})^4}{d_{Kritisch3}} \right) = 10779.46 \text{ mm}^3$		
$W_{t3} := \frac{\pi}{16} \cdot \left(\frac{d_{Kritisch3}^4 - (42 \text{ mm})^4}{d_{Kritisch3}} \right) = 21558.93 \text{ mm}^3$		
$Mb_{res3} := \sqrt{Mb_z(s_{8max})^2 + Mb_y(s_{8max})^2}$		
$R_{p0.2N} := 900 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	nach TB 1-1	$K_t := 1 - 0.34 \cdot \log\left(\frac{d_{Kritisch3}}{16 \text{ mm}}\right) = 0.818$
Biegung		Torsion
$\sigma_{bmax} := \frac{Mb_{res3}}{Wb_3} = 21.855 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$		$\tau_{tmax} := \frac{T_{ab}}{W_{t3}} = 23.242 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
$\sigma_{ba} := \frac{K_A \cdot Mb_{res3}}{Wb_3} = 43.71 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$		$\tau_{ta} := \frac{K_A \cdot T_{ab}}{W_{t3}} = 46.483 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
$\sigma_{bF} := 1.2 \cdot R_{p0.2N} \cdot K_t = 883.092 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$		$\tau_{tF} := \frac{1.2 \cdot R_{p0.2N} \cdot K_t}{\sqrt{3}} = 509.853 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
$\sigma_{bWN} := 440 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$		$\tau_{tWN} := 330 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
aus TB 3-9b mit $R_m = 1100 \text{ N/mm}^2$		
$\beta_{LH} := 2.3$	$\beta_{LH} := 1.55$	wegen Pressverband

$$K_g := 1 - 0.2 \cdot \frac{\log\left(\frac{d_{Kritisch3}}{7.5 \text{ mm}}\right)}{\log(20)} = 0.867 \quad \text{aus TB 3-11c}$$

$$K_{0\sigma} := 1 - 0.22 \log\left(\frac{Rz}{\mu\text{m}}\right) \cdot \left(\log\left(\frac{Rm}{20 \frac{N}{\text{mm}^2}}\right) - 1\right) = 0.87 \quad \text{aus TB 3-10}$$

$$K_V := 1 \quad \text{aus TB 3-12}$$

$$K_{0\tau} := 0.575 \cdot K_{0\sigma} + 0.425 = 0.925$$

$$K_{Db} := \left(\frac{\beta_{kb}}{K_g} + \frac{1}{K_{0\sigma}} - 1\right) \cdot \frac{1}{K_V} = 2.803$$

$$K_{Dt} := \left(\frac{\beta_{kt}}{K_g} + \frac{1}{K_{0\tau}} - 1\right) \cdot \frac{1}{K_V} = 1.869$$

$$\sigma_{bGW} := K_t \cdot \frac{\sigma_{bWN}}{K_{Db}} = 128.375 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$\tau_{tGW} := K_t \cdot \frac{\tau_{tWN}}{K_{Dt}} = 144.394 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$S_F := \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_{bmax}}{\sigma_{bF}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{tmax}}{\tau_{tF}}\right)^2}} = 19.279$$

$$S_D := \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_{ba}}{\sigma_{bGW}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{ta}}{\tau_{tGW}}\right)^2}} = 2.134$$

Ergebnis: Die Abtriebswelle ist dauerfest.

Berechnung der Presspassung des Zahnrads der Abtriebswelle:

$$D_F := 61 \text{ mm} \quad l_F := 40 \text{ mm} \quad \mu := 0.18 \quad S_H := 2 \quad D_{Aa} := 139.914 \text{ mm}$$

$$F_l := 2524 \text{ N} \quad F_t := 6970 \text{ N}$$

$$F_{res} := \sqrt{F_l^2 + F_t^2} = 7.413 \text{ kN}$$

$$F_{Rres} := S_H \cdot F_{res} = 14.826 \text{ kN} \quad A_F := D_F \cdot l_F \cdot \pi$$

$$p_{Fk} := \frac{F_{Rres}}{A_F \cdot \mu} = 10.745 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{Erforderliche kleinste Fugenpressung}$$

$$Q_A := \frac{D_F}{D_{Aa}} = 0.436 \quad R_e := 900 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{Für 42CrMo4} \quad S_F := 1.5$$

$$\frac{2 \cdot p_{Fk}}{1 - Q_A^2} = 26.534 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{R_e}{S_F} = 692.82 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$26.534 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \leq 692.82 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{Werkstoff geeignet}$$

Kleinstes Haftmaß:

$$E_A := 210000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{Aus TB 1-1} \quad K := 2.5 \quad \text{Aus TB 12-7}$$

$$Z_k := \frac{p_{Fk} \cdot D_F}{E_A} \cdot K = 7.803 \text{ }\mu\text{m}$$

$$R_{ZAi} := 6.3 \text{ }\mu\text{m} \quad R_{ZLa} := 4 \text{ }\mu\text{m} \quad \text{Aus TB 2-12}$$

$$G := 0.8 \cdot (R_{ZAi} + R_{ZLa}) = 8.24 \text{ }\mu\text{m}$$

$$\ddot{U}_u := Z_k + G = 16.043 \text{ }\mu\text{m} \quad \text{Messbares kleinstes zulässiges Übermaß}$$

$$p_{Fg} := \frac{R_e}{S_F} \cdot \frac{1 - \psi_A}{\sqrt{3}} = 280.564 \frac{N}{mm^2} \quad \text{GröÙte zul. Flächenpressung des Zahnrads}$$

$$p_{FgI} := \frac{R_e}{S_F} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} = 692.82 \frac{N}{mm^2} \quad \text{GröÙte zul. Flächenpressung der Welle}$$

$$Z_G := \frac{p_{Fg} \cdot D_F}{E_A} \cdot K = 203.743 \mu m \quad \text{GröÙtes zulässiges HaftmaÙ}$$

$$\ddot{U}_{ozul} := Z_G + G = 211.983 \mu m \quad \text{Messbares gröÙtes zulässiges ÜbermaÙ}$$

$$\ddot{U}_{uzul} := Z_k + G = 16.043 \mu m \quad \text{Messbares kleinstes zulässiges ÜbermaÙ}$$

Für Passung H8/u8 für D=61mm:

$$\begin{aligned} EI &:= 0 \mu m & ei &:= 87 \mu m \\ ES &:= 46 \mu m & es &:= 133 \mu m \end{aligned}$$

$$\ddot{U}_u := ei - ES = 41 \mu m \quad \text{muss größer sein als} \quad \ddot{U}_{uzul} = 16.043 \mu m$$

$$\ddot{U}_o := es - EI = 133 \mu m \quad \text{muss kleiner sein als} \quad \ddot{U}_{ozul} = 211.983 \mu m$$

Die Passung H8/u8 ist geeignet!

Berechnung der Presspassung des Zahnrads der Vorgelegewelle:

$$D_F := 37 \text{ mm} \quad l_F := 40 \text{ mm} \quad \mu := 0.18 \quad S_H := 2 \quad D_{Aa} := 138.424 \text{ mm}$$

$$F_l := 793 \text{ N} \quad F_t := 2179 \text{ N}$$

$$F_{res} := \sqrt{F_l^2 + F_t^2} = 2.319 \text{ kN} \quad \text{nach Seite 432 f.}$$

$$F_{Rres} := S_H \cdot F_{res} = 4.638 \text{ kN} \quad A_F := D_F \cdot l_F \cdot \pi$$

$$p_{Fk} := \frac{F_{Rres}}{A_F \cdot \mu} = 5.541 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{Erforderliche kleinste Fugenpressung} \quad \text{nach Gl. 12.10}$$

$$Q_A := \frac{D_F}{D_{Aa}} = 0.267 \quad R_e := 900 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{Für 42CrMo4} \quad S_F := 1.5$$

$$\frac{2 \cdot p_{Fk}}{1 - Q_A^2} = 11.935 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{R_e}{S_F} = 692.82 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$11.935 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \leq 692.82 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{Werkstoff geeignet}$$

Kleinstes Haftmaß:

$$E_A := 210000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{Aus TB 1-1} \quad K := 2.1 \quad \text{Aus TB 12-7}$$

$$Z_k := \frac{p_{Fk} \cdot D_F}{E_A} \cdot K = 2.05 \text{ }\mu\text{m}$$

$$R_{ZAi} := 6.3 \text{ }\mu\text{m} \quad R_{ZLa} := 4 \text{ }\mu\text{m} \quad \text{Aus TB 2-12}$$

$$G := 0.8 \cdot (R_{ZAi} + R_{ZLa}) = 8.24 \text{ }\mu\text{m}$$

$$\ddot{U}_u := Z_k + G = 10.29 \text{ }\mu\text{m} \quad \text{Messbares kleinstes zulässiges Übermaß}$$

$$p_{res} := \frac{R_e}{S_F} \cdot \frac{1 - Q_A^2}{2} = 321.66 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{GröÖte zul. Flächenpressung des Zahnrads}$$

$$p_{Fg} = \frac{S_F}{\sqrt{3}} \quad \text{mm}^2$$

$$p_{Fgl} := \frac{R_e}{S_F} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} = 692.82 \frac{N}{\text{mm}^2} \quad \text{GröÙte zul. Flächenpressung der Welle}$$

$$Z_G := \frac{p_{Fg} \cdot D_F}{E_A} \cdot K = 119.014 \mu\text{m} \quad \text{Größtes zulässiges Haftmaß}$$

$$\ddot{U}_{ozul} := Z_G + G = 127.254 \mu\text{m} \quad \text{Messbares größtes zulässiges Übermaß}$$

$$\ddot{U}_{uzul} := Z_k + G = 10.29 \mu\text{m} \quad \text{Messbares kleinstes zulässiges Übermaß}$$

Für Passung H8/u8 für D=37mm:

$$\begin{array}{ll} EI := 0 \mu\text{m} & ei := 60 \mu\text{m} \\ ES := 39 \mu\text{m} & es := 99 \mu\text{m} \end{array}$$

$$\ddot{U}_u := ei - ES = 21 \mu\text{m} \quad \text{muss größer sein als} \quad \ddot{U}_{uzul} = 10.29 \mu\text{m}$$

$$\ddot{U}_o := es - EI = 99 \mu\text{m} \quad \text{muss kleiner sein als} \quad \ddot{U}_{ozul} = 127.254 \mu\text{m}$$

Die Passung H8/u8 ist geeignet!

Schmierstoffberechnung

Für Auslegung eines Schmierstoffes für das Getriebe muss zuerst die benötigte kinematische Nennviskosität des Schmieröles bestimmt werden. Diese erhalten wir über TB 20-7 a) mit Hilfe des Kraft-Geschwindigkeits-Faktors $\frac{k_s}{v}$. Es wird die Umfangsgeschwindigkeit und Durchmesser von Zahnrad 4 gewählt.

$$u := \frac{z_4}{z_3} \quad n_{Abtrieb} := \frac{n_{Antrieb}}{i'_{Gesamt}}$$

$$\frac{k_s}{v} := \left(3 \cdot \frac{F_{tZ4}}{b_4 \cdot d_4} \cdot \frac{u+1}{u} \right) \cdot \frac{1}{\pi \cdot d_4 \cdot n_{Abtrieb}} = 1.429 \frac{s}{m} \cdot MPa$$

Durch das Ablesen von TB 20-7 a) ergibt sich ca. ein Wert von: $\nu_{40} := 2.3 \cdot 10^2 \cdot \frac{mm^2}{s}$

Gewähltes Schmieröl:

DIN 51517 - CLP 220: Umlaufschmieröl auf Basis eines Mineralöls (C) mit Zusatzstoffen für erhöhten Korrosionsschutz, Alterungsbeständigkeit (L), sowie Herabsetzung der Reibung und des

Verschleißes (P).

Geeignet für kinematische Viskositäten von $\nu_{40} := 198 \dots 242 \frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$ - ISO VG 220 (220).