

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: $F_B := 3000 \text{ N}$	Schaltdrehzahl: $n_s := 1400 \text{ rpm}$	Dauerfestigkeitsschubspannung: $\tau_{Tzul} := 50 \frac{N}{mm^2}$	(42CrMo4)
Antriebsdrehzahl: $n_{Antrieb} := 2000 \frac{1}{min}$			

Übersetzungsverhältnis:

Antriebsmoment: $T_{an} := 50 \text{ N} \cdot \text{m}$	Theoretisch benötigte Übersetzungen: $i_1 := 3.1$ $i_{Gesamt} := i_1 \cdot i_2$	$i_2 := 3.226$ $i_{Gesamt} = 10.001$	orientiert an TB 21-11
Errechnete Übersetzungen (siehe Zahnraddaten): $i'_1 := 3.1$ $i'_{Gesamt} := i'_1 \cdot i'_2$		$i'_2 := 3.23$ $i'_{Gesamt} = 10.013$	
Moment der Vorgelegewelle: $T_{Vorgelege} := T_{an} \cdot i'_{Gesamt}$		$T_{Vorgelege} = 155 \text{ N} \cdot \text{m}$	
Abtriebsmoment: $T_{ab} := T_{an} \cdot i'_{Gesamt}$		$T_{ab} = 500.65 \text{ N} \cdot \text{m}$	

Fliehkraftkupplung:

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

$$r_{FK} := 39 \text{ mm} \quad \mu_0 := 0.9$$

$$\rho_{Kupfer} := 8960 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \Delta l := 2.5 \text{ mm}$$

$$d_R := 130 \text{ mm} \quad V_{FK} := 61 \text{ cm}^3$$

Masse eines Fliehkörpers: $m_{FK} := V_{FK} \cdot \rho_{Kupfer}$ $m_{FK} = 0.547 \text{ kg}$

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

Bei Schaltdrehzahl:

Fliehkraft: $F_{Flieh} := m_{FK} \cdot r_{FK} \cdot \omega_s^2$ $F_{Flieh} = 458.159 \text{ N}$

Kontaktkraft: $F_N := (F_{Flieh} - 2 \cdot F_F)$ $F_N = 428.159 \text{ N}$

Reibkraft eines Fliehkörpers: $F_R := \mu_0 \cdot F_N$ $F_R = 385.343 \text{ N}$

Reib-/Schaltmoment: $T_R := N_{FK} \cdot F_R \cdot \frac{d_R}{2}$ $T_R = 50.095 \text{ N} \cdot \text{m}$

Entwurfsdurchmesser:

Antriebswelle:

$$d_{min1} := \sqrt[3]{\frac{(16 \cdot T_{an} \cdot K_A)}{\pi \cdot \tau_{Tzul}}}$$

$$d_{min1} = 21.677 \text{ mm}$$

Gewählt: $d_{W1} := 25 \text{ mm}$

Vorgelegewelle:

$$d_{min2} := \sqrt[3]{\frac{(16 \cdot T_{Vorgelege} \cdot K_A)}{\pi \cdot \tau_{Tzul}}}$$

$$d_{min2} = 31.607 \text{ mm}$$

Gewählt: $d_{W2} := 35 \text{ mm}$

Abtriebswelle:

$$d_{min3} := \sqrt[3]{\frac{(16 \cdot T_{ab} \cdot K_A)}{\pi \cdot \tau_{Tzul}}}$$

$$d_{min3} = 46.722 \text{ mm}$$

Gewählt: $d_{W3} := 50 \text{ mm}$ **Zahnraddaten:**

Ritzelzähnezahlen:

$$z_1 := 29$$

$$z_3 := 28$$

$$z_2 := 90$$

$$z_4 := 90$$

$$i'_1 := \frac{z_2}{z_1} = 3.103$$

$$i'_2 := \frac{z_4}{z_3} = 3.214$$

Damit ist $i'_1 \sim i_1$ und $i'_2 \sim i_2$

$$i'_{ges} := i'_1 \cdot i'_2 = 9.975$$

orientiert an TB 21-13

Modul 1,2:

$$m_{n12} := \frac{(1.8 \cdot d_{W1} \cdot \cos(\beta))}{z_1 - 2.5}$$

$$m_{n12} = 1.596 \text{ mm}$$

nach Gl. 21-63

Gerundet:

$$m_{n12} := 1.5 \text{ mm}$$

nach TB 21-1

Teilkreisdurchmesser 1,2:

$$d_1 := \frac{(z_1 \cdot m_{n12})}{\cos(\beta)}$$

$$d_1 = 46.292 \text{ mm}$$

nach Gl. 21-38

$$d_2 := \frac{(z_2 \cdot m_{n12})}{\cos(\beta)}$$

$$d_2 = 143.664 \text{ mm}$$

Zahnradbreite 1,2:

$$\text{Zahnrad Z1: } b_1 := \frac{(2 \cdot T_{an})}{d_1^2 B_{zul}} \quad b_1 = 11.666 \text{ mm} \quad \text{nach Vereinbarung}$$

Gewählt: $b_1 := 40 \text{ mm}$ gewählt nach TB-21-14 b.)

$$b_2 := b_1$$

Null-Achsabstand 1,2:

$$a_{d1} := \frac{(d_1 + d_2)}{2} \quad a_{d1} = 94.978 \text{ mm} \quad \text{nach Gl. 21-8}$$

Modul 3,4:

$$m_{n34} := \frac{(2 \cdot a_{d1} \cdot \cos(\beta))}{(1 + i_2) \cdot z_3} \quad m_{n34} = 1.509 \text{ mm} \quad \text{nach Gl. 21-64}$$

Gerundet: $m_{n34} := 1.5 \text{ mm}$ nach TB 21-1

Teilkreisdurchmesser 3,4:

$$d_3 := \frac{(z_3 \cdot m_{n34})}{\cos(\beta)} \quad d_3 = 44.695 \text{ mm} \quad \text{nach Gl. 21-38}$$

$$d_4 := \frac{(z_4 \cdot m_{n34})}{\cos(\beta)} \quad d_4 = 143.664 \text{ mm}$$

Zahnradbreite 3,4:

$$\text{Zahnrad Z3: } b_3 := \frac{(2 \cdot T_{Vorgelege})}{d_3^2 B_{zul}} \quad b_3 = 38.795 \text{ mm} \quad \text{nach Vereinbarung}$$

$$\text{Gewählt: } b_3 := 40 \text{ mm} \quad \text{gewählt nach TB-21-14 b.)}$$

$$b_4 := b_3$$

Null-Achsabstand 3,4:

$$a_{d2} := \frac{(d_3 + d_4)}{2} \quad a_{d2} = 94.18 \text{ mm} \quad a_{d1} = 94.978 \text{ mm} \quad \text{nach Gl. 21-8}$$

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

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

Profilverschiebung:

Stirneingriffswinkel:

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

Betriebseingriffswinkel:

$$\alpha_{wt} := \cos\left(\cos(\alpha_t) \cdot \frac{a_{d1}}{a_{d2}}\right) \cdot \frac{360^\circ}{2 \cdot \pi} \quad \alpha_{wt} = 19.882^\circ \quad \text{nach Gl. 21-66}$$

Summe Profilverschiebungsfaktoren:

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

$$\text{inv}\alpha_{wt} = 0.015 \quad \text{inv}\alpha_t = 0.018$$

$$\Sigma x := \frac{\text{inv}\alpha_{wt} - \text{inv}\alpha_t}{2 \cdot \tan(\alpha_n)} \cdot (z_1 + z_2) \quad \text{nach Gl. 21-55}$$

$$\Sigma x = -0.517$$

Ersatzzähnezahlen:

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

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

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

$$z_{n1} = 34.416 \quad z_{n2} = 106.809$$

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

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

Hinweis S.732

$$x_1 = -0.02$$

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

$$x_2 = -0.497$$

Verschiebungen:

$$V_1 := x_1 \cdot m_{n12} \quad V_1 = -0.03 \text{ mm} \quad \text{nach Gl. 21-49}$$

$$V_2 := x_2 \cdot m_{n12} \quad V_2 = -0.745 \text{ mm}$$

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

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

Maße der Zahnräder nach Profilverschiebung:

Kopfhöhenänderung:

$$k := a_{d2} - a_{d1} - m_{n12} \cdot (x_1 + x_2) \quad k = -0.023 \text{ mm} \quad \text{nach Gl. 21-23}$$

Kopfspiel (Soll):

$$c_{12} := 0.25 \cdot m_{n12} \quad c_{12} = 0.375 \text{ mm} \quad \text{nach S.720}$$

$$c_{34} := 0.25 \cdot m_{n34} \quad c_{34} = 0.375 \text{ mm}$$

Kopfkreisdurchmesser nach Profilverschiebung:

$$d_{a1} := d_1 + 2 \cdot m_{n12} + 2 \cdot V_1 + 2 \cdot k \quad d_{a1} = 49.185 \text{ mm} \quad \text{nach Gl. 21-24}$$

$$d_{a2} := d_2 + 2 \cdot m_{n12} + 2 \cdot V_2 + 2 \cdot k \quad d_{a2} = 145.128 \text{ mm}$$

$$d_{a3} := d_3 + 2 \cdot m_{n34} \quad d_{a3} = 47.695 \text{ mm} \quad \text{nach Gl. 21-40}$$

$$d_{a4} := d_4 + 2 \cdot m_{n34} \quad d_{a4} = 146.664 \text{ mm}$$

Fußkreisdurchmesser nach Profilverschiebung:

$$d_{f1} := d_1 - 2 \cdot ((m_{n12} + c_{12}) - V_1) \quad d_{f1} = 42.481 \text{ mm} \quad \text{nach Gl. 21-25}$$

$$d_{f2} := d_2 - 2 \cdot ((m_{n12} + c_{12}) - V_2) \quad d_{f2} = 138.424 \text{ mm}$$

$$d_{f3} := d_3 - 2.5 \cdot m_{n34} \quad d_{f3} = 40.945 \text{ mm} \quad \text{nach Gl. 21-41}$$

$$d_{f4} := d_4 - 2.5 \cdot m_{n34} \quad d_{f4} = 139.914 \text{ mm}$$

Kopfspiel nach Profilverschiebung:

$$c := a_{d2} - 0.5 \cdot (d_{a1} + d_{f2}) \quad c = 0.375 \text{ mm} \quad \text{nach S.720}$$

Prüfen der Zahndicke am Kopfkreis:

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

min. Kopfdicke des Zahnes: $s_{a12min} := 0.2 \cdot m_{n12}$ nach S.717

$$s_{a12min} = 0.3 \text{ mm}$$

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.727 - 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.731
 α_{at1} entspricht
 α_{yt1} aus Roloff Matek

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

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

$$s_{a1} := d_{a1} \cdot \left(\frac{s_{t1}}{d_1} + \operatorname{inv}\alpha_t - \operatorname{inv}\alpha_{at1} \right) \quad s_{a1} = 1.239 \text{ mm} \quad \text{nach Gl. 21-53}$$

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

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

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

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

$$s_{a2} := d_{a2} \cdot \left(\frac{s_{t2}}{d_2} + \operatorname{inv}\alpha_t - \operatorname{inv}\alpha_{at2} \right) \quad s_{a2} = 1.358 \text{ mm}$$

Sowohl s_{a1} als auch s_{a2} sind $> s_{a12min}$. Die Zahndicke am Kopfkreis ist damit ausreichend. Zusätzliche Prüfung über TB 21-12 R/M führt zum gleichen Ergebnis.

Grundkreisdurchmesser db:

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

$$d_{b1} := d_1 \cdot \cos(\alpha_t) \quad d_{b1} = 43.167 \text{ mm}$$

$$d_{b2} := d_2 \cdot \cos(\alpha_t) \quad d_{b2} = 133.966 \text{ mm}$$

nach Gl. 21-2

$$d_{b3} := d_3 \cdot \cos(\alpha_t) \quad d_{b3} = 41.678 \text{ mm}$$

$$d_{b4} := d_4 \cdot \cos(\alpha_t) \quad d_{b4} = 133.966 \text{ mm}$$

Profilüberdeckung:

Profilüberdeckung des ersten Zahnradpaars:

$$\varepsilon_{\alpha12} := \frac{\left(0.5 \cdot \left(\sqrt{d_{a1}^2 - d_{b1}^2} + \frac{z_2}{|z_2|} \cdot \sqrt{d_{a2}^2 - d_{b2}^2}\right) - a_{d2} \cdot \sin(\alpha_{wt})\right)}{\pi \cdot m_{t12} \cdot \cos(\alpha_t)} \quad \text{nach Gl. 21-57}$$

$$\varepsilon_{\alpha12} = 1.64$$

$$\varepsilon_{\beta12} := \frac{b_1 \cdot \tan(\beta)}{p_{t12}} \quad \varepsilon_{\beta12} = 2.903 \quad \text{nach Gl. 21-44}$$

$$\varepsilon_{\gamma12} := \varepsilon_{\alpha12} + \varepsilon_{\beta12} \quad \varepsilon_{\gamma12} = 4.543 \quad \text{nach Gl. 21-46}$$

-> Profilüberdeckung des ersten Zahnradpaars ist ausreichend (nach Erklärung S. 729)

Profilüberdeckung des zweiten Zahnradpaars:

$$\varepsilon_{\alpha34} := \frac{\left(0.5 \cdot \left(\sqrt{d_{a3}^2 - d_{b3}^2} + \frac{z_2}{|z_2|} \cdot \sqrt{d_{a4}^2 - d_{b4}^2}\right) - a_{d2} \cdot \sin(\alpha_{wt})\right)}{\pi \cdot m_{t12} \cdot \cos(\alpha_t)}$$

$$\varepsilon_{\alpha34} = 2.013$$

$$\varepsilon_{\beta34} := \frac{b_3 \cdot \tan(\beta)}{p_{t12}} \quad \varepsilon_{\beta34} = 2.903$$

$$\varepsilon_{\gamma34} := \varepsilon_{\alpha34} + \varepsilon_{\beta34} \quad \varepsilon_{\gamma34} = 4.916$$

-> Profilüberdeckung des zweiten Zahnradpaars ist ausreichend (nach Erklärung S. 729)

Betriebswälzkreisdurchmesser:

$$d_{w1} := \frac{d_1 \cdot \cos(\alpha_t)}{\cos(\alpha_{wt})} \quad d_{w1} = 45.903 \text{ mm} \quad \text{nach Gl. 21-22a}$$

$$d_{w2} := \frac{d_2 \cdot \cos(\alpha_t)}{\cos(\alpha_{wt})} \quad d_{w2} = 142.457 \text{ mm} \quad \text{nach Gl. 21-22b}$$

$$d_{w3} := d_3 \quad d_{w3} = 44.695 \text{ mm}$$

$$d_{w4} := d_4 \quad d_{w4} = 143.664 \text{ mm}$$

Kontrolle Achsabstand:

$$a := \frac{d_{w1} + d_{w2}}{2} = 94.18 \text{ mm} \quad \text{identisch mit:} \\ a_{d2} = 94.18 \text{ mm}$$

$$a := \frac{d_{w3} + d_{w4}}{2} = 94.18 \text{ mm}$$

Zusammenfassung:

$d_1 = 46.292 \text{ mm}$	$d_{b1} = 43.167 \text{ mm}$	$d_{a1} = 49.185 \text{ mm}$	$d_{f1} = 42.481 \text{ mm}$
$d_2 = 143.664 \text{ mm}$	$d_{b2} = 133.966 \text{ mm}$	$d_{a2} = 145.128 \text{ mm}$	$d_{f2} = 138.424 \text{ mm}$
$d_3 = 44.695 \text{ mm}$	$d_{b3} = 41.678 \text{ mm}$	$d_{a3} = 47.695 \text{ mm}$	$d_{f3} = 40.945 \text{ mm}$
$d_4 = 143.664 \text{ mm}$	$d_{b4} = 133.966 \text{ mm}$	$d_{a4} = 146.664 \text{ mm}$	$d_{f4} = 139.914 \text{ mm}$

$b_1 = 40 \text{ mm}$	$d_{w1} = 45.903 \text{ mm}$	$z_1 = 29$	$m_{n12} = 1.5 \text{ mm}$
$b_2 = 40 \text{ mm}$	$d_{w2} = 142.457 \text{ mm}$	$z_2 = 90$	
$b_3 = 40 \text{ mm}$	$d_{w3} = 44.695 \text{ mm}$	$z_3 = 28$	$m_{n34} = 1.5 \text{ mm}$
$b_4 = 40 \text{ mm}$	$d_{w4} = 143.664 \text{ mm}$	$z_4 = 90$	

$V_1 = -0.03 \text{ mm}$	$\varepsilon_{\alpha 12} = 1.64$	$\varepsilon_{\alpha 34} = 2.013$	$x_1 = -0.02$
$V_2 = -0.745 \text{ mm}$	$\varepsilon_{\beta 12} = 2.903$	$\varepsilon_{\beta 34} = 2.903$	$x_2 = -0.497$
$V_3 = 0 \text{ mm}$	$\varepsilon_{\gamma 12} = 4.543$	$\varepsilon_{\gamma 34} = 4.916$	
$V_4 = 0 \text{ mm}$			

Passfederberechnung:

Werkstoff Passfeder E295 GC

$$S_F := 1.3 \quad Re := 420 \frac{N}{mm^2} \quad p_{fzul} := \frac{Re}{S_F} \quad p_{fzul} = 323.077 \frac{N}{mm^2}$$

nach TB 12-1b

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

Antriebswelle - Fliehkraftkupplung
für Wellendurchmesser 25mm: -Passfeder DIN 6885 - A8x7x25

$$h_{Pass} := 7 \text{ mm} \quad l_{Pass} := 22 \text{ mm} \quad h := 0.45 \cdot h_{Pass} = 3.15 \text{ mm}$$

$$b_{Pass} := 8 \text{ mm} \quad l'_{Pass} := l_{Pass} - b_{Pass} \quad d_{Kritisch1} := 35 \text{ mm}$$

$$p_m := \frac{2 \cdot K_A \cdot T_{an} \cdot K_\lambda}{d_{Kritisch1} \cdot h \cdot l'_{Pass} \cdot n_{Pass} \cdot \varphi} = 129.576 \frac{N}{mm^2} \quad p_m < p_{fzul} \quad \text{nach Gl. 12-1}$$

Werkstoff Passfeder E295 GC

$$S_F := 1.3 \quad Re := 420 \frac{N}{mm^2} \quad p_{fzul} := \frac{Re}{S_F} \quad p_{fzul} = 323.077 \frac{N}{mm^2}$$

nach TB 12-1b

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

Abtriebswelle - Rutschkupplung
für Wellendurchmesser 50mm: -Passfeder DIN 6885 - A14x9x30

$$h_{Pass} := 9 \text{ mm} \quad l_{Pass} := 30 \text{ mm} \quad h := 0.45 \cdot h_{Pass} = 4.05 \text{ mm}$$

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

$$p_m := \frac{2 \cdot K_A \cdot T_{an} \cdot K_\lambda}{d_{Kritisch1} \cdot h \cdot l'_{Pass} \cdot n_{Pass} \cdot \varphi} = 61.728 \frac{N}{mm^2}$$

$p_m < p_{fzul}$ nach Gl. 12-1

Vorauswahl der Lagergrößen:

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

Festlager Abtriebswelle:

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

$$p := 3$$

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

$$n := \frac{n_{Antrieb}}{i'_{Gesamt}} \quad L_{10h} := 10000 \text{ hr}$$

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

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

$$C_{erf} = 29.582 \text{ kN}$$

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

$$C_{erf} = 29.141 \text{ kN}$$

Loslager An-/Abtriebswelle:

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

$$p := 3$$

$$\text{eig.: } 3,3333$$

$$n := n_{Antrieb} - \frac{n_{Antrieb}}{i'_{Gesamt}} \quad L_{10h} := 10000 \text{ hr}$$

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

$$C_{erf} = 61.562 \text{ kN}$$

Loslager Vorgelegewelle:

$$P := 6.5 \text{ kN}$$

$$p := 3$$

$$\text{eig.: } 3,333$$

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

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

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

$$C_{\text{erf}} = 47.372 \text{ kN}$$

Ermittlung der Lagerkräfte aus Freischnitt:

Lagerkräfte an der Antriebswelle:

Antriebsmoment

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

Wälzkreisdurchmesser $d_{w1} = 45.903 \text{ mm}$

Wirkabstände

$$X_1 := 45.3 \text{ mm}$$

$$X_2 := 52.5 \text{ mm}$$

Zahnrad Z1

$$F_{tZ1} := \frac{2 \cdot T_{an}}{d_{w1}}$$

Umfangskraft nach Gl. 21.70

$$F_{tZ1} = 2.179 \text{ kN}$$

$$F_{aZ1} := F_{tZ1} \cdot \tan(\beta)$$

Axialkraft nach Gl. 21.72

$$F_{aZ1} = 0.793 \text{ kN}$$

$$F_{rZ1} := \frac{(F_{tZ1} \cdot \tan(\alpha_n))}{\cos(\beta)}$$

Radialkraft nach Gl. 21.71

$$F_{rZ1} = 0.844 \text{ kN}$$

Loslager

$$F_{L1y} := \frac{F_{tZ1} \cdot X_2}{X_1 + X_2}$$

$$F_{L1y} = 1.169 \text{ kN}$$

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

$$F_{L1z} = 0.205 \text{ kN}$$

Festlager

$$F_{F1x} := F_{aZ1}$$

$$F_{F1x} = 0.793 \text{ kN}$$

$$F_{F1y} := F_{tZ1} - F_{L1y}$$

$$F_{F1y} = 1.009 \text{ kN}$$

$$F_{F1z} := F_{rZ1} - F_{L1z}$$

$$F_{F1z} = 0.639 \text{ kN}$$

Lagerkräfte an der Vorgelegewelle:

Moment an der Vorgelegewelle: $T_{Vorgelege} = 155 \text{ N}\cdot\text{m}$

Wälzkreisdurchmesser $d_{w2} = 142.457 \text{ mm}$ $d_{w3} = 44.695 \text{ mm}$

Wirkabstände $X_3 := 48.5 \text{ mm}$ $X_4 := 104.15 \text{ mm}$ $X_5 := 49.85 \text{ mm}$

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

Zahnrad Z3

$$F_{tZ3} := \frac{2 \cdot T_{Vorgelege}}{d_{w3}} \quad F_{tZ3} = 6.936 \text{ kN}$$

$$F_{aZ3} := F_{tZ3} \cdot \tan(\beta) \quad F_{aZ3} = 2.524 \text{ kN}$$

$$F_{rZ3} := \frac{F_{tZ3} \cdot \tan(\alpha_n)}{\cos(\beta)} \quad F_{rZ3} = 2.686 \text{ kN}$$

Loslager

$$F_{L2y} := -\frac{F_{tZ2} \cdot X_3 + F_{tZ3} \cdot (X_3 + X_4)}{X_3 + X_4 + X_5} \quad F_{L2y} = -4.707 \text{ kN}$$

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

$$F_{L2z} = 2.227 \text{ kN}$$

Festlager

$$F_{F2x} := F_{aZ3} + F_{aZ2} \quad F_{F2x} = 1.732 \text{ kN}$$

$$F_{F2y} := -F_{tZ2} - F_{tZ3} - F_{L2y} \quad F_{F2y} = -0.051 \text{ kN}$$

$$F_{F2z} := F_{rZ2} - F_{rZ3} + F_{L2z} \quad F_{F2z} = -1.303 \text{ kN}$$

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 $F_B := 3 \text{ kN}$

Abtriebsmoment $T_{ab} = 500.65 \text{ N} \cdot \text{m}$

Wälzkreisdurchmesser $d_{w4} = 143.664 \text{ mm}$

Wirkabstände $X_6 := 49.35 \text{ mm}$ $X_7 := 51.65 \text{ mm}$

Zahnrad Z4 $F_{aZ4} := -F_{aZ3}$ $F_{tZ4} := -F_{tZ3}$ $F_{rZ4} := -F_{rZ3}$
 $F_{tZ4} := \frac{2 \cdot T_{ab}}{d_{w4}}$ $F_{tZ4} = 6.97 \text{ kN}$

$F_{aZ4} := F_{tZ3} \cdot \tan(\beta)$ $F_{aZ4} = 2.524 \text{ kN}$

$F_{rZ4} := \frac{F_{tZ4} \cdot \tan(\alpha_n)}{\cos(\beta)}$ $F_{rZ4} = 2.7 \text{ kN}$

Loslager $F_{L3y} := \frac{-F_{tZ4} \cdot X_7}{X_6 + X_7}$ $F_{L3y} = -3.564 \text{ kN}$
 $F_{L3z} := \frac{-F_{rZ4} \cdot X_7 - F_{aZ4} \cdot \frac{d_{w4}}{2}}{X_6 + X_7}$ $F_{L3z} = -3.176 \text{ kN}$

Festlager $F_{F3x} := -F_{aZ4} + F_B$ $F_{F3x} = 0.476 \text{ kN}$

$F_{F3y} := -F_{tZ4} - F_{L3y}$ $F_{F3y} = -3.406 \text{ kN}$

$F_{F3z} := -F_{rZ4} - F_{L3z}$ $F_{F3z} = 0.476 \text{ kN}$

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:

$F_{L3y} := 3.564 \text{ kN}$

$F_{L3z} := 3.176 \text{ kN}$

$F_{F3y} := 3.406 \text{ kN}$

Wälzlagberechnung:

Festlager Antriebswelle:

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

aus WLK

$$F_a := |F_{F1x}| = 0.793 \text{ kN}$$

aus Freischnitt

$$F_r := \sqrt[2]{F_{F1y}^2 + F_{F1z}^2} = 1.194 \text{ kN}$$

$$\frac{F_a}{C_0} = 0.055 \quad \frac{F_a}{F_r} = 0.664 \quad \text{Seite 509 unten}$$

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

$$X := 1 \\ Y := 0.55$$

$$e := 1.14$$

aus TB14-3a

$$P := X \cdot F_r + Y \cdot F_a = 1.631 \text{ kN} \quad \text{nach Gl. 14.6}$$

$$p := 3 \text{ für Kugellager} \quad \text{nach Seite 508 unten}$$

$$C := 21.6 \text{ kN} \quad \text{nach WLK}$$

$$L_{10h} := \frac{10^6}{n_{Antrieb}} \cdot \left(\frac{C}{P} \right)^p = 19374 \text{ hr} \quad \text{nach Gl. 14.5a (Faktor 60 weg gelassen wegen den Einheiten)}$$

Loslager Antriebswelle:

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

$$F_r := \sqrt[2]{(F_{L1y} + F_{L1z})^2} = 1.374 \text{ kN}$$

$$P := F_r = 1.374 \text{ kN} \quad \text{Seite 509 unten}$$

$$p := \frac{10}{3} \quad \text{für Rollenlager}$$

$$C := 14 \text{ kN} \quad \text{aus WLK}$$

$$L_{10h} := -\frac{10^6}{\frac{n_{Antrieb}}{i'_{Gesamt}}} \cdot \left(\frac{C}{P} \right)^p = 21221 \text{ hr}$$

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

$$\text{mit } i'_{Gesamt} = 10.013$$

Festlager Vorgelegewelle:

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

$$F_a := |F_{F2x}| = 1.732 \text{ kN} \quad \text{aus Freischnitt}$$

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

$$\frac{F_a}{C_0} = 0.062 \quad \frac{F_a}{F_r} = 1.328$$

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

$$e := 0.51 \cdot \left(\frac{F_a}{C_0} \right)^{0.233} = 0.267 \quad \text{aus TB14-3a Fußnote}$$

daraus ergibt sich nach TB 14-3a X und Y zu: $X := 0.56$
(weil $F_a/F_r > e$ ist, siehe Fußnote)

$$Y := 0.866 \left(\frac{F_a}{C_0} \right)^{-0.229} = 1.638$$

$$P := X \cdot F_r + Y \cdot F_a = 3.566 \text{ kN}$$

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

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

$$L_{10h} := \frac{10^6}{\frac{n_{Antrieb}}{i'_1}} \cdot \left(\frac{C}{P} \right)^p = 36486 \text{ hr} \quad \text{mit } i'_1 = 3.103$$

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

Loslager Vorgelegewelle:

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

aus Freischnitt

$$F_r := \sqrt[2]{F_{L2y}^2 + F_{L2z}^2} = 5.207 \text{ kN}$$

$$P := F_r = 5.207 \text{ kN}$$

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

für Zylinderrollenlager

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

aus WLK

$$L_{10h} := \frac{10^6}{\frac{n_{Antrieb}}{i'_1}} \cdot \left(\frac{C}{P} \right)^p = 15981 \text{ hr}$$

Festlager Abtriebswelle:

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

aus WLK

$$F_a := |F_{F3x}| = 0.476 \text{ kN}$$

aus Freischnitt

$$F_r := \sqrt[2]{(F_{L1y} + F_{L3y})^2 + (F_{L1z} + F_{L3z})^2} = 5.817 \text{ kN}$$

$$\frac{F_a}{C_0} = 0.01$$

$$\frac{F_a}{F_r} = 0.082$$

Seite 509 unten

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

$$X := 1$$

$$Y := 0.55$$

$$e := 1.14$$

aus TB14-3a

$$P := X \cdot F_r + Y \cdot F_a = 6.078 \text{ kN} \quad \text{nach Gl. 14.6}$$

$$p := 3$$

für Kugellager

nach Seite 508 unten

$$C := 60 \text{ kN}$$

nach WLK

$$L_{10h} := \frac{10^6}{n_{Abtrieb}} \cdot \left(\frac{C}{P} \right)^p = 80256 \text{ hr}$$

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

nach Gl. 14.5a

Loslager Abtriebswelle:

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

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

$$P := F_r = 4.774 \text{ kN} \quad \text{Seite 509 unten}$$

$$p := 3$$

für Kugellager

$$C := 69.5 \text{ kN}$$

aus WLK

$$L_{10h} := \frac{10^6}{\frac{n_{Antrieb}}{i'_{Gesamt}}} \cdot \left(\frac{C}{P} \right)^p = 28568 \text{ hr}$$

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

mit $i'_{Gesamt} = 10.013$

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:

Schnitt entlang s_1 (positives Schnittufer)
 $Mt(s_1) := 0$

X-Y-Ebene:

$N_x := 0$

X-Z-Ebene:

$N_x := 0$

$$Q_y(s_1) := -F_{L1y} = -1.169 \text{ kN} \quad Q_z(s_1) := -F_{L1z} = -0.205 \text{ kN}$$

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

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

$$Mb_z(s_{1max}) = -52.976 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$Mb_y(s_{1max}) = -9.276 \text{ N} \cdot \text{m}$$

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

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

Schnitt entlang s_2 (negatives Schnittufer) $s_{2max} := 52.5 \cdot \text{mm}$ $s_{2min} := 0 \cdot \text{mm}$

$$Mt(s_2) := 50 \text{ N} \cdot \text{m} \quad N_x := -F_{F1x} = -0.793 \text{ kN} \quad N_x := -F_{F1x} = -0.793 \text{ kN}$$

$$Q_y(s_2) := F_{F1y} = 1.009 \text{ kN} \quad Q_z(s_2) := F_{F1z} = 0.639 \text{ kN}$$

$$Mb_z(s_2) := -F_{F1y} \cdot s_2 \quad Mb_y(s_2) := -F_{F1z} \cdot s_2$$

$$Mb_z(s_{2max}) = -52.976 \text{ N} \cdot \text{m} \quad Mb_y(s_{2max}) = -33.55 \text{ N} \cdot \text{m}$$

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

Statischer & dynamischer Festigkeitsnachweis Antriebswelle:

$$Rz := 6.3 \mu\text{m} \quad d_{Kritisch1} := 25 \text{ mm} \quad Rm := 1100 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$Wb_1 := \frac{\pi}{32} \cdot (d_{Kritisch1})^3 = 1533.98 \text{ mm}^3 \quad W_{t1} := \frac{\pi}{16} \cdot (d_{Kritisch1})^3 = 3067.96 \text{ mm}^3$$

Flächenträgheitsmoment aus TB11-3

$$Mb_{res1} := \sqrt{Mb_z(s_{2max})^2 + Mb_y(s_{2max})^2} \quad T_{max} := \text{T}_{an} \quad \text{da das Anfahren mit Anlaufkupplung erfolgt}$$

$$R_{p0.2N} := 900 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad K_t := 1 - 0.34 \cdot \log\left(\frac{d_{Kritisch1}}{16 \text{ mm}}\right) = 0.934$$

nach TB 1-1

nach TB 3-11

Biegung:

$$\sigma_{bmax} := \frac{Mb_{res1}}{Wb_1} = 40.878 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

nach Bild 3-2

$$\sigma_{ba} := \frac{K_A \cdot Mb_{res1}}{Wb_1} = 81.756 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Torsion:

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

nach Bild 3-2

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

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

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

nach Flowchart Bild 3-31

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

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

aus TB 1-1

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

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

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

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

aus TB 3-11c

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

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

$$S_F := \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_{bmax}}{\sigma_{bF}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{tmax}}{\tau_{tF}}\right)^2}} = 20.3 \quad \text{nach Bild 3-31}$$

$$S_D := \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_{ba}}{\sigma_{ta}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{ta}}{\tau_{ta}}\right)^2}} = 1.9 \quad \text{nach Bild 3-32}$$

$\text{V}\backslash \cup bGW / \quad \backslash ' tGW /$

Ergebnis: Die Antriebswelle ist dauerfest.

Vorgelegewelle:

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

Y-Z-Ebene: X-Y-Ebene: X-Z-Ebene:

$$\begin{array}{lll} \text{Schnitt entlang } s_3 \text{ (positives Schnittufer)} & s_{3max} := 49.85 \cdot \text{mm} & s_{3min} := 0 \cdot \text{mm} \\ Mt(s_3) := 0 & N_x := 0 & N_x := 0 \end{array}$$

$$Q_y(s_3) := -F_{L2y} = -4.707 \text{ kN} \quad Q_z(s_3) := F_{L2z} = 2.227 \text{ kN}$$

$$Mb_z(s_3) := -F_{L2y} \cdot s_3 \quad Mb_y(s_3) := F_{L2z} \cdot s_3$$

$$Mb_z(s_{3max}) = -234.644 \text{ N} \cdot \text{m} \quad Mb_y(s_{3max}) = 111.011 \text{ N} \cdot \text{m}$$

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

$$\begin{array}{lll} \text{Schnitt entlang } s_4 \text{ (positives Schnittufer)} & s_{4max} := 104.15 \cdot \text{mm} & s_{4min} := 0 \cdot \text{mm} \\ N_x := -F_{aZ3} = -2.524 \text{ kN} & N_x := -F_{aZ3} = -2.524 \text{ kN} & \end{array}$$

$$Q_y(s_4) := -F_{L2y} + F_{tZ3} = 2.229 \text{ kN} \quad Q_z(s_4) := F_{L2z} - F_{rZ3} = -0.46 \text{ kN}$$

$$Mb_z(s_4) := -F_{L2y} \cdot (s_{3max} + s_4) + F_{tZ3} \cdot s_4 \quad Mb_y(s_4) := F_{L2z} \cdot (s_{3max} + s_4) - F_{rZ3} \cdot s_4 - F_{aZ3} \cdot \frac{d_{w3}}{2}$$

$$Mb_z(s_{4max}) = -2.512 \text{ N} \cdot \text{m} \quad Mb_y(s_{4max}) = 6.734 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$Mb_z(s_{4min}) = -234.644 \text{ N} \cdot \text{m} \quad Mb_y(s_{4min}) = 54.596 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Y-Z-Ebene:

$$Mt(s_4) := T_{\text{Vorgelege}} = 155 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$\begin{array}{lll} \text{Schnitt entlang } s_5 \text{ (negatives Schnittufer)} & s_{5max} := 48.5 \cdot \text{mm} & s_{5min} := 0 \cdot \text{mm} \\ Mt(s_5) := 0 & N_x := -F_{F2x} = -1.732 \text{ kN} & N_x := -F_{F2x} = -1.732 \text{ kN} \end{array}$$

$$Q_y(s_5) := -F_{F2y} = -0.051 \text{ kN} \quad Q_z(s_5) := -F_{F2z} = -1.303 \text{ kN}$$

$$Mb_z(s_5) := -F_{F2y} \cdot s_5 \quad Mb_y(s_5) := F_{F2z} \cdot s_5$$

$$Mb_z(s_{5max}) = -2.474 \text{ N} \cdot \text{m} \quad Mb_y(s_{5max}) = 63.196 \text{ N} \cdot \text{m}$$

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

Statischer & dynamischer Festigkeitsnachweis Vorgelegewelle:

$$Rz := 6.3 \text{ } \mu\text{m} \quad d_{Kritisch2} := 35 \text{ mm} \quad Rm := 1100 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$Wb_2 := \frac{\pi}{32} \cdot (d_{Kritisch2})^3 = 4209.24 \text{ mm}^3$$

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

$$Mb_{res2} := \sqrt{Mb_z(s_{3max})^2 + Mb_y(s_{3max})^2}$$

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

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

Biegung

$$\sigma_{bmax} := \frac{Mb_{res2}}{Wb_2} = 15.443 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{ba} := \frac{K_A \cdot Mb_{res2}}{Wb_2} = 30.886 \frac{N}{mm^2}$$

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

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

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

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

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

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

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

Torsion

$$\tau_{tmax} := \frac{T_{Vorgelege}}{W_{t2}} = 18.412 \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_{ta} := \frac{K_A \cdot T_{Vorgelege}}{W_{t2}} = 36.824 \frac{N}{mm^2}$$

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

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

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

aus TB 3-11c

$$K_{0\tau} := 0.575 \cdot K_{0\sigma} + 0.425 = 0.925 \quad \text{aus TB 3-10}$$

$$K_V := 1$$

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

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

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

$$S_F := \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_{bmax}}{\sigma_{bF}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{tmax}}{\tau_{tF}}\right)^2}} = 26.957$$

$$S_D := \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_{ba}}{\sigma_{bGW}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{ta}}{\tau_{tGW}}\right)^2}} = 2.329$$

Ergebnis: Die Vorgelegewelle ist dauerfest.

Abtriebswelle:

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

Y-Z-Ebene:

X-Y-Ebene:

X-Z-Ebene:

Schnitt entlang s_6 (positives Schnittufer)

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

$$N_x := -F_B = -3 \text{ kN}$$

$$N_x := -F_B = -3 \text{ kN}$$

$$Q_y(s_6) := 0$$

$$Q_z(s_6) := 0$$

$$Mb_z(s_6) := 0$$

$$Mb_y(s_6) := 0$$

Schnitt entlang s_7 (positives Schnittufer)

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

$$N_x := -F_B - F_{F3x} = -3.476 \text{ kN} \quad N_x := -F_B - F_{F3x} = -3.476 \text{ kN}$$

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

$$Q_z(s_7) := -F_{F3z} = -0.476 \text{ kN}$$

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

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

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

$$Mb_y(s_{7max}) = 24.603 \text{ N} \cdot \text{m}$$

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

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

Schnitt entlang s_8 (negatives Schnittufer)

$$Mt(s_8) := 0$$

$$N_\sim := 0$$

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

$$N_\sim := 0$$

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

Statischer & dynamischer Festigkeitsnachweis Abtriebswelle:

$Rz := 6.3 \mu\text{m}$	$d_{Kritisch3} := 55 \text{ mm}$	$Rm := 1100 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
$Wb_3 := \frac{\pi}{32} \cdot \left(\frac{d_{Kritisch3}^4 - (42 \text{ mm})^4}{d_{Kritisch3}} \right) = 10779.46 \text{ mm}^3$		
	$W_{t3} := \frac{\pi}{16} \cdot \left(\frac{d_{Kritisch3}^4 - (42 \text{ mm})^4}{d_{Kritisch3}} \right) = 21558.93 \text{ mm}^3$	
$Mb_{res3} := \sqrt{Mb_z(s_{8max})^2 + Mb_y(s_{8max})^2}$		

$R_{p0.2N} := 900 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	nach TB 1-1	$K_t := 1 - 0.34 \cdot \log \left(\frac{d_{Kritisch3}}{16 \text{ mm}} \right) = 0.818$
---	-------------	---

Biegung

$\sigma_{bmax} := \frac{Mb_{res3}}{Wb_3} = 21.855 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	$\tau_{tmax} := \frac{T_{ab}}{W_{t3}} = 23.222 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
$\sigma_{ba} := \frac{K_A \cdot Mb_{res3}}{Wb_3} = 43.71 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	$\tau_{ta} := \frac{K_A \cdot T_{ab}}{W_{t3}} = 46.445 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
$\sigma_{bF} := 1.2 \cdot R_{p0.2N} \cdot K_t = 883.092 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	$\tau_{tF} := \frac{1.2 \cdot R_{p0.2N} \cdot K_t}{\sqrt{3}} = 509.853 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
$\sigma_{bWN} := 440 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	$\tau_{tWN} := 330 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

$\beta_{kb} := 2.3$	aus TB 3-9b mit $Rm = 1100 \text{ N/mm}^2$	$\beta_{kt} := 1.55$ wegen Pressverband
$K := 1 - 0.2 \cdot \log \left(\frac{d_{Kritisch3}}{7.5 \text{ mm}} \right) = 0.867$		aus TB 3-11c

y

$$\log(20)$$

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

aus TB 3-10

$$K_V := 1$$

aus TB 3-12

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

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

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

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

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

$$S_F := \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_{bmax}}{\sigma_{bF}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{tmax}}{\tau_{tF}}\right)^2}} = 19.291$$

$$S_D := \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_{ba}}{\sigma_{bGW}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{ta}}{\tau_{tGW}}\right)^2}} = 2.135$$

Ergebnis: Die Abtriebswelle ist dauerfest.

Berechnung der Presspassung des Zahnrads der Abtriebswelle:

$$D_r := 61 \text{ mm} \quad l_r := 40 \text{ mm} \quad u := 0.18 \quad S_r := 2 \quad D_{\lambda} := 139.914 \text{ mm}$$

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

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

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

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

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

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

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

Kleinstes Haftmaß:

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

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

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

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

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

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

$$p_{FgI} := \frac{\kappa_e}{S_F} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} = 692.82 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Größte zul. Flächenpressung der Welle

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

Größtes zulässiges Haftmaß

$$\ddot{U}_{ozul} := Z_G + G = 211.983 \mu\text{m}$$

Messbares größtes zulässiges Übermaß

$$\ddot{U}_{uzul} := Z_k + G = 16.043 \mu\text{m}$$

Messbares kleinstes zulässiges Übermaß

Für Passung H8/u8 für D=61mm:

$$EI := 0 \mu\text{m}$$

$$ei := 87 \mu\text{m}$$

$$ES := 46 \mu\text{m}$$

$$es := 133 \mu\text{m}$$

$$\ddot{U}_u := ei - ES = 41 \mu\text{m}$$

muss größer sein als $\ddot{U}_{uzul} = 16.043 \mu\text{m}$

$$\ddot{U}_o := es - EI = 133 \mu\text{m}$$

muss kleiner sein als $\ddot{U}_{ozul} = 211.983 \mu\text{m}$

Die Passung H8/u8 ist geeignet!

Berechnung der Presspassung des Zahnrads der Vorgelegewelle:

$$D_F := 37 \text{ mm}$$

$$l_F := 40 \text{ mm}$$

$$\mu := 0.18$$

$$S_H := 2$$

$$D_{Aa} := 138.424 \text{ mm}$$

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

$$F_{res} := \sqrt{F_l^2 + F_t^2} = 2.319 \text{ kN}$$

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

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

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

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

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

Kleinstes Haftmaß:

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

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

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

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

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

$$p_{Fg} := \frac{R_e}{S_F} \cdot \frac{1 - Q_A^2}{\sqrt{3}} = 321.66 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{Größte zul. Flächenpressung des Zahnrads}$$

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

S_F	$\sqrt{3}$	mm^2	
$Z_G := \frac{p_{Fg} \cdot D_F}{E_A} \cdot K = 119.014 \mu\text{m}$		Größtes zulässiges Haftmaß	
$\ddot{U}_{ozul} := Z_G + G = 127.254 \mu\text{m}$		Messbares größtes zulässiges Übermaß	
$\ddot{U}_{uzul} := Z_k + G = 10.29 \mu\text{m}$		Messbares kleinstes zulässiges Übermaß	
Für Passung H8/u8 für D=37mm:			
$EI := 0 \mu\text{m}$	$ei := 60 \mu\text{m}$	$ES := 39 \mu\text{m}$	$es := 99 \mu\text{m}$
$\ddot{U}_u := ei - ES = 21 \mu\text{m}$		muss größer sein als $\ddot{U}_{uzul} = 10.29 \mu\text{m}$	
$\ddot{U}_o := es - EI = 99 \mu\text{m}$		muss kleiner sein als $\ddot{U}_{ozul} = 127.254 \mu\text{m}$	
Die Passung H8/u8 ist geeignet!			

Schmierstoffberechnung

Für Auslegung eines Schmierstoffs 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.

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

$$\frac{k_s}{v} := \left(3 \cdot \frac{F_{tZ4}}{b_4 \cdot d_4} \cdot \frac{u+1}{u} \right) \cdot \frac{1}{\pi \cdot d_4 \cdot n_{Abtrieb}} = 3.175 \frac{s}{m} \cdot MPa$$

Durch das Ablesen von TB 20-7 a) ergibt sich ca. ein Wert von: $\nu_{40} := 3.2 \cdot 10^2 \cdot \frac{mm^2}{s}$

Gewähltes Schmieröl:

DIN 51517 - CLP 320: 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 $\nu_{40} := 288 \dots 352 \frac{mm^2}{s}$ - ISO VG 320 (320).