Getriebeauslegung

zweistufiges Stirnradgetriebe

Angaben: $P := 38.00\ kW$

$n_{ein} := 3500\ min^{-1}$

$n_{aus} := 170\ min^{-1}$

$K_A := 2.00$

$L_h := 30000\ hr$

1. Zahnradwerkstoffe / Verzahnungsqualitäten

Stufe I: Qualität 6

Ritzel: Werkstoff: 34 CrMo 4

$$\sigma_{Hlim1} := 1070\ \frac{N}{mm^2}$$

$$HV_1 := 590$$

$$\sigma_{FE1} := 680\ \frac{N}{mm^2}$$

Rad: Werkstoff: Ck 45

$$\sigma_{Hlim2} := 1030\ \frac{N}{mm^2}$$

$$HV_2 := 560$$

$$\sigma_{FE2} := 540\ \frac{N}{mm^2}$$

Stufe II: Qualität 7

Ritzel: Werkstoff: 31 CrMoV 9

$$\sigma_{Hlim3} := 1230\ \frac{N}{mm^2}$$

$$HV_3 := 700$$

$$\sigma_{FE3} := 840\ \frac{N}{mm^2}$$

Rad: Werkstoff: 16 MnCr 5

$$\sigma_{Hlim4} := 1110\ \frac{N}{mm^2}$$

$$HV_4 := 550$$

$$\sigma_{FE4} := 810 \frac{N}{mm^2}$$

2. Wahl der Übersetzungsaufteilung

$$u_{ges} := \frac{n_{ein}}{n_{aus}} = 20.588$$

$$u_I := 5.2$$

$$u_{II_ref} := \frac{u_{ges}}{u_I} = 3.959$$

3. Radbreite - Durchmesserverhältnis

Werte aus VII/014 bzw. VII/015

Stufe I: vergütet gehärtet beidseitige, unsymmetrische Lagerung

$$\frac{b_I}{d_I} \le 0.88 \qquad \boxed{\frac{b_I}{m_I}} = ?\ 20$$

Stufe II: vergütet gehärtet nitriert beidseitige, unsymmetrische Lagerung

$$\frac{b_{II}}{d_{II}} \le 0.64 \qquad \boxed{\frac{b_{II}}{m_{II}}} = ?\ 25$$

4. Wahl der Ritzelzähnezahlen zi

Stufe I:

$$z_{1W} := 35$$

$$z_2 := z_{1W} \cdot u_I = 182$$

$$z_{2W} := 187$$

$$u_{IW} := \frac{z_{2W}}{z_{1W}} = 5.343$$

Stufe II:

$$z_{3W} := 25$$

$$u_{II} := \frac{u_{ges}}{u_{IW}} = 3.853$$

$$z_4 := z_{3W} \cdot u_{II} = 96.335$$

$z_{4W} := 99$

$u_{IIW} := \frac{z_{4W}}{z_{3W}} = 3.96$

Gesamtübersetzung:

$u_{gesW} := u_{IW} \cdot u_{IIW} = 21.158$

$n_{ausW} := \frac{n_{ein}}{u_{gesW}} = 165.424 \ \frac{1}{min}$

$\frac{(n_{ausW} - n_{aus})}{n_{aus}} = -0.027$

5. Wahl des Moduls

5.1.1 Drehzahlen

$n_{ein} = (3.5 \cdot 10^3) \ \frac{1}{min}$

$n_{2W} := \frac{n_{ein}}{u_{IW}} = 655.08 \ \frac{1}{min}$

$n_{ausW} = 165.424 \ \frac{1}{min}$

5.1.2 Winkelgeschwindigkeiten

$\omega_1 := 2 \ \pi \ n_{ein} = 366.519 \ \frac{1}{s}$

$\omega_2 := 2 \ \pi \cdot n_{2W} = 68.6 \ \frac{1}{s}$

$\omega_3 := 2 \ \pi \cdot n_{ausW} = 17.323 \ \frac{1}{s}$

5.1.3 Nennmomente

$T_{N1} := \frac{P}{\omega_1} = 103.678 \ N \cdot m$

$T_{N2} := \frac{P}{\omega_2} = 553.937 \ N \cdot m$

$T_{N3} := \frac{P}{\omega_3} = (2.194 \cdot 10^3) \ N \cdot m$

5.1.4 Lastwechsel

$$L_1 := \frac{(L_h \cdot n_{ein})}{10^6} = 6.3 \cdot 10^3$$

$$L_2 := \frac{(L_h \cdot n_{2W})}{10^6} = 1.179 \cdot 10^3$$

$$L_3 := \frac{(L_h \cdot n_{aus})}{10^6} = 306$$

5.2 Stufe I

Ritzelvolumen für Stufe I:

Berechnung von Tges1:

$$K_A = 2$$

$$K_V := 1.1$$

$$K_{H\beta} := 1$$

$$K_{H\alpha} := 1$$

Gesamtmoment:

$$T_{ges1} := T_{N1} \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{H\beta} \cdot K_{H\alpha} = 228.092\ N \cdot m$$

Berechnung erfolgt mit Sicherheit SH=1.4

$$S_H := 1.4$$

$$\sigma_{H_zul1} := \frac{\sigma_{Hlim1}}{S_H} = 764.286\ \frac{N}{mm^2}$$

aus VII/027:

$$Z_E := 189.8\ \sqrt{\frac{N}{mm^2}}$$

aus VII/026: ohne Profilverschiebung mit

$$\beta := 12°$$

$$Z_{HI} := 2.45$$

$$Volumen_I := \frac{(2 \cdot T_{ges1})}{\sigma_{H_zul1}^{\ 2}} \cdot \frac{(u_{IW} + 1)}{u_{IW}} \cdot Z_E^{\ 2} \cdot Z_{HI}^{\ 2} = (2.005 \cdot 10^{-4})\ m^3$$

Aus

$$\boxed{\left(\frac{b_I}{m_I}\right)} \cdot m_I \cdot z_{IW}^{\ 2} \cdot m_I^{\ 2} = ?\ 25 \cdot m_I^{\ 2} \cdot z_{IW}^{\ 2}$$

$$25 \cdot \boxed{m_I^{\ 2}} \cdot z_{IW}^{\ 2} = ?\ Volumen_I$$

$$m_I := \sqrt[3]{\frac{Volumen_I}{20 \cdot z_{1W}^{\ 2}}} = 2.015\ mm$$

Wahl des Moduls nach DIN780: größeres gewählt damit gleiche Durchmesser bei Rädern

$$m_{Igew} := 2\ mm$$

$$m_1 := m_{Igew} = 2\ mm$$

$$m_2 := m_{Igew} = 2\ mm$$

5.3 Stufe II

Berechnung von Tges2:

$$K_A = 2$$

$$K_V = 1.1$$

$$K_{H\beta} = 1$$

$$K_{H\alpha} = 1$$

Gesamtmoment:

$$T_{ges2} := T_{N2} \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{H\beta} \cdot K_{H\alpha} = \left(1.219 \cdot 10^3\right)\ N \cdot m$$

Berechnung erfolgt mit

$$S_H = 1.4$$

$$\sigma_{H_zul3} := \frac{\sigma_{Hlim3}}{S_H} = 878.571\ \frac{N}{mm^2}$$

aus VII/027:

$$Z_E := 189.8\ \sqrt{\frac{N}{mm^2}}$$

aus VII/026: ohne Profilverschiebung mit

$$\beta := 12°$$

$Z_{HII} := 2.50$

$$Volumen_{II} := \frac{(2 \cdot T_{ges2})}{\sigma_{H_zul3}^{2}} \cdot \frac{(u_{IIW}+1)}{u_{IIW}} \cdot Z_E^{2} \cdot Z_{HII}^{2} = (8.905 \cdot 10^{-4})\ m^3$$

$$m_{II} := \sqrt[3]{\frac{Volumen_{II}}{25 \cdot z_{3W}^{2}}} = 3.848\ mm$$

Wahl des Moduls nach DIN780:

$m_{IIgew} := 4\ mm$

$m_3 := m_{IIgew} = 4\ mm$

$m_4 := m_{IIgew} = 4\ mm$

6. Schrägverzahnung

wird bei schnelllaufenden Rädern (v>10m/s oder n>1000 1/min) verwendet

$r_1 := \frac{m_1 \cdot z_{1W}}{2} = 0.035\ m$ $\quad v_I := \omega_1 \cdot r_1 = 12.828\ \frac{m}{s}$ $\quad n_{ein} = (3.5 \cdot 10^3)\ \frac{1}{min}$

$r_3 := \frac{m_3 \cdot z_{3W}}{2} = 0.05\ m$ $\quad v_{II} := \omega_2 \cdot r_3 = 3.43\ \frac{m}{s}$ $\quad n_{ausW} = 165.424\ \frac{1}{min}$

Für die erste Stufe wird eine Schrägverzahnung von gewählt.
Die zweite Stufe wird gerade verzahnt.

7. Profilverschiebung

Es wird keine Profilverschiebung gewählt.

8. Abmessungen und Geometrie der Zahnräder

Alle 4 Zahnräder werden als Nullräder ausgeführt.

8.1 Ritzel 1

$\beta := 10°$

$\alpha := 20 \frac{\pi}{180}$ Eingriffswinkel

$m_{1n} := m_1 = 2\ mm$ Modul

$m_{1t} := \frac{m_1}{cos(\beta)} = 2.031\ mm$ Stirnmodul

$z_{1W} = 35$ Zähnezahl

$z_{1n} := \frac{z_{1W}}{cos(\beta)^3} = 36.645$

$\alpha_t := atan\left(\frac{tan(\alpha)}{cos(\beta)}\right) = 20.284\ °$

$p_{1n} := m_{1n} \cdot \pi = 6.283\ mm$

$p_{1t} := \frac{p_{1n}}{cos(\beta)} = 6.38\ mm$

$h_{a1} := m_{1n} = 2\ mm$

$c_1 := 0.2 \cdot m_{1n} = 0.4\ mm$

$h_{f1} := h_{a1} + c_1 = 2.4\ mm$

$b_1 := 20 \cdot m_{1n} = 40\ mm$

$p_{Ritzel1} := 6\ mm$

$b_{1ges} := b_1 + p_{Ritzel1} = 46\ mm$

$d_1 := z_{1W} \cdot m_{1t} = 71.08\ mm$

$\frac{b_1}{d_1} = 0.563$

$d_{a1} := d_1 + 2 \cdot h_{a1} = 75.08\ mm$

$d_{f1} := d_1 - 2 \cdot h_{f1} = 66.28\ mm$

$d_{b1} := d_1 \cdot cos(\alpha_t) = 66.672\ mm$

$L_{Ritzel1} := b_{1ges} = 46\ mm$

8.2 Rad 2

$m_{2n} := m_2 = 2\ mm$

$m_{2t} := \frac{m_{2n}}{cos(\beta)} = 2.031\ mm$

$z_{2W} = 187$

$z_{2n} := \frac{z_{2W}}{cos(\beta)^3} = 195.789$

$p_{2n} := m_{2n} \cdot \pi = 6.283\ mm$

$p_{2t} := \frac{p_{2n}}{cos(\beta)} = 6.38\ mm$

$h_{a2} := m_{2n} = 2\ mm$

$c_2 := 0.2 \cdot m_{2n} = 0.4\ mm$

$h_{f2} := h_{a2} + c_2 = 2.4\ mm$

$b_2 := 20 \cdot m_{2n} = 40\ mm$

$d_2 := z_{2W} \cdot m_{2t} = 379.77\ mm$

$\frac{b_2}{d_2} = 0.105$

$d_{a2} := d_2 + 2 \cdot h_{a2} = 383.77\ mm$

$d_{f2} := d_2 - 2 \cdot h_{f2} = 374.97\ mm$

$d_{b2} := d_2 \cdot cos(\alpha_t) = 356.219\ mm$

$L_{Rad2} := 50\ mm$

8.3 Ritzel 3

$m_3 = 4\ mm$

$z_{3W} = 25$

$p_3 := m_3 \cdot \pi = 12.566\ mm$

$p_{e3} := p_3 \cdot cos(\alpha) = 11.809\ mm$

$h_{a3} := m_3 = 4\ mm$

$c_3 := 0.2 \cdot m_3 = 0.8\ mm$

$h_{f3} := h_{a3} + c_3 = 4.8\ mm$

$b_3 := 25 \cdot m_3 = 100\ mm$

$p_{Ritzel3} := 6\ mm$

$b_{3ges} := b_3 + p_{Ritzel3} = 106\ mm$

$d_3 := z_{3W} \cdot m_3 = 100\ mm$

$\frac{b_3}{d_3} = 1$

$d_{a3} := d_3 + 2 \cdot h_{a3} = 108\ mm$

$d_{f3} := d_3 - 2 \cdot h_{f3} = 90.4\ mm$

$d_{b3} := d_3 \cdot cos(\alpha) = 93.969\ mm$

$L_{Ritzel3} := b_{3ges} = 106\ mm$

8.4 Rad 4

$m_4 = 4\ mm$

$z_{4W} = 99$

$p_4 := m_4 \cdot \pi = 12.566\ mm$

$p_{e4} := p_4 \cdot cos(\alpha) = 11.809\ mm$

$h_{a4} := m_4 = 4\ mm$

$c_4 := 0.2 \cdot m_4 = 0.8\ mm$

$h_{f4} := h_{a4} + c_4 = 4.8\ mm$

$b_4 := 25 \cdot m_4 = 100\ mm$

$d_4 := z_{4W} \cdot m_4 = 396\ mm$

$\frac{b_4}{d_4} = 0.253$

$d_{a4} := d_4 + 2 \cdot h_{a4} = 404\ mm$

$d_{f4} := d_4 - 2 \cdot h_{f4} = 386.4\ mm$

$d_{b4} := d_4 \cdot cos(\alpha) = 372.118\ mm$

$L_{Rad4} := 80\ mm$

8.5 Achsabstände
Achsabstand für Stufe I:

$$a_I := \frac{d_1 + d_2}{2} = 225.425\ mm$$

Achsabstand für Stufe II:

$$a_{II} := \frac{d_3 + d_4}{2} = 248\ mm$$

8.6 Profilüberdeckungen
1. Stufe Schrägverzahnung

$$\varepsilon_{\alpha tI} := \frac{\sqrt{\left(\frac{d_{a1}}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_{b1}}{2}\right)^2} + \sqrt{\left(\frac{d_{a2}}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_{b2}}{2}\right)^2} - \left(\frac{d_{b1}}{2} + \frac{d_{b2}}{2}\right) \cdot tan(\alpha_t)}{p_{1t} \cdot cos(\alpha_t)} = 1.755$$

$$\varepsilon_{\beta I} := \frac{b_1 \cdot sin(\beta)}{m_{1n} \cdot \pi} = 1.105$$

$\varepsilon_{ges} := \varepsilon_{\alpha tI} + \varepsilon_{\beta I} = 2.861$

$\varepsilon_{ges} > 1$

2.Stufe Geradverzahnung:

$$\varepsilon_{\alpha II} := \frac{\sqrt{\left(\frac{d_{a3}}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_{b3}}{2}\right)^2} + \sqrt{\left(\frac{d_{a4}}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_{b4}}{2}\right)^2} - \left(\frac{d_{b3}}{2} + \frac{d_{b4}}{2}\right) \cdot tan(\alpha_t)}{p_3 \cdot cos(\alpha_t)} = 1.624$$

$\varepsilon_{\alpha II} > 1$

8.7 Abschätzung der Wellendurchmesser
Einheitslose Leistung und einheitslose Drehzahlen benötigt:

$$P_{oe} := P \cdot \frac{1}{W} = 3.8 \cdot 10^4$$

$$n_{einoe} := n_{ein} \cdot min = 3.5 \cdot 10^3$$

$$n_{2oe} := n_{2W} \cdot min = 655.08$$

$$n_{ausoe} := n_{ausW} \cdot min = 165.424$$

8.7.1 Antriebswelle

$$d_{w1t} := 16 \cdot \sqrt[3]{\frac{P_{oe}}{n_{einoe}}}\ mm = 35.429\ mm$$

$$d_{w1b} := 13 \cdot \sqrt[4]{\frac{P_{oe}}{n_{einoe}}}\ mm = 23.598\ mm$$

beide <60 daher eher Torsionskritisch!

$$d_{f1} - d_{w1t} = 30.851\ mm$$

$$3 \cdot m_1 = 6\ mm$$

$$5 \cdot m_1 = 10\ mm$$

daher Ritzel extra auf Welle aufsetzen!
8.7.2 Zwischenwelle

$$d_{w2t} := 16 \cdot \sqrt[3]{\frac{P_{oe}}{n_{2oe}}}\ mm = 61.937\ mm$$

$$d_{w2b} := 13 \cdot \sqrt[4]{\frac{P_{oe}}{n_{2oe}}}\ mm = 35.877\ mm$$

weder wirklich biege noch torsionskritisch irgendwie dazwischen!

$$d_{f3} - d_{w2t} = 28.463\ mm$$

$$3 \cdot m_2 = 6\ mm$$

$$5 \cdot m_2 = 10\ mm$$

Ritzel extra auf Welle aufsetzen!
8.7.3 Abtriebswelle

$$d_{w3t} := 16 \cdot \sqrt[3]{\frac{P_{oe}}{n_{ausoe}}}\ mm = 97.99\ mm$$

$$d_{w3b} := 13 \cdot \sqrt[4]{\frac{P_{oe}}{n_{ausoe}}}\ mm = 50.61\ mm$$

weder wirklich biege noch torsionskritisch irgendwie dazwischen!
9.1 Festigkeitsrechnung der Zahnräder nach DIN 3990/ISO 10300 (Stirnräder) bzw. DIN3991/ISO 10300 (Kegelräder)
Stufe I

$$F_{tNI} := \frac{2 \cdot T_{N1}}{d_1} = \left(2.917 \cdot 10^3\right)\ N$$

Umfangskraft

$$\frac{v_I \cdot z_{1W}}{100} = 4.49\ \frac{m}{s} \qquad \varepsilon_{\beta I} = 1.105$$

erfüllt da <14 für Schrägstirnräder mit eps.bet>1
erfüllt

$$z_{1W} < 50$$

erfüllt da >150N/mm aus VII/018

$$\frac{K_A \cdot F_{tNI}}{b_1} = 145.861\ \frac{N}{mm}$$

$$K_{VI} := 1.1$$

Breitenfaktoren

$$K_{H\beta I} := 1.135 + 0.18 \cdot \left(\frac{b_1}{d_1}\right)^2 + 0.23 + 10^{-3} \cdot b_1 \cdot \frac{1}{mm} = 1.462$$

$$h_1 := m_{1n} + 1.2 \cdot m_{1n} = 4.4\ mm$$

grobe Näherung für Qualität 6
siehe S.347

$$N_1 := \frac{\left(\frac{b_1}{h_1}\right)^2}{1 + \frac{b_1}{h_1} + \left(\frac{b_1}{h_1}\right)^2} = 0.891$$

$$K_{F\beta I} := K_{H\beta I}{}^{N_1} = 1.403$$

Lastaufteilungsfaktoren

$$K_{H\alpha I} := 1$$

$$K_{F\alpha I} := 1$$

$F_{\alpha I}$

Tatsächliche Umfangskraft für die Hertzsche Pressung

$$F_{tgesHI} := F_{tNI} \cdot K_A \cdot K_{VI} \cdot K_{H\beta I} \cdot K_{H\alpha I} = \left(9.383 \cdot 10^3\right) N$$

Tatsächliche Umfangskraft für die Zahnfußfestigkeit

$$F_{tgesFI} := F_{tNI} \cdot K_A \cdot K_{VI} \cdot K_{F\beta I} \cdot K_{F\alpha I} = \left(9.003 \cdot 10^3\right) N$$

Auftretende Hertzsche Pressung

$$Z_E := 189.8 \sqrt{\frac{N}{mm^2}}$$

Aus VII/027

$$Z_{HI} := 2.47$$

Zonenfaktor aus VII/026
Überdeckungsfaktor für Geradverzahnung gilt:
für eps.bet >1 wird eps.bet=1 gesetzt wodurch sich die vereinfachte Formel ergibt.
Schrägungsfaktor ZbetI

$$Z_{\varepsilon I} := \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_{\alpha tI}}} = 0.755$$

$$\varepsilon_{\beta I} = 1.105$$

$$Z_{\beta I} := \sqrt{cos(\beta)} = 0.992$$

$$\sigma_{HI} := Z_E \cdot Z_{HI} \cdot \sqrt{\frac{F_{tgesHI}}{b_1 \cdot d_1} \cdot \frac{u_{IW}+1}{u_{IW}}} \cdot Z_{\varepsilon I} \cdot Z_{\beta I} = 695.026 \frac{N}{mm^2}$$

Kontrolle der Hertzschen Pressung für Ritzel 1

$$\sigma_{Hlim1} = \left(1.07 \cdot 10^3\right) \frac{N}{mm^2}$$

$$Z_{WI} := 1$$

Einflussfaktor des Gegenradwerkstoffs ZW

Schmierstofffaktor ZL: aus VII/028 Temperatur des Getriebes beträgt 50°C v50=95mm^2/s daraus ergibt sich:

$$v_I = 12.828 \frac{m}{s}$$

$$Z_{LI} := 0.95$$

Geschwindigkeitsfaktor ZV aus VII/028:

$Z_{VI} := 1.01$ für $v_I = 12.828 \frac{m}{s}$

Rauigkeitsfaktor ZR aus VII/029

$R_{z1} := 5\ \mu m$

$R_{z2} := 5\ \mu m$

$$R_{z100I} := \frac{R_{z1} + R_{z2}}{2} \cdot \sqrt[3]{\frac{100\ mm}{a_I}} = 3.813\ \mu m$$

daraus ergibt sich:

$Z_{RI} := 0.96$

$Z_{XI} := 1$ Größenfaktor ZX aus VII/029

$Z_{NTI} := 1$ Wöhlerfaktor ZNT aus VII/029

Zulässige Hertzsche Pressung für Ritzel 1

$$\sigma_{HP1} := \sigma_{Hlim1} \cdot Z_{WI} \cdot Z_{LI} \cdot Z_{VI} \cdot Z_{RI} \cdot Z_{XI} \cdot Z_{NTI} = 985.598 \frac{N}{mm^2}$$

Sicherheit gegen Grübchenbildung für Ritzel 1

$$S_{Hlim1} := \frac{\sigma_{HP1}}{\sigma_{HI}} = 1.418$$

Die Sicherheit liegt über dem gewünschten Bereich (1,1<SH<1,4)

Kontrolle der Hertzschen Pressung für Rad 2
Aus actio=reactio folgt, dass die Hertzsche Pressung bei Rad 2 dieselbe wie bei Ritzel 1 ist.

$$\sigma_{Hlim2} = \left(1.03 \cdot 10^3\right) \frac{N}{mm^2}$$

Zulässige Hertzsche Pressung für Rad 2

$$\sigma_{HP2} := \sigma_{Hlim2} \cdot Z_{WI} \cdot Z_{LI} \cdot Z_{VI} \cdot Z_{RI} \cdot Z_{XI} \cdot Z_{NTI} = 948.754 \frac{N}{mm^2}$$

$S_{Hlim2} := \frac{\sigma_{HP2}}{\ } = 1.365$ Die Sicherheit liegt über dem

σ_{HI}

gewünschten Bereich
(1,1<SH<1,4)

Dauerbruchfestigkeit

$z_{1n} = 36.645$ $x_1 := 0$ $Y_{Fs1} := 4.29$

Kopffaktor YFs aus VII/020
Anteilfaktor Yeb aus VII/024

$z_{2n} = 195.789$ $x_2 := 0$ $Y_{Fs2} := 4.5$

$Y_{\varepsilon\beta} := 0.67$

Auftretende Zahnfußspannung für Ritzel 1

$$\sigma_{F1} := \frac{F_{tgesFI}}{b_1 \cdot m_1} \cdot Y_{Fs1} \cdot Y_{\varepsilon\beta} = 323.471 \ \frac{N}{mm^2}$$

Auftretende Zahnfußspannung für Rad 2

$$\sigma_{F2} := \frac{F_{tgesFI}}{b_2 \cdot m_2} \cdot Y_{Fs2} \cdot Y_{\varepsilon\beta} = 339.305 \ \frac{N}{mm^2}$$

max.Spannung am Zahnfuß des Prüfrades:

$\sigma_{FE1} = 680 \ \frac{N}{mm^2}$ Aus VII/017

$\sigma_{FE2} = 540 \ \frac{N}{mm^2}$

relative Stützziffer aus VII/022 und VII/020

$z_{1n} = 36.645$ => $Y_{sa1} := 1.74$ => $Y_{\delta rel1} := 0.99$

=> =>

$z_{2n} = 195.789$ $Y_{sa2} := 2.05$ $Y_{\delta rel2} := 1.01$

relativer Oberflächenfaktor aus VII/022

$Y_{Rrel1} := 1.03$ $Y_{Rrel2} := 1.03$

relativer Größenfaktor Yx aus VII/023

$Y_X := 1$

Wöhlerfaktor YNT aus VII/023

$Y_{NT} := 1$

Zulässige Zahnfußspannung für Ritzel 1

$$\sigma_{FP1} := \sigma_{FE1} \cdot Y_{\delta rel1} \cdot Y_{Rrel1} \cdot Y_X \cdot Y_{NT} = 693.396 \ \frac{N}{mm^2}$$

Sicherheit gegen Zahnbruch für Ritzel 1

$$S_{F1} := \frac{\sigma_{FP1}}{\sigma_{F1}} = 2.144$$

Zulässige Zahnfußspannung für Rad 2

$$\sigma_{FP2} := \sigma_{FE2} \cdot Y_{\delta rel2} \cdot Y_{Rrel2} \cdot Y_X \cdot Y_{NT} = 561.762 \ \frac{N}{mm^2}$$

Sicherheit gegen Zahnbruch für Rad 2

$$S_{F2} := \frac{\sigma_{FP2}}{\sigma_{F2}} = 1.656$$

liegt im erforderlichen Bereich zwischen 1,5 und 3,5

Kontrolle der Zahnfußfestigkeit für Ritzel 1 und Rad 2 auf Gewaltbruchfestigkeit

$$F_{tmax} := \frac{P}{d_1 \cdot n_{ein} \cdot \pi} \cdot K_A \cdot K_{VI} \cdot K_{F\beta I} \cdot K_{F\alpha I} = \left(9.003 \cdot 10^3\right) \ N$$

Auftretende maximale Zahnfußspannung für Ritzel 1

$$\sigma_{Fstat1} := \frac{F_{tmax}}{b_1 \cdot m_1} \cdot Y_{Fs1} \cdot Y_{\varepsilon\beta} = 323.471 \ \frac{N}{mm^2}$$

Auftretende maximale Zahnfußspannung für Rad 2

$$\sigma_{Fstat2} := \frac{F_{tmax}}{b_2 \cdot m_2} \cdot Y_{Fs2} \cdot Y_{\varepsilon\beta} = 339.305 \ \frac{N}{mm^2}$$

relative statische Stützziffer aus VII/023

$$Y_{s1} := Y_{sa1} \cdot \left(0.6 + 0.4 \cdot \varepsilon_{\alpha tI}\right) = 2.266$$

$$Y_{s2} := Y_{sa2} \cdot \left(0.6 + 0.4 \cdot \varepsilon_{\alpha tI}\right) = 2.669$$

$$Y_{\delta relstat1} := 0.2 + 0.4 \cdot Y_{s1} = 1.106$$

$$Y_{\delta relstat2} := 0.2 + 0.4 \cdot Y_{s2} = 1.268$$

$\delta_{relstat2}$ s_2

$Y_N := 2.5$ Wöhlerfaktor für Lastwechselzahhl N=1 aus VII/023

Ertragbare Zahnfußspannung für Ritzel 1 ohne Sicherheit

$$\sigma_{FGstat1} := \sigma_{FE1} \cdot Y_{\delta relstat1} \cdot Y_N = \left(1.881 \cdot 10^3\right) \frac{N}{mm^2}$$

Sicherheit gegen Gewaltbruch für Ritzel 1

$$S_{G1} := \frac{\sigma_{FGstat1}}{\sigma_{Fstat1}} = 5.814$$

Ertragbare statische Zahnfußspannung für Rad 2

$$\sigma_{FGstat2} := \sigma_{FE2} \cdot Y_{\delta relstat2} \cdot Y_N = \left(1.712 \cdot 10^3\right) \frac{N}{mm^2}$$

Sicherheit gegen Gewaltbruch für Rad 2

$$S_{G2} := \frac{\sigma_{FGstat2}}{\sigma_{Fstat2}} = 5.044$$ liegt im zulässigen Bereich 5<SG<10

Stufe II

Umfangskraft

$$F_{tNII} := \frac{2 \cdot T_{N2}}{d_3} = \left(1.108 \cdot 10^4\right) N$$ Umfangskraft

$$\frac{v_{II} \cdot z_{3W}}{100} = 0.857 \frac{m}{s}$$ erfüllt da <10 für Geradstirnräder erfüllt

$z_{3W} = 25$ $z_{3W} < 50$ erfüllt da >150N/mm aus VII/018 für Qualität 7

$$\frac{K_A \cdot F_{tNII}}{b_3} = 221.575 \frac{N}{mm}$$

$K_{VII} := 1.05$

Breitenfaktoren

$$K_{H\beta II} := 1.150 + 0.18 \cdot \left(\frac{b_3}{d_3}\right)^2 + 0.30 + 10^{-3} \cdot b_3 \cdot \frac{1}{mm} = 1.73$$

$h_3 := m_3 + 1.2 \cdot m_3 = 8.8\ mm$

grobe Näherung für Qualität 7
siehe S.347

$$N_3 := \frac{\left(\frac{b_3}{h_3}\right)^2}{1 + \frac{b_3}{h_3} + \left(\frac{b_3}{h_3}\right)^2} = 0.913$$

$K_{F\beta II} := K_{H\beta II}{}^{N_3} = 1.649$

Lastaufteilungsfaktoren

$K_{H\alpha II} := 1$

$K_{F\alpha II} := 1$

Tatsächliche Umfangskraft für die Hertzsche Pressung

$F_{tgesHII} := F_{tNII} \cdot K_A \cdot K_{VII} \cdot K_{H\beta II} \cdot K_{H\alpha II} = \left(4.025 \cdot 10^4\right)\ N$

Tatsächliche Umfangskraft für die Zahnfußfestigkeit

$F_{tgesFII} := F_{tNII} \cdot K_A \cdot K_{VII} \cdot K_{F\beta II} \cdot K_{F\alpha II} = \left(3.837 \cdot 10^4\right)\ N$

Auftretende Hertzsche Pressung

$Z_E := 189.8 \sqrt{\frac{N}{mm^2}}$

Aus VII/027

$Z_{HII} := 2.5$

Zonenfaktor aus VII/026
Überdeckungsfaktor für
Geradverzahnung gilt:

$Z_{\varepsilon II} := \sqrt{\frac{4 - \varepsilon_{\alpha II}}{3}} = 0.89$

Schrägungsfaktor ZbetII für
Geradverzahnung

$Z_{\beta II} := 1$

$$\sigma_{HII} := Z_E \cdot Z_{HII} \cdot \sqrt{\frac{F_{tgesHII}}{b_3 \cdot d_3} \cdot \frac{u_{IIW} + 1}{u_{IIW}}} \cdot Z_{\varepsilon II} \cdot Z_{\beta II} = 948.203\ \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{Hlim3} = \left(1.23 \cdot 10^3\right) \frac{N}{mm^2}$$

$Z_{WII} := 1$ Einflussfaktor des Gegenradwerkstoffs ZW

Schmierstofffaktor ZL: aus VII/028 gewähltes Öl VG 100 Temperatur des Getriebes beträgt 50°C v50=90mm^2/s daraus ergibt sich:

$$Z_{LII} := 0.95$$

Geschwindigkeitsfaktor ZV aus VII/028:

$Z_{VII} := 0.97$ für $v_{II} = 3.43 \frac{m}{s}$

Rauigkeitsfaktor ZR aus VII/029

$$R_{z3} := 4\ \mu m$$

$$R_{z4} := 4\ \mu m$$

$$R_{z100II} := \frac{R_{z3} + R_{z4}}{2} \cdot \sqrt[3]{\frac{100\ mm}{a_{II}}} = 2.955\ \mu m$$

daraus ergibt sich:

$$Z_{RII} := 1.02$$

$Z_{XII} := 1$ Größenfaktor ZX aus VII/029

Wöhlerfaktor ZNT aus VII/029

$$Z_{NTII} := 1$$

Zulässige Hertzsche Pressung für Ritzel 3

$$\sigma_{HP3} := \sigma_{Hlim3} \cdot Z_{WII} \cdot Z_{LII} \cdot Z_{VII} \cdot Z_{RII} \cdot Z_{XII} \cdot Z_{NTII} = \left(1.156 \cdot 10^3\right) \frac{N}{mm^2}$$

Sicherheit gegen Grübchenbildung für Ritzel 1

$S_{Hlim3} := \frac{\sigma_{HP3}}{\sigma_{HII}} = 1.219$ Die Sicherheit liegt im gewünschten Bereich (1,1<SH<1,4)

$$\sigma_{Hlim4} = \left(1.11 \cdot 10^3\right) \frac{N}{mm^2}$$

Zulässige Hertzsche Pressung für Rad 4

$$\sigma_{HP4} := \sigma_{Hlim4} \cdot Z_{WII} \cdot Z_{LII} \cdot Z_{VII} \cdot Z_{RII} \cdot Z_{XII} \cdot Z_{NTII} = \left(1.043 \cdot 10^3\right) \frac{N}{mm^2}$$

$$S_{Hlim4} := \frac{\sigma_{HP4}}{\sigma_{HII}} = 1.1$$

Die Sicherheit liegt im gewünschten Bereich (1,1<SH<1,4)

Dauerbruchfestigkeit

$z_{3W} = 25$ $\quad x_1 := 0$ $\quad Y_{Fs3} := 4.35$ $\quad$ Kopffaktor YFs aus VII/020

Anteilfaktor Yeb aus VII/024

$z_{4W} = 99$ $\quad x_2 := 0$ $\quad Y_{Fs4} := 4.27$

$Y_{\varepsilon\beta II} := 0.73$ $\quad \varepsilon_{\alpha II} = 1.624$

Auftretende Zahnfußspannung für Ritzel 3

$$\sigma_{F3} := \frac{F_{tgesFII}}{b_3 \cdot m_3} \cdot Y_{Fs3} \cdot Y_{\varepsilon\beta II} = 304.585 \frac{N}{mm^2}$$

Auftretende Zahnfußspannung für Rad 4

$$\sigma_{F4} := \frac{F_{tgesFII}}{b_4 \cdot m_4} \cdot Y_{Fs4} \cdot Y_{\varepsilon\beta II} = 298.983 \frac{N}{mm^2}$$

max.Spannung am Zahnfuß des Prüfrades:

$$\sigma_{FE3} = 840 \frac{N}{mm^2}$$

Aus VII/017

$$\sigma_{FE4} = 810 \frac{N}{mm^2}$$

relative Stützziffer aus VII/022 und VII/020

$z_{3W} = 25$ => $Y_{sa3} := 1.65$ => $Y_{\delta rel3} := 0.98$

=> =>

$z_{4W} = 99$ $\quad Y_{sa4} := 1.92$ $\quad Y_{\delta rel4} := 1.02$

relativer Oberflächenfaktor aus VII/022

$Y_{Rrel3} := 1.03$ $\qquad$ $Y_{Rrel4} := 1.03$

relativer Größenfaktor Yx aus VII/023

$Y_{XII} := 1$

Wöhlerfaktor YNT aus VII/023

$Y_{NTII} := 1$

Zulässige Zahnfußspannung für Ritzel 3

$$\sigma_{FP3} := \sigma_{FE3} \cdot Y_{\delta rel3} \cdot Y_{Rrel3} \cdot Y_{XII} \cdot Y_{NTII} = 847.896 \ \frac{N}{mm^2}$$

Sicherheit gegen Zahnbruch für Ritzel 3

$$S_{F3} := \frac{\sigma_{FP3}}{\sigma_{F3}} = 2.784$$

Zulässige Zahnfußspannung für Rad 4

$$\sigma_{FP4} := \sigma_{FE4} \cdot Y_{\delta rel4} \cdot Y_{Rrel4} \cdot Y_{XII} \cdot Y_{NTII} = 850.986 \ \frac{N}{mm^2}$$

Sicherheit gegen Zahnbruch für Rad 2

$S_{F4} := \frac{\sigma_{FP4}}{\sigma_{F4}} = 2.846$ $\qquad$ liegt im erforderlichen Bereich zwischen 1,5 und 3,5

Kontrolle der Zahnfußfestigkeit für Ritzel 3 und Rad 4 auf Gewaltbruchfestigkeit

$$F_{tmaxII} := \frac{P}{d_3 \cdot n_{2W} \cdot \pi} \cdot K_A \cdot K_{VII} \cdot K_{F\beta II} \cdot K_{F\alpha II} = \left(3.837 \cdot 10^4\right) \ N$$

Auftretende maximale Zahnfußspannung für Ritzel 1

$$\sigma_{Fstat3} := \frac{F_{tmaxII}}{b_3 \cdot m_3} \cdot Y_{Fs3} \cdot Y_{\varepsilon\beta II} = 304.585 \ \frac{N}{mm^2}$$

Auftretende maximale Zahnfußspannung für Rad 4

$$\sigma_{Fstat4} := \frac{F_{tmaxII}}{b_4 \cdot m_4} \cdot Y_{Fs4} \cdot Y_{\varepsilon\beta II} = 298.983 \ \frac{N}{mm^2}$$

relative statische Stützziffer aus VII/023

$$Y_{s3} := Y_{sa3} \cdot \left(0.6 + 0.4 \cdot \varepsilon_{\alpha II}\right) = 2.062$$

$$Y_{s4} := Y_{sa4} \cdot \left(0.6 + 0.4 \cdot \varepsilon_{\alpha II}\right) = 2.399$$

$$Y_{\delta relstat3} := 0.2 + 0.4 \cdot Y_{s3} = 1.025$$

$$Y_{\delta relstat4} := 0.2 + 0.4 \cdot Y_{s4} = 1.16$$

$Y_N := 2.5$ Wöhlerfaktor für Lastwechselzahhl N=1 aus VII/023

Ertragbare Zahnfußspannung für Ritzel 3 ohne Sicherheit

$$\sigma_{FGstat3} := \sigma_{FE3} \cdot Y_{\delta relstat3} \cdot Y_N = \left(2.152 \cdot 10^3\right) \ \frac{N}{mm^2}$$

Sicherheit gegen Gewaltbruch für Ritzel 3

$$S_{G3} := \frac{\sigma_{FGstat3}}{\sigma_{Fstat3}} = 7.065$$

Ertragbare statische Zahnfußspannung für Rad 4

$$\sigma_{FGstat4} := \sigma_{FE4} \cdot Y_{\delta relstat4} \cdot Y_N = \left(2.348 \cdot 10^3\right) \ \frac{N}{mm^2}$$

Sicherheit gegen Gewaltbruch für Rad 4

$S_{G4} := \frac{\sigma_{FGstat4}}{\sigma_{Fstat4}} = 7.854$ liegt im zulässigen Bereich 5<SG<10

Sicherheiten zusammengefasst:

Stufe I	Stufe II
$S_{Hlim1} = 1.418$	$S_{Hlim3} = 1.219$
$S_{Hlim2} = 1.365$	$S_{Hlim4} = 1.1$
$S_{F1} = 2.144$	$S_{F3} = 2.784$

$S_{F2} = 1.656$ $S_{F4} = 2.846$

$S_{G1} = 5.814$ $S_{G3} = 7.065$

$S_{G2} = 5.044$ $S_{G4} = 7.854$

Berechnung der Lagerkräfte siehe Skizze 1

$Zahnhöhe_4 := \frac{d_{a4} - d_{b4}}{2} = 15.941\ mm$ Gehäuseabstand 1.3 mal höchste Zahnhöhe

$Abstand := 1.3 \cdot Zahnhöhe_4 = 20.723\ mm$

$Gehäuseabstand := 21\ mm$

$Gehäuselänge := a_I + a_{II} + \frac{d_1}{2} + \frac{d_4}{2} + 2 \cdot Gehäuseabstand = 748.965\ mm$

$l_1 := 752\ mm$

$Gehäusebreite := 3 \cdot Gehäuseabstand + b_1 + b_3 = 203\ mm$

$Lagerbreite := 30\ mm$ angenommen

$d_{1W} := 30\ mm$

$d_{2W} := 50\ mm$

$d_{3W} := 74\ mm$

$a_1 := \frac{Lagerbreite}{2} + Gehäuseabstand + \frac{b_1}{2} = 56\ mm$

$a_2 := a_1 + \frac{b_1}{2} + Gehäuseabstand + \frac{b_3}{2} = 147\ mm$

Einbaufall 1

$F_{U1} := 2 \cdot \frac{T_{N1}}{d_1} = \left(2.917 \cdot 10^3\right)\ N$

$F_{R1} := F_{U1} \cdot \frac{\tan(\alpha)}{cos(\beta)} = \left(1.078 \cdot 10^3\right)\ N$

$F_{A1} := F_{U1} \cdot tan(\beta) = 514.386\ N$

$F_{A11} := F_{A1}$

$$F_{A12} := F_{A11}$$

$$A_{y1} := \frac{F_{R1} \cdot (l_1 - a_1) - F_{A11} \cdot \frac{d_1}{2}}{l_1} = 973.565\ N$$

$$A_{z1} := F_{U1} \cdot \left(1 - \frac{a_1}{l_1}\right) = \left(2.7 \cdot 10^3\right)\ N$$

$$A_{radial1} := \sqrt{A_{y1}^{\ 2} + A_{z1}^{\ 2}} = \left(2.87 \cdot 10^3\right)\ N$$

$$B_{x1} := F_{A11}$$

$$B_{axial1} := B_{x1}$$

$$B_{y1} := \frac{F_{A11} \cdot \left(\frac{d_1}{2}\right) + F_{R1} \cdot a_1}{l_1} = 104.599\ N$$

$$B_{z1} := F_{U1} \cdot \frac{a_1}{l_1} = 217.24\ N$$

$$B_{radial1} := \sqrt{B_{y1}^{\ 2} + B_{z1}^{\ 2}} = 241.111\ N$$

Einbaufall 2

$$A_{y2} := \frac{F_{R1} \cdot (l_1 - a_1) + F_{A11} \cdot \frac{d_1}{2}}{l_1} = \left(1.022 \cdot 10^3\right)\ N$$

$$A_{z2} := F_{U1} \cdot \left(1 - \frac{a_1}{l_1}\right) = \left(2.7 \cdot 10^3\right)\ N$$

$$A_{radial2} := \sqrt{A_{y2}^{\ 2} + A_{z2}^{\ 2}} = \left(2.887 \cdot 10^3\right)\ N$$

$$B_{x2} := -F_{A11} = -514.386\ N \qquad B_{axial2} := B_{x2}$$

$$B_{y2} := \frac{-F_{A12} \cdot \left(\frac{d_1}{2}\right) + F_{R1} \cdot a_1}{l_1} = 55.979\ N$$

$$B_{z2} := F_{U1} \cdot \frac{a_1}{l_1} = 217.24\ N$$

$$B_{radial2} := \sqrt{B_{y2}^{\ 2} + B_{z2}^{\ 2}} = 224.337\ N$$

Lagerkräfte der Zwischenwelle siehe Skizze 2
Einbaufall 1

$F_{U2} := F_{U1}$

$F_{U3} := F_{U2} \cdot \frac{d_2}{d_3}$

$F_{R2} := F_{R1} = \left(1.078 \cdot 10^3\right)\ N$

$F_{R3} := F_{U3} \cdot tan(\alpha) = \left(4.032 \cdot 10^3\right)\ N$

$F_{A2} := F_{A1} = 514.386\ N$

$F_{A21} := F_{A1}$

$F_{A22} := F_{A1}$

$C_{x1} := 0$

$C_{axial1} := C_{x1}$

$C_{y1} := F_{R2} \cdot \left(1 - \frac{a_1}{l_1}\right) - F_{R3} \cdot \left(1 - \frac{a_2}{l_1}\right) + F_{A21} \cdot \frac{d_2}{2 \cdot l_1} = -2.116 \cdot 10^3\ N$

$C_{z1} := F_{U2} \cdot \left(1 - \frac{a_1}{l_1}\right) - F_{U3} \cdot \left(1 + \frac{a_2}{l_1}\right) = -1.054 \cdot 10^4\ N$

$C_{radial1} := \sqrt{C_{y1}^{\ 2} + C_{z1}^{\ 2}} = \left(1.075 \cdot 10^4\right)\ N$

$D_{x1} := F_{A21} = 514.386\ N$

$D_{axial1} := D_{x1}$

$D_{y1} := \frac{F_{R2} \cdot a_1 - F_{A21} \cdot \frac{d_2}{2} - F_{R3} \cdot a_2}{l_1} = -837.832\ N$

$D_{z1} := F_{U2} \cdot \frac{a_1}{l_1} + F_{U3} \cdot \left(2 + \frac{a_2}{l_1}\right) = \left(2.454 \cdot 10^4\right)\ N$

$D_{radial1} := \sqrt{D_{y1}^{\ 2} + D_{z1}^{\ 2}} = \left(2.455 \cdot 10^4\right)\ N$

Einbaufall 2

$C_{x2} := F_{A22} = 514.386\ N \qquad C_{axial2} := C_{x2}$

$C_{y2} := F_{R2} \cdot \left(1 - \frac{a_1}{l_1}\right) - F_{R3} \cdot \left(1 - \frac{a_2}{l_1}\right) - F_{A21} \cdot \frac{d_2}{2 \cdot l_1} = -2.376 \cdot 10^3\ N$

$C_{z2} := F_{U2} \cdot \left(1 - \frac{a_1}{l_1}\right) - F_{U3} \cdot \left(1 + \frac{a_2}{l_1}\right) = -1.054 \cdot 10^4\ N$

$C_{radial2} := \sqrt{C_{y2}^{\ 2} + C_{z2}^{\ 2}} = \left(1.081 \cdot 10^4\right)\ N$

$D_{x2} := 0$

$$D_{axial2} := D_{x2}$$

$$D_{y2} := \frac{F_{R2} \cdot a_1 + F_{A21} \cdot \frac{d_2}{2} - F_{R3} \cdot a_2}{l_1} = -578.061\ N$$

$$D_{z2} := F_{U2} \cdot \frac{a_1}{l_1} + F_{U3} \cdot \left(2 + \frac{a_2}{l_1}\right) = \left(2.454 \cdot 10^4\right)\ N$$

$$D_{radial2} := \sqrt{D_{y2}^{\ 2} + D_{z2}^{\ 2}} = \left(2.455 \cdot 10^4\right)\ N$$

Lagerkräfte der Abtriebswelle Skizze 3

$$F_{U4} := F_{U3} = \left(1.108 \cdot 10^4\right)\ N$$

$$F_{R4} := F_{R3} = \left(4.032 \cdot 10^3\right)\ N$$

$$E_x := 0$$

$$E_x := 0$$

$$E_y := F_{R4} \cdot \left(1 - \frac{a_2}{l_1}\right) = \left(3.244 \cdot 10^3\right)\ N$$

$$E_z := -F_{U4} \cdot \left(1 - \frac{a_2}{l_1}\right) = -8.913 \cdot 10^3\ N \qquad E_{z2} := E_z$$

$$E_{radial1} := \sqrt{E_y^{\ 2} + E_z^{\ 2}} = \left(9.485 \cdot 10^3\right)\ N \qquad E_{radial2} := E_{radial1}$$

$$F_y := F_{R4} \cdot \frac{a_2}{l_1} = 788.235\ N$$

$$F_z := -F_{U4} \cdot \frac{a_2}{l_1} = -2.166 \cdot 10^3\ N \qquad F_{z2} := F_z$$

$$F_{radial1} := \sqrt{F_y^{\ 2} + F_z^{\ 2}} = \left(2.305 \cdot 10^3\right)\ N \qquad F_{radial2} := F_{radial1}$$

Wahl des Einbaufalls
Auswahlkriterium: Die Axialkraft soll möglichst vom radial weniger belasteten Lager aufgenommen werden.
Antriebswelle

Einbaufall 1

$$A_{radial1} = \left(2.87 \cdot 10^3\right)\ N$$

$$B_{axial1} = 514.386\ N$$

$$B_{radial1} = 241.111\ N$$

Einbaufall 2

$$A_{radial2} = \left(2.887 \cdot 10^3\right)\ N$$

$$B_{axial2} = -514.386\ N$$

$$B_{radial2} = 224.337\ N$$

In beiden Fällen B radial weniger belastet weshalb der Einbaufall aufgrund der Lagerkräfte der Zwischenwelle ausgewählt wird.
Zwischenwelle

Einbaufall 1

$C_{axial1} = 0$

$C_{radial1} = \left(1.075 \cdot 10^4\right) N$

$D_{axial1} = 514.386\ N$

$D_{radial1} = \left(2.455 \cdot 10^4\right) N$

Einbaufall 2

$C_{axial2} = 514.386\ \frac{kg \cdot m}{s^2}$

$C_{radial2} = \left(1.081 \cdot 10^4\right) N$

$D_{axial2} = 0$

$D_{radial2} = \left(2.455 \cdot 10^4\right) N$

In beiden Fällen C radial weniger belastet daher Einbaufall 2 gewählt.
Abtriebswelle
Da die zweite Stufe geradverzahnt ist treten in den Lagern keine Axialkräfte auf.
Biegemomentenverläufe
Antriebswelle

$x := 0\ mm, 0.01\ mm .. l_1$

$l_1 = 752\ mm$

$$M_{y1}(x) := \left\| \begin{array}{l} \text{if } x \le a_1 \\ \quad \left\| A_{z2} \cdot x \right. \end{array} \right.$$

Dimensionierung der Antriebswelle
Querschnitt 1
Skizze 4

$$b_{w1} := l_1 - a_1 - \frac{b_1}{2} = 676\ mm$$

$$c_{w1} := b_{w1} - 10\ mm = 666\ mm$$

Absatz 1

$$M_{BAb1} := B_{radial2} \cdot b_{w1} = 151.652\ N \cdot m$$

Absatz 2

$$M_{BAb2} := B_{radial2} \cdot c_{w1} = 149.408\ N \cdot m$$

Mitte Ritzel (a1)

$$M_{B1I} := A_{radial2} \cdot a_1 = 161.672\ N \cdot m$$

Torsionsmoment (Nennmoment)

$$T_{N1} = 103.678\ N \cdot m$$

Stoßbelastung

$$T_{1Imax} := T_{N1} \cdot K_A = 207.356\ N \cdot m$$

$$M_{1Imax} := 0$$

auftretende Spannungen Absatz 1

$$d_{Ab1} := 30\ mm$$

$$\sigma_{1Ab1} := \frac{32 \cdot M_{BAb1}}{\pi \cdot d_{Ab1}^{\ 3}} = 57.212\ \frac{N}{mm^2}$$

$$T_{1Ab1} := \frac{16 \cdot T_{1Imax}}{\pi \cdot d_{Ab1}^{\ 3}} = 39.113 \ \frac{N}{mm^2}$$

auftretende Spannungen Absatz 2

$$d_{Ab2} := 30 \ mm$$

$$\sigma_{1Ab2} := \frac{32 \cdot M_{BAb2}}{\pi \cdot d_{Ab2}^{\ 3}} = 56.365 \ \frac{N}{mm^2}$$

$$T_{1Ab2} := \frac{16 \cdot T_{1Imax}}{\pi \cdot d_{Ab2}^{\ 3}} = 39.113 \ \frac{N}{mm^2}$$

auftretende Spannungen bei der Passfeder 1

$$d_{WPf1} := 30 \ mm$$

$$\sigma_{1Pf1} := \frac{32 \cdot M_{B1I}}{\pi \cdot d_{Ab1}^{\ 3}} = 60.992 \ \frac{N}{mm^2}$$

$$T_{1Pf1} := \frac{16 \cdot T_{1Imax}}{\pi \cdot d_{Ab1}^{\ 3}} = 39.113 \ \frac{N}{mm^2}$$

Wellenwerkstoff 34 CrMo 4

$$\sigma_{B34CrMo4} := 1000 \ \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{S34CrMo4} := 800 \ \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{zdW34CrMo4} := 400 \ \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{bW34CrMo4} := 500 \ \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_{tW34CrMo4} := 300 \ \frac{N}{mm^2}$$

Oberflächenrauheit

$$R_{zw1} := 12.5 \ \mu m$$

Absatz 1
Formzahlen

$$d_{w1max} := 36 \ mm$$

$$t_{Ab1} := \frac{d_{w1max} - d_{Ab1}}{2} = 3 \ mm$$

$$r_{Ab1} := \frac{d_{Ab1}}{\ } = 2 \ mm$$ siehe Skript S.170

15

$r_{Ab1} := 2\ mm$ gewählt

$$\alpha_{\sigma Ab1} := 1 + \frac{1}{\sqrt{0.62 \cdot \frac{r_{Ab1}}{t_{Ab1}} + 11.6 \cdot \frac{r_{Ab1}}{d_{Ab1}} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{r_{Ab1}}{d_{Ab1}}\right)^2 + 0.2 \cdot \left(\frac{r_{Ab1}}{t_{Ab1}}\right)^3 \cdot \frac{d_{Ab1}}{d_{w1max}}}} = 1.829$$

$$\alpha_{TAb1} := 1 + \frac{1}{\sqrt{3.4 \cdot \frac{r_{Ab1}}{t_{Ab1}} + 38 \cdot \frac{r_{Ab1}}{d_{Ab1}} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{r_{Ab1}}{d_{Ab1}}\right)^2 + \left(\frac{r_{Ab1}}{t_{Ab1}}\right)^2 \cdot \frac{d_{Ab1}}{d_{w1max}}}} = 1.412$$

Technologischer Größeneinflussfaktor

$d_{B1} := 16\ mm$

$$K_{1Ab1} := 1 - 0.26 \cdot log\left(\frac{d_{Ab1}}{d_{B1}}\right) = 0.929$$

Geometrische Größeneinflussfaktoren

$$K_{2Ab1} := 1 - 0.2 \cdot \frac{log\left(\frac{d_{Ab1}}{7.5\ mm}\right)}{log(20)} = 0.907$$

$$K_{3Ab1} := 1 - 0.2 \cdot log\left(\alpha_{\sigma Ab1}\right) \cdot \frac{log\left(\frac{d_{Ab1}}{7.5\ mm}\right)}{log(20)} = 0.976$$

Einfluss der Oberflächenrauhigkeit

$$\sigma_{BAb1} := K_{1Ab1} \cdot \sigma_{B34CrMo4} = 929.02\ \frac{N}{mm^2}$$

$$K_{F\sigma Ab1} := 1 - 0.22 \cdot log\left(\frac{R_{zw1}}{\mu m}\right) \cdot \left(log\left(\frac{\sigma_{BAb1}}{20\ \frac{N}{mm^2}}\right) - 1\right) = 0.839$$

$$K_{FTAb1} := 0.575 \cdot K_{F\sigma Ab1} + 0.425 = 0.907$$

Einflussfaktor der Oberflächenverfestigung

$K_{v1} := 1$

Bezogenes Spannungsgefälle G'

$$\psi_{Ab1} := \frac{1}{4 \cdot \sqrt{\frac{t_{Ab1}}{r_{Ab1}} + 2}} = 0.145 \qquad \frac{d_{Ab1}}{d_{w1max}} = 0.833 \qquad 0.846 > 0.67$$

$$G_{BAb1} := \frac{2.3 \cdot (1 + \psi_{Ab1})}{r_{Ab1}} = 1.317 \ \frac{1}{mm}$$

$$G_{TAb1} := \frac{1.15}{r_{Ab1}} = 0.575 \ \frac{1}{mm}$$

Kerbwirkungszahl

$$\sigma_{SdAb1} := K_{1Ab1} \cdot \sigma_{S34CrMo4} = 743.216 \ \frac{N}{mm^2}$$

$$n_{\sigma StützAb1} := 1 + \sqrt{G_{BAb1} \cdot mm} \cdot 10^{-\left(0.33 + \frac{\sigma_{SdAb1}}{712 \frac{N}{mm^2}}\right)} = 1.049$$

$$\beta_{\sigma Ab1} := \frac{\alpha_{\sigma Ab1}}{n_{\sigma StützAb1}} = 1.744$$

$K_{2F} := 1.2$ Aus 743-1 Tabelle 3

$$T_{tFAb1} := \frac{K_{1Ab1} \cdot K_{2F} \cdot \sigma_{S34CrMo4}}{\sqrt{3}} = 514.915 \ \frac{N}{mm^2}$$

$$n_{TStützAb1} := 1 + \sqrt{G_{TAb1} \cdot mm} \cdot 10^{-\left(0.33 + \frac{T_{tFAb1}}{712 \frac{N}{mm^2}}\right)} = 1.067$$

$$\beta_{TAb1} := \frac{\alpha_{TAb1}}{n_{TStützAb1}} = 1.323$$

Gesamteinflussfaktoren DIN 743-1 S.4

$$K_{\sigma Ab1} := \left(\frac{\beta_{\sigma Ab1}}{K_{2Ab1}} + \frac{1}{K_{F\sigma Ab1}} - 1\right) \cdot \frac{1}{K_{v1}} = 2.114$$

$$K_{\tau Ab1} := \left(\frac{\beta_{TAb1}}{K_{2Ab1}} + \frac{1}{K_{FTAb1}} - 1\right) \cdot \frac{1}{K_{v1}} = 1.56$$

Berechnung der Bauteilgestaltfestigkeit unter Berücksichtigung der berechneten Einflüsse

$$\sigma_{bWKAb1} := \frac{\sigma_{bW34CrMo4} \cdot K_{1Ab1}}{K_{\sigma Ab1}} = 219.747 \ \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_{tWKAb1} := \frac{\tau_{tW34CrMo4} \cdot K_{1Ab1}}{K_{\tau Ab1}} = 178.636 \ \frac{N}{mm^2}$$

Einflussfaktoren der Mittelspannungsempfindlichkeit DIN 743-1 S.5

$$\psi_{b\sigma KAb1} := \frac{\sigma_{bWKAb1}}{2 \cdot K_{1Ab1} \cdot \sigma_{B34CrMo4} - \sigma_{bWKAb1}} = 0.134$$

$$\psi_{\tau KAb1} := \frac{\tau_{tWKAb1}}{2 \cdot K_{1Ab1} \cdot \sigma_{B34CrMo4} - \tau_{tWKAb1}} = 0.106$$

Vergleichsmittelspannungen

$$\sigma_{1Ab1m} := 0 \ \frac{N}{mm^2} \qquad T_{1Ab1} = 39.113 \ \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{mvAb1} := \sqrt{\sigma_{1Ab1m}^{\ 2} + 3 \cdot T_{1Ab1}^{\ 2}} = 67.746 \ \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_{mvAb1} := \frac{\sigma_{mvAb1}}{\sqrt{3}} = 39.113 \ \frac{N}{mm^2}$$

Bauteilfließgrenze DIN 743-1 S.6

$$\gamma_{FAb1} := 1.05$$

$$\sigma_{bFKAb1} := K_{1Ab1} \cdot K_{2F} \cdot \gamma_{FAb1} \cdot \sigma_{S34CrMo4} = 936.452 \ \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_{tFKAb1} := K_{1Ab1} \cdot K_{2F} \cdot \gamma_{FAb1} \cdot \frac{\sigma_{S34CrMo4}}{\sqrt{3}} = 540.661 \ \frac{N}{mm^2}$$

$$\frac{\sigma_{mvAb1}}{\sigma_{1Ab1}} = 1.184$$

$$\frac{\sigma_{bFKAb1} - \sigma_{bWKAb1}}{\sigma_{bWKAb1} - \sigma_{bFKAb1} \cdot \psi_{b\sigma KAb1}} = 7.613$$

$1.184 \leq 7.792$ Bedingung erfüllt daraus folgt

$$\sigma_{bADKAb1} := \frac{\sigma_{bWKAb1}}{1 + \psi_{b\sigma KAb1} \cdot \frac{\sigma_{mvAb1}}{\sigma_{1Ab1}}} = 189.629 \ \frac{N}{mm^2}$$

$$\frac{\tau_{mvAb1}}{T_{1Ab1}} = 1 \qquad \frac{\tau_{tFKAb1} - \tau_{tWKAb1}}{\tau_{tWKAb1} - \tau_{tFKAb1} \cdot \psi_{\tau KAb1}} = 2.989$$

$1 < 4.636$

$$\tau_{tADKAb1} := \frac{\tau_{tWKAb1}}{1 + \psi_{\tau KAb1} \cdot \frac{\tau_{mvAb1}}{T_{1Ab1}}} = 161.462 \ \frac{N}{mm^2}$$

Sicherheit für Dauerfestigkeitsnachweis

$$S_{DAb1} := \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_{1Ab1}}{\sigma_{bADKAb1}}\right)^2 + \left(\frac{T_{1Ab1}}{\tau_{tADKAb1}}\right)^2}} = 2.585$$

$$S_{FAb1} := \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_{1Ab1}}{\sigma_{bFKAb1}}\right)^2 + \left(\frac{T_{1Ab1}}{\tau_{tFKAb1}}\right)^2}} = 10.561$$

Sicherheit der Passfeder 1:

$$d_{BK1} := 40 \ mm$$

$$\sigma_{BdPf1} := \sigma_{B34CrMo4} \cdot \left(1 - 0.26 \cdot log\left(\frac{d_{BK1}}{16 \ mm}\right)\right) = 896.536 \ \frac{N}{mm^2}$$

Biegespannungsamplitude DIN 743-1 S.5

$$\beta_{\sigma Pf1} := 3 \cdot \left(\frac{\sigma_{BdPf1}}{1000 \ \frac{N}{mm^2}}\right)^{0.38} = 2.878$$

Technologischer Größeneinflussfaktor

$$d_{B1} = 16 \ mm$$

$$K_{1Pf1} := 1 - 0.26 \cdot log\left(\frac{d_{WPf1}}{d_{B1}}\right) = 0.929$$

$$K_{2Pf1} := 1 - 0.2 \cdot \frac{log\left(\frac{d_{WPf1}}{7.5 \ mm}\right)}{log(20)} = 0.907$$

$$K_{3dBPf1} := 1 - 0.2 \cdot log\left(\beta_{\sigma Pf1}\right) \cdot \frac{log\left(\frac{d_{B1}}{7.5 \ mm}\right)}{log(20)} = 0.977$$

$$log\left(\frac{d_{WPf1}}{}\right)$$

$$K_{3Pf1} := 1 - 0.2 \cdot log\left(\beta_{\sigma Pf1}\right) \cdot \frac{log\left(\frac{d_{B1}}{7.5\ mm}\right)}{log(20)} = 0.958$$

Experimentell bestimmte Kerbwirkungszahl DIN 743-2 S.3

$$\beta_{\sigma exPf1} := \beta_{\sigma Pf1} \cdot \frac{K_{3dBPf1}}{K_{3Pf1}} = 2.936$$

Einflussfaktor der Oberflächenrauhigkeit

$$K_{F\sigma Pf1} := 1$$

$$K_{F\tau Pf1} := 1$$

Einflussfaktor der Oberflächenverfestigung

$$K_{v1} = 1$$

Gesamteinflussfaktor nach DIN 743-1 Glg 8

$$K_{\sigma Pf1} := \left(\frac{\beta_{\sigma exPf1}}{K_{2Pf1}} + \frac{1}{K_{F\sigma Pf1}} - 1\right) \cdot \frac{1}{K_{v1}} = 3.235$$

Kerbwirkungszahl

$$d_{BK1} = 40\ mm$$

$$\beta_{\tau Pf1} := 0.56 \cdot \beta_{\sigma Pf1} + 0.1 = 1.712$$

Geometrischer Größeneinflussfaktor

$$K_{3\tau dBPf1} := 1 - 0.2 \cdot log\left(\beta_{\tau Pf1}\right) \cdot \frac{log\left(\frac{d_{B1}}{7.5\ mm}\right)}{log(20)} = 0.988$$

$$K_{3\tau Pf1} := 1 - 0.2 \cdot log\left(\beta_{\tau Pf1}\right) \cdot \frac{log\left(\frac{d_{WPf1}}{7.5\ mm}\right)}{log(20)} = 0.978$$

Experimentell bestimmte Kerbwirkungszahl

$$\beta_{\tau exPf1} := \beta_{\tau Pf1} \cdot \frac{K_{3\tau dBPf1}}{K_{3\tau Pf1}} = 1.729$$

Gesamteinflussfaktor

$$K_{\tau Pf1} := \left(\frac{\beta_{\tau exPf1}}{\ } + \frac{1}{\ } - 1\right) \cdot \frac{1}{\ } = 1.905$$

$$\left(K_{2Pf1} \quad K_{F\tau Pf1} \right) K_{v1}$$

Berechnung der Bauteilgestaltfestigkeit unter Berücksichtigung der berechneten Einflüsse

$$\sigma_{bWKPf1} := \frac{\sigma_{bW34CrMo4} \cdot K_{1Pf1}}{K_{\sigma Pf1}} = 143.571 \ \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_{tWKPf1} := \frac{\tau_{tW34CrMo4} \cdot K_{1Pf1}}{K_{\tau Pf1}} = 146.289 \ \frac{N}{mm^2}$$

Einflussfaktoren der Mittelspannungsempfindlichkeit DIN 743-1 S.5

$$\psi_{b\sigma KPf1} := \frac{\sigma_{bWKPf1}}{2 \cdot K_{1Pf1} \cdot \sigma_{B34CrMo4} - \sigma_{bWKPf1}} = 0.084$$

$$\psi_{\tau KPf1} := \frac{\tau_{tWKPf1}}{2 \cdot K_{1Pf1} \cdot \sigma_{B34CrMo4} - \tau_{tWKPf1}} = 0.085$$

Vergleichsmittelspannungen

$$\sigma_{1Pf1m} := 0 \ \frac{N}{mm^2} \qquad T_{1Pf1} = 39.113 \ \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{mvPf1} := \sqrt{\sigma_{1Pf1m}^{\ 2} + 3 \cdot T_{1Pf1}^{\ 2}} = 67.746 \ \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_{mvPf1} := \frac{\sigma_{mvPf1}}{\sqrt{3}} = 39.113 \ \frac{N}{mm^2}$$

Bauteilfließgrenze DIN 743-1 S.6

$$\beta_{\sigma exPf1} = 2.936$$

$$\gamma_{FPf1} := 1.10$$

$$\sigma_{bFKPf1} := K_{1Pf1} \cdot K_{2F} \cdot \gamma_{FPf1} \cdot \sigma_{S34CrMo4} = 981.045 \ \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_{tFKPf1} := K_{1Pf1} \cdot K_{2F} \cdot \gamma_{FPf1} \cdot \frac{\sigma_{S34CrMo4}}{\sqrt{3}} = 566.406 \ \frac{N}{mm^2}$$

$$\frac{\sigma_{mvPf1}}{\sigma_{1Pf1}} = 1.111$$

$$\frac{\sigma_{bFKPf1} - \sigma_{bWKPf1}}{\sigma_{bWKPf1} - \sigma_{bFKPf1} \cdot \psi_{b\sigma KPf1}} = 13.636$$

$1.111 \leq 13.636$ Bedingung erfüllt daraus folgt

$$\sigma_{bADKAb1} := \frac{\sigma_{bWKAb1}}{1 + \psi_{b\sigma KAb1} \cdot \frac{\sigma_{mvAb1}}{\sigma_{1Ab1}}} = 189.629 \ \frac{N}{mm^2}$$

$$\frac{\tau_{mvAb1}}{T_{1Ab1}} = 1 \qquad \frac{\tau_{tFKAb1} - \tau_{tWKAb1}}{\tau_{tWKAb1} - \tau_{tFKAb1} \cdot \psi_{\tau KAb1}} = 2.989$$

$$1 \leq 4.636$$

$$\tau_{tADKAb1} := \frac{\tau_{tWKAb1}}{1 + \psi_{\tau KAb1} \cdot \frac{\tau_{mvAb1}}{T_{1Ab1}}} = 161.462 \ \frac{N}{mm^2}$$

Sicherheit für Dauerfestigkeitsnachweis

$$S_{DAb1} := \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_{1Ab1}}{\sigma_{bADKAb1}}\right)^2 + \left(\frac{T_{1Ab1}}{\tau_{tADKAb1}}\right)^2}} = 2.585$$

$$S_{FAb1} := \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_{1Ab1}}{\sigma_{bFKAb1}}\right)^2 + \left(\frac{T_{1Ab1}}{\tau_{tFKAb1}}\right)^2}} = 10.561$$