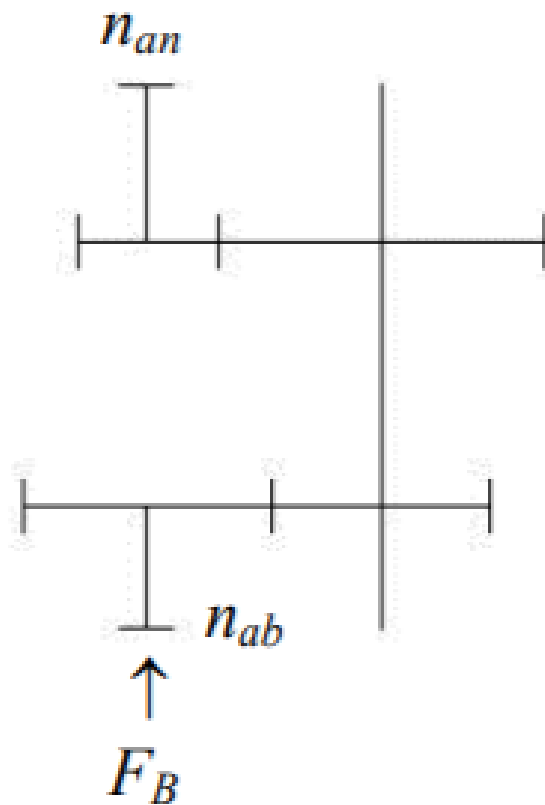


2-stufiges schrägverzahntes koaxiales Getriebe

Abgabe Testat 1 Gruppe 4 – 03.12.2021

Prof. Dr. Lindner



Inhaltsverzeichnis

1.0 Anforderungsliste

2.0 Skizzen

2.1 Prinzip-Skizze

2.2 Entwurf-Skizze

3.0 Berechnungen

3.1 Übersetzungsverhältnis

3.2 Profilverschiebung

3.3 Zusammenfassung der Parameter der Zahnräder

3.4 Welle-Nabe-Verbindung - Passfeder

Anforderungsliste 2-stufiges schrägverzahntes koaxiales Getriebe

Eingangsparameter

- Antrieb $T_{an} = 50 \text{ [Nm]}$
- Abtrieb $T_{ab} = 500 \text{ [Nm]}$
- Schaltdreh. $n_s = 1400 \text{ [min}^{-1}\text{]}$
- Antrieb $n_{an} = 2000 \text{ [min}^{-1}\text{]}$
- Abtrieb $FB = 3 \text{ [kN]}$

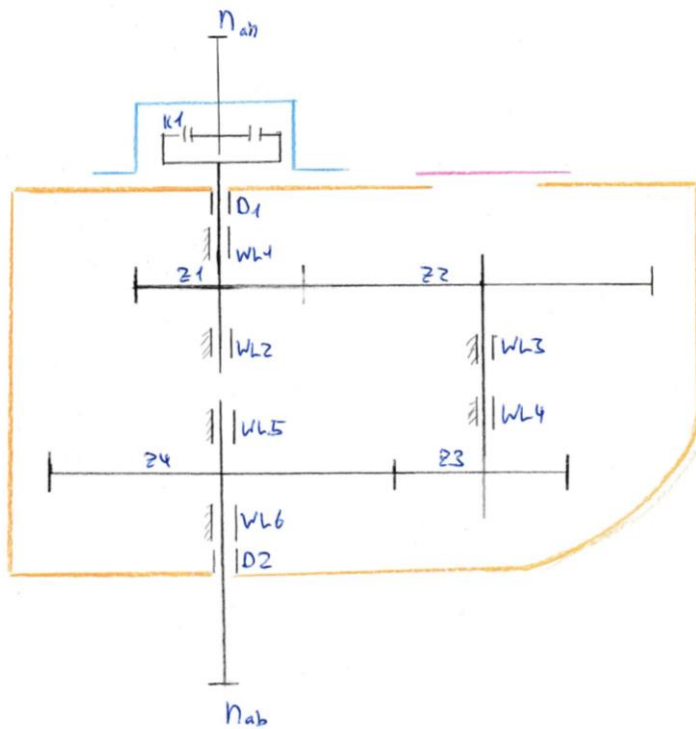
Anforderungen

- Zweiteiliges Getriebegehäuse zur einfachen Montage & Wartung sowie einer möglichst wirtschaftlichen Fertigung z.B. als Gussteil
- Koaxiale Bauweise mit Vorgelegewelle
- Getriebegehäuse mit Ölablassschraube für Ölwechsel bei Wartung und/oder Inspektion
- Schrägverzahnung der Stirnräder für einen ruhigen Lauf ($\beta=20^\circ$)
- Fliehkraftkupplung zum Schutz des Motors (Lastfreier Anlauf), die Schaltdrehzahl liegt bei ca. 1400min^{-1}
- Ölschmierung des Getriebes mit zugehörigen Wellendichtringen etc.
- Die Standzeit der Wälzlager soll mindestens $L_{10}>10000\text{h}$ sein
- Erreichung der Zielp Parameter (Drehmoment Abtrieb etc.) mit einer maximalen Abweichung von 0,5% über dem geforderten Soll-Wert
- Dauerfest $SD>1,5$ für alle Wellen an je einer Schwachstelle
- Möglichst Verwendung von Kauf-/Normteilen

Zusätzliche Wünsche für die Konstruktion

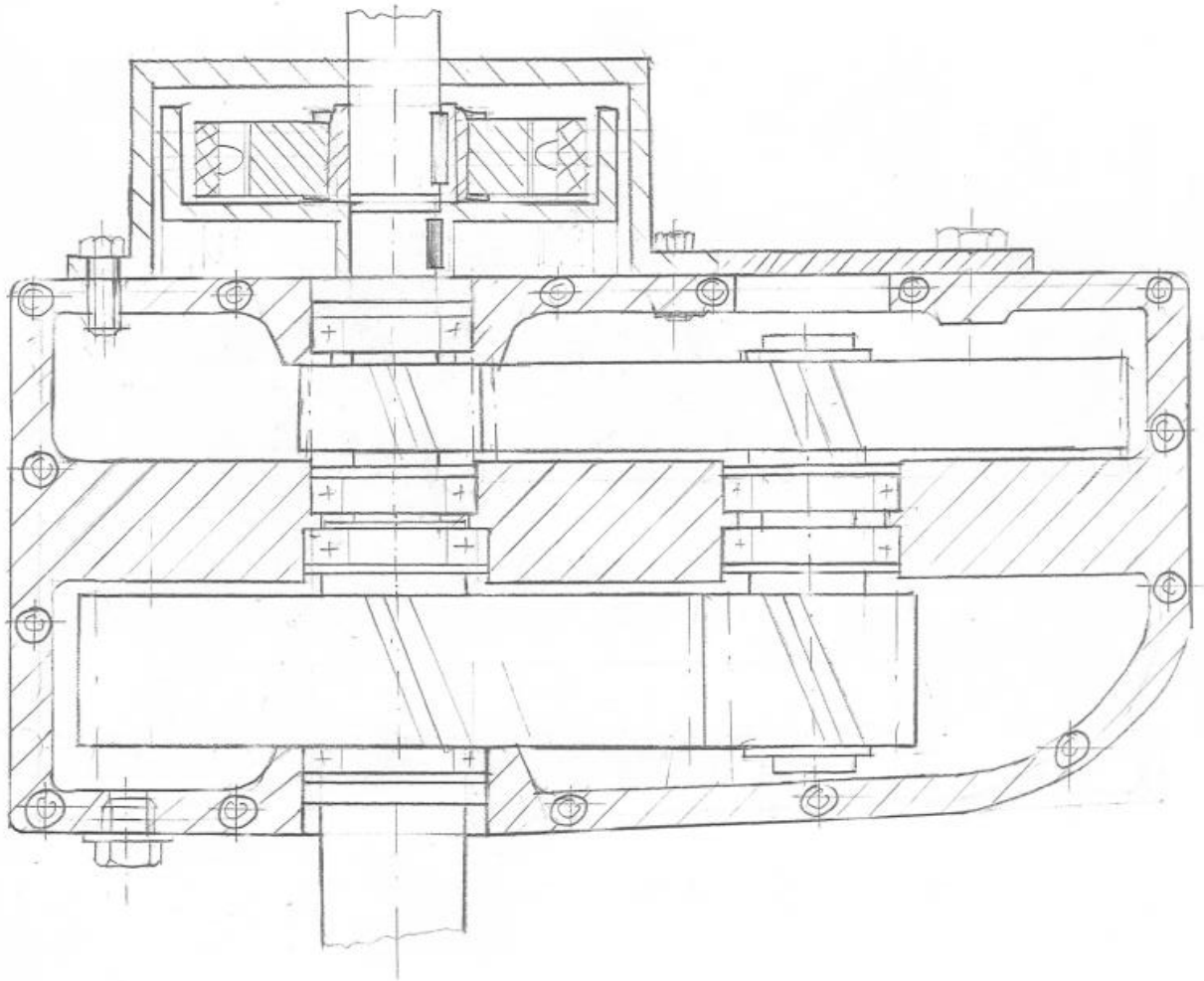
- Eine gut zugängliche Wartungsklappe um möglichst Bedienerfreundlich zu sein
- Kompakte & vertikale Bauweise bei hoher Leistungsdichte (bei niedrigem Gewicht z.B. Aluminiumguss)
- Möglichst lange Standzeit bei Belastung der Ausgangswelle durch Bohrvorgang mit max. 3kN
- Beständig gegenüber äußeren Einflüssen wie Staub & Korrosion

Prinzip-Skizze



Bezeichnung	Name
Z1	Zahnrad 1
Z2	Zahnrad 2
Z3	Zahnrad 3
Z4	Zahnrad 4
WL1	Wälzlager 1
WL2	Wälzlager 2
WL3	Wälzlager 3
WL4	Wälzlager 4
WL5	Wälzlager 5
WL6	Wälzlager 6
D1	Radialwellendichtring
D2	Radialwellendichtring
K1	Fliehkraftkupplung
n_{an}	Antreibswelle
n_{ab}	Abtriebswelle

Entwurf-Skizze



2-stufiges schrägverzahntes koaxiales Getriebe

Alle im Folgenden auftretenden Angaben zu Seitenzahlen, Tabellen und Gleichungen beziehen sich auf "Roloff/Matek Maschinenelemente (24. Auflage)"

Konstanten per Vorgabe

Drehmoment Antrieb	$T_{an} := 50 \text{ N} \cdot \text{m}$
Drehmoment Abtrieb	$T_{ab} := 500 \text{ N} \cdot \text{m}$
Antriebsdrehzahl	$n_{an} := 2000 \text{ min}^{-1}$
axiale Abtriebskraft	$F_B := 3 \text{ kN}$
Anwendungsfaktor	$K_A := 2$
Verzahnungsschrägungswinkel	$\beta := 20^\circ$
Normaleingriffswinkel	$\alpha_n := 20^\circ$
Dauerfestigkeitsschubspannung von 42CrMo4 (Wellenstahl)	$\tau_{tzul} := 50 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Überschlägiger Belastungswert	$B_{zul} := 4 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

theoretisches Übersetzungsverhältnis

$$i_{ges} := \frac{T_{ab}}{T_{an}} = 10 \qquad i_{12} := 3.4$$

$$i_{23} := \frac{i_{ges}}{i_{12}} = 2.941 \qquad i_{ges} := i_{12} \cdot i_{23} = 10$$

gewählt nach TB21-11

Ritzelzähnezahlen

$z_1 := 21$	$z_2 := z_1 \cdot i_{12} = 71.4$	$z_2 := 71$	orientiert an TB21-12 Da $ggT > 1$ wurde die Ritzelzähnezahl um +1 erhöht
$z_3 := 28$	$z_4 := z_3 \cdot i_{23} = 82$	$z_4 := 83$	

wirkliches Übersetzungsverhältnis

$$i_{12} := \frac{z_2}{z_1} = 3.381 \qquad i_{23} := \frac{z_4}{z_3} = 2.964 \qquad i_{ges} := i_{12} \cdot i_{23} = 10.022$$

$$T_{ab} := T_{an} \cdot i_{ges} = 501.105 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$\frac{500 \cdot \text{N} \cdot \text{m}}{T_{ab}} = 0.998 \qquad \text{Abweichung von 0,2\% vom geforderten Abtriebsdrehmoment}$$

Durchmesser Antriebswelle

$$d_{min1} := \sqrt[3]{\frac{16 \cdot T_{an} \cdot K_A}{\pi \cdot \tau_{zul}}} = 21.677 \text{ mm}$$

$$d_{W1} := 30 \text{ mm}$$

Formel nach Vereinbarung

Durchmesser Vorlegewelle

$$d_{min2} := \sqrt[3]{\frac{16 \cdot T_{an} \cdot i_{12} \cdot K_A}{\pi \cdot \tau_{zul}}} = 32.535 \text{ mm}$$

$$d_{W2} := 40 \text{ mm}$$

Formel nach Vereinbarung

Durchmesser Abtriebswelle

$$d_{min3} := \sqrt[3]{\frac{16 \cdot T_{an} \cdot i_{ges} \cdot K_A}{\pi \cdot \tau_{zul}}} = 46.736 \text{ mm}$$

$$d_{W3} := 55 \text{ mm}$$

Formel nach Vereinbarung

gewählt aufgrund von Passfededer-/ & Lagerabmaßen (TB12-2)

Modul 1;2

$$m_{n12} := \frac{1.8 \cdot d_{W1} \cdot \cos(\beta)}{z_1 - 2.5} = 2.743 \text{ mm}$$

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

orientiert an TB21-1

Zahnradbreite

$$b_1 := \frac{2 \cdot T_{an}}{d_{W1}^2 \cdot B_{zul}} = 27.778 \text{ mm}$$

$$b_1 := 30 \text{ mm}$$

orientiert an TB21-13b

$$b_2 := b_1$$

$$b_3 := \frac{2 \cdot T_{an} \cdot i_{12}}{d_{W2}^2 \cdot B_{zul}} = 52.827 \text{ mm}$$

$$b_3 := 55 \text{ mm}$$

orientiert an TB21-13b

$$b_4 := b_3$$

Teilkreis 1 & 2

$$d_{T1} := z_1 \cdot \frac{m_{n12}}{\cos(\beta)} = 67.043 \text{ mm}$$

$$d_{T2} := z_2 \cdot \frac{3 \text{ mm}}{\cos(\beta)} = 226.67 \text{ mm}$$

Achsabstand 1;2

$$a_{d12} := \frac{d_{T1} + d_{T2}}{2} = 146.857 \text{ mm}$$

Gl.21.42

Modul 3;4

$$m_{n34} := \frac{2 \cdot a_{d12} \cdot \cos(\beta)}{(1 + i_{23}) \cdot z_3} = 2.486 \text{ mm}$$

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

orientiert an TB21-1

Teilkreis 3 & 4

$$d_{T3} := z_3 \cdot \frac{m_{n34}}{\cos(\beta)} = 74.492 \text{ mm}$$

$$d_{T4} := z_4 \cdot \frac{m_{n34}}{\cos(\beta)} = 220.817 \text{ mm}$$

Gl.21.38

Achsabstand 3;4

$$a_{d34} := \frac{d_{T3} + d_{T4}}{2} = 147.655 \text{ mm}$$

$$a_{d12} \neq a_{ad34}$$

$$a_{d12} - a_{d34} = -0.798 \text{ mm}$$

Gl.21.42

Fazit: Es ist eine Profilverschiebung notwendig, um die Differenz der Achsabstände auszugleichen! Es wird eine positive Profilverschiebung gewählt, um den Zahnfuß zu stärken und die Tragfähigkeit der Zähne wird erhöht.

Stirneingriffswinkel

$$\alpha_t := \arctan\left(\frac{\tan(\alpha_n)}{\cos(\beta)}\right) = 21.173^\circ$$

Gl. 21.35

Betriebseingriffswinkel

$$\alpha_w := \arccos\left(\cos(\alpha_t) \cdot \frac{a_{d12}}{a_{d34}}\right) = 21.959^\circ$$

Gl. 21.31

Summe Profilverschiebungsfaktoren

$$\text{inv}\alpha_w := \tan(\alpha_w) - \alpha_w \cdot \frac{\pi}{180^\circ} = 0.01994$$

$$\text{inv}\alpha_t := \tan(\alpha_t) - \alpha_t \cdot \frac{\pi}{180^\circ} = 0.01779$$

$$\Sigma x := \frac{\text{inv}\alpha_w - \text{inv}\alpha_t}{2 \cdot \tan(\alpha_n)} \cdot (z_1 + z_2) = 0.271$$

Gl. 21.56

Ersatzzähnezahlen

$$\beta_b := \arccos\left(\cos(\beta) \cdot \frac{\cos(\alpha_n)}{\cos(\alpha_t)}\right) = 18.747^\circ$$

Gl. 21.36

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

$$z_{n1} := \frac{z_1}{\cos(\beta_b)^2 \cdot \cos(\beta)} = 24.922$$

$$z_{n2} := \frac{z_2}{\cos(\beta_b)^2 \cdot \cos(\beta)} = 84.26$$

Gl. 21.47

sinnvolle Wahl von x

$$x_1 := \frac{\Sigma x}{2} + \left(\frac{1}{2} - \frac{\Sigma x}{2} \right) \cdot \frac{\log \left(\frac{z_2}{z_1} \right)}{\log \left(\frac{z_{n1} \cdot z_{n2}}{100} \right)} = 0.28128$$

Gl. 21.33

$$x_2 := \Sigma x - x_1 = -0.0105$$

Beide Räder nach TB 21-3 ausführbar!

Gl. 21.56

Verschiebungen

$$V_1 := x_1 \cdot m_{n12} = 0.844 \text{ mm}$$

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

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

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

Gl. 21.49

Kontrolle Achsabstand

Betriebswälzkreisdurchmesser

$$d_{w1} := d_{T1} \cdot \frac{\cos(\alpha_t)}{\cos(\alpha_w)} = 67.408 \text{ mm}$$

$$d_{w2} := d_{T2} \cdot \frac{\cos(\alpha_t)}{\cos(\alpha_w)} = 227.902 \text{ mm}$$

Gl. 21.22u

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

$$\text{vgl.: } a_{d34} = 147.655 \text{ mm}$$

Kopfspiel Soll

$$c_{12\text{Soll}} := 0.25 \cdot m_{n12} = 0.75 \text{ mm}$$

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

vgl. S. 794

Kopfhöhenänderung: $k := a - a_{d12} - m_{n12} \cdot (x_1 + x_2) = -0.014 \text{ mm}$

Gl. 21-23

Zahnräder

Zahnrad Nr.1:

$$d_{T1} = 67.043 \text{ mm}$$

$$\text{Betriebswälzkreisdurchmesser } d_{w1} := \frac{2 \cdot z_1}{z_1 + z_2} \cdot a = 67.408 \text{ mm} \quad \text{Gl.21-22a}$$

$$\text{Grundkreisdurchmesser } d_{b1} := z_1 \cdot \frac{m_{n12} \cdot \cos(\alpha_t)}{\cos(\beta)} = 62.517 \text{ mm} \quad \text{Gl.21-39}$$

$$\text{Kopfkreisdurchmesser } d_{a1} := d_{T1} + 2 \cdot (m_{n12} + V_1 + k) = 74.702 \text{ mm} \quad \text{Gl.21-24}$$

$$\text{Fußkreisdurchmesser } d_{f1} := d_{T1} - 2 \cdot ((m_{n12} + c_{12Soll}) - V_1) = 61.231 \text{ mm} \quad \text{Gl.21-25}$$

Zahnrad Nr.2:

$$d_{T2} = 226.67 \text{ mm}$$

$$d_{w2} := \frac{2 \cdot z_2}{z_1 + z_2} \cdot a = 227.902 \text{ mm} \quad \text{Gl.21-22b}$$

$$d_{b2} := z_2 \cdot \frac{m_{n12} \cdot \cos(\alpha_t)}{\cos(\beta)} = 211.369 \text{ mm} \quad \text{Gl.21-39}$$

$$d_{a2} := d_{T2} + 2 \cdot (m_{n12} + V_2 + k) = 232.578 \text{ mm} \quad \text{Gl.21-24}$$

$$d_{f2} := d_{T2} - 2 \cdot ((m_{n12} + c_{12Soll}) - V_2) = 219.107 \text{ mm} \quad \text{Gl.21-25}$$

Zahnrad Nr.3:

$$d_{T3} = 74.492 \text{ mm}$$

$$d_{w3} := \frac{2 \cdot z_3}{z_3 + z_4} \cdot a = 74.492 \text{ mm} \quad \text{Gl.21-22a}$$

$$d_{b3} := z_3 \cdot \frac{m_{n34} \cdot \cos(\alpha_t)}{\cos(\beta)} = 69.464 \text{ mm} \quad \text{Gl.21-39}$$

$$d_{a3} := d_{T3} + 2 \cdot (m_{n34} + V_2 + k) = 79.401 \text{ mm} \quad \text{Gl.21-40}$$

$$d_{f3} := d_{T3} - 2.5 \cdot m_{n34} = 68.242 \text{ mm} \quad \text{Gl.21-41}$$

Zahnrad Nr.4:

$$d_{T4} = 220.817 \text{ mm}$$

$$d_{w3} := \frac{2 \cdot z_4}{z_3 + z_4} \cdot a = 220.817 \text{ mm}$$

Gl.21-22b

$$d_{b4} := z_4 \cdot \frac{m_{n34} \cdot \cos(\alpha_t)}{\cos(\beta)} = 205.911 \text{ mm}$$

Gl.21-39

$$d_{a4} := d_{T4} + 2 \cdot (m_{n34} + V_2 + k) = 225.725 \text{ mm}$$

Gl.21-40

$$d_{f4} := d_{T4} - 2.5 \cdot m_{n34} = 214.567 \text{ mm}$$

Gl.21-41

Kopfspiel nach Profilverschiebung

$$c_{12Ist} := a - 0.5 \cdot (d_{a1} + d_{f2}) = 0.75 \text{ mm}$$

$$c_{12Soll} - c_{12Ist} = -6.505 \cdot 10^{-16} \text{ mm}$$

Keine relevante Abweichung!

vgl. S. 794

Stirnmodul

$$m_{t12} := \frac{m_{n12}}{\cos(\beta)} = 3.193 \text{ mm} \quad m_{t34} := \frac{m_{n34}}{\cos(\beta)} = 2.66 \text{ mm}$$

Gl.21-23

Profilüberdeckung

$$\varepsilon_{\alpha 12} := \frac{0.5 \cdot \left(\sqrt{d_{a1}^2 - d_{b1}^2} + \frac{z_2}{|z_2|} \cdot \sqrt{d_{a2}^2 - d_{b2}^2} \right) - a \cdot \sin(\alpha_w)}{\pi \cdot m_{t12} \cdot \cos(\alpha_t)} = 1.47$$

Gl.21-57

Laut S.787 ist der Wert für ε_{α} gut.

$$\varepsilon_{\beta 12} := \frac{b_1 \cdot \sin(\beta)}{\pi \cdot m_{n12}} = 1.089$$

Gl.21-44

$$\text{Gesamt: } \varepsilon_{\gamma 12} := \varepsilon_{\alpha 12} + \varepsilon_{\beta 12} = 2.559$$

$$\varepsilon_{\alpha 34} := \frac{0.5 \cdot \left(\sqrt{d_{a3}^2 - d_{b3}^2} + \frac{z_4}{|z_4|} \cdot \sqrt{d_{a4}^2 - d_{b4}^2} \right) - a \cdot \sin(\alpha_w)}{\pi \cdot m_{t34} \cdot \cos(\alpha_t)} = 1.316$$

Gl.21-57

Laut S.787 ist der Wert für ε_{α} gut.

$$\varepsilon_{\beta 34} := \frac{b_3 \cdot \sin(\beta)}{\pi \cdot m_{n34}} = 2.395$$

Gl.21-44

$$\text{Gesamt: } \varepsilon_{\gamma 34} := \varepsilon_{\alpha 34} + \varepsilon_{\beta 34} = 3.711$$

Zusammenfassung

Nr.	d (mm)	d_b (mm)	d_a (mm)	d_f (mm)	d_w (mm)	b (mm)	m (mm)	V (mm)	z
Zahnrad_1	67.04	62.52	74.78	61.196	67.41	30	3	0.844	21
Zahnrad_2	226.67	211.37	232.61	219.032	227.66	30	3	-0.031	71
Zahnrad_3	74.49	69.46	79.49	68.24	74.49	55	2.5	0	28
Zahnrad_4	220.82	205.92	225.82	214.57	220.82	55	2.5	0	83

Passfederverbindungen TB 12-2

$$R_e := 295 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2} \quad S_F := 1.1 \quad \eta_{zul} := \frac{R_e}{S_F} = 268.182 \frac{N}{\text{mm}^2} \quad \varphi := 1 \quad n := 1$$

$$l_{tr1} := \frac{2 \cdot T_{an}}{d_{W1} \cdot 3 \text{ mm} \cdot \eta_{zul} \cdot \varphi \cdot n} = 4.143 \text{ mm} \quad b := 8 \text{ mm} \quad l_{tr1} + b = 12.143 \text{ mm}$$

Antriebswelle: Passfeder DIN 6885 - A8x7x14

$$l_{tr2} := \frac{2 \cdot T_{an} \cdot i_{12}}{d_{W2} \cdot 3 \text{ mm} \cdot \eta_{zul} \cdot \varphi \cdot n} = 10.506 \text{ mm} \quad b := 12 \text{ mm} \quad l_{tr2} + b = 22.506 \text{ mm}$$

Vorlegewelle: Passfeder DIN 6885 - A12x8x25

$$l_{tr3} := \frac{2 \cdot T_{an} \cdot i_{12} \cdot i_{23}}{d_{W3} \cdot 4 \text{ mm} \cdot \eta_{zul} \cdot \varphi \cdot n} = 16.987 \text{ mm} \quad b := 16 \text{ mm} \quad l_{tr3} + b = 32.987 \text{ mm}$$

Abtriebswelle: Passfeder DIN 6885 - A16x10x36