

Aufgabe 1 (22 Punkte)

Als Entwicklungsingenieur landwirtschaftlicher Maschinen entwerfen Sie den Antrieb eines in einem Maishäcksler genutzten Corncracker. Dazu legen Sie die schrägverzahnte Zahnradgeometrie des Getriebes im Antriebsstrang des Corncracker aus, vgl. Abbildung 1.1. Der Antrieb des Getriebes erfolgt durch einen Riemen mit einer konstanten Drehzahl von $n_1 = 1500 \text{ min}^{-1}$. Der Corncracker erfordert für den optimalen Betrieb eine Drehzahl von $n_2 = -430 \text{ min}^{-1}$ und nimmt im Betrieb eine durch das Getriebe abzugebende Leistung von $P_2 = -350 \text{ kW}$ auf. Im Interesse eines besonders laufruhigen Betriebs legen Sie für die Zahnradgeometrie eine ganzzahlige Gesamtüberdeckung $\varepsilon_y = 3$ fest. Aus einer ersten Zahnradfestigkeitsberechnung ergibt sich eine Zähnezahl des Ritzels von $z_1 = 21$.

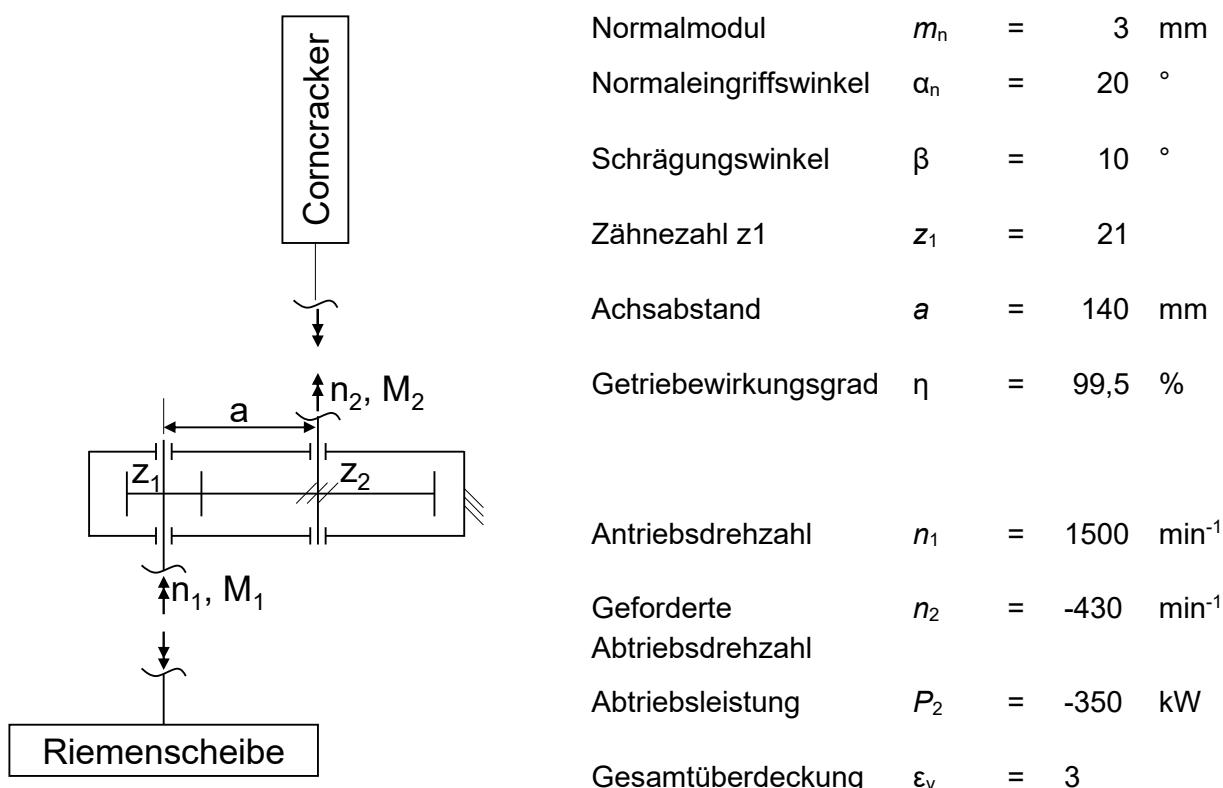


Abbildung 1.1: Schema

Hinweis:

- Das Bezugprofil der Verzahnung entspricht DIN 867.

1.1 Berechnen Sie die auftretenden Drehmomente sowie die Zähnezahl des Rades. (3 Punkte)	
1.1.1	Berechnen Sie die erforderliche Übersetzung i_{erf} .
1.1.2	Berechnen Sie die Zähnezahl z_2 so, dass die sich einstellende Übersetzung i der geforderten Übersetzung i_{erf} bestmöglich entspricht.
1.1.3	Berechnen Sie die sich einstellende Übersetzung i .
1.1.4	Berechnen Sie das Drehmoment am Getriebeausgang M_2 in kNm.
1.1.5	Berechnen Sie das Drehmoment am Getriebeeingang M_1 in kNm.

Falls Sie Aufgabenteil 1.1 nicht lösen konnten, rechnen Sie mit $z_2 = 70$ weiter.

Um gegebene Bauräume einzuhalten, ist Ihnen der Achsabstand $a = 140$ mm vorgegeben. Sie bestimmen nachfolgend die zur Einhaltung des Achsabstandes erforderliche Profilverschiebungssumme und teilen diese unter der Annahme, dass am Ritzel gerade kein schädlicher Unterschnitt auftreten soll, auf die beiden Zahnräder auf.

1.2 Bestimmen Sie die Profilverschiebungsfaktoren. (5,5 Punkte)	
1.2.1	Berechnen Sie den Stirneingriffswinkel α_t in °.
1.2.2	Berechnen Sie den Betriebseingriffswinkel α_{wt} in °.
1.2.3	Berechnen Sie die zur Einhaltung des geforderten Achsabstandes a erforderliche Profilverschiebungssumme $\sum x$.
1.2.4	Berechnen Sie den zur Vermeidung von schädlichem Unterschnitt am Ritzel mindestens erforderlichen Profilverschiebungsfaktor $x'_{min,1}$.
1.2.5	Berechnen Sie den Profilverschiebungsfaktor am Rad x_2 unter der Annahme, dass die Profilverschiebung am Ritzel dem Wert $x'_{min,1}$ entspricht.

Falls Sie Aufgabenteil 1.2 nicht lösen konnten, rechnen Sie mit $\alpha_t = 20,4$ °, $\alpha_{wt} = 22,0$ °, $x_1 = -0,5$ und $x_2 = -0,4$ weiter.

Vorbereitend für die Festlegung der Zahnbreite berechnen Sie die Profilüberdeckung ε_α . Ein Kollege unterstützt Sie die bei der Berechnung und bestimmt die Teilüberdeckung des Ritzels zu $\varepsilon_1 = 0,57$.

1.3 Berechnen Sie die Profilüberdeckung ε_α . (3,5 Punkte)	
1.3.1	Berechnen Sie den Grundkreis des Rades z_2 d_{b2} in mm.
1.3.2	Berechnen Sie den Kopfkreis des Rades z_2 d_{a2} in mm.
1.3.3	Berechnen Sie die Profilüberdeckung ε_α .

Falls Sie Aufgabenteil 1.3 nicht lösen konnten, rechnen Sie mit $\varepsilon_\alpha = 2$ weiter.

Nachfolgend legen Sie die Zahnbreite so fest, dass sich die gewünschte Gesamtüberdeckung $\varepsilon_Y = 3$ ergibt.

1.4 Berechnen Sie die gemeinsame Zahnbreite b in mm so, dass die geforderte Gesamtüberdeckung ε_Y erreicht wird. (1,5 Punkte)	
---	--

Mit dem Ziel der Emissionsreduktion senken Sie nun die Drehzahl des Verbrennungsmotors auf $n_{1,\text{neu}} = 1200 \text{ min}^{-1}$. Um den Corncracker trotzdem weiterhin bei -430 min^{-1} betreiben zu können, müssen Sie die Übersetzung Ihres Getriebes anpassen. Sie möchten die Profilverschiebungen und die Profilverschiebungssumme der angepassten Zahnräder möglichst gering halten, um Unterschnitt und Spitzzähne zu vermeiden. Damit vorhandene Werkzeuge weiterverwendet werden können, lassen sie den Normalmodul unverändert bei $m_n = 3 \text{ mm}$. Sie legen nachfolgend die Zähnezahlen fest.

1.5 Legen Sie die angepassten Zähnezahlen fest. (2,5 Punkte)	
1.5.1	Wählen Sie eine ganzzahlige Zähnezahlsumme $\sum z$ so, dass der Achsabstand a dem Nullachsabstand a_d so gut wie möglich entspricht.
1.5.2	Berechnen Sie die Zähnezahl des Ritzels $z_{1,\text{neu}}$.
1.5.3	Berechnen Sie die Zähnezahl des Rads $z_{2,\text{neu}}$.

Falls Sie Aufgabenteil 1.5 nicht lösen konnten, rechnen Sie mit $z_{1,\text{neu}} = 25$ weiter.

1.6 Wie verhält sich der zur Vermeidung von schädlichem Unterschnitt erforderliche Mindestprofilverschiebungsfaktor $x'_{\min,1}$ des Ritzels z_1 durch die Anpassung der Übersetzung? (1 Punkt)	
1.7 Benennen Sie den in Abbildung 1.2 dargestellten Schnitt. (0,5 Punkte)	

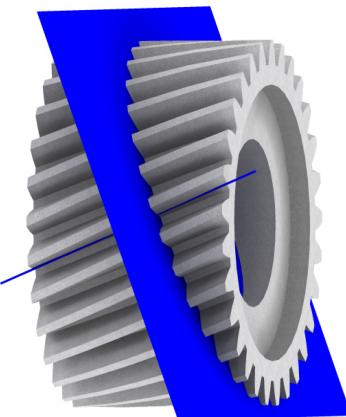


Abbildung 1.2: Schnitt

1.8 Wie verändern sich die nachfolgenden Größen bei einer Vergrößerung der Profilverschiebung beider im Eingriff befindlicher Zahnräder qualitativ? (2,5 Punkte)	
1.8.1	Wie verändert sich die Zahndicke am Kopfkreis s_{at} der Zahnräder qualitativ?
1.8.2	Wie verändert sich die Teilung am Teilkreis p_t der Zahnräder qualitativ?
1.8.3	Wie verändert sich der Betriebseingriffswinkel α_{wt} qualitativ?
1.8.4	Wie verändert sich die Profilüberdeckung ε_a qualitativ?

- 1.9 Nennen Sie eine Flankenmodifikation, mit der Sie die Anfälligkeit der Verzahnung gegen Schiefstellungen der Wellen reduzieren können. (1 Punkt)

Nachfolgend sind einige geometrische Größen im Zahneingriff dargestellt:

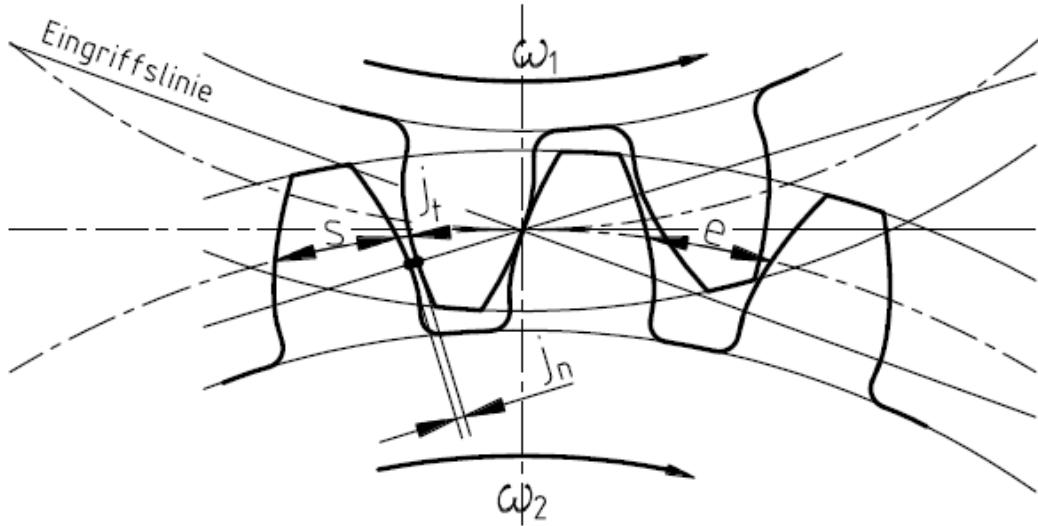


Abbildung 1.3: Geometrische Größen am Zahnrad

- 1.10 Benennen Sie die Größe e. (1 Punkt)

Lösung zur Aufgabe 1

1.1 Drehmomente & Zähnezahlen

Σ 3 P

$$i_{erf} = \frac{n_1}{n_2} = -3,488$$

0,5 P

mit

$$n_1 = 1500 \text{ min}^{-1}$$

$$n_2 = -430 \text{ min}^{-1}$$

$$z_2 = -z_1 \cdot i_{erf} = 73,256 \rightarrow 73$$

0,5 P

mit

$$z_1 = 21$$

$$i_{erf} = -3,488$$

$$i = -\frac{z_2}{z_1} = -3,476$$

0,5 P

mit

$$z_2 = 73$$

$$z_1 = 21$$

$$M_2 = \frac{P_2}{2 \cdot \pi \cdot n_2} = 7,745 \text{ kNm}$$

0,5 P

mit

$$P_2 = -350 \text{ kW}$$

$$n_2 = \frac{n_1}{i} = -431,531 \text{ min}^{-1}$$

$$M_1 = -\frac{M_2}{i \cdot \eta} = 2,239 \text{ kNm}$$

1 P

mit

$$M_2 = 7,745 \text{ kNm}$$

$$i = -3,476$$

$$\eta = 0,995$$

1.2 Profilverschiebungsfaktoren

Σ 5,5 P

$$\alpha_t = \arctan \left(\frac{\tan(\alpha_n)}{\cos(\beta)} \right) = 20,284^\circ$$

1 P

mit

$$\alpha_n = 20^\circ$$

$$\beta = 10^\circ$$

$$\alpha_{wt} = \arccos \left(\frac{a_d}{a} \cdot \cos(\alpha_t) \right) = 16,411^\circ$$

1 P

mit

$$a = 140 \text{ mm}$$

$$\alpha_t = 20,284^\circ$$

$$a_d = \frac{m_n \cdot (z_1 + z_2)}{2 \cdot \cos(\beta)} = 143,175 \text{ mm}$$

mit

$$m_n = 3 \text{ mm}$$

$$z_1 = 21; z_2 = 73$$

$$\beta = 10^\circ$$

$$\sum x = \frac{\operatorname{inv}(\alpha_{wt}) - \operatorname{inv}(\alpha_t)}{2 \cdot \tan(\alpha_n)} \cdot (z_2 + z_1) = -\mathbf{0,965} \quad 1 \text{ P}$$

Mit

$$\alpha_{wt} = 16,411^\circ$$

$$\alpha_t = 20,284^\circ$$

$$\alpha_n = 20^\circ$$

$$z_2 = 73$$

$$z_1 = 21$$

$$x'_{min,1} = 1 - \frac{z_1}{\frac{5}{6} \cdot z_g} = -\mathbf{0,538} \quad 2 \text{ P}$$

mit

$$z_1 = 21$$

$$z_g = 2 \cdot \frac{\cos(\beta)}{\sin^2(\alpha_t)} = 16,389$$

mit

$$\beta = 10^\circ$$

$$\alpha_t = 20,284^\circ \text{ mit}$$

$$x_2 = \sum x - x_1 = -\mathbf{0,427} \quad 0,5 \text{ P}$$

mit

$$\sum x = -0,965$$

$$x_1 = x_{min,1} = -0,538$$

1.3 Profilüberdeckung **$\Sigma 3,5 \text{ P}$**

$$d_{b,2} = d_2 \cdot \cos(\alpha_t) = \mathbf{208,588 \text{ mm}} \quad 1 \text{ P}$$

mit

$$\alpha_t = 20,284^\circ$$

$$d_2 = \frac{z_2 \cdot m_n}{\cos(\beta)} = 222,378 \text{ mm}$$

mit

$$z_2 = 73$$

$$m_n = 3 \text{ mm}$$

$$\beta = 10^\circ$$

$$d_{a,2} = z_2 \cdot \frac{m_n}{\cos(\beta)} + 2 \cdot x_2 \cdot m_n + 2 \cdot h_{ap} + 2 \cdot k = 225,254 \text{ mm} \quad 1,5 \text{ P}$$

mit

$$z_2 = 73$$

$$m_n = 3 \text{ mm}$$

$$\beta = 10^\circ$$

$$x_2 = -0,427$$

$$h_{ap} = m_n = 3 \text{ mm}$$

mit

$$k = a - a_d - m_n \cdot \sum x = -0,280 \text{ mm}$$

mit

$$a = 140 \text{ mm}$$

$$a_d = 143,175 \text{ mm}$$

$$m_n = 3 \text{ mm}$$

$$\sum x = -0,965$$

$$\epsilon_\alpha = \epsilon_1 + \epsilon_2 = 1,884$$

1 P

mit

$$\epsilon_1 = 0,57$$

$$\epsilon_2 = \frac{z_2}{2\pi} \cdot \left(\sqrt{\left(\frac{d_{a,2}}{d_{b,2}} \right)^2 - 1} - \tan(\alpha_{wt}) \right) = 1,314$$

mit

$$z_2 = 73$$

$$d_{a,2} = 225,254 \text{ mm}$$

$$d_{b,2} = 208,588 \text{ mm}$$

$$\alpha_{wt} = 16,411^\circ$$

1.4 Zahnbreite

Σ 1,5 P

$$b = \epsilon_\beta \cdot \frac{p_t}{\tan(\beta)} = 60,552 \text{ mm} \quad 1,5 \text{ P}$$

mit

$$\epsilon_\beta = \epsilon_\gamma - \epsilon_\alpha = 1,116$$

mit

$$\epsilon_\gamma = 3$$

$$\epsilon_\alpha = 1,884$$

sowie

$$p_t = \pi \cdot \frac{m_n}{\cos(\beta)} = 9,570 \text{ mm}$$

mit

$$m_n = 3 \text{ mm}$$

$$\beta = 10^\circ$$

1.5 Angepasste Zähnezahlen

Σ 2,5 P

$$a = a_d = \sum z_{neu} \cdot \frac{m_n}{2 \cdot \cos(\beta)} \Leftrightarrow \sum z_{neu} = \frac{a \cdot 2 \cdot \cos(\beta)}{m_n} = 91,915 \rightarrow 92 \quad 1 \text{ P}$$

mit

$$a = 140 \text{ mm}$$

$$m_n = 3 \text{ mm}$$

$$\beta = 10^\circ$$

$z_{1,neu} = \sum z_{neu} - z_{2,neu}$; mit $z_{2,neu} = z_{1,neu} \cdot (-i_{neu})$ ergibt sich 1 P

$$z_{1,neu} = \sum z_{neu} - z_{1,neu} \cdot (-i_{neu}) \Leftrightarrow z_{1,neu} = \frac{\sum z_{neu}}{1 - i_{neu}} = 24,268 \rightarrow \mathbf{24}$$

mit

$$i_{neu} = \frac{n_{1,neu}}{n_2} = \frac{1200}{-430} = -2,791$$

$$z_{2,neu} = \sum z_{neu} - z_{1,neu} = \mathbf{68} \quad \text{0,5 P}$$

mit

$$\sum z_{neu} = 92$$

$$z_{1,neu} = 24$$

1.6 Veränderung erforderlicher Mindestprofilverschiebungsfaktor $\Sigma 1 \text{ P}$

Durch die neue Übersetzung hat sich die Zähnezahl erhöht. Da die praktische Grenzzähnezahl durch die veränderte Zähnezahl unverändert bleibt, ergibt sich gemäß der Formel

$$x_{min} = 1 - \frac{z}{z_g}$$

dass bei steigender Zähnezahl z der Mindestprofilverschiebungsfaktor **sinkt** 1 P

1.7 Schnitt $\Sigma 0,5 \text{ P}$

Es handelt sich bei dem dargestellten Schnitt um einen **Normalschnitt**. 0,5 P

1.8 Profilverschiebungsfaktor $\Sigma 2,5 \text{ P}$

Bei steigender Profilverschiebung **verringert** sich die Zahndicke am Kopfkreis, da das Werkzeug bei der Herstellung im Vergleich zum Null-Rad bei größeren Durchmessern angesetzt wird. 0,5 P

Die Teilung am Teilkreis ist unabhängig von der Profilverschiebung, da der Teilkreis unabhängig von der Profilverschiebung ist. Die Teilung am Teilkreis **ändert sich** daher **nicht** bei Veränderung der Profilverschiebung. 0,5 P

Der Betriebseingriffswinkel **steigt** bei steigender Profilverschiebungssumme, da bei durch den größeren Achsabstand aufgrund der größeren Zahnräder die Eingriffslinie als Tangente an die Grundkreise steiler verläuft. 1 P

Die Profilüberdeckung **sinkt** bei steigender Profilverschiebungssumme, da die Eingriffslinie sich verkürzt. 0,5 P

1.9 Flankenmodifikation $\Sigma 1 \text{ P}$

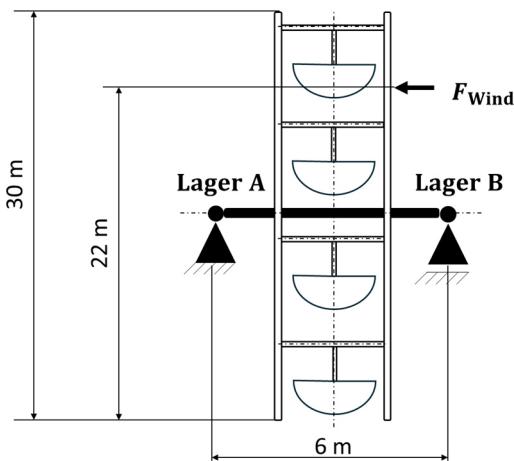
Die Anfälligkeit der Verzahnung gegen Schiefstellung kann entweder durch eine **Breitenballigkeit**, durch eine **Flankenlinienwinkelkorrektur**, oder durch **Endrücknahmen** verringert werden. 1 P

1.10 Geometrische Größe $\Sigma 1 \text{ P}$

Abgebildet ist die **Lückenweite am Teilkreis im Stirnschnitt**. 1 P

Aufgabe 2 (22 Punkte)

Sie sollen die Lagerung eines Riesenrads auslegen. Für die Lagerung kommen Rillenkugellager in einer Fest-Los-Lageranordnung zum Einsatz. Das Riesenrad ist so aufgestellt, dass es durch den von rechts kommenden Wind eine resultierende, exzentrisch angreifende Windlast F_{Wind} erfährt. Vereinfacht kann angenommen werden, dass der Wind mit einer durchschnittlichen Windflächenlast konstant an der Querschnittsfläche des Riesenrads angreift. Das Riesenrad befindet sich mittig zwischen den beiden Lagern. Die Lager tragen die aus dem Gewicht des Riesenrads sowie die aus der Windlast resultierenden Kräfte.



Durchschnittliche Windflächenlast	p_{Wind}	=	200 N/m ²
Drehzahl	n	=	4 min ⁻¹
Betriebstemperatur	ϑ	=	28 °C
Masse Riesenrad	m	=	80 t
Ermüdungsgrenzbelastung	C_u	=	150 kN
Verunreinigungsbeiwert	e_c	=	0,9

Parameter Lager A+B

Dynamischer Radiallastfaktor	X	=	0,7	Grenzwert	e	=	0,31
Dynamischer Axiallastfaktor	Y	=	1,4	Dynamische Tragzahl	C	=	580 kN
Statischer Radiallastfaktor	X_0	=	0,65	Statische Tragzahl	C_0	=	640 kN
Statischer Axiallastfaktor	Y_0	=	1,3	Innendurchmesser Lager	d	=	350 mm
Ausfallwahrscheinlichkeit			10 %	Außendurchmesser Lager	D	=	500 mm
Betriebsart			Normaler Lauf	Erdbeschleunigung	g	=	9,81 m/s ²

Hinweise:

- Nutzen Sie zur Lösung der Aufgabe die Diagramme auf den Hilfsblättern 1 bis 2 zu Aufgabe 2.
- Positive Schnittkräfte des Lagers wirken in positiver Koordinatenrichtung.

2.1 Geben Sie an, welches Lager das Festlager ist. (1 Punkt)

Zunächst soll geprüft werden, wie hoch die Sicherheitsreserven des Lagers A gegenüber einer statischen Überlast sind.

2.2 Bestimmen Sie die statische Sicherheitsreserve des Lagers A. (6 Punkte)

- | | |
|-------|---|
| 2.2.1 | Berechnen Sie die aus der durchschnittlichen Windflächenlast p_{Wind} resultierende Gesamtkraft F_{Wind} auf das Riesenrad in kN. |
| 2.2.2 | Berechnen Sie die Last A_z für das Lager A für den gegebenen Lastzustand in kN. |
| 2.2.3 | Berechnen Sie die Last A_y für das Lager A für den gegebenen Lastzustand in kN. |
| 2.2.4 | Berechnen Sie die statisch äquivalente Lagerlast $P_{0,A}$ für das Lager A in kN. |
| 2.2.5 | Berechnen Sie die maximal zulässige statische Lagerlast für das Lager A $P_{0,A,zul}$ in kN. |
| 2.2.6 | Berechnen Sie die statische Sicherheitsreserve $P_{0,A,zul} / P_{0,A}$ für das Lager A. |

Falls Sie Aufgabenteil 2.2 nicht lösen konnten, rechnen Sie mit $A_y = 135 \text{ kN}$ und $A_z = 545 \text{ kN}$ weiter.

2.3 Welche geometrische Form nimmt die Kontaktfläche bei einem Kugellager zwischen Wälzkörper und Lagerring nach der HERTZ'schen Kontakttheorie an? (1 Punkt)

2.4 Nennen Sie eine Werkstofflegierung eines Wälzgerstahls. (1 Punkt)

Im Folgenden soll die Grundölviskosität für das Lagerfett ausgewählt werden, sodass die Lager für die geforderte Ermüdungslebensdauer ausgelegt sind. Nehmen Sie dafür an, dass die geforderte Lebensdauer des Riesenrads 20 Jahre beträgt und sich das Riesenrad durchschnittlich 2h pro Tag an 60 Tagen im Jahr dreht.

2.5 Bestimmen Sie die minimal erforderliche ISO VG Klasse für das Grundöl des Fetts, damit das Lager A die erwartete Ermüdungslebensdauer erreicht. (8 Punkte)	
2.5.1	Berechnen Sie die Ermüdungslebensdauer L_{nm} für Lager A in 10^6 Umdrehungen, welche einer geforderten Ermüdungslebensdauer von 20 Jahren entspricht.
2.5.2	Berechnen Sie die dynamische äquivalente Lagerlast P_A für Lager A in kN.
2.5.3	Berechnen Sie den Beiwert $\frac{e_c \cdot C_u}{P}$.
2.5.4	Bestimmen Sie das minimal erforderliche Viskositätsverhältnis κ .
2.5.5	Bestimmen Sie die Bezugsviskosität ν_1 für das Grundöl des Fetts des Lagers A in mm^2/s .
2.5.6	Berechnen Sie die minimal erforderliche Betriebsviskosität $\nu_{min,L}$ für das Grundöl des Fetts des Lagers A in mm^2/s , damit das Lager A die geforderte Ermüdungslebensdauer erreicht.
2.5.7	Bestimmen Sie die minimal erforderliche ISO VG Klasse für das Grundöl des Fetts des Lagers A, damit die erwartete Ermüdungslebensdauer erreicht.

Falls Sie Aufgabenteil 2.5 nicht lösen konnten, rechnen Sie mit $\nu_1 = 710 \text{ mm}^2/\text{s}$ und ISO VG 220 weiter.

Zusätzlich zur geforderten Lebensdauer, soll ein verschleißfreier Betrieb sichergestellt werden. Gehen Sie davon aus, dass sich ein verschleißfreier Betrieb der Lagerung bei $\kappa \geq 0,1$ einstellt.

2.6 Bestimmen Sie die minimal erforderlich ISO VG Klasse für das Grundöl des Fetts, damit das Lager A verschleißfrei arbeitet. (3 Punkte)	
2.6.1	Berechnen Sie die minimal erforderliche Betriebsviskosität $\nu_{min,V}$ für das Grundöl des Fetts des Lagers A in mm^2/s für einen verschleißfreien Betrieb.
2.6.2	Bestimmen Sie die minimal erforderliche ISO VG Klasse für das Grundöl des Fetts des Lagers A für einen verschleißfreien Betrieb.
2.6.3	Bestimmen Sie die minimal erforderliche ISO VG Klasse für das Grundöl des Fetts des Lagers A, damit sowohl die erwartete Ermüdungslebensdauer erreicht wird als auch der verschleißfreie Betrieb sichergestellt wird.

2.7 Hin und wieder kam es bei Lagerdemontagen vor, dass ein Verunreinigungsbeiwert des Fetts von 0,7 vorlag. Wie ändert sich die minimal erforderliche Betriebsviskosität ν für das Grundöl des Fetts qualitativ, damit die ursprünglich berechnete Lebensdauer erreicht wird? (**1 Punkt**)

2.8 Nennen Sie eine Wälzlagerraumform, welche ausschließlich Axialkräfte übertragen kann. (**1 Punkt**)

Hilfsblatt 1 zu Aufgabe 2

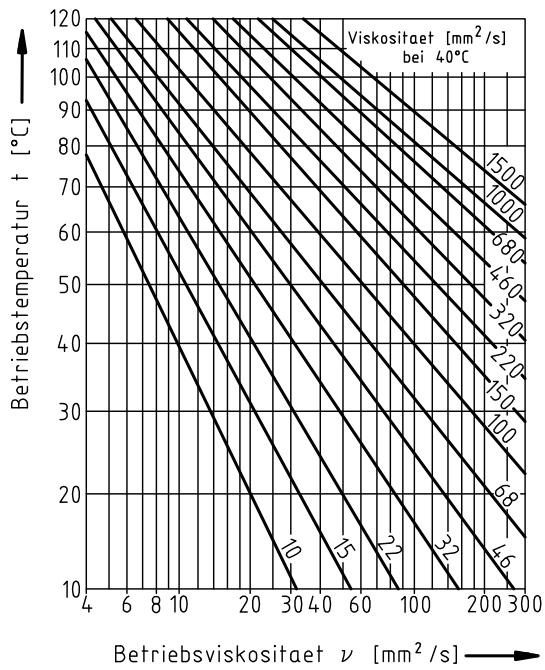


Bild 2.1: Betriebsviskosität ν

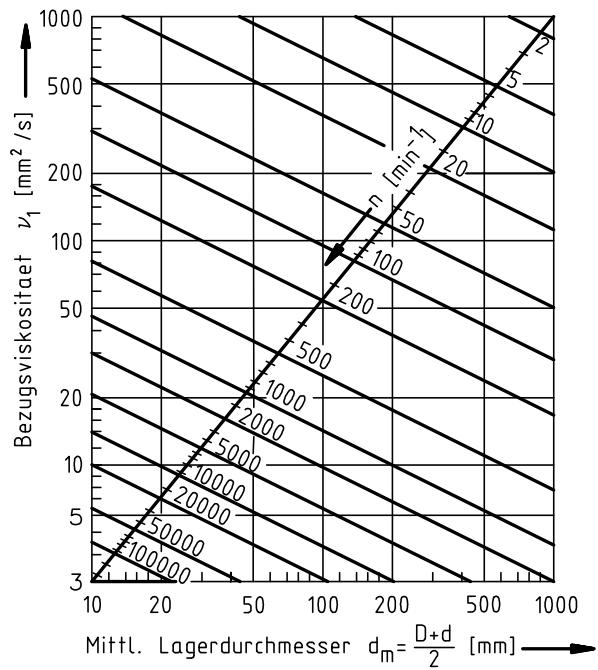
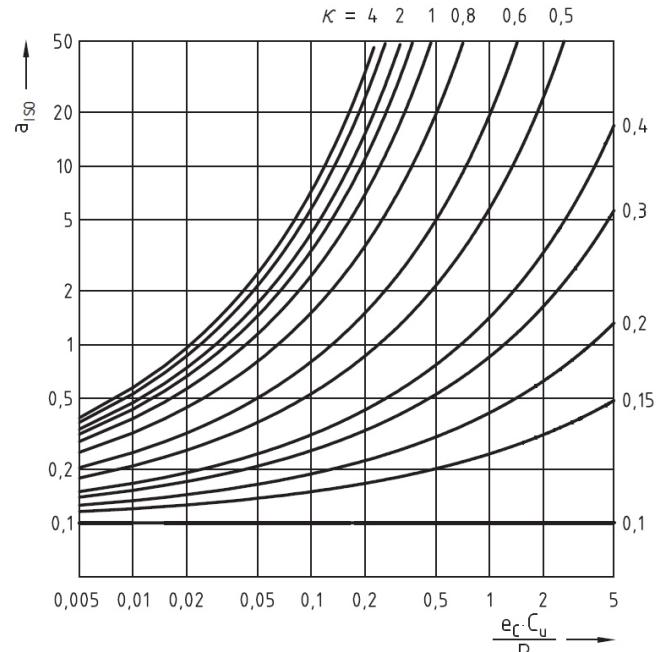
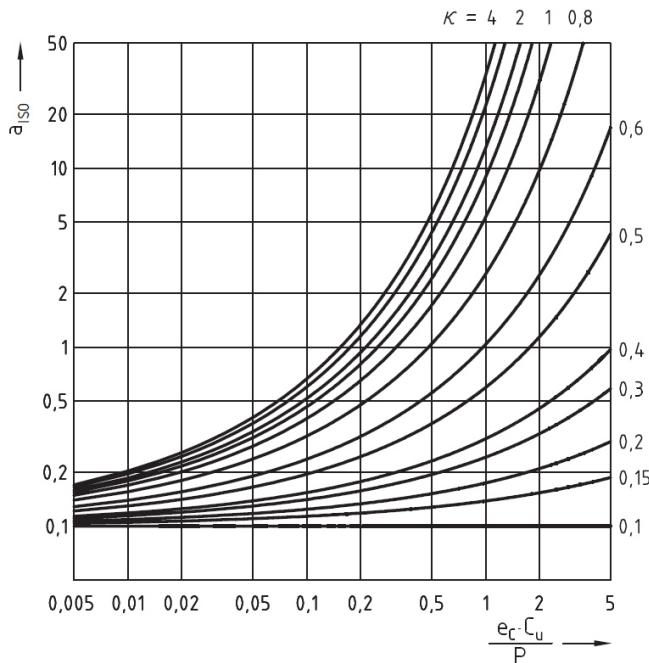


Bild 2.2: Bezugsviskosität ν_1



Hilfsblatt 2 zu Aufgabe 2

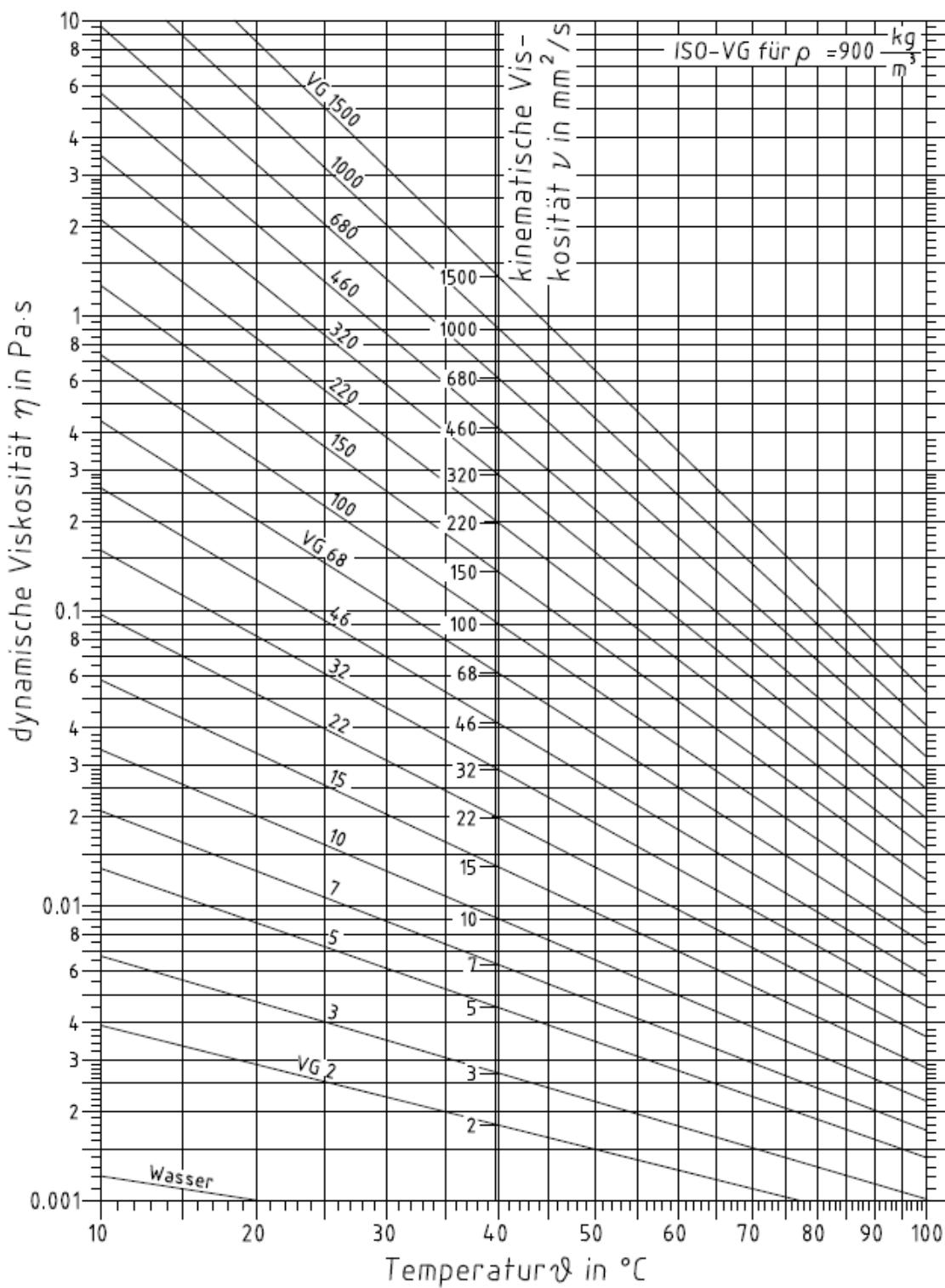


Bild 2.5: Viskositäts-Temperatur-Blatt für verschiedene Viskositätsklassen nach NIEMANN

Lösung zur Aufgabe 2

2.1 Festlager

$\Sigma 1 P$

Lager A ist das Festlager.

1 P

2.2 Statische Sicherheitsreserve des Lagers A

$\Sigma 6 P$

$$A_{Riesenrad} = \frac{\pi}{4} \cdot d_{Riesenrad}^2 = \frac{\pi}{4} \cdot (30 \text{ m})^2 = 706,858 \text{ m}^2$$

$$F_{Wind} = p_{Wind} \cdot A_{Riesenrad} = 200 \text{ N/m}^2 \cdot 706,858 \text{ m}^2 = 141,372 \text{ kN}$$

1 P

$$\Sigma M_{x,B} = 0 = -A_z \cdot 6 \text{ m} + m * g \cdot 3 \text{ m} + F_{Wind} \cdot \left(22 \text{ m} - \frac{30 \text{ m}}{2} \right)$$

$$A_z = \frac{m * g * 3 \text{ m} + F_{Wind} \cdot \left(22 \text{ m} - \frac{30 \text{ m}}{2} \right)}{6 \text{ m}}$$

$$A_z = 557,334 \text{ kN}$$

mit:

$$m = 80t$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

1,5 P

$$\Sigma F_y = 0 = A_y - F_{Wind}$$

$$A_y = F_{Wind} = 141,372 \text{ kN}$$

1 P

$$P_{0,A} = \max \{X_0 \cdot F_{r,A} + Y_0 \cdot F_{a,A}; F_{r,A}\} = 557,334 \text{ kN}$$

1,5 P

$$X_0 \cdot F_{r,A} + Y_0 \cdot F_{a,A} = 546,050 \text{ kN}$$

mit:

$$F_{a,A} = |A_y| = 141,372 \text{ kN}$$

$$F_{r,A} = |A_z| = 557,334 \text{ kN}$$

$$S_0 = \frac{C_0}{P_{0,A,zul}} = 1, \text{ Kugellager, normaler Lauf}$$

$$P_{0,A,zul} = \frac{C_0}{S_0} = 640 \text{ kN}$$

0,5 P

$$\frac{P_{0,A,zul}}{P_{0,A}} = 1,148$$

0,5 P

2.3 Kontaktfläche

$\Sigma 1 P$

Nach der HERTZ'schen Kontakttheorie entsteht bei einem Punktkontakt wie in Kugellager unter Belastung eine Verformung die zu einer Kontaktfläche in Form einer **Ellipse** führt.

1 P

2.4 Werkstofflegierung eines Wälz Lagerstahls

$\Sigma 1 P$

Eine der folgenden Antworten ist zu nennen:

1 P

- 100Cr6
- 17MnCr5
- 16CrNiMo6
- 43CrMo4
- X45Cr13
- X102CrMo17

- 15CrMoN15
- Si3N4

2.5 Minimale Grundölviskosität zur Erreichung der Ermüdungslebensdauer **Σ 8 P**

$$L_{nm} = \frac{20 \text{ Jahre} \cdot 60 \text{ Tage} \cdot 2 \text{ h} \cdot 60 \text{ min} \cdot 4 \text{ U/min}}{10^6} = 0,576 \cdot 10^6 \text{ Umdrehungen} \quad 1 \text{ P}$$

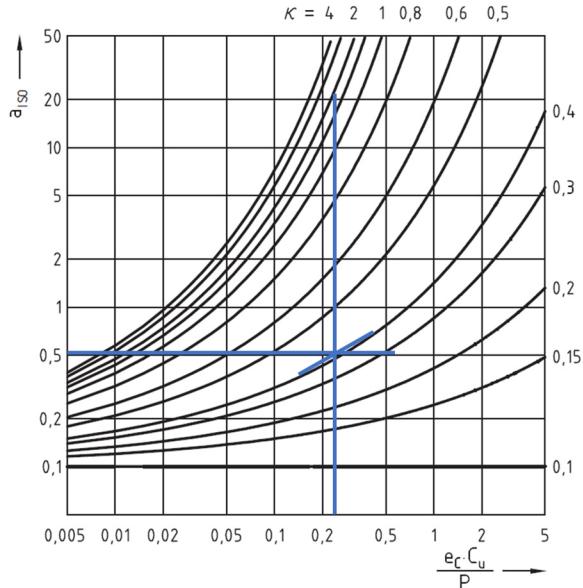
$$\frac{F_{a,A}}{F_{r,A}} = \frac{|A_y|}{|A_z|} = 0,254 < e = 0,31$$

→ $P_A = F_{r,A} = |A_z| = 557,334 \text{ kN}$ 1,5 P

$$\frac{e_c \cdot C_u}{P} = 0,242$$

mit:
 $P = 557,334 \text{ kN}$ 1 P

$\kappa = 0,410$ 1,5 P



mit:

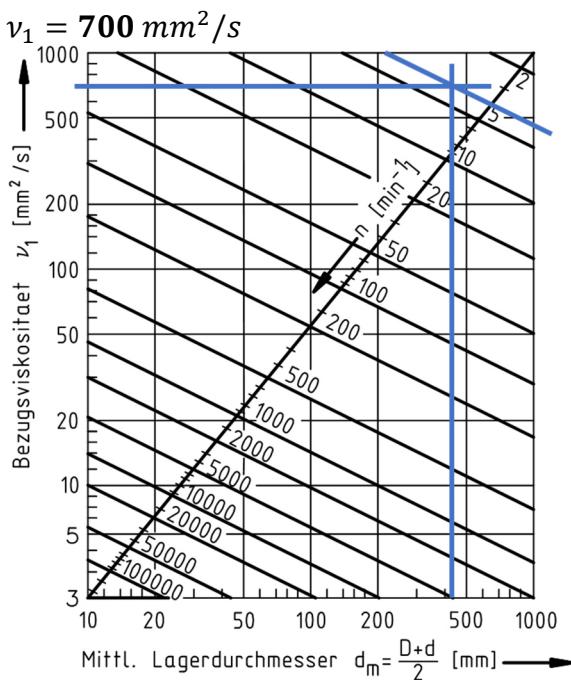
$$L_{nm} = a_1 \cdot a_{ISO} \cdot \left(\frac{C}{P}\right)^p$$

→ $a_{ISO} = \frac{L_{nm}}{a_1 \cdot \left(\frac{C}{P}\right)^p} = 0,511$

$p = 3$

$a_1 = 1$ (Ausfallwahrscheinlichkeit 10% laut Aufgabenstellung)

$P = P_A = 557,334 \text{ kN}$



mit:

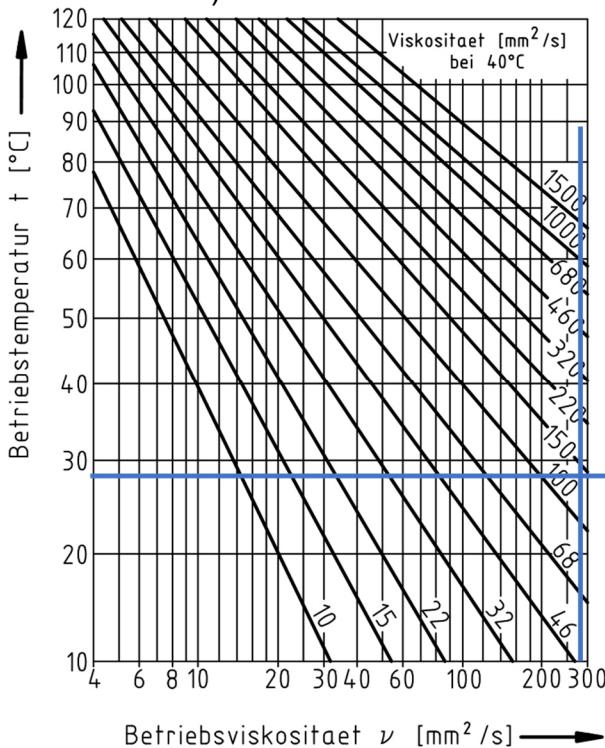
$$d_m = \frac{D + d}{2} = 425 \text{ mm}$$

$$\kappa = \frac{\nu}{\nu_1}$$

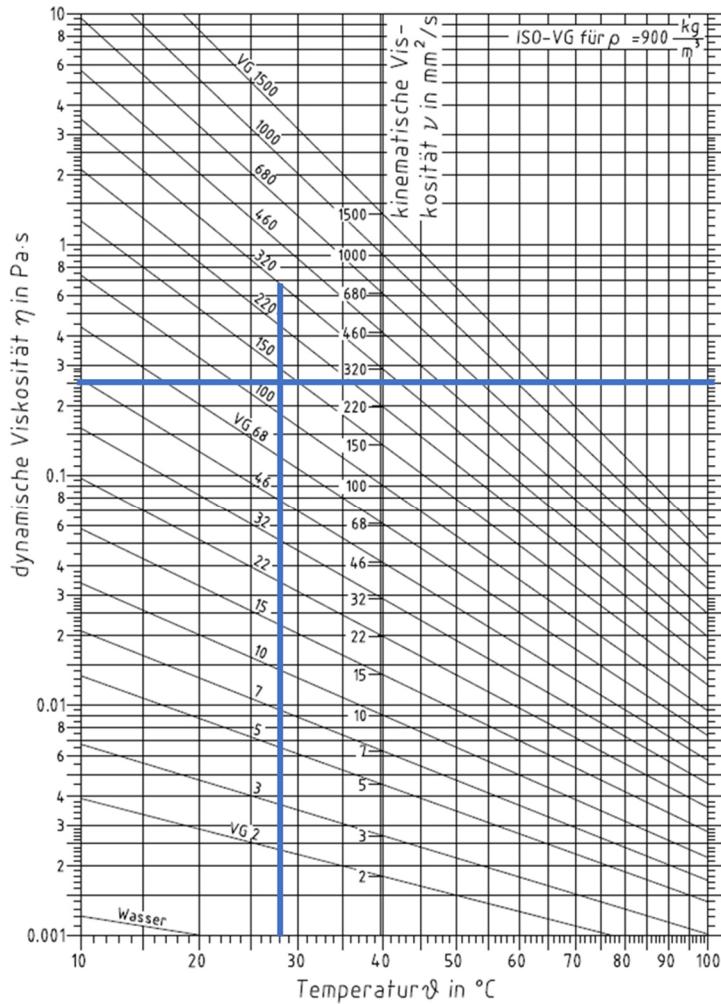
$$\rightarrow \nu = \kappa \cdot \nu_1 = 287,000 \text{ mm}^2/\text{s}$$

0,5 P

Es muss ein Fett mit der ISO VG Klasse **150** gewählt werden (Abschätzung zur sicheren Seite). 115 PP



Alternativ:



2.6 Minimale Grundölviskosität für verschleißfreien Betrieb

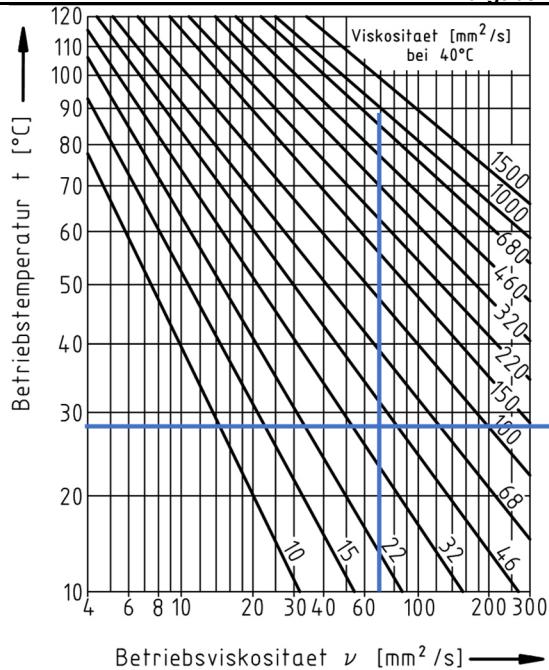
Σ 3 P

$$\nu_{min} = \nu_1 \cdot 0,1 = 700 \frac{mm^2}{s} \cdot 0,1 = 70 mm^2/s$$

0,5 P

Es muss ein Fett mit der ISO VG Klasse **46** gewählt werden (Abschätzung zur sicheren Seite).

1,5 P



$$\nu_{40,min,L} = \max(150 \text{ mm}^2/\text{s}; 46 \text{ mm}^2/\text{s}) = 150 \text{ mm}^2/\text{s}$$

Es muss ein Fett mit der ISO VG Klasse **150** gewählt werden (Abschätzung zur sicheren Seite). 1 P

2.7 Änderung Betriebsviskosität bei schlechterem Verunreinigungsbeiwert Σ 1 P

Die minimal erforderliche Betriebsviskosität **steigt**.

Begründung: Der Term $\frac{e_c \cdot c_u}{P}$ verringert sich. Damit a_{ISO} und somit die berechnete Lebensdauer konstant bleiben, muss sich das Viskositätsverhältnis κ erhöhen. Dies wird durch eine Steigerung der Betriebsviskosität ν erreicht. 1 P

2.8 Wälzlagerbauform, welche ausschließlich Axialkräfte übertragen kann Σ 1 P

Antwort: **Axial-Zylinderrollenlager oder Axial-Nadellager**

Begründung: Aufgrund fehlender Borde können bei Axial-Zylinderrollenlagern und Axial-Nadellagern keine Axialkräfte aufgenommen werden.

Ausnahmsweise auch richtig: **Axial-Rillenkugellager**

Das Axial-Rillenkugellager ist nicht geeignet für Axiallasten. Allerdings können durch die Rillen (Formschluss) geringe axiale Kräfte aufgenommen werden. 1 P

Aufgabe 3 (22 Punkte)

Als Teil des Entwicklerteams eines Herstellers für E-Lastenräder entwickeln Sie ein Antriebskonzept für ein E-Lastenrad. Das E-Lastenrad verfügt über einen Pedal- und einen Elektroantrieb. Es handelt sich um einen sogenannten Mittelmotor mit integriertem Summiergetriebe. Von der Getriebeausgangswelle (II) wird die Leistung über einen Riemen ($i_{\text{Riemen}} = 1$) auf die Nabe des Hinterrades übertragen. In der Nabe des Hinterrads ist zusätzlich eine 2-Gang Nabenschaltung verbaut.

Zur Realisierung des Summiergetriebes verwenden Sie eine Kombination aus zwei Planetengetrieben (RS1 & RS2) und zwei Kupplungen (K1 & K2). Über die Schaltung der Kupplungen K1 & K2 werden der Pedal-, der Elektro- sowie der Hybridbetrieb realisiert. Die Nabenschaltung wird durch das Planetengetriebe RS3 und die nicht im Detail abgebildeten Kupplungen realisiert. Sie untersuchen den Antrieb auf seine Eignung für diese Anwendung.

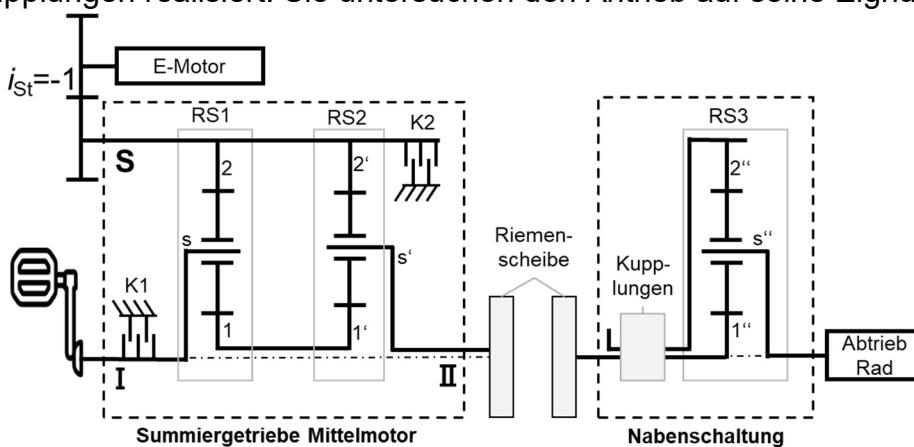


Abbildung 3.1: Schematischer Aufbau des E-Lastenrad Antriebes

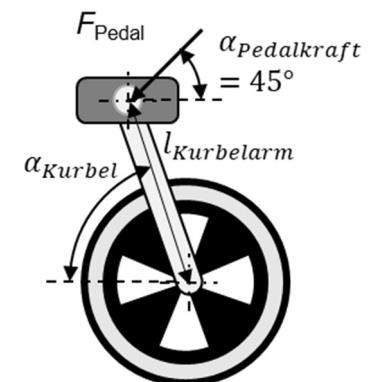


Abbildung 3.2: Zeichnung der Pedalkraft

Getriebeparameter

Übersetzung i_{St} der Stirnradstufe	$i_{\text{St}} = -1$	Standübersetzung i_{12} des RS1	$i_{12} = -2,5$
Übersetzung $i_{1's'}$ des RS2	$i_{1's'} = 5$	Zähnezahl Sonne des RS3	$z_{1''} = 30$
Übersetzung i_{Riemen} des Riemens	$i_{\text{Riemen}} = 1$	Zähnezahl Hohlrad der RS3	$z_{2''} = -54$
Maximale Pedalkraft	$F_{\text{Pedal,max}} = 300 \text{ N}$	Maximale Motordrehzahl	$n_{\text{Motor,max}} = -500 \text{ min}^{-1}$
Angriffswinkel Pedalkraft	$\alpha_{\text{Pedalkraft}} = 45^\circ$	Maximale Geschw. im Elektrobetrieb	$v_{\text{el,max}} = 15 \text{ km/h}$
Kurbelarmlänge	$l_{\text{Kurbelarm}} = 0,17 \text{ m}$	Raddurchmesser	$d_{\text{Rad}} = 0,737 \text{ m}$
Gewicht E-Lastenrad inkl. Person	$m_{\text{Gesamt}} = 100 \text{ kg}$	Pedaldrehzahl Betriebspunkt 1	$n_{\text{Pedal},1} = 60 \text{ min}^{-1}$
Erdbeschleunigung	$g = 9,81 \text{ m/s}^2$	Motordrehzahl Betriebspunkt 1	$n_{\text{Motor},1} = -450 \text{ min}^{-1}$

Hinweise:

- Vernachlässigen Sie alle Verluste.
- Gehen Sie davon aus, dass für den Pedalbetrieb die Pedale und das Hinterrad gleichsinnig drehen.
- Für die Hangabtriebskraft gilt $F_{Hang} = m \cdot g \cdot \sin(\alpha_{Hang})$.

Tabelle 3.1: Schaltschema K1 und K2

	K1	K2
Pedalbetrieb	Offen	Geschlossen
Hybridbetrieb	Offen	Offen
Elektrobetrieb	Geschlossen	Offen

Tabelle 3.2: Schaltschema Nabenschaltung

	Welle 1“	Welle 2“
1. Gang	Antrieb	Gestellfest
2. Gang	Gestellfest	Antrieb

3.1 Beschriften Sie das Getriebeschema nach WOLF in Abbildung 3.3 für das Summiergetriebe im Mittelmotor. (3 Punkte)

3.1.1	Ordnen Sie der Welle 3.1.1 die zugehörige Bezeichnung (1, 1', 2, 2', s, s') zu.
3.1.2	Ordnen Sie der Welle 3.1.2 die zugehörige Bezeichnung (1, 1', 2, 2', s, s') zu.
3.1.3	Ordnen Sie der Welle 3.1.3 die zugehörige Bezeichnung (1, 1', 2, 2', s, s') zu.
3.1.4	Ordnen Sie der Welle 3.1.4 die zugehörige Bezeichnung (1, 1', 2, 2', s, s') zu.
3.1.5	Ordnen Sie der Welle 3.1.5 die zugehörige Bezeichnung (1, 1', 2, 2', s, s') zu.
3.1.6	Ordnen Sie der Welle 3.1.6 die zugehörige Bezeichnung (1, 1', 2, 2', s, s') zu.

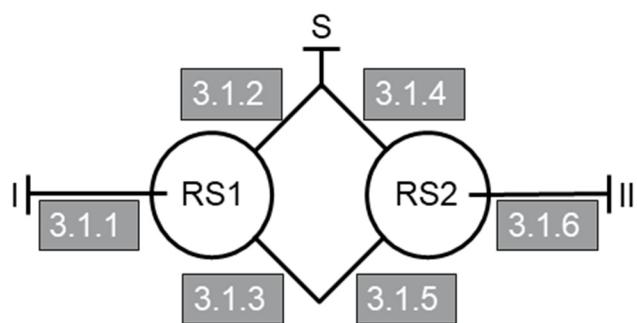


Abbildung 3.3: Getriebeschema nach WOLF für das Summiergetriebe des Mittelmotors

Betrachten Sie zunächst den reinen Pedalbetrieb bei eingelegtem 1. Gang der Nabenschaltung. Es soll sichergestellt werden, dass das unbeladene E-Lastenrad inkl. Person mit reiner Muskelkraft bei einer Steigung von 20% gefahren werden kann. Nehmen Sie an, dass hierfür das Drehmoment am Hinterrad die 1,5-fache Hangabtriebskraft überwinden muss. Gehen Sie davon aus, dass die Pedalkraft F_{Pedal} immer nur auf einem der Pedale und unter dem konstanten Winkel $\alpha_{\text{Pedalkraft}} = 45^\circ$ wirkt.

3.2 Berechnen Sie das maximale Drehmoment, das der Fahrer aufbringt. (2 Punkte)	
3.2.1	Bestimmen Sie den Winkel α_{Kurbel} der Kurbelstellung in $^\circ$, bei dem das maximale Antriebsdrehmoment $M_{\text{Pedal},\max}$ anliegt.
3.2.2	Berechnen Sie den Betrag des maximal durch den Fahrer bereitgestellten Drehmoments $M_{\text{Pedal},\max}$ in Nm.

Falls Sie Aufgabenteil 3.2 nicht lösen konnten, rechnen Sie mit $M_{\text{Pedal},\max} = 50 \text{ Nm}$ weiter.

3.3 Berechnen Sie die nötige Gesamtübersetzung des Antriebs. (3,5 Punkte)	
3.3.1	Berechnen Sie die wirkende Hangabtriebskraft F_{Hang} in N.
3.3.2	Berechnen Sie den Betrag des nötigen Abtriebsmoment $M_{\text{Rad,Hang}}$ am Hinterrad zum Überwinden der 1,5-fachen Hangabtriebskraft F_{Hang} in Nm.
3.3.3	Befindet sich der RS1 für den reinen Pedalbetrieb im Zwei- oder Dreowellensbetrieb?
3.3.4	Berechnen Sie die notwendige Gesamtübersetzung $i_{\text{l,s}}$ von den Pedalen zum Hinterrad, um das benötigte Abtriebsmoment $M_{\text{Rad,Hang}}$ am Hinterrad bereitzustellen.
3.3.5	Wie muss sich der Betrag der Gesamtübersetzung $i_{\text{l,s}}$ des Antriebs qualitativ verändern, wenn das Gewicht des E-Lastenrad zunimmt?

Neben dem Pedalbetrieb kann das E-Lastenrad auch ausschließlich durch den Elektromotor angetrieben werden. Prüfen Sie im Folgenden, ob die Drehzahl des Elektromotors begrenzt werden muss, wenn die maximal mögliche Fahrgeschwindigkeit im reinen Elektrobetrieb $v_{\text{el,max}} = 15 \text{ km/h}$ betragen soll. Gehen Sie hierfür von einem Betrieb der Nabenschaltung im 2. Gang aus.

3.4 Muss der Elektromotor für den Elektrobetrieb des E-Lastenrads gedrosselt werden? (5,5 Punkte)	
3.4.1	Berechnen Sie die Raddrehzahl $n_{\text{Rad},15}$ bei einer Fahrgeschwindigkeit von 15 km/h in min^{-1} .
3.4.2	Berechnen Sie die Übersetzung $i_{2,\text{s}}$ der Nabenschaltung.
3.4.3	Berechnen Sie die Drehzahl $n_{\text{Riemen},15}$ der Riemscheibe am Hinterrad in min^{-1} .
3.4.4	Berechnen Sie die Standübersetzung $i_{1,II}$ des Summiergetriebes des Mittelmotors.
3.4.5	Berechnen Sie die Übersetzung $i_{S,II}$ des Summiergetriebes des Mittelmotors.
3.4.6	Berechnen Sie den Betrag der Drehzahl $n_{\text{Motor},15}$ des Elektromotors für eine Fahrgeschwindigkeit von 15 km/h in min^{-1} .
3.4.7	Muss die Drehzahl des Elektromotors für den Elektrobetrieb gedrosselt werden?

Falls Sie Aufgabenteil 3.4 nicht lösen konnten, rechnen Sie mit $i_{1,II} = 1,5$ weiter.

3.5 Nennen Sie einen Vorteil der Verwendung eines Planetengetriebes anstelle eines Stirnradgetriebes zur Realisierung der Nabenschaltung? (1 Punkt)	
---	--

Betrachten Sie nun den Hybridbetrieb des E-Lastenrades. Im Folgenden untersuchen Sie den Betriebspunkt 1 mit einer Pedaldrehzahl $n_{\text{Pedal},1} = 60 \text{ min}^{-1}$. Einer Kennlinie in der Betriebsanleitung können Sie die dazugehörige Motordrehzahl $n_{\text{Motor},1} = -450 \text{ min}^{-1}$ entnehmen. Gehen Sie davon aus, dass der 2. Gang eingelegt ist und der Fahrer in dem Betriebspunkt 1 das Drehmoment $M_{\text{Pedal,max}}$ aufbringt. Sie untersuchen die Geschwindigkeit des E-Lastenrads für den Betriebspunkt 1.

3.6 Bestimmen Sie die Geschwindigkeit des E-Lastenrads für den Betriebspunkt 1. (6 Punkte)	
3.6.1	Berechnen Sie das freie Drehzahlverhältnis $k_{S,I}$ des Summiergetriebes des Mittelmotor.
3.6.2	Berechnen Sie die resultierende Drehzahl $n_{\text{Riemen},II,1}$ der Riemscheibe in min^{-1} .
3.6.3	Berechnen Sie die Antriebsleistung $P_{\text{Pedal},1}$, die durch den Fahrer im Betriebspunkt 1 aufgebracht wird, in W.
3.6.4	Berechnen Sie die Antriebsleistung $P_{\text{Motor},1}$ in W, die durch den Elektromotor im Betriebspunkt 1 aufgebracht wird.
3.6.5	Berechnen Sie die Geschwindigkeit $v_{\text{Fahrrad},1}$ des E-Lastenrads im Betriebspunkt 1 in km/h. Gehen Sie davon aus, dass alle am E-Lastenrad angreifenden Widerstände eine summierte Kraft von 307,68 N ergeben.

Sie betreiben ein verlustbehaftetes Planetengetriebe im Standbetrieb fortlaufend bei konstanter Antriebsdrehzahl und -drehmoment. Im Laufe der Nutzung verschlechtert sich der Wirkungsgrad des Planetengetriebes.

3.7 Wie verändern sich infolgedessen die Abtriebsdrehzahl und das Abtriebsdrehmoment qualitativ? (1 Punkt)

3.7.1 Wie verändert sich die Abtriebsdrehzahl qualitativ?

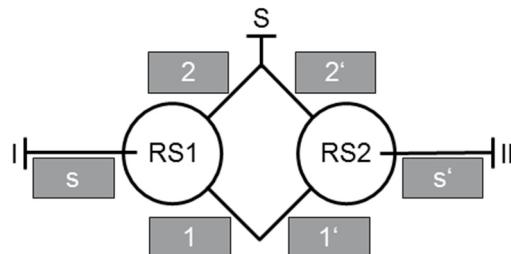
3.7.2 Wie verändert sich das Abtriebsdrehmoment qualitativ?

Lösung zur Aufgabe 3

3.1 Getriebeschema nach Wolf

Σ 3 P

s	0,5 P
2	0,5 P
1	0,5 P
2'	0,5 P
1'	0,5 P
s'	0,5 P



3.2 Maximales Drehmoment des Radfahrenden

Σ 2 P

$$\alpha_{Pedal} = 45^\circ$$

1 P

da M_{Pedal} maximal wird, wenn die Kraft F_{Pedal} und der Hebelarm $l_{Kurbelarm}$ im Winkel von 90° zueinander stehen

$$M_{Pedal,max} = F_{Pedal,max} \cdot l_{Kurbelarm} = 300 \text{ N} \cdot 0,17 \text{ m} = 51 \text{ Nm}$$

1 P

3.3 Anfahren im Hang

Σ 3,5 P

$$F_{Hang} = m_G \cdot g \cdot \sin(\alpha) = 100 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \sin(11,310^\circ) = 192,390 \text{ N}$$

1 P

$$\text{mit } \alpha = \arctan\left(\frac{20}{100}\right) = 11,310^\circ$$

$$M_{Rad,Hang} = |-1,5 \cdot F_{Hang} \cdot r_{Rad}| = \left|-1,5 \cdot 192,391 \cdot \frac{0,737}{2}\right| = 106,286 \text{ Nm}$$

0,5 P

Zweiwellenbetrieb

0,5 P

$$i_{I,s''} = -\frac{M_{Rad,Berg}}{M_{Pedal,max}} = -\frac{-106,286}{51} = 2,084$$

1 P

Steigen, da $m_G \uparrow \rightarrow F_{Hang} \uparrow \rightarrow M_{Rad,Hang} \uparrow \rightarrow i_{I,s''} \uparrow$

0,5 P

3.4 Drosselung Des E-Motors

Σ 5,5 P

$$v_{Rad,15} = 15 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 15 \cdot \frac{1000 \text{ m}}{60 \text{ min}} = 250 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

1 P

$$n_{Rad,15} = \frac{v_{Rad}}{2\pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)} = \frac{250 \frac{\text{m}}{\text{min}}}{2\pi \cdot \left(\frac{0,737 \text{ m}}{2}\right)} = 107,975 \text{ min}^{-1}$$

$$i_{2''s''} = 1 - \frac{1}{i_{1''2''}} = 1 - \frac{1}{-1,8} = 1,556$$

1 P

$$\text{mit } i_{1''2''} = \frac{z_{2''}}{z_{1''}} = \frac{-54}{30} = -1,8$$

$$n_{Riemen,15} = n_{Rad,15} \cdot i_{2''s''} = 107,975 \cdot 1,556 = \mathbf{168,009 \text{ min}^{-1}}$$

0,5 P

$$i_{I,II} = i_{s1} \cdot i_{1's'} = 0,286 \cdot 5 = \mathbf{1,430}$$

1 P

$$\text{mit } i_{s,1} = \frac{1}{1-i_{12}} = \frac{1}{1-(-2,5)} = 0,286$$

$$i_{S,II} = \frac{i_{I,II}}{i_{I,II}-1} = \frac{1,43}{1,43-1} = \mathbf{3,326}$$

1 P

$$n_{Motor,15} = |n_{Riemen,15} \cdot i_{S,II} \cdot i_{St}| = |168,009 \text{ min}^{-1} \cdot 3,326 \cdot (-1)| = \mathbf{558,798 \text{ min}^{-1}} \quad 0,5 \text{ P}$$

Nein, da $n_{Motor,15} > n_{Motor,max}$ ist, ist keine Drosselung notwendig

0,5 P

3.5 Vorteil Planetengetriebe

Σ 1 P

Es ist **eine** der folgenden Antwortmöglichkeiten zu nennen:

1 P

Reduzierung des Bauvolumens

Reduzierung des Gewichtes

An- und Abtriebswellen liegen koaxial

Hohe und niedrige Übersetzungsverhältnisse

Ein hoher Wirkungsgrad ist möglich

3.6 Hybridantrieb

Σ 6 P

$$k_{S,I} = \frac{n_S}{n_I} = \frac{450 \text{ min}^{-1}}{60 \text{ min}^{-1}} = \mathbf{7,5}$$

0,5 P

$$\text{mit } n_S = n_{Motor,1} \cdot \frac{1}{i_{St}} = -450 \text{ min}^{-1} \cdot \frac{1}{-1} = 450 \text{ min}^{-1}$$

$$n_{Riemen,1} = n_{II} = k_{II,I} * n_I = 2,955 \cdot 60 \text{ min}^{-1} = \mathbf{177,3 \text{ min}^{-1}}$$

1,5 P

$$\text{mit } k_{II,I} = \frac{1-k_{S,I}(1-i_{I,II})}{i_{I,II}} = \frac{1-7,5 \cdot (1-(1,43))}{(1,43)} = 2,955$$

Alternative Lösung nach dem Satz von Willis:

$$n_{II} = \frac{n_I - (1-i_{I,II}) \cdot n_S}{i_{I,II}} = \frac{60 \text{ min}^{-1} - (1-1,43) \cdot 450 \text{ min}^{-1}}{1,43} = 177,082 \text{ min}^{-1}$$

$$\text{mit } n_I - i_{I,II} \cdot n_{II} - (1 - i_{I,II}) \cdot n_S$$

$$P_{Pedal,1} = M_{Pedal,1} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{Pedal,1}}{60} = 51 \text{ Nm} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot 60 \text{ min}^{-1}}{60} = \mathbf{320,442 \text{ W}}$$

1 P

$$P_{Motor,1} = M_{Motor,1} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{Motor,1}}{60} = -21,93 \text{ Nm} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot (-450 \text{ min}^{-1})}{60} = \mathbf{1033,426 \text{ W}}$$

1,5 P

$$\text{mit } M_{Motor,1} = -M_{Fahrer,1} \cdot \frac{i_{I,II}-1}{1} = -51 \text{ Nm} \cdot \frac{1,43-1}{1} = -21,93 \text{ Nm} \text{ (Drehmomentplan)}$$

$$v_{Rad,1} = \frac{P_{Rad,1}}{F_{Rad,1}} = \frac{1351,868 \text{ W}}{307,68 \text{ N}} = 4,400 \frac{\text{m}}{\text{s}} = \mathbf{15,84 \frac{\text{km}}{\text{h}}}$$

1,5 P

$$P_{Rad,1} = -P_{Fahrer,1} - P_{Motor,1} = -320,442 \text{ W} - 1033,426 \text{ W} = -1353,868 \text{ W} \text{ (aus Leistungsbilanz)}$$

3.7 Einfluss des Wirkungsgrades

Σ 1 P

Die Abtriebsdrehzahl bleibt unverändert

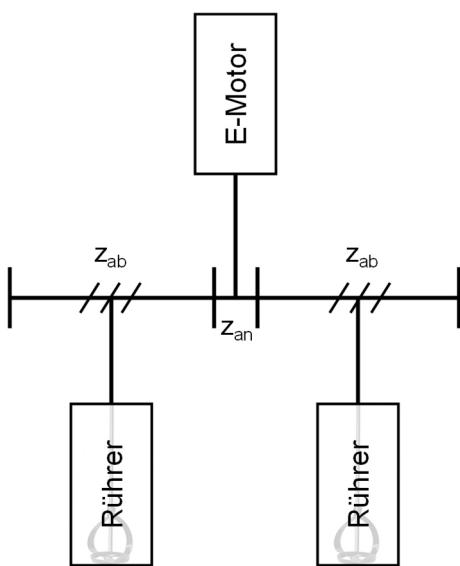
0,5 P

Das Abtriebsdrehmoment sinkt

0,5 P

Aufgabe 4 (22 Punkte)

Sie sind Entwickler in einem Unternehmen für Handrührgeräte. Um die Leistung des gleichmäßig laufenden Elektromotors auf die beiden Rührer aufzuteilen, nutzen Sie ein Verteiler-Getriebe mit zwei identischen Abtriebsräden. Gehen Sie davon aus, dass in dem untersuchten Betriebspunkt das Abtriebsmoment an beiden Rührern gleich ist. Im Nachfolgenden prüfen Sie ihr Getriebe hinsichtlich der Zahnradfestigkeit.



Antriebsleistung	P_{an}	=	450 W
Abtriebsdrehzahl	n_{ab}	=	800 min ⁻¹
Zähnezahl z_{an}	z_{an}	=	16
Zähnezahl z_{ab}	z_{ab}	=	90
Normalmodul	m_n	=	0,5 mm
Schrägungswinkel	β	=	15 °
Effektive Zahnbreite	b	=	5 mm
Profilverschiebung	x_{an}	=	0,2
Profilverschiebung	x_{ab}	=	-0,2
Einlaufbetrag	y_p	=	2 µm
Material			18CrNiMo7-6
Schmierstoff			ISO VG 100
Verzahnungsqualität			IT 5

Faktoren

$$\begin{array}{ll} Z_V \cdot Z_R \cdot Z_W & = 1,01 \\ Z_B \cdot Z_H \cdot Z_E \cdot Z_\varepsilon \cdot Z_\beta & = 419,7 \sqrt{\text{N/mm}^2} \\ C_{v2} \cdot B_f + C_{v3} \cdot B_k & = 0,481 \end{array} \quad \begin{array}{ll} \text{Breitenfaktor} & K_{H\alpha} = 2,26 \\ \text{Stirnfaktor} & K_{H\beta} = 1,2 \end{array}$$

Hinweise:

- Nutzen Sie zur Lösung der Aufgabe die Diagramme auf dem Hilfsblatt 1 zu Aufgabe 4.
- Nehmen Sie alle Komponenten als verlustfrei an.
- Nehmen Sie an, dass der Teig eine unregelmäßige Dichte aufweist.

4.1 Bestimmen Sie die Zahnkräfte am Antriebsritzel. (4 Punkte)	
4.1.1	Berechnen Sie den Teilkreisdurchmesser des Antriebsritzels d_{an} in mm.
4.1.2	Berechnen Sie den Betrag des Abtriebsmoments M_{an} in Nm.
4.1.3	Berechnen Sie die aus dem Moment resultierende Tangentialkraft im Zahnkontakt F_t in N.
4.1.4	Berechnen Sie die Axialkraft F_{ax} in N.

Falls Sie Aufgabenteil 4.1 nicht lösen konnten, rechnen Sie mit $d_{an} = 9 \text{ mm}$ und $F_t = 120 \text{ N}$ weiter.

- | | |
|-----|---|
| 4.2 | Nennen Sie eine Schadensart, die durch Ermüdung an der Zahnflanke auftritt.
<i>(1 Punkt)</i> |
|-----|---|

Im Folgenden untersuchen Sie die Flankentragfähigkeit des Antriebsritzels. Im ersten Schritt bestimmen Sie die Grenzspannung des Zahnrads. Gehen Sie von einer dauerfesten Auslegung aus.

- | | |
|-------|--|
| 4.3 | Bestimmen Sie die Grenzspannung am Antriebsritzel. <i>(3,5 Punkte)</i> |
| 4.3.1 | Bestimmen Sie den Größenfaktor Z_x . |
| 4.3.2 | Bestimmen Sie den Dauerfestigkeitswert $\sigma_H \text{ lim}$ für den gegebenen Werkstoff in N/mm^2 . |
| 4.3.3 | Bestimmen Sie den Schmierstofffaktor Z_L . |
| 4.3.4 | Berechnen Sie die Grenzspannung σ_{HG} in N/mm^2 . |

Falls Sie Aufgabenteil 4.3 nicht lösen konnten, rechnen Sie mit $\sigma_{HG} = 1490 \text{ N/mm}^2$ weiter.

- | | |
|-----|---|
| 4.4 | Bestimmen Sie den Anwendungsfaktor K_A . <i>(1 Punkt)</i> |
|-----|---|

Falls Sie Aufgabenteil 4.4 nicht lösen konnten, rechnen Sie mit $K_A = 1,3$ weiter.

Um die tatsächliche Flankenpressung zu bestimmen, müssen Sie zuerst den Dynamikfaktor bestimmen. Gehen Sie dafür davon aus, dass die Zahnräder durchgängig im unterkritischen Bereich betrieben werden ($N = 0,025$).

- | | |
|-------|--|
| 4.5 | Bestimmen Sie den Dynamikfaktor. <i>(5,5 Punkte)</i> |
| 4.5.1 | Bestimmen Sie die Einzelfedersteifigkeit c' in $\text{N}/(\text{mm} \cdot \mu\text{m})$ nach Methode B. Vereinfachungen sind nicht zulässig. |
| 4.5.2 | Berechnen Sie die wirksame Profil-Formabweichung $f_{pe \text{ eff}}$ in μm . |
| 4.5.3 | Berechnen Sie den Faktor B_p . |
| 4.5.4 | Berechnen Sie den Dynamikfaktor K_v . |

Falls Sie Aufgabenteil 4.5 nicht lösen konnten, rechnen Sie mit $K_v = 1,05$ weiter.

4.6 Prüfen Sie, ob das Antriebsritzel hinsichtlich Zahnflankentragfähigkeit ausreichend dimensioniert ist. (3 Punkte)	
4.6.1	Berechnen Sie die Flankenpressung σ_H in N/mm ² .
4.6.2	Berechnen Sie die vorliegende Sicherheit S_H .
4.6.3	Ist das Zahnräder auf Basis Ihrer Ergebnisse hinsichtlich Zahnflankentragfähigkeit ausreichend dimensioniert?

Neben der Überprüfung der Flankentragfähigkeit, müssen nach DIN 3990 auch die Zahnfußtragfähigkeit und die Fresstragfähigkeit der Zahnräder sichergestellt sein. Beantworten Sie dazu folgende Fragen.

4.7 Nennen Sie eine Spannung, die durch den Spannungskorrekturfaktor Y_{Sa} berücksichtigt wird? (1 Punkt)	
4.8	Nennen Sie eine konstruktive Maßnahme, um das Risiko für Zahnfußbruch zu minimieren. (1,5 Punkte)
4.9	An welchem Punkt auf der Eingriffslinie liegt die höchste Kontakttemperatur vor? (1,5 Punkte)

Hilfsblatt 1 zu Aufgabe 4

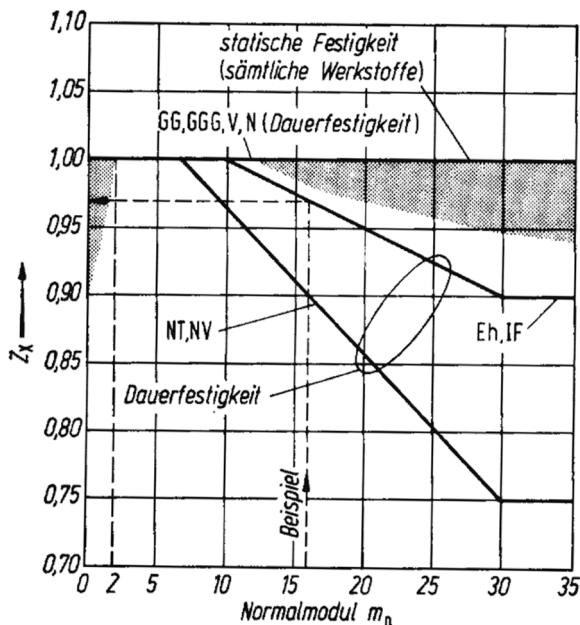


Bild 4.1: Größenfaktor Z_x

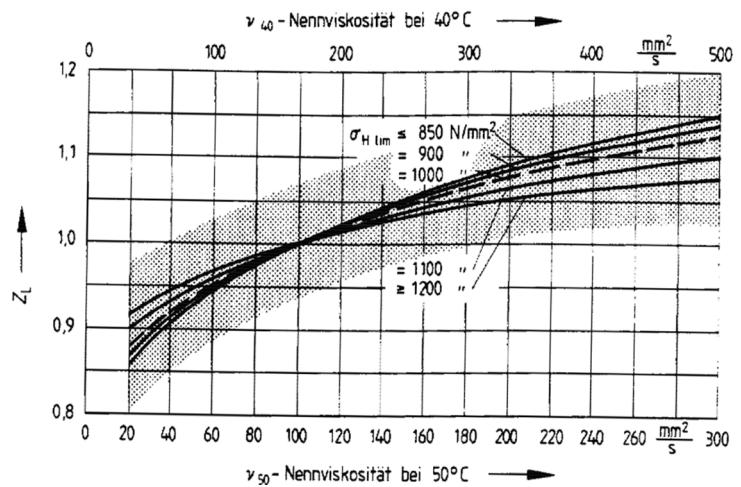
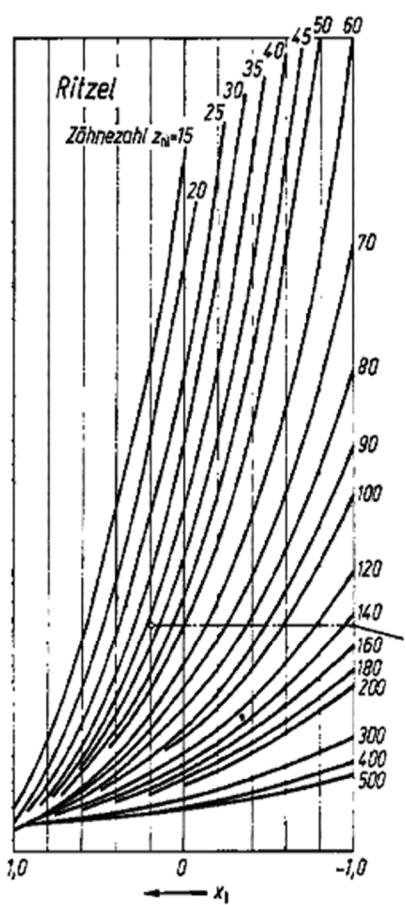


Bild 4.2: Schmierstofffaktor Z_L



Beispiel: $z_{n1}=36$, $x_1=+0,2$, $z_{n2}=130$, $x_2=-0,2$, $c'_{th}=19,7 \text{ N}/(\text{mm } \mu\text{m})$

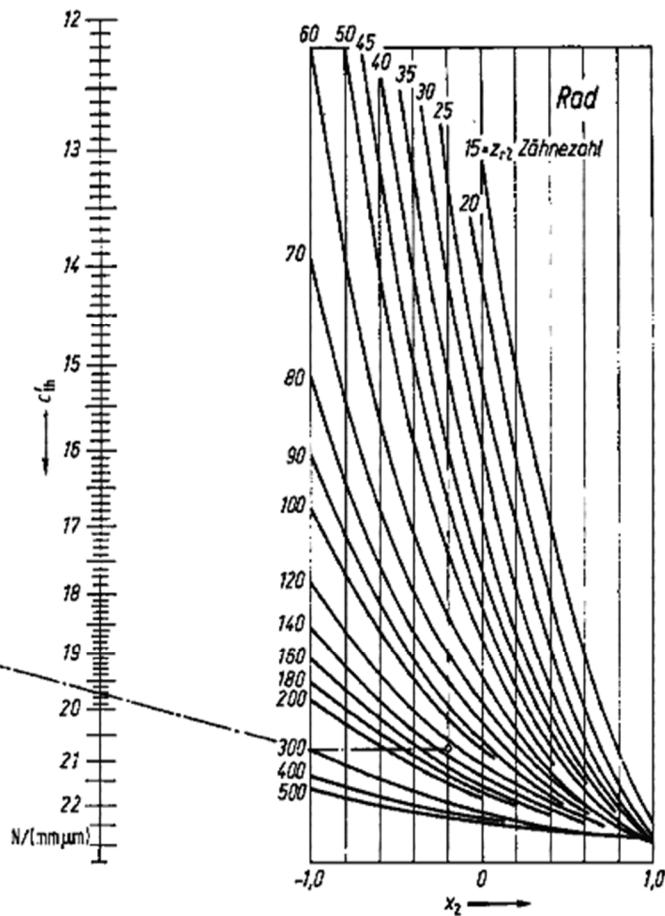


Bild 4.3 Theoretische Einzelfedersteifigkeit c'_{th} von Geradstirnrädern mit $z_{n1,2} = \frac{z_{1,2}}{\cos^3 \beta}$

Lösung zur Aufgabe 4

4.1 Zahnkräfte am Antriebsritzel

Σ 4 P

$$d_{an} = \frac{z_{an} \cdot m_n}{\cos \beta} = 8,282 \text{ mm}$$

0,5 P

mit

$$z_{an} = 16, m_n = 0,5 \text{ mm}, \beta = 15^\circ$$

$$M_{an} = M_{ab} \cdot \frac{z_{an}}{z_{ab}} = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot n_{ab}} \cdot \frac{z_{an}}{z_{ab}} = 0,955 \text{ N}$$

1,5 P

mit

$$P = 450 \text{ W}, z_{ab} = 90, z_{an} = 16, n_{ab} = 800 \text{ min}^{-1}$$

$$F_t = \frac{2 \cdot M_{an}}{d_{an} \cdot z_e} = 115,310 \text{ N}$$

1 P

mit

$$z_e = 2$$

(Alternativ) (1)

$$F_t = \frac{2 \cdot M_{ab}}{d_{ab} \cdot z_e} = \frac{2 \cdot \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot n_{ab}}}{d_{ab} \cdot z_e} = \frac{P}{n_{ab} \cdot d_{ab} \cdot z_e} = 115,300 \text{ N}$$

mit

$$z_e = 1$$

$$d_{ab} = \frac{z_{ab} \cdot m_n}{\cos \beta} = 46,587 \text{ mm}$$

$$F_{ax} = F_t \cdot \tan \beta = 30,897 \text{ N}$$

1 P

4.2 Schadensart durch Ermüdung

Σ 1 P

Es ist eine der folgenden Antworten zu nennen:

1 P

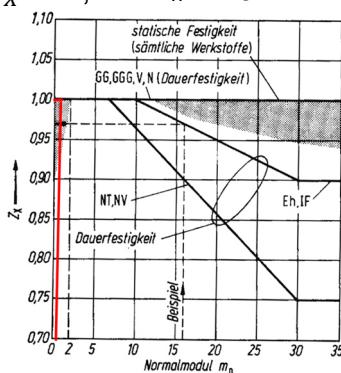
- Pitting, Grübchen
- Mikropitting, Grauflecken

4.3 Grenzspannung am Antriebsritzel

Σ 3,5 P

$$Z_X = 1, \text{ da } m_n < 10 \text{ mm}$$

0,5 P

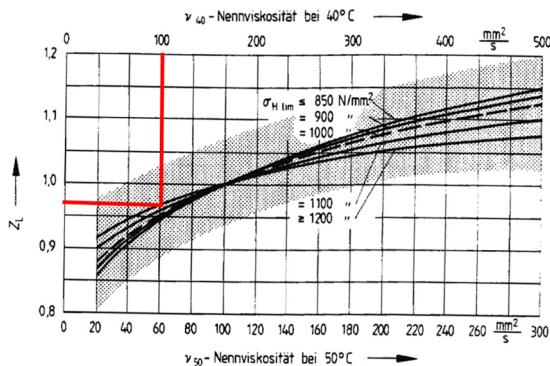


$$\sigma_{H \lim} = 1510 \frac{N}{mm^2}$$

0,5 P

für 18 CrNiMo7-6 (aus Werkstofftabelle, A.5)

$$Z_L = 0,97$$



mit

$$\nu_{40} = 100 \text{ (ISO VG 100)}$$

$$\sigma_{H \lim} = 1510 \text{ N/mm}^2 \geq 1200 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{HG} = \sigma_{H \lim} \cdot Z_{NT} \cdot Z_L \cdot Z_v \cdot Z_R \cdot Z_W \cdot Z_X = 1479,347 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

1,5 P

mit

$$Z_{NT} = 1, \text{ da dauerfest}$$

$$Z_v \cdot Z_R \cdot Z_W = 1,01 \text{ (Aufgabenstellung)}$$

4.4 Anwendungsfaktor

S 1 P

$$K_A = 1,25$$

1 P

mit

Arbeitweise Antriebsmaschine: gleichmäßig (Elektromotor)

Arbeitsweise Abtriebsmaschine: mäßige Stöße (Rührer und Mischer für zähe Flüssigkeiten oder Stoffe mit unregelmäßiger Dichte)

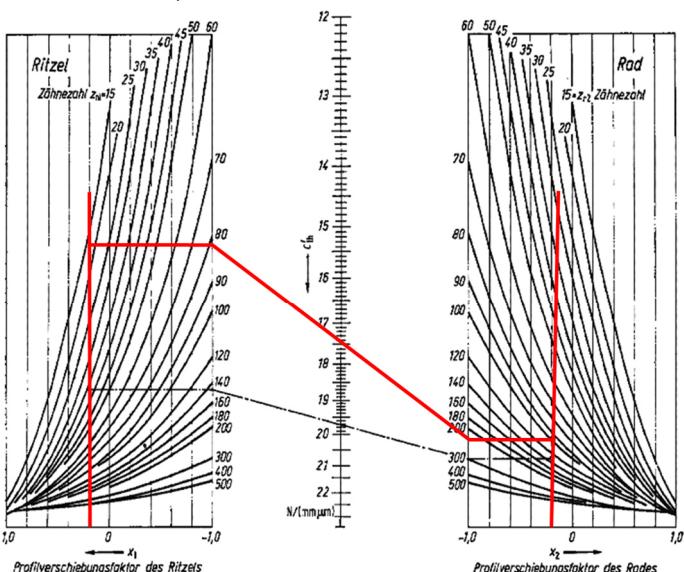
4.5 Dynamikfaktor

S 5,5 P

$$c' = c_{th} \cdot 0,8 \cdot \cos \beta = 13,446 \frac{\text{N}}{\text{mm} \mu\text{m}}$$

1,5 P

$$c_{th} = 17,4 \frac{\text{N}}{\text{mm} \mu\text{m}}$$



Beispiel: $z_{n1}=36, x_{11}=+0,2, z_{n2}=130, x_{21}=-0,2, c_{th}=19,7 \text{ N/mm} \mu\text{m}$

mit

$$z_{n1} = z_{n,an} = \frac{z_{an}}{\cos^3 \beta} = 17,754$$

$$z_{n2} = z_{n,ab} = \frac{z_{ab}}{\cos^3 \beta} = 99,865$$

$$f_{p\ eff} = f_p - y_p = 2,695 \mu m \quad 1,5 P$$

mit

$$f_{p|5} = 4 + 0,315 \cdot (m_n + 0,25 \cdot \sqrt{d}) = 4,695 \mu m$$

$$d = \max\{d_{ab}, d_{an}\} = d_{ab} = \frac{z_{ab} \cdot m_n}{\cos \beta} = 46,587 mm$$

$$B_p = \frac{c' \cdot f_{p\ eff} \cdot b}{F_t \cdot K_A} = 1,257 \quad 1 P$$

$$K_v = N \cdot K + 1 = 1,022 \quad 1,5 P$$

$$\text{mit } K = C_{v1} \cdot B_p + C_{v2} \cdot B_f + C_{v3} \cdot B_k = 1,002$$

$$N = 0,025, C_{v1} = 0,32$$

4.6 Zahnflankentragfähigkeit Σ 3 P

$$\sigma_H = Z_B \cdot Z_H \cdot Z_\varepsilon \cdot Z_\beta \cdot Z_E \cdot \sqrt{\frac{F_t}{d_1 \cdot b} \cdot \frac{u+1}{u}} \cdot \sqrt{K_A \cdot K_V \cdot K_{H\beta} \cdot K_{H\alpha}} = 1414,741 \frac{N}{mm^2} \quad 1,5 P$$

mit

$$u = \frac{z_{Rad}}{z_{Ritzel}} = \frac{z_{ab}}{z_{an}} = 5,625, Z_B \cdot Z_H \cdot Z_\varepsilon \cdot Z_\beta \cdot Z_E = 419,7 \sqrt{N/mm^2}, K_{H\beta} = 1,2, K_{H\alpha} = 2,26$$

$$S_H = \frac{\sigma_{HG}}{\sigma_H} = 1,046 \quad 1 P$$

Ja, da $S_H > S_{H\ min} = 1,0$ 0,5 P

4.7 Spannungskorrekturfaktor Σ 1 P

Der Spannungskorrekturfaktor berücksichtigt folgende Spannungen. Es ist **eine** der Antworten zu nennen:

- Druckspannung
- Schubspannung
- Kerbspannung

4.8 Konstruktive Maßnahme gegen Zahnbruch Σ 1,5 P

Es ist **eine** der folgenden Antworten zu nennen. Weitere Antworten sind denkbar: 1,5 P

- Zahnbreite erhöhen
- Profilverschiebung
- Durchmesser erhöhen
- Zahnflankenkorrektur

4.9 Temperaturverlauf auf der Eingriffslinie Σ 1,5 P

Die höchste Temperatur liegt an Punkt D vor, da hier die gesamte Last an einem Zahn angreift und eine hohe Gleitgeschwindigkeit vorliegt. 1,5 P

Aufgabe 5 (8 Punkte)

5.1 Gegeben ist das in Abbildung 5.1 dargestellte Viskosimeter. (2 Punkte)	
5.1.1	Wie heißt das in Abbildung 5.1 gezeigte Viskosimeter?
5.1.2	Benennen Sie die bei diesem Viskosimeter genutzte physikalische Messgröße zur Bestimmung der Viskosität.

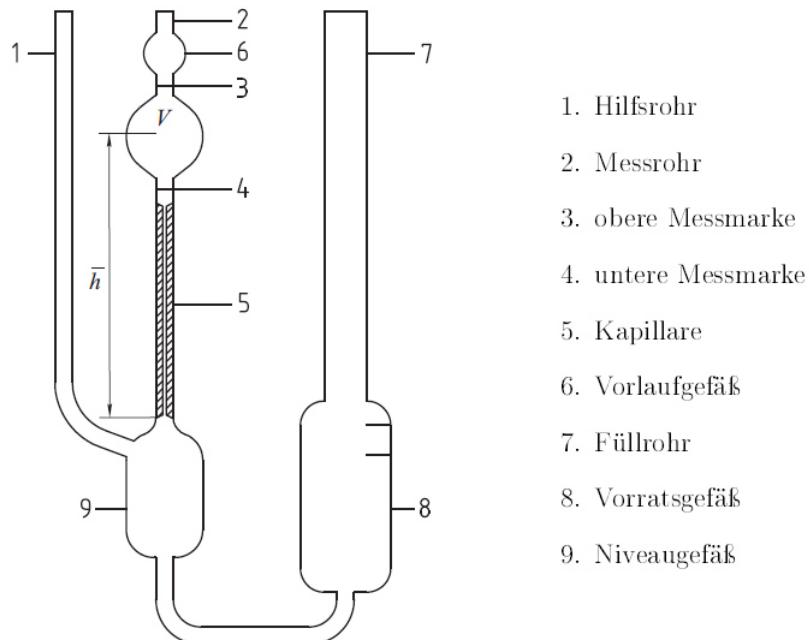


Abbildung 5.1: Prinzipbild des Viskosimeters

5.2	Kann es bei einer Relativgeschwindigkeit von $u = 0$ zwischen der Oberfläche der Welle und der Lagerschale eines Gleitlagers zu einem Druckaufbau im Schmierspalt kommen? (1 Punkt)
5.3	Nennen Sie eine Werkstofflegierung oder einen Werkstoffnamen für Gleitlager mit guten Einbettungseigenschaften. (1 Punkt)
5.4	Um welchen Faktor muss der Kühlölvolumenstrom bei reiner Wärmeabfuhr durch einen Ölkühler gesteigert werden, wenn das relative Lagerspiel bei konstanten Betriebsbedingungen, konstanter Lagerbreite und -durchmesser, bei gleichbleibendem Schmierstoff und bei gleichbleibenden Öltemperaturen vor und nach dem Ölkühler halbiert wird? Gehen Sie von einem Betrieb bei einer Sommerfeldzahl $So < 1$ aus. (1,5 Punkte)

5.5 Ab welcher spezifischen Lagerbelastung \bar{p} in N/mm² muss beim Anfahrvorgang hydrodynamischer Gleitlager gegebenenfalls eine zusätzliche hydrostatische Anhebung vorgesehen werden? (**1 Punkt**)

5.6 Um welchen Faktor erhöht sich die Übergangsrehzahl eines Gleitlagers, welches mit einem Öl der Klasse ISO VG 10 betrieben wird, wenn die Temperatur von 40°C auf 60°C gesteigert wird? (**1,5 Punkte**)

Hinweis: Nutzen Sie zur Lösung der Aufgabe die Diagramme auf den Hilfsblättern 1 bis 2 zu Aufgabe 5.

Hilfsblatt 1 zu Aufgabe 5

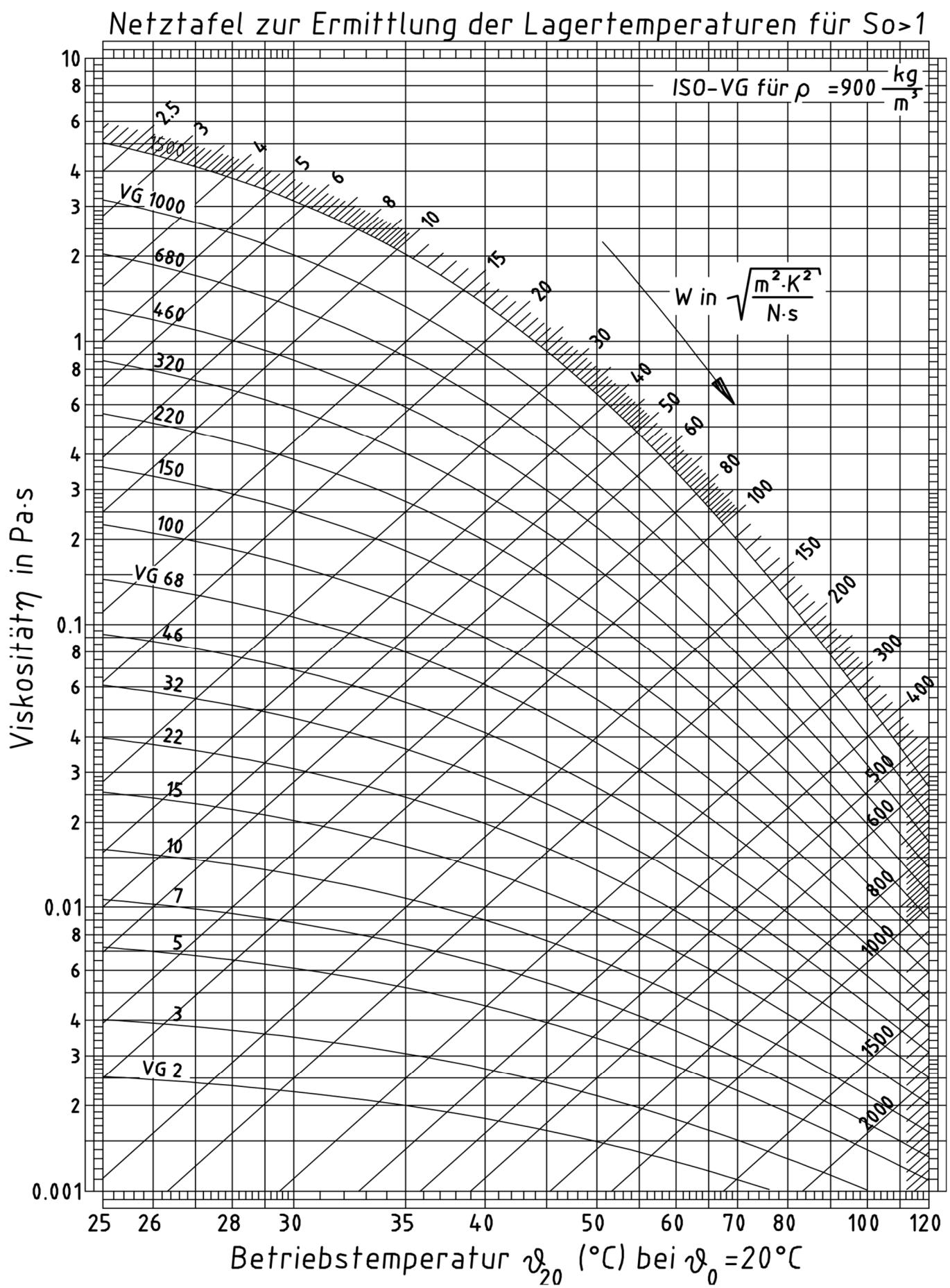


Bild 5.1: Netztafel für den Bereich $So > 1$

Hilfsblatt 2 zu Aufgabe 5

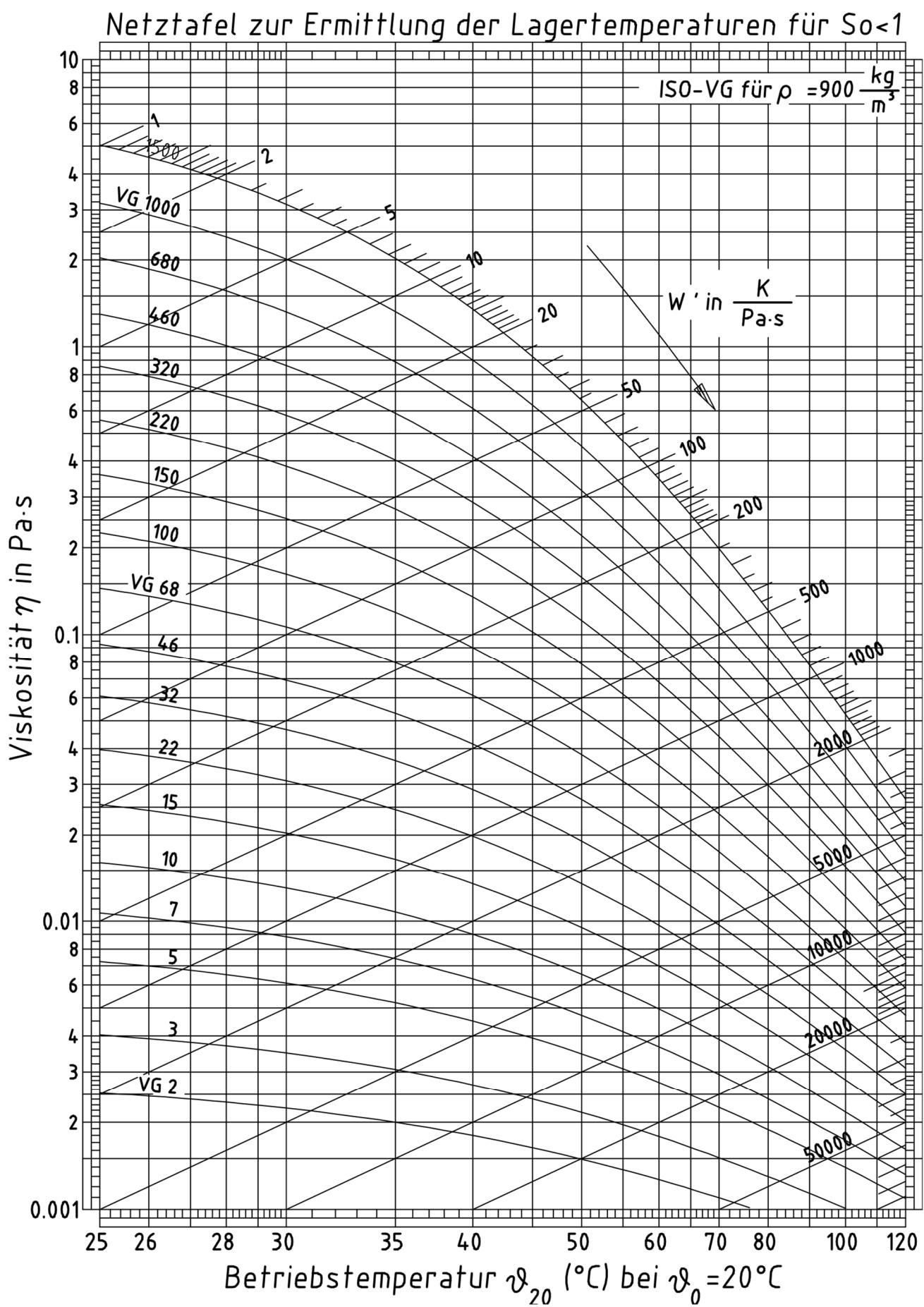


Bild 5.2: Netztafel für den Bereich $S_0 < 1$

Lösung zur Aufgabe 5

5.1 Name Viskosimeter

Σ 2 P

Das dargestellte Viskosimeter ist ein **UBBELOHDE-Viskosimeter**.

1 P

Die genutzte physikalische Messgröße ist die **Zeit**.

1 P

5.2 Bedingung für hydrodynamischen Druckaufbau

Σ 1 P

Ja, es ist lediglich eine Relativbewegung zwischen äußerer Last und Schmierstoffströmung erforderlich.

1 P

5.3 Werkstoff mit guten Einbettungseigenschaften

Σ 1 P

Es ist **eine** der folgenden Antworten zu nennen:

1 P

- Weißmetall
- PbSb10Sn6
- PbSb15SnAs
- SnSb8Cu4

5.4 Änderung des Kühlölvolumenstroms

Σ 1,5 P

$$f \cdot F \cdot u = Q_K \cdot k \cdot (\vartheta_a - \vartheta_e)$$

$$f = \frac{3 \cdot \psi}{So}$$

$$So = \frac{\bar{p} \cdot \psi^2}{\eta \cdot \omega}$$

$$f = \frac{3 \cdot \psi \cdot \eta \cdot \omega}{\bar{p} \cdot \psi^2} = \frac{3 \cdot \eta \cdot \omega}{\bar{p} \cdot \psi}$$

$$\frac{Q_{K,nachher}}{Q_{K,vorher}} \frac{f_{nachher}}{f_{vorher}} = \frac{\psi_{vorher}}{\psi_{nachher}} = 2$$

Der Kühlölvolumenstrom muss um den Faktor **2** gesteigert werden.

1,5 P

5.5 Spezifische Lagerbelastung, bei der eine hydrostatische Anhebung gegebenenfalls vorgesehen werden muss.

Σ 1 P

Wenn die spezifische Lagerbelastung beim Anfahren $\bar{p} > 2,5 \text{ bis } 3 \text{ N/mm}^2$ ist, muss gegebenenfalls eine hydrostatische Anhebung vorgesehen werden.

1 P

5.6 Faktor, um die sich die Übergangsrehzahl erhöht

Σ 1,5 P

$$n_{ü} = \frac{10^{-8} \cdot F}{6 \cdot C_{ü} \cdot \eta \cdot V}$$

$$\eta_{40^\circ C} = 0,09 \text{ Pas}$$

$$\eta_{60^\circ C} = 0,05 \text{ Pas}$$

$$\frac{n_{ü,60^\circ C}}{n_{ü,40^\circ C}} = \frac{\eta_{40^\circ C}}{\eta_{60^\circ C}} = \frac{0,09 \text{ Pas}}{0,05 \text{ Pas}} = 1,8$$

Die Übergangsrehzahl erhöht sich um den Faktor **1,8**

1,5 P

Konstruktionsaufgabe (24 Punkte)

K.1 Bearbeiten Sie als Hilfestellung zu Aufgabenteil K.2 zunächst Tabelle 1 zur Konstruktionsaufgabe auf dem folgenden Blatt. (6 Punkte)

K.2 Setzen Sie auf dem Hilfsblatt 1 zur Konstruktionsaufgabe ein funktionierendes und montierbares Verteilergetriebe aus den im Elementkatalog vorgegebenen Maschinenelementen zusammen. Ein Verteilergetriebe verteilt das Antriebsmoment auf zwei Abtriebswellen. (18 Punkte)

Beachten Sie folgende Aufgabenstellung:

Gestalten Sie die Lagerungen, die Verzahnungen, die Welle-Nabe-Verbindungen (WNV) und die Abdichtungen des Verteilergetriebes. Das gefräste Gehäuse des Verteilergetriebes ist in der Zeichenebene geteilt.

Teil der Aufgabe ist die Darstellung des gesamten in Abbildung 1 gezeigten Bereichs.

Lagerung:

- Zur exakten Positionierung des Kegelrads auf der Zwischenwelle ist eine spielfreie axiale Führung notwendig. Auf die Zwischenwelle wirken aufgrund der Verzahnung hohe Lasten. Die Zwischenwelle dreht mit niedriger Drehzahl.
- Die Lagerung der Abtriebswelle 1 muss die geringen Lasten der gradverzahnten Stirnräder aufnehmen, zusätzlich sollen die Abtriebswellen jedoch unempfindlich gegenüber Ausdehnung der Welle sein. Die auftretenden Lagerkräfte sollen durch die Lageranordnung geringgehalten werden. Die Abtriebswellen drehen mit hoher Drehzahl.

Welle-Nabe-Verbindung (WNV):

- Die Verzahnung des Kegelrads auf der Zwischenwelle ist aus dem Vollen gefräst.
- Die WNV des Zahnrad 1 mit der Zwischenwelle erfolgt mittels einer günstig zu fertigenden formschlüssigen WNV.
- Die formschlüssige WNV des Zahnrad 1 mit der Abtriebswelle 1 soll das zu übertragende Drehmoment gleichmäßig auf den Umfang der Abtriebswelle 1 verteilen.

Abdichtung:

- Dichten Sie die Abtriebswelle 2 vollständig gegen den Austritt von Fett ab. Abtriebswelle 1 ist zu Wartungszwecken nicht erreichbar, nutzen Sie deshalb eine wartungsfreie Dichtung. Verwenden Sie nicht mehr Dichtungen als unbedingt erforderlich.

Verzahnung:

- Alle Verzahnungen sind gradverzahnt und normgerecht im Schnitt darzustellen.

Gehäuse:

- Stellen Sie sicher, dass beide Gehäuseteile eindeutig zueinander positioniert und montiert werden können.
- Zur Abdichtung zwischen den Gehäuseteilen wird eine Papierdichtung verwendet, die nicht in der Zeichnung darzustellen ist.

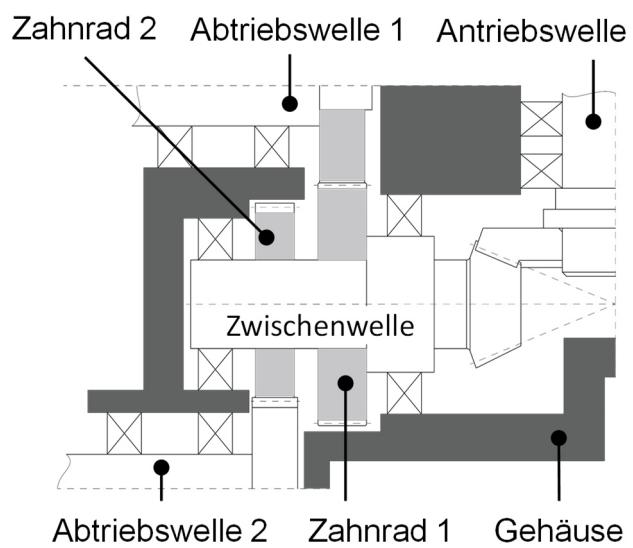


Abbildung 1: Prinzipskizze Verteilergetriebe

Tabelle 1 zur Konstruktionsaufgabe

K.1 Fragen zur Konstruktion (6 Punkte)

Lagerung Zwischenwelle

K.1.1	Welche Kontaktart zwischen Wälzkörper und Lagerring eignet sich für geringe Drehzahlen, wenn gleichzeitig hohe Lasten übertragen werden sollen?
K.1.2	Wie müssen sich die Durchmesser der Wellenabsätze in Richtung des freien Wellenendes verändern, damit Lager und Dichtung montierbar sind?

Lagerung Abtriebswellen

K.1.3	Nennen Sie eine Lageranordnung, die unempfindlich gegenüber Ausdehnungen der Welle ist.
K.1.4	Wie muss der Abstand zwischen zwei Lagern qualitativ gewählt werden, wenn die Krafteinleitung außerhalb der Lagerung stattfindet?
K.1.5	Welcher Lagerring erfährt Umfangslast, wenn die Hauptbelastung durch eine Verzahnung hervorgerufen wird?
K.1.6	Wie sind Lagerringe zu passen, wenn diese Umfangslast erfahren?

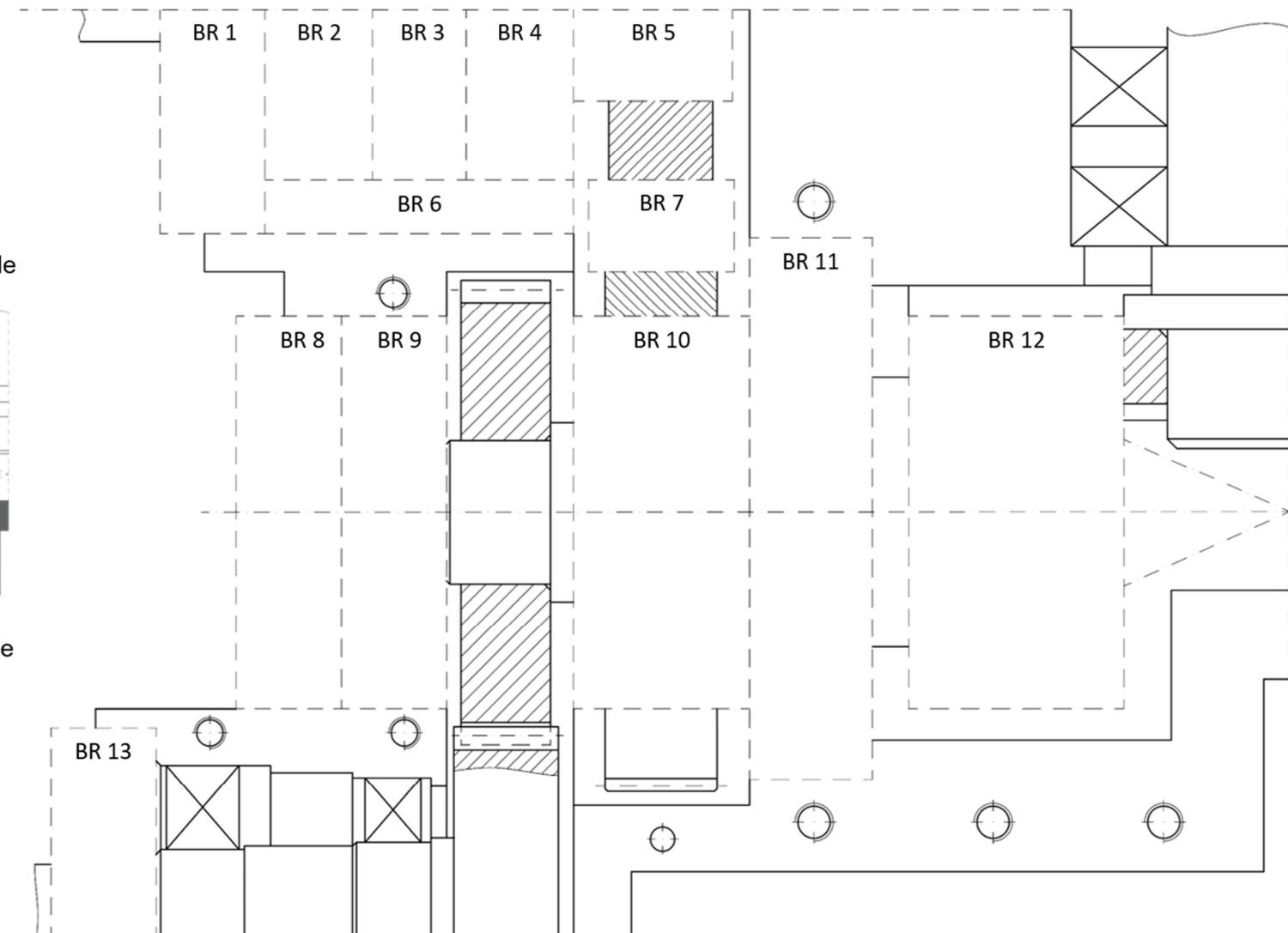
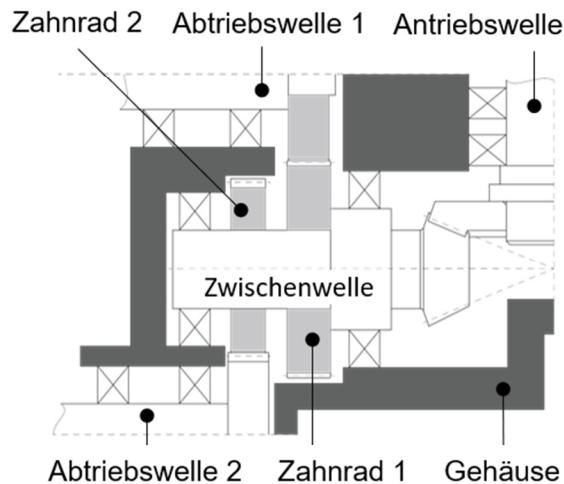
Dichtung

K.1.7	Wie viel Grad sollte der Winkel einer Fase, über den eine Dichtung montiert wird, mindestens haben?
K.1.8	Welche Dichtungsart eignet sich zur Abdichtung von relativ zueinander unbewegten Gehäuseteilen?
K.1.9	Nennen Sie eine wartungsfreie dynamische Dichtung.

Allgemeines

K.1.10	Wie viele radiale Wirkflächenpaare sollte es pro Bauteilpaar jeweils geben?
K.1.11	Nennen Sie neben den formschlüssigen Welle-Nabe-Verbindungen eine weitere Verbindungsart.
K.1.12	Wie werden zwei Gehäusehälften eindeutig zueinander positioniert?

Hilfsblatt 1 zur Konstruktionsaufgabe



Musterlösung zur Konstruktionsaufgabe

K.1 Fragen zur Konstruktion (6 Punkte)

Lagerung Zwischenwelle

K.1.1	Welche Kontaktart zwischen Wälzkörper und Lagerring eignet sich für geringe Drehzahlen, wenn gleichzeitig hohe Lasten übertragen werden sollen? (Linienkontakt)
K.1.2	Wie müssen sich die Durchmesser der Wellenabsätze in Richtung des freien Wellenendes verändern, damit Lager und Dichtung montierbar sind? (kleiner werden)

Lagerung Abtriebswellen

K.1.3	Nennen Sie eine Lageranordnung die unempfindlich gegenüber Ausdehnungen der Welle ist (Fest-/Loslagerung, schwimmenden Lagerung)
K.1.4	Wie muss der Abstand zwischen zwei Lagern gewählt werden, wenn die Krafteinleitung außerhalb der Lager stattfindet? (weit, groß)
K.1.5	Welcher Lagerring erfährt Umfangslast, wenn die Hauptbelastung durch eine Verzahnung hervorgerufen wird? (Innenring)
K.1.6	Wie sind Lagerringe zu passen, wenn diese Umfangslast erfahren? (fest)

Dichtung

K.1.7	Wie viel Grad sollte der Winkel einer Fase, über den eine Dichtung montiert wird, mindestens haben? (15)
K.1.8	Welche Dichtungsart eignet sich zur Abdichtung von relativ zueinander unbewegten Gehäuseteilen? (statische Dichtung)
K.1.9	Nennen Sie eine wartungsfreie dynamische Dichtung. (Labyrinthdichtung, Spaltdichtung)

Allgemeines

K.1.10	Wie viele radiale Wirkflächenpaare sollte es pro Bauteilpaar jeweils geben? (eine)
K.1.11	Nennen Sie neben den formschlüssigen Welle-Nabe-Verbindungen eine weitere Verbindungsart. (kraftschlüssig, stoffschlüssig)
K.1.12	Wie werden zwei Gehäusehälften eindeutig zueinander positioniert? (Passstifte, Zentrierung)

	Bauraum	Element	Variante	Maß
Zwischenwelle				
Lager 1	11	4	10	500
Lager 2	9	4	9	300
Abdichtung	8	1	9	-
WNV	10	6	3	400
Abtriebswelle 1				
Lager 1	4	3	11	500
Lager 2	2	3	1	400
Abdichtung	1	1	3	300
WNV	5	6	2	-
Abtriebswelle 2				
Abdichtung	13	1	5	-
Verzahnung				
Stirnradstufe	7	7	1	-
Kegelradstufe	12	7	6	-
Gehäuse				
Verschraubung	6	5	2	-

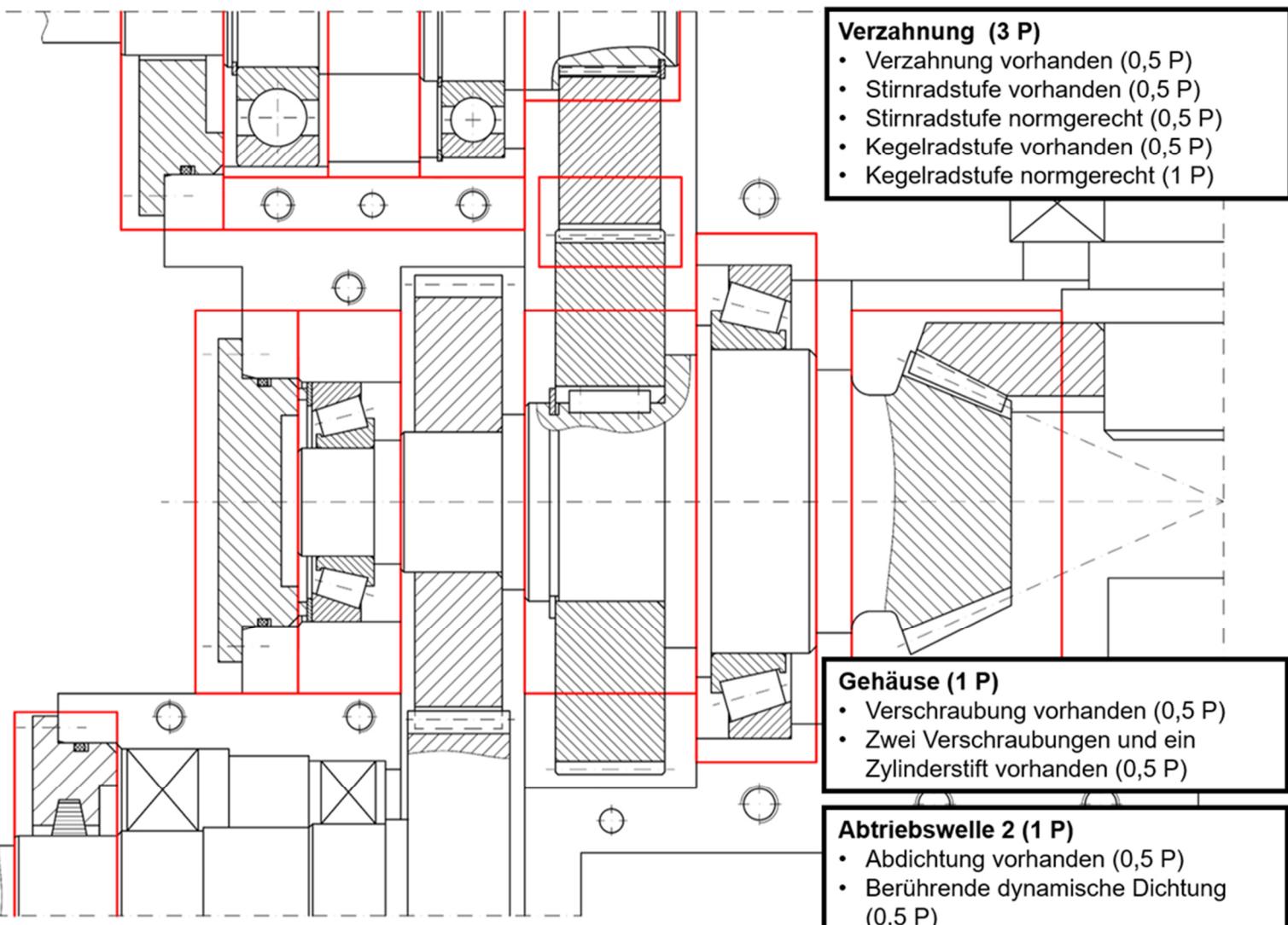
Musterlösung zur Konstruktionsaufgabe

Abtriebswelle 1 (6,5 P)

- Lager vorhanden (0,5 P)
- Punktkontakt (0,5 P)
- Lager für Fest-/Loslagerung (0,5 P)
- Fest-/Loslagerung (0,5 P)
- Spiegelung der Lager korrekt (0,5 P)
- Abstand zwischen Lagern (0,5 P)
- Abdichtung vorhanden (0,5 P)
- Abdichtungen Spiegelung korrekt (0,5 P)
- Nichtberührende dynamische Dichtung (0,5 P)
- WNV vorhanden (0,5 P)
- WNV Spiegelung korrekt (0,5 P)
- WNV korrekt (0,5 P)
- Maße korrekt (0,5 P)

Zwischenwelle (6,5 P)

- Lager vorhanden (0,5 P)
- Linienkontakt (0,5 P)
- Lager für angestellte Lagerung (0,5 P)
- X-Anordnung (0,5 P)
- Spiegelung der Lager korrekt (0,5 P)
- Abdichtung vorhanden (0,5 P)
- Abdichtungen fräsgerecht (1 P)
- Statische Dichtung (0,5 P)
- WNV vorhanden (0,5 P)
- WNV Spiegelung korrekt (0,5 P)
- WNV korrekt (0,5 P)
- Maße korrekt (0,5 P)



Verzahnung (3 P)

- Verzahnung vorhanden (0,5 P)
- Stirnradstufe vorhanden (0,5 P)
- Stirnradstufe normgerecht (0,5 P)
- Kegelradstufe vorhanden (0,5 P)
- Kegelradstufe normgerecht (1 P)

Gehäuse (1 P)

- Verschraubung vorhanden (0,5 P)
- Zwei Verschraubungen und ein Zylinderstift vorhanden (0,5 P)

Abtriebswelle 2 (1 P)

- Abdichtung vorhanden (0,5 P)
- Berührende dynamische Dichtung (0,5 P)

Bauraum	Element	Variante	Maß
Zwischenwelle			
Lager 1	Lager vorhanden (0,5 P)	Linienkontakt (0,5 P) Lager für angestellte Lagerung (0,5 P)	
Lager 2	Spiegelung Lager Korrekt (0,5 P)	X-Anordnung (0,5 P)	
Abdichtung 1	Abdichtung vorhanden (0,5 P)	Statische Dichtung (0,5 P) Abdichtungen fräsgerecht (1 P)	
WNV	WNV vorhanden (0,5 P)	WNV Spiegelung korrekt (0,5 P) WNV korrekt (0,5 P)	Maße korrekt (0,5 P)
Abtriebswelle 1			
Lager 1	Lager vorhanden (0,5 P)	Punktkontakt (0,5 P) Lager für Fest-/Loslagerung Lagerung (0,5 P)	
Lager 2	Spiegelung Lager Korrekt (0,5 P) Abstand zwischen Lagern (0,5 P)	Fest-/Loslagerung (0,5 P)	
Abdichtung	Abdichtung vorhanden (0,5 P)	Nichtberührende dynamische Dichtung (0,5 P) Abdichtungen Spiegelung korrekt (0,5 P)	Maße korrekt (0,5 P)
WNV	WNV vorhanden (0,5 P)	WNV Spiegelung korrekt (0,5 P) WNV korrekt (0,5 P)	
Abtriebswelle 2			
Abdichtung	Abdichtung vorhanden (0,5 P)	Berührende dynamische Dichtung (0,5 P)	
Verzahnung			
Stirnradstufe	Verzahnung vorhanden (0,5 P) Stirnradstufe vorhanden (0,5 P)	Stirnradstufe gradverzahnt und normgerecht (0,5 P)	
Kegelradstufe	Kegelradstufe vorhanden (0,5 P)	Kegelradstufe normgerecht (1 P)	
Gehäuse			
Ver-schraubung	Verschraubung vorhanden (0,5 P)	Zwei Verschraubungen und ein Zylinderstift (0,5 P)	

Zwischenwelle

Σ 6,5 P

Lager vorhanden

Wenn für Lager 1 und Lager 2 in der Spalte Element jeweils ein Lager (E3,4) ausgewählt ist, dann gibt es 0,5 Punkte in der Zeile Lager 1, Spalte Element.

0,5 P

Linienkontakt

Wenn für Lager 1 und Lager 2 in der Spalte Variante jeweils ein Lager mit Punktkontakt (E3; V4,9,10,12 & E4; V4,9,10,12) ausgewählt ist, dann gibt es 0,5 Punkte in der Zeile Lager 1, Spalte Variante.

0,5 P

Lager für angestellte Lagerung

Wenn für Lager 1 und Lager 2 in der Spalte Variante jeweils Lager ausgewählt sind, die sich für eine angestellte Lagerung eignen (E3; V3,5–10,12 & E4; V3,5–10, 12), dann gibt es 0,5 Punkte in der Zeile Lager 1, Spalte Variante.

0,5 P

X-Anordnung

Wenn für Lager 1 und Lager 2 in der Spalte Variante jeweils ein Lager ausgewählt ist, dass sich für eine angestellte Lagerung eignet und das linke Lager Axialkräfte von links oben nach rechts unten (E3; V3,5,6,8,10 & E4; V7,9,12) und das rechte Lager Axialkräfte von rechts oben nach links unten (E3; V7,9,12 & E4; V3,5,6,8,10) überträgt, dann gibt es 0,5 Punkte in der Zeile Lager 2, Spalte Variante.

0,5 P

Spiegelung Lager Korrekt

Wenn für Lager 1 und Lager 2 in der Spalte Element Lager ausgewählt sind (E3,4) und das linke Lager von links montiert werden kann (E3) und das rechte Lager von rechts montiert werden kann (E4), dann gibt es Punkte in der Zeile Lager 2, Spalte Element.

0,5 P

Abdichtung vorhanden

Wenn für die Abdichtung in der Spalte Element eine Abdichtung (E1,2) ausgewählt ist, dann gibt es 0,5 Punkte in der Zeile Abdichtung, Spalte Element.

0,5 P

Statische Dichtung

Wenn für die Abdichtung in der Spalte Variante eine statische Dichtung (E1; V9 & E2; V9) ausgewählt ist, dann gibt es 0,5 Punkte in der Zeile Abdichtung, Spalte Variante.

0,5 P

Abdichtungen fräsgerecht

Wenn für die Abdichtungen in der Spalte Variante Dichtungen ausgewählt sind, die für am Gehäuse anliegen (E1; V1,3,5,8,9 & E2; V1,3,5,8,9), dann gibt es 0,5 Punkte in der Zeile Abdichtung, Spalte Variante.

1 P

WNV vorhanden

Wenn für WNV in der Spalte Element eine WNV (E6) ausgewählt ist, dann gibt es 0,5 Punkte in der Zeile WNV, Spalte Element.

0,5 P

WNV Spiegelung korrekt

Wenn für WNV in der Spalte Variante eine WNV ausgewählt ist die von links montiert werden kann, dann gibt es Punkte in der Zeile WNV, Spalte Variante.

0,5 P

WNV korrekt

Wenn für WNV in der Spalte Variante eine Passfederverbindung ausgewählt, dann gibt es Punkte in der Zeile WNV, Spalte Variante.

0,5 P

Maße korrekt

Wenn für Lager 1, Lager 2 und WNV Maße ausgewählt sind und die Maße in der Reihenfolge Abdichtung, Lager, WNV, Lager kleiner werden, dann gibt es Punkte in der Zeile WNV, Spalte Maß.

Abtriebswelle 1

Σ 6,5 P

Lager vorhanden

Wenn für Lager 1 und Lager 2 in der Spalte Element jeweils ein Lager (E3,4) ausgewählt ist, dann gibt es 0,5 Punkte in der Zeile Lager 1, Spalte Element.

0,5 P

Punktkontakt

Wenn für Lager 1 und Lager 2 in der Spalte Variante jeweils ein Lager mit Punktkontakt (E3; V1-3,5-8,11 & E4; V1-3,5-8,11) ausgewählt ist, dann gibt es 0,5 Punkte in der Zeile Lager 1, Spalte Variante.

0,5 P

Lager für Fest-/Loslagerung

Wenn für Lager 1 und Lager 2 in der Spalte Variante jeweils Lager ausgewählt sind, die sich für eine Fest-/Loslagerung eignen (E3; V1,2,11 & E4; V1,2,11), dann gibt es 0,5 Punkte in der Zeile Lager 1, Spalte Variante.

0,5 P

Fest-/Loslagerung

Wenn für Lager 1 und Lager 2 in der Spalte Variante jeweils ein Lager ausgewählt ist, dass sich für eine Fest-/Loslagerung eignet und das linke Lager ausschließlich Radialkräfte (E3; V1,2 & E4; V1,2) und das rechte Lager Radial- und Axialkräfte (E3; V11 & E4; V11) überträgt, dann gibt es 0,5 Punkte in der Zeile Lager 2, Spalte Variante.

0,5 P

Spiegelung Lager Korrekt

Wenn für Lager 1 und Lager 2 in der Spalte Element Lager ausgewählt sind (E3,4) und das linke Lager von links montiert werden kann (E3) und das rechte Lager von rechts montiert werden kann (E4), dann gibt es Punkte in der Zeile Lager 2, Spalte Element.

0,5 P

Abstand zwischen Lagern vorhanden

Wenn zwischen den Bauräumen für Lager 1 und Lager 2 ein freier Bauraum vorhanden ist, dann gibt es 0,5 Punkte in der Zeile Lager, Spalte Element.

0,5 P

Abdichtung vorhanden

Wenn für die Abdichtung in der Spalte Element eine Abdichtung (E1,2) ausgewählt ist, dann gibt es 0,5 Punkte in der Zeile Abdichtung, Spalte Element.

0,5 P

Nichtberührenden dynamische Dichtung

Wenn für die Abdichtung in der Spalte Variante eine nichtberührende dynamische Dichtung (E1; V1-4 & E2; V1-4) ausgewählt ist, dann gibt es 0,5 Punkte in der Zeile Abdichtung, Spalte Variante.

0,5 P

Abdichtungen Spiegelung korrekt

Wenn für die Abdichtungen in der Spalte Variante Dichtungen ausgewählt sind, die von links montiert werden können (E1), dann gibt es 0,5 Punkte in der Zeile Abdichtung, Spalte Variante.

0,5 P

WNV vorhanden

Wenn für WNV in der Spalte Element eine WNV (E6) ausgewählt ist, dann gibt es 0,5 Punkte in der Zeile WNV, Spalte Element.

0,5 P

WNV Spiegelung korrekt

Wenn für WNV in der Spalte Variante eine WNV ausgewählt ist die von rechts montiert werden kann, dann gibt es Punkte in der Zeile WNV, Spalte Variante.

0,5 P

WNV korrekt

Wenn für WNV in der Spalte Variante eine Keilwellenverbindung ausgewählt, dann gibt es Punkte in der Zeile WNV, Spalte Variante.

0,5 P

Maße korrekt

Wenn für Lager 1, Lager 2 und Abdichtung Maße ausgewählt sind und die Maße in der Reihenfolge Abdichtung, Lager, Lager, Abdichtung kleiner werden, dann gibt es Punkte in der Zeile Abdichtung, Spalte Maß.

0,5 P

Abtriebswelle 2

Σ 1 P

Abdichtung vorhanden

Wenn für die Abdichtung in der Spalte Element eine Abdichtung (E1,2) ausgewählt ist, dann gibt es 0,5 Punkte in der Zeile Abdichtung, Spalte Element.

0,5 P

Berührenden dynamische Dichtung

Wenn für die Abdichtung in der Spalte Variante eine Berührende dynamische Dichtung (E1; V5-8 & E2; V5-8) ausgewählt ist, dann gibt es 0,5 Punkte in der Zeile Abdichtung, Spalte Variante.

0,5 P

Verzahnung

Σ 3 P

Verzahnung vorhanden

Wenn für die Stirnradstufe und die Kegelradstufe in der Spalte Element eine Verzahnung (E7) ausgewählt ist, dann gibt es 0,5 Punkte in der Zeile Stirnradstufe, Spalte Element.

0,5 P

Stirnradstufe vorhanden

Wenn für die Stirnradstufe in der Spalte Element eine Stirnradstufe (E7; V1,3,5) ausgewählt ist, dann gibt es 0,5 Punkte in der Zeile Stirnradstufe, Spalte Element.

0,5 P

Stirnradstufe gradverzahnt und normgerecht

Wenn für die Stirnradstufe in der Spalte Element eine gradverzahnte und normgerecht dargestellte Stirnradstufe (E7; V1) ausgewählt ist, dann gibt es 0,5 Punkte in der Zeile Stirnradstufe, Spalte Variante.

0,5 P

Kegelradstufe vorhanden

Wenn für die Stirnradstufe in der Spalte Element eine Kegelradstufe (E7; V2,4,6) ausgewählt ist, dann gibt es 0,5 Punkte in der Zeile Kegelradstufe, Spalte Element.

0,5 P

Kegelradstufe normgerecht

Wenn für die Stirnradstufe in der Spalte Element eine normgerecht dargestellte Kegelradstufe (E7; V6) ausgewählt ist, dann gibt es 0,5 Punkte in der Zeile Stirnradstufe, Spalte Variante.

1 P

Gehäuse

Σ 1 P

Verschraubung vorhanden

Wenn für die Verschraubung in der Spalte Element eine Verschraubung (E5) ausgewählt ist, dann gibt es 0,5 Punkte in der Zeile Verschraubung, Spalte Element.

0,5 P

Zwei Schrauben und ein Zylinderstift

Wenn für die Verschraubung in der Spalte Variante eine Variante mit zwei Verschraubungen und einem Zylinderstift (E5; V2-8) ausgewählt ist, dann gibt es 0,5 Punkte in der Zeile Verschraubung, Spalte Variante.

0,5 P

