

# Musterlösung

## zur Einsicht am 04.09.2023

Vorläufige Ergebnisse der Prüfung **MASCHINENGESTALTUNG III**  
vom 29.07.2023

für die Studiengänge **Maschinenbau, Wirtschaftsingenieurwesen FR Maschinenbau**  
sowie **Masterstudiengänge**

Punktegrenzen	Note
ab 101,5 Punkten	1,0*
ab 95,0 Punkten	1,3*
ab 90,0 Punkten	1,7
ab 84,0 Punkten	2,0
ab 78,0 Punkten	2,3
ab 72,0 Punkten	2,7
ab 67,0 Punkten	3,0
ab 61,0 Punkten	3,3
ab 55,0 Punkten	3,7
ab 50,0 Punkten	4,0
ab 0 Punkten oder bei NE	5,0

Maximalpunktzahl: 120 Punkte

(\*) Bei Interesse an einer HiWi-Tätigkeit oder an Bachelor-/Projektarbeiten bitte melden bei:  
J. Müller, M.Sc. – 0241/80 95609 – julius.mueller@imse.rwth-aachen.de

## Aufgabe 1 (22 Punkte)

Sie untersuchen den Antrieb einer Rolltreppe. Der Antrieb besteht aus einem Elektromotor und einem Getriebe. Als Getriebe wird ein dreistufiges Planetengetriebe eingesetzt, das die Treppenstufen und den Handlauf jeweils über ein Reibrad antreibt. Der Handlauf kann zur Wartung der Rolltreppe über die Bremse B1 festgehalten werden.

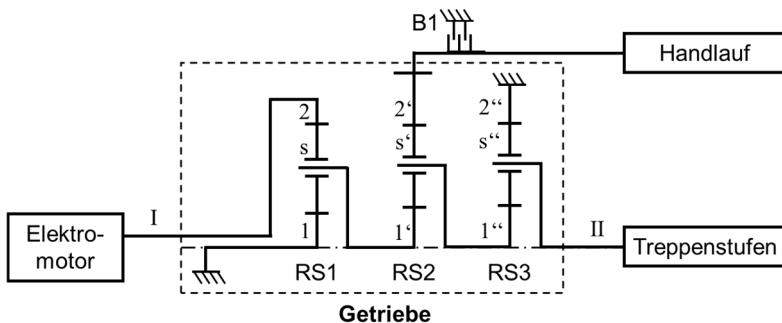


Abbildung 1.1: Schematischer Aufbau des Antriebs

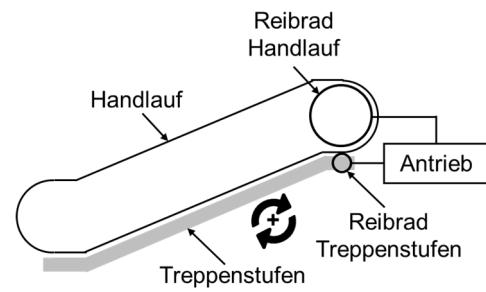


Abbildung 1.2: Schemazeichnung der Rolltreppe

Standüber-  
setzung RS1

$$i_{12} = -4,2$$

Durchmesser  
Reibrad  
Treppenstufen

Standübersetzung  
RS3

$$i_{1''2''} = -3,9$$

Durchmesser Reibrad  
Handlauf

$$d_{R,H} = 0,9 \text{ m}$$

### Betrieb ohne Handlauf

Sonnendrehzahl  $n_{1'} = 450 \text{ min}^{-1}$

Maximales  
Lastmoment am  
Abtrieb

### Betrieb mit Handlauf

Stegdrehzahl

$$n_{s',H} = 94 \text{ min}^{-1}$$

Drehmoment  
Elektromotor

$$M_{EM,H} = 300 \text{ Nm}$$

### Hinweise:

- Vernachlässigen Sie alle Verluste.
- Nehmen Sie an, dass sich zwischen Getriebe und Treppenstufen sowie zwischen Getriebe und Handlauf keine zusätzliche Übersetzung befindet.
- Eine positive Drehrichtung am Abtrieb II entspricht einer Fahrt nach oben.

1.1 In welche beiden Leistungen wird die übertragene Leistung bei einem Planetengetriebe üblicherweise gegliedert? (1 Punkt)

1.2 Welche Getriebebauform könnte aufgrund ihrer Eigenschaft der Selbsthemmung anstelle eines Planetengetriebes für einen Rolltreppenantrieb verwendet werden? (1 Punkt)

1.3 Beschriften Sie das Getriebeschema nach WOLF für den ersten Radsatz (1,5 Punkte)	
1.3.1	Ordnen Sie der mit 1.3.1 markierten Welle die zugehörige Bezeichnung (1, 2, s) zu.
1.3.2	Ordnen Sie der mit 1.3.2 markierten Welle die zugehörige Bezeichnung (1, 2, s) zu.
1.3.3	Ordnen Sie der mit 1.3.3 markierten Welle die zugehörige Bezeichnung (1, 2, s) zu.

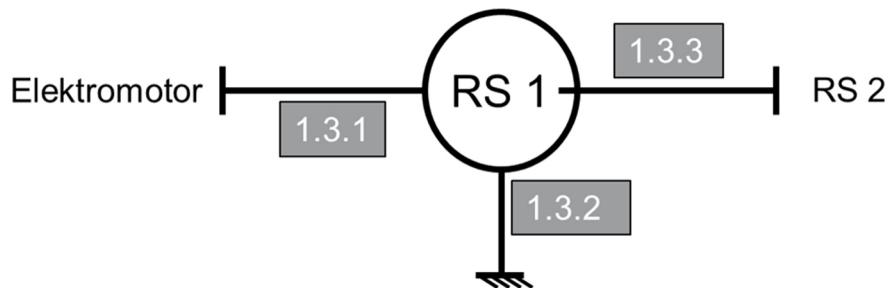


Abbildung 1.3: Getriebeschema nach Wolf

Zunächst wird der Handlauf der Rolltreppe über die Bremse B1 festgehalten.

1.4 Untersuchen Sie die Drehzahlverhältnisse des zweiten und dritten Radsatzes mit Hilfe der in Abbildung 1.4 dargestellten Geschwindigkeitspläne nach KUTZBACH. (4 Punkte)	
1.4.1	Ermitteln Sie die Übersetzung $i_{1's}$ zwischen Eingang und Ausgang der beiden Radsätze.
1.4.2	Mit welcher Geschwindigkeit $v_{\text{Rolltreppe}}$ in m/s bewegt sich die Rolltreppe?
1.4.3	Ermitteln Sie die Standübersetzung $i_{1'2'}$ des zweiten Radsatzes. Runden Sie auf eine Nachkommastelle.

Falls Sie Aufgabenteil 1.4 nicht lösen konnten, rechnen Sie mit  $i_{1'2'} = -4,3$  und  $v_{\text{Rolltreppe}} = 0,7 \text{ m/s}$  weiter.

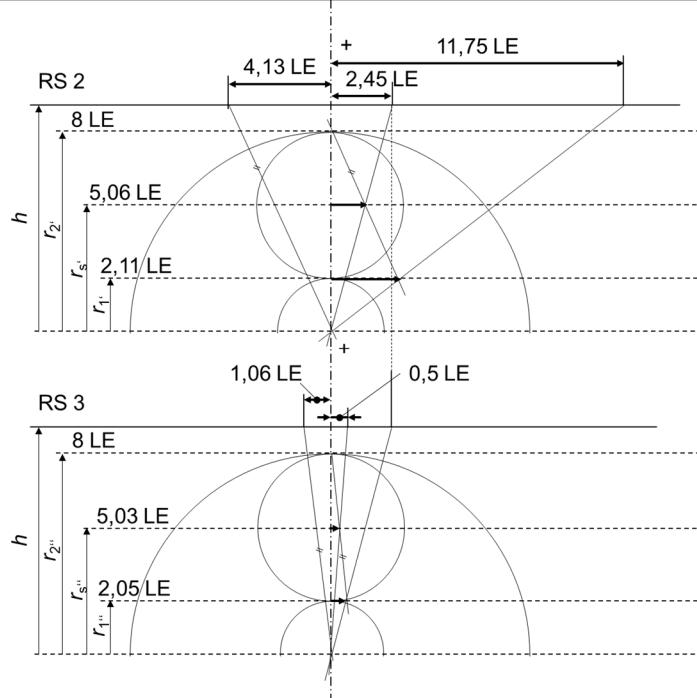


Abbildung 1.4: Geschwindigkeitsplan nach KUTZBACH

1.5 Untersuchen Sie den Antrieb der Treppenstufen ohne Handlauf. (5 Punkte)	
1.5.1	Berechnen Sie die Drehzahl $n_{EM}$ des Elektromotors in $\text{min}^{-1}$ .
1.5.2	Berechnen Sie die Gesamtübersetzung $i_{I,II}$ des Getriebes.
1.5.3	Wie viel Drehmoment $M_{EM}$ in Nm muss der Elektromotor bei maximaler Last aufbringen? Zusätzlich zum Lastmoment bringt der Elektromotor ein Leerlaufmoment von 50 Nm auf.
1.5.4	Welche Leistung $P_{EM,max}$ in kW muss der Elektromotor bei konstanter Geschwindigkeit und maximaler Auslastung aufbringen?

Die Bremse B1 wird gelöst, sodass sich nun auch der Handlauf bewegt. Aus Komfortgründen soll der Handlauf die gleiche Geschwindigkeit haben wie die Treppenstufen. Die Treppenstufen haben die gleiche Geschwindigkeit wie beim Betrieb ohne Handlauf.

1.6 Untersuchen Sie den Betrieb der Rolltreppe mit Handlauf. (6,5 Punkte)	
1.6.1	Berechnen Sie das Abtriebsmoment $M_{2',H}$ in Nm.
1.6.2	Berechnen Sie die Drehzahl $n_{2',H}$ des Handlaufs in $\text{min}^{-1}$ . Beachten Sie, dass die Ausgangsdrehzahl des Handlaufs aufgrund des Aufbaus des Getriebes negativ ist und der Handlauf die gleiche Geschwindigkeit wie die Treppenstufen aufweist.
1.6.3	Berechnen Sie die Drehzahl $n_{1',H}$ in $\text{min}^{-1}$ .
1.6.4	Wie viel Prozent der Antriebsleistung des Elektromotors werden in diesem Betriebspunkt für den Handlauf benötigt?

1.7 Nennen Sie eine Getriebebauform mit kraftschlüssig mechanischem Wirkprinzip.  
*(1 Punkt)*

1.8 Welcher der beiden Leistungsanteile bei hydrostatisch-mechanischen Leistungsverzweigungsgetrieben muss hoch sein, damit ein hoher Wirkungsgrad erreicht wird? *(1 Punkt)*

1.9 Welches Verhältnis weisen die Abtriebsmomente in einem Achsdifferential ohne Verluste bei einer Kurvenfahrt auf? *(1 Punkt)*

## Lösung zur Aufgabe 1

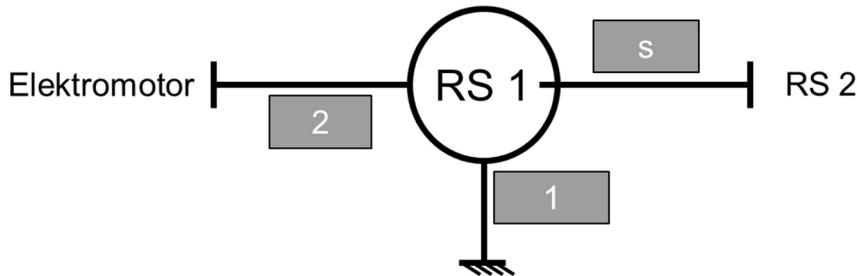
<b>1.1 Leistungsaufteilung</b>	<b>Σ 1 P</b>
Wälzleistung, Kupplungsleistung	1 P

<b>1.2 Getriebebauform</b>	<b>Σ 1 P</b>
Schneckengetriebe	1 P

<b>1.3 Getriebeschema nach WOLF</b>	<b>Σ 1,5 P</b>
Der Elektromotor ist mit dem Hohlrad verbunden: 2	0,5 P

Das Gehäuse ist mit der Sonne verbunden: 1 0,5 P

Der zweite Radsatz ist mit dem Steg verbunden: s 0,5 P



<b>1.4 Geschwindigkeitsplan nach KUTZBACH</b>	<b>Σ 4 P</b>
---	--------------

$$i_{1's''} = \frac{n_{1'}}{n_{s''}} = \frac{11,75 \text{ LE}}{0,5 \text{ LE}} = 23,5 \quad 1,5 \text{ P}$$

$$\nu_{\text{Rolltreppe}} = n_{s''} \cdot 2\pi \cdot \frac{d_{R,T}}{2} = 0,501 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad 1,5 \text{ P}$$

$$\text{Mit } n_{s''} = \frac{n_{1'}}{i_{1's''}} = \frac{450 \text{ min}^{-1}}{11,75 \text{ LE}} \cdot 0,5 \text{ LE} = 19,149 \text{ min}^{-1} = 0,319 \text{ s}^{-1}$$

Alternativlösung

$$\text{Mit } n_{s''} = \frac{n_{1'}}{i_{1's''}} = \frac{450 \text{ min}^{-1}}{23,5} = 19,149 \text{ min}^{-1} = 0,319 \text{ s}^{-1}$$

$$i_{1'2'} = \frac{r_{2'}}{r_{1'}} = \frac{-8 \text{ LE}}{2,11 \text{ LE}} = -3,791 = -3,8 \quad 1 \text{ P}$$

<b>1.5 Betrieb ohne Handlauf</b>	<b>Σ 5 P</b>
----------------------------------	--------------

$$n_{EM} = n_s \cdot i_{2s} = 450 \text{ min}^{-1} \cdot \left(1 - \frac{1}{-4,2}\right) = 557,143 \text{ min}^{-1} \quad 1 \text{ P}$$

Mit  $n_s = n_{1'}$

$$i_{I,II} = i_{2s} \cdot i_{1's'} \cdot i_{1''s''} = \left(1 - \frac{1}{i_{12}}\right) \cdot (1 - i_{1'2'}) \cdot (1 - i_{1''2''}) = 29,12 \quad 1,5 \text{ P}$$

$$M_{EM} = -\frac{M_{\text{max},\text{Last}}}{i_{I,II}} + M_{\text{Leerlauf}} = -\frac{-6000 \text{ Nm}}{29,12} + 50 \text{ Nm} = 256,044 \text{ Nm} \quad 1,5 \text{ P}$$

$$P_{EM,\text{max}} = 2\pi \cdot n_{EM} \cdot M_{EM} = 2\pi \cdot 557,143 \text{ min}^{-1} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \cdot 256,044 \text{ Nm} = 14,939 \text{ kW} \quad 1 \text{ P}$$

**1.6 Betrieb mit Handlauf**

**$\Sigma 6,5 P$**

$$M_{2'} = M_{EM,H} \cdot -i_{2s} \cdot (-1) \cdot -i_{1'2'} = M_{EM,H} \cdot \frac{i_{12} - 1}{-i_{12}} \cdot (-1) \cdot -i_{1'2'} = 1411,429 \text{ Nm} \quad 2 P$$

$$n_{2',H} = -\frac{v_{Rollenstufen}}{2\pi \cdot \frac{d_{R,H}}{2}} = -\frac{0,501 \frac{m}{s}}{2\pi \cdot \frac{0,9 m}{2}} \cdot \frac{60 s}{1 min} = -10,632 \text{ min}^{-1} \quad 1 P$$

$$n_{1',H} = i_{1'2'} \cdot n_{2',H} + (1 - i_{1'2'}) \cdot n_{s',H} = 491,602 \text{ min}^{-1} \quad 1,5 P$$

$$p_H = \frac{|P_H|}{|P_{EM,H}|} \cdot 100 \% = \frac{1571,457 W}{19121,304 W} \cdot 100 \% = 8,218 \% \quad 2 P$$

$$\text{Mit } P_H = 2\pi \cdot n_{2',H} \cdot M_{2',H} = 2\pi \cdot (-10,632 \text{ min}^{-1}) \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 s} \cdot 1411,429 \text{ Nm} = \\ -1571,457 W$$

$$P_{EM,H} = 2\pi \cdot n_{EM,H} \cdot M_{EM,H} = 2\pi \cdot 608,650 \text{ min}^{-1} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 s} \cdot 300 \text{ Nm} = 19121,304 W$$

$$n_{EM,H} = n_{1',H} \cdot i_{2s} = 491,602 \text{ min}^{-1} \cdot \left(1 - \frac{1}{-4,2}\right) = 608,650 \text{ min}^{-1}$$

**1.7 Kraftschlüssige mechanische Getriebebauform**

**$\Sigma 1 P$**

Eine Antwort aus: **Kegelring, Reibrad, Riemen**

**1 P**

**1.8 Leistungsanteil für hohen Wirkungsgrad**

**$\Sigma 1 P$**

Der **mechanische** Leistungsanteil muss für einen hohen Wirkungsgrad hoch sein.

**1 P**

**1.9 Drehmomentverhältnis Differential**

**$\Sigma 1 P$**

Das Drehmomentverhältnis am Abtrieb beträgt **1**.

**1 P**

## Aufgabe 2 (22 Punkte)

Sie legen die Radialgleitlager im Getriebe eines Schwerlastantriebs aus, welches in den unten angegebenen Betriebspunkten arbeitet. Aus Sicherheitsgründen soll die höchstzulässige spezifische Lagerlast des Werkstoffs 20% über der spezifischen Lagerlast liegen. Prüfen Sie die Temperatursicherheit für die gegebenen Betriebspunkte.

Lagerlast	$F$	=	350 kN	Betriebspunkt I			
Lagerdurchmesser	$D$	=	215 mm	Drehzahl I	$n_I$	=	80 min <sup>-1</sup>
Radiales Betriebsspiel	$s$	=	0,1183 mm	Grenztemperatur I	$T_{GI}$	=	60 °C
Umgebungstemperatur	$T_U$	=	20 °C	Betriebspunkt II			
Kühlölvolumenstrom	$Q_k$	=	15 l/min	Drehzahl II	$n_{II}$	=	350 min <sup>-1</sup>
Kühltemperaturdifferenz am Ölkühler	$\Delta\vartheta$	=	15 °C	Lagertemperatur II	$T_{GII}$	=	40 °C
Höchstzulässige spezifische Lagerlast	$\bar{p}_{zul}$	=	10 MPa	Sommerfeldzahl bei $T_{GII}$	$SO_{GII}$	=	0,956

### Hinweis:

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

2.1 Welche viskositätsabhängige Größe wird bei Rotationsviskosimetern für die Bestimmung der Viskosität gemessen? (1 Punkt)

2.2 Um welchen Faktor ändert sich die ermittelte Viskosität beim UBBELOHDE Viskosimeter bei doppelter Durchflusszeit? (1 Punkt)

2.3 Bestimmen Sie die minimale Lagerbreite. (1,5 Punkte)

2.3.1 Bestimmen Sie die maximale spezifische Lagerlast  $\bar{p}$  in N/mm<sup>2</sup>, unter Berücksichtigung der geforderten Werkstoffsicherheit.

2.3.2 Berechnen Sie die minimale Lagerbreite  $B$  in mm, die für die Gewährleistung der Werkstoffsicherheit erforderlich ist.

Falls Sie Aufgabenteil 2.3 nicht lösen konnten, rechnen Sie mit  $\bar{p} = 7,5 \text{ N/mm}^2$  und  $B = 240 \text{ mm}$  weiter.

2.4 Nennen Sie eine Möglichkeit, um geringere Lagerbreiten bei unveränderter Lagerlast zu realisieren. (1 Punkt)

Unter Gewährleistung der Temperatursicherheit soll die maximale ISO VG Klasse des Schmierstoffs beim gegebenen Betriebspunkt I bestimmt werden. Die Kühlung erfolgt ausschließlich durch Wärmeabfuhr über das Gehäuse. Aus Platzgründen wird für die Lagerbreite  $B$  die minimale Lagerbreite aus Aufgabe 2.3.2 gewählt.

2.5 Bestimmung der maximalen ISO VG Klasse des Schmierstoffs. (5 Punkte)	
2.5.1	Berechnen Sie die Umfangsgeschwindigkeit $u_l$ in m/s.
2.5.2	Berechnen Sie die wärmeabgebende Oberfläche $A$ in $\text{m}^2$ , bei Abschätzung zur sicheren Seite.
2.5.3	Berechnen Sie die Erwärmungszahl für den Schwerlastbereich $W$ in $\sqrt{\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}^2}{\text{N} \cdot \text{s}}}$ .
2.5.4	Bestimmen Sie die maximale ISO VG Klasse des Schmierstoffs, bei einer Grenztemperatur von $T_{GI}$ und Umgebungstemperatur $T_U$ .

Falls Sie Aufgabenteil 2.5 nicht lösen konnten, rechnen Sie mit  $u_l = 0,950 \text{ m/s}$  und  $A = 0,750 \text{ m}^2$  weiter.

Für den Betrieb wurde ein Öl der Klasse ISO VG 320 gewählt. Im Sommer ist mit einer deutlich erhöhten Umgebungstemperatur zu rechnen. Daher soll nachfolgend die Umgebungstemperatur berechnet werden, bei der das Lager unter Einhaltung der Temperatursicherheit und bei gleichbleibender Drehzahl  $n_l$  maximal betrieben werden darf.

2.6 Berechnen Sie die Umgebungstemperatur, die unter Einhaltung der Temperatursicherheit maximal erreicht werden darf. (5,5 Punkte)	
2.6.1	Berechnen Sie das relative Lagerspiel $\psi$ in %.
2.6.2	Bestimmen Sie die Viskosität $\eta_{GI}$ bei Grenztemperatur $T_{GI}$ in Pas.
2.6.3	Berechnen Sie die Sommerfeldzahl $S_{0GI}$ bei Grenztemperatur $T_{GI}$ .
2.6.4	Berechnen Sie den Reibwert $f_{GI}$ . Runden Sie das Ergebnis auf vier Nachkommastellen.
2.6.5	Berechnen Sie die Umgebungstemperatur $T_{Umax}$ in °C, die zur Einhaltung der Temperatursicherheit bei ausschließlicher Kühlung über das Gehäuse maximal auftreten darf.

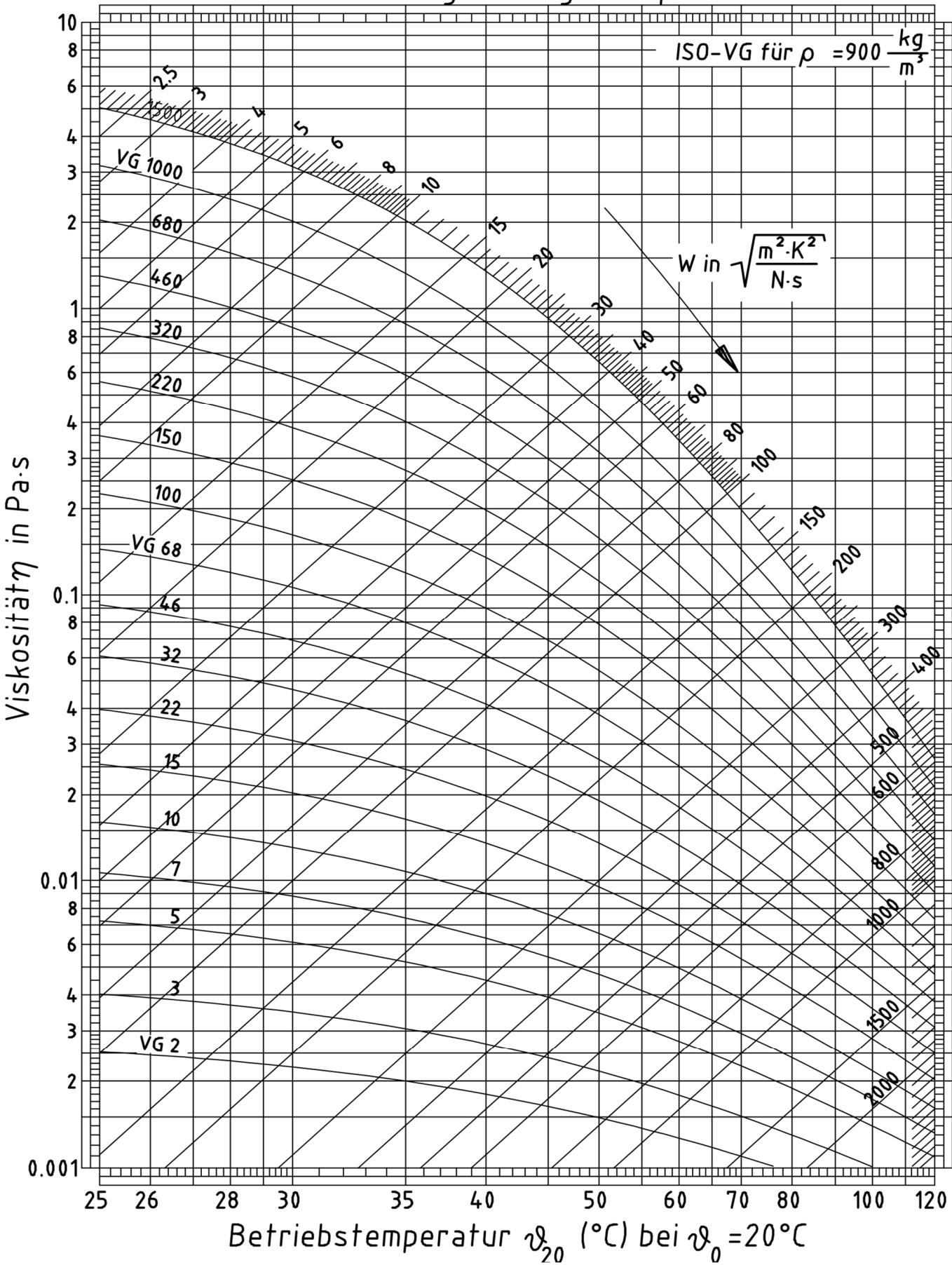
Falls Sie Aufgabenteil 2.6 nicht lösen konnten, rechnen Sie mit  $\psi = 1,3 \%$  weiter.

Zum Schutz hitzeempfindlicher Messtechnik soll die Grenztemperatur auf  $T_{GII}$  reduziert werden. Gleichzeitig wird die Drehzahl auf  $n_{II}$  erhöht. Zur Kühlung wird nun ein externer Ölkühler mit konstantem Kühlölvolumenstrom  $Q_k$  eingesetzt. Prüfen Sie, ob die Temperatursicherheit beim Einsatz von Öl als Kühlmittel im Ölkühler und einem Betrieb bei Drehzahl  $n_{II}$  gewährleistet ist. Die Kühlung über das Lagergehäuse kann vernachlässigt werden.

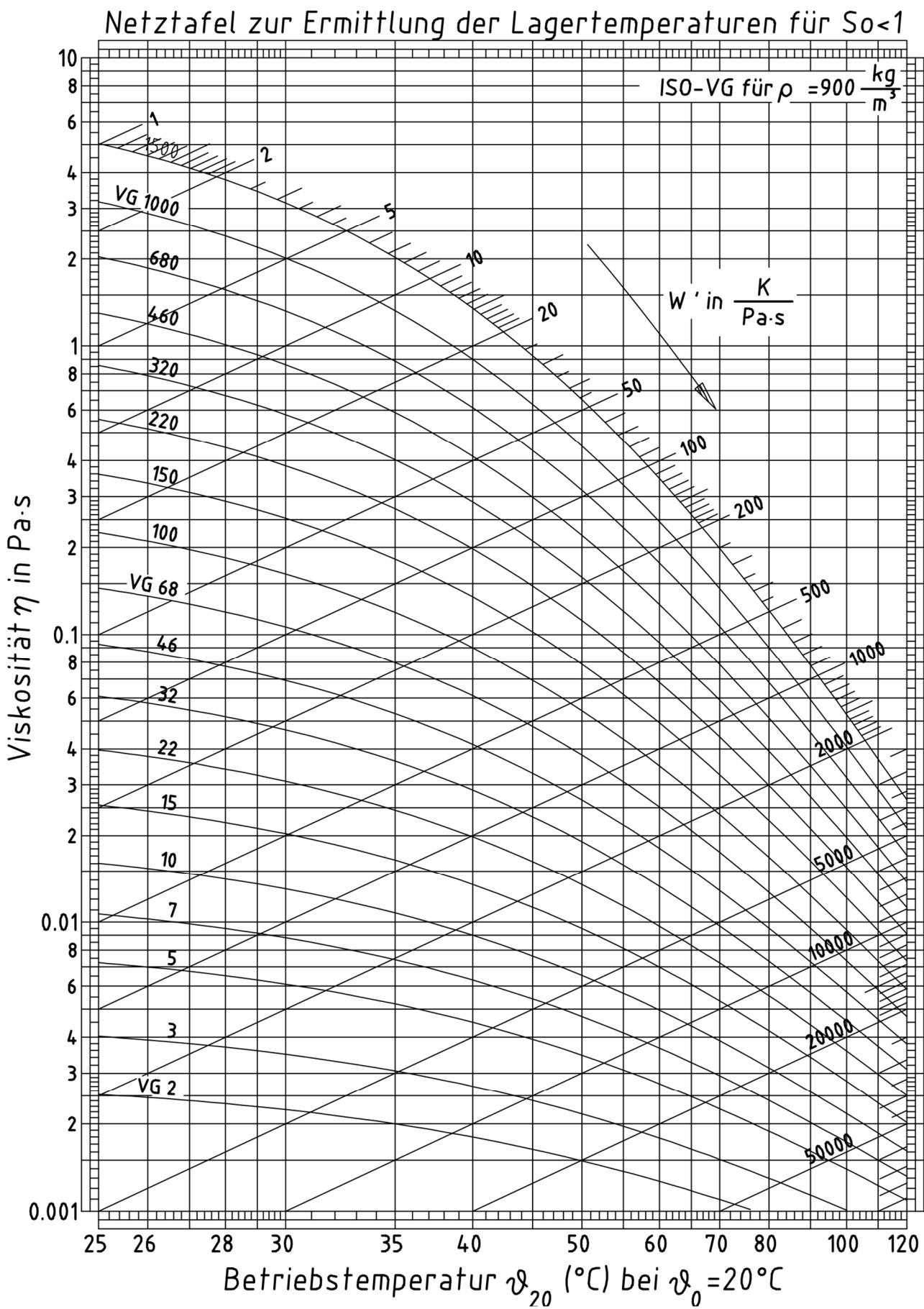
2.7 Prüfung der Temperatursicherheit beim Einsatz von Öl als Kühlmittel. (4 Punkte)	
2.7.1	Berechnen Sie die Umfangsgeschwindigkeit $u_{\parallel}$ in m/s.
2.7.2	Berechnen Sie den Reibwert $f_{G\parallel}$ bei gegebener Sommerfeldzahl $S_0 G_{\parallel}$ . Runden Sie das Ergebnis auf vier Nachkommastellen.
2.7.3	Berechnen Sie die spezifische Wärmekapazität $k$ des Kühlmittels in $\frac{J}{m^3 K}$ , die zur Einhaltung der Temperatursicherheit mindestens erforderlich ist.
2.7.4	Ist die Temperatursicherheit beim Einsatz von Öl als Kühlmittel auf Basis ihrer Ergebnisse gegeben?
2.8	Wie verändert sich die Tragfähigkeit eines hydrodynamischen Gleitlagers qualitativ, wenn die Lagerschale bei konstanter Wellendrehzahl und Lastrichtung mitrotiert und so die Relativgeschwindigkeit zwischen Welle und Lagerschale abnimmt? (1,5 Punkte)
2.9	Welche konstruktive Maßnahme ist erforderlich, um eine hydrostatische Lagerung mit mehreren Taschen zur Abstützung einer außermittig wirkenden Kraft zu ertüchtigen? (1,5 Punkte)

## Hilfsblatt 1 zu Aufgabe 2

### Netztafel zur Ermittlung der Lagertemperaturen für $\text{So} > 1$



## Hilfsblatt 2 zu Aufgabe 2

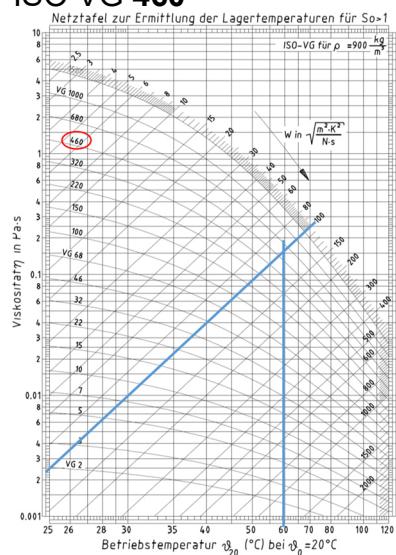


## Lösung zur Aufgabe 2

<b>2.1 Viskositätsabhängige Messgröße wird bei Rotationsviskosimetern</b>	<b>Σ 1 P</b>
<b>Reibmoment</b>	1P
<b>2.2 Änderungsfaktor Viskosität beim UBBELOHDE Viskosimeter</b>	<b>Σ 1 P</b>
Die ermittelte Viskosität $\nu$ berechnet sich aus der Durchflusszeit $t$ und der Viskosimeterkonstante $C$ zu $\nu = C \cdot t$ . Die ermittelte Viskosität nimmt somit um einen Faktor <b>zwei</b> zu, wenn eine doppelte Durchflusszeit gemessen wird.	1 P
<b>2.3 Werkstoffsicherheit</b>	<b>Σ 1,5 P</b>
Spezifische Lagerlast	
$\bar{p} = \frac{\bar{p}_{zul}}{1,2} = 8,333 \frac{N}{mm^2}$	1 P
Lagerbreite	
$B = \frac{F}{\bar{p} \cdot D} = 195,357 mm$	0,5 P
<b>2.4 Eine Möglichkeit zur Erreichung geringerer Lagerbreiten bei unveränderter Lagerlast</b>	<b>Σ 1 P</b>
Eine der folgenden Antworten ist zu nennen:	
<ul style="list-style-type: none"><li>• <b>Werkstoff mit höherer Festigkeit</b></li><li>• <b>Größerer Durchmesser</b></li></ul>	1 P
<b>2.5 Max. ISO VG Klasse</b>	<b>Σ 5 P</b>
Umfangsgeschwindigkeit I	
$u_I = \pi \cdot D \cdot n_I = 0,901 m/s$	0,5 P
Wärmeabgebende Oberfläche	
$A = 15 \cdot B \cdot D = 0,630 m^2$	1 P
Erwärmungszahl W	
$W = \frac{4,25 \cdot u}{\alpha \cdot A} \cdot \sqrt{F \cdot u \cdot B} = 100,576 \sqrt{\frac{m^2 \cdot K^2}{N \cdot s}}$	1,5 P
<i>mit</i>	
$\alpha = 15 W/m^2K$ , da Lager im Maschinenverband	

Maximale ISO VG Klasse  
ISO VG 460

2 P



**2.6 Max. Umgebungstemperatur**

**Σ 5,5 P**

Relatives Lagerspiel

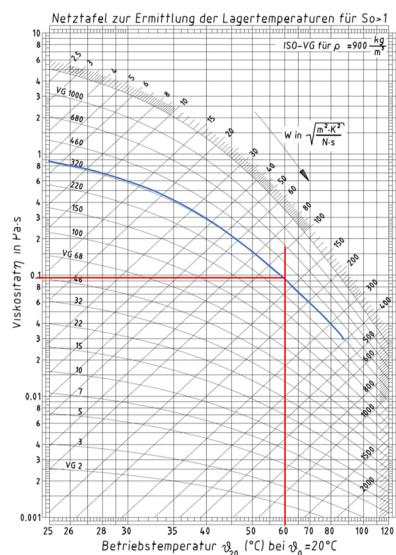
1 P

$$\psi = \frac{s}{D/2} = 1,1\%$$

Dyn. Viskosität von ISO VG 320 Öl bei  $T_{GI}$

0,5 P

$$\eta_{GI} = \eta(T_{GI}) = 0,093 \text{ Pas}$$



Sommerfeldzahl bei  $T_{GI}$

1,5 P

$$So_{GI} = \frac{\bar{p} \cdot \psi^2}{\eta_{GI} \cdot \omega_I} = 12,941$$

mit

$$\omega_I = 2 \cdot \pi \cdot n_I = 8,378 \text{ s}^{-1}$$

Reibwert bei  $T_{GI}$

$$f_{GI} = \frac{3 \cdot \psi}{\sqrt{So_{GI}}} = 0,0009$$

1 P

Max. Umgebungstemperatur

$$T_{U,max} = T_{GI} - \frac{f_{GI} \cdot F \cdot u_I}{\alpha \cdot A} = 29,967 \text{ } ^\circ\text{C} \quad 1,5 \text{ P}$$

mit

Wärmeabgabe nur über das Gehäuse:

$$f_{GI} \cdot F \cdot u_I = \alpha \cdot A \cdot (T_{GI} - T_{U,max})$$

## 2.7 Temperatursicherheit mit Ölkühler

**Σ 4 P**

Umfangsgeschwindigkeit II

$$u_{II} = \pi \cdot D \cdot n_{II} = 3,940 \text{ m/s} \quad 0,5 \text{ P}$$

Reibwert bei  $T_{GI}$

$$f_{GII} = \frac{3 \cdot \psi}{So_{GII}} = 0,0035 \quad 1 \text{ P}$$

Spez. Wärmekapazität des Kühlmittels

$$k = \frac{f_{GII} \cdot F \cdot u_{II}}{Q_K \cdot \Delta\vartheta} = 1,331 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{m}^3\text{K}} \quad 1,5 \text{ P}$$

mit

Wärmeabgabe bei Vernachlässigung des Gehäuseanteils:

$$f_{GII} \cdot F \cdot u_{II} = Q_K \cdot k \cdot \Delta\vartheta$$

Temperatursicherheit mit Öl als Kühlmittel gegeben?

$$\text{Ja, da } k < k_{öI} = 1,8 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{m}^3\text{K}} \quad 1 \text{ P}$$

## 2.8 Tragfähigkeit hydrodyn. Gleitlager bei Mitrotieren der Lagerschale

**Σ 1,5 P**

Durch die Rotation der Lagerschale wird zusätzliches Öl in den Schmierspalt transportiert, sodass die Tragfähigkeit steigt.

1,5 P

## 2.9 hydrostatischen Lagerung mit mehreren Taschen und außermittig wirkender Kraft eine funktionierende Lagerung gewährleistet

**Σ 1,5 P**

Entkopplung der Taschen voneinander, z.B durch:

1,5 P

- Einbau von mehreren Pumpen
- Einbau von Vordrosseln

### Aufgabe 3 (22 Punkte)

Sie legen die Radlagerung eines Baggers aus. Die Lagerung wird als Fest-Los-Lagerung mit Hilfe von Radialzyylinderrollenlagern umgesetzt. Während der Auslegung nehmen Sie an, dass die Lagerung bei leichter Verunreinigung betrieben wird. Sie erwarten Stoßbelastungen während des Betriebs.

Betriebsdaten			Lagerdaten Festlager		
Betriebstemperatur	$\vartheta$	= 50 °C	Außendurchmesser	$D$	= 110 mm
Drehzahl	$n$	= 200 min <sup>-1</sup>	Innendurchmesser	$d$	= 60 mm
Radialkraft am Festlager	$F_{\text{rad},\text{FL}}$	= 35 kN	Dynamische Tragzahl	$C$	= 111 kN
Axialkraft am Festlager	$F_{\text{a},\text{FL}}$	= 8,5 kN	Statische Tragzahl	$C_0$	= 102 kN
ISO-VG-Klasse	ISO VG 100		Grenzwert	$e$	= 0,2
Ausfallwahrscheinlichkeit	5 %		Dyn. Radiallastfaktor	$X$	= 0,92
			Dyn. Axiallastfaktor	$Y$	= 0,6
			Stat. Radiallastfaktor	$X_0$	= 1
			Stat. Axiallastfaktor	$Y_0$	= 0

#### Hinweis:

- Nutzen Sie zur Lösung der Aufgabe die Diagramme auf den Hilfsblättern 1 bis 2 zu Aufgabe 3.

3.1 Mit Hilfe welcher konstruktiven Maßnahme wird bei der verwendeten Wälzlagerraumform Kantenträgen vermieden? (1 Punkt)

3.2 Berechnen Sie die nominelle Lebensdauer des Festlagers in Betriebsstunden. (2,5 Punkte)

3.2.1 Berechnen Sie die dynamisch äquivalente Lagerlast des Festlagers  $P_{\text{FL}}$  in kN.

3.2.2 Berechnen Sie die nominelle Lebensdauer des Festlagers  $L_{10h,\text{FL}}$  in Betriebsstunden.

Falls Sie Aufgabenteil 3.2 nicht lösen konnten, rechnen Sie mit  $P_{\text{FL}} = 40$  kN und  $L_{10h,\text{FL}} = 2500$  h weiter.

3.3 Wie groß ist die Ausfallwahrscheinlichkeit in %, die der dynamischen Tragzahl zugrunde liegt? (1 Punkt)

3.4 Berechnen Sie die Ersatzkrümmung gemäß HERTZ'scher Theorie bei linienförmiger Berührung zweier Zylinder mit den Radien  $r_1 = 10 \text{ mm}$  und  $r_2 = 30 \text{ mm}$  in  $1/\text{mm}$ .  
**(1 Punkt)**

3.5 Prüfen Sie, ob die statische Sicherheit des Festlagers gegeben ist. **(2,5 Punkte)**

3.5.1 Berechnen Sie die statische Sicherheit  $S_0$ .

3.5.2 Ist die statische Sicherheit auf Basis Ihrer Ergebnisse ausreichend groß?

3.6 Berechnen Sie die erweiterte Lebensdauer des Festlagers. **(6,5 Punkte)**

3.6.1 Bestimmen Sie den Beiwert  $e_c \cdot C_u / P$ .

3.6.2 Bestimmen Sie die Betriebsviskosität  $\nu$  in  $\text{mm}^2/\text{s}$ .

3.6.3 Bestimmen Sie den Beiwert  $a_{\text{ISO}}$ .

3.6.4 Berechnen Sie die erweiterte Lebensdauer des Festlagers  $L_{5\text{mh},\text{FL}}$  in h.

**Falls Sie Aufgabenteil 3.6 nicht lösen konnten, rechnen Sie mit  $\nu = \nu_1 = 70 \text{ mm}^2/\text{s}$ ,  $C_u = 10 \text{ kN}$ ,  $a_{\text{ISO}} = 0,5$  und  $L_{5\text{mh},\text{FL}} = 780 \text{ h}$  weiter.**

In der Erprobung erster Prototypen sind bereits nach 600 h fünf Prozent der ausgelegten Lager ausgefallen. Sie führen dies auf Verschmutzung in den Lagern zurück. Um zukünftig zuverlässiger die Lebensdauer der Wälzlager berechnen zu können, bestimmen Sie den Verunreinigungsbeiwert  $e_{c,\text{Erprobung}}$ . Nehmen Sie dazu an, dass Lagerlast, Betriebstemperatur und Ermüdungsgrenzbelastung während der Erprobung den in der Auslegung angenommenen Werten entsprechen.

3.7 Bestimmen Sie den tatsächlichen Verunreinigungsbeiwert  $e_{c,\text{Erprobung}}$ . **(3 Punkte)**

3.7.1 Berechnen Sie den Beiwert  $a_{\text{ISO,Erprobung}}$ .

3.7.2 Bestimmen Sie den Beiwert  $e_{c,\text{Erprobung}} \cdot C_u / P$ .

3.7.3 Berechnen Sie den tatsächlichen Verunreinigungsbeiwert  $e_{c,\text{Erprobung}}$ .

**Falls Sie Aufgabenteil 3.7 nicht lösen konnten, rechnen Sie mit  $a_{\text{ISO,Erprobung}} = 0,3$  weiter.**

Wählen Sie nachfolgend auf Basis des Auszugs aus einem Lagerkatalog in Tabelle 3.1 ein geeignetes Radialzylinderrollenlager aus, das auch unter den Erprobungsbedingungen eine erweiterte Lebensdauer  $L_{5\text{mh},\text{FL,Erprobung}}$  von 780 h erreicht. Aus Kostengründen soll das Lager nicht mehr als erforderlich überdimensioniert sein. Nehmen Sie vereinfachend an, dass die Ermüdungsgrenzbelastung  $C_u$  konstant bleibt.

Tabelle 3.1: Lagerkatalog

Lagertyp-bezeichnung	Dynamische Tragzahl
NUP212	115 kN
NUP2212	155 kN
NUP311	163 kN
NUP2311	239 kN

3.8      Lagerauswahl (2,5 Punkte)

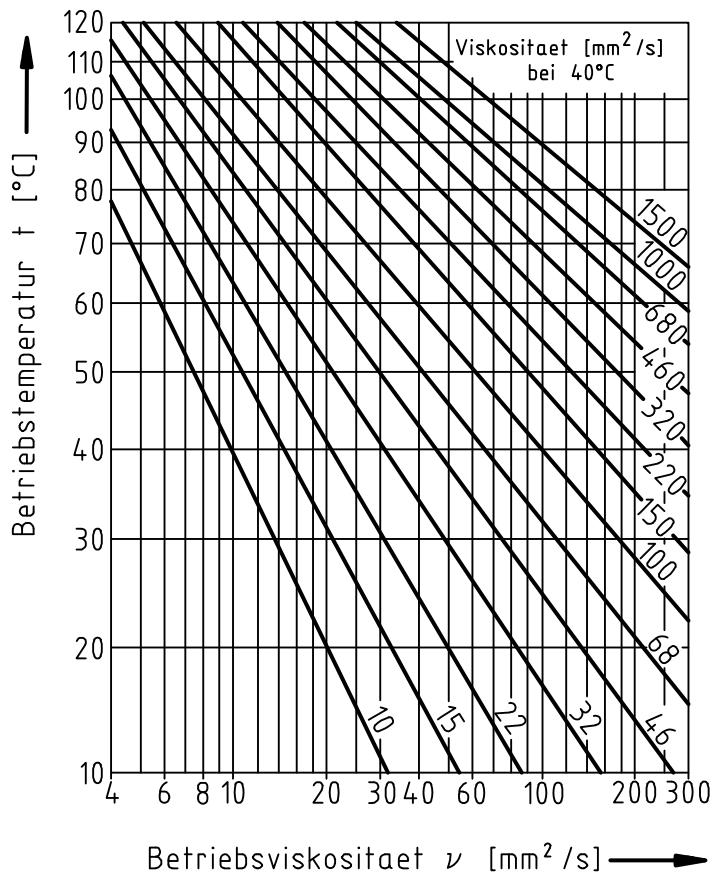
3.8.1    Berechnen Sie die erforderliche dynamische Tragzahl  $C_{\text{erf}}$  in kN.

3.8.2    Wählen Sie ein geeignetes Lager aus Tabelle 3.1 aus.

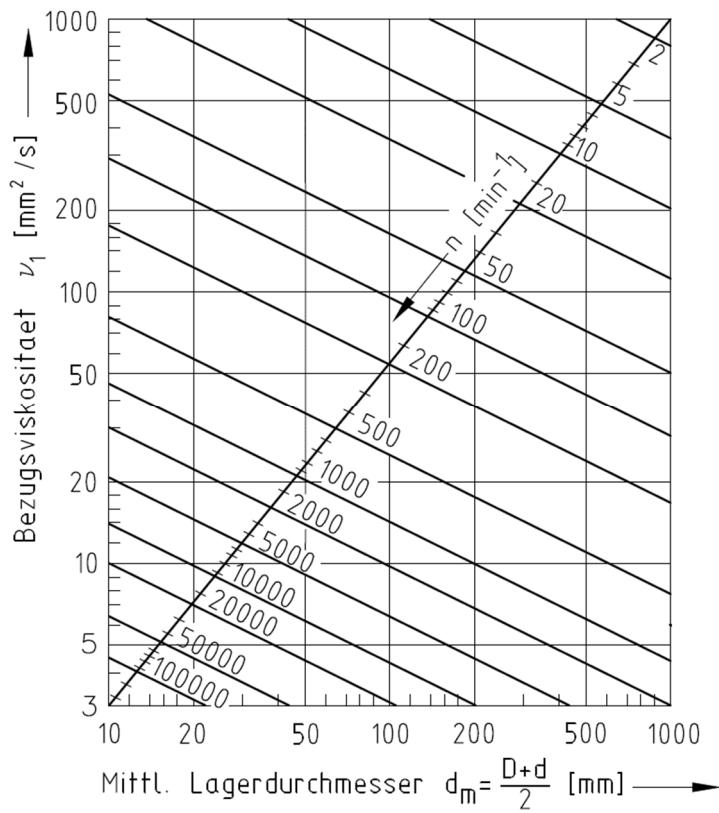
3.9      Tatsächlich steigt bei zunehmender dynamischer Tragzahl  $C$  auch die Ermüdungsgrenzbelastung  $C_u$ . Wie ändert sich unter Berücksichtigung dieses Effekts die zur Erreichung von  $L_{5\text{mh},\text{FL}}$  erforderlich dynamische Tragzahl  $C_{\text{erf}}$  qualitativ? (1 Punkt)

3.10     Nennen Sie einen für überwiegende Stoßbeanspruchung geeigneten Wälzlagwerkstoff. (1 Punkt)

## Hilfsblatt 1 zu Aufgabe 3

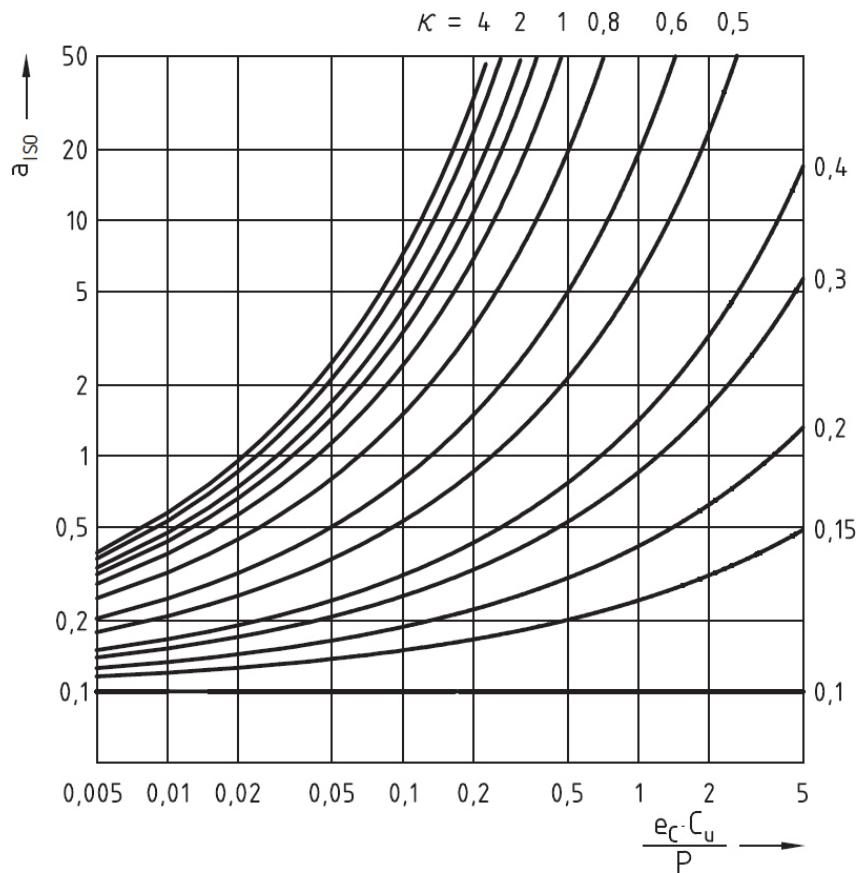


**Bild 3.1:** Betriebsviskosität  $\nu$

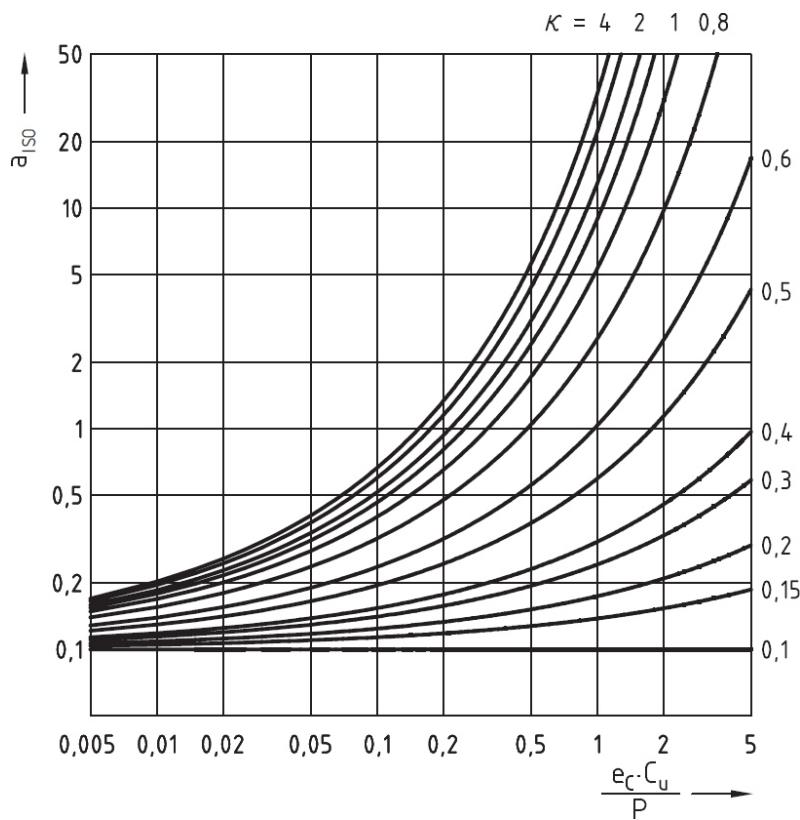


**Bild 3.2:** Bezugsviskosität  $\nu_1$

## Hilfsblatt 2 zu Aufgabe 3



**Bild 3.3:**  $a_{ISO}$  Radial-Kugellager



**Bild 3.4:**  $a_{ISO}$  Radial-Rollenlager

## Lösung zur Aufgabe 3

### 3.1 Kantentragen am Radialzylinderrollenlager

**Σ 1 P**

Eine der folgenden Antwortmöglichkeiten ist zu nennen:

- Kantenverrundung
- Logarithmische Verjüngung

1 P

### 3.2 Nominelle Lebensdauer des Festlagers

**Σ 2,5 P**

$$P_{FL} = X \cdot F_{rad,FL} + Y \cdot F_{a,FL} = 37,3 \text{ kN}$$

1,5 P

mit

$$\frac{F_{a,FL}}{F_{rad,FL}} = \frac{8,5 \text{ kN}}{35 \text{ kN}} = 0,243 > 0,2 = e$$

$$X = 0,92$$

$$Y = 0,6$$

$$F_{rad,FL} = 35 \text{ kN}$$

$$F_{a,FL} = 8,5 \text{ kN}$$

$$L_{10h,FL} = \frac{\left(\frac{C}{P}\right)^p \cdot 10^6}{60 \cdot n} = 3158,876 \text{ h}$$

1 P

mit

$$C = 111 \text{ kN}$$

$$P = 37,3 \text{ kN}$$

$p = 10/3$ , wegen Zylinderrollenlagern

$$n = 200 \text{ min}^{-1}$$

### 3.3 Ausfallwahrscheinlichkeit der dynamischen Tragzahl

**Σ 1 P**

Die der dynamischen Tragzahl zugrunde liegende Ausfallwahrscheinlichkeit beträgt

**10%.**

1 P

### 3.4 Ersatzkrümmung gemäß HERTZ'scher Theorie

**Σ 1 P**

$$k = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} = 0,133 \frac{1}{\text{mm}}$$

1 P

mit

$$r_1 = 10 \text{ mm}$$

$$r_2 = 30 \text{ mm}$$

### 3.5 Statische Sicherheit

**Σ 2,5 P**

$$S_0 = \frac{C_0}{P_0} = 2,914$$

1,5 P

mit

$$C_0 = 102 \text{ kN}$$

$$P_0 = F_{rad,FL} = 35 \text{ kN}, \text{ da } F_{rad,FL} = X_0 \cdot F_{rad,FL} + Y_0 \cdot F_{a,FL}, \text{ da } X_0 = 1 \text{ und } Y_0 = 0$$

**Nein**, die statische Sicherheit ist nicht ausreichend groß, da  $S_0 = 2,914 < 3 = S_{0,min}$  für Rollenlager bei Stoßbelastung.

1 P

### 3.6 Erweiterte Lebensdauer des Festlagers

**Σ 6,5 P**

$$\frac{e_c \cdot C_U}{P} = 0,1$$

2 P

mit

$e_c = 0,3$ , da  $D_{pw} \approx d_m = \frac{D+d}{2} = \frac{110\text{mm}+60\text{mm}}{2} = 85\text{mm} < 100\text{mm}$  und leichte

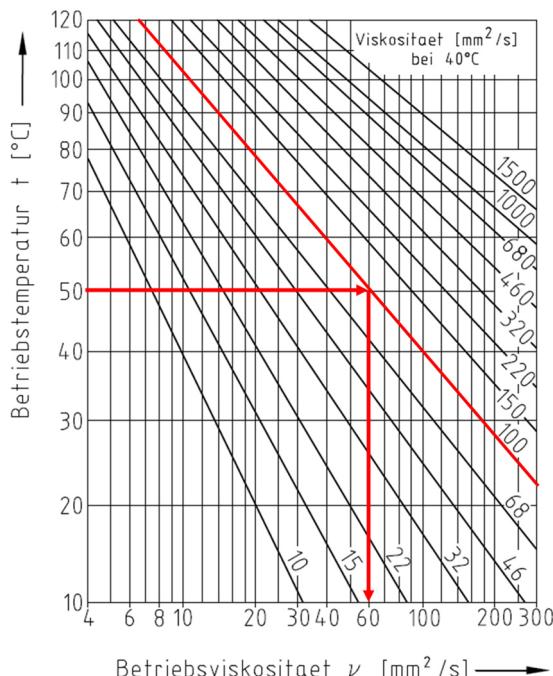
Verunreinigungen sowie Abschätzung zur sicheren Seite

$C_U = 12,439 \text{ kN}$ , da  $C_U \approx \frac{1}{8,2} \cdot C_0$  für Rollenlager mit  $D_{pw} < 100\text{mm}$  und  $C_0 = 102\text{kN}$

$P = 37,3 \text{ kN}$

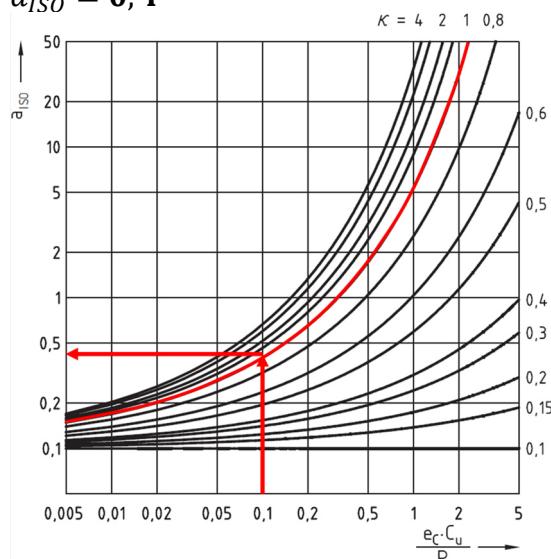
$$\nu = 60 \frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$$

1 P



$$a_{ISO} = 0,4$$

2 P



mit

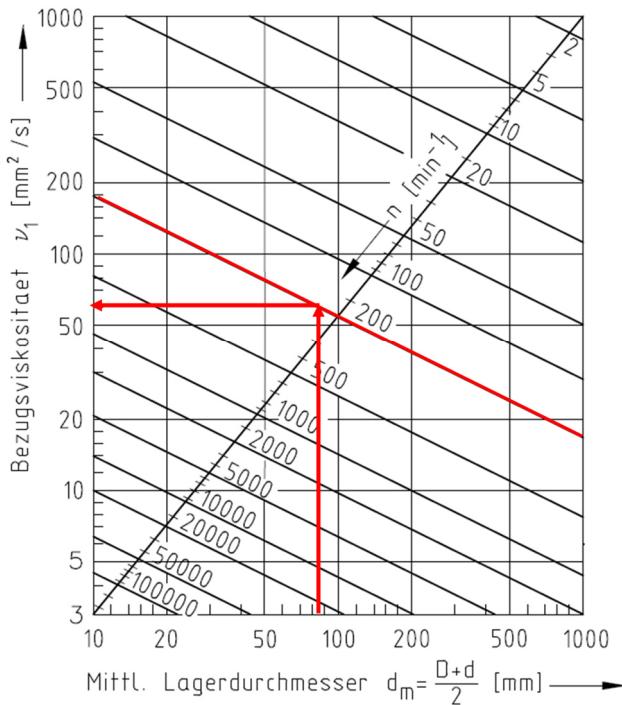
$$\frac{e_c \cdot C_U}{P} = 0,1$$

$$\kappa = \frac{\nu}{\nu_1} = 1$$

mit

$$\nu = 60 \frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$$

$$\nu_1 = 60 \frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$$



$$L_{5mh,FL} = \frac{a_1 \cdot a_{ISO} \cdot \left(\frac{C}{P}\right)^p \cdot 10^6}{60 \cdot n} = 808,672 \text{ h}$$

1,5 P

mit

$a_1 = 0,64$ , da 5% Ausfallwahrscheinlichkeit

$a_{ISO} = 0,4$

$C = 111 \text{ kN}$

$P = 37,3 \text{ kN}$

$p = 10/3$ , da Rollenlager

$n = 200 \text{ min}^{-1}$

Alternativer Ansatz auf Basis von  $L_{10h,FL}$

$$L_{5mh,FL} = a_1 \cdot a_{ISO} \cdot L_{10h,FL} = 808,672 \text{ h}$$

(1,5 P)

mit

$a_1 = 0,64$ , da 5% Ausfallwahrscheinlichkeit

$a_{ISO} = 0,4$

$$L_{10h,FL} = 3158,876 \text{ h}$$

### 3.7 Tatsächlicher Verunreinigungsbeiwert $e_{c,Erprobung}$

**Σ 3 P**

$$a_{ISO,Erprobung} = \frac{60 \cdot n \cdot L_{5mh,FL,Erprobung}}{10^6 \cdot \left(\frac{C}{P}\right)^p \cdot a_1} = 0,297$$

1 P

mit

$$L_{5mh,FL,Erprobung} = 600 \text{ h}$$

$a_1 = 0,64$ , da 5% Ausfallwahrscheinlichkeit

$C = 111 \text{ kN}$

$P = 37,3 \text{ kN}$

$p = 10/3$ , da Rollenlager

$n = 200 \text{ min}^{-1}$

alternativ per Dreisatz

$$a_{ISO,Erprobung} = a_{ISO} \cdot \frac{L_{5mh,FL,Erprobung}}{L_{5mh,FL}} = 0,297 \quad (1 \text{ P})$$

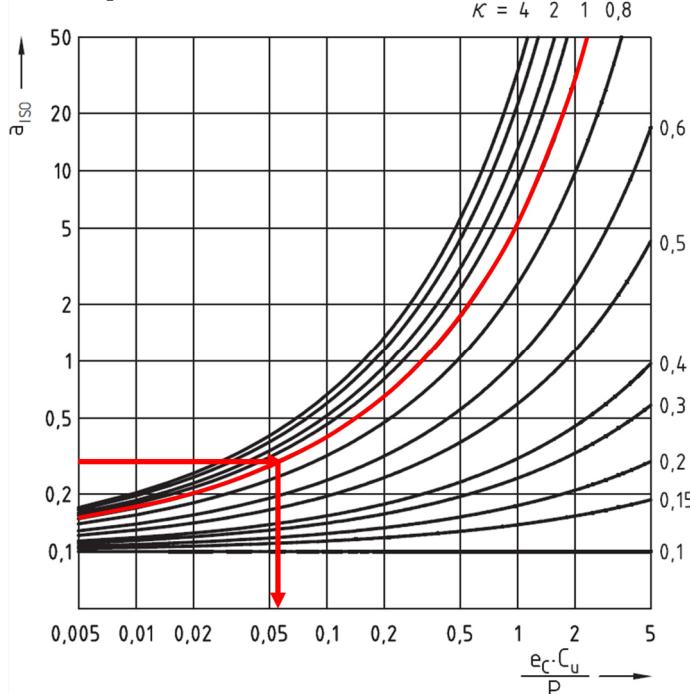
mit

$$a_{ISO} = 0,4$$

$$L_{5mh,FL} = 808,672 \text{ h}$$

$$L_{5mh,FL,Erprobung} = 600 \text{ h}$$

$$\frac{e_{c,Erprobung} \cdot C_U}{P} = 0,06 \quad 1,5 \text{ P}$$



mit

$\kappa = 1$ , unverändert, da Drehzahl, Temperatur, Lagerdurchmesser und ISO-VG-Klasse gleich bleiben

$$a_{ISO,Erprobung} = 0,297$$

$$e_{c,Erprobung} = \frac{e_{c,Erprobung} \cdot C_U}{P} \cdot \frac{P}{C_U} = 0,18 \quad 0,5 \text{ P}$$

mit

$$\frac{e_{c,Erprobung} \cdot C_U}{P} = 0,06$$

$$P = 37,3 \text{ kN}$$

$$C_U = 12,439 \text{ kN}$$

### 3.8 Lagerauswahl

**$\Sigma 2,5 \text{ P}$**

$$C_{erf} = \left( \frac{60 \cdot n \cdot L_{5mh,FL}}{10^6 \cdot a_1 \cdot a_{ISO,Erprobung}} \right)^{\frac{1}{p}} \cdot P = 120,06 \text{ kN} \quad 1,5 \text{ P}$$

mit

$$n = 200 \text{ min}^{-1}$$

$$L_{5mh,FL} = 780 \text{ h}$$

$$a_1 = 0,64, \text{ da } 5\% \text{ Ausfallwahrscheinlichkeit}$$

$$a_{ISO,Erprobung} = 0,297$$

$$P = 37,3 \text{ kN}$$

$$p = 10/3, \text{ da Rollenlager}$$

Alternativ

$$C_{erf} = \left( \frac{L_{5mh,FL}}{L_{5mh,FL,Erfprobung}} \right)^{\frac{1}{p}} \cdot C = 120,09 \text{ kN} \quad (1,5 \text{ P})$$

mit

$$L_{5mh,FL} = 780h$$

$$L_{5mh,FL,Erfprobung} = 600h$$

$$p = 10/3, \text{ da Rollenlager}$$

$$C = 111 \text{ kN}$$

Es wird Lager **NUP2212** ausgewählt, da die nächsthöhere dynamische Tragzahl zu 1 P erreichen ist.

### 3.9 Genauere erforderliche Tragzahl $C_{erf}$

**$\Sigma 1 \text{ P}$**

Die erforderliche dynamische Tragzahl  $C_{erf}$  sinkt, da ein Teil der Lebensdauererhöhung durch die steigende Ermüdungsgrenzbelastung  $C_u$  erfolgt. 1 P

### 3.10 Wälzlagwerkstoff

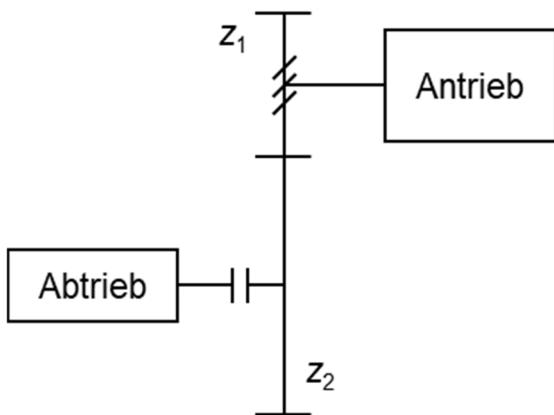
**$\Sigma 1 \text{ P}$**

Einer der folgenden Werkstoffe ist zu nennen:

- 17MnCr5
- 16CrNiMo6

## Aufgabe 4 (22 Punkte)

Sie möchten in Ihren alten Rasentraktor einen Gleichstrommotor als Antrieb einbauen. Das zuvor verbaute Getriebe können Sie dazu nicht mehr nutzen. Ihr Rasentraktor erfährt bei der Anwendung mittlere Stöße. Sie finden in einem alten Lager drei gleiche Stirnradgetriebe, die unterschiedlich starken Verschleiß aufweisen, und prüfen, ob Sie diese für Ihre Anwendung benutzen können. Für das Stirnradgetriebe ist ein Datenblatt vorhanden, auf dem noch einige Parameter der vorherigen Anwendung des Getriebes erkennbar sind.



### Betriebspunkt vorherige Anwendung

Antriebsmoment	$T'_{an}$	=	500	Nm
Tangentialkraft bei $T'_{an}$	$F'_t$	=	8670	N
Zahnnormalkraft bei $T'_{an}$	$F'_{bn}$	=	9680	N
Flankenpressung bei $T'_{an}$	$\sigma'_{H}$	=	780	N/mm <sup>2</sup>

### Betriebspunkte Rasentraktor

Parameter Ritzel		Nennleistung	$P$	=	15	kW
Zahnbreite	$b$	= 75	mm	Maximal nötiges Drehmoment am Antrieb	$T_{an,max}$	= 200 Nm
Normaleingriffswinkel	$\alpha_n$	= 20	°	Maximale Drehzahl am Abtrieb	$n_{ab,max}$	= 450 min <sup>-1</sup>
Normalmodul	$m_n$	= 5	mm			
Faktoren	$Z_L \cdot Z_v \cdot Z_R \cdot Z_X$	= 1,2				
Werkstoff	34CrMo4 (DIN 17100)			Verzahnungsqualität	IT 7	

### Hinweise:

- Nutzen Sie zur Lösung der Aufgabe das Diagramm und die Tabelle auf Hilfsblatt 1 zu Aufgabe 4.
- Führen Sie Festigkeitsnachweise nach DIN 3990 durch.
- Nehmen Sie alle Komponenten als verlustfrei an.
- Stirnfaktor  $K_{H\alpha}$  und Breitenfaktor  $K_{H\beta}$  können für die Berechnungen vernachlässigt werden.

4.1 Berechnen Sie die geometrischen Abmessungen des Ritzels unter Beachtung der Betriebsdaten aus der vorherigen Anwendung. (4 Punkte)	
4.1.1	Berechnen Sie den Teilkreisdurchmesser des Ritzels $d_1$ in mm.
4.1.2	Berechnen Sie den Schrägungswinkel des Ritzels $\beta$ in °.
4.1.3	Bestimmen Sie die Zähnezahl des Ritzels $z_1$ .

Falls Sie Aufgabenteil 4.1 nicht lösen konnten, rechnen Sie mit  $d_1 = 93,175$  mm,  $\beta = 15^\circ$  und  $z_1 = 18$  weiter.

Sie stellen an zwei der Getriebe verschiedene Schadensbilder an den Zahnflanken des Ritzels fest. Einer der Schäden lässt sich auf eine erhöhte Temperatur im Zahnkontakt zurückführen. Das andere Ritzel weist einen Schaden aufgrund zu hoher Flankenpressung aus seiner vorherigen Anwendung auf. Daher prüfen Sie bis zu welchem maximalen Antriebsmoment das Ritzel eine ausreichende Flankentragfähigkeit aufweist.

4.2 Nennen Sie neben Zahn- und Lagerreibung eine weitere Quelle für die Entstehung von Reibungswärme bei hohen Umfangsgeschwindigkeiten in Getrieben.  
**(1,5 Punkte)**

4.3 Nennen Sie einen Schaden, der durch die Flankenpressung im Zahnkontakt entsteht. **(1 Punkt)**

4.4	Prüfen Sie ob das Ritzel für Ihre Anwendung eine ausreichende Flankentragfähigkeit aufweist. <b>(5 Punkte)</b>
4.4.1	Bestimmen Sie den Lebensdauerfaktor $Z_{NT}$ für eine dauerfeste Auslegung.
4.4.2	Bestimmen Sie die zulässige Flankenpressung $\sigma_{HP}$ in N/mm <sup>2</sup> . Beachten Sie für die Härte der Zahnräder die Daten auf Hilfsblatt 1 zu Aufgabe 4.
4.4.3	Bestimmen Sie das maximal zulässige Moment am Ritzel $T_{1,zul}$ in Nm. Beachten Sie die gegebene Flankenpressung aus der vorherigen Anwendung. Nehmen Sie dazu außerdem an, dass die K-Faktoren der beiden Anwendungen identisch sind.
4.4.4	Ist das Ritzel auf Basis Ihrer Ergebnisse für die Anwendung im Rasentraktor im Sinne der Flankentragfähigkeit geeignet?

Sie sind der Auffassung, dass die Zahnußtragfähigkeit bei der maximalen Drehzahl am Antrieb am kritischsten ist. Daher prüfen Sie diese im Folgenden. Aus Ihren ersten Berechnungen erhalten Sie die Daten in Tabelle 4.1.

Tabelle 4.1: Berechnungsparameter Zahnußtragfähigkeit

Zahnuß-Nennspannung	$\sigma_{FO,1}(n_{an,max})$	=	19,726	N/mm <sup>2</sup>
Zul. Zahnußspannung des Ritzels	$\sigma_{FG,1}$	=	555	N/mm <sup>2</sup>
Dimensionslose Faktoren bei $N$	$C_{v2} \cdot B_f + C_{v3} \cdot B_k$	=	1,6875	
Reduzierte Masse	$m_{red}$	=	0,0415	kg/mm
Zähnezahl Rad	$z_2$	=	60	
Einzelfedersteifigkeit	$c'$	=	13,1	N/(mm·μm)
Eingriffsfedersteifigkeit	$c_Y$	=	18,7	N/(mm·μm)
Einlaufabweichung	$y_{pe}$	=	2	μm

4.5 Bestimmen Sie den  $K_V$ -Bereich bei maximaler Drehzahl am Antrieb. (2 Punkt)

4.5.1 Berechnen Sie die Bezugsdrehzahl  $N$  bei maximaler Drehzahl am Antrieb  $n_{an,max}$ .

4.5.2 In welchem Drehzahlbereich liegt die Bezugsdrehzahl  $N$ ?

Falls Sie Aufgabenteil 4.5 nicht lösen konnten, rechnen Sie mit  $n_{an,max} = -2300 \text{ min}^{-1}$  und  $N = 0,25$  weiter.

4.6 Wie hoch ist der Anwendungsfaktor  $K_A$ ? (1 Punkt)

Falls Sie Aufgabenteil 4.6 nicht lösen konnten, rechnen Sie mit  $K_A = 1,4$  weiter.

4.7 Der Durchmesser welches Zahnrads einer Zahnradpaarung ist maßgebend für die Berechnung der Teilungs-Einzelabweichung? (1 Punkt)

4.8 Prüfen Sie die Zahndurchmessertragfähigkeit Ihres Ritzels bei maximaler Drehzahl  $n_{an,max}$  am Antrieb. (6,5 Punkte)

4.8.1 Berechnen Sie die wirksame Eingriffsteilungsabweichung  $f_{pe\ eff}$  in  $\mu\text{m}$ .

4.8.2 Ermitteln Sie den Faktor  $B_p$ .

4.8.3 Ermitteln Sie den Dynamikfaktor  $K_V$  bei maximaler Drehzahl.

4.8.4 Ist das Ritzel auf Basis Ihrer Ergebnisse ausreichend gegen Zahnbruch dimensioniert?

## Hilfsblatt 1 zu Aufgabe 4

Tabelle 4.2: Brinell-Härten für verschiedene Werkstoffe

Werkstoff	Brinell-Härte HB
34CrMo4 (DIN 17100)	257
34CrMo4 (DIN 17200)	561
42CrMo4 (DIN 17100)	285

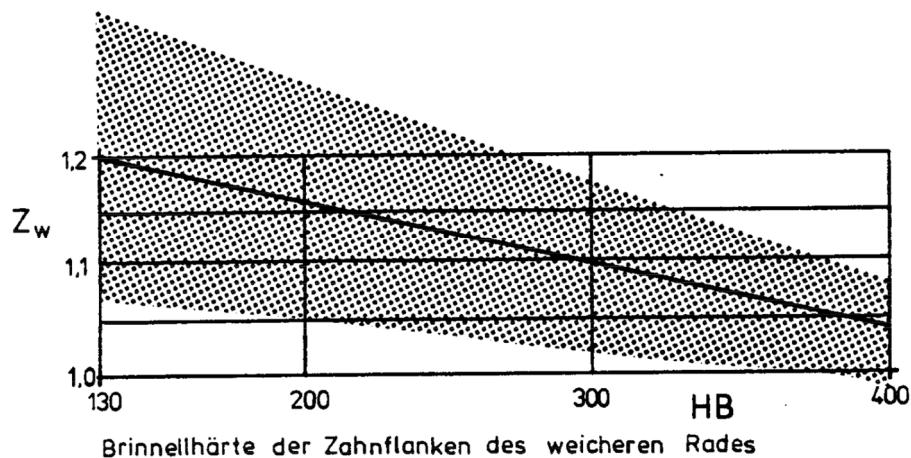


Bild 4.1: Werkstoffpaarungsfaktor  $Z_w$

## Lösung zur Aufgabe 4

### 4.1 Zahnradgeometrie bestimmen

**Σ 4 P**

$$d_1 = \frac{2 \cdot T'_{an}}{F'_t \cdot z_e} = 115,340 \text{ mm}$$

1,5 P

mit

$$T'_{an} = 500 \text{ Nm}$$

$$F'_t = 8670 \text{ N}$$

$z_e = 1$  (zwei kämmende Zahnräder)

$$\beta = \cos^{-1} \left( \frac{F'_t}{F'_{bn} \cdot \cos \alpha_n} \right) = 17,609^\circ$$

1,5 P

mit

$$F'_{bn} = 9680 \text{ N}$$

$$\alpha_n = 20^\circ$$

$$z_1 = \frac{d_1 \cdot \cos \beta}{m_n} = 21,987 \Rightarrow 22$$

1 P

mit

$$m_n = 5 \text{ mm}$$

### 4.2 Reibungswärme

**Σ 1,5 P**

Es ist eine der folgenden Antworten ist zu nennen.

- **Quetschverluste**
- **Ventilationsverluste**
- **(Planschverluste, Flüssigkeitsreibung, ...)**

1,5 P

### 4.3 Zahnflankenschaden

**Σ 1 P**

- **Grübchen(-bildung)**
- **Pitting**

1 P

### 4.4 Zahnflankenschaden

**Σ 5 P**

$$\text{Dauerfest} \Rightarrow Z_{NT} = 1$$

1 P

$$\sigma_{HP} = \frac{\sigma_{H\ lim}}{S_{H\ min}} \cdot Z_{NT} \cdot Z_L \cdot Z_v \cdot Z_R \cdot Z_W \cdot Z_x = 718,68 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

1,5 P

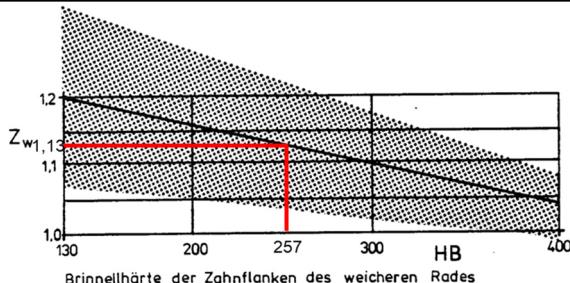
mit

$$\sigma_{H\ lim} = 530 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \text{ (Anhang A.5)}$$

$$Z_L \cdot Z_v \cdot Z_R \cdot Z_x = 1,2$$

$$S_{H\ min} = 1$$

$$Z_W = 1,13 \text{ mit } HB = 257 \text{ (Tabelle 4.2)}$$



$$T_{1,zul} = T'_{an} \cdot \left( \frac{\sigma_{HP}}{\sigma'_H} \right)^2 = 424,475 \text{ Nm}$$

2 P

mit

$$T'_{an} = 500 \text{ Nm}$$

$$\sigma'_H = 780 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{HP} = 718,68 \text{ N/mm}^2$$

$$\frac{\sigma_{H_1}}{\sigma_{H_2}} = \sqrt{\frac{F_{t,1}}{F_{t,2}}} = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}} \Rightarrow T_2 = T_1 \cdot \left( \frac{\sigma_{H_2}}{\sigma_{H_1}} \right)^2$$

$$\sigma_H = Z_{B/D} \cdot Z_H \cdot Z_\epsilon \cdot Z_\beta \cdot Z_E \cdot \sqrt{\frac{F_t}{d_1 \cdot b} \cdot \frac{u+1}{u}} \cdot \sqrt{K_A \cdot K_V \cdot K_{H\beta} \cdot K_{H\alpha}}$$

Z-Faktoren sind unverändert, da das gleiche Getriebe genutzt wird.

K-Faktoren sind unverändert, da es in der Aufgabe angegeben ist.

$$T_{max,an} < T_{1,zul} \Rightarrow \text{Ja}$$

0,5 P

mit

$$T_{max,an} = 250 \text{ Nm}$$

#### 4.5 Resonanzbereich

Σ 2 P

$$N = \frac{|n_{an,max}|}{n_{E,1}} = 0,133$$

1,5 P

$$n_{E,1} = \frac{30 \cdot 10^3}{\pi \cdot z_1} \sqrt{\frac{c_\gamma}{m_{red,3}}} = 9213,942 \text{ min}^{-1}$$

mit

$$c_\gamma = 18,7 \frac{N}{mm \mu m}$$

$$m_{red} = 0,0415 \text{ kg/mm}$$

$$n_{an,max} = -\frac{z_2}{z_1} \cdot n_{ab,max} = -1227,273 \text{ min}^{-1}$$

mit

$$n_{ab,max} = 450 \text{ min}^{-1}$$

$$z_2 = 60$$

Alternativ:

(1.5 P)

$$N = \frac{|n_{ab,max}|}{n_{E,2}} = 0,133$$

mit

$$n_{E,2} = n_{E,1} = \frac{30 \cdot 10^3}{\pi \cdot z_2} \sqrt{\frac{c_\gamma}{m_{red,3}}} = 3378,445 \text{ min}^{-1}$$

$N \leq 0,85 \Rightarrow$  Unterkritisch

0,5 P

**x.6 Anwendungsfaktor**

**$\Sigma 1 P$**

$$K_A = 1,5$$

1 P

mit

Antriebsmaschine  $\rightarrow$  gleichmäßig uniform

Getriebene Maschine  $\rightarrow$  mittlere Stöße

**x.7 Teilungs-Einzelabweichung**

**$\Sigma 1 P$**

Rad (Großrad, Des größeren, ...)

1 P

**x.8 Dynamikfaktor bestimmen**

**$\Sigma 6,5 P$**

$$f_{pe\ eff|7} = f_{pe|7} - y_{pe} = 11,665 \mu\text{m}$$

1,5 P

mit

$$y_{pe} = 2 \mu\text{m}$$

$$f_{pe|7} = f_{pe|5} \cdot 1,4^2 = 13,665 \mu\text{m}$$

$$f_{pe|5} = 4 + 0,315 \cdot (m_n + 0,25 \sqrt{d}) = 6,972 \mu\text{m}$$

$$m_n = 5 \text{ mm}$$

$$d = \max\{d_1, d_2\} = 314,56 \text{ mm}$$

$$\text{mit } d_1 = 115,338 \text{ mm}; d_2 = \frac{z_2 \cdot m_n}{\cos \beta} = 314,552 \text{ mm}$$

$$B_p = \frac{c' \cdot f_{pe\ eff|7} \cdot b}{F_t \cdot K_A} = 3,775$$

2 P

mit

$$c' = 13,1 \text{ N}/(\text{mm} \cdot \mu\text{m})$$

$$b = 75 \text{ mm}$$

$$F_t = 2 \cdot \frac{T_{an}}{d_1 \cdot z_e} = 2023,825 \text{ N}$$

$$T_{an} = \frac{P_{RM} \cdot 60}{2 \pi \cdot n_{an,max}} = 116,714 \text{ Nm}$$

$$K_V = N \cdot K + 1 = 1,385$$

1,5 P

$$K = C_{v1} \cdot B_p + C_{v2} \cdot B_f + C_{v3} \cdot B_k = 2,896$$

$$C_{v1} = 0,32 \text{ (Umdruck Tabelle 3.8)}$$

$$C_{v2} \cdot B_f + C_{v3} \cdot B_k = 1,6875$$

$$\frac{\sigma_{FG,1}}{\sigma_F} = 13,52 > 1,4 = S_F \min \Rightarrow \text{Ja (Sicher)}$$

1,5 P

mit

$$\sigma_{FG,1} = 555 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_F = \sigma_{FO,1} \cdot K_A \cdot K_{V(N_1)} = 41,05 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{FO,1} = 19,726 \text{ N/mm}^2$$

## Aufgabe 5 (8 Punkte)

5.1 Was gilt qualitativ für das Übersetzungsverhältnis bei Zahnradgetrieben, die dem Verzahnungsgesetz folgen? (1 Punkt)

5.2 Betrachtet wird das in Abbildung 5.1 dargestellte Stirnradgetriebe. Die Antriebsdrehzahl ist negativ. Geben Sie das Vorzeichen der Antriebsdrehzahl  $n_{ab}$  an. (1 Punkt)

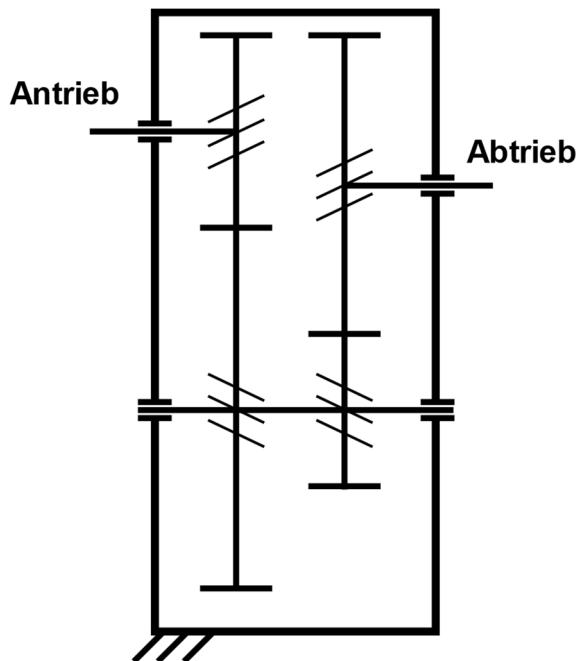


Abbildung 5.1: Zweistufiges Stirnradgetriebe

5.3 Bei der Auslegung einer schrägverzahnten Zahnradpaarung vergrößern Sie den Betrag der negativen Profilverschiebung an Zahnrad 1, während Zahnrad 2 unverändert bleibt. An beiden Zahnräden tritt kein Unterschnitt auf. Beantworten Sie folgende Fragen. (2,5 Punkte)

5.3.1 Wie verändert sich der Achsabstand der Stirnradpaarung?

5.3.2 Wie verändert sich der Grundkreisdurchmesser  $d_{b1}$  von Zahnrad 1?

5.3.3 Wie verändert sich die Stirnzahndicke  $s_{t1}$  von Zahnrad 1?

5.3.4 Wie verändert sich der Modul von Zahnrad 1?

5.4 Beantworten Sie nachfolgende Fragen zu Profilverschiebungen bei Zahnrädern. <i>(1,5 Punkte)</i>	
5.4.1	Welcher aus der Vorlesung bekannte Fall der Profilverschiebung liegt vor, wenn ein $V_{\text{plus}}$ -Rad und ein $V_{\text{minus}}$ -Rad kombiniert werden und der Achsabstand dem Null-Achsabstand entspricht?
5.4.2	Welcher Zahnradsschaden wird durch einen stark negativen Profilverschiebungsfaktor begünstigt?
5.5 Nennen Sie einen Grund dafür, dass Zahnflankenkorrekturen an Zahnrädern vorgenommen werden. <i>(1 Punkt)</i>	
5.6 Nennen Sie eine typische Zahnflankenkorrektur, welche das Kantentragen verhindert. <i>(1 Punkt)</i>	

## Lösung zur Aufgabe 5

### 5.1 Verzahnungsgesetz

**Σ 1 P**

Eine der beiden Antworten ist zu nennen:

Zahnradgetriebe zeichnen sich dadurch aus, dass sie ein **konstantes Übersetzungsverhältnis** haben.

Das Übersetzungsverhältnis ist **unabhängig** vom **Betriebspunkt**.

**1 P**

### 5.2 Zweistufiges Stirnradgetriebe

**Σ 1 P**

Bei einem zweistufigen Stirnradgetriebe mit Außenverzahnungen führt der Antrieb des Getriebes mit einer negativen Drehrichtung zu einer **negativen Abtriebsdrehzahl**.

**1 P**

### 5.3 Geometrische Zusammenhänge

**Σ 2,5 P**

Bei Vergrößerung der negativen Profilverschiebung am Zahnrad 1 muss der Achsabstand des Zahnradgetriebes **kleiner** werden, um ein ideales Abwälzen der Zähne zu erreichen.

**0,5 P**

Der Grundkreisdurchmesser verändert sich nicht bei einer Profilverschiebung und bleibt somit **gleich**.

**0,5 P**

Bei Vergrößerung der negativen Profilverschiebung am Zahnrad 1 wird die Stirnzahndicke  $s_{t1}$  **kleiner**.

**1 P**

Der Modul der Verzahnung bleibt **gleich**.

**0,5 P**

### 5.4 Profilverschiebungen

**Σ 1,5 P**

Bei der vorliegenden Verzahnung handelt es sich um eine **V-Null-Verzahnung**.

**0,5 P**

Infolge der starken negativen Profilverschiebung am Zahnrad, besteht die Gefahr eines **Zahnbruchs**.

**1 P**

### 5.5 Zahnradauslegung

**Σ 1 P**

Eine der **fettgedruckten** Antworten ist zu nennen.

Als Antwort ist das **Verringern von Eingriffsstößen** zu nennen, oder als Grund für deren Auftreten die:

- **Elastische Verformung des Lagers**
- **Elastische Verformung der Welle**
- **Elastische Verformung des Zahnrades**
- **Elastische Verformung des Gehäuses**

**1 P**

### 5.6 Zahnflankenkorrekturen

**Σ 1 P**

Eine der folgenden Antwortmöglichkeiten ist zu nennen:

- **Endrücknahme**
- **Breitenballigkeit**
- **Flankenlinienwinkelkorrektur**

**1 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 Getriebe eines Elektrofahrzeugs aus den im Elementkatalog vorgegebenen Maschinenelementen zusammen. Geben Sie hierzu für jeden Bauraum das gewählte Maschinenelement, die gewählte Variante, ob die Variante seitlich gespiegelt dargestellt ist und das jeweilige charakteristische Maß an. (18 Punkte)

### Beachten Sie folgende Aufgabenstellung:

Gestalten Sie die Lagerungen, die Abdichtungen, die Verzahnung sowie die Welle-Nabe-Verbindungen eines Getriebes für ein Elektrofahrzeug. Die Antriebswelle treibt über eine vorgeschaltete Zwischenwelle den Korb des Differentialgetriebes an. Im Korb sind zwei mitdrehende Ausgleichskegelräder positioniert, von denen nur eins in der Skizze dargestellt ist. Die Ausgleichskegelräder sind drehbar auf einem Bolzen gelagert, der fest mit dem Korb verbunden ist und verteilen die Drehbewegung auf die beiden Abtriebswellen.

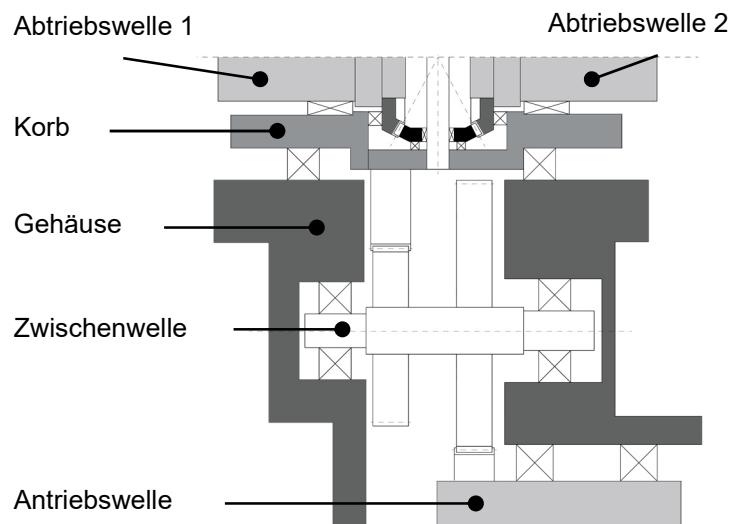


Abbildung 1: Prinzipskizze des Differentialgetriebes

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

### Lagerung:

- Die schnell rotierende und gering belastete Antriebswelle erfährt im Betrieb signifikante Temperaturschwankungen. Ihre Lagerung soll davon so wenig wie möglich beeinflusst werden. Am Antriebsritzel ist eine enge axiale Führung erforderlich. Auf die Lager sollen möglichst geringe Lagerkräfte wirken.
- Für die bei hohen Drehzahlen betriebene Zwischenwelle ist eine spielfreie axiale Führung vorzusehen. Die vergleichsweise geringe Last wird alleine durch die Verzahnung hervorgerufen.
- Die Lager des Korbs erfahren durch die Verzahnung hohe Lasten und werden bei geringen Drehzahlen betrieben. Es ist eine spielfreie Lagerung vorzusehen.

### Welle-Nabe-Verbindung (WNV):

- Die formschlüssige WNV des Ritzels mit der Antriebswelle soll die Last gleichmäßig auf den Umfang der Welle verteilen.
- Die formschlüssige WNV des angetriebenen Rades und der Zwischenwelle soll möglichst kostengünstig ausgeführt werden.

### Abdichtung:

- Wählen Sie einen für den Wärmetransport geeigneten Schmierstoff. Dichten Sie das Lagergehäuse gegen den Austritt dieses Schmierstoffes ab.
- Die Abdichtung der Antriebswelle soll wartungsfrei ausgelegt werden.

### Gehäuse:

- Bei dem Gehäuse handelt es sich um ein Gussgehäuse, das in der Zeichenebene geteilt ist. Die beiden Gehäusehälften werden verschraubt. Stellen Sie sicher, dass beide Gehäusehälften eindeutig positioniert und montiert werden können.

**Tabelle 1 zur Konstruktionsaufgabe****K.1 Fragen zur Konstruktion (6 Punkte)****Lagerung der Antriebswelle**

K.1.1	Welcher Lagerring erfährt Umfangslast, wenn die Hauptbelastung durch die Zahnkräfte zwischen Ritzel und Rad hervorgerufen wird?
K.1.2	Welche Passungsart sollte für diesen Lagerring gewählt werden?
K.1.3	Wie sollte der Abstand zwischen den Lagern gewählt werden?

**Lageranordnung der Zwischenwelle**

K.1.4	Mit welchem Element können Sie die Vorspannung für die geforderte Lageranordnung einstellen?
K.1.5	Welche Lageranordnung ermöglicht eine spielfreie axiale Führung?
K.1.6	Welche Kontaktart zwischen Wälzkörper und Lagerring eignet sich bei geringen Lasten am besten für hohe Drehzahlen?

**Abdichtung**

K.1.7	Wie groß sollte der Winkel einer Montagefase sein, um einen O-Ring in einem Gehäuse montieren zu können?
K.1.8	Welcher Schmierstoff eignet sich gut für den Wärmetransport?
K.1.9	Welches Dichtungselement kann zur Abdichtung zwischen Abtriebswelle und Gehäusedeckel genutzt werden?

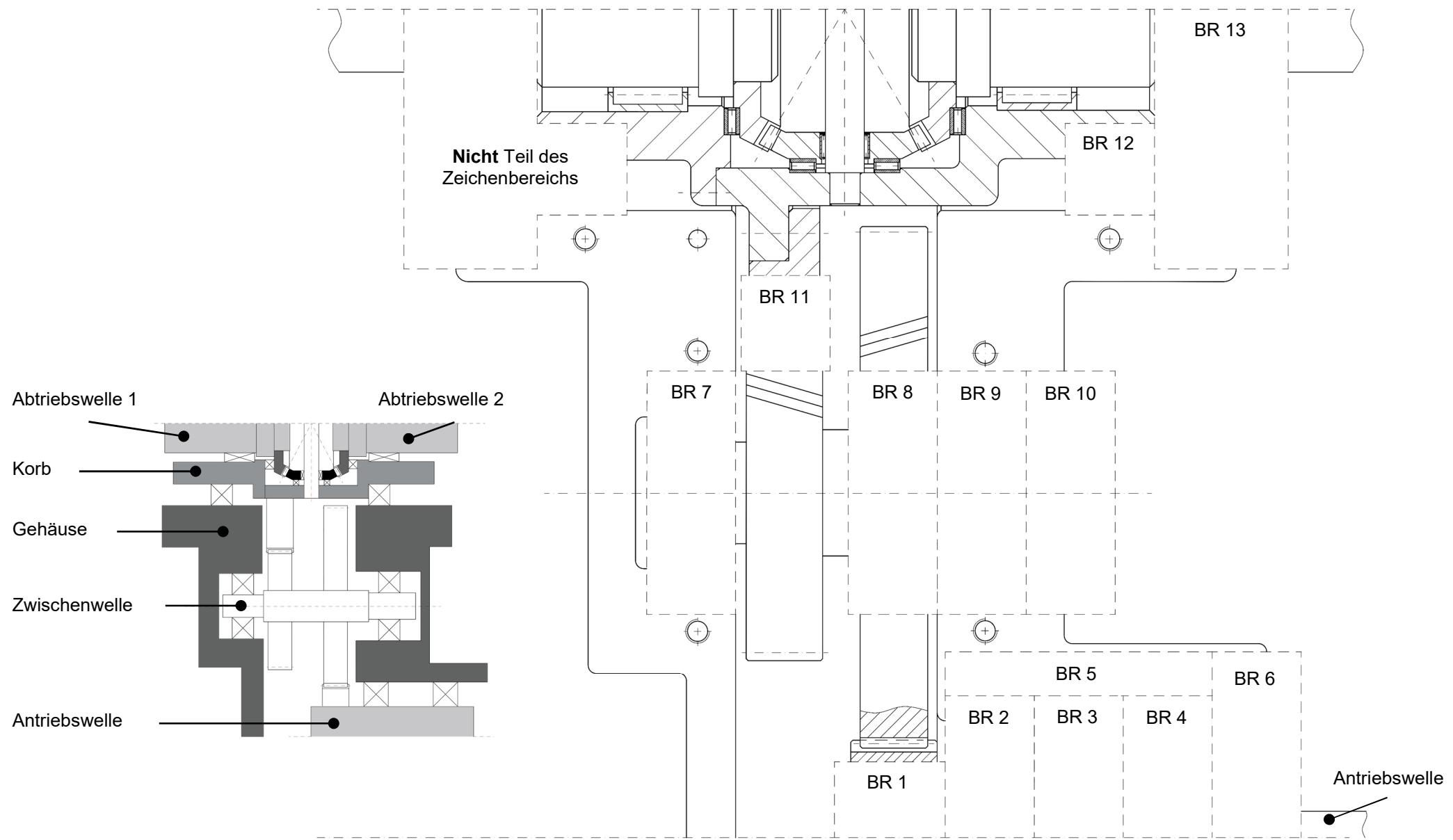
**Montierbarkeit**

K.1.10	Wie viele Anlageflächen kann es pro Bauteilpaar in axialer Richtung maximal geben?
K.1.11	Warum müssen Funktionsflächen von Gussbauteilen nachbearbeitet werden?

**Welle-Nabe-Verbindung**

K.1.12	In dieser Aufgabe sollen Sie eine formschlüssige Welle-Nabe-Verbindung verwenden: Nennen Sie eine weitere Verbindungsart für Welle-Nabe-Verbindungen.
--------	---

## Hilfsblatt 1 zur Konstruktionsaufgabe



## Tabelle 1 zur Konstruktionsaufgabe

K.1 Fragen zur Konstruktion (**6 Punkte**)

### Lagerung der Antriebswelle

K.1.1	Welcher Lagerring erfährt Umfangslast, wenn die Hauptbelastung durch die Zahnkräfte zwischen Ritzel und Rad hervorgerufen wird? ( <b>Innenring</b> ) ( <b>0,5 P</b> )
K.1.2	Welche Passungsart sollte für diesen Lagerring gewählt werden? ( <b>feste Passung, Presspassung</b> ) ( <b>0,5 P</b> )
K.1.3	Wie sollte der Abstand zwischen den Lagern gewählt werden? ( <b>groß, weit</b> ) ( <b>0,5 P</b> )

### Lageranordnung der Zwischenwelle

K.1.4	Mit welchem Element können Sie die Vorspannung für die geforderte Lageranordnung einstellen? ( <b>Deckel und Passscheibe</b> ) ( <b>0,5 P</b> )
K.1.5	Welche Lageranordnung ermöglicht eine spielfreie axiale Führung? ( <b>angestellte Lagerung, X-/O-Anordnung</b> ) ( <b>0,5 P</b> )
K.1.6	Welche Kontaktart zwischen Wälzkörper und Lagerring eignet sich bei geringen Lasten am besten für hohe Drehzahlen? ( <b>Punktkontakt</b> ) ( <b>0,5 P</b> )

### Abdichtung

K.1.7	Wie groß sollte der Winkel einer Montagefase sein, um einen O-Ring in einem Gehäuse montieren zu können? ( <b>15°</b> ) ( <b>0,5 P</b> )
K.1.8	Welcher Schmierstoff eignet sich gut für den Wärmetransport? ( <b>Öl</b> ) ( <b>0,5 P</b> )
K.1.9	Welches Dichtungselement kann zur dynamischen Abdichtung zwischen Abtriebswelle und Gehäusedeckel genutzt werden? ( <b>RWDR, Labyrinthdichtung</b> ) ( <b>0,5 P</b> )

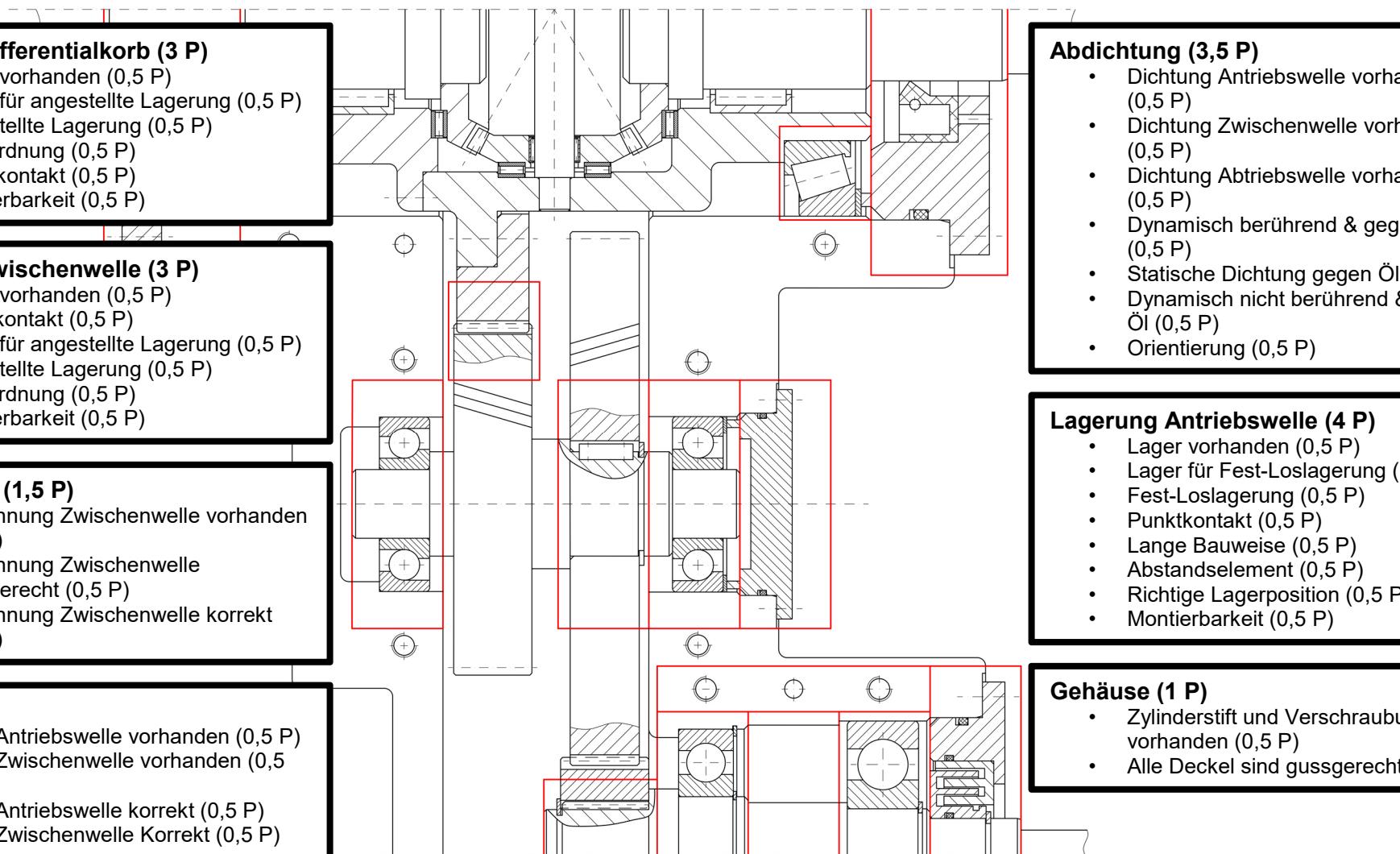
### Montierbarkeit

K.1.10	Wie viele Anlageflächen kann es pro Bauteilpaar in axialer Richtung maximal geben? ( <b>eine, 1</b> ) ( <b>0,5 P</b> )
K.1.11	Warum müssen Funktionsflächen an Gussbauteilen nachbearbeitet werden? ( <b>glatte Anlagefläche, o.ä.</b> ) ( <b>0,5 P</b> )

### Welle-Nabe-Verbindung

K.1.12	In dieser Aufgabe sollen Sie eine formschlüssige Welle-Nabe-Verbindung verwenden: Welche weitere Verbindungsart für Welle-Nabe-Verbindungen kennen Sie? ( <b>Reib-/Kraftschluss, Stoffschluss</b> ) ( <b>0,5 P</b> )
--------	--

## Musterlösung

**Lagerung Differentialkorb (3 P)**

- Lager vorhanden (0,5 P)
- Lager für angestellte Lagerung (0,5 P)
- Angestellte Lagerung (0,5 P)
- X-Anordnung (0,5 P)
- Linienkontakt (0,5 P)
- Montierbarkeit (0,5 P)

**Lagerung Zwischenwelle (3 P)**

- Lager vorhanden (0,5 P)
- Punktkontakt (0,5 P)
- Lager für angestellte Lagerung (0,5 P)
- Angestellte Lagerung (0,5 P)
- X-Anordnung (0,5 P)
- Montierbarkeit (0,5 P)

**Verzahnung (1,5 P)**

- Verzahnung Zwischenwelle vorhanden (0,5 P)
- Verzahnung Zwischenwelle normgerecht (0,5 P)
- Verzahnung Zwischenwelle korrekt (0,5 P)

**WNV (2 P)**

- WNV Antriebswelle vorhanden (0,5 P)
- WNV Zwischenwelle vorhanden (0,5 P)
- WNV Antriebswelle korrekt (0,5 P)
- WNV Zwischenwelle Korrekt (0,5 P)

**Abdichtung (3,5 P)**

- Dichtung Antriebswelle vorhanden (0,5 P)
- Dichtung Zwischenwelle vorhanden (0,5 P)
- Dichtung Abtriebswelle vorhanden (0,5 P)
- Dynamisch berührend & gegen Öl (0,5 P)
- Statische Dichtung gegen Öl (0,5 P)
- Dynamisch nicht berührend & gegen Öl (0,5 P)
- Orientierung (0,5 P)

**Lagerung Antriebswelle (4 P)**

- Lager vorhanden (0,5 P)
- Lager für Fest-Loslagerung (0,5 P)
- Fest-Loslagerung (0,5 P)
- Punktkontakt (0,5 P)
- Lange Bauweise (0,5 P)
- Abstandselement (0,5 P)
- Richtige Lagerposition (0,5 P)
- Montierbarkeit (0,5 P)

**Gehäuse (1 P)**

- Zylinderstift und Verschraubung vorhanden (0,5 P)
- Alle Deckel sind gussgerecht (0,5 P)

## Musterlösung zur Konstruktionsaufgabe

Bauraum	Element	Variante	Seitlich gespiegelt?	Maß
1	5	2	ja	480
2	2	12	ja	500
3	1	1	Ja/nein	490
4	2	1	ja	480
5	6	3	ja/nein	-
6	1	3	ja	470
7	2	3	nein	480
8	5	6	nein	500
9	2	8	ja	480
10	1	8	ja	-
11	4	1	nein	-
12	3	7	ja	700
13	1	6	ja	690

## **Abdichtung** **Σ 3,5 P**

### Dichtung Antriebswelle vorhanden

Auf der Antriebswelle (BR 2-4,6) ist ein abdichtender Deckel (E1; V2-9) vorhanden. 0,5 P

### Dichtung Zwischenwelle vorhanden

Auf der Zwischenwelle (BR 7-10) ist ein abdichtender Deckel (E1; V2-9) vorhanden. 0,5 P

### Dichtung Abtriebswelle vorhanden

Auf der Propellerwelle (BR 12,13) ist ein abdichtender Deckel (E1; V2-9) vorhanden. 0,5 P

### Dynamisch berührende Dichtung

In den für Dichtungen in Frage kommenden Bauräumen (BR 2-4, 6-10,12,13) sind genau zwei dynamische Dichtung vorhanden (E1; V2-7). 0,5 P

### Statische Dichtung

In den für Dichtungen in Frage kommenden Bauräumen (BR 2-4, 6-10,12,13) ist mindestens eine statische Dichtung vorhanden (E1; V8,9). 0,5 P

### Dynamisch nicht berührende Dichtung

In den für Dichtungen in Frage kommenden Bauräumen (BR 2-4, 6-10,12,13) sind genau zwei dynamische Dichtung vorhanden (E1; V2-7). 0,5 P

### Orientierung

In den für Dichtungen in Frage kommenden Bauräumen sind mindestens zwei richtig angeordnete abdichtende Deckel vorhanden (BR 2-4, 6-10,12,13: E1; V2-9; gespiegelt) und keine falsch angeordneten abdichtenden Deckel (BR 2-4,6-10,12,13: E1; V2-9; ungespiegelt). 0,5 P

## **Lagerung Antriebswelle** **Σ 4 P**

### Lager vorhanden

In den Bauräumen, die eine Lagerung der Antriebswelle ermöglichen (BR 2-4,6), sind genau zwei Lager (E2,3) vorhanden. 0,5 P

### Lager für Fest-/Loslagerung

In den Bauräumen, die eine Lagerung der Antriebswelle ermöglichen (BR 2-4,6), sind zwei Lager, die sich für eine Fest-/Loslagerung eignen (E2; V1,2,4,5 & E3; V1,2,6,11) und kein Lager, das sich nicht für eine Fest-/Loslagerung eignet (E2; V6-12 & E3; V3-5,7-9,12), vorhanden. 0,5 P

### Fest-/Loslagerung

In den Bauräumen, die eine Lagerung der Antriebswelle ermöglichen (BR 2-4,6), sind genau ein Loslager mit Gussgehäuse (E2; V1,2), genau ein Festlager mit Gussgehäuse (E2; V4,5) und keine weiteren Lager vorhanden. 0,5 P

### Punktkontakt

In den Bauräumen, die eine Lagerung der Antriebswelle ermöglichen (BR 2-4,6), ist mindestens ein Lager mit Punktkontakt (E2; V1-3,5-8,12 & E3; V1,2,5,6,9,10,11) und kein Lager mit Linienkontakt vorhanden (E2; V4,9,10,11 & E3; V3,4,7,8,12). 0,5 P

### Lange Bauweise

In den Bauräumen, die eine Lagerung der Antriebswelle ermöglichen (BR 2-4,6), sind genau 2 Lager mit Gussgehäuse (E2) vorhanden, die nicht direkt aneinander liegen. 0,5 P

Abstandselement

In den Bauräumen, die eine Lagerung der Antriebswelle ermöglichen (BR 2-4,6) sind genau 2 Lager mit Gussgehäuse (E2) vorhanden, die nicht direkt aneinander liegen. Zwischen den beiden Lagern ist mindestens ein Abstandselement vorhanden (E1: V1)

0,5 P

Richtige Lagerposition

In den Bauräumen, die eine Lagerung der Antriebswelle ermöglichen (BR 2-4,6) wurde eine Fest-/Loslagerung umgesetzt. Das Festlager ist näher an der Verzahnung (BR 1) als das Loslager.

0,5 P

Montierbarkeit

In den Bauräumen, die eine Lagerung der Antriebswelle ermöglichen (BR 2-4,6), sind mindestens drei Maße angegeben. Die Maße werden von links (BR 2) nach rechts (BR 3,4,6) kleiner.

0,5 P

**Gehäuse**

**Σ 1 P**

Zylinderstift und Verschraubung vorhanden

Im Gehäusebauraum (BR 5) ist ein gussgerechtes Gehäuseteil mit Verschraubung in der Nähe der Lager und einer Bohrung für einen Passstift (E6: V3) vorhanden

0,5 P

Deckel gussgerecht

In den für Dichtungen in Frage kommenden Bauräumen (BR 6,10,13) sind drei gussgerechte Deckel (E1: V3,6,8) vorhanden.

0,5 P

**Lagerung Differentialkorb**

**Σ 3 P**

Lager vorhanden

In den Bauräumen, die eine Lagerung des Differentialkorbs ermöglichen (BR 12,13), ist genau ein Lager (E2,3) vorhanden.

0,5 P

Lager für angestellte Lagerung

In den Bauräumen, die eine Lagerung des Differentialkorbs ermöglichen (BR 12,13), ist ein Lager vorhanden, das sich für eine angestellte Lagerung eignet (E2; 3,6-9,11 & E3; V2-5,7-10) und kein Lager, das sich nicht für eine angestellte Lagerung eignet (E2; V1,2,4,5,10 & E3; V1,2,6,11,12) vorhanden.

0,5 P

Angestellte Lagerung

In den Bauräumen, die eine Lagerung des Differentialkorbs ermöglichen (BR 12,13), ist genau 1 Lager (E2,3) vorhanden. Das Lager überträgt Axialkräfte von links unten nach rechts oben (E2; V7,9,11 ungespiegelt & E3; V3,9 ungespiegelt & E2; V3,6,8,12 gespiegelt & E3; V4,5,7,8,10 gespiegelt).

0,5 P

X-Anordnung

In den Bauräumen, die eine Lagerung des Differentialkorbs ermöglichen (BR 12,13), ist genau 1 Lager (E3) vorhanden. Das Lager in BR 12 überträgt Axialkräfte von links unten nach rechts oben (E3; V7 gespiegelt).

0,5 P

Linienkontakt

In den Bauräumen, die eine Lagerung des Differentialkorbs ermöglichen (BR 12,13), ist ein Lager mit Linienkontakt (E2; V4,9-11 & E3; V3,4,7,8,12) und kein Lager mit Punktkontakt (E2; V1-3,5-8,12 & E3; V1,2,5,6,9-11) vorhanden.

0,5 P

### Montierbarkeit

In den Bauräumen, die eine Lagerung des Differentialkorbs ermöglichen (BR 12,13), sind mindestens zwei Maße angegeben. Die Maße werden von links (BR 12) nach rechts (BR 13) kleiner. Die Spiegelung der Bauteile ermöglicht die Montage von rechts nach links.

0,5 P

### Lagerung Zwischenwelle

**Σ 3 P**

#### Lager vorhanden

In den Bauräumen, die eine Lagerung der Zwischenwelle ermöglichen (BR 7-10), sind genau zwei Lager (E2,3) vorhanden.

0,5 P

#### Lager für angestellte Lagerung

In den Bauräumen, die eine Lagerung der Zwischenwelle ermöglichen (BR 7-10), ist mindestens ein Lager, das sich für eine angestellte Lagerung eignet (E2; 3,6-9,11 & E3; V2-5,7-10) und kein Lager, das sich nicht für eine angestellte Lagerung eignet (E2; V1,2,4,5,10 & E3; V1,2,6,11,12) vorhanden.

0,5 P

#### Angestellte Lagerung

In den Bauräumen, die eine Lagerung der Zwischenwelle ermöglichen (BR 7-10), sind genau 2 Lager (E2,3) vorhanden. Eines der Lager überträgt Axialkräfte von links oben nach rechts unten (E2; V3,6,8,12 ungespiegelt & E3; V4,5,7,8,10 ungespiegelt & E2; V7,9,11 gespiegelt & E3; V3,9 gespiegelt). Das andere Lager überträgt Axialkräfte von links unten nach rechts oben (E2; V7,9,11 ungespiegelt & E3; V3,9 ungespiegelt & E2; V3,6,8,12 gespiegelt & E3; V4,5,7,8,10 gespiegelt).

0,5 P

#### X-Anordnung

In den Bauräumen, die eine Lagerung der Zwischenwelle ermöglichen (BR 7-10), sind genau 2 Lager im Gussgehäuse (E2) vorhanden. Das linke Lager überträgt Axialkräfte von links oben nach rechts unten (E2; V3,6,8,12 ungespiegelt & E2; V7,9,11 gespiegelt). Das rechte Lager überträgt Axialkräfte von links unten nach rechts oben (E2; V7,9,11 ungespiegelt & E2; V3,6,8,12 gespiegelt).

0,5 P

#### Punktkontakt

In den Bauräumen, die eine Lagerung der Zwischenwelle ermöglichen (BR 7-10), ist mindestens ein Lager mit Punktkontakt (E2; V1-3,5-8,12 & E3; V1,2,5,6,9,10,11) und kein Lager mit Linienkontakt vorhanden (E2; V4,9,10,11 & E3; V3,4,7,8,12).

0,5 P

#### Montierbarkeit

In den Bauräumen der Zwischenwelle (BR 7-10), sind mindestens zwei Maße angegeben. Die Maße werden von links (BR 8) nach rechts (BR 10) kleiner. Die Spiegelung der Bauteile ermöglicht die Montage von rechts nach links.

0,5 P

### Verzahnung

**Σ 1,5 P**

#### Verzahnung Zwischenwelle vorhanden

Im Bauraum für die Schrägverzahnung (BR 11) ist ein Verzahnungselement (E4) vorhanden.

0,5 P

#### Normgerecht Verzahnungsdarstellung

Im Bauraum für die Schrägverzahnung (BR 11) ist ein normgerecht dargestelltes Verzahnungselement (E4; V1,2,6) vorhanden.

0,5 P

#### Korrekte Verzahnung

Im Bauraum für die Schrägverzahnung (BR 11) ist ein normgerechtes schrägverzahntes Verzahnungselement (E4; V1) vorhanden.

0,5 P

**Welle-Nabe-Verbindung**

WNV an der Antriebswelle vorhanden

Im Bauraum der WNV der Antriebswelle (BR 1) ist eine WNV (E5) vorhanden. 0,5 P

WNV an der Zwischenwelle vorhanden

Im Bauraum der WNV der Zwischenwelle (BR 8) ist eine WNV (E5) vorhanden. 0,5 P

WNV an der Antriebswelle korrekt

Im Bauraum der WNV der Antriebswelle (BR1) ist eine Steckverzahnung (E5; V2 gespiegelt) vorhanden. 0,5 P

WNV an der Zwischenwelle korrekt

Im Bauraum der WNV der Zwischenwelle (BR 8) ist eine Passfederverbindung (E5; V6 ungespiegelt) vorhanden. 0,5 P

