

flkm

May 24, 2024

1 Statische Festigkeitswerte und Festigkeitsnachweis

1.1 Die Kritische Stelle:

Die kritische Stelle befindet sich an dem Punkt, wo das Festlager sitzt.

Dies hat folgende Koordinaten: $L=0.3 \text{ m}$

An diesem Punkt treten folgende kräfte / Momente auf:

$$M_{b.y_{max}} = 240000000 \text{ Nmm}$$

$$M_{b.y_{min}} = -240000000 \text{ Nmm}$$

$$Q_{b.y_{max}} = 800000 \text{ N}$$

$$Q_{b.y_{min}} = -800000 \text{ N}$$

$$N_{x_{max}} = 10000 \text{ N}$$

$$N_{x_{min}} = 0 \text{ N}$$

$$M_{t_{max}} = 184000000.0 \text{ Nmm}$$

$$M_{t_{min}} = 0 \text{ Nmm}$$

1.2 Werkstoffnormwerte

Für die Welle wurde ein legierter Vergütungsstahl 42CrMo4 ausgewählt aufgrund von seiner guten Eigenschaften wie: Hohe Festigkeit und Zähigkeit, Gute Härte, Verschleißfestigkeit, Gute Schweißbarkeit

WERKSTOFF DATENBLATT
GRUPPE Werkzeugstahl, legierter Vergütungsstahl

1.7225

 42CrMo4
AISI 4140

1.7225 ONLINE KAUFEN
CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG

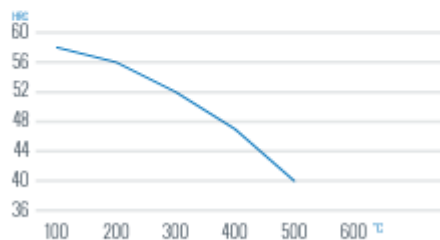
	max.	min.
C (Kohlenstoff)	0,45	0,38
Si (Silicium)	0,40	
Mn (Mangan)	0,90	0,60
Cr (Chrom)	1,20	0,90
Mo (Molybdän)	0,30	0,15
S (Schwefel)	0,035	
P (Phosphor)	0,025	

BEHANDLUNGSMÖGLICHKEITEN

weichglühen	680 - 720 °C	langsame Ofenabkühlung
normalglühen	840 - 880 °C	Luftabkühlung
härten	820 - 880 °C	Öl, Wasser abschrecken
anlassen	100 - 500 °C	vgl. Anlassschaubild

PHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN

Dichte	7,75 kg/dm³
Wärmeleitfähigkeit (20°C)	45 W/m · K
Elastizitätsmodul	210 kN/mm²
spezifische Wärme	460 J/kg · K²
spezifischer elektr. Widerstand	0,19 Ω · mm²/m

ANLASSSCHAUBILD

WERKSTOFF-EIGENSCHAFTEN

	schlecht	mittel	gut	sehr gut
Zerspanbarkeit	1.7225	1.7225	1.7225	1.7225
Zähigkeit	1.7225	1.7225	1.7225	1.7225
Verschleißfestigkeit	1.7225	1.7225	1.7225	1.7225
Schweißbarkeit	1.7225	1.7225	1.7225	1.7225
Korrosionsbeständigkeit	1.7225	1.7225	1.7225	1.7225
Polierbarkeit	1.7225	1.7225	1.7225	1.7225
Härtbarkeit	1.7225	1.7225	1.7225	1.7225

Zugfestigkeit	1.7225	720 (vergütet: 800 - 1300)
R_m (N/mm²)	1.7225	950 - 1100
Bruchdehnung	1.7225	10 - 13
A_5 (%)	1.7225	38 bei 20°
Streckgrenze	1.7225	550
$R_{0,02}$ (N/mm²)	1.7225	800 bei 20°
	1.7225	850 - 1100 bei 20°
	1.7225	1150 bei 20°

Richtwerte für die Härte

100 °C	58 ± 1HRC
200 °C	56 ± 1HRC
300 °C	52 ± 1HRC
400 °C	47 ± 1HRC
500 °C	40 ± 1HRC

Arbeitshärtigkeit HRC 53 - 61

Haftungsausschluss: Da die Werte je nach Verarbeitung variieren können, sind die genannten Werte lediglich Richtwerte und ohne Garantie.

stauberstahl

Stauber GmbH Metalltechnologie • Daimlerstr. 14 • 71639 Muesbach • Telefon: 0 42 26 9 33 33 0

Für den Werkstoff 42CrMo4 ergeben sich aus der Tabelle die Norm-Zugfestigkeit und Streckgrenze:

- Norm-Zugfestigkeit ($R_{m,N}$): 1100 MPa

- Norm-Streckgrenze ($R_{p.N}$): 900 MPa

Die Durchmesser der Proben, an denen die Festigkeitswerte ermittelt wurde sind für vergüteten Vergütungsthal (Aus MEI-Skript 2023):

$$d_{eff.N.m} = 16 \text{ mm} \quad d_{eff.N.p} = 16 \text{ mm}$$

Zur Berechnung werden außerdem folgende Faktoren benötigt:

- ($a_{d.m}$) = 0.3 (Aus MEI-Skript 2023)

- ($a_{d.p}$) = 0.4 (Aus MEI-Skript 2023)

1.2.1 Berechnung der Wellenlänge

$$\sigma_{W_{soll}} = \frac{R_{P.N}}{j_{min}} = \frac{900.00 \text{ MPa}}{1.5} = 600.00 \text{ Mpa}$$

Wobei j_{min} (Die Sicherheit gegen Fließen liegt zwischen 1,2 und 1,8) und J sind Sicherheitsfaktor

- $j = 4$ (da die Sicherheit besser wird, wenn es Hoch ist, und das Gefahr des Versagens ist größer bei der Dynamsichen-FKM)

$$d_{Achse_{min}} \geq \left(\frac{32 \cdot M_{max_b} \cdot j}{\pi \cdot \sigma_{W_{soll}}} \right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{32 \cdot 240000000.00 \text{ N} \cdot \text{mm} \cdot 4}{\pi \cdot 600.00 \text{ Mpa}} \right)^{\frac{1}{3}} = 253.54 \text{ mm}$$

Daraus folgt, dass d (Durchmesser der Welle) = 330 mm

2 Statischer Festigkeitsnachweis der Welle:

2.1 Nennspannungen:

2.1.1 Für die Minimal- und Maximalspannungen ergibt sich:

$$S_{minb_y} = \frac{32 \cdot (M_{by_B.min})}{\pi \cdot d^3} = \frac{32 \cdot (-240000000 \text{ Nmm})}{\pi \cdot (330 \text{ mm})^3} = -68.025 \text{ Mpa}$$

$$S_{maxb_y} = \frac{32 \cdot (M_{by_B.max})}{\pi \cdot d^3} = \frac{32 \cdot (240000000 \text{ Nmm})}{\pi \cdot (330 \text{ mm})^3} = 68.025 \text{ Mpa}$$

$$S_{max_{x,zd}} = \frac{4 \cdot (N_{max_x})}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot (10000 \text{ N})}{\pi \cdot (330 \text{ mm})^2} = 0.117 \text{ Mpa}$$

$$S_{min_{x,zd}} = \frac{4 \cdot (N_{min_x})}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot (0 \text{ N})}{\pi \cdot (330 \text{ mm})^2} = 0.000 \text{ Mpa}$$

$$T_{\max_s y} = \frac{4 \cdot (Q_{y,\max})}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot (800000 \text{ N})}{\pi \cdot (330 \text{ mm})^2} = 9.353 \text{ Mpa}$$

$$T_{\min_s y} = \frac{4 \cdot (Q_{y,\min})}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot (-800000 \text{ N})}{\pi \cdot (330 \text{ mm})^2} = -9.353 \text{ Mpa}$$

2.2 Gesamtspannungen:

$$S_{\min_b} = -\sqrt{S_{\min_b x}^2 + S_{\min_b y}^2 + S_{\min_b z}^2} = -\sqrt{(0.000 \text{ Mpa})^2 + (-68.025 \text{ Mpa})^2 + (0.000 \text{ Mpa})^2} = -68.025 \text{ Mpa}$$

$$S_{\max_b} = \sqrt{S_{\max_b x}^2 + S_{\max_b y}^2 + S_{\max_b z}^2} = \sqrt{(0.000 \text{ Mpa})^2 + (68.025 \text{ Mpa})^2 + (0.000 \text{ Mpa})^2} = 68.025 \text{ Mpa}$$

$$T_{\min_t} = \frac{16 \cdot M_{t,\min}}{\pi \cdot d^3} = \frac{16 \cdot (0.000 \text{ Nmm})}{\pi \cdot 330^3} = 0.000 \text{ Mpa}$$

$$T_{\max_t} = \frac{16 \cdot M_{t,\max}}{\pi \cdot d^3} = \frac{16 \cdot (184000000.000 \text{ Nmm})}{\pi \cdot 330^3} = 26.076 \text{ Mpa}$$

$$S_{\min_{zd}} = -\sqrt{S_{\min_x d}^2 + S_{\min_y d}^2 + S_{\min_z d}^2} = \sqrt{(0.000 \text{ Mpa})^2 + (0.000 \text{ Mpa})^2 + (0.000 \text{ Mpa})^2} = -0.000 \text{ Mpa}$$

$$S_{\max_{zd}} = \sqrt{S_{\max_x d}^2 + S_{\max_y d}^2 + S_{\max_z d}^2} = \sqrt{(0.117 \text{ Mpa})^2 + (0.000 \text{ Mpa})^2 + (0.117 \text{ Mpa})^2} = 0.117 \text{ Mpa}$$

$$T_{\min_s} = -\sqrt{T_{\min_x s}^2 + T_{\min_y s}^2 + T_{\min_z s}^2} = -\sqrt{(0.000 \text{ Mpa})^2 + (-9.353 \text{ Mpa})^2 + (0.000 \text{ Mpa})^2} = -9.353 \text{ Mpa}$$

$$T_{\max_s} = \sqrt{T_{\max_x s}^2 + T_{\max_y s}^2 + T_{\max_z s}^2} = \sqrt{(0.000 \text{ Mpa})^2 + (9.353 \text{ Mpa})^2 + (0.000 \text{ Mpa})^2} = 9.353 \text{ Mpa}$$

2.2.1 Bestimmung der Technologischen Größenfaktoren:

2.2.2 Die Formel für den technologischen Größenfaktor Kd_m lautet:

2.3 Zugfestigkeit

$$Kd_m = \begin{cases} 1 & \text{für } d_{\text{eff}} \leq d_{\text{eff_Nm}} \\ \frac{1-0.7686 \times ad_m \times \log_{10}(\frac{d_{\text{eff}}}{7.5})}{1-0.7686 \times ad_m \times \log_{10}(\frac{d_{\text{eff_Nm}}}{7.5})} & \text{für } d_{\text{eff}} < 250 \text{ und } d_{\text{eff_Nm}} < d_{\text{eff}} \\ \frac{1-1.17 \times ad_m}{1-0.7686 \times ad_m \times \log_{10}(\frac{d_{\text{eff_Nm}}}{7.5})} & \text{für } d_{\text{eff}} > 250 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Für $d_{\text{eff}} = 340 > 250$:

$$Kd_m = \frac{1 - 1.17 \times 0.3}{1 - 0.7686 \times 0.3 \times \log_{10}\left(\frac{16 \text{ mm}}{7.5}\right)} = 0.70$$

2.4 Fließgrenze:

Die Formel für den technologischen Größenfaktor Kd_p lautet:

$$Kd_p = \begin{cases} 1 & \text{für } d_{\text{eff}} \leq d_{\text{eff_Np}} \\ \frac{1 - 0.7686 \times ad_p \times \log_{10}\left(\frac{d_{\text{eff}}}{7.5}\right)}{1 - 0.7686 \times ad_p \times \log_{10}\left(\frac{d_{\text{eff_Np}}}{7.5}\right)} & \text{für } d_{\text{eff}} < 250 \text{ und } d_{\text{eff_Np}} < d_{\text{eff}} \\ \frac{1 - 1.17 \times ad_p}{1 - 0.7686 \times ad_p \times \log_{10}\left(\frac{d_{\text{eff_Np}}}{7.5}\right)} & \text{für } d_{\text{eff}} > 250 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Für $d_{\text{eff}} = 340 > 250$:

$$Kd_p = \frac{1 - 1.17 \times 0.4}{1 - 0.7686 \times 0.4 \times \log_{10}\left(\frac{16 \text{ mm}}{7.5}\right)} = 0.59$$

2.5 Anisotropiefaktor

Bei mehrachsigen Spannungszustände und Schubspannung gilt (Aus MEI-Skript 2023):

$$KA = 1$$

Zugfestigkeit und Fließgrenze des Werkstoffs im Bauteil:

$$R_m = K_{d.m} \times K_A \times R_{m.N} = 0.70 \times 1 \times 1100 \text{ Mpa} = 772.51 \text{ Mpa}$$

$$R_p = K_{d.p} \times K_A \times R_{p.N} = 0.59 \times 1 \times 900 \text{ Mpa} = 532.69 \text{ Mpa}$$

2.6 Bauteilfestigkeit

2.6.1 Plastische Stützwirkungen

Plastische Stützwirkungen werden nur bei Belastungsarten mit Spannungsgradienten berücksichtigt, wie beispielsweise bei Biegung und Torsion.

Die Plastische Formzahl für einen kreis-Querschnitt beträgt (Aus MEI-Skript 2023):

$$K_{p.b} = 1.7$$

$$K_{p.t} = 1.33$$

Damit kann die Stützzahl ermittelt werden.

2.6.2 Berechnung der plastischen Formzahl

Die plastische Formzahl für die Biegung für $R_p \leq 1050 \text{ Mpa}$ (npl_b) und Torsion (npl_t) wird wie folgt berechnet:

$$npl_b = \min \left(\sqrt{\frac{1050 \text{ Mpa}}{R_p}}, K_{pb} \right) \quad \text{falls } R_p < 1050 = \min \left(\sqrt{\frac{1050 \text{ Mpa}}{532.69 \text{ Mpa}}}, 1.7 \right) = 1.40$$

$$npl_t = \min \left(\sqrt{\frac{1050 \text{ Mpa}}{R_p}}, K_{pt} \right) \quad \text{falls } R_p < 1050 = \min \left(\sqrt{\frac{1050 \text{ Mpa}}{532.69 \text{ Mpa}}}, 1.33 \right) = 1.33$$

2.7 Konstruktionsfaktoren

Die Konstruktionsfaktoren berechnen sich folgendermaßen (Aus MEI-Skript 2023):

$$K_{SK_{zd}} = 1$$

$$K_{SK_b} = \frac{1}{npl_b} = 0.71$$

$$K_{SK_s} = 1$$

$$K_{SK_t} = \frac{1}{npl_t} = 0.75$$

Die Konstruktionsfaktoren gelten immer nur für einen Kerbquerschnitt, d.h., es müssen ggf. mehrere Querschnitte berechnet werden.

2.8 Bauteilfestigkeit

Die Festigkeitswerte des Bauteils können wie folgt berechnet werden:

$$S_{SK_{zd}} = \frac{R_m}{K_{SK_{zd}}} = \frac{772.51 \text{ Mpa}}{1} = 772.514 \text{ Mpa}$$

$$S_{SK_b} = \frac{R_m}{K_{SK_b}} = \frac{772.51 \text{ Mpa}}{0.71} = 1084.585 \text{ Mpa}$$

$$T_{SK_s} = f_t \times \frac{R_m}{K_{SK_s}} = 0.577 \times \frac{772.51 \text{ Mpa}}{1.00} = 445.741 \text{ Mpa}$$

$$T_{SK_t} = f_t \times \frac{R_m}{K_{SK_t}} = 0.577 \times \frac{772.51 \text{ Mpa}}{0.75} = 592.835 \text{ Mpa}$$

Der Faktor $f_t = 0.577$ (Aus MEI-Skript 2023)

2.9 Sicherheitsfaktoren

Die Auswahl der Sicherheitsfaktoren richtet sich nach der potenziellen Schadenswirkung und der Wahrscheinlichkeit des Auftretens von angenommenen Spannungen und hohen Belastungen.

Daraus ergibt sich der Gesamtsicherheitsfaktor (Aus MEI-Skript 2023)

$$j_m = 2$$

$$j_p = 1.5$$

$$j_{ges} :$$

2.9.1 Wenn $\frac{R_p}{R_m} = 0.69 \leq 0.75$ gilt es:

$$j_{ges} = j_p = 1.50$$

3 Nachweis der statischen Festigkeit

3.1 Auslastungen für die einzelnen Spannungsarten

$$\begin{aligned} a_{SK_b} &= \frac{\max(|S_{\max_b}|, |S_{\min_b}|) \times j_{ges}}{S_{SK_b}} = \frac{\max(|68.03 \text{ Mpa}|, |68.03 \text{ Mpa}|) \times 1.50}{1084.59 \text{ Mpa}} = 0.09 \\ a_{SK_zd} &= \frac{\max(|S_{\max_zd}|, |S_{\min_zd}|) \times j_{ges}}{S_{SK_zd}} = \frac{\max(|0.12 \text{ Mpa}|, |0.00 \text{ Mpa}|) \times 1.50}{772.51 \text{ Mpa}} = 0.0002 \\ a_{SK_s} &= \frac{\max(|T_{\max_s}|, |T_{\min_s}|) \times j_{ges}}{T_{SK_s}} = \frac{\max(|9.35 \text{ Mpa}|, |9.35 \text{ Mpa}|) \times 1.50}{445.74 \text{ Mpa}} = 0.03 \\ a_{SK_t} &= \frac{\max(|T_{\max_t}|, |T_{\min_t}|) \times j_{ges}}{T_{SK_t}} = \frac{\max(|26.08 \text{ Mpa}|, |0.00 \text{ Mpa}|) \times 1.50}{592.83 \text{ Mpa}} = 0.07 \end{aligned}$$

Da alle Einzelauslastungen kleiner als 1 sind, sind die Einzelnachweise erbracht.

3.2 Auslastung für zusammengesetzte Spannungsarten

Die Auslastung für zusammengesetzte Spannungsarten wird wie folgt berechnet:

$$a_{SK_sv} = \sqrt{(a_{SK_zd} + a_{SK_b})^2 + (a_{SK_s} + a_{SK_t})^2} = \sqrt{(0.00 + 0.09)^2 + (0.03 + 0.07)^2} = 0.1356$$

Damit ist der statische Festigkeitsnachweis erbracht. Das Bauteil wird von den angegebenen Belastungen zu 13.56% ausgelastet. Dieser Wert sollte möglichst nahe an 1 liegen, um die besten Ergebnisse zu erzielen. Mit steigendem statischen Nachweis steigt auch die Dynamische-FKM, daher suchen wir einen Wert, der für beide Funktionen geeignet ist.

4 Spannungen für den Dauerfestigkeit (Dynamischer Festigkeitsnachweis der Welle)

5 Dynamische Festigkeitswerte und Festigkeitsnachweis

5.1 Spannungen für Dauerfestigkeitsnachweis:

$$N_m = \frac{N_{max_x} + N_{min_x}}{2} = \frac{10000 \text{ N} + 0 \text{ N}}{2} = 5000.000 \text{ N}$$

$$N_a = \frac{N_{max_x} - N_{min_x}}{2} = \frac{10000 \text{ N} - 0 \text{ N}}{2} = 5000.000 \text{ N}$$

$$Q_a = \frac{Q_{max_y} - Q_{min_y}}{2} = \frac{800000 \text{ N} - -800000 \text{ N}}{2} = 800000.000 \text{ N}$$

$$Q_m = \frac{Q_{max_y} + Q_{min_y}}{2} = \frac{800000 \text{ N} + -800000 \text{ N}}{2} = 0.000 \text{ N}$$

$$M_{b_m} = \frac{M_{by_{max}} + M_{by_{min}}}{2} = \frac{240000000 \text{ Nmm} + -240000000 \text{ Nmm}}{2} = 0.000 \text{ Nmm}$$

$$M_{b_a} = \frac{M_{by_{max}} - M_{by_{min}}}{2} = \frac{240000000 \text{ Nmm} - -240000000 \text{ Nmm}}{2} = 240000000.000 \text{ Nmm}$$

$$M_{t_m} = \frac{M_{t_{max}} + M_{t_{min}}}{2} = \frac{184000000.0 \text{ Nmm} + 0 \text{ Nmm}}{2} = 92000000.000 \text{ Nmm}$$

$$M_{t_a} = \frac{M_{t_{max}} - M_{t_{min}}}{2} = \frac{184000000.0 \text{ Nmm} - 0 \text{ Nmm}}{2} = 92000000.000 \text{ Nmm}$$

$$S_{m_z d} = \frac{4 \cdot N_m}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 5000.0 \text{ N}}{\pi \cdot (330 \text{ mm})^2} = 0.058 \text{ Mpa}$$

$$S_{a_z d} = \frac{4 \cdot N_a}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 5000.0 \text{ N}}{\pi \cdot (330 \text{ mm})^2} = 0.058 \text{ Mpa}$$

$$S_{m_b} = \frac{32 \cdot M_{b_m}}{\pi \cdot d^3} = \frac{32 \cdot 0.000 \text{ Nmm}}{\pi \cdot (330 \text{ mm})^3} = 0.000 \text{ Mpa}$$

$$S_{a_b} = \frac{32 \cdot M_{b_a}}{\pi \cdot d^3} = \frac{32 \cdot 240000000.000 \text{ Nmm}}{\pi \cdot (330 \text{ mm})^3} = 68.025 \text{ Mpa}$$

$$T_{a_q} = \frac{4 \cdot Q_a}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 800000.0 \text{ N}}{\pi \cdot (330 \text{ mm})^2} = 9.353 \text{ Mpa}$$

$$T_{m_q} = \frac{4 \cdot Q_m}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 0.0 \text{ N}}{\pi \cdot (330 \text{ mm})^2} = 0.000 \text{ Mpa}$$

$$T_{m_t} = \frac{16 \cdot M_{t_m}}{\pi \cdot d^3} = \frac{16 \cdot 92000000.000 \text{ Nmm}}{\pi \cdot (330 \text{ mm})^3} = 13.038 \text{ Mpa}$$

$$T_{a_t} = \frac{16 \cdot M_{t_a}}{\pi \cdot d^3} = \frac{16 \cdot 92000000.000 \text{ Nmm}}{\pi \cdot (330 \text{ mm})^3} = 13.038 \text{ Mpa}$$

5.2 Werkstoff-Normwerte und Festigkeitskennwerte für den Werkstoff im Bauteil:

- Normwert für axiale Spannungen $\sigma_{W_{zd_N}}$: 480 Mpa (Aus MEI-Skript 2023)
- Normwert für Schubspannungen $\tau_{W_{s_N}}$: 180 Mpa (Aus MEI-Skript 2023)

5.2.1 Festigkeitskennwerte des Werkstoffs im Bauteil:

- Berechneter Wert für axiale Spannungen $\sigma_{W_{zd}}$

$$\sigma_{W_{zd}} = K_{dm} \cdot K_a \cdot \sigma_{W_{zd_N}} = 0.70 \cdot 1 \cdot 480 \text{ Mpa} = 337.097 \text{ Mpa}$$

- Berechneter Wert für Schubspannungen τ_{W_s}

$$\tau_{W_{zd}} = K_{dm} \cdot K_a \cdot \tau_{W_{s_N}} = 0.70 \cdot 1 \cdot 180 \text{ Mpa} = 126.411 \text{ Mpa}$$

$$t = \frac{D - d}{2} = \frac{340 - 330}{2} = 5.0 \text{ mm } r = 5.0$$

5.3 Formzahlen für den Rundstab mit Umlaufkerbe für $r > 0$ und $d/D < 1$ (Aus MEI-Skript 2023)

$$K_{t,t} = 1 + \frac{1}{\sqrt{0.7 \frac{r}{t} + \frac{20.6}{d} r \left(1 + 2 \frac{r}{d}\right)^2}}$$

$$= 1 + \frac{1}{\sqrt{0.7 \frac{5.0 \text{ mm}}{5.0 \text{ mm}} + \frac{20.6}{330 \text{ mm}} 5.0 \text{ mm} \left(1 + 2 \frac{5.0 \text{ mm}}{330 \text{ mm}}\right)^2}} = 1.985$$

$$K_{t,b} = 1 + \frac{1}{\sqrt{0.2 \frac{r}{t} + \frac{5.5}{d} r \left(1 + 2 \frac{r}{d}\right)^2}}$$

$$= 1 + \frac{1}{\sqrt{0.2 \frac{5.0 \text{ mm}}{5.0 \text{ mm}} + \frac{5.5}{330 \text{ mm}} 5.0 \text{ mm} \left(1 + 2 \frac{5.0 \text{ mm}}{330 \text{ mm}}\right)^2}} = 2.862$$

$$K_{t,zd} = 1 + \frac{1}{\sqrt{0.22 \frac{r}{t} + \frac{2.74}{d} r \left(1 + 2 \frac{r}{d}\right)^2}}$$

$$= 1 + \frac{1}{\sqrt{0.22 \frac{5.0 \text{ mm}}{5.0 \text{ mm}} + \frac{2.74}{330 \text{ mm}} 5.0 \text{ mm} \left(1 + 2 \frac{5.0 \text{ mm}}{330 \text{ mm}}\right)^2}} = 2.946$$

$K_{t,s} = 2.95$ da keine Formzahlen für Schub vorhanden sind, wird hier mit dem größten Wert

$$Fr \quad \frac{t}{d} \quad \text{bzw} \quad \frac{t}{d} > 0.25 \quad \text{ist} \quad \Theta = 0. \quad \text{sonst} \quad \Theta = \frac{1}{4 \cdot \sqrt{\frac{t}{r}} + 2}$$

Werkstoffgruppe	a_g	b_g
Nichtrostender Stahl	0.4	2400
Anderer Stahl	0.50	2700

$$\Theta = \frac{1}{4 \cdot \sqrt{\frac{5.0}{5.0}} + 2} = 0.167$$

5.3.1 Damit sind die bezogenen Spannungsgefälle für die Kerbe:

$$G_\sigma(r) = \frac{2}{r} \cdot (1 + \theta) = \frac{2}{5.0} \cdot (1 + 0.17) = 0.467 \quad \frac{1}{\text{mm}}$$

$$G_\tau(r) = \frac{1}{r} = \frac{1}{5.0} = 0.200 \quad \frac{1}{\text{mm}}$$

5.3.2 und für die Spannungsart:

$$G_\sigma(d) = \frac{2}{d} = \frac{2}{330} = 0.006 \quad \frac{1}{\text{mm}}$$

$$G_{\tau}(d) = \frac{2}{d} = \frac{2}{330} = 0.006 \quad \frac{1}{mm}$$

5.3.3 Für den Werkstoff ergeben sich die Konstanten (Aus MEI-Skript 2023):

$$a_g = 0.5$$

$$b_g = 2700$$

5.4 Die Stützzahlen für die Spannungsart:

$$n_{\sigma}(r) = 1 + \sqrt{G_{\sigma}(r) \cdot mm} \cdot 10^{(-(ag+(\frac{Rm}{bg \cdot \frac{N}{mm^2}})))} = 1 + \sqrt{0.47 \cdot mm} \cdot 10^{(-(0.5+(\frac{772.51}{2700.00 \cdot \frac{N}{mm^2}})))} = 1.11$$

$$n_{\tau}(r) = 1 + \sqrt{G_{\tau}(r) \cdot mm} \cdot 10^{(-(ag+(\frac{0.577 \cdot Rm}{bg \cdot \frac{N}{mm^2}})))} = 1 + \sqrt{0.20 \cdot mm} \cdot 10^{(-(0.5+(\frac{0.577 \cdot 772.51}{2700.00 \cdot \frac{N}{mm^2}})))} = 1.10$$

5.5 Die Stützzahlen für die Spannungsart:

$$da \ G_{\sigma}(d) < 0.1 \text{ gilt :}$$

$$n_{\sigma}(d) = 1 + G_{\sigma}(d) \cdot mm \cdot 10^{(-(ag-0.5+(\frac{Rm}{bg \cdot \frac{N}{mm^2}})))} = 1 + 0.01 \cdot mm \cdot 10^{(-(0.5-0.5+(\frac{772.51}{2700.00 \cdot \frac{N}{mm^2}})))} = 1.00$$

$$da \ G_{\tau}(d) < 0.1 \text{ gilt :}$$

$$n_{\tau}(d) = 1 + G_{\tau}(d) \cdot mm \cdot 10^{(-(ag-0.5+(\frac{0.577 \cdot Rm}{bg \cdot \frac{N}{mm^2}})))} = 1 + 0.01 \cdot mm \cdot 10^{(-(0.5-0.5+(\frac{0.577 \cdot 772.51}{2700.00 \cdot \frac{N}{mm^2}})))} = 1.00$$

5.6 Kerbwirkungszahlen:

$$K_{f.b} = \max(\frac{K_{t.b}}{n_{\sigma(d)} \cdot n_{\sigma(r)}}, \frac{1}{n_{\sigma(d)}}) = \max(\frac{2.86}{1.00 \cdot 1.11}, \frac{1}{1.00}) = 2.57$$

$$K_{f.t} = \max(\frac{K_{t.t}}{n_{\tau(d)} \cdot n_{\tau(r)}}, \frac{1}{n_{\tau(d)}}) = \max(\frac{1.98}{1.00 \cdot 1.10}, \frac{1}{1.00}) = 1.80$$

$$K_{f.zd} = \max(\frac{K_{t.zd}}{n_{\sigma(r)}}, 1) = \max(\frac{2.95}{1.11}, 1) = 2.65$$

$$K_{f.s} = \max(\frac{K_{t.s}}{n_{\tau(r)}}, 1) = \max(\frac{2.95}{1.10}, 1) = 2.69$$

5.7 Rauheitsfaktor

Fertigungsverfahren	Mittenrauhwert Ra [μm]
	mittel
Schneiden	1,6-12,5
Längsdrehen	0,8-12,5
Plandrehen	1,6-12,5
Einstechdrehen	4,2-12,5
Hobeln	1,3-25
Stoßen	1,6-8,35
Schaben	1,6-6,3
Bohren	6,3-12,5
Aufbohren	0,4-3,2
Senken	1,6-6,3
Reiben	0,8-2,1
Umfangs-, Stirnfräsen	1,6-12,5
Räumen	1,6-10,35
Feilen	1,1-6,3
Rund-Längsschleifen	0,2-0,8
Rund-Planschleifen	0,2-1,6
Rund-Einstechschleifen	0,2-0,8
Flach-Umfangsschleifen	0,4-1,6
Flach-Stirnschleifen	0,4-1,6
Polierschleifen	0,05-0,1
Langhubhonen	0,13-0,65
Kurzhubhonen	0,02-0,17
Rundläppen	0,025-0,2

Quelle:(Roloff /Matek Maschinenelemente Normung · Berechnung · Gestaltung)

Rauheitsfaktor des Bauteils beim Flach-Umfangsschleifen

$$R_z = 1.5 \mu\text{m}$$

$$K_\sigma = 1 - 0.22 \cdot \log_{10}\left(\frac{R_z}{\mu\text{m}}\right) \cdot \log_{10}\left(\frac{2 \cdot R_m}{400 \text{ MPa}}\right) = 1 - 0.22 \cdot \log_{10}\left(\frac{1.5 \mu\text{m}}{\mu\text{m}}\right) \cdot \log_{10}\left(\frac{2 \cdot 772.51 \text{ MPa}}{400 \text{ MPa}}\right) = 0.98$$

$$K_\tau = 1 - 0.577 \cdot 0.22 \cdot \log_{10}\left(\frac{R_z}{\mu\text{m}}\right) \cdot \log_{10}\left(\frac{2 \cdot R_m}{400 \text{ MPa}}\right) = 1 - 0.577 \cdot 0.22 \cdot \log_{10}\left(\frac{1.5 \mu\text{m}}{\mu\text{m}}\right) \cdot \log_{10}\left(\frac{2 \cdot 772.51 \text{ MPa}}{400 \text{ MPa}}\right) = 0.99$$

5.8 Randschichtfaktor

Der Randschichtfaktor

Für Bauteile ohne Randschichtverfestigung gilt:

$$K_v = 1$$

5.9 Konstruktionsfaktoren

$$K_{WK_b} = \left(K_{f.b} + \frac{1}{K_{r.\sigma}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_v} = \left(2.57 + \frac{1}{0.98} - 1 \right) \cdot \frac{1}{1.00} = 2.59$$

$$K_{WK_t} = \left(K_{f.t} + \frac{1}{K_{r.\tau}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_v} = \left(1.80 + \frac{1}{0.99} - 1 \right) \cdot \frac{1}{1.00} = 1.82$$

$$K_{WK_{zd}} = \left(K_{f.zd} + \frac{1}{K_{r.\sigma}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_v} = \left(2.65 + \frac{1}{0.98} - 1 \right) \cdot \frac{1}{1.00} = 2.67$$

$$K_{WK_s} = \left(K_{f.s} + \frac{1}{K_{r.\tau}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_v} = \left(2.69 + \frac{1}{0.99} - 1 \right) \cdot \frac{1}{1.00} = 2.70$$

5.10 Bauteilwechselfestigkeit:

Die ertragbaren Nennwerte der Bauteil-Wechselfestigkeit sind:

$$S_{WK.b} = \frac{\sigma_{W_{zd}}}{K_{WK.b}} = \frac{337.10}{2.59} = 130.19 \text{ Mpa}$$

$$S_{WK.zd} = \frac{\sigma_{W_{zd}}}{K_{WK.zd}} = \frac{337.10}{2.67} = 126.11 \text{ Mpa}$$

$$T_{WK.t} = \frac{\tau_{W.s}}{K_{WK.t}} = \frac{126.41}{1.82} = 69.63 \text{ Mpa}$$

$$T_{WK.s} = \frac{\tau_{W.s}}{K_{WK.s}} = \frac{126.41}{2.70} = 46.83 \text{ Mpa}$$

5.11 Mittelspannungsempfindlichkeit

Die Mittelspannungsempfindlichkeit ist ein Maß dafür, wie stark die Ausschlagspannung mit wachsender Mittelspannung abfällt

$$M_\sigma = 0.000035 \cdot \frac{R_m}{MPa} - 0.1 = 0.00035 \cdot \frac{772.51}{MPa} - 0.1 = 0.1704$$

$$M_\tau = 0.577 \cdot M_\sigma = 0.577 \cdot 0.1704 = 0.098$$

5.12 Vergleichspannung

$$S_{m.v} = \sqrt{3 \cdot (T_{m.t} + T_{m.s})^2 + (S_{m.b} + S_{m.zd})^2} = \sqrt{3 \cdot (13.04 + 0.00)^2 + (0.000000 + 0.058459)^2} = 22.58 \text{ Mpa}$$

$$T_{m.v} = 0.577 \cdot S_{m.v} = 0.577 \cdot 22.58 = 13.03 \text{ Mpa}$$

5.13 Bauteil-Ausschlagfestigkeit:

$$M_{\sigma} = 0.1704$$

$$M_{\tau} = 0.098309$$

$$S_{SK_{zd}} = 772.51$$

$$S_{SK_b} = 1084.59$$

$$T_{SK_s} = 445.74$$

$$T_{SK_t} = 592.83$$

$$S_{WK_{zd}} = 126.11$$

$$S_{WK_b} = 130.19$$

$$T_{WK_s} = 46.83$$

$$T_{WK_t} = 69.63$$

5.14 Aus dem Smith-Diagramm lassen sich folgende Werten ablesen:

Daraus ergeben sich nachfolgende Bauteilauslagsapnnungen:

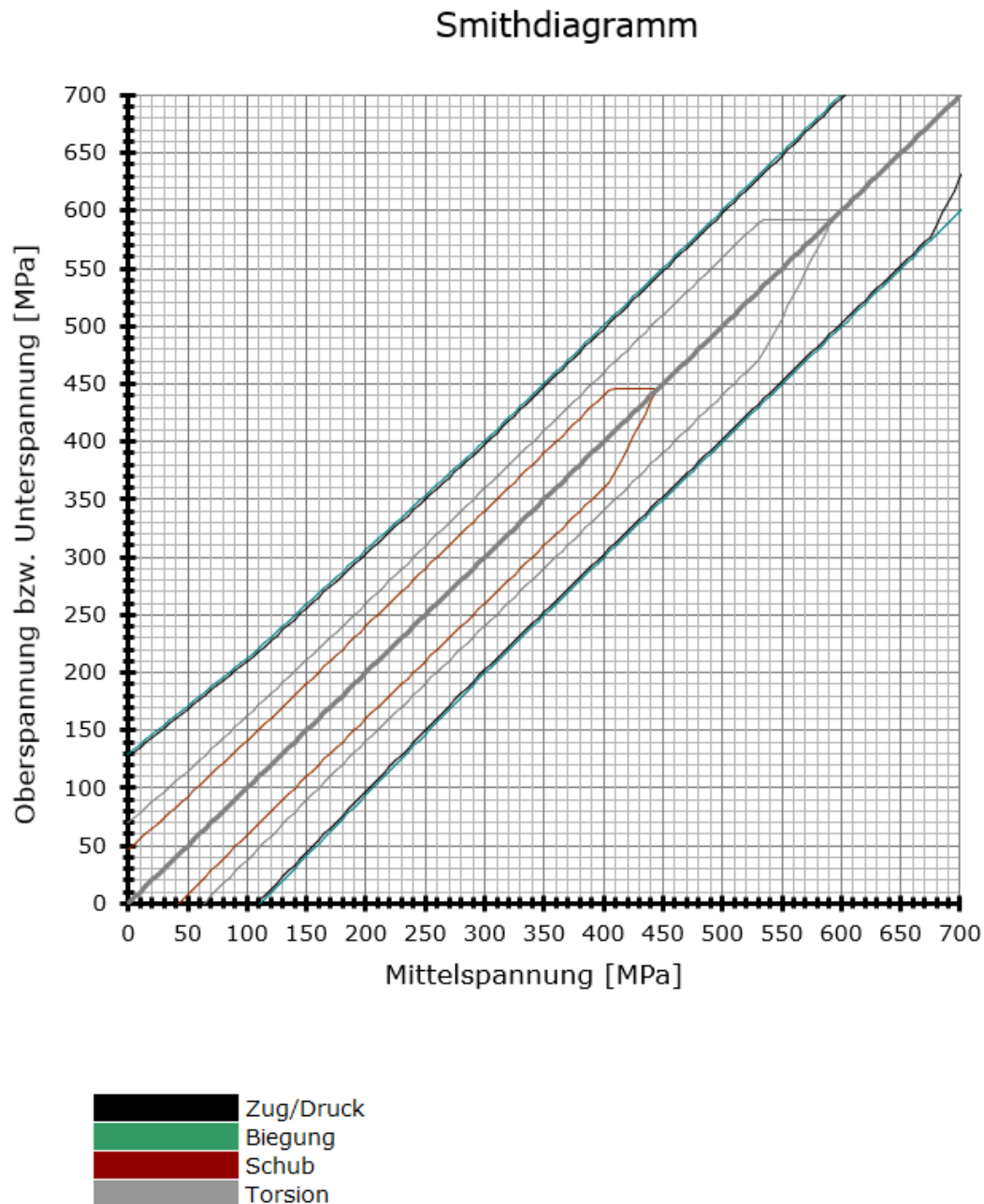
$$S_{o_{zd}} = S_{Ak_{zd}} = 130.000 \text{ Mpa}$$

$$S_{o_b} = S_{AK_b} = 130.730 \text{ Mpa}$$

$$T_{o_s} = T_{Ak_s} = 51.340 \text{ Mpa}$$

$$T_{o_t} = T_{AK_t} = 74.140 \text{ Mpa}$$

5.14.1 Überlasungsfall F1 , Mittelspannung Konstant, Amplitude steigt



5.15 Sicherheitsfaktoren

Da die Schadensfolgen hoch sind und regelmäßige Inspektionen nicht durchgeführt werden, ist der Sicherheitsfaktor gleich.

$$J_d = 1.5$$

5.16 Nachweis der Dauerfestigkeit

Auslastungen für einzelne Spannungsarten

$$a_{AK.b} = \frac{S_{a.b} \cdot J_d}{\min(S_{Ak.b}, 0.75 \cdot R_p \cdot K_{p.b})} = \frac{68.03 \cdot 1.5}{\min(130.73, 0.75 \cdot 532.69 \cdot 1.7)} = 0.7805$$

$$a_{AK.t} = \frac{T_{a.t} \cdot J_d}{\min(T_{Ak.t}, 0.75 \cdot 0.577 \cdot R_p \cdot K_{pt})} = \frac{13.04 \cdot 1.5}{\min(74.14, 0.75 \cdot 0.577 \cdot 532.69 \cdot 1.33)} = 0.2638$$

$$a_{AK.zd} = \frac{S_{a.zd} \cdot J_d}{\min(S_{Ak.zd}, 0.75 \cdot R_p)} = \frac{0.06 \cdot 1.5}{\min(130.00, 0.75 \cdot 532.69)} = 0.0007$$

$$a_{AK.s} = \frac{T_{a.s} \cdot J_d}{\min(T_{Ak.s}, 0.75 \cdot 0.577 \cdot R_p)} = \frac{9.35 \cdot 1.5}{\min(51.34, 0.75 \cdot 0.577 \cdot 532.69)} = 0.2733$$

5.17 Auslastungen für zusammengestzte Spannungsarten:

$$a_{AK.Sv} = \sqrt{(a_{AK.b} + a_{AK.zd})^2 + (a_{AK.t} + a_{AK.s})^2} = \sqrt{(0.78 + 0.0007)^2 + (0.26 + 0.2733)^2} = 0.9480$$

Die Einzelauslastungen sind kleiner 1 , die Gesamtauslastung beträgt 94.80 %. Diese Ergebnisse s deutet darauf hin, dass die Welle unter dynamischen Bedingungen deutlich stärker belastet ist als unter statischen Bedingungen. Dies könnte darauf hindeuten, dass die Welle während ihres Betriebs starken wechselnden Belastungen ausgesetzt ist, die möglicherweise zu Ermüdung und Versagen führen könnten.