

Beispiel 3.2

Statischer Nachweis mit örtlichen Spannungen

Das Einzelteil eine Kugelgelenkverbindung, durch die mehrere Streben in einem Punkt beweglich miteinander verbunden sind, wird während des Betriebes in der im Bild 3.63 gezeigten Weise beansprucht. Diese gezielte Beweglichkeit ist erforderlich, um die gesamte Baugruppe vor Zerstörung zu schützen. Die Kontur des Gehäuseteils stellt den Anschlag dar, bis zu dem die gezielte Beweglichkeit möglich ist. Für das Einzelteil sind ein statischer Festigkeitsnachweis und ein Ermüdungsfestigkeitsnachweis mit örtlichen Spannungen zu führen. Die Hauptspannungen werden mit der FEA berechnet.

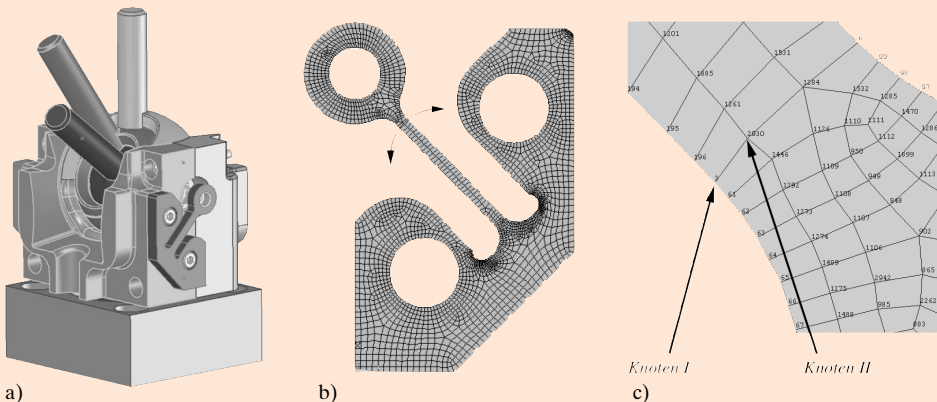


Bild 3.63 Einzelteil der Kugelgelenkverbindung
a) Gesamtbaugruppe, b) Einzelteil mit angreifender Kraft und Beweglichkeiten, c) FEM-Modell mit nachzuweisenden Querschnitt

1. Schritt

$$\sigma_{1,\max} = 727 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \sigma_{2,\max} = 9 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \sigma_{3,\max} = 0 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{Maximale Hauptspannungen}$$

$$\sigma_{1,\min} = -727 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \sigma_{2,\min} = -9 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \sigma_{3,\min} = 0 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{Minimale Hauptspannung}$$

Die Bruchdehnung des Materials Baustahl E 335 ist größer als 6 %, deshalb Vergleichsspannung für duktile Materialien berechnen.

$$\sigma_1 = 727 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \sigma_2 = 9 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \sigma_3 = 0 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{ungünstige Spannungscombination}$$

$$\sigma_v = \sqrt{\left(\frac{1}{2}\right) \cdot \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]} \quad \sigma_v = 731,542 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_H = \frac{1}{3} \cdot (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad \sigma_H = 239,333 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad h = \frac{\sigma_H}{\sigma_v} \quad h = 0,327 \quad \text{Mehrachsigkeit}$$

2. Schritt

$$E = 210\,000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$A = 0,06$$

Bruchdehnung

$$R_{m,N} = 590 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$R_{p,N} = 335 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Nennzugfestigkeit und Nennfließgrenze

$$K_{d,m} = 1$$

$$K_{d,p} = 1$$

Größeneinflussfaktor Tab. 3.25

$$K_A = 0,9$$

Anisotropiefaktor Tab. 3.10

$$R_m = K_{d,m} \cdot K_A \cdot R_{m,N}$$

$$R_m = 531 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Zugfestigkeit

$$R_p = K_{d,p} \cdot K_A \cdot R_{p,N}$$

$$R_p = 301,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Fließgrenze

$$K_{T,m} = 1$$

$$K_{T,p} = 1$$

Temperaturfaktor Tab. 3.28

$$R_{m,T} = K_{T,m} \cdot R_m$$

$$R_{m,T} = 351 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Zugfestigkeit mit Temperatureinfluss

$$R_{p,T} = K_{T,p} \cdot R_p$$

$$R_{p,T} = 301,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Fließgrenze mit Temperatureinfluss

3. Schritt

$$\epsilon_{\text{ref}} = A$$

duktiles Material

$$\epsilon_0 = 0,05$$

minimale ertragbare Gesamtdehnung siehe Tab. 3.29

$$\epsilon_{\text{ertr}} = \epsilon_{\text{ref}}$$

$$\epsilon_{\text{ertr}} = 0,06$$

für $h > \frac{1}{3}$

$$K_p = 1,3$$

plastische Formzahl mit FEM ermittelt

$$n_{\text{pl}} = \text{MIN} \left(\sqrt{E \cdot \frac{\epsilon_{\text{ertr}}}{R_p}}, K_p \right)$$

$$n_{\text{pl}} = 1,3$$

$$K_{\text{NL}} = 1$$

4. Schritt

$$\sigma_{\text{SK}} = n_{\text{pl}} \cdot R_p$$

$$\sigma_{\text{SK}} = 391,95 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Bauteilfestigkeit

5. Schritt

$$j_s = 1$$

$$j_z = 1$$

$$j_m = 1,85$$

Nachweis gegen Bruch, siehe Tab. 3.12 mittlere Schadensfolge und hoher Auftretenswahrscheinlichkeit

$$j_{\text{ges}} = j_s \cdot j_z \cdot \frac{j_m \cdot R_p}{K_{T,m} \cdot R_m}$$

Die restlichen Anteile entfallen, weil $\frac{R_p}{R_m} = 0,568$ und keine hohen Temperaturen vorliegen.

$$j_{\text{ges}} = 1,05$$

6. Schritt

$$a_{\text{SK,zd}} = \frac{\sigma_v}{\bar{\sigma}_{\text{SK}}}$$

$$a_{\text{SK,zd}} = 1,157 \quad \text{Der Auslastungsgrad für diesen Lastfall beträgt 115 \% .}$$

$$j_{\text{ges}}$$

Ermüdungsfestigkeitsnachweis mit örtlichen Spannungen

1.Schritt

$$R_Z = 10 \mu\text{m}$$

$$\sigma_{1,\text{max}} = 727 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{2,\text{max}} = 9 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{3,\text{max}} = 0 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Maximale Hauptspannungen

$\sigma_{1,\min} = -727 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	$\sigma_{2,\min} = -9 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	$\sigma_{3,\min} = 0 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	Minimale Hauptspannungen
$\sigma_{1,a,1} = \frac{\sigma_{1,\max} - \sigma_{1,\min}}{2}$	$\sigma_{1,a,1} = 727 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$		Amplitude Hauptspannung 1, Lastzyklus 1
$\sigma_{1,m,1} = \frac{\sigma_{1,\max} + \sigma_{1,\min}}{2}$	$\sigma_{1,m,1} = 0 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$		Mittelspannung Hauptspannung 1, Lastzyklus 1
$\sigma_{2,a,1} = \frac{\sigma_{2,\max} - \sigma_{2,\min}}{2}$	$\sigma_{2,a,1} = 9 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$		Amplitude Hauptspannung 2, Lastzyklus 1
$\sigma_{2,m,1} = \frac{\sigma_{2,\max} + \sigma_{2,\min}}{2}$	$\sigma_{2,m,1} = 0 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$		Mittelspannung Hauptspannung 2, Lastzyklus 1
$\sigma_{3,a,1} = \frac{\sigma_{3,\max} - \sigma_{3,\min}}{2}$	$\sigma_{3,a,1} = 0 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$		Amplitude Hauptspannung 3, Lastzyklus 1
$\sigma_{3,m,1} = \frac{\sigma_{3,\max} + \sigma_{3,\min}}{2}$	$\sigma_{3,m,1} = 0 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$		Mittelspannung 3, Lastzyklus 1

2. Schritt

$R_{m,N} = 590 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	$R_{p,N} = 335 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$		
$K_{d,m} = 1$	$K_{d,p} = 1$		Größeneinflussfaktor Tab. 3.25
$K_A = 0,9$			Anisotropiefaktor Tab. 3.10
$R_m = K_{d,m} \cdot K_A \cdot R_{m,N}$	$R_m = 531 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$		Zugfestigkeit
$R_p = K_{d,p} \cdot K_A \cdot R_{p,N}$	$R_p = 301,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$		Fließgrenze
$f_{W\sigma} = 0,45$	$\sigma_{W,zd} = f_{W\sigma} \cdot R_m$	$\sigma_{W,zd} = 238,95 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	Werkstoffwechselfestigkeit siehe Tab. 3.13
$f_{W\tau} = 0,577$	$\tau_{W,s} = f_{W\tau} \cdot \sigma_{W,zd}$	$\tau_{W,s} = 137,874 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	Werkstoffwechselfestigkeit für Scherbelastung siehe Tab. 3.33
$K_{T,D} = 1$	Abstand der Knoten		Temperaturfaktor Tab. 3.28
$\sigma_{W,zd,T} = K_{T,D} \cdot \sigma_{W,zd}$	$\sigma_{W,zd,T} = 238,95 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$		Werkstoffwechselfestigkeit für Temperatureinfluss
$\tau_{W,s,T} = K_{T,D} \cdot \tau_{W,s}$	$\tau_{W,s,T} = 137,874 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$		Werkstoffwechselfestigkeit für Scherbelastung mit Temperatureinfluss

3. Schritt

Die Kerbwirkungszahlen werden aus den Formzahlen und den Stützzahlen berechnet.

$\sigma_{1,a,1} = 727 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	Amplitude Hauptspannung 1, Lastzyklus 1 für Knoten an der Oberfläche
$\sigma_{2,a,1} = 9 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	Amplitude Hauptspannung 2, Lastzyklus 1 für Knoten an der Oberfläche
$\sigma_{1,a,1\Delta s} = 9 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	Amplitude Hauptspannung 1, Lastzyklus 1 für Knoten im Bauteilinneren
$\Delta s = 0,3438 \text{ mm}$	Abstand der Knoten
$\sigma_{2,a,1\Delta s} = 8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	Amplitude Hauptspannung 2, Lastzyklus 1 für Knoten im Bauteilinneren

$$G_{\sigma 1} = \frac{1}{\Delta s} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{1,a,1} \Delta s}{\sigma_{1,a,1}}\right) \quad G_{\sigma 1} = 2,873 \frac{1}{\text{mm}}$$

Gesamt-Spannungsgefälle

$$G_{\sigma 2} = \frac{1}{\Delta s} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{2,a,1} \Delta s}{\sigma_{2,a,1}}\right) \quad G_{\sigma 2} = 0,323 \frac{1}{\text{mm}}$$

Die Stielersche Stützzahl wird nach folgender Gleichung berechnet.

$$a_G = 0,5 \quad b_G = 2700 \quad \text{siehe Tab. 3.20}$$

$$n_{\sigma 1} = 1 + \sqrt{G_{\sigma 1} \cdot \text{mm}} \cdot 10 - \left(a_G + \frac{R_m}{b_G \frac{N}{\text{mm}^2}}\right) \quad n_{\sigma 1} = 1,341$$

$$n_{\sigma 2} = 1 + \sqrt[4]{G_{\sigma 2} \cdot \text{mm}} \cdot 10 - \left(a_G + \frac{R_m}{b_G \frac{N}{\text{mm}^2}}\right) \quad n_{\sigma 2} = 1,152$$

$$a_{R,\sigma} = 0,22 \quad R_{m,N,\min} = 400 \frac{N}{\text{mm}^2} \quad \text{siehe Tab. 3.22}$$

$$K_{R,\sigma} = 1 - a_{R,\sigma} \cdot \lg\left(\frac{R_Z}{\mu\text{m}}\right) \cdot \lg\left(\frac{2 \cdot R_m}{R_{m,N,\min}}\right) \quad K_{R,\sigma} = 0,907 \quad \text{Rauheitsfaktor}$$

$$K_V = 1 \quad \text{ohne Randschichtverfestigung}$$

$$K_S = 1 \quad \text{Stahl}$$

$$K_{NL,E} = 1 \quad \text{keine GJL}$$

$$K_f = 2 \quad \text{Schätzwert der Kerbwirkungszahl, siehe Tab. 3.18}$$

$$K_{WK,\sigma 1} = \frac{1}{n_{\sigma 1}} \left[1 + \frac{1}{K_f} \cdot \left(\frac{1}{K_{R,\sigma}} - 1\right)\right] \cdot \frac{1}{K_V} \cdot \frac{1}{K_{NL,E}} \cdot \frac{1}{K_S} \quad K_{WK,\sigma 1} = 0,784 \quad \text{Konstruktionsfaktor}$$

$$K_{WK,\sigma 2} = \frac{1}{n_{\sigma 2}} \left[1 + \frac{1}{K_f} \cdot \left(\frac{1}{K_{R,\sigma}} - 1\right)\right] \cdot \frac{1}{K_V} \cdot \frac{1}{K_{NL,E}} \cdot \frac{1}{K_S} \quad K_{WK,\sigma 2} = 0,913$$

4. Schritt

$$K_{WK,\sigma 1} = \frac{\sigma_{W,zd}}{K_{WK,\sigma 1}} \quad \sigma_{WK,\sigma 1} = 303,627 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$K_{WK,\sigma 2} = \frac{\sigma_{W,zd}}{K_{WK,\sigma 2}} \quad \sigma_{WK,\sigma 2} = 261,71 \frac{N}{\text{mm}^2} \quad \text{Bauteilwechselfestigkeit}$$

$$\text{gewählt Überlastfall 2} \quad R_{zd} = \frac{\sigma_{1,\min}}{\sigma_{1,\max}} \quad R_{zd} = -1 \quad \text{gewählt Bereich 2}$$

$$a_M = 0,35 \quad b_M = -0,1 \quad \text{Tab. 3.23}$$

$$M_\sigma = \frac{\frac{R_m}{N}}{\frac{\text{mm}^2}{1000}} + b_M \quad M_\sigma = 0,086$$

$$K_{AK,\sigma 1} = \frac{1}{1 + M_\sigma \frac{\sigma_{1,m,1}}{\sigma_{1,a,1}}} \quad K_{AK,\sigma 2} = \frac{1}{1 + M_\sigma \frac{\sigma_{2,m,1}}{\sigma_{2,a,1}}}$$

$$\sigma_{AK,\sigma 1} = K_{AK,\sigma 1} \cdot \sigma_{WK,\sigma 1} \quad \sigma_{AK,\sigma 2} = K_{AK,\sigma 2} \cdot \sigma_{WK,\sigma 2}$$

$$\sigma_{AK,\sigma 1} = 303,627 \frac{N}{\text{mm}^2} \quad \sigma_{AK,\sigma 2} = 261,71 \frac{N}{\text{mm}^2} \quad \text{Bauteildauerwechselfestigkeit je nach Mittelspannung}$$

$$\bar{N} = 50\,000 \quad \text{geforderte Zyklenzahl}$$

$$N_D = 1\,000\,000 \quad \text{Knickpunktzahl der Bauteil-Wöhlerlinie}$$

$$A_{ele} = 1 \quad \text{Abstand zwischen Lebensdauer und Wöhlerlinie}$$

$$D_m = \frac{2}{\sqrt[4]{A_{ele}}} \quad D_m = 2 \quad D_{m,\max} = 1; \text{ daraus folgt: } D_m = 1$$

$$k = 5$$

Neigungsexponent der Bauteil-Wöhlerlinie Tab. 3.17

$$K_{BK,zd} = \left(\frac{A_{ele} \cdot N_D \cdot D_m}{N} \right)^{\frac{1}{k}} K_{BK,zd} = 1,821$$

$$\sigma_{BK,\sigma 1} = K_{BK,zd} \cdot \sigma_{AK,\sigma 1} \quad \sigma_{BK,\sigma 1} = 552,772 \frac{N}{mm^2}$$

Bauteilbetriebsfestigkeit

$$\sigma_{BK,\sigma 2} = K_{BK,zd} \cdot \sigma_{AK,\sigma 2} \quad \sigma_{BK,\sigma 2} = 476,461 \frac{N}{mm^2}$$

5. Schritt

$$j_s = 1, j_G = 1, j_F = 1,4$$

siehe Tab. 3.32 mittlere Schadensfolgen, keine regelmäßige Inspektion

$$K_{T,D} = 1$$

keine hohen Temperaturen

$$j_D = j_s \frac{j_F \cdot j_G}{K_{T,D}}$$

$$j_D = 1,4$$

6. Schritt

$$a_{SK,\sigma 1} = \frac{\sigma_{1,a,1}}{\frac{\sigma_{BK,\sigma 1}}{j_D}}$$

$$a_{SK,\sigma 1} = 0,575$$

Einzelbelastungsgrade

$$a_{SK,\sigma 2} = \frac{\sigma_{2,a,1}}{\frac{\sigma_{BK,\sigma 2}}{j_D}}$$

$$a_{SK,\sigma 2} = 0,026$$

$$a_{SK,\sigma 3} = 0$$

$$f_r = 0,578$$

Schubfestigkeitsfaktor nach Tab. 3.27

$$q = \frac{\sqrt{3} - \frac{1}{f_r}}{\sqrt{3} - 3}$$

$$q = 0,00$$

$$a_{NH} = a_{SK,\sigma 1}$$

Maximalwert der Einzelbelastungsgrade

$$a_{GH} = \sqrt{(a_{SK,\sigma 1} - a_{SK,\sigma 2})^2 + (a_{SK,\sigma 2} - a_{SK,\sigma 3})^2 + (a_{SK,\sigma 3} - a_{SK,\sigma 1})^2} \quad a_{GH} = 0,795$$

$$a_{SV} = q \cdot a_{NH} + (1 - q) \cdot a_{GH} \quad a_{SV} = 0,794$$

Der Auslastungsgrad für diesen Lastfall beträgt 79 %.

Tab. 3.10 Anisotropiefaktor K_A (nach FKM-Richtlinie [3.17])

Stahl				
R_m (in N/mm ²)	bis 600	über 600 bis 900	über 900 bis 1200	über 1200
K_A	0,90	0,86	0,83	0,80
Aluminiumknetwerkstoff				
R_m (in N/mm ²)	bis 200	über 200 bis 400	über 400 bis 600	
K_A	1	0,95	0,90	

Tab. 3.12 Sicherheitsfaktor j (nach FKM-Richtlinie [3.17])

		Stahl, duktiler Aluminiumknetwerkstoff			Stahlguss, Grauguss					
					nicht zerstörungsfrei geprüft			zerstörungsfrei geprüft		
		Schadensfolgen hoch	Schadensfolgen mittel	Schadensfolgen gering	Schadensfolgen hoch	Schadensfolgen mittel	Schadensfolgen gering	Schadensfolgen hoch	Schadensfolgen mittel	Schadensfolgen gering
Aufretenswahrscheinlichkeit hoch	j_m	2,0	1,85	1,75	2,8	2,59	2,45	2,5	2,31	2,19
	j_p	1,5	1,4	1,3	2,1	1,96	1,82	1,87	1,75	1,63
	j_{mt}	1,5	1,4	1,3	2,1	1,96	1,82	1,87	1,75	1,63
	j_{pt}	1,0	1,0	1,0	1,4	1,4	1,4	1,25	1,25	1,25
Aufretenswahrscheinlichkeit gering	j_m	1,8	1,7	1,6	2,52	2,38	2,24	2,25	2,13	2,0
	j_p	1,35	1,25	1,2	1,89	1,75	1,68	1,69	1,56	1,5
	j_{mt}	1,35	1,25	1,2	1,89	1,75	1,68	1,69	1,56	1,5
	j_{pt}	1,0	1,0	1,0	1,4	1,4	1,4	1,25	1,25	1,25

 Tab. 3.13 Zug-Druck-Wechselfestigkeitsfaktor $f_{W,\sigma}$ und Schubwechselfestigkeitsfaktor $f_{W,\tau}$ (nach FKM-Richtlinie [3.17])

Werkstoffgruppe	$f_{W,\sigma}$	$f_{W,\tau}$
Einsatzstahl	0,40	0,577
nichtrostender Stahl	0,40	0,577
Schmiedestahl	0,40	0,577
Stahl außer diesen	0,45	0,577
GS	0,34	0,577
GGG	0,34	0,65
GT	0,30	0,75
GG	0,30	0,85
Aluminiumknetwerkstoff	0,30	0,577
Aluminiumgusswerkstoff	0,30	0,75

Tab. 3.17 Knickpunktzyklenzahlen $N_{D,\sigma}$ und Neigungsexponenten sowie Werte $f_{II,\sigma}$ und $f_{II,\tau}$ der Bauteil-Wöhlerlinien (WL) (nach FKM-Richtlinie [3.17])

Normalspannung					
Bauteil	$N_{D,\sigma}$	$N_{D,\sigma,II}$	k_σ	$k_{D,\sigma}$	$f_{II,\sigma}$
Stahl und Eisengusswerkstoff (WL Typ I)					
nicht geschweißt	10^6	–	5	–	1,0
geschweißt	$5 \cdot 10^6$	–	3	–	1,0
Aluminiumwerkstoff und austenitischer Stahl (WL Typ II)					
nicht geschweißt	10^6	10^8	5	15	0,74
geschweißt	$5 \cdot 10^6$	–	3	–	1,0
Schubspannung					
Bauteil	$N_{D,\tau}$	$N_{D,\tau,II}$	k_τ	$k_{D,\tau}$	$f_{II,\tau}$
Stahl und Eisengusswerkstoff (WL Typ I)					
nicht geschweißt	10^6	–	8	–	1,0
geschweißt	10^8	–	5	–	1,0
Aluminiumwerkstoff (WL Typ II)					
nicht geschweißt	10^6	10^8	8	25	0,83
geschweißt	10^8	–	5	–	1,0

Tab. 3.18 Konstante \tilde{K}_f (nach FKM-Richtlinie [3.17])

Werkstoffgruppe	Stahl Aluknetwerkstoff	GS	GGG	GT	GG
\tilde{K}_f	2,0	2,0	1,5	1,2	1,0

Tab. 3.20 Konstanten a_G und b_G (nach FKM-Richtlinie [3.17])

Werkstoff- gruppe	Nicht- rostender Stahl	Anderer Stahl	GS	GGG	GT	GG	Aluminium- knet- werkstoff	Aluminium- guss- werkstoff
a_G	0,40	0,50	0,25	0,05	-0,05	-0,05	0,05	-0,05
b_G	2400	2700	2000	3200	3200	3200	850	3200

Tab. 3.22 Konstante $a_{R,\sigma}$ und minimale Zugfestigkeit in der Werkstoffgruppe, $R_{m,N,\min}$ (nach FKM-Richtlinie [3.17])

Werkstoffgruppe	Stahl	GS	GGG	GT	GG	Aluminiumknetwerkstoff	Aluminiumgusswerkstoff
$a_{R,\sigma}$	0,22	0,20	0,16	0,12	0,06	0,22	0,20
$R_{m,N,\min}$ (in MPa)	400	400	400	350	100	133	133

Tab. 3.23 Konstante a_M und b_M (nach FKM-Richtlinie [3.17])

Werkstoffgruppe	Stahl	GS	GGG	GT	GG	Aluminiumknetwerkstoff	Aluminiumgusswerkstoff
a_M	0,35	0,35	0,35	0,35	0	1,0	1,0
b_M	-0,1	0,05	0,08	0,13	0,5	-0,04	0,2

Tab. 3.24 Ertragbare Minersumme D_M , empfohlene Werte (nach FKM-Richtlinie [3.17])

	nicht geschweißte Bauteile	geschweißte Bauteile
Stahl, GS, Aluminium	0,3	0,5
GGG, GT, GG	1,0	1,0

Tab. 3.25 Technologische Größeneinflussfaktoren $K_{d,m}$ und $K_{d,p}$ (d_{eff} siehe Tab. 3.19), weitere Werte siehe FKM-Richtlinie [3.17]

Material	Bestimmung von $K_{d,m}$ und $K_{d,p}$ (für die Fließgrenzen sind die Werte $K_{d,m}$, $d_{eff,N,m}$, $a_{d,m}$ durch $K_{d,p}$, $d_{eff,N,p}$, $a_{d,p}$ zu ersetzen, außer GG)	
Grauguss	für $d_{eff} \leq 7,5$ mm $K_{d,m} = 1,207$ für $d_{eff} > 7,5$ mm $K_{d,m} = 1,207 \cdot \left(\frac{d_{eff}}{7,5 \text{ mm}}\right)^{-0,1922}$	
Nichtrostender Stahl DIN EN 10 088	$K_{d,m} = K_{d,p} = 1$ (innerhalb des Abmessungsbereichs der Norm ist kein Größeneinfluss feststellbar)	
Unlegierter Baustahl DIN EN 10 025	$d_{eff,N,m} = 40$ mm $d_{eff,N,p} = 40$ mm $a_{d,m} = 0,15$ $a_{d,p} = 0,30$	für $d_{eff} \leq d_{eff,N,m}$, $K_{d,m} = K_{d,p} = 1$ für $d_{eff,N,m} < d_{eff} < d_{eff,max,m}$ $d_{eff,max,m} = 250$ mm für Walzstahl $d_{eff,max,m} = \infty$ für alle anderen
Stahlguss DIN 1681	$d_{eff,N,m} = 100$ mm $d_{eff,N,p} = 100$ mm $a_{d,m} = 0,15$ $a_{d,p} = 0,30$	$K_{d,m} = \frac{1 - 0,7686 \cdot a_{d,m} \cdot \lg\left(\frac{d_{eff}}{7,5 \text{ mm}}\right)}{1 - 0,7686 \cdot a_{d,m} \cdot \lg\left(\frac{d_{eff,N,m}}{7,5 \text{ mm}}\right)}$
Aluminiumknetwerkstoff	$K_{d,m} = K_{a,p} = 1$	R_m und R_p sind werkstoff- und größenabhängig aus den Werkstofftabellen zu entnehmen
Aluminiumgusswerkstoff	für $d_{eff} \leq d_{eff,N,m} = d_{eff,N,p} = 12$ mm $K_{d,m} = K_{d,p} = 1$ für $12 \text{ mm} < d_{eff} < d_{eff,max,m} = d_{eff,max,p} = 150$ mm $K_{d,m} = K_{d,p} = 1,1 \cdot \left(\frac{d_{eff}}{7,5 \text{ mm}}\right)^{-0,2}$ für $d_{eff} > 150$ mm $K_{d,m} = K_{d,p} = 0,6$	
Geschweißte Bauteile	Im Nahtquerschnitt gilt für Stahl, Eisengusswerkstoffe und Aluminiumwerkstoffe $K_{a,m} = K_{d,p} = 1$	

Tabelle 3.27 Druckfestigkeitsfaktor f_σ und Schubfestigkeitsfaktor f_τ nach FKM-Richtlinie [3.17]

Werkstoffgruppe	f_σ für Zug	f_σ für Druck	f_τ
Einsatzstahl	1	1	0,577 ¹⁾
Nichtrostender Stahl	1	1	0,577
Schmiedestahl	1	1	0,577
Stahl außer diesen	1	1	0,577
GS	1	1	0,577
GJS	1	1,3	0,65
GJM	1	1,5	0,75
GJL	1	2,5	1,0 ²⁾
Alu-Knetwerkstoff	1	1	0,577
Alu-Gusswerkstoff	1	1,5	0,75

1) $0,577 = \frac{1}{\sqrt{3}}$, nach Gestaltänderungsenergiehypothese.

2) nach Normalspannungshypothese.

Tabelle 3.28 Temperaturfaktoren zur Berücksichtigung des Temperatureinflusses bei zulässigen Werkstoffkennwerten (nach FKM-Richtlinie [3.17])

Werkstoff	Temperaturfaktoren für statischen Festigkeitsnachweis	Temperaturfaktoren für Ermüdungsfestigkeitsnachweis
Feinkornstahl $T > 60^{\circ}\text{C}$	$K_{T,m} = K_{T,p} = 1 - 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{T}{^{\circ}\text{C}}$	$K_{T,D} = 1 - 10^{-3} \cdot \frac{T}{^{\circ}\text{C}}$
Anderer Stahl außer nichtrostender Stahl $T > 100^{\circ}\text{C}$	$K_{T,m} = K_{T,p} = 1 - 1,7 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{T}{^{\circ}\text{C}} - 100\right)$	$K_{T,D} = 1 - 1,4 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{T}{^{\circ}\text{C}} - 100\right)$
GS $T > 100^{\circ}\text{C}$	$K_{T,m} = K_{T,p} = 1 - 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{T}{^{\circ}\text{C}} - 100\right)$	$K_{T,D} = 1 - 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{T}{^{\circ}\text{C}} - 100\right)$
GJS $T > 100^{\circ}\text{C}$	$K_{T,m} = K_{T,p} = 1 - 2,4 \cdot \left(10^{-3} \cdot \frac{T}{^{\circ}\text{C}}\right)^2$	$K_{T,D} = 1 - a_{T,D} \cdot \left(10^{-3} \cdot \frac{T}{^{\circ}\text{C}}\right)^2$ GJS: $a_{T,D} = 1,6$, GJM: $a_{T,D} = 1,3$, GJL: $a_{T,D} = 1,0$
Aushärtbarer Aluminiumwerkstoff $T > 50^{\circ}\text{C}$	$K_{T,m} = \text{MAX}\left(1 - 4,5 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{T}{^{\circ}\text{C}} - 50\right); 0,1\right)$ $K_{T,m} = K_{T,p}$	$K_{T,D} = 1 - 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{T}{^{\circ}\text{C}} - 50\right)$
Nichtaushärtbarer Aluminiumwerkstoff $T > 100^{\circ}\text{C}$	$K_{T,m} = \text{MAX}\left(1 - 4,5 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{T}{^{\circ}\text{C}} - 100\right); 0,1\right)$ $K_{T,m} = K_{T,p}$	$K_{T,D} = 1 - 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{T}{^{\circ}\text{C}} - 50\right)$

Tabelle 3.29 Dehnungskennwerte (nach FKM-Richtlinie [3.17])

Werkstoffgruppe	Nachweis mit Nennspannungen		Nachweis mit örtlichen Spannungen	
	fiktive Fließgrenze $R_{p,max}$	ertragbare Dehnung ϵ_{ertr}	minimale ertragbare Gesamtdehnung Minimum bei Mehrachsigkeit	
			ϵ_0 für $A \geq 6\%$	ϵ_0 für $A < 6\%$
Stahl, GS	1150 MPa	0,05	0,05	0,05
GJS	750 MPa	0,04	0,04	R_p/E
GJM	400 MPa	0,02	0,02	R_p/E
GJL			0,0	R_p/E
Alu-Knet	400 MPa	0,05	0,05	R_p/E
Alu-Guss	150 MPa	0,02	0,02	R_p/E

Tabelle 3.30 Eigenspannungsvektor K_E und Mittlungsempfindlichkeit M für geschweißte Bauteile (nach FKM-Richtlinie [3.17])

Eigenspannungen	$K_{E,\sigma}$	M_σ	$K_{E,\tau}$	M_τ
hoch – bei mehrachsig belasteten, dickwandigen Bauteilen – bei konstruktiv bedingten globalen Eigenspannungen	1,00	0	1,00	0
mittel – schlanke Träger mit Längsnähten und Quernähten kürzer 300 mm, quer beanspruchte Schweißnähte bis 10 mm Blechdicke – Schweißen mit eigenspannungsmindernden Vorkehrungen	1,26	0,15	1,15	0,09
gering – Eigenspannungen bis max. $0,2 \cdot R_p$ – Schweißen und danach spannungsarm Glühen – wenn Eigenspannungen nachweislich ausgeschlossen sind	1,54	0,30	1,30	0,17

Tabelle 3.31 Zusätzlicher Teilsicherheitsfaktor j_z für nicht geschweißte und geschweißte Bauteile (nach FKM-Richtlinie [3.17])

j_z	nicht geschweißt	geschweißt	
		GW, WEZ	SN
Walzstahl	1	1	1
Alu-Knet	1	1,13	1,13
GS, GJS, GJM, GJL zerstörungsfrei geprüft	1,25	1,25	1
Alu-Guss	1,25	1,25	1,13
GS, GJS, GJM, GJL nicht zerstörungsfrei geprüft	1,4	1,4	1
Alu Guss nicht zerstörungsfrei geprüft	1,4	1,4	1,13

Tabelle 3.32 Material Sicherheitsfaktor j_F für geschweißte und nichtgeschweißte Bauteile (nach FKM-Richtlinie [3.17])

j_F		nicht geschweißte Bauteile			geschweißte Bauteile		
		Schadensfolgen			Schadensfolgen		
		hoch	mittel	gering	hoch	mittel	gering
regelmäßige Inspektion	nein	1,5	1,4	1,3	1,4	1,25	1,15
	ja	1,35	1,25	1,2	1,2	1,1	1,0