

Festigkeitsnachweis von Eisengußteilen nach der FKM-Richtlinie

Dieser Beitrag gibt in Anlehnung an die FKM-Richtlinie einen Einstieg in den Festigkeitsnachweis für komplexe Maschinenbauteile aus GJL- oder GJS-Guß. Er versetzt den interessierten Leser in die Lage, bei Kenntnis der örtlichen Spannungsverteilung im kritischen Bauteilbereich zumindest den statischen Festigkeitsnachweis für Gußteile im normalen Temperaturbereich zu führen. Ferner werden die für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis bei Eisengußteilen relevanten Größen vorgestellt, so daß ein schneller Einstieg in das komplexe Regelwerk möglich ist.

Kontakt
dr.schmidt@hh-moelln.de

1 Einleitung

Gußeisen ist aufgrund seiner Eigenschaften für viele Anwendungen der ideale Werkstoff. Doch das Potential, das insbesondere die Freiheit in der Formgebung bietet, wird häufig nicht ausgenutzt. Oft entstehen überdimensionierte, nicht kraftflußgerechte Gußkonstruktionen, wo Leichtbau und optimale Materialausnutzung gefragt wären. Doch auch das andere Extrem, bei dem die Leistungsdaten bestehender, ursprünglich ausreichend dimensionierter Konstruktionen bis zum Bauteilversagen gesteigert werden, ist in der industriellen Praxis anzutreffen.

Ursache beider Arten von Fehlkonstruktionen ist eine mangelhafte Bauteilauslegung. Diese wiederum beruht auf der in weiten Kreisen vorherrschenden Meinung, daß für Gußteile keine beziehungsweise keine einfachen zu handhabenden Berechnungsvorschriften existieren. Dieses mag in der Flut der für Schweißkonstruktionen geltenden Berechnungsvorschriften begründet liegen, die für verschiedene Industriebranchen erstellt wurden und im wesentlichen darauf abzielen, ein Bauteilversagen in der Schwachstelle „Schweißnaht“ zu verhindern.

Gußteile weisen derartige lokale Schwachstellen nicht auf. Für einen Festigkeitsnachweis ist vielmehr das gesamte Bauteil zu betrachten. Die Geometrie kraftflußgerechter Bauteile ist in der Regel so komplex, daß für Standardprofile geltende Formeln be-

stenfalls zur überschlägigen Querschnitt-Dimensionierung herangezogen werden können. Aufgrund der Erfahrung aus einer Vielzahl von Entwicklungsprojekten im Hause des Autors muß davor gewarnt werden, die Nennspannungen für einfache Geometrien auf komplexer geformte Bauteile zu übertragen. Hier existiert in der Regel kein Nennquerschnitt. Zudem kann beispielsweise die Geometrie der Kräfteinleitung zur mehrachsigen Bauteilbeanspruchung führen, die beim Bauteilentwurf in der 2D-Ebene leicht übersehen wird.

Erst die Finite-Elemente-(FEM)-Methode bietet eine hinreichende Sicherheit beim Bestimmen der Bauteilbeanspruchung. Mit der zunehmenden Einführung von 3D-CAD-Systemen und den damit zur Verfügung stehenden Volumenmodellen für Gußteile reduziert sich der Aufwand für die Bauteilberechnung erheblich. Teilweise sind diese CAD-Systeme mit integrierten FEM-Modulen ausgestattet, mit denen sich relativ schnell mehr oder weniger grobe Näherungslösungen für den Spannungszustand im Bauteil berechnen lassen.

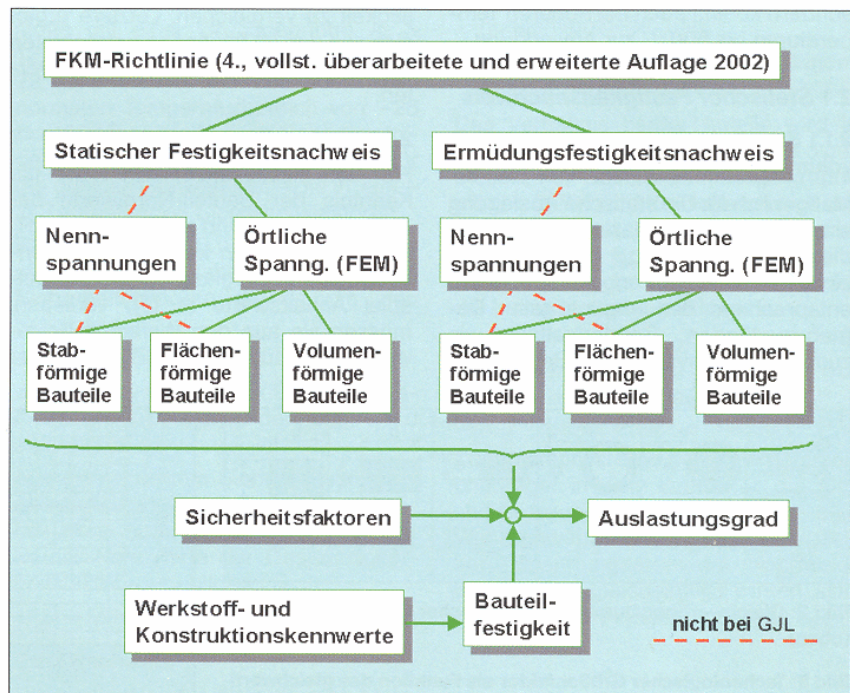


Bild 1: Festigkeitsnachweise nach FKM-Richtlinie

¹⁾ Dr.-Ing. Thorsten Schmidt, Leiter Entwicklung und Konstruktion bei Heidenreich & Harbeck Gießerei AG Mölln

2 FKM-Richtlinie

Im deutschsprachigen Raum repräsentiert die FKM-Richtlinie [1] den Stand der Technik für statische Festigkeits- und Ermüdungsfestigkeitsnachweise im allgemeinen Maschinenbau. Mit dem Erscheinen der englischen Übersetzung ist davon auszugehen, daß sich diese Richtlinie auch international durchsetzen wird. Ihr Gültigkeitsbereich wurde mit dem Erscheinen der jüngsten Ausgabe von dynamisch belasteten Bauteilen aus Stahl und Eisenguß auf Aluminiumteile ausgedehnt. Die Berechnungsgänge werden in dieser Richtlinie in solche für stabförmige Bauteile (Achsen, Wellen und Balken), flächenförmige Bauteile (Scheiben, Platten und Schalen) und volumenförmige Bauteile unterschieden. Die prinzipielle Vorgehensweise beim statischen und Ermüdungsfestigkeitsnachweis ist vereinheitlicht (Bild 1).

Komplexere Gußteile fallen in die Klasse der volumenförmigen Bauteile. Nennspannungen, wie bei Biegebalken oder Wellen, sind hier im allgemeinen nicht bekannt. Die Richtlinie sieht dementsprechend die örtlichen Spannungen als Ergebnis aus FEM-Berechnungen (oder alternativ aus realen Messungen an der Bauteiloberfläche) als Grundlage für den statischen und den Dauerfestigkeitsnachweis bei volumenförmigen Bauteilen vor. Die FKM-Richtlinie deckt nicht nur den in diesem Beitrag behandelten normalen Temperaturbereich von - 25 bis 100 °C ab, sondern kommt auch bei höheren Temperaturen bis 500 °C zur Anwendung.

2.1 Statischer Festigkeitsnachweis

2.1.1 Spannungskennwerte bei volumenförmigen Bauteilen

Maßgeblich für die statische Auslegung sind die extremen Maximal- und Minimalspannungen $\sigma_{\max,ex}$ und $\sigma_{\min,ex}$ der einzelnen Spannungskomponenten entsprechend den ungünstigsten Betriebszuständen. Sonderlastfälle wie zum Beispiel physikalische Begrenzun-

gen sind beim statischen Nachweis zu berücksichtigen. Wenn im Nachweispunkt mehrere Spannungskomponenten zusammenwirken, sind sie zu überlagern. Gleiche Spannungsarten (Normalspannungen aus verschiedenen, gleichzeitig auftretenden Lastfällen usw.) werden direkt überlagert, so daß für jede Spannungsart nur noch eine einzelne Spannungskomponente besteht. Für unterschiedliche Spannungsarten wird die Überlagerung hingegen erst im Festigkeitsnachweis durchgeführt.

Bei den hier behandelten volumenförmigen Gußteilen sind die Hauptspannungen (Zug oder Druck) in den Richtungen 1, 2 (parallel zur Bauteiloberfläche) und 3 (senkrecht zur Bauteiloberfläche in das Bauteil weisend) beim Nachweis zu berücksichtigen. Die extremen Maximal- und Minimalspannungen sind:

$$\sigma_{\max,ex,1}, \sigma_{\max,ex,2}, \sigma_{\max,ex,3}$$

und

$$\sigma_{\min,ex,1}, \sigma_{\min,ex,2}, \sigma_{\min,ex,3}$$

Der statische Festigkeitsnachweis ist für den Bauteilbereich mit maximaler Zug- und maximaler Druckbelastung getrennt zu führen, um die unterschiedliche Zug- und Druckfestigkeit der Eisengußwerkstoffe berücksichtigen zu können. Bei Gußbeisen mit Lamellengraphit fließt zudem das nichtlinearelastische Spannungs-Dehnungs-Verhalten in die Berechnung ein.

Gemäß Bild 1 sind die Spannungskennwerte unter Berücksichtigung der Sicherheitsfaktoren mit der Bauteilfestigkeit zu vergleichen. Letztere ergibt sich aus den im folgenden betrachteten Werkstoff- und Konstruktionskennwerten.

2.1.2 Werkstoffkennwerte

Für den Festigkeitsnachweis ist die Kenntnis der Bauteil-Normwerte der Zugfestigkeit R_m und der Fließgrenze R_p erforderlich. Wenn keine wanddickenabhängigen Festigkeitswerte (zum Beispiel Anhaltswerte in [2]) vorliegen, müssen sie aus den Werkstoff-Normwerten der Zugfestigkeit $R_{m,N}$ und der

Fließgrenze $R_{p,N}$ [3, 4] bestimmt werden, welche für die genormte Werkstoffprobe gelten. Es sind dabei die Mindestwerte oder die gewährleisteten Werte²⁾ oder die untere Grenze des in Zugversuchen bestimmten Festigkeitsbereiches für das Probestück heranzuziehen. Bei der genormten Werkstoffprobe handelt es sich um eine nichtgekerbte, polierte Rundprobe des Durchmessers $d_0 = 7,5$ mm. Die benötigten Bauteil-Normwerte gelten hingegen für den gleichwertigen Durchmesser

$$d_{eff} = 4 * \text{Volumen/Oberfläche} \quad (1)$$

des betrachteten Bauteilausschnittes. Für einfache Querschnittsformen kann dieser nach Bild 2 bestimmt werden.

Die Umrechnung der für den gleichwertigen Durchmesser geltenden Bauteil-Normwerte aus den für eine mittlere Überlebenswahrscheinlichkeit P_U von 97,5 % geltenden Halbzeug-Normwerten erfolgt bei Gußteilen über die technologischen Größenfaktoren $K_{d,m}$ und $K_{d,p}$ gemäß

$$R_m = K_{d,m} * R_{m,N} \text{ bzw. } R_p = K_{d,p} * R_{p,N} \quad (2)$$

Die Abhängigkeit des technologischen Größenfaktors $K_{d,m}$ vom gleichwertigen Durchmesser d_{eff} ist für den Bereich bis 300 mm in Bild 3 dargestellt. Der technologische Größenfaktor $K_{d,p}$ ist für Gußbeisen mit Lamellengraphit nicht definiert, bei Gußbeisen mit Kugelgraphit gilt $K_{d,p} = K_{d,m}$.

Bei Druckspannungen ist ferner der Zugdruckfestigkeitsfaktor f_σ (Tabelle 1) zu berücksichtigen, mit dem die gegenüber der Zugfestigkeit abweichenden

²⁾ Für hochbelastete Bauteilbereiche sind über den Normwerten liegende Werkstoffeigenschaften und geeignete Prüfvorschriften mit der Gießerei abzustimmen.

Tabelle 1: Festigkeitsfaktoren

Werkstoffgruppe	f_σ für Zug	f_σ für Druck
GJS (GGG)	1	1,3
GJL (GG)	1	2,5

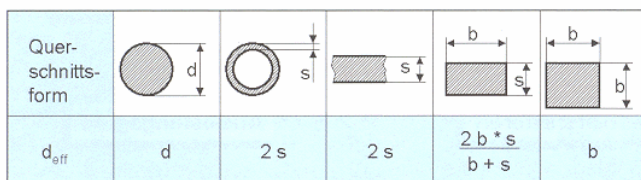
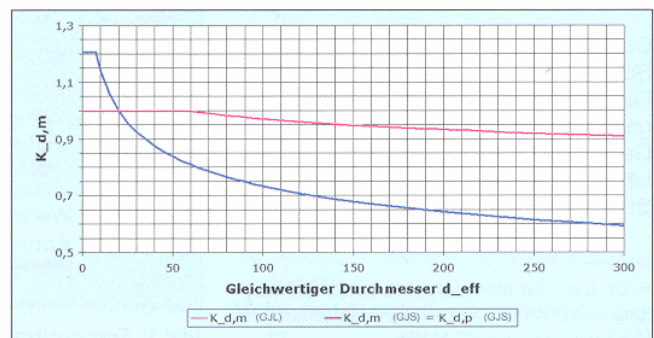


Bild 2: Gleichwertiger Durchmesser einfacher Querschnittsformen (oben)

Bild 3: Technologischer Größenfaktor als Funktion des gleichwertigen Durchmessers (rechts)

Blaue Linie: $K_{d,m}$ (GJL); rote Linie: $K_{d,m} = K_{d,p}$ (GJS)



de Werkstofffestigkeit für diese Beanspruchung gemäß

$$\sigma_{d,B} = f_{\sigma} \cdot R_m \text{ und } \sigma_{d,F} = f_{\sigma} \cdot R_p \quad (3)$$

Eingang findet.

2.1.3 Konstruktionskennwerte

Gemäß *Bild 1* werden zur Bestimmung der Bauteilfestigkeit neben den Spannungs- und den soeben bestimmten Werkstoffkennwerten noch Konstruktionskennwerte benötigt. Bei Gußteilen sind diese für die Hauptnormalspannungen (Zug oder Druck) in den Richtungen 1, 2 und 3 zu unterscheiden. Es gilt

$$\begin{aligned} K_{SK,\sigma 1} &= 1 / (n_{pl,\sigma 1} \cdot K_{NL}), \\ K_{SK,\sigma 2} &= 1 / (n_{pl,\sigma 2} \cdot K_{NL}), \\ K_{SK,\sigma 3} &= 1 / K_{NL} \end{aligned} \quad (4)$$

mit der plastischen Stützzahl $n_{pl,\sigma}$ und der Konstanten K_{NL} . Letztere dient der Berücksichtigung des nichtlinearelastischen Spannungs-Dehnungsverhaltens von Gußeisen mit Lamellengraphit. Für die (Biege-)Zugseite des Querschnitts gilt $K_{NL} = K_{NL,Zug}$, während für die (Biege-)Druckseite der Kehrwert $K_{NL,Druck} = 1/K_{NL,Zug}$ jeweils nach *Tabelle 2* anzusetzen ist. Für Bauteile aus Gußeisen mit Kugelgraphit gilt $K_{NL} = 1$.

Die plastische Stützzahl berücksichtigt den Einfluß der Spannungsverteilung infolge Belastung und Bauteilform auf die statische Bauteilfestigkeit und ermöglicht damit die Ausschöpfung von Tragreserven, die ein Bauteil nach dem örtlichen Einsetzen des Fließens noch besitzt. Voraussetzung für die Anwendung einer plastischen Stützzahl ist ein Spannungsgefälle senkrecht zur Richtung der Spannung σ . Die plastische Stützzahl ist ausschließlich anzuwenden auf nichtgehärtete Bauteile aus Gußeisen mit Kugelgraphit mit großer Bruchdehnung $A_5 \geq 8\%$, wie sie beispielsweise die gängigen Sorten EN-GJS-350-22, EN-GJS-400-18 und EN-GJS-400-15 aufweisen. Für alle anderen Eisengußteile gilt ebenso wie bei konservativer Bauteilberechnung $n_{pl,\sigma} = 1$.

Das in Kapitel 3.3.2 der FKM-Richtlinie beschriebene Verfahren zur näherungsweise Bestimmung der plastischen Formzahl volumenförmiger Bauteile ist im allgemeinen aufwendig und wird daher den Berechnungsexperten vorbehalten bleiben. Der Wertebereich der plastischen Stützzahl variiert je nach Geometrie und Lastfall zwischen 1 (zum Beispiel bei einem Profil mit dünnem Kreisringquerschnitt bei Torsion) und 1,7 (zum Beispiel bei einem Profil mit Kreisquerschnitt unter Biegebeanspruchung).

Tabelle 2: Konstante K_{NL} (nur bei GJL relevant)

Werkstoffsorte	GJL-150	GJL-200	GJL-250	GJL-300	GJL-350
$K_{NL,Zug}$	1,15	1,10	1,10	1,05	1,05
$K_{NL,Druck}$	0,87	0,91	0,91	0,95	0,95

Tabelle 3: Sicherheitsfaktoren j_m und j_p für duktiles Gußeisen mit Kugelgraphit mit einer Bruchdehnung $A_5 \geq 12,5\%$

j_m (j_p)	Schadensfolgen		
	groß	gering	
nichtgeprüfte Gußstücke			
Wahrscheinlichkeit des Auftretens der Spannung oder Spannungskombination	groß	2,8 (2,1)	2,45 (1,8)
	gering	2,55 (1,9)	2,2 (1,65)
zerstörungsfrei geprüfte Gußstücke			
Wahrscheinlichkeit des Auftretens der Spannung oder Spannungskombination	groß	2,5 (1,9)	2,2 (1,65)
	gering	2,25 (1,7)	2,0 (1,5)

2.2 Statische Bauteilfestigkeit

Die ertragbaren örtlichen Werte der statischen Bauteilfestigkeit für die Hauptnormalspannungen ergeben sich zu

$$\sigma_{SK,i} = f_{\sigma} \cdot R_m / K_{SK,\sigma i} \text{ mit } i = 1, 2, 3. \quad (5)$$

2.2.1 Sicherheitsfaktoren

In der FKM-Richtlinie sind unter Voraussetzung sicherer Lastannahmen Sicherheitsfaktoren für duktile und spröde Eisengußwerkstoffe aufgeführt. Zur Gruppe der duktilen Sphäroguß-Werkstoffe mit einer Bruchdehnung $A_5 \geq 12,5\%$ zählen die Sorten EN-GJS-350-22, GJS-400-18 und GJS-400-15. Im normalen Temperaturbereich von -25 bis 100 °C gelten je nach Schadensfolge und nach den Prüfvorschriften für die duktilen Gußwerkstoffe die in *Tabelle 3* aufgeführten Sicherheitsfaktoren.

Für alle übrigen GJS- und GJL-Werkstoffe sind die in *Tabelle 3* aufgeführten Sicherheitsfaktoren jeweils um den Summanden

$$\Delta j = 0,5 - \sqrt{(A_5 / 50\%)} \quad (6)$$

zu erhöhen, wobei für Gußeisen mit Lamellengraphit als Bruchdehnung $A_5 = 0$ anzusetzen ist.

Aus den einzelnen Sicherheitsfaktoren ist bei den duktilen Werkstoffen schließlich noch unter Berücksichtigung der Bauteil-Normwerte der Gesamtsicherheitsfaktor j_{erf} zu bilden:

$$1/j_{erf} = \text{MIN} (1/j_m, 1/j_p \cdot R_p/R_m) \quad (7)$$

2.2.2 Nachweis

Die Nachweise für die extremen Maximal- und Minimalspannungen sind bei

Eisengußwerkstoffen getrennt durchzuführen. Die statischen Auslastungsgrade bei volumenförmigen Bauteilen für die Spannungsart Hauptnormalspannung in den Richtungen $i = 1, 2$ und 3 sind

$$a_{SK,\sigma i} = |\sigma_{\max,ex,i} / (\sigma_{SK,i} / j_{erf})| \leq 1 \quad (8)$$

Die Festigkeitshypothese für zusammengesetzte Spannungsarten besteht aus zwei Anteilen:

- a_{NH} (entsprechend der Normalspannungshypothese) und
- a_{GH} (entsprechend der Gestaltänderungs-Energiehypothese).

Das Verhältnis beider Anteile wird je nach Duktilität über die Konstante q gesteuert. Für Gußeisen mit Kugelgraphit gilt $q = 0,264$ und für Gußeisen mit Lamellengraphit $q = 0,759$. Bei zusammengesetzten Spannungsarten ergibt sich der statische Auslastungsgrad für die betrachtete Bauteilklasse zu

$$a_{SK,\sigma V} = q \cdot a_{NH} + (1 - q) \cdot a_{GH} \leq 1 \quad (9)$$

$$\text{mit } a_{NH} = \text{MAX} (a_{SK,\sigma 1}, a_{SK,\sigma 2}, a_{SK,\sigma 3}) \quad (10)$$

$$\text{und } a_{GH} = \sqrt{(1/2 \cdot ((a_{SK,\sigma 1} - a_{SK,\sigma 2})^2 + (a_{SK,\sigma 2} - a_{SK,\sigma 3})^2 + (a_{SK,\sigma 3} - a_{SK,\sigma 1})^2))} \quad (11)$$

Zu beachten ist eine besondere Vorzeichenregel in dem Anteil für die Gestaltänderungsenergiehypothese a_{GH} . Wenn gewährleistet ist, daß die einzelnen Spannungsarten im Nachweispunkt immer gleichsinnig³⁾ wirken, sind die statischen Auslastungsgrade $a_{SK,\sigma 1}$,

³⁾ z. B. Zugnormalspannung in Richtung 1 und Zugnormalspannung in Richtung 2



Bild 4: Rohgußteil Armaturengehäuse (Foto: Heidenreich & Harbeck AG Mölln)

$a_{SK,\sigma 2}$ und $a_{SK,\sigma 3}$ unverändert in die Gleichung für a_{GH} einzusetzen. Wirken sie immer gegensinnig⁴⁾, so sind die statischen Auslastungsgrade mit unterschiedlichen Vorzeichen einzusetzen. Im allgemeinen (ohne Gewährleistung gleichsinnig oder gegensinnig wirkender Spannungsarten) sind die statischen Auslastungsgrade $a_{SK,\sigma 1}$, $a_{SK,\sigma 2}$, und $a_{SK,\sigma 3}$ ohne Betragsstriche mit Vorzeichen entsprechend der extremen Spannungen einzusetzen. Hierbei sind alle acht möglichen Kombinationen der statischen Auslastungsgrade der extremen Spannungen ($\sigma_{max+ex,1}$ mit $\sigma_{max+ex,2}$, ...; $\sigma_{max+ex,1}$ mit $\sigma_{min+ex,2}$, ...; etc.) zu beachten. Maßgeblich für den Festigkeitsnachweis ist dann der ungünstigste Fall!

⁴⁾ z.B. Zugnormalspannung in Richtung 1 und Drucknormalspannung in Richtung 2

Tabelle 4: Statischer Festigkeitsnachweis für Gußteil Armaturengehäuse

		Maximalspannung (Knoten 16529)	Minimalspannung (Knoten 18071)
Zugfestigkeit (Halbzeug-N.wert)	$R_{m,N}$	500 N/mm ²	
Fließgrenze	$R_{p,N}$	320 N/mm ²	
Effektiver Durchmesser	d_{eff}	< 60 mm	
Größenfaktor	$K_{d,m}, K_{d,p}$	1	
Zugfestigkeit (Bauteil-Normwert)	R_m	500 N/mm ²	
Zugdruckfestigkeitsfaktor	f_σ	1	1,3
Plastische Stützzahl ($A_5 < 8\%$)	$n_{pl,\sigma,i}$	1	
Konstante	K_{NL}	1	
Konstruktionsfaktoren	$K_{SK,\sigma i}$	1	
ertragbare örtliche Werte der statischen Bauteilfestigkeit	$\sigma_{SK,i}$	500 N/mm ²	650 N/mm ²
Sicherheitsfaktoren	$j_m; (j_p)$	2,8; (2,1)	
Gesamtsicherheitsfaktor	J_{erf}	3,478	
statischer Auslastungsgrad	$s_{SK,\sigma 1}$	0,768	0,005
	$a_{SK,\sigma 2}$	0,017	0,039
	$a_{SK,\sigma 3}$	0,061	0,152
Konstante	q	0,264	
Anteil Normalspannungshypothese	A_{NH}	0,768	0,152
Anteil Gestaltänderungshypothese	A_{GH}	0,731	0,133
Statischer Auslastungsgrad	$a_{SK,\sigma V}$	0,741 (≤ 1)	0,138 (≤ 1)

3 Beispiel Armaturengehäuse

Für das im Kundenauftrag entwickelte Armaturengehäuse (Bild 4) aus GJS-500 mit Nennweite 200 mm wird der Festigkeitsnachweis exemplarisch dargestellt.

3.1 Statischer Nachweis

Die Beaufschlagung des Bauteils mit einem Innendruck von 100 bar ist für die Bemessung des Bauteils maßgebend. Die für den statischen Festigkeitsnachweis relevanten Maximalbeziehungsweise Minimalspannungen

treten an den Knoten 16529 und 18071 auf (Bild 5). Der statische Festigkeitsnachweis kann anhand Tabelle 4 nachvollzogen werden. Da die Auslastungsgrade kleiner als 1 sind, ist die statische Festigkeit gegeben.

3.2 Ermüdungsfestigkeitsnachweis

3.2.1 Spannungskollektivkennwerte

Der Ermüdungsfestigkeitsnachweis erfolgt nach dem gleichen Schema wie der statische Festigkeitsnachweis. Zunächst ist für den im allgemeinen veränderlichen Spannungs-Zeit-Verlauf

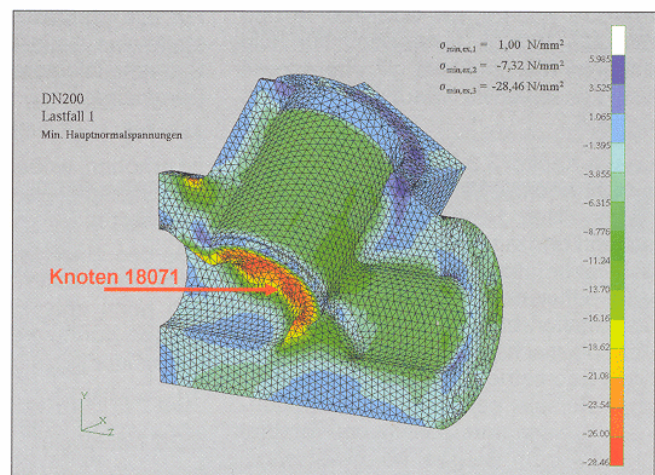
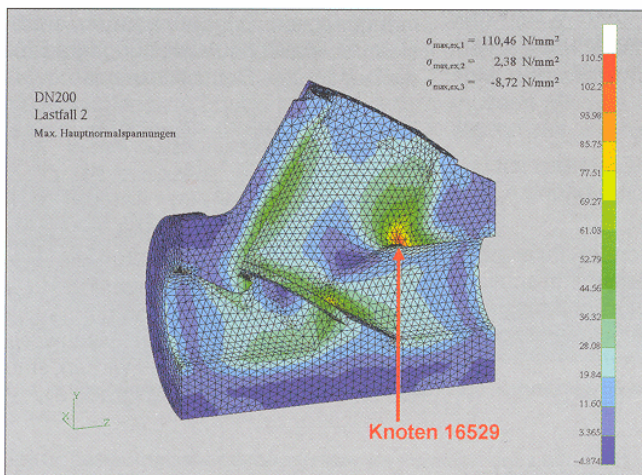


Bild 5: Armaturengehäuse: Knoten mit maximalen Hauptspannungen (links) und Knoten mit minimalen Hauptspannungen (rechts)

ein Spannungskollektiv abzuleiten, das aus Spannungszyklen der Amplituden $\sigma_{a,i}$ und der Mittelwerte $\sigma_{m,i}$ besteht. Die größte Amplitude dieses Spannungskollektives ist $\sigma_{a,1}$ mit dem zugehörigen Mittelwert $\sigma_{m,1}$. Aus beiden ergeben sich die Maximal- und Minimalwerte $\sigma_{\max,1} = \sigma_{m,1} + \sigma_{a,1}$ und $\sigma_{\min,1} = \sigma_{m,1} - \sigma_{a,1}$. Die Werte $\sigma_{\max,1}$ und $\sigma_{\min,1}$ können von den Werten $\sigma_{\max,ex}$ und $\sigma_{\min,ex}$ abweichen, da extreme, sehr selten auftretende Werte aus Sonderlastfällen, wie beispielsweise eine Bauteilkollision, nur für die statische, nicht jedoch für die Ermüdungsfestigkeit von Bedeutung sind.

Ein Sonderfall ist das Einstufenkollektiv mit $\sigma_a = \sigma_{a,1}$ und $\sigma_m = \sigma_{m,1}$, für das je nach geforderter Lastzyklenanzahl ein Dauer- oder ein Zeitfestigkeitsnachweis zu führen ist. Ist das Gußteil Lastkollektiven ausgesetzt, so ist der allgemeine Betriebsfestigkeitsnachweis zu führen. Bezüglich der dann erforderlichen Berechnung einer Äquivalentspannungsamplitude und des zugehörigen Mittelwertes sei auf die FKM-Richtlinie [1] verwiesen.

Analog zum statischen Festigkeitsnachweis erfolgt die Überlagerung von proportionalen oder synchronen Spannungsarten zu einer einzigen Spannungsart. Bei nichtproportional veränderlichen Spannungszuständen ist der Ermüdungsfestigkeitsnachweis nach der FKM-Richtlinie als grobe Näherungslösung durchführbar, indem für jede Belastung I, II, ... die Spannungskollektivwerte berechnet und – wie später beschrieben – die Auslastungsgrade $a_{BK,\sigma V I}$, $a_{BK,\sigma V II}$, ... ermittelt werden. Die für jede der Belastungen I, II, ... ermittelten Auslastungsgrade sind dann linear zum Gesamtauslastungsgrad

$$a_{BK,\sigma V ges} = a_{BK,\sigma V I} + a_{BK,\sigma V II} + \dots \quad (12)$$

zu addieren. Diese konservative Näherungslösung liegt auf der sicheren Seite.

3.2.2 Werkstoffkennwerte

Die Wechselfestigkeitswerte des Gußteils (Bauteil-Normwerte) können mit dem Zug-Druck-Wechsel-Festigkeitsfaktor $f_{W,\sigma}$ beziehungsweise mit dem Schub-Wechsel-Festigkeitsfaktor $f_{W,\tau}$ wiederum direkt aus dem Bauteil-Normwert der Zugfestigkeit R_m bestimmt werden. Es gelten

$$\sigma_{Wzd} = f_{W,\sigma} \cdot R_m \quad (13)$$

$$\tau_{W,s} = f_{W,\tau} \cdot \sigma_{Wzd} \quad (14)$$

mit den Wechselfestigkeitsfaktoren aus *Tabelle 5*.

Tabelle 5: Wechselfestigkeitsfaktoren

Werkstoffgruppe	$f_{W,\sigma}$ für Zugdruck	$f_{W,\tau}$ für Schub
GJS (GGG)	0,34	0,65
GJL (GG)	0,30	0,85

Tabelle 6: Konstante K_f

Werkstoffgruppe	K_f
GJS (GGG)	1,5
GJL (GG)	1,0

Tabelle 7: Konstante $a_{R,\sigma}$ und minimale Zugfestigkeit der Werkstoffgruppe

Werkstoffgruppe	$a_{R,\sigma}$	$R_{m,N,min}$	Beispiel: $K_{R,\sigma}$ für ungehärtete Gußhaut
GJS (GGG)	0,16	400	GJS-400: 0,889
GJL (GG)	0,06	100	GJL-250: 0,903

Tabelle 8: Randschichtfaktoren K_V , Werte für 30–40 mm Probendurchmesser (in Klammern: 8–15 mm Probendurchmesser)

Verfahren	nichtgekerbte Bauteile	gekerbte Bauteile
Nitrieren	1,10 (1,15)	1,3 (1,9)
Einsatzhärten	1,1 (1,2)	1,2 (1,5)
Festwalzen	1,1 (1,2)	1,3 (1,5)
Kugelstrahlen	1,1 (1,1)	1,1 (1,4)
Induktivhärten, Flamhärten	1,2 (1,3)	1,5 (1,6)

Sind Normwerte für die Werkstoff-Festigkeitskennwerte verfügbar, so lassen sich die Bauteil-Normwerte analog zur Zugfestigkeit mit dem bereits eingeführten technologischen Größenfaktor $K_{d,m}$ (*Bild 3*) gemäß $\sigma_{Wzd} = K_{d,m} \cdot \sigma_{Wzd,N}$ bestimmen.

An diesem Punkt können die Gußteile aufgrund ihres homogenen Gefüges einen klaren Vorteil gegenüber den konkurrierenden Schweißkonstruktionen ausspielen, denn bei diesen limitiert die FKM-Richtlinie für Schweißnahtwurzel und -übergang, unabhängig vom verwendeten Grundwerkstoff, die Wechselfestigkeitskennwerte auf $\sigma_{Wzd,Schweißnaht} = 92$ MPa und $\tau_{W,s,Schweißnaht} = 37$ MPa. Das Ausnutzen der höheren Grenzen und der Freiheiten bei der Formgebung – durch diese können zum Beispiel Kerbspannungen erheblich reduziert werden – führt zu funktional überlegenen Gußkonstruktionen.

3.3 Konstruktionskennwerte volumenförmiger Bauteile

Die Konstruktionsfaktoren für die Hauptnormalspannungen in den drei Achsrichtungen sind beim Ermüdungsfestigkeitsnachweis

$$\begin{aligned} K_{WK,\sigma 1} &= (1 + 1/K_f \cdot (1/K_{R,\sigma} - 1)) / (K_V \cdot K_{NLE} \cdot n_{\sigma,1}) \\ K_{WK,\sigma 2} &= (1 + 1/K_f \cdot (1/K_{R,\sigma} - 1)) / (K_V \cdot K_{NLE} \cdot n_{\sigma,2}) \\ K_{WK,\sigma 3} &= (1 + 1/K_f \cdot (1/K_{R,\sigma} - 1)) / (K_V \cdot K_{NLE}) \end{aligned} \quad (15)$$

mit der von der Werkstoffsorte abhängigen Konstante K_f gemäß *Tabelle 6*. Die FKM-Richtlinie enthält Hinweise zur Bestimmung besserer, weniger konservativer Schätzwerte über den Kerbradius und den gleichwertigen Durchmesser. Diese aufwendigere Vorgehensweise kann im Einzelfall sinnvoll sein, um einen etwas oberhalb von 1 liegenden Auslastungsgrad auf ein zulässiges Niveau zu senken.

Die Stützzahlen n_{σ} berücksichtigen den Einfluß der Bauteilgestalt auf die Ermüdungsfestigkeit des Bauteils. Wegen der aufwendigeren Bestimmung bietet sich auch hier zunächst eine konservative Vorgehensweise durch Setzen von $n_{\sigma} = 1$ an. Sollte dieses für einen Festigkeitsnachweis nicht genügen, kann der Berechnungsspezialist in Anlehnung an die FKM-Richtlinie bei vorhandenem Spannungsgefälle quer zur betrachteten Spannungsrichtung einen höheren, möglicherweise für den Nachweis hinreichenden Wert n_{σ} ermitteln.

Der Rauheitsfaktor $K_{R,\sigma}$ berücksichtigt den Einfluß der Werkstückoberfläche auf die Ermüdungsfestigkeit. Für polierte Bauteile gilt $K_{R,\sigma} = 1$. Neben der mittleren Oberflächenrauheit R_z gehen der Bauteil-Normwert der Zugfestigkeit R_m sowie die werkstoffgruppenabhängigen Konstanten $a_{R,\sigma}$ und $R_{m,N,min}$ (*Tabelle 7*) in die Berechnung des Rauheitsfaktors ein.

$$K_{R,\sigma} = 1 - a_{R,\sigma} \cdot \lg (R_z / \mu\text{m}) \cdot \lg (2 R_m / R_{m,N,min}) \quad (16)$$

Für die Gußhaut ist als mittlere Oberflächenrauheit $R_z = 200 \mu\text{m}$ anzusetzen. Bei randschichtgehärteten Bauteilen ergibt sich wegen der höheren Rand-Zugfestigkeit R_m ein kleinerer und somit ungünstigerer Rauheitsfaktor.

Über den Randschichtfaktor K_V wird der Einfluß einer Randschichtverfestigung auf die Ermüdungsfestigkeit des Bauteils berücksichtigt. Bei Eisengußwerkstoffen gelten die Richtwerte aus Tabelle 8. Für Bauteile ohne Randschichtverfestigung sowie für nicht oder schwach gekerbte Bauteile bei Zug-Druck gilt $K_V = 1$.

Über die Konstante $K_{NL,E}$ fließt schließlich noch das nichtlinear-elastische Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Gußeisen mit Lamellengraphit bei Zug-Druck oder Biegung in den Konstruktionsfaktor ein (Tabelle 9). Für Gußeisen mit Kugelgraphit ist $K_{NL,E} = 1$ anzusetzen.

3.4 Bauteilfestigkeit

Die Berechnung der Bauteil-Ermüdungsfestigkeit erfolgt in drei Schritten. Zuerst gilt es, die ertragbaren örtlichen Werte der Bauteil-Wechselfestigkeit über die soeben behandelten Konstruktionsfaktoren zu bestimmen, was zu folgender Gleichung führt:

$$\sigma_{WK,i} = \sigma_{W,zd} / K_{WK,oi} \quad i = 1, 2, 3 \quad (17)$$

Im Anschluß daran sind die Amplituden $\sigma_{AK,i}$ der Bauteil-Dauerfestigkeit je nach Mittelspannungsfaktoren $K_{AK,oi}$ und schließlich die Amplituden der Bauteil-Betriebsfestigkeit $\sigma_{BK,i}$ je nach Betriebsfestigkeitsfaktoren zu berechnen.

Die ertragbaren örtlichen Werte der Amplitude der Bauteil-Dauerfestigkeit volumenförmiger Bauteile für die Hauptnormalspannungen (Richtungen $i = 1, 2$ und 3) sind

$$\sigma_{AK,i} = K_{AK,oi} * \sigma_{WK,i} \quad (18)$$

Die Berechnungsvorschrift für den Mittelspannungsfaktor $K_{AK,oi}$ hängt sowohl vom Mittelspannungsbereich (Druckschwell- (I), Wechsel- (II), niedriger (III) und hoher (IV) Zugschwellbereich, s. Haigh-Diagramm, Bild 6) als auch vom Überlastungsfall ab. Hier sind ebenfalls vier Fälle zu unterscheiden. Wegen des Umfangs – insgesamt sind 16 Kombinationen möglich – muß auf eine detaillierte Betrachtung der Vorgehensweise beim Betriebsfestigkeitsnachweis verzichtet und auf die FKM-Richtlinie verwiesen werden.

Die ertragbaren örtlichen Werte der Bauteil-Betriebsfestigkeit, das heißt die ertragbaren Größtwerte eines Belastungskollektivs, ergeben sich über die Beziehung

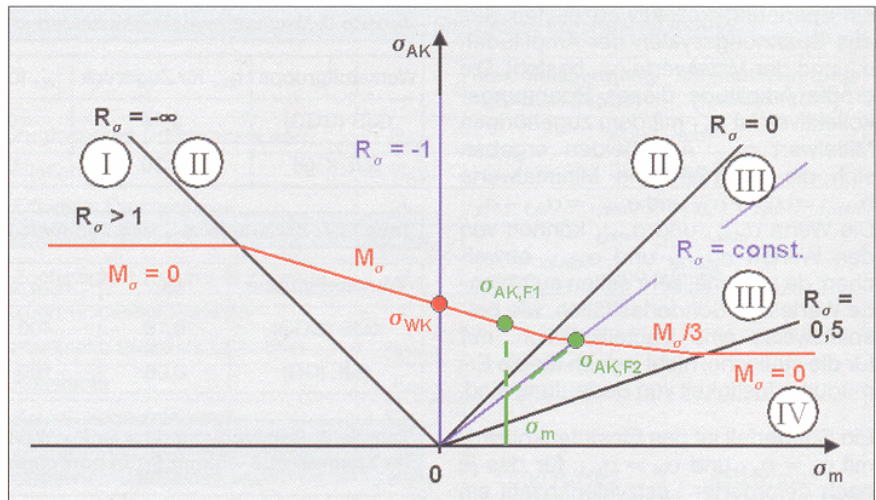


Bild 6: Haigh-Diagramm mit Bereichen I-IV der Mittelspannungsempfindlichkeit (Spannungsverhältnis $R_\sigma = \sigma_{min}/\sigma_{max}$)

$$\sigma_{BK,oi} = K_{BK,oi} * \sigma_{AK,i} \quad (19)$$

Bei nichtgeschweißten Gußteilen gilt für den Betriebsfestigkeitsfaktor $K_{BK,oi}$ bei Einstufenspannung und einer geforderten Zyklenzahl $N \leq 10^6$ (Zeitfestigkeitsnachweis)

$$K_{BK,oi} = (10^6 / N)^{1/5} \quad (20)$$

Für eine dauerfeste Bauteilbemessung mit $N > 10^6$ Lastzyklen ist $K_{BK,oi} = 1$ zu setzen. Im Falle allgemeiner Lastkollektive ist die Berechnung des Betriebsfestigkeitsfaktors nach dem elementaren

Miner-Verfahren vorzunehmen, das ausführlich in der FKM-Richtlinie dargelegt ist.

3.5 Sicherheitsfaktoren

Ebenso wie beim statischen Festigkeitsnachweis werden unter Voraussetzung sicherer Lastannahmen in der Richtlinie spezifische Sicherheitsfaktoren für duktilen (Bruchdehnung $A_5 \geq 12,5\%$) und für spröden Eisengußwerkstoff (Bruchdehnung $A_5 < 12,5\%$) aufgeführt. Im normalen Temperaturbe-

Tabelle 9: Konstante $K_{NL,E}$

Werkstoffsorte	GJL-100	GJL-150	GJL-200	GJL-250	GJL-300	GJL-350
$K_{NL,E}$	1,075		1,050		1,025	

Tabelle 10: Sicherheitsfaktoren für duktilen Gußeisen mit Kugelgraphit mit einer Bruchdehnung $A_5 \geq 12,5\%$

i_D	Schadensfolgen		
	groß	gering	
nichtgeprüfte Gußstücke			
regelmäßige Inspektion	nein	2,1	1,8
	ja	1,9	1,7
zerstörungsfrei geprüfte Gußstücke			
regelmäßige Inspektion	nein	1,9	1,65
	ja	1,7	1,5

Tabelle 11: Faktor q

Bauteile aus GJS ohne Randschichthärtung	Bauteile aus GJL ohne Randschichthärtung	randschichtgehärtete Bauteile
q = 0,264	q = 0,759	q = 1

reich von -25 bis 100 °C gelten je nach Schadensfolge und nach den Prüfverfahren die in *Tabelle 10* aufgeführten Werte. Für alle übrigen GJS- und die GJL-Werkstoffe sind die Sicherheitsfaktoren aus *Tabelle 10* – analog zur statischen Betrachtung – um den Summanden $\Delta j_D = 0,5 - \sqrt{(A_5 / 50\%)}$ zu erhöhen, wobei für Gußeisen mit Lamellengraphit als Bruchdehnung $A_5 = 0$ anzusetzen ist.

3.6 Nachweise

Die Nachweise sind mit Hilfe der zyklischen Auslastungsgrade in den 3 Hauptrichtungen $i = 1, 2$ und 3

$$a_{BK,oi} = |\sigma_{a,i} / (\sigma_{BK,i} / j_D)| \leq 1 \quad (21)$$

im Nachweispunkt, also dem kritischen Punkt des Bauteilquerschnittes, zu führen. Mit $\sigma_{a,i}$ sind dabei die größten Amplituden der Hauptnormalspannungen in den Richtungen $i = 1, 2$ und 3 bezeichnet.

Der Festigkeitsnachweis für zusammengesetzte Spannungsarten ist analog zur Vorgehensweise beim statischen Nachweis durchzuführen. Die der Normalspannungshypothese und der Gestaltänderungs-Energie-Hypothese zuzurechnenden Anteile werden je nach Duktilität über die Konstante q (*Tabelle 11*) gesteuert.

Bei zusammengesetzten Spannungsarten ergibt sich der statische Auslastungsgrad für die betrachtete Bauteilklasse zu

$$a_{BK,oV} = q * a_{NH} + (1 - q) * a_{GH} \leq 1 \quad (22)$$

$$\text{mit } a_{NH} = \text{MAX}(a_{BK,o1}, a_{BK,o2}, a_{BK,o3})$$

$$\text{und } a_{GH} = \sqrt{1/2 * ((a_{BK,o1} - a_{BK,o2})^2 + (a_{BK,o2} - a_{BK,o3})^2 + (a_{BK,o3} - a_{BK,o1})^2)}$$

Zu beachten ist wiederum die besondere Vorzeichenregel in dem Anteil für die Gestaltänderungs-Energie-Hypothese a_{GH} , wie sie bereits beim statischen Festigkeitsnachweis zur Anwendung kam.

3.7 Gesamtnachweis

Zeitstandfestigkeit für Beispiel Armaturengehäuse

Unter Berücksichtigung der aus der Druckbeaufschlagung resultierenden Einstufenspannung ist ein Zeitfestigkeitsnachweis für 10^5 Lastzyklen durchzuführen. Maßgeblich ist die Spannungsdifferenz gegenüber dem unbelasteten Zustand an Knoten 16529 (*Bild 5 links*). Die Zwischenergebnisse des Festigkeitsnachweises sind in *Tabelle 12* angeführt. Da $a_{SK,oV} < 1$ gilt, ist die Zeitfestigkeit für 10^5 Lastspiele nachgewiesen.

Tabelle 12: Nachweis der Zeitstandfestigkeit für 10^5 Lastspiele

		Hauptspg. 1	Hauptspg. 2	Hauptspg. 3
Mittelspannung	$\sigma_{m,i}$	55,23 N/mm ²	1,19 N/mm ²	-4,36 N/mm ²
Amplitude	$\sigma_{a,i}$	55,23 N/mm ²	1,19 N/mm ²	4,36 N/mm ²
Zugdruckwechsel-Festigkeitsfaktor	$f_{W,\sigma}$	0,34		
Konstante	K_f	1,5		
Mittlere Oberflächenrauheit	R_z	200 μ m		
Konstante	$a_{R,\sigma}$	0,16		
Minimale Zugfestigkeit	$R_{m,N,min}$	400 N/mm ²		
Rauheitsfaktor	$K_{R,\sigma}$	0,853		
Randschichtfaktor	K_V	1		
Konstante	K_{NLE}	1		
Konstruktionsfaktor	$K_{WK,\sigma i}$	1,114	1,114	1,114
Ertragbarer örtlicher Wert der Bauteilwechselfestigkeit	$\sigma_{WK,i}$	152,5 N/mm ²	152,5 N/mm ²	152,5 N/mm ²
Mittelspannungsfaktor (Überlastfall 2)	$K_{AK,\sigma i}$	0,797	0,797	1,342
ertragbarer örtlicher Wert der Amplitude der Bauteil-Dauerfestigkeit	$\sigma_{AK,i}$	121,5 N/mm ²	121,5 N/mm ²	204,8 N/mm ²
Betriebsfestigkeitsfaktor (Einstufen-Spg., N = 10^5 Lastspiele)	$K_{BK,\sigma i}$	1,585	1,585	1,585
ertragbarer örtlicher Wert der Bauteil-Betriebsfestigkeit	$\sigma_{BK,i}$	192,7 N/mm ²	192,7 N/mm ²	324,5 N/mm ²
Sicherheitsfaktor	j_D	2,1	2,1	2,1
Gesamtsicherheitsfaktor	J_{erf}	2,226	2,226	2,226
zyklischer Auslastungsgrad	$a_{BK,\sigma i}$	0,638	0,014	0,030
Anteil Normalspannungshypothese	A_{NH}	0,638		
Anteil Gestaltänderungshypothese	A_{GH}	0,616		
Zyklischer Auslastungsgrad	$a_{SK,oV}$	0,622		

4 Zusammenfassung

Mit der FKM-Richtlinie [1] steht ein für Festigkeitsnachweise im gesamten Maschinenbaubereich anwendbares, umfangreiches Regelwerk zur Verfügung. Im vorliegenden Beitrag werden das Konzept der FKM-Richtlinie erläutert und die für Eisengußteile relevanten Regeln extrahiert und verdichtet. Dem interessierten Gußkonstrukteur wird damit die Möglichkeit zur schnellen Einarbeitung in das Thema „Festigkeitsnachweis auf Basis örtlicher Spannungen im Nachweispunkt“ gegeben.

Basierend auf diesem Beitrag kann der statische Nachweis für Gußteile geführt werden. Wegen der zu unterscheidenden 16 Kombinationen aus vier Mittelspannungs-Empfindlichkeits-Bereichen und vier Überlastfällen kann der Ermüdungs-Festigkeitsnachweis nicht vollständig dargelegt werden.

Dem erfahrenen Konstrukteur wird die Anwendung der beschriebenen Richtlinie dringend empfohlen. Der Lohn werden belastungsgerecht konstruierte, dauerfeste Konstruktionen sein, welche die auf unpassender Dimensionierung beruhenden Nachteile vieler bestehender Konstruktionen vermeiden.

Schrifttum

- [1] FKM-Richtlinie Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl-, Eisenguß- und Aluminiumwerkstoffen. 4., erweiterte Ausgabe 2002. VDMA-Verlag.
- [2] Ferrocast®-Werkstoff-Normblatt. Herausgeber: Arbeitsgemeinschaft Qualitätsguss e.V.
- [3] DIN EN 1561: Gießereiwesen – Gußeisen mit Lamellengraphit, Beuth Verlag, Berlin 1997.
- [4] DIN EN 1563: Gießereiwesen – Gußeisen mit Kugelgraphit, Beuth Verlag, Berlin 1997.