

***Festigkeitsnachweis***  
***nach der***  
***FKM-Richtlinie***

# Richtlinie „Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile“<sup>\*)</sup>

Die dem gegenwärtigen Kenntnisstand entsprechende FKM-Richtlinie „Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile“ für Konstrukteure und Berechnungsingenieure im allgemeinen Maschinenbau entstand auf der Grundlage ehemaliger TGL-Standards [1 bis 4], die im IfL Institut für Leichtbau, Dresden – jetzt IMA Materialforschung und Anwendungstechnik, Dresden –, erarbeitet wurden. Ihr Anwendungsbereich entspricht etwa dem der zurückgezogenen Richtlinie VDI 2226 [5]. Zur modular gegliederten FKM-Richtlinie ist das PC-Rechnerprogramm Festigkeitsnachweis in Arbeit. – Dieser Bericht beschreibt die Richtlinie unter besonderer Berücksichtigung der Gußwerkstoffe auf der Basis von Eisen und Stahl (Eisengußwerkstoffe).

Die FKM-Richtlinie dient dem Festigkeitsnachweis unter Beachtung aller relevanten Einflüsse, möglichst ohne „weiße Flecken“ im Algorithmus. Der Festigkeitsnachweis

- umfaßt den statischen (und hochzyklischen) Ermüdungsfestigkeitsnachweis, letzteren als Dauer- oder Betriebsfestigkeitsnachweis,
- gilt für Gußeisen, Stahl- und Temperguß sowie Walzstähle ohne besondere Anforderungen hinsichtlich Korrosionsbeständigkeit und Warmfestigkeit,
- sollte bei bestehenden Voraussetzungen mit Nennspannungen erfolgen,

<sup>\*)</sup> Dem Beitrag liegt das Vorhaben Nr. 154 des Forschungskuratoriums Maschinenbau (FKM) zugrunde. Es wurde von der IMA Materialforschung und Anwendungstechnik, Dresden (Dr.-Ing. B. Hänel unter Mitarbeit von Dipl.-Ing. G. Wirthgen), in Zusammenarbeit mit dem Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit der Technischen Universität Clausthal (Prof. Dr.-Ing. H. Zenner) und dem Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik der Technischen Hochschule Darmstadt (Prof. Dr.-Ing. T. Seeger) unter der Obmannschaft von Prof. Dr.-Ing. E. Haibach, Jugenheim, bearbeitet.

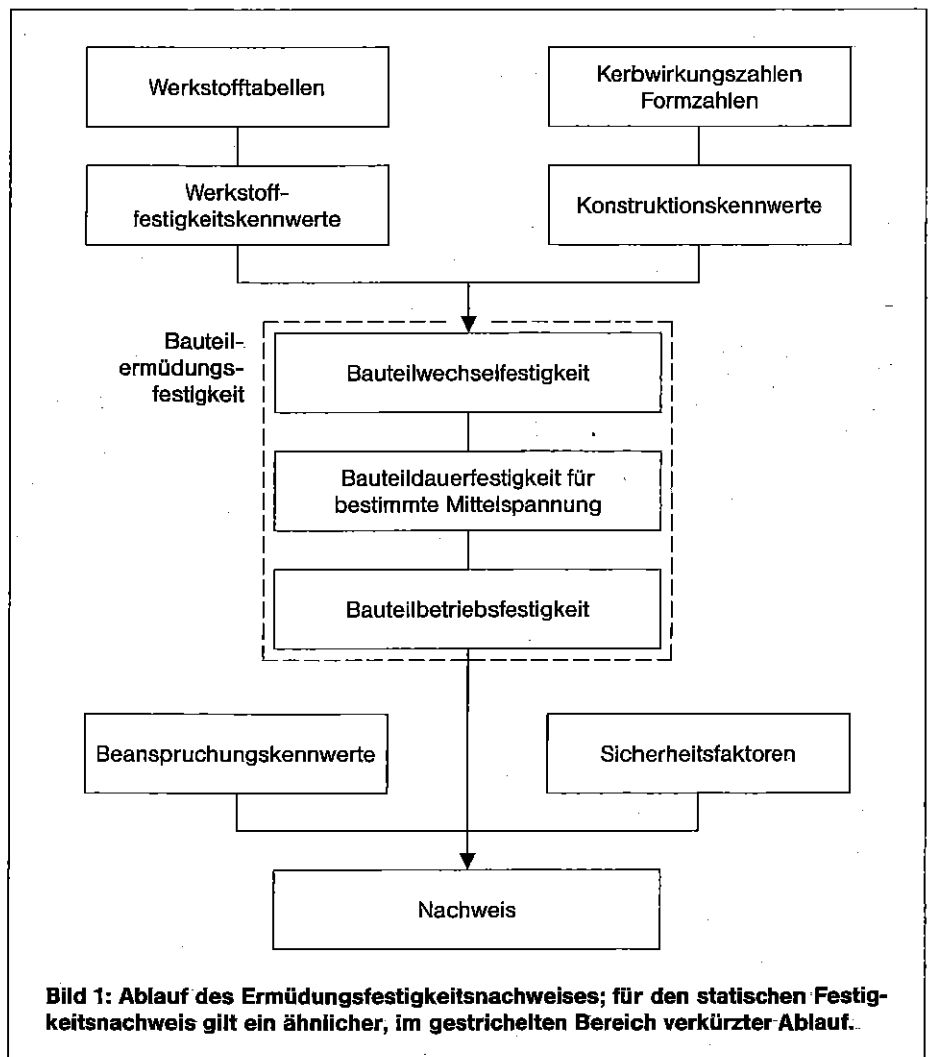
kann aber auch mit elastisch bestimmten örtlichen Spannungen durchgeführt werden. Das gilt insbesondere

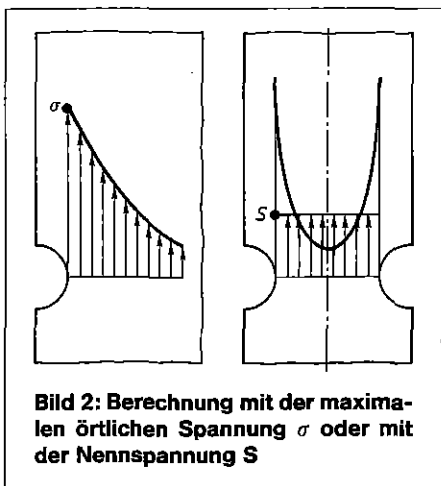
- für Eisengußwerkstoffe, wenn die Bauteile kompliziert oder kompakt sind, so daß Nennspannungen nicht definiert sind,
- für spröde Werkstoffe, für die wegen mangelnder Duktilität kein statischer Nennspannungsnachweis geführt werden darf,

– zur Bewertung von mit FEM und ähnlichen Methoden gewonnenen Ergebnissen,

- ist anwendbar vor allem für nichtgeschweißte, aber auch für geschweißte Bauteile. Auf letzteres wird in diesem Beitrag aber nicht eingegangen.

Die FKM-Richtlinie ist anwendbar für korrosionsfreies Umgebungsmedium, Bauteiltemperaturen von  $-25^{\circ}\text{C}$  bis  $+500^{\circ}\text{C}$  und Beanspruchungsfrequenzen bis 100 Hz. Sie baut auf den gewähr-





**Bild 2: Berechnung mit der maximalen örtlichen Spannung  $\sigma$  oder mit der Nennspannung  $S$**

leisteten Festigkeitskennwerten der Werkstoffnormen auf und gilt für die in den Normen festgelegten Wanddicken. Bei Überschreitung des Anwendungsbereiches sind zwischen den Beteiligten (Hersteller, Betreiber, Werkstoffachtmann und Richtlinienbearbeiter) Vereinbarungen zu treffen. Der Berechnungsablauf ist zum überwiegenden Teil zwangsläufig, der Anwender hat nur wenige Entscheidungen zu treffen.

Die Gliederung dieses Berichtes folgt derjenigen der FKM-Richtlinie und dem Ablauf des Festigkeitsnachweises, Bild 1.

Ein Berechnungsbeispiel für einen Verdichterzylinder aus Gußeisen mit Lamellengraphit auf der Grundlage des ehemaligen Standards TGL 19341 [2] – einer der Vorläufer der FKM-Richtlinie – wurde in [6] beschrieben.

## Statischer Festigkeitsnachweis

### Beanspruchung

Elastisch bestimmte örtliche Spannungen und Nennspannungen können Normalspannungen  $\sigma$  und  $S$ , Bild 2, sowie Schubspannungen  $\tau$  und  $T$  sein.

Bei der Festlegung der Beanspruchungskomponenten sind drei Fälle zu unterscheiden:

- Bei räumlich ausgedehnten, kompakten Bauteilen sind die Beanspruchungen zusammengesetzt aus den Hauptspannungen in drei Richtungen (Zug- oder Druckspannung) („Räumlicher“ Fall; Beispiel: Verdichterzylinder mit Spannungen aus dem Innendruck, Längs- und Umfangsspannungen).
- Bei flächenhaften Bauteilen sind die Beanspruchungen zusammengesetzt aus Normalspannungen in zwei Richtungen (Zug- oder Druckspannung) und aus einer Schubspannung („Ebener“ Fall; Beispiel: Wand mit Normalspannungen in zwei Richtungen).
- Bei stabförmigen Bauteilen sind die Beanspruchungen zusammengesetzt aus Zug- oder Druckspannung, Biegespannung, Schubspannung (seltener von Bedeutung) und Torsionsspannung („Linearer“ Fall; Beispiel: Stab mit Biege- und Torsionsspannungen).

Wenn Beanspruchungsgrößtwerte, die aus unterschiedlichen Belastungen kommen, am betrachteten Punkt des Bauteiles nicht denkbar ungünstig zusammenwirken, kann das in der Berechnung mit sogenannten Kombinationsfaktoren berücksichtigt werden.

### Werkstoff

Die FKM-Richtlinie gilt für die Werkstoffe Gußeisen mit Lamellengraphit (GG, Grauguß, DIN 1691), Temperguß (GT, DIN 1692), Gußeisen mit Kugelgraphit (GGG, DIN 1693), Stahlguß (GS, DIN 1681) und Vergütungsstahlguß (DIN 17205) sowie verschiedene Walzstähle. Es wird unterstellt, daß die in diesen Normen aufgeführten Festigkeitskennwerte Zugfestigkeit  $R_{m,N}$  und Dehnbeziehungsweise Streckgrenze  $R_{p,N}$  (als Beispiel nennt Tabelle 1 die Werte für Gußeisen mit Kugelgraphit) für eine Werkstoffprobe gelten, die bei Gußeisenwerkstoffen einem genormten Probestück des gleichwertigen Durchmessers  $d_{eff,N}$  entnommen ist, Bild 3. Die Werkstoffprobe ist eine nichtgekerbte, polierte Rundprobe des Durchmessers  $d_0 = 7,5$  mm.

Die Festigkeitskennwerte Zugfestigkeit  $R_m$  und Dehnbeziehungsweise Streckgrenze  $R_p$  des „dicken“ Bauteils oder Gußstücks des gleichwertigen Durchmessers  $d_{eff}$  unterscheiden sich von den Festigkeitskennwerten  $R_{m,N}$  und  $R_{p,N}$  („N“ = nach Norm, Normwert) durch den technologischen Größenfaktor  $K_d$ :

$$R_m = K_{d,m} \cdot R_{m,N} \quad (1)$$

$$R_p = K_{d,p} \cdot R_{p,N} \quad (2)$$

Für den gleichwertigen Durchmesser einer Wand der Dicke  $s$  gilt beispielsweise  $d_{eff} = 2s$ , wenn die Festigkeit wesentlich durch die Abkühlungsverhältnisse bei der Herstellung bestimmt wird (zum Beispiel Gußeisen mit Lamellengraphit, vergüteter Stahlguß), aber  $d_{eff} = s$ , wenn dies nicht der Fall ist (zum Beispiel normalisierter Stahlguß).

**Tabelle 1: Festigkeitseigenschaften von Gußeisen mit Kugelgraphit (GGG), statische Eigenschaften nach DIN 1693 T1, zyklische Eigenschaften nach TGL 8189/01; Normabmessungen des Probestücks (gleichwertiger Rohgußdurchmesser);  $d_{eff,N} = 60$  mm**

Werkstoffkurzzeichen	Statische Eigenschaften *)			Zyklische Eigenschaften Beanspruchungsart			
	Zugfestigkeit	0,2%-Dehngrenze	Bruchdehnung	Zugdruck	Biegung	Schub	Verdrehung
	$R_{m,N}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_{p0,2,N}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$A_5$ [%]	$\sigma_{W,zd,N}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{W,b,N}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\tau_{W,s,N}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\tau_{W,t,N}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
GGG-35.3	350	220	22	120	160	75	105
GGG-40.3	400	250	18	135	185	90	120
GGG-40	400	250	15	135	185	90	120
GGG-50	500	320	7	170	225	110	150
GGG-60	600	380	3	205	265	135	180
GGG-70	700	440	2	240	305	155	205
GGG-80	800	500	2	270	340	175	235

\*) Dehngrenzenverhältnis  $R_{p0,2,N}/R_{m,N}$  für alle Sorten  $< 0,75$

Die Werte  $R_{m,N}$  und  $R_{p,N}$  sollen der Überlebenswahrscheinlichkeit  $P_{\bar{U}} = 97,5\%$  (Mittelwert minus zweimal Standardabweichung) entsprechen. Diese Aussage ist dann von Bedeutung, wenn experimentell bestimmte Werte bekannt sind und in die Berechnung eingeordnet werden sollen.

Bei Druckbeanspruchung wird die im Vergleich zu Stahl größere Druckfestigkeit der Gußeisenwerkstoffe, bei Gußeisen mit Lamellengraphit auch das ausgeprägt nichtlinear-elastische Spannungs-Dehnungsverhalten berücksichtigt.

### Konstruktion

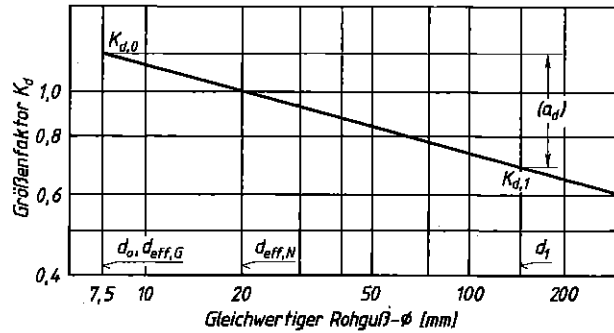
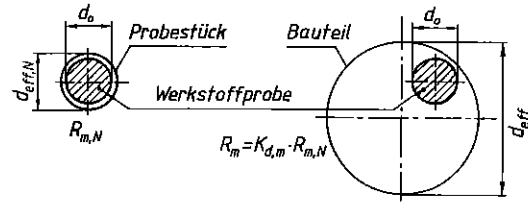
Der Einfluß der Konstruktion auf die statische Bauteilfestigkeit wird mit dem Konstruktionsfaktor  $K_{SK}$  berücksichtigt, der je nach Beanspruchung und Bauteilform bestimmt wird. Die Berechnung hat hier und im folgenden für jede Beanspruchungskomponente getrennt zu erfolgen; bei Berechnung mit örtlichen Spannungen und Normalspannungen ( $\sigma$ , Zug oder Druck) gilt:

$$K_{SK,\sigma} = \frac{1}{n_{pl,\sigma}} \quad (3)$$

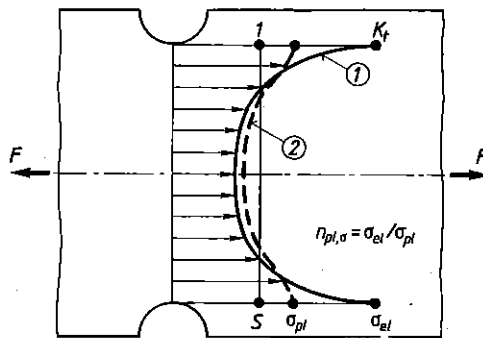
Die plastische Stützzahl  $n_{pl,\sigma}$  erfaßt die plastische Makrostützwirkung, Bild 4. Ihre Festlegung erfolgt auf der Grundlage der Bauteilfließkurve, Bild 5, in einfacher, aber mangelhafter Weise beispielsweise mit der NEUBER-Formel. Bei der Berechnung mit der Nennspannung gilt (vereinfacht, ohne Sicherheitsfaktor) die Bedingung  $S \leq R_p$ , bei der Berechnung mit der maximalen örtlichen Spannung aber  $\sigma \leq n_{pl,\sigma} \cdot R_p$ . Die plastische Stützzahl bewirkt hier den Ausgleich zwischen der Nennspannung und der höheren maximalen örtlichen Spannung, die sich um die Formzahl unterscheiden.

Bei einer Bruchdehnung  $A_5 < 12,5\%$  – betrifft Gußeisen mit Lamellengraphit, Temperguß und einige Sorten Gußeisen mit Kugelgraphit – ist die Berechnung immer mit örtlichen Spannungen durchzuführen, da hinreichende Plastifizierbarkeit als Voraussetzung der Berechnung mit Nennspannungen nicht besteht.

Für Gußeisen mit Lamellengraphit ist wegen seiner Sprödigkeit das Anwenden einer plastischen Stützzahl nicht zulässig.

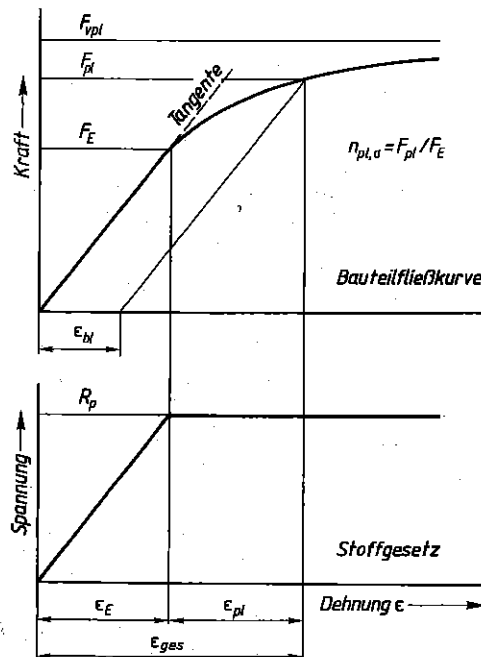


**Bild 3: Technologischer Größenfaktor  $K_d$  für die Zugfestigkeit von Gußeisen mit Lamellengraphit, Definition (oben) und Verlauf (unten) bezogen auf den gleichwertigen Durchmesser  $d_{eff}$ . Der Verlauf ist festgelegt durch  $d_{eff,N}$ , für den der Festigkeitskennwert  $R_{m,N}$  gilt,  $d_{eff,G}$ , bis zu dem kein technologischer Größeneinfluß bestehen soll, und die Konstante  $a_d$ , die die Neigung der Geraden bestimmt.**



- ① = fiktive, elastisch berechnete Spannungsverteilung
- ② = wirkliche Spannungsverteilung bei elastisch-plastischem Werkstoffverhalten
- $\sigma_{el}$  = max. elastische,  $\sigma_{pl}$  = max. elastisch-plastische örtliche Spannung
- S = Nennspannung

**Bild 4: Definition der plastischen Stützzahl  $n_{pl,\sigma}$  für einen Kerbstab bei Zug; im Grenzfall der vollplastischen Traglast gilt  $n_{pl,\sigma} = K_t$  (Formzahl).**



- $F_{vp}$  = vollplastische Traglast
- $F_{pl}$  = ertragbare Last
- $F_E$  = elastische Traglast bei Erreichen der Fließgrenze
- $R_p$  = Fließgrenze
- $\epsilon_{bl}$  = bleibende Dehnung
- $\epsilon_E$  = elastische Dehnung bei Erreichen der Fließgrenze
- $\epsilon_{pl}$  = plastische Dehnung
- $\epsilon_{ges}$  = Gesamtdehnung

**Bild 5: Bauteilfließkurve  $F(\epsilon)$  und Stoffgesetz  $\sigma(\epsilon)$  (hier linear-elastisch-idealplastisch) je nach Dehnung  $\epsilon$**



## Ermüdungs- festigkeitsnachweis

### Beanspruchung

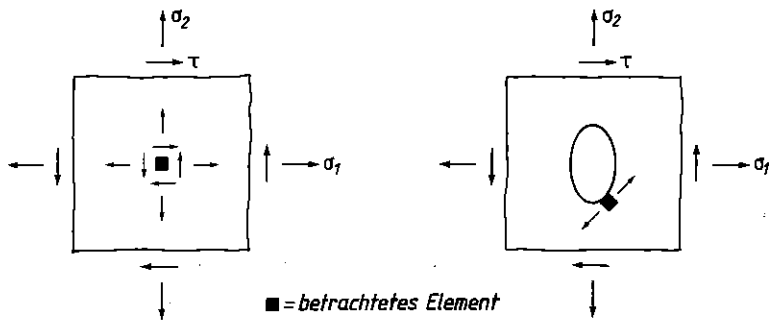
Eine zyklische Beanspruchung besteht aus Beanspruchungszyklen, die durch Mittelspannung und Spannungsamplitude definiert sind. Bei der Festlegung der Beanspruchungskomponenten sind „räumlicher“, „ebener“ und „linearer“ Fall wie beim statischen Festigkeitsnachweis zu unterscheiden. Die Beanspruchung ist einstufig oder – in der Regel – eine Kollektivbeanspruchung.

Kenngrößen des Beanspruchungskollektivs für jede Beanspruchungskomponente sind die Mittelspannungen  $\bar{\sigma}_{m,i}$  der einzelnen Stufen oder deren Spannungsverhältnisse  $R_{\sigma,i}$ , die Größtspannungsamplitude  $\hat{\sigma}_a = \sigma_{a,1}$ , der Umfang  $N$  (Zyklenzahl entsprechend der geforderten Lebensdauer) und die Form (bezogene Spannungsamplituden  $\sigma_{a,i}/\sigma_{a,1}$  und zugehörige bezogene Zyklenzahlen  $N_i/N$ ), Bild 8.

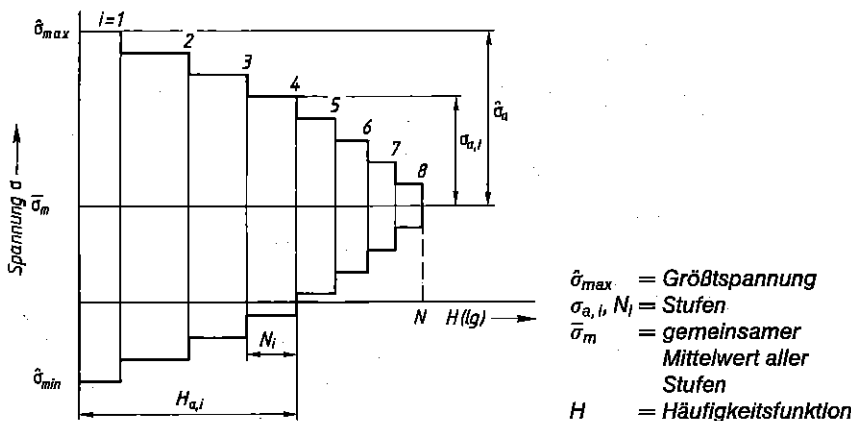
Die Kennwerte eines Beanspruchungskollektivs lassen sich – je nach Anforderungen an die Genauigkeit und bestehenden Erfahrungen – in unterschiedlicher Weise festlegen mit:

- experimenteller Bestimmung oder Berechnung (bei hohen Anforderungen an die Genauigkeit und/oder fehlenden Erfahrungen über die Beanspruchung des Bauteils),
- einem Normkollektiv (bei bestehenden Erfahrungen über die Form des Kollektivs, Kollektivbeiwert  $p$  nach Katalog),
- einer Beanspruchungsgruppe (in Anlehnung an den Kranbau, DIN 15 018; bei bestehenden Erfahrungen über Umfang und Form des Kollektivs, also die Beanspruchungsgruppe, diese nach Katalog),
- einer Äquivalentspannungsamplitude (bei bestehenden Erfahrungen über Umfang, Form und Größtwert des Kollektivs; Äquivalentspannungsamplitude nach Katalog). Der Ermüdungsfestigkeitsnachweis hat dann die einfache äußere Gestalt eines Dauerfestigkeitsnachweises (eventuell auch Zeitfestigkeitsnachweis).

Das nicht immer denkbar ungünstige Zusammenwirken der Kollektive kann wie bei der statischen Beanspruchung mit Kombinationsfaktoren berücksichtigt werden.



**Bild 7:** Mehrachsige Belastung eines plattenförmigen Bauteils durch die Komponenten  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  und  $\tau$ , wirkende Spannungen an einem Element; links = geschlossene Platte mit mehrachsiger Beanspruchung, Gleichung (10) hat den Charakter einer Festigkeitshypothese; rechts = Platte mit Öffnung, einachsige Beanspruchung, Gleichung (10) hat den Charakter einer Interaktionsformel, sofern sie in diesem Fall angewendet wird.



**Bild 8:** Beanspruchungskollektiv und Kenngrößen, dargestellt für Normalspannungen; gezeigt wird ein normalverteiltes Beanspruchungskollektiv mit dem Beiwert  $p = \sigma_{a,8}/\sigma_{a,1} \approx 0$

**Tabelle 2:** Faktoren zur Berechnung der Wechselfestigkeitskennwerte Zugdruck und Schub aus der Zugfestigkeit

Faktor	Eisengußwerkstoff			
	GG	GT	GGG	GS <sup>1)</sup>
$f_W$ <sup>2)</sup>	0,26	0,28	0,34	0,34
$r$ <sup>3)</sup>	0,85	0,75	0,65	0,58

<sup>1)</sup> Unlegierter Stahliguß nach DIN 1681 und Vergütungsstahliguß nach DIN 17 205

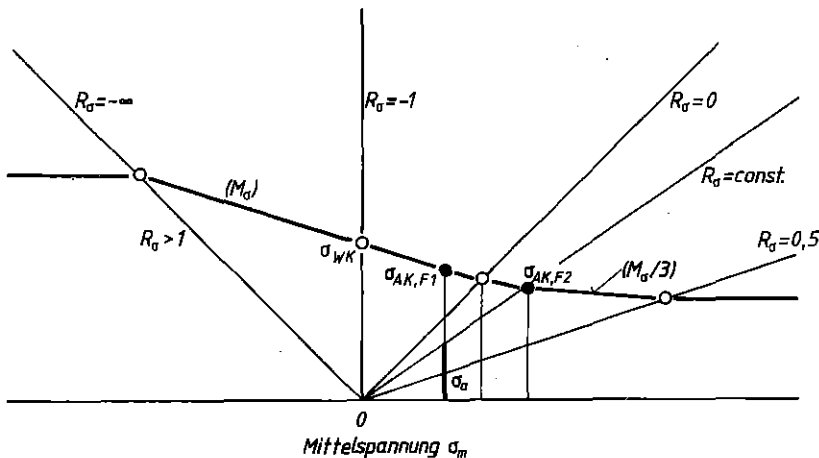
<sup>2)</sup>  $f_W = \sigma_{W,zd}/R_m$

<sup>3)</sup>  $r = \tau_{W,s}/\sigma_{W,zd}$

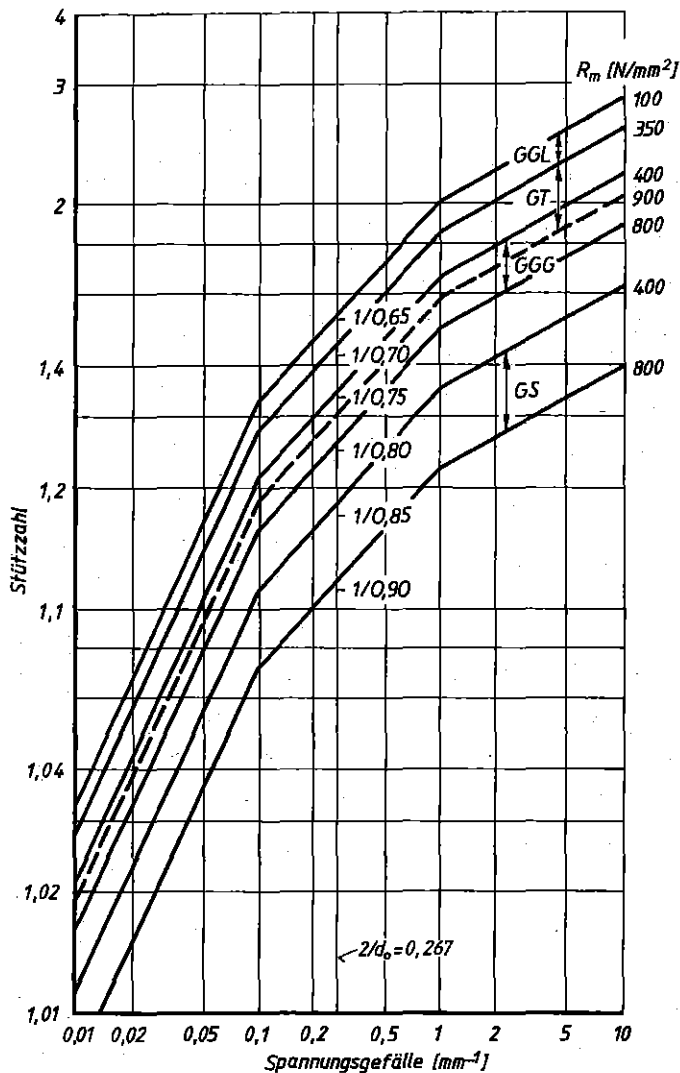
Die Quotientenbildung in den Gleichungen (8) und (9) ermöglicht es, die einzelnen Spannungskomponenten getrennt zu bewerten. Anschaulich kann die Notwendigkeit am Beispiel einer geschweißten Platte gezeigt werden, für die die ertragbaren Normalspannungen in x- und y-Richtung sehr unterschiedlich sein können.

Die „Auslastung“ des Bauteiles durch die einzelnen Beanspruchungskomponenten und die zusammengesetzten Beanspruchungen ergibt sich aus den Quotienten der linken und rechten Seite der Gleichungen (6) bis (10); der ungünstigste Fall – hier Gleichung (10) – ist jeweils maßgeblich.

Die Anwendung der Gleichungen (8) bis (10) unterstellt, daß der Ort der maximalen Beanspruchung für die einzelnen Beanspruchungskomponenten der gleiche und die resultierende Beanspruchung mehrachsige ist. Falls die Gleichungen in anderen Fällen angewendet werden, haben sie nur den Charakter einer empirischen Interaktionsgleichung, nicht einer Festigkeitshypothese, Bild 7.



**Bild 9:** Amplitude der Bauteil-Dauerfestigkeit  $\sigma_{AK}$  in Abhängigkeit von der Mittelspannung  $\sigma_m$  (Überlastungsfall F1) bzw. des Spannungsverhältnisses  $R_\sigma$  (Überlastungsfall F2), dargestellt für Normalspannungen und eine Mittelspannungsempfindlichkeit  $M_\sigma = 0,25$ ;  $\sigma_a$  = vorhandene Amplitude,  $\sigma_{WK}$  = Bauteil-Wechselfestigkeit



**Bild 10:** Stützzahl  $n_\sigma$  in Abhängigkeit vom bezogenen Spannungsgefälle  $\bar{G}_\sigma$ , dargestellt für Normalspannungen, logarithmische Darstellung; Zahlenwerte 0,65 bis 0,90: Unterschied der Wechselfestigkeitskennwerte für Zugdruck und Biegung, gültig für die Werkstoffprobe des Durchmessers  $d_0 = 7,5$  mm

## Werkstoff

Die Wechselfestigkeitskennwerte für Zugdruck oder Schub sind:

$$\sigma_{W,zd} = K_{d,m} \cdot \sigma_{W,zd,N} \quad (12)$$

$$\tau_{W,s} = K_{d,m} \cdot \tau_{W,s,N} \quad (13)$$

$K_{d,m}$  ist – wie für die Zugfestigkeit – der technologische Größenfaktor. Die links in Gleichungen (12) und (13) stehenden Werte gelten für das „dicke“ Bauteil. Für die rechts stehenden Werte gilt:

$$\sigma_{W,zd,N} = f_W \cdot R_{m,N} \quad (14)$$

$$\tau_{W,s,N} = r \cdot \sigma_{W,zd,N} \quad (15)$$

mit

$f_W$  und  $r$  = Faktoren nach Tabelle 2,

$R_{m,N}$  wie nach Gleichung (1).

Nur die in den Gleichungen (14) und (15) genannten Festigkeitswerte sind für die Berechnung erforderlich. Die ferner in Tabelle 1 aufgeführten Wechselfestigkeitskennwerte für Biegung und Torsion,  $\sigma_{W,b,N}$  und  $\tau_{W,t,N}$ , dienen nur der Information und der Einordnung experimentell bestimmter Werte, sind aber für die Berechnung nicht erforderlich, da sie mit den noch zu beschreibenden Stützzahlen aus den Größen  $\sigma_{W,zd,N}$  beziehungsweise  $\tau_{W,s,N}$  berechnet werden können.

Die Werkstoff-Festigkeitskennwerte entsprechen wie im statischen Fall der Überlebenswahrscheinlichkeit  $P_0 = 97,5\%$ .

Die Mittelspannungsempfindlichkeit  $M_\sigma$ , als weiterer Festigkeitskennwert, wird für den Wechselbereich – Spannungsverhältnis  $R_\sigma = -1$  bis  $0$  – nach SCHÜTZ in Abhängigkeit von Zugfestigkeit und Werkstoffgruppe berechnet; für Normalspannungen gilt nach Bild 9:

$$M_\sigma = \frac{\sigma_{WK} - \sigma_{AK,R\sigma=0}}{\sigma_{m,R\sigma=0}} = a_M \cdot R_m + b_M \quad (16)$$

mit

$\sigma_{WK}$  und  $\sigma_{AK,R\sigma=0}$  = ertragbare Spannungsamplitude bei reiner Wechselbeziehung beziehungsweise Schwellbeanspruchung,

$\sigma_{m,R\sigma=0} = \sigma_{AK,R\sigma=0}$  = Mittelspannung bei reiner Schwellbeanspruchung.

Beispielsweise gilt für Gußeisen mit Kugelgraphit:

$$M_\sigma = 0,00035 \cdot R_m + 0,08 \quad (17)$$

Für GGG-40 mit  $R_m = 400 \text{ N/mm}^2$  ergibt sich  $M_\sigma = 0,22$ .

Für andere Werte des Spannungsverhältnisses  $R_\sigma$  gelten andere Werte, so daß in Bild 9 mehrere Bereiche zu unterscheiden sind. Gleichung (16) gilt unabhängig von der Kerbschärfe des Bauteils; bei der Berechnung mit Nennspannungen (Formzahl als Maß der Kerbschärfe bekannt) oder mit örtlichen Spannungen (Formzahl nicht bekannt) entstehen also keine Widersprüche.

### Konstruktion

Der Einfluß der Konstruktion auf die Ermüdungsfestigkeit wird mit dem Konstruktionsfaktor  $K_{WK}$  berücksichtigt, der in Abhängigkeit von Gestalt und Oberfläche des Bauteils bestimmt wird. Die Berechnung ist auch hier für jede Beanspruchungskomponente getrennt vorzunehmen; bei Berechnung mit örtlichen Spannungen und Normalspannungen ( $\sigma$ , Zugdruck) gilt:

$$K_{WK,\sigma} = \frac{1}{n_\sigma \cdot K_{FK,\sigma}} \cdot \frac{1}{K_V} \quad (18)$$

mit

$n_\sigma =$  Stützzahl.

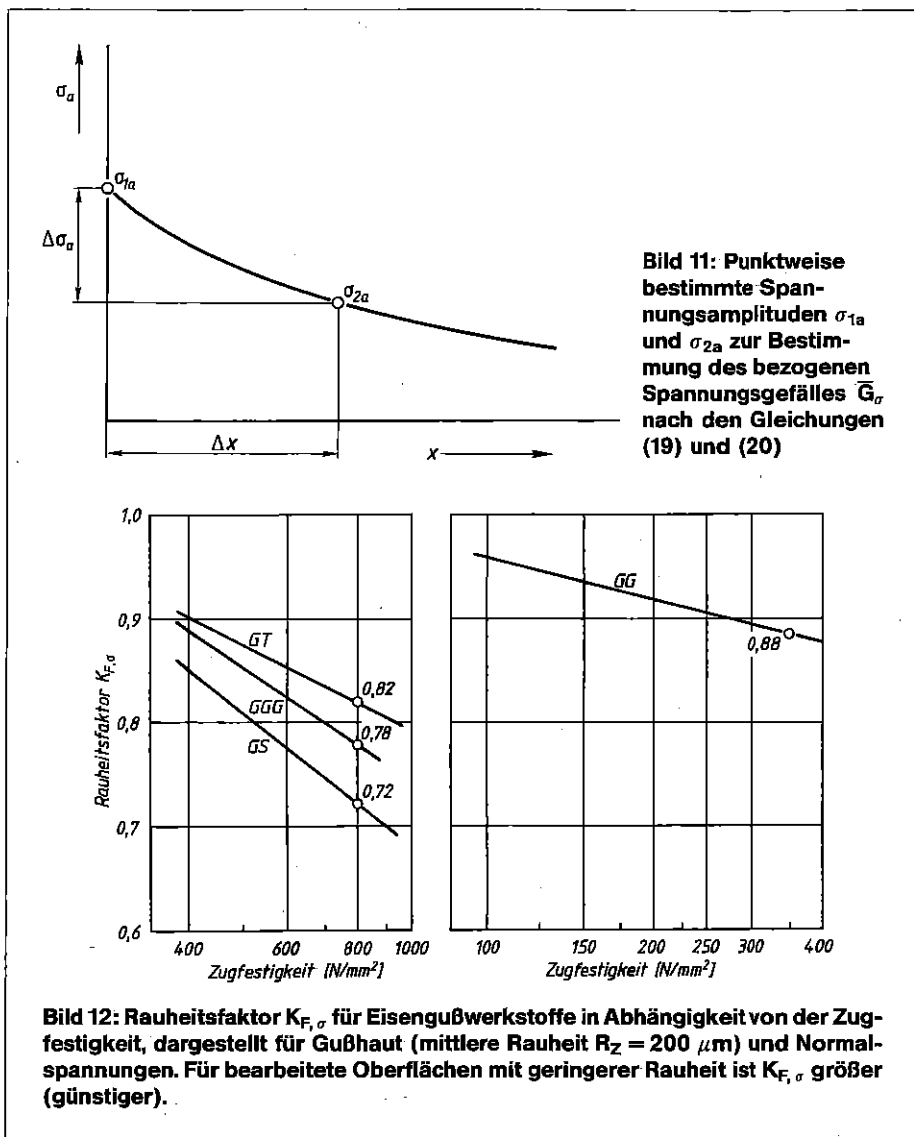
Der Einfluß der Oberfläche auf die Verminderung der Bauteil-Dauerfestigkeit ergibt sich aus der Rauheit – Rauheitsfaktor  $K_{F,\sigma}$  – und der Randschichtverfestigung – Randschichtfaktor  $K_V$ .

Mit der Stützzahl werden Form und Größe des Bauteils berücksichtigt. Sie hängt vom bezogenen Spannungsgefälle  $\bar{G}_\sigma$  und vom Werkstoff ab, Bild 10. Näherungsweise gilt für Normalspannungen  $\bar{G}_\sigma = 2/r$  je nach Kerbradius  $r$ . Bei punktweise bestimmten Spannungsamplituden kann die Berechnung mit der Randspannungsamplitude  $\sigma_{1a}$  (Bild 11) nach diesen Gleichungen erfolgen:

$$\bar{G}_\sigma = \frac{1}{\sigma_{1a}} \cdot \frac{\Delta\sigma_a}{\Delta X} \quad (19)$$

$$= \frac{1}{\Delta X} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{2a}}{\sigma_{1a}}\right) \quad (20)$$

Der Rauheitsfaktor für das Bauteil ( $K_{F,\sigma}$ ) ist etwas größer (günstiger) als der für den Werkstoff ( $K_{F,\sigma}$ ), Bild 12, da das (gekerbte) Bauteil weniger kerbempfindlich als der (nichtgekerbte) Werkstoff ist. Eigentlich sind vor allem Eigenspannungen und Verfestigung als Folge der Fertigung entscheidend für die Verminderung der Bauteil-Dauerfestigkeit, weniger die Rauheit selbst. Nach dem gegenwärtigen Kenntnisstand können hierzu aber keine quantitativen Festlegungen getroffen werden, so daß vorerst die traditionellen Regelungen beibehalten werden müssen.



**Bild 11: Punktweise bestimmte Spannungsamplituden  $\sigma_{1a}$  und  $\sigma_{2a}$  zur Bestimmung des bezogenen Spannungsgefälles  $\bar{G}_\sigma$  nach den Gleichungen (19) und (20)**

**Bild 12: Rauheitsfaktor  $K_{F,\sigma}$  für Eisengußwerkstoffe in Abhängigkeit von der Zugfestigkeit, dargestellt für Gußhaut (mittlere Rauheit  $R_z = 200 \mu m$ ) und Normalspannungen. Für bearbeitete Oberflächen mit geringerer Rauheit ist  $K_{F,\sigma}$  größer (günstiger).**

**Tabelle 3: Einfluß von Nachbehandlungsverfahren auf den Randschichtfaktor  $K_V$  von Eisengußwerkstoffen (Gußeisen, Stahl- und Temperguß), Richtwerte**

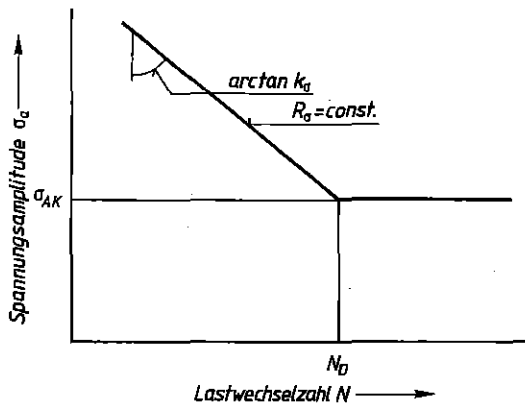
Verfahren	Randschichtfaktor $K_V$			
	Bauteil ungekerbt*)		Bauteil gekerbt	
	Probendurchmesser		Probendurchmesser	
	8 bis 15 mm	30 bis 40 mm	8 bis 15 mm	30 bis 40 mm
Nitrieren	1,15	1,1	1,9	1,3
Einsatzhärten	1,2	1,1	1,5	1,2
Induktions-, Flammhärten	1,3	1,2	1,6	1,5
Rollen	1,2	1,1	1,5	1,3
Kugelstrahlen	1,1	1,1	1,4	1,1

\*) Für ungekerbte Bauteile unter Zugdruckbelastung ist  $K_V = 1$

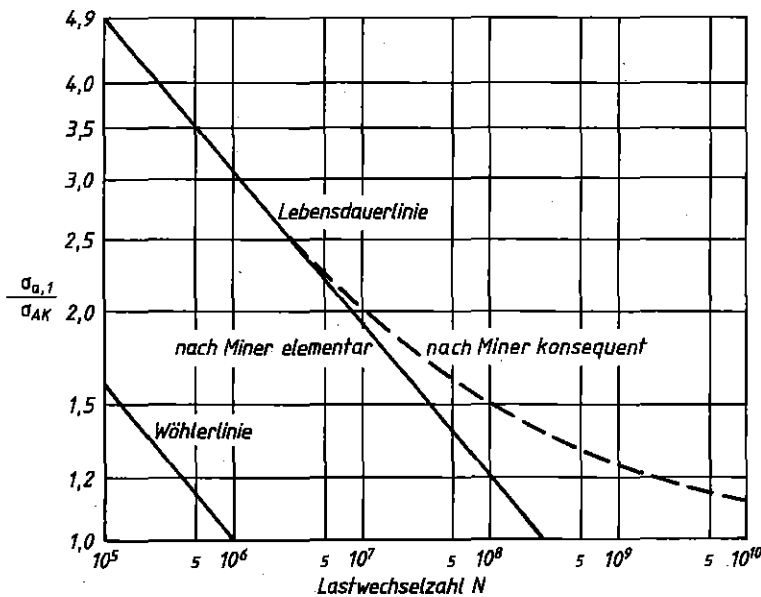
Für den Randschichtfaktor  $K_V$  zur Berücksichtigung einer Randschichtverfestigung sollen die Werte nach Tabelle 3 gelten.

verändert, hat aber eine andere Form, weil hier in der Regel eine Kerbwirkungszahl existiert, die die Stützzahl ersetzt.

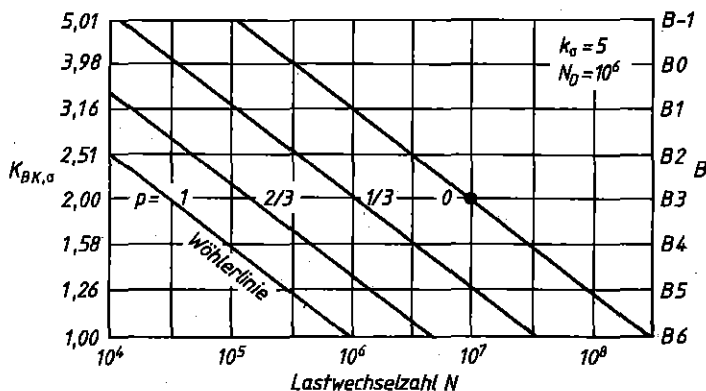
Bei Berechnung mit Nennspannungen ist der Konstruktionsfaktor inhaltlich un-



**Bild 13:** Schematische Bauteil-Wöhlerlinie, dargestellt für Normalspannungen und gültig für konstantes Spannungsverhältnis  $R_\sigma$ . Das Beanspruchungskollektiv ist erforderlichenfalls so umzurechnen, daß es in allen Stufen der Bedingung  $R_\sigma = \text{const.}$  genügt. Es gilt  $k_\sigma = 5$  (Normalspannungen),  $k_\tau = 8$  (Schubspannungen) und einheitlich  $N_D = 10^6$ .



**Bild 14:** Lebensdauerlinien für ein Beanspruchungskollektiv geringer Völligkeit nach unterschiedlichen Berechnungsverfahren, dargestellt für Normalspannungen;  $\sigma_{a,1}$  = Kollektivgrößtwert,  $\sigma_{AK}$  = Bauteil-Dauerfestigkeit,  $N$  = Lebensdauer (Lastwechselzahl); Kennwerte des normal-(binominal-) verteilten Normkollektivs: Beiwert  $p = 0$ , Umfang  $n = 10^6$ ; Kennwerte der Wöhlerlinie:  $k_\sigma = 5$ ,  $N_D = 10^6$



**Bild 15:** Betriebsfestigkeitsfaktor  $K_{BK,\sigma}$  je nach Beanspruchungsgruppe  $B$ , dargestellt für Normalspannungen. „Normal-“ (binominal-) verteiltes Normkollektiv mit dem Beiwert  $p$ , Beanspruchungsgruppe in Anlehnung an den Kranbau, DIN 15 018. Falls die Beanspruchungsgruppe, gültig für ein bestimmtes Bauteil bei bestimmter Einsatzart, nicht einem Katalog entnommen wird, können sie und der gesuchte Wert  $K_{BK,\sigma}$  je nach Kollektivumfang  $N$  und  $p$  aus dem Bild abgelesen werden. Beispiel (markierter Punkt):  $N = 10^7$  und  $p = 0$  bedeutet  $B\ 3$  mit  $K_{BK,\sigma} = 2,00$

## Bauteil-Wechselfestigkeit

Mit dem Konstruktionsfaktor ergibt sich die Bauteil-Wechselfestigkeit; bei Berechnung mit örtlichen Spannungen und Normalspannungen gilt:

$$\sigma_{WK} = \frac{\sigma_W}{K_{WK,\sigma}} \quad (21)$$

## Amplitude der Bauteil-Dauerfestigkeit für gegebene Mittelspannung

Der ertragbare Wert der Amplitude der Bauteil-Dauerfestigkeit für die gegebene Mittelspannung ist für örtliche Spannungen und Normalspannungen:

$$\sigma_{AK} = K_{AK,\sigma} \cdot \sigma_{WK} \quad (22)$$

Der Mittelspannungsfaktor  $K_{AK,\sigma}$  ist je nach Mittelspannung  $\sigma_m$ , Mittelspannungsempfindlichkeit  $M_\sigma$  und „Überlastungsfall“ zu berechnen, siehe Bild 9. Die Wahl des Überlastungsfalles hat in Abhängigkeit vom Beanspruchungsverhalten bei einer möglichen Überlastung im Betrieb (nicht Havarie) zu erfolgen. Beispielsweise kann dann die Mittelspannung konstant bleiben (Überlastungsfall F1) oder das Spannungsverhältnis (Überlastungsfall F2) usw. In der Regel ist der Überlastungsfall F2 der sicherste, weil er die kleinsten Werte  $\sigma_{AK}$  ergibt. Die Unterschiede werden größer mit zunehmenden Werten der Mittelspannungsempfindlichkeit und des Sicherheitsfaktors.

## Bauteil-Betriebsfestigkeit

Der ertragbare Wert der Amplitude der Bauteil-Betriebsfestigkeit für die gegebene Mittelspannung ist für örtliche Spannungen und Normalspannungen:

$$\sigma_{BK} = K_{BK,\sigma} \cdot \sigma_{AK} \quad (23)$$

Der Betriebsfestigkeitsfaktor  $K_{BK,\sigma}$  ist je nach Beanspruchungskollektiv und Bauteil-Wöhlerlinie nach einem der nachstehend genannten Berechnungsverfahren nach MINER zu bestimmen.

Die Bauteil-Wöhlerlinie besteht aus zwei Geraden im doppeltlogarithmischen Koordinatensystem und ist durch Bauteil-Dauerfestigkeit, Neigungsexponent  $k_\sigma$  und Knickpunktzyklenzahl  $N_D$  festgelegt, Bild 13. Die Werte  $k_\sigma$  und  $N_D$  gelten unabhängig von der Kerbschärfe des Bauteils; wie bei der Mittelspannungsempfindlichkeit entstehen so bei der Berechnung mit Nennspannungen (Formzahl bekannt) oder mit örtlichen Spannungen (Formzahl nicht bekannt) keine Widersprüche.

Die Berechnung hat in der Regel nach dem Verfahren „MINER konsequent“\*) zu erfolgen. Wenn ungünstigere Ergebnisse akzeptiert werden können, kann die Berechnung in vereinfachter Form nach dem Verfahren „MINER elementar“ durchgeführt werden; beide Lebensdauerlinien werden in *Bild 14* miteinander verglichen. In einer weiter vereinfachten Form kann die Berechnung mit Beanspruchungsgruppen, *Bild 15*, und in noch weiter vereinfachter Form auf der Grundlage der Äquivalentspannungsamplitude durchgeführt werden. Der Ermüdungsfestigkeitsnachweis hat im letzten Fall die einfache äußere Gestalt eines Dauerfestigkeitsnachweises (eventuell auch Zeitfestigkeitsnachweis).

Die Berechnung für Einstufenbeanspruchung ist ein Sonderfall des allgemeinen Falles der Berechnung für Kollektivbeanspruchung.

### Sicherheit

Die erforderlichen Sicherheitsfaktoren für Gußeisenwerkstoffe, Stahlguß und Walzstahl sind unterschiedlich und von weiteren Einflüssen abhängig. Grundsicherheitsfaktor und Ausgangswert ist  $j_D = 1,5$  bezüglich der Ermüdungsfestigkeit von Walzstahl. Ansonsten gelten die gleichen Festlegungen wie für den vorstehend genannten statischen Festigkeitsnachweis bis auf folgende Unterschiede:

- Bei regelmäßiger Inspektion dürfen die Sicherheitsfaktoren um 10% vermindert werden.
- Bei Berechnung mit örtlichen Spannungen wird kein Bonus von 10% für „genauere Berechnung“ erteilt, da auch bei Berechnung mit Nennspannungen die Spannungsspitzen mit der Stützzahl oder der Kerbwirkungszahl immer „genau“ berücksichtigt werden.

### Nachweis

Der Nachweis erfolgt formal wie im statischen Fall; die Analogie hier und an anderen Stellen ist beabsichtigt. Für Normal- und Schubspannungen gelten die Einzelnachweise:

$$\frac{\hat{\sigma}_a}{\hat{\sigma}_{BK}} \leq \frac{1}{j_D} \quad (24)$$

$$\frac{\hat{\tau}_a}{\hat{\tau}_{BK}} \leq \frac{1}{j_D} \quad (25)$$

\*) Die Berechnung nach dem Verfahren „MINER konsequent“ ist kompliziert und kaum von Hand ausführbar. Hier wird deutlich, daß in der Regel das in Arbeit befindliche PC-Rechnerprogramm angewendet werden sollte.

mit

$\hat{\sigma}_a$  und  $\hat{\tau}_a$  = Beanspruchungen (Spannungsamplituden, Kollektivgrößtwerte),

$\hat{\sigma}_{BK}$  und  $\hat{\tau}_{BK}$  = zugehörige Bauteil-Betriebsfestigkeitswerte (ertragbare Spannungsamplituden, ertragbare Kollektivgrößtwerte).

Die Gleichungen können ergänzt werden um einen Temperaturfaktor und einen Frequenzfaktor.

Der Nachweis für zusammengesetzte Beanspruchungen wird für duktile Werkstoffe mit großer Bruchdehnung ( $A_5 > 12,5\%$ ) nach der Gestaltänderungsenergiehypothese geführt:

$$s_{v,GH} = \sqrt{\left(\frac{\hat{\sigma}_a}{\hat{\sigma}_{BK}}\right)^2 + 3r^2 \cdot \left(\frac{\hat{\tau}_a}{\hat{\tau}_{BK}}\right)^2} \leq \frac{1}{j_D} \quad (26)$$

und für Werkstoffe mit einer Bruchdehnung  $A_5 < 12,5\%$  nach der Normalspannungshypothese:

$$s_{v,NH} = \frac{1}{2} \cdot \left( \left| \frac{\hat{\sigma}}{\hat{\sigma}_{BK}} \right| + \sqrt{\left(\frac{\hat{\sigma}}{\hat{\sigma}_{BK}}\right)^2 + 4r^2 \cdot \left(\frac{\hat{\tau}_a}{\hat{\tau}_{BK}}\right)^2} \right) \leq \frac{1}{j_D} \quad (27)$$

Für den allgemeinen Fall gilt eine lineare Überlagerung beider:

$$q \cdot s_{v,NH} + (1 - q) \cdot s_{v,GH} \leq \frac{1}{j_D} \quad (28)$$

Die Größe beider Anteile wird wie im statischen Fall durch die Größe  $q(r)$  gesteuert, so daß für Walzstahl  $q = 0$ , also die Gestaltänderungsenergiehypothese, für Gußeisen mit Lamellengraphit aber  $q = 0,75$ , somit im wesentlichen die Normalspannungshypothese gilt.

Weitere Merkmale wie mögliche Berücksichtigung von Kombinationsfaktoren, „Auslastung“ des Bauteils und Charakterisierung der Gleichungen (26) bis (28) als Festigkeitshypothese oder Interaktionsgleichungen sind die gleichen wie im statischen Fall.

Beim Nachweis mit einer Äquivalentspannungsamplitude  $\sigma_{a,eff}$  sind die Quotienten  $\hat{\sigma}_a/\hat{\sigma}_{BK}$  (für Normalspannungen, Schubspannungen analog) der vorangehenden Gleichungen zu ersetzen durch die Quotienten  $\sigma_{a,eff}/\sigma_{AK}$  ( $\sigma_{AK}$  = Dauerfestigkeit), und der Nachweis erscheint als Dauerfestigkeitsnachweis; die Mühe der Betriebsfestigkeitsrechnung ist hier zur Beanspruchungsseite verlagert und steckt in der Festlegung der Äquivalentspannungsamplitude.

## Zusammenfassung und Ausblick

Die FKM-Richtlinie „Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile“ ermöglicht einen umfassenden statischen, Dauer- und Betriebsfestigkeitsnachweis für Bauteile des Maschinenbaues und anderer Bereiche der metallverarbeitenden Industrie unter Beachtung aller wesentlichen Einflußgrößen. Die Richtlinie gilt für Gußeisenwerkstoffe, Stahlguß und Walzstahl. Die Bauteile können auch geschweißt sein, worauf aber nicht näher eingegangen wird. Ausgangspunkt sind die gewährleisteten Festigkeitskennwerte in den Werkstoffnormen, Ergebnis ist die „Auslastung“ des Bauteiles.

Die Berechnung sollte bei bestehenden Voraussetzungen mit Nennspannungen, kann aber auch mit elastisch bestimmten örtlichen Spannungen durchgeführt werden. Das gilt insbesondere

- für Gußeisenwerkstoffe und Stahlguß, wenn die Bauteile kompliziert oder kompakt sind, so daß Nennspannungen nicht definiert sind,
- für Werkstoffe mit einer Bruchdehnung  $A_5 < 12,5\%$ , für die wegen mangelnder Duktilität kein Nennspannungsnachweis geführt werden darf,
- zur Bewertung von mit FEM und ähnlichen Methoden gewonnenen Ergebnissen.

Für die Anwendung vorteilhaft sind die modulare Gestaltung der FKM-Richtlinie und das in Arbeit befindliche PC-Rechnerprogramm „Festigkeitsnachweis“. An der weiteren Ausgestaltung dieser FKM-Richtlinie wird gearbeitet.

### Schrifttum

- [1] TGL 19340 (März 1983): Ermüdungsfestigkeit, Dauerfestigkeit der Maschinenbauteile
- [2] TGL 19341 (Februar 1988): Festigkeitsnachweis für Bauteile aus Eisengußwerkstoffen
- [3] TGL 19333 (Mai 1979): Schwingfestigkeit, Zeitfestigkeit von Achsen und Wellen
- [4] TGL 19350 (Februar 1986): Ermüdungsfestigkeit, Betriebsfestigkeit der Maschinenbauteile
- [5] Richtlinie VDI 2226 (Juli 1965): Empfehlung für die Festigkeitsberechnung metallischer Bauteile
- [6] Hänel, B., M. Krämer, W. Lausch, G. Kubon, H. Kropp u. R. Wienhold: Spannungsberechnung und Festigkeitsnachweis für einen Verdichterszylinder aus Gußeisen mit Lamellengraphit. Z. konstruieren + gießen 16 (1991) 3, S. 4 bis 14

## Formelzeichen

### Kleinbuchstaben

$d$  = Durchmesser

$d_{\text{eff}}$  = gleichwertiger Durchmesser des Rohgusses oder Halbzeuges

$d_{\text{eff},N}$  =  $d_{\text{eff}}$  nach der jeweiligen Werkstoffnorm

$d_{\text{eff},G}$  =  $d_{\text{eff}}$ , bis zu dem kein technologischer Größeneinfluß bestehen soll

$d_0$  =  $d$  der Werkstoffprobe,  $d_0 = 7,5 \text{ mm}$

$f_W$  = Quotient aus  $\sigma_W$  und  $R_m$

$j$  = Sicherheitsfaktor, allg.

$j_m$  =  $j$  gegenüber  $R_m$

$j_p$  =  $j$  gegenüber  $R_p$

$j_D$  =  $j$  gegenüber der Ermüdungsfestigkeit

$j_F$  = zusätzlicher Teilsicherheitsfaktor für zulässige Fehler in Gußstücken

$k_\sigma$  = Neigungsexponent der Bauteil-Wöhlerlinie \*)

$n_{pl,\sigma}$  = plastische Stützzahl für die statische Festigkeit \*)

$n_\sigma$  = Stützzahl für die Ermüdungsfestigkeit \*)

$p$  = Kollektivbeiwert

$r$  = Kerbradius

$r$  = Quotient aus  $\tau_{W,s}$  und  $\sigma_{W,zd}$

$s$  = Dicke

### Großbuchstaben

$A_5$  = Bruchdehnung

$\bar{G}_\sigma$  = bezogenes Spannungsgefälle \*)

$K_d$  = technologischer Größenfaktor

$K_{d,m}$  =  $K_d$  für  $R_m$  sowie für  $\sigma_{W,zd}$  und  $\tau_{W,s}$

$K_{d,p}$  =  $K_d$  für  $R_p$

$K_{AK,\sigma}$  = Mittelspannungsfaktor, der den Unterschied der Bauteil-Dauerfestigkeit mit und ohne Mittelspannung beschreibt \*)

$K_{BK,\sigma}$  = Betriebsfestigkeitsfaktor, der den Unterschied zwischen Betriebsfestigkeit und Dauerfestigkeit des Bauteiles beschreibt \*)

$K_{F,\sigma}$  = Rauheitsfaktor für den Werkstoff \*)

$K_{FK,\sigma}$  = Rauheitsfaktor für das Bauteil \*)

$K_{SK,\sigma}$  = Konstruktionsfaktor, der den Unterschied der statischen Festigkeit von Bauteil und Werkstoff beschreibt \*)

$K_V$  = Randschichtfaktor

$K_{WK,\sigma}$  = Konstruktionsfaktor, der den Unterschied der Wechselfestigkeit von Bauteil und Werkstoff beschreibt \*)

$M_\sigma$  = Mittelspannungsempfindlichkeit \*)

$N$  = Zyklenzahl entsprechend der geforderten Lebensdauer oder ertragbare Zyklenzahl

$N_D$  = Knickpunktzyklenzahl der Bauteil-Wöhlerlinie

$R_e$  = Streckgrenze des Werkstoffes

$R_m$  = Zugfestigkeit des Werkstoffes

$R_{m,N}$  = Normwert zu  $R_m$

$R_p$  = Fließgrenze des Werkstoffes als Verallgemeinerung von  $R_e$  oder  $R_{p0,2}$

$R_{p,N}$  = Normwert zu  $R_p$

$R_{p0,2}$  = 0,2-Dehngrenze des Werkstoffes

$R_z$  = mittlere Rauheit der Oberfläche

$R_\sigma$  = Spannungsverhältnis \*)

### Griechische Buchstaben

$\sigma$  = örtlicher Wert der Spannung allgemein \*)

$\sigma_a$  = Spannungsamplitude \*)

$\hat{\sigma}_a, \sigma_{a,1}$  =  $\sigma_a$  der größten Stufe des Beanspruchungskollektives \*)

$\sigma_{a,\text{eff}}$  = Äquivalentspannungsamplitude \*)

$\sigma_m$  = Mittelspannung \*)

$\sigma_{AK}$  = Amplitude der Bauteil-Dauerfestigkeit für  $\sigma_m$  \*)

$\hat{\sigma}_{BK}$  = Amplitude (Größtwert) der Bauteil-Betriebsfestigkeit für  $\sigma_m$  \*)

$\sigma_{SK}$  = statische Bauteilfestigkeit \*)

$\sigma_{WK}$  = Bauteil-Wechselfestigkeit \*)

$\sigma_{W,zd}$  = Zugdruckwechselspannung

$\sigma_{W,zd,N}$  = Normwert zu  $\sigma_{W,zd}$

$\sigma_{W,b}$  = Biegewechselspannung

$\sigma_{W,b,N}$  = Normwert zu  $\sigma_{W,b}$

$\tau_{W,s}$  = Schubwechselspannung

$\tau_{W,s,N}$  = Normwert zu  $\tau_{W,s}$

$\tau_{W,t}$  = Torsionswechselspannung

$\tau_{W,t,N}$  = Normwert zu  $\tau_{W,t}$

\*) Gilt für Normalspannungen. Für Schubspannungen ist  $\sigma$  durch  $\tau$  zu ersetzen.

# 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.

## 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 einfach 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-

stehenfalls 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 Krafteinleitung 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.

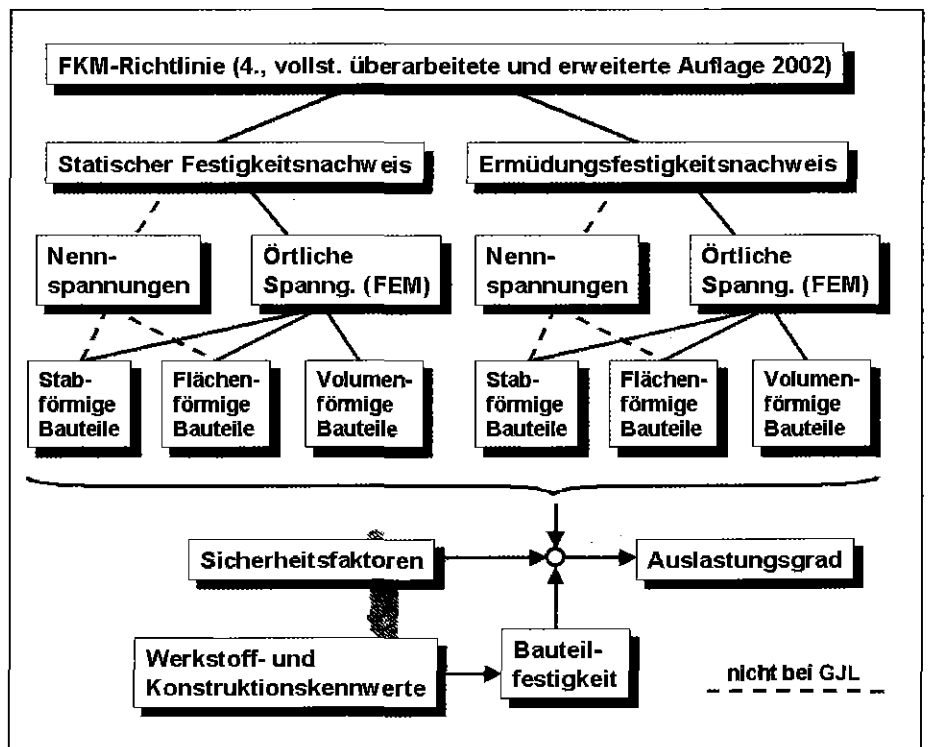


Bild 1: Festigkeitsnachweise nach FKM-Richtlinie

<sup>1)</sup> 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 Gußeisen 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 Werte<sup>2)</sup> 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

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

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

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

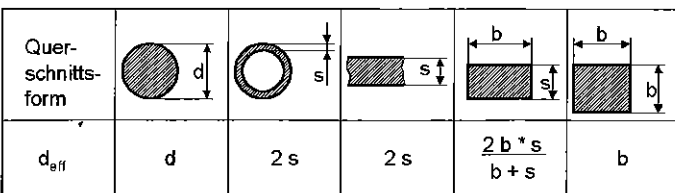
Die Abhängigkeit des technologischen Größenfaktors  $K_{d,m}$  vom gleichwertigen Durchmesser  $d_{eff}$  ist für den Bereich bis 300 mm im *Bild 3* dargestellt. Der technologische Größenfaktor  $K_{d,p}$  ist für Gußeisen mit Lamellengraphit nicht definiert, bei Gußeisen mit Kugelgraphit gilt  $K_{d,p}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

Bei Druckspannungen ist ferner der Zugdruckfestigkeitsfaktor  $f_\sigma$  (*Tabelle 1*) zu berücksichtigen, mit dem die gegenüber der Zugfestigkeit abweichenden

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

**Tabelle 1: Festigkeitsfaktoren**

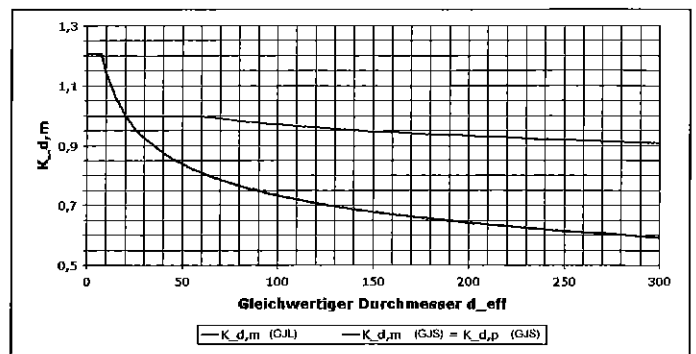
Werkstoffgruppe	$f_\sigma$ für Zug	$f_\sigma$ für Druck
GJS (GGG)	1	1,3
GJL (GG)	1	2,5



**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  $\sigma$ . 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 duktilen 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	<b>2,8</b> (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	<b>2,5</b> (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  $100\text{ °C}$  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

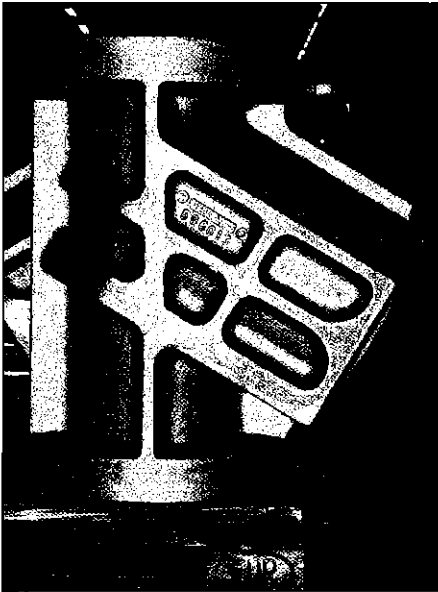
$$a_{SK,\sigma v} = q \cdot a_{NH} + (1 - q) \cdot a_{GH} \leq 1 \quad (9)$$

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

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

Zu beachten ist eine besondere Vorzeichenregel in dem Anteil für die Gestaltänderungsenergiehypothese  $a_{GH}$ . Wenn gewährleistet ist, daß die einzelnen Spannungsarten im Nachweispunkt immer gleichsinnig<sup>3)</sup> wirken, sind die statischen Auslastungsgrade  $a_{SK,\sigma i}$ ,

<sup>3)</sup> 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 gegensinnig<sup>4)</sup>, 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!

<sup>4)</sup> 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 <sup>2</sup>	
Fließgrenze	$R_{p,N}$	320 N/mm <sup>2</sup>	
Effektiver Durchmesser	$d_{eff}$	< 60 mm	
Größenfaktor	$K_{d,m}, K_{d,p}$	1	
Zugfestigkeit (Bauteil-Normwert)	$R_m$	500 N/mm <sup>2</sup>	
Zugdruckfestigkeitsfaktor	$f_\sigma$	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 <sup>2</sup>	650 N/mm <sup>2</sup>
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
<b>Statischer Auslastungsgrad</b>	<b><math>a_{SK,\sigma v}</math></b>	<b>0,741 (<math>\leq 1</math>)</b>	<b>0,138 (<math>\leq 1</math>)</b>

### 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

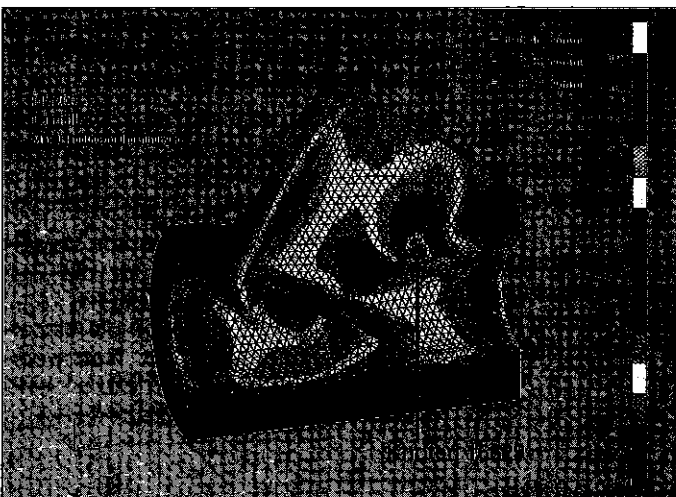
Die Beaufschlagung des Bauteils mit einem Innendruck von 100 bar ist für die Bemessung des Bauteils maßgebend. Die für den statischen Festigkeitsnachweis relevanten Maximalbeziehungsweise Minimalspannungen

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, Flammhärten	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  $n_{\sigma}$  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  $n_{\sigma}$  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.

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

Für die Gußhaut ist als mittlere Oberflächenrauheit  $R_z = 200 \mu\text{m}$  anzusetzen. Bei randschichtgehärteten Bauteilen ergibt sich wegen der höheren Randzugfestigkeit  $R_m$  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  $K_{NLE}$  fließt schließlich noch das nichtlinear-elastische Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Gußeisen mit Lamellengraphit bei Zugdruck oder Biegung in den Konstruktionsfaktor ein (Tabelle 9). Für Gußeisen mit Kugelgraphit ist  $K_{NLE} = 1$  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:

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

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  $K_{AK,o}$  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

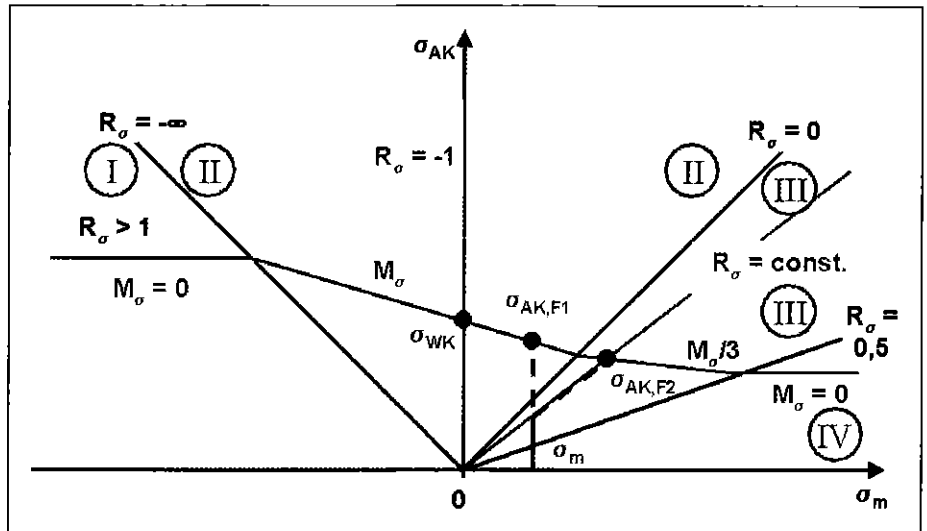


Bild 6: Haigh-Diagramm mit Bereichen I-IV der Mittelspannungsempfindlichkeit (Spannungsverhältnis  $R_\sigma = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ )

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

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 dargestellt 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  $K_{NLE}$

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

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

$J_D$	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 Prüfvorschriften 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

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

mit  $a_{NH} = \text{MAX}(a_{BK,o1}, a_{BK,o2}, a_{BK,o3})$   
und  $a_{GH} = \sqrt{(1/2 \cdot ((a_{BK,o1} - a_{BK,o2})^2 + (a_{BK,o2} - a_{BK,o3})^2 + (a_{BK,o3} - a_{BK,o1})^2))}$ .

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

## 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.

# FKM-Richtlinie - Bruchmechanischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile

Die FKM-Richtlinie für den bruchmechanischen Festigkeitsnachweis [1] entstand in einem Forschungsprojekt im Arbeitskreis Bauteilfestigkeit mit der Förderung durch das Forschungskuratorium Maschinenbau des VDMA. Mit ihr sind Konstrukteure und Berechnungsingenieure in der Lage, bruchmechanische Fragestellungen schnell zu beantworten. Sie beschreibt den bruchmechanischen Festigkeitsnachweis und ermöglicht eine Sicherheitsbewertung hinsichtlich Dauerfestigkeit und begrenztem Ermüdungsrissfortschritt sowie hinsichtlich Rissinitiierung, stabiler Risserweiterung, Rissinstabilität oder plastischem Kollaps bei statischer Beanspruchung. Grundlage der Richtlinie bildet die Europäische Prozedur SINTAP [2] und die Britische Norm 7910 [3]. Sie ergänzt die FKM-Richtlinie zum konventionellen Festigkeitsnachweis [4] um die Bewertung von Bauteilen mit vorhandenen oder postulierten Rissen [5].

## 1 Einleitung

Für Konstrukteure und Berechnungsingenieure im Maschinenbau und in verwandten Bereichen der Industrie gibt es seit 1994 die „FKM-Richtlinie für den rechnerischen Festigkeitsnachweis“, die in „konstruieren + gießen“ für komplexe Maschinenbauteile aus GJL- oder GJS-Guss bereits in [6] kommentiert wurde. Sie entstand - wie auch die hier vorgestellte FKM-Richtlinie für den bruchmechanischen Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile - im Arbeitskreis Bauteilfestigkeit mit der Förderung durch das Forschungskuratorium Maschinenbau und die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto-von-Guericke“ (AIF). Die FKM-Richtlinie für den rechnerischen Festigkeitsnachweis enthält den statischen Festigkeitsnachweis und den Ermüdungsfestigkeitsnachweis unter Anwendung der klassischen Methoden der Festigkeitslehre ohne Berücksichtigung von Fehlern. Werden an Bauteilen jedoch Fehler wie zum Beispiel Risse durch zerstörungsfreie Prüfverfahren entdeckt oder muss mit deren Auftreten in einem Inspektionszeitraum gerechnet werden, so verlangt dies eine Anwendung bruchmechanischer Methoden. Eine zusammenfassende Übersicht zu den fachspezifischen bruchmechanischen Bewertungsvorschriften in unterschiedlichen Industriezweigen wird in [7] gegeben.

<sup>1</sup> Prof.-Dr.-Ing. Gerhard Pusch und Dr.-Ing. Peter Hübner, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Werkstofftechnik, Dr.-Ing. Britta Pyttel, TU Darmstadt, Institut für Werkstoffkunde

Der bruchmechanische Festigkeitsnachweis für Bauteile aus Eisengusswerkstoffen [8] ist Bestandteil der FKM-Richtlinie und weiterer fachspezifischer Regelwerke [9], [10], wobei auch für diese Bauteile die Bruchsicherheitsbewertung geschweißter Konstruktionen [11] unter Beachtung bestehender Richtlinien [12] zur bruchmechanischen Bewertung zunehmend zu beachten sein wird. Die Anwendung der FKM-Richtlinie ermöglicht die gezielte Lösung folgender Aufgabenstellungen:

- In der Konstruktionsphase können angenommene Fehler bewertet werden, um Geometrie, Werkstoff und Herstellungsverfahren zu spezifizieren.
- Während der Herstellung und im Betrieb sind geeignete zerstörungsfreie Prüfverfahren zur Qualitätskontrolle auszuwählen und gegebenenfalls Inspektionsintervalle festzulegen.
- Während des Betriebes müssen Bauteile mit Fehlern hinsichtlich ihrer gegenwärtigen und zukünftigen Gebrauchseignung bewertet werden. Im Schadensfall sind die Schadensursachen zu ermitteln.

Die prinzipielle Vorgehensweise ist dabei trotz unterschiedlicher Aufgabenstellungen und Ergebnisse gleich und bildet den Kern der Richtlinie. Der bruchmechanische Festigkeitsnachweis des fehlerbehafteten Bauteils ersetzt nicht den konventionellen Festigkeitsnachweis des nicht fehlerbehafteten Bauteils. Beide Nachweise verstehen sich als komplementäre Nachweise.

## 2 Inhalt der Richtlinie

Die Richtlinie gilt für den Maschinenbau und für verwandte Bereiche der Industrie. Für mechanisch beanspruchte Bauteile mit vorhandenen oder angenommenen Fehlern ermöglicht sie einen rechnerischen Nachweis der statischen Festigkeit und einen Nachweis der Ermüdungsfestigkeit. Die Bauteile werden hinsichtlich Rissinitiierung, stabiler Risserweiterung, Bruch oder plastischem Kollaps bei statischer Beanspruchung sowie hinsichtlich Dauerfestigkeit und Ermüdungsrissfortschritt deterministisch beurteilt.

Die Richtlinie beinhaltet eine Zulässigkeitsbewertung hinsichtlich Fehlergröße, Beanspruchungshöhe und Werkstofffähigkeit. Sie gilt für Stahl, Eisengusswerkstoffe sowie Leichtmetalllegierungen bei Bauteiltemperaturen unterhalb der jeweiligen Kriechtemperatur. Es werden Beanspruchungen verwendet, die als Ergebnis elastizitätstheoretischer Lösungen, elastischer Finite-Elemente- und Randelemente-Berechnungen oder aus Messungen vorliegen.

Die Richtlinie gilt in der Regel nicht für nichtmetallische Werkstoffe, dynamische (stoßartige) und stochastische Beanspruchung, Kriechvorgänge und korrosive Umgebungsmedien. Sie gibt für alle Anwendungsfälle einen einheitlich strukturierten Berechnungsablauf vor. Dieser kann auf verschiedenen Ebenen abgestufter Konservativität erfolgen (**Bild 1**).

### 3 Beanspruchungsparameter und Berechnungsverfahren

Beanspruchungsparameter sind der Spannungsintensitätsfaktor  $K$ , der FAD-Parameter  $K_r$  und der Plastifizierungsgrad  $L_r$  des Bauteils mit Riss. Die Parameter J-Integral und  $\delta$  (Rissspitzenaufweitung) werden in dieser Richtlinie nicht explizit verwendet.

Eine Umrechnung von J in K ist über die elastischen Konstanten  $E$  und  $\nu$  möglich.

$$K = \left( \frac{E \cdot J}{1 - \nu^2} \right)^{1/2} \quad (1)$$

Der Spannungsintensitätsfaktor  $K$  wird definiert und Hinweise zur Berechnung gegeben. Weiterhin gilt

$$K_r = K / K_{mat} \quad (2)$$

und

$$L_r = F / F_0 \quad (3)$$

wobei  $K_{mat}$  die Bruchzähigkeit,  $F$  die Last und  $F_0$  die plastische Grenzlast sind.

Im Anhang der Richtlinie sind für verschiedene Strukturmodelle mit Fehlern Lösungen für die Spannungsintensitätsfaktoren  $K$  und die plastische Grenzlast angegeben.

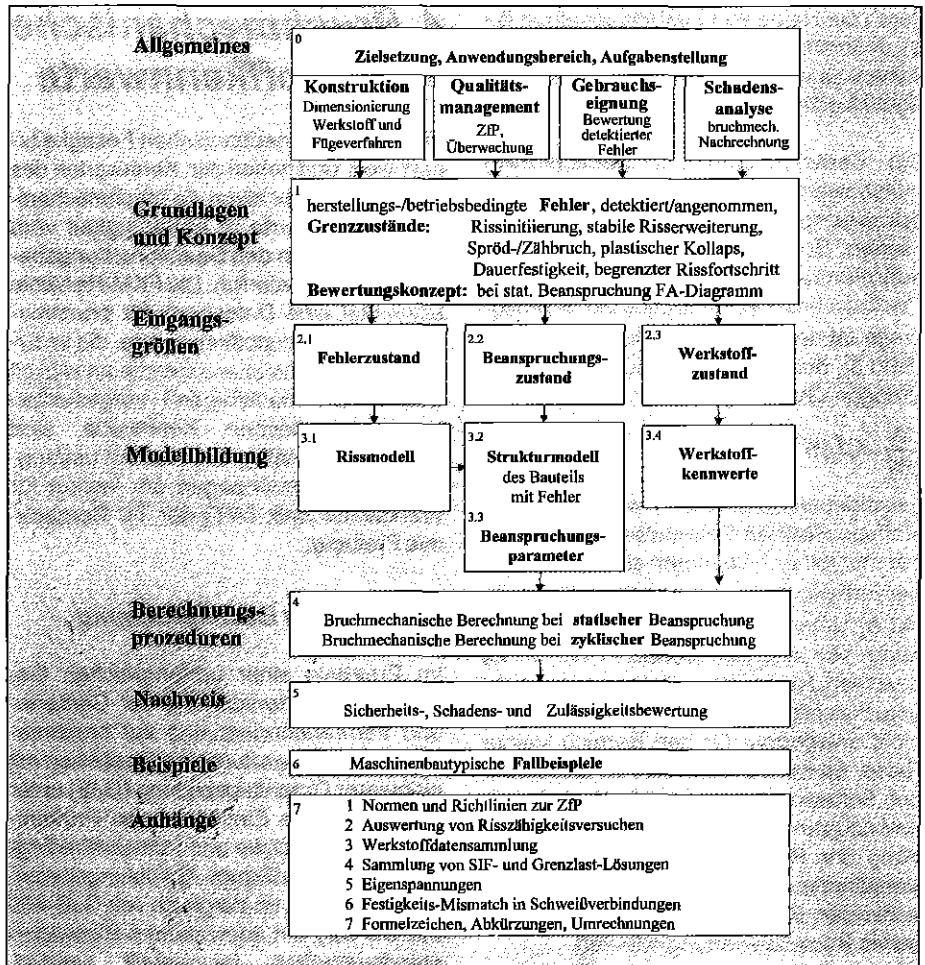


Bild 1: Struktur der Richtlinie zum bruchmechanischen Festigkeitsnachweis

Der bruchmechanische Festigkeitsnachweis bei **statischer Beanspruchung** wird, in Abhängigkeit von den verwendeten Festigkeitswerten, in zwei Ebenen unterschiedlicher Konservativität geführt. Die Basisebene liefert konservativere Ergebnisse als die Erweiterungsebene. Die Berechnungen basieren auf dem FAD-Konzept (Failure-Assessment-Diagramm). Es können die Grenzzustände Rissinitiation und Rissinstabilität betrachtet werden (Bild 2). Verwendet werden Grenzkurven  $K_r = f(L_r)$  nach SINTAP [2] in einer Basisebene, wobei unterschiedliche Grenzkurven für Werkstoffe mit und ohne ausgeprägter Streck-

grenze existieren, sowie in einer Erweiterungsebene (entspricht R6, Option 2). In der Basisebene gilt beispielsweise bei Vorliegen einer ausgeprägten Streckgrenze  $R_{el}$  für  $L_r < 1$

$$f(L_r) = \left( 1 + \frac{L_r^2}{2} \right)^{1/2} \quad (4)$$

für  $1 \leq L_r < L_{r,max}$

$$f(L_r) = f(1) L_r^{\frac{N-1}{2N}} \quad (5)$$

für  $L_r = 1$

$$f(1) = \left( \lambda + \frac{1}{2\lambda} \right)^{1/2} \quad (6)$$

mit

$$\lambda = 1 + \frac{E \Delta \epsilon}{R_{el}}$$

$$\Delta \epsilon = 0,0375 \left[ 1 - \frac{R_{el}}{1000} \right]$$

$$N = 0,3 \left[ 1 - \left( \frac{R_{el}}{R_m} \right) \right]$$

und

$$L_{r,max} = \frac{1}{2} \left( \frac{R_{el} + R_m}{R_{el}} \right)$$

Bei Versagen durch Rissinitiation sind die kritischen Bedingungen durch den Punkt B auf der Grenzkurve definiert. Die Lage von Punkten wie A innerhalb der Grenzkurve bedeutet sichere und von Punkten wie C außerhalb der Grenzkurve unsichere Bauteilbedingungen. Bei Versagen durch Rissinstabilität sind die kritischen Bedingungen

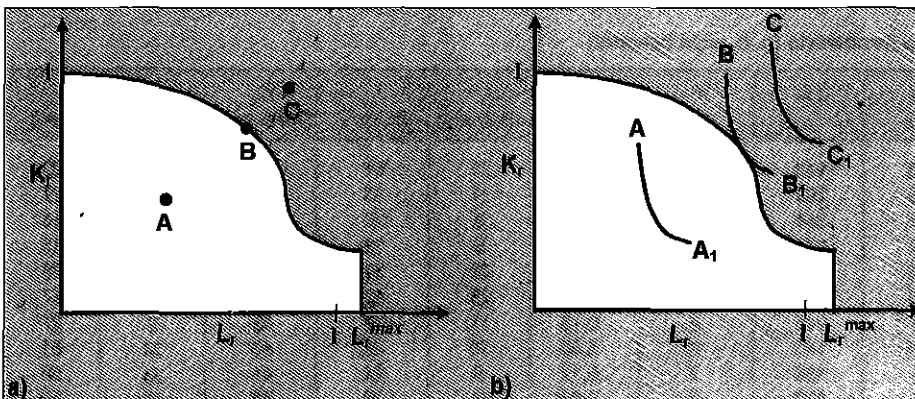


Bild 2: Bewertungsdiagramm FAD

durch die Reihe von Zustandspunkten B - B<sub>1</sub> definiert. Die Punkte A - A<sub>1</sub> bedeuten sichere und die Punkte C - C<sub>1</sub> unsichere Bauteilbedingungen.

Die Berechnungen zur Bauteilsicherheitsbewertung unter **zyklischer Beanspruchung** basieren auf der linear-elastischen Bruchmechanik und dem dort auftretenden Zusammenhang zwischen Rissfortschrittsrate da/dN und der Schwingbreite ΔK des Spannungsintensitätsfaktors (**Bild 3**), der im Bereich II durch die Paris-Erdogan-Gleichung

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (7)$$

beschrieben werden kann, wobei die werkstoffspezifischen Parameter C und m experimentell zu bestimmen sind. Hierbei ist der Einfluss der Mittelspannung,  $R = \sigma_u / \sigma_o$ , mit  $\sigma_u$  Unterspannung und  $\sigma_o$  Oberspannung, vor allem im Bereich I und III zu beachten. Reihenfolgeeffekte werden nicht berücksichtigt. Die Rechenprozeduren sind nicht anwendbar für den Bereich kleiner Risse. Es werden Hinweise zu existierenden Softwarepaketen, die die Berechnung unterstützen können, gegeben. Die Anwendung der Richtlinie wird zum besseren Verständnis und zur Veranschaulichung an konkreten Beispielen zur bruchmechanischen Bauteilbewertung erläutert.

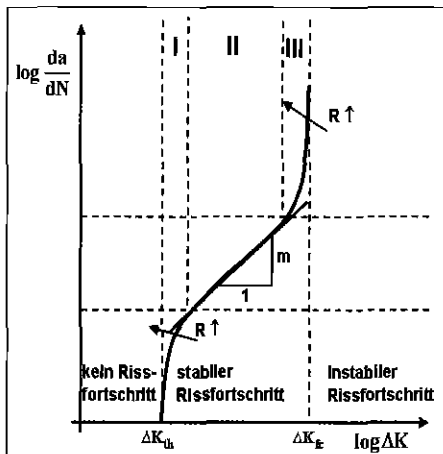


Bild 3: Zyklische Risswachstumskurve

## 4 Bruchmechanische Werkstoffkennwerte

Für den bruchmechanischen Festigkeitsnachweis sind neben den Kennwerten des Zugversuchs vor allem die bruchmechanischen Kennwerte in Abhängigkeit vom Gefüge und von den Beanspruchungsbedingungen erforderlich. Die FKM-Richtlinie beinhaltet eine Datenbank für bruchmechanische Werkstoffkennwerte, die im Ergebnis einer Literaturrecherche entwickelt wurde. Die nachfolgend vorgestellten bruchmechanischen Kennwerte sind schwerpunktmäßig Ergebnisse umfangreicher Untersuchungen am Institut für Werkstofftechnik (IWT) der TU Bergademie Freiberg.

### 4.1 Statische Beanspruchung

Im Ergebnis einer umfangreichen Gemeinschaftsuntersuchung der Gießerei- und Verbraucherindustrie zur bruchmechanischen Bewertung von Gusseisen mit globularer Graphitausbildung (GJS) unter Beachtung des Einflusses von Prüftemperatur, Wanddicke und formstoffbedingten unterschiedlichen Abkühlungsbedingungen konnte im Vergleich von GJS-400 mit GS-C25 ein äquivalentes Risswiderstandsverhalten festgestellt werden. Hieraus folgt, dass Gusseisen in optimierter Form in seinen bruchmechanischen Eigenschaften höher zu bewerten ist, als die relativ niedrige Kerbschlagzähigkeit erwarten lässt. Aus **Bild 4** ist aber auch ableitbar, dass gültige, das heißt auf das Bauteil übertragbare bruchmechanische Kennwerte mit vertretbaren Probenabmessungen im Temperaturbereich von RT bis -40 °C nur mit fließbruchmechanischen Konzepten bestimmt werden können.

Die gefüge- und damit festigkeitsbedingte Abhängigkeit der Bruchzähigkeit  $K_{Ic}^J$  - abgeleitet aus Risswiderstandskurven des J-Integralkonzeptes und Umrechnung in K-

Werte nach Gleichung (1) - ist im **Bild 5** dargestellt. Die in **Tabelle 1** aufgeführten Kennwerte des CTOD- und J-Integral-Konzeptes [15] bis [20] wurden an 20 %-seitengekerbten SENB-Proben (10 x 20 x 100 mm) über die Aufnahme von Risswiderstandskurven (Compliance Methode) gemäß ESIS P2-92 [21] bestimmt. Die physikalischen Rissinitiierungswerte  $J_I^{BL}$  und  $\delta_I^{BL}$  werden im Schnittpunkt der Blunting-Line mit der  $J_R$ - beziehungsweise der  $\delta_R$ -Kurve bestimmt. Die Umrechnung der  $J_I^{BL}$ -Werte in  $K_{Ic}^J$ -Werte des K-Konzeptes erfolgt nach Gleichung (1). Die Bauteilübertragbarkeit bruchmechanischer Kennwerte, das heißt das rechnerische Abschätzen zulässiger Fehlerabmessungen, setzt die Unabhängigkeit der ermittelten Werte von Probengröße und -geometrie voraus. Vorliegende Ergebnisse zur Bauteilübertragbarkeit fließbruchmechanischer Kennwerte des J-Integral-Konzeptes bestätigen, dass physikalische Rissinitiierungswerte nach der hier erfolgten Art der Auswertung diese Forderung weitestgehend erfüllen [22], [23].

Die auch praktizierte Bestimmung der technischen Rissinitiierungswerte  $J_{0,2}$  und  $\delta_{0,2}$  erfolgt über die  $J_R$ - oder die  $\delta_R$ -Kurven bei einem Betrag der stabilen Rissausbreitung von  $\Delta a = 0,2$  mm. Aus den bruchmechanischen Kennwerten für unterschiedliche Gusseisenwerkstoffe gemäß **Tabelle 1**, in die auch die mechanischen Kennwerte des Zugversuchs, die Brinellhärte HB und die Kennwerte des Kerbschlagbiegeversuchs (Kerbschlagzähigkeit KV, seitliche Breite SB, ISO-V-Probe) aufgeführt sind, folgt, dass bei Raumtemperatur die duktile Matrix das Werkstoffversagen über eine stabile Rissausbreitung initiiert.

Wird GJS-600-3 mit überwiegend perlitischem Gefüge in diese Betrachtung mit einbezogen, so wird hier das Werkstoffversagen durch eine überwiegend spaltflächige stabile Rissausbreitung bis zu einem deutlichen „pop-in“-Effekt eingeleitet,

Tabelle 1: Mechanische und bruchmechanische Kennwerte (n. b. nicht benannt)

Werkstoff	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	A [%]	HB	KV [J]	SB [mm]	$J_I^{BL}$ [kJm <sup>-2</sup> ]	$J_{0,2}$ [kJm <sup>-2</sup> ]	$K_{Ic}^J$ [MPam <sup>1/2</sup> ]	$\delta_I^{BL}$ [µm]	$\delta_{0,2}$ [µm]
GJS-400-15	264	413	26	143	18	0,46	21	51	60	37	92
GJS-800-10	637	893	13	292	n. b.	n. b.	11	35	45	31	27
GJS-1000-5	800	1062	8	344	7	0,03	8	20	37	6	15
GJV-300	240	295	5	137	n. b.	8	8	19	33	21	45
GJMB-350-10	213	332	15	125	13	0,36	22	39	63	47	78
GJMB-450-6	312	453	10	163	12	0,26	28	42	72	40	57
GJMB-650-2	450	703	6	245	5	0,15	11	28	45	9	27
GJMW-360-12	166	348	21	140	11	0,35	10	27	43	24	61
GJMW-400-5	238	515	5	186	7	0,12	9	24	41	24	50
GJMW-450-7	304	536	5	196	9	0,19	8	29	38	15	52
GJMW-550-4	485	714	6	230	6	0,08	12	25	47	18	28

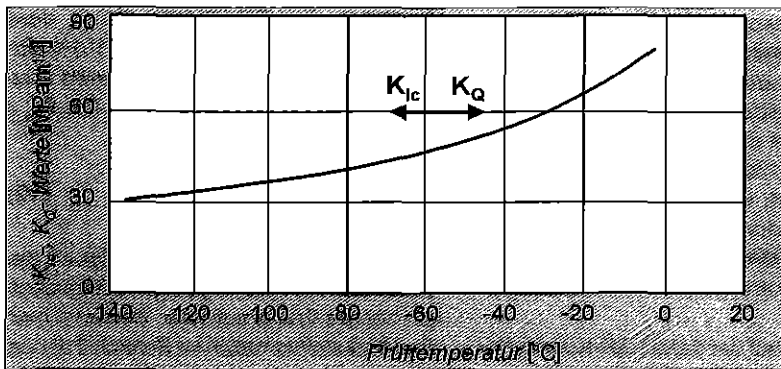
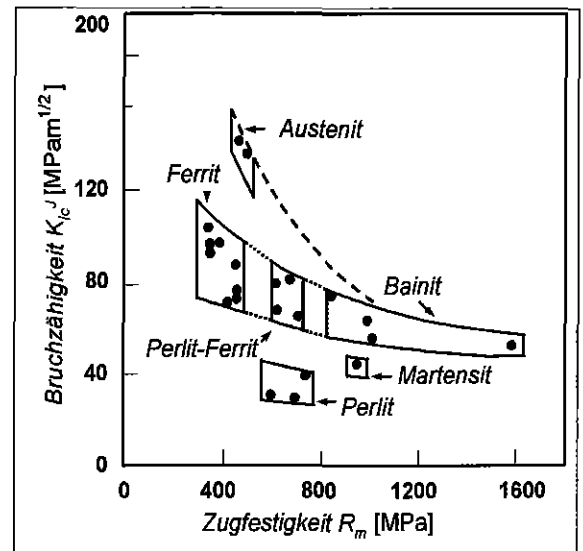


Bild 4: Verlauf der unteren Grenzkurve für die temperaturabhängigen Bruchzähigkeitswerte  $K_{Ic}$  beziehungsweise  $K_Q$  für ferritisches GJS-400, gemessen an 100 bis 200 mm dicken CT-Proben [13] (oben)

Bild 5: Bruchzähigkeit  $K_{Ic}$  (CT-Proben, Dicke 25 mm, Teillastungsverfahren, ASTM E 813-81) in Abhängigkeit von der Zugfestigkeit für unterschiedliche Gusseisenwerkstoffe [14] (rechts)



dem instabile Rissausbreitung folgt. Die für GJS-600-3 definierten  $J_c = 15 \text{ kJm}^{-2}$  und  $\delta_c = 21 \text{ }\mu\text{m}$  charakterisieren einen kritischen Rissinitiierungswert bei Auftreten des „pop-in“-Effektes, das heißt einer lokalen instabilen Rissausbreitung, der bei weiterer Belastung Werkstoffversagen durch instabile Rissausbreitung folgt.

Die im Vergleich zum GJS-400-15 niedrigere Bruchzähigkeit des GJV-300 ist auf die größere innere Kerbwirkung der vermicularen Graphitteilchen und dem hieraus resultierenden Bruch der Teilchen bei stabiler Rissausbreitung zurückzuführen, wie aus „in-situ“-Versuchen im REM und mikrofraktographischen Bruchflächenanalysen folgt [24]. Mit zunehmendem Mg-Gehalt (0,015 bis 0,041 Gew.-%) und dem hiermit korrespondierendem höheren Kugelgraphitanteil (15 bis 36 %) ist ein deutlicher Anstieg der  $J_{Ic}^{BL}$  (8 bis 19  $\text{kJm}^{-2}$ ) und  $J_{0,2}$ -Werte (25 bis 40  $\text{kJm}^{-2}$ ) zu verzeichnen [25].

Für die GJMB-Werkstoffe nimmt mit zunehmendem Perlitanteil der Risseinleitungs-widerstand ab. Beachtenswert ist hierbei, dass der perlitische GJMB-650-2 über eine stabile Rissausbreitung bis zum Bruch versagt. Die Ursache hierfür ist die metallographisch nachgewiesene Einformung der Zementitlamellen im Perlit als Ergebnis der Wärmebehandlung [20]. Das übereinstimmende bruchmechanische Verhalten von GJS-400-15 und GJMB-350-10 ist trotz Brechen der knötchenförmigen Graphitteilchen auf die höhere Duktilität der ferritischen Matrix des schwarzen Tempergusses zurückzuführen, die wiederum im niedrigeren Si-Gehalt begründet ist [20].

Auch für die GJMW-Werkstoffe gilt, dass der Bruch duktil über eine stabile Rissausbreitung eingeleitet wird [26]. Hinsichtlich der Gefügeabhängigkeit der

bruchmechanischen Kennwerte bestätigt sich hier die generelle Aussage, dass die CTOD-Werte besser differenzieren, weil zum einen die Rissspitzenöffnung  $\delta$  direkt mit dem Gefüge vor der Rissspitze korreliert und zum anderen die technische Fließgrenze  $\sigma_F = 0,5 (R_{p0,2} + R_m)$  in die Berechnung des CTOD-Wertes eingeht.

Die FKM-Richtlinie verweist auf die Möglichkeit, bruchmechanische Kennwerte über Korrelationen zu anderen Kennwerten beziehungsweise dem Gefüge abzuschätzen. Aus vorliegenden Ergebnissen folgt, dass eine Abschätzung physikalischer Rissinitiierungswerte von ferritischen Gusseisenwerkstoffen über Gefügeparameter und Kennwerte des Zugversuchs möglich ist [15], [16], [27], [28].

Für Gusseisen mit lamellarer Graphitbildung und ferritischem, ferritisch-perlitischem, bainitischem und martensitischem Grundgefüge ( $R_m = 121$  bis 647 MPa, HB 30 = 86 bis 311) werden  $K_{Ic}$ -Werte von 21 bis 46  $\text{MPa m}^{1/2}$  mitgeteilt [14], [29]. Die für Gusseisen mit Lamellengraphit charakteristische direkte Proportionalität zwischen Zugfestigkeit und Bruchzähigkeit kann auf den Einfluss der Graphitmorphologie zurückgeführt werden, da mit abnehmender Teilchenzahl und -größe die innere Kerbwirkung des Graphits ab- und der Einfluss des Grundgefüges zunimmt.

Untersuchungen zum Einfluss tiefer Umgebungstemperaturen zeigen für den GJS-400 bei  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$  keinen Abfall der physikalischen und technischen Rissinitiierungswerte. Die GJMB- und GJMW-Werkstoffe weisen dagegen bei dieser Temperatur einen deutlichen Abfall des Risseinleitungs-widerstandes auf [20], [26].

#### 4.2 Zyklische Beanspruchung

Im Rahmen umfassender Betriebsfestigkeitsanalysen kommen bruchmechanische Rissfortschrittskonzepte sowohl zur gefügeabhängigen Bewertung des Rissausbreitungsverhaltens als auch zur Berechnung der Bauteillebensdauer zum Einsatz. Eine wesentliche Voraussetzung hierfür ist die Verfügbarkeit der bruchmechanischen Kennwerte unter Zugrundelegung der  $da/dN$ - $\Delta K$ -Kurven (Bild 3).

Die Messung der Risswachstumsgeschwindigkeit  $da/dN$  ( $N$  Lastspiel) in Abhängigkeit vom zyklischen Spannungsfaktor  $\Delta K$  wurde über die rechnergesteuerte Messung der Resonanzfrequenz als Maß für die von der Risstiefe abhängigen Probennachgiebigkeit vorgenommen. Bei der hier erreichten Auflösung von etwa  $2 \text{ }\mu\text{m}$  ist für den Bereich I der  $da/dN$ - $\Delta K$ -Kurve ein exaktes Bestimmen des Schwellenwertes  $\Delta K_{th}$  möglich. Das Ermitteln der werkstoffabhängigen Konstanten  $m$  und  $C$  der Paris-Erdogan-Gleichung (Bereich II der  $da/dN$ - $\Delta K$ -Kurve) als Basis für die Abschätzung der Restlebensdauer rissbehafteter Bauteile erfolgte in Anlehnung an ASTM E647-86.

In der Tabelle 2 sind die bruchmechanischen Kennwerte in Abhängigkeit von der Mittelspannung ( $R$ -Wert) unter Einbeziehung des den Restbruch charakterisierenden  $\Delta K_{Ic}$ -Wertes (Bereich III der  $da/dN$ - $\Delta K$ -Kurve) zusammengestellt, wobei die Kennwerte der  $da/dN$ - $\Delta K$ -Kurve die Mittelwerte von je drei SENB-Proben der Abmessung  $10 \times 20 \times 100 \text{ mm}$  sind. Die Auswertung des Streufeldes von fünf Proben des GJS-400 ergab für einen Mittelwert des  $\Delta K_{th}$ -Wertes von  $7,5 \text{ MPa m}^{1/2}$  eine Standardabweichung von  $\pm 0,4 \text{ MPa m}^{1/2}$ , die in dieser Höhe durch die Gesamtheit der Versuche bestätigt wird. Der

relative Fehler liegt in Übereinstimmung mit Messungen an Stahl im Bereich von  $\pm 10\%$  [30] bis [32].

Aus Untersuchungen an ferritischem GJS-400 mit unterschiedlicher Graphitteilchengröße ( $d_G = 21$  bis  $54 \mu\text{m}$ ) folgt, dass mit abnehmender Graphitteilchengröße die  $\Delta K_{th}$ -Werte kleiner werden. Dies korreliert einerseits mit der korrespondierenden Abnahme des Teilchenabstandes  $\lambda$  und der hieraus nach dem Ritchie-Modell folgenden Abnahme der freien Weglänge der Versetzungen sowie andererseits mit der Zunahme der 0,2-Dehngrenze. Beide Einflussgrößen verringern die zur Rissbildung erforderliche plastische Deformation, zum Beispiel in Ermüdungsgleitbändern oder an Grenzflächen der Graphitteilchen, wie bei „in-situ“-Versuchen im REM beobachtet wurde [30]. Die bei  $R = 0,1$  ermittelten  $\Delta K_{th}$ -Werte von mehr als  $6 \text{ MPam}^{1/2}$  stimmen mit Messungen in [33] an GJS-400 ( $R_{p0,2} = 299 \text{ MPa}$ ,  $\Delta K_{th} = 7,3 \text{ MPam}^{1/2}$ ) überein und liegen oberhalb der Werte für Stahl vergleichbarer Festigkeit. Als Ursache kann die teilchenbedingte Behinderung der plastischen Deformation angeführt werden.

Für den Bereich II der  $da/dN$ - $\Delta K$ -Kurve ist ein weitgehend teilchengrößenunabhängiges Risswachstum zu verzeichnen. Erst bei Graphitteilchengrößen  $d_G = 12 \mu\text{m}$  im Schweißgut artgleicher Schweißverbindungen aus GJS-400 ist ein deutlich höheres Risswachstum zu verzeichnen. Für Graphitteilchengrößen im Bereich von  $d_G = 21$  bis  $54 \mu\text{m}$  kann als Mittelwertskurve

$$da/dN = 6,4 \cdot 10^{-12} (\Delta K)^{6,1} \quad (8)$$

angegeben werden.

Eine vergleichende Bewertung unterschiedlicher Gusseisenwerkstoffe ist mit den in **Tabelle 2** aufgeführten Kennwerten der zyklischen Risswachstumskurve möglich. Festzustellen ist eine deutliche Abhängigkeit des  $\Delta K_{th}$ - beziehungsweise  $\Delta K_{fc}$ -Wertes von der Mittelspannung (R-Wert), die sich am Beispiel des GJV-300 über

$$\Delta K_{th,R} = (1 - R)^\gamma \Delta K_{th,R=0} \quad (9)$$

mit  $\gamma = 1,3$  quantifizieren lässt. Aus dem Verlauf der  $da/dN$ - $\Delta K$ -Kurven für Gusseisenwerkstoffe mit unterschiedlicher Graphitbildung (**Bild 6**) unter Einbeziehung von Messungen an einem Gusseisen mit lamellarer Graphitbildung GJL-350 ( $R_m = 391 \text{ MPa}$ ,  $\Delta K_{th} = 6,7 \text{ MPam}^{1/2}$  bei  $R = 0,1$ ,  $m = 6,7$  und  $C = 3,8 \cdot 10^{-12}$ ) [34]. Die höheren Rissausbreitungsgeschwindigkeiten des GJL-350 und GJV-300 können auf die lamellare beziehungsweise würmchenförmige Form der Graphits zurückgeführt werden. Im Rahmen von in-situ“-Versuchen im REM bei zy-

klischer Beanspruchung zur Rissbildung und Rissausbreitung an GJS-400 und GJV-300 wurde erkannt, dass die Schädigungsprozesse bei globularer Graphitbildung durch Ablösen der Graphitkugeln von der Matrix mit nachfolgender Mikrorissbildung bestimmt wird, während die vermiculare Graphitbildung durch das Brechen der Teilchen und Mikrorissbildung charakterisiert werden kann [30].

Aus dem Verlauf der  $da/dN$ - $\Delta K$ -Kurven für Gusseisenwerkstoffe mit globularer Graphitbildung und ferritischem, ferritisch-perlitischem und bainitischem Grundgefüge (**Bild 7**) folgt, dass ein gefügeunabhängiges Risswachstum festgestellt wer-

den kann. Aus **Bild 7** folgt weiter, dass unter Zugrundelegung von Gl. (10) im Ergebnis einer zusammenfassenden Auswertung in [35] für Baustähle mit  $R_{p0,2}$ -Grenzen von 200 bis 1000 MPa

$$\frac{da}{dN} = 3,49 \cdot 10^{-9} (\Delta K)^{3,16} \quad (10)$$

die Risswachstumsgeschwindigkeit der Gusseisenwerkstoffe gefügebedingt deutlich höhere Werte aufweist. Bewertet man das Werkstoffverhalten im Bereich II der  $da/dN$ - $\Delta K$ -Kurve über die in [36] für spröde und zähe Stähle bestimmte Korrelation zwischen den Parametern C und m der Paris-Erdogan-Gleichung, so wird die Einordnung der Rissausbreitungsgeschwindigkeit der

**Tabelle 2: Bruchmechanische Kennwerte der zyklischen Risswachstumskurve nach [19], [20], [30], [32]**

Werkstoff	R-Wert	$\Delta K_{th}$ [MPam <sup>1/2</sup> ]	m	C	$\Delta K_{fc}$ [MPam <sup>1/2</sup> ]
GJS-400-15	0,1	7,5	4,5	$2,2 \cdot 10^{-10}$	40
	0,3	6,2	4,6	$3,8 \cdot 10^{-10}$	31
	0,5	4,5	4,2	$1,3 \cdot 10^{-9}$	22
GJS-600-3	0,1	6,9	4,1	$1,2 \cdot 10^{-9}$	34
	0,3	6,6	3,9	$1,3 \cdot 10^{-9}$	27
	0,5	4,6	3,7	$1,9 \cdot 10^{-9}$	19
GJS-800-10	0,1	5,4	2,9	$0,9 \cdot 10^{-8}$	51
	0,3	4,8	3,0	$1,1 \cdot 10^{-8}$	40
	0,5	4,3	3,2	$1,0 \cdot 10^{-8}$	29
GJS-1000-5	0,1	5,5	2,9	$2,3 \cdot 10^{-8}$	45
	0,3	4,0	2,7	$3,3 \cdot 10^{-8}$	33
	0,5	3,4	2,8	$3,9 \cdot 10^{-8}$	24
GJV-300	0,1	7,0	6,7	$1,1 \cdot 10^{-11}$	25
	0,3	4,6	7,2	$2,0 \cdot 10^{-12}$	24
	0,5	3,3	5,5	$1,9 \cdot 10^{-10}$	16
GJMB-350-10	0,1	7,6	3,4	$1,2 \cdot 10^{-8}$	26
	0,3	6,4	3,5	$9,8 \cdot 10^{-9}$	22
	0,5	6,0	4,0	$4,0 \cdot 10^{-9}$	15
GJMB-450-6	0,1	6,6	3,4	$6,8 \cdot 10^{-9}$	27
	0,3	4,9	3,2	$1,5 \cdot 10^{-8}$	25
	0,5	5,3	3,6	$5,7 \cdot 10^{-9}$	24
GJMB-650-2	0,1	4,4	3,1	$6,7 \cdot 10^{-9}$	35
	0,3	4,1	3,0	$1,3 \cdot 10^{-8}$	33
	0,5	4,4	3,1	$1,3 \cdot 10^{-8}$	27
GJMW-360-12	0,1	5,5	3,5	$7,0 \cdot 10^{-9}$	38
	0,3	4,6	2,9	$3,0 \cdot 10^{-8}$	29
	0,5	3,5	2,4	$1,0 \cdot 10^{-7}$	21
GJMW-400-15	0,1	7,5	3,6	$5,0 \cdot 10^{-9}$	36
	0,3	6,0	4,3	$1,5 \cdot 10^{-8}$	28
	0,5	4,4	3,1	$4,0 \cdot 10^{-8}$	20
GJMW-450-7	0,1	5,4	3,2	$8,0 \cdot 10^{-9}$	39
	0,3	5,1	3,1	$3,0 \cdot 10^{-8}$	30
	0,5	4,6	3,7	$8,0 \cdot 10^{-9}$	22
GJMW-550-4	0,1	4,1	2,2	$1,5 \cdot 10^{-7}$	45
	0,3	3,7	2,6	$7,0 \cdot 10^{-8}$	35
	0,5	3,2	2,6	$7,0 \cdot 10^{-8}$	25

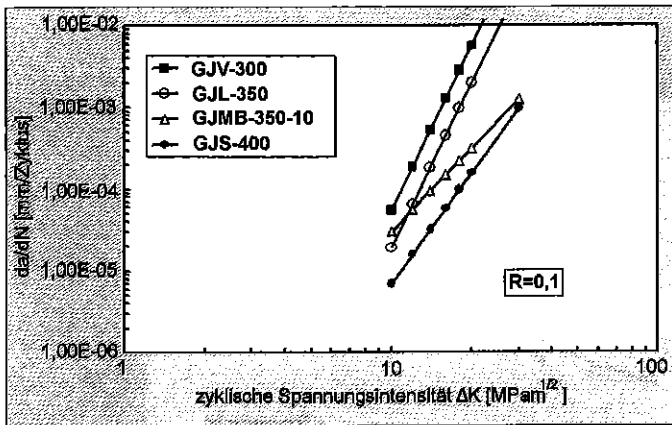


Bild 6: Zyklische Risswachstumskurven für Gusseisenwerkstoffe mit unterschiedlicher Graphitausbildung

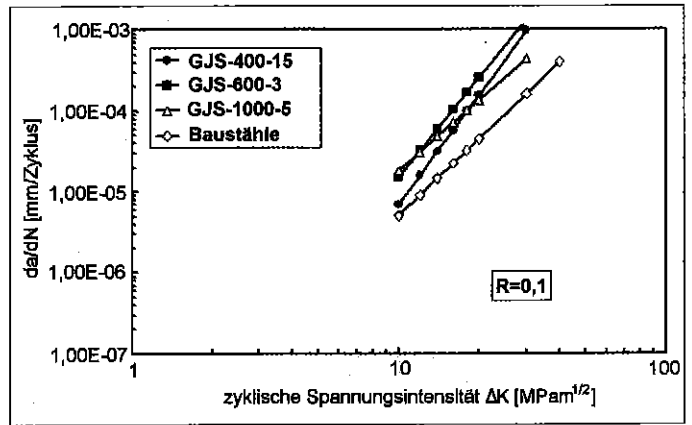


Bild 7: Zyklische Risswachstumskurven für Gusseisenwerkstoffe mit globularer Graphitausbildung im Vergleich zu Stahl

untersuchten Gusseisenwerkstoffe bei zyklischer Beanspruchung in die Kategorie der spröden Stähle gemäß

$$C = \frac{2,89 \cdot 10^{-5}}{15,5^m} \quad (11)$$

deutlich.

Aus umfangreichen Untersuchungen zum schwingfesten Bemessen dickwandiger Bauteile aus GJS-400 unter Berücksichtigung gießtechnisch bedingter Gefügeentartungen und Gussfehler folgt, dass diese unter Beachtung vorgegebener Bemessungskriterien nicht zum Ausschuss erklärt werden müssen [37], [38]. Über die Einbeziehung bruchmechanischer Kriterien zum Anriss- und Rissfortschrittsverhalten ist es weiter möglich, für einen frühzeitig bemerkten Riss die Restlebensdauer des Bauteils abzuschätzen.

Dabei ist zu beachten, dass für eine Restlebensdauerberechnung belastbare Informationen zum Risswachstumsverhalten notwendig sind. In der Designphase werden für derartige bruchmechanische Sicherheitsanalysen häufig konservative Referenzkurven verwendet, die als obere Hüllkurven über eine Vielzahl von Messergebnissen einer Werkstoffgruppe abgeleitet wurden. Dabei ist nicht immer ersichtlich, wie groß die Sicherheitsmarge im Einzelfall ausfällt.

Eine statistische Auswertung ist über die Ableitung von Quantilsrisswachstumskurven auf der Basis des NASGRO-Computercodes möglich, der als ESACRACK 4.0 [39] bis [41] verfügbar ist. Die Grundlagen dieser statistischen Auswertung und ihre Anwendung auf Gusseisenwerkstoffe werden in [42] erläutert.

### 4.3 Dynamische Beanspruchung

Sowohl das Bewerten des Festigkeitsverhaltens als auch das Bestimmen der bruchmechanischen Kennwerte bei dynamischer Beanspruchung erfordern die experimentelle Bestimmung der Festigkeitswerte bei erhöhten Prüfgeschwindigkeiten und unterschiedlichen Temperaturen. Zugversuche bei quasistatischen und dynamischen Beanspruchungen zeigen, dass Zugfestigkeit und  $R_{p0,2}$ -Grenze mit höheren Prüfgeschwindigkeiten beziehungsweise tieferen Temperaturen zunehmen und über die Arrhenius-Gleichung in Abhängigkeit von der Temperatur und der Beanspruchungsgeschwindigkeit  $\dot{\epsilon}$  analytisch bestimmbar sind [43]. Das experimentelle Ermitteln dynamischer Risswiderstandskurven des CTOD- und J-Integralkonzeptes [44] bis [47] erfolgte an glatten SENB-Proben der Abmessung 10 x 20 x 100 mm und 10 x 10 x 55 mm bei Anwendung der Mehrprobentechnik („low-blow“-Technik). Die dynamischen physikalischen Rissinitilierungswerte  $J_{di}^{BL}$  und  $\delta_{di}^{BL}$  wurden in Analogie zu den statischen Rissinitilierungswerten auf der Grundlage von ESIS P2-92 bestimmt und nach Gleichung (1) in K-Werte umgerechnet.

Eine spezielle Prüfvorschrift zur experimentellen Bestimmung dynamischer Bruchzähigkeitskennwerte liegt als Entwurf vor [48]. Die dynamischen Rissinitilierungswerte des CTOD- und J-Integralkonzeptes für ferritisches GJS-400 zeigen in Analogie zu den statischen Werten eine deutliche Gefügeabhängigkeit und machen im direkten Vergleich deutlich, dass die stoßartige Beanspruchung sowohl bei RT als auch bei tiefen Temperaturen zu einer deutlichen Verringerung des Risseinleitungswiderstandes führt. Bestätigt wird dies auch im Ergebnis der bruchmechanischen Bewertung einer artgleichen Schweißverbindung aus GJS-400 bei statischer und dynamischer Beanspruchung [49]. Hier

sind vor allem der zähigkeitsverringernde Einfluss kleiner Graphitteilchen im Schweißgut und erhöhte Perlitanteile auf den Risseinleitungswiderstand der Schweißverbindung bei dynamischer Beanspruchung in Verbindung mit dem Werkstoffverhalten bei tiefen Temperaturen zu beachten.

Auf den Einfluss dynamischer Beanspruchungen hinsichtlich des Risseinleitungs- und Rissausbreitungswiderstandes duktiler Gusseisenwerkstoffe wird auch im Schrifttum [50] bis [52] hingewiesen und auf den zusätzlich zähigkeitsverringernenden Einfluss tiefer Umgebungstemperaturen und großer Bauteildicken [53], [54] aufmerksam gemacht. Beachtenswert sind in diesem Zusammenhang auch Untersuchungen [55], [56] zum Bestimmen der Rissauffangzähigkeit  $K_{Ia}$  nach ASTM E1221-88 zum Bewerten des temperaturabhängigen Rissstopp-Verhaltens (Rissarrest) von GJS-400 (Bild 8).

## 5 Anwendungsbeispiele

Das in der Vergangenheit erfolgreich praktizierte Einbeziehen des Bruchmechanikkonzeptes sowohl zur Sicherheitsbewertung potentiell bruchgefährdeter Konstruktionen als auch zur Schadensfallanalyse war eine wichtige Basis für die Erarbeitung der FKM-Richtlinie [57], [58]. Ein Einbeziehen bruchmechanischer Konzepte zur beanspruchungsgerechten Gusswerkstoff- und Gussteilbewertung wird unter Beachtung von Gussfehlern oder denkbarer gießtechnischer Unregelmäßigkeiten vor allem dann erforderlich und zunehmend praktiziert, wenn Gusswerkstoffe aufgrund ihrer spezifischen Vorteile in festigkeitsbeanspruchten Konstruktionen zum Einsatz kommen. Das wird auch bei den zunehmend an Bedeutung gewinnenden artgleichen Konstruktionsschweißungen und Gussverbundschweißungen [59] bis [61] zu

beachten sein. Auf einige Anwendungsfälle für die bruchmechanische Festigkeitsberechnung von Bauteilen aus Gusseisenwerkstoffen, die hier ausführlich dargestellt wurden, soll in diesem Zusammenhang noch einmal aufmerksam gemacht werden.

Im Rahmen einer Revision im Pumpspeicherwerk (PSW) Markersbach wurden Anrisse in den Kugelschieberzapfen aus G20Mn5 festgestellt, durch die die Betriebssicherheit des PSW in Frage gestellt wurde [62]. Der kontrollierte Weiterbetrieb über einen Zeitraum von vier Jahren bis zur planmäßigen Instandsetzung erfolgte auf der Basis einer bruchmechanischen Beanspruchungsanalyse und Werkstoffcharakterisierung unter Beachtung statischer, dynamischer und zyklischer Beanspruchungen [63], [64]. Für den G20Mn5 ( $R_{p0,2} = 265 \text{ MPa}$ ) wurden bei  $0^\circ\text{C}$  statische  $K_{Ic}$ -Werte zwischen  $52$  und  $62 \text{ MPam}^{1/2}$  bestimmt. Die an  $25 \text{ mm}$  dicken CCA-Proben gemessene Rissauffangzähigkeit  $K_{Ia}$  betrug bei dieser Temperatur  $66 \text{ MPam}^{1/2}$ . Die Bestimmung des Risswachstums  $da/dN$  bei zyklischer Beanspruchung ergab bei  $R = 0,1$  Schwellenwerte  $\Delta K_{th}$  zwischen  $6,0$  und  $7,5 \text{ MPam}^{1/2}$ . Für den Bereich II der  $da/dN$ - $\Delta K$ -Kurve lässt sich der G20Mn5 gemäß

$$\frac{da}{dN} = 6 \cdot 10^{-10} [\Delta K]^{3,8} \quad (12)$$

mit  $da/dN$  in  $[\text{mm}/\text{Zyklus}]$  und  $\Delta K$  in  $[\text{MPa m}^{1/2}]$  in die für Baustähle bekannten Streubänder einordnen, wobei für die Berechnung der Restlebensdauer zusätzlich die Teilprozesse Schwingungsrisskorrosion und dehnungsinduzierte Risskorrosion zu berücksichtigen waren [65].

Als ein weiteres Beispiel für das Anwenden bruchmechanischer Bemessungsverfahren kann die Planung und der Bau einer Turbinenrohrleitung aus duktilen Gussrohren angeführt werden [66]. Beim Bau eines  $16 \text{ MW}$ -Laufkraftwerks im Vorarlberg führten besonders hohe Sicherheitsanforderungen und schwierige Einbaubedingungen in alpinem Gelände zu der Entscheidung, die Turbinenleitung im Nennweitenbereich bis  $\text{DN } 1600$  bei Betriebsdrücken über  $30 \text{ bar}$  nicht mit geschweißten Stahlrohren, sondern mit duktilen Schleudergussrohren aus optimierten GJS-400 zu bauen. Die bruchmechanische Bewertung erfolgte auf Basis des „Leck-vor-Bruch“-Kriteriums, wobei die bruchmechanischen Kennwerte am IWT bestimmt wurden [67]. Im Ergebnis der durchgeführten bruchmechanischen Sicherheitsbewertungen, gestützt durch

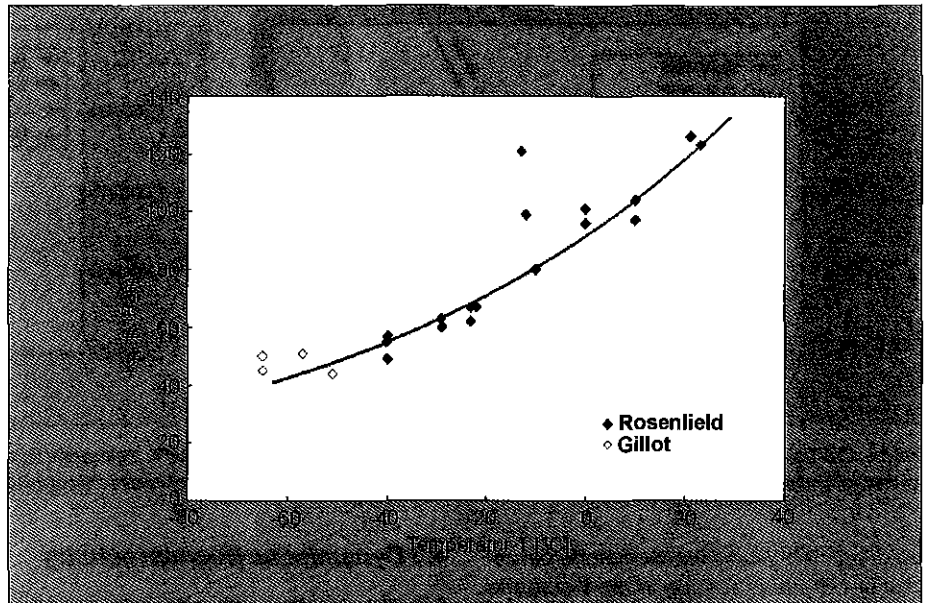


Bild 8: Rissauffangzähigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur [55], [56]

Berstversuche an der Technischen Versuchs- und Forschungsanstalt der TU Wien, erfolgte die Verwendung von Schleudergussrohren.

Die Anwendung bruchmechanischer Bewertungskonzepte bei der Entwicklung von Eisenbahnradern aus bainitischem Gusseisen (ADI) erfolgte auf der Basis numerischer Beanspruchungsanalysen. Zur sicherheitstechnischen Auslegung des ADI-Rades ( $R_{p0,2} = 637 \text{ MPa}$ ,  $R_m = 893 \text{ MPa}$ ) gegen Gewaltbruch und Ermüdungsrisswachstum wurde eine linear-elastische bruchmechanische Analyse für hypothetische rissartige Fehler an exponierten Stellen durchgeführt. Aus den berechneten bruchmechanisch relevanten Risslängen kann im Zusammenhang mit wiederkehrenden betrieblichen Überwachungsmaßnahmen und Sicherheitskonzepten eine zulässige Rissgröße abgeleitet werden. Die hier ermittelten kritischen Rissgrößen konnten mittels zerstörungsfreier Prüfverfahren sicher und zuverlässig diagnostiziert [68] und die Eignung von ADI als alternativer Radwerkstoff bestätigt werden [69].

Für den Transport und die Lagerung radioaktiver Abfälle kommen in Deutschland überwiegend Behälter aus duktilem Gusseisen mit Kugelgraphit zur Anwendung, für die umfassende Bruchsicherheitsbewertungen unter Einbeziehung bruchmechanischer Festigkeitsberechnungen erforderlich sind. Während bis 2002 ausschließlich die bruchmechanische Bewertung auf der Basis des statischen Be-

lastungsfalles erfolgte [70], sieht die überarbeitete Leitlinie der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) auch die Einbeziehung stoßartiger Beanspruchungen vor [9]. Gegenstand laufender Untersuchungen sind sowohl die numerische Beanspruchungsanalyse der Behälter unter Einbeziehung hypothetischer Gussfehler [71], [72] als auch die Bestimmung dynamischer Bruchzähigkeitskennwerte in Abhängigkeit von der Prüftemperatur und dem Gussgefüge des GJS-400. Erste Ergebnisse an stoßbiegebeanspruchten SENB-Proben (Dicke =  $140 \text{ mm}$ , Breite =  $280 \text{ mm}$ , Länge =  $1350 \text{ mm}$ ) bei  $\dot{K} \approx 5 \cdot 10^4 \text{ MPam}^{1/2}/\text{s}$  zeigen, dass der für den statischen Belastungsfall bei  $-40^\circ\text{C}$  geforderte Mindestwert von  $50 \text{ MPam}^{1/2}$  auch bei stoßartiger Belastung erreicht werden kann [37]. Das Ermitteln fließbruchmechanischer Kennwerte bei statischer und dynamischer Beanspruchung für den Transportbehälterwerkstoff GJS-400 in Abhängigkeit vom Gefüge (Perlitanteil, Graphitmorphologie) und der Temperatur ist gegenwärtig Gegenstand umfangreicher Untersuchungen am IWT.

Abschließend soll auf die jetzt im Vorschriftenwerk [10] integrierte bruchmechanische Beanspruchungsanalyse potenzieller Ermüdungsbrüche von Komponenten aus GJS-400-18LT in Windenergieanlagen hingewiesen werden, um Schadensfälle [74] zu vermeiden beziehungsweise die Rissausbreitungsgeschwindigkeit in die umfassende Betriebsfestigkeitsanalyse einzubinden [75].

## 6 Zusammenfassung

Das Konzept der Bruchmechanik nimmt mit seiner inzwischen fünfzigjährigen Entwicklung einen wichtigen Platz in der ingenieurtechnischen Bruchsicherheitsbewertung ein und ist fester Bestandteil des nationalen und internationalen Regelwerkes, das mit der FKM-Richtlinie erweitert wird. Dabei erlaubt die hierzu erstellte Software „FracSafe“ Berechnungen nach der FKM-Richtlinie und orientiert sich auch in ihrem Aufbau an dieser. Die fortlaufende Aktualisierung beinhaltet unter anderem ein Einbeziehen stoßartiger Beanspruchung und der Spannungsrisskorrosion sowie die weitere Sammlung von bruchmechanischen Werkstoffkennwerten.

### Schrifttum

- [1] FKM (Forschungskuratorium Maschinenbau)-Richtlinie: Bruchmechanischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile. VDMA Verlag GmbH, Frankfurt/M. 2001.
- [2] SINTAP - Structural Integrity Assessment Procedures for European Industry. BE95-1426. 1999.
- [3] British Standard 7910: Guide on methods for assessing the acceptability of flaws in fusion welded structures. British Standard Institution. 2000 (Incorporating amendment No. 1).
- [4] FKM-Richtlinie. Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile, VDMA Verlag GmbH, Frankfurt/M. 1998.
- [5] Pyttel, B., C. Berger, L. Hodulak u. J. G. Blauel: FKM-Richtlinie Bruchmechanischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile – Gegenwärtiger Stand und geplante Weiterentwicklungen. 29. MPA-Seminar, Stuttgart Oktober 2003, Tagungsband.
- [6] Schmidt, T.: Festigkeitsnachweis von Eisen-gussteilen nach der FKM-Richtlinie. konstruieren + giesen 28 (2003) H. 1, S. 15 - 21.
- [7] Zerst, U., u. P. Langenberg: Bruchmechanische Konzepte. Die industrielle Anwendung vor dem Hintergrund internationaler Bewertungsvorschriften und Regelwerke. MP Materialprüfung 43 (2001) H. 9, S. 331 - 353.
- [8] Pusch, G.: Beanspruchungsgerechte Bauteilbewertung mit Hilfe bruchmechanischer Methoden. konstruieren + giesen 23 (1998) H. 2, S. 20 - 28.
- [9] BAM-GGR007: Leitlinie zur Verwendung von Gusseisen mit Kugelgraphit für Transport- und Lagerbehälter für radioaktive Stoffe. Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Rev. O. Juni 2002.
- [10] Regelwerk Germanischer Lloyd: WindEnergie GmbH, Richtlinie vom 1. November 2003.
- [11] Hübner, P.-V., P. Hübner, G. Pusch u. T. Leonhardt: Bruchmechanische Festigkeitsbewertung der Verbundschweißung Temperguss-Stahl. konstruieren + giesen 29 (2004) H. 3, S. 16 - 20.
- [12] Zerst, U., u. P. Hübner: DVS-Merkblatt 2401: Bruchmechanische Bewertung von Fehlern in Schweißverbindungen. Fachbuchreihe Schweißtechnik, Band 101, DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf 2004.
- [13] Berger, C.: Eigenschaften in dickwandigen Gussstücken aus Sphäroguss - Ergebnisse aus Gemeinschaftsversuchen. in: BAM-Seminar „Behälter aus Späroguss für radioaktive Stoffe“, DVM-Berichtsband, Berlin Juni 1987, S. 181 - 197.
- [14] Wolfensberger, S.: Bruchzähigkeit von Gusseisen. Dr.-Ing.-Diss., ETH Zürich 1986.
- [15] Rehmer, B.: Bruchmechanische Bewertung ferritischer Gusseisenwerkstoffe mit Kugel- und Vermiculargraphit in Abhängigkeit von Beanspruchungsgeschwindigkeit und -temperatur. Dr.-Ing.-Diss., TU Bergakademie Freiberg 1992.
- [16] Baer, W.: Bruchmechanische Bewertung ferritischer Gusseisenwerkstoffe sowie artgleicher Schweißverbindungen bei statischer Beanspruchung. Dr.-Ing.-Diss., TU Bergakademie Freiberg 1996.
- [17] Pusch, G., O. Liesenberg, P. Hübner, T. Brecht u. L. Krodol: Mechanische und bruchmechanische Kennwerte für Gusseisen mit Kugelgraphit. konstruieren + giesen 24 (1999) H. 2, S. 10 - 19.
- [18] Pusch, G., u. O. Liesenberg: Bruchmechanische Kennwerte für Gusseisenwerkstoffe. Gießerei-Praxis (2000) H. 3, S. 105 - 112.
- [19] Hübner, P.-V.: Gefüge- und beanspruchungsabhängige Charakterisierung des Risswiderstandsverhaltens von entkohlend geglühtem Temperguss unter Einbeziehung der Verbundschweißung mit Stahl. Dr.-Ing.-Diss. TU Bergakademie Freiberg 2003.
- [20] Brecht, K., G. Pusch u. O. Liesenberg: Bruchmechanische Kennwerte von Temperguss – Teil 1: Schwarzer Temperguss. konstruieren + giesen 27 (2002) H. 2, S. 21 - 30.
- [21] ESIS P2-92: ESIS (Europe an Structure Integrity Society) Procedure for Determining the Fracture Behaviour of Metallic Materials.
- [22] Roos, E.: Grundlagen und notwendige Voraussetzungen zur Anwendung der Risswiderstandskurve in der Sicherheitsanalyse angerissener Bauteile. Habilitationsschrift Universität Stuttgart 1992. in: VDI-Fortschr.-Bericht Reihe 18, Nr. 122. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1993.
- [23] Holland, D.: Einfluss des Spannungszustandes auf die Vorgänge beim Gleitbruch von Baustählen. Dr.-Ing.-Diss., RWTH Aachen 1992.
- [24] Pusch, G., O. Liesenberg, S. Stehmann und B. Rehmer: Vergleichende Bewertung unterschiedlicher Methoden zur experimentellen Ermittlung der statischen Risseinleitungszähigkeit für ferritisches Gusseisen mit globularer und vermicularer Graphitbildung. Giessereiforschung 42 (1990) H. 2, S. 64 - 73.
- [25] Ludwig, A., G. Pusch, L. Melnikova u. J. Hübler: Mechanische und bruchmechanische Kennwerte für unterschiedlich behandeltes Gusseisen mit vermicularer Graphitbildung. konstruieren + giesen, demnächst.
- [26] Hübner, P.-V., G. Pusch, O. Liesenberg u. R. Döpp: Bruchmechanische Kennwerte von Temperguss – Teil 2: Weißer Temperguss. konstruieren + giesen 28 (2003) H. 3, S. 18 - 25.
- [27] Pusch, G., u. A. Ludwig: Berechnung fließbruchmechanischer Kennwerte für duktile Gusseisenwerkstoffe mit unterschiedlicher Graphitbildung aus Parametern der Mikrostruktur und der Fließkurve. DFG-Projekt Pu 104/701.
- [28] Stroppe, H., G. Pusch u. A. Ludwig: Bestimmung der Bruchzähigkeit von ferritischem Gusseisen mit Kugelgraphit aus den Kennwerten der Zugversuche und der Gefügebildung. Giessereiforschung 54 (2002) H. 4, S. 115 - 120, auch: konstruieren + giesen 29 (2004) H. 4, S. 19 - 23.
- [29] Deike, R. u. a.: Gusseisen mit Lamellengraphit – Eigenschaften und Anwendung. konstruieren + giesen 25 (2000) H. 2, S. 39 - 40.
- [30] Komber, B.: Bruchmechanische Bewertung des Rissausbreitungsverhaltens ferritischer Gusseisenwerkstoffe bei zyklischer Beanspruchung. Dr.-Ing. Diss., TU Bergakademie Freiberg 1995.
- [31] Pusch, G., B. Komber u. O. Liesenberg: Bruchmechanische Kennwerte für ferritische duktile Gusseisenwerkstoffe bei zyklischer Beanspruchung. konstruieren + giesen 21 (1996) H. 2, S. 49 - 54.
- [32] Pusch, G., P. Hübner u. O. Liesenberg: Untersuchungen zum gefügeabhängigen Rissausbreitungsverhalten von Gusseisenwerkstoffen bei zyklischer Beanspruchung. DVM-Bericht 234 „Fortschritte der Bruch- und Schädigungsmechanik“, Freiberg Februar 2002.
- [33] Lang, K.-H.: Das Ermüdungsverhalten von GGG-60, GGG-40, GGV-30 und GG-30 im Temperaturbereich 20 °C < T < 500 °C. Dr.-Ing. Diss., Universität Karlsruhe 1985.
- [34] Just, C., G. Kaiser, M. Schmidt u. M. Zaiczek: Rissausbreitungswiderstand von legiertem Gusseisen mit Lamellengraphit unter statischer und schwingender Beanspruchung. Gießereitechnik 36 (1990) H. 4, S. 108 - 111.
- [35] Henkel, Chr.: Beitrag zur bruchmechanischen Bewertung des Risswachstumsverhaltens höherfester schweißbarer Baustähle und deren Schweißverbindungen unter zyklisch mechanischer Beanspruchung. Dr.-Ing. Diss., TU Bergakademie Freiberg 1985.
- [36] Tanaka, K.: A correlation of  $\Delta K_{th}$ -value with the exponent m in the equation of fatigue crack growth for various steels. Int. Journ. of Fract. 15 (1979) H. 1, S. 57 - 68.
- [37] Kaufmann, H.: Zur schwingfesten Bemessung dickwandiger Bauteile aus GGG-40 unter Berücksichtigung gießtechnisch bedingter Gefügeengpänzen. Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit LBF Darmstadt. Bericht Nr. FB-214, Darmstadt 1998.

- [38] Kaufmann, H., u. D. B. Wolters: Zyklische Beanspruchbarkeit dickwandiger Bauteile aus ferritischem Gusseisen mit Kugelgraphit. konstruieren + giesen 27 (2002) H. 1, S. 4 - 27.
- [39] NASGRO (2000): Fatigue crack growth computerprogram «NASGRO», Version 3, NASA, L. B. Johnson Space Centre, Houston, Texas. JSC-22267B.
- [40] Hübner, P., G. Pusch u. U. Zerbst: Ableitung von Quantilrischwachstumskurven für Restlebensdauerberechnungen. DVM-Bericht 236 „Fortschritte der Bruch- und Schädigungsmechanik“ 2004. S. 121 - 129.
- [41] Hübner, P., P. Trubitz u. G. Pusch: Vergleich des Bruchverhaltens von ADI mit dem Radstahl R7. DVM-Tag 2003, „Werkstoffe für die Systemtechnik Bahn“ Tagungsband, S. 163 - 174.
- [42] Hübner, P., u. G. Pusch: Zyklisches Risswachstumsverhalten von Gusseisenwerkstoffen – Analytische Aufbereitung für die Nutzung des Berechnungsprogramms ESACRACK. konstruieren + giesen, demnächst.
- [43] Trubitz, P., J. Reichelt, G. Pusch u. P. Warnke: Dynamische Bruchzähigkeitswerte für schwere Transportbehälter. 36. Tagung d. DVM-Arbeitskreises Bruchvorgänge, Köln Febr. 2004, DVM-Bericht, S. 261 - 268.
- [44] Udoh, A.: Ermittlung fließbruchmechanischer Kennwerte für ferritisches GGG-40 und seine Schweißverbindung bei dynamischer Beanspruchung. Dr.-Ing. Diss., TU Bergakademie Freiberg 1997.
- [45] Pusch, G., A. Udoh u. K. Rose: Einfluss von Temperatur und Beanspruchungsgeschwindigkeit auf die mechanischen Eigenschaften von GGG-40. konstruieren + giesen 22 (1997) H. 1, S. 31 - 34.
- [46] Pusch, G., A. Udoh u. S. Winkler: Experimentelle Bestimmung dynamischer Rissinitiierungswerte. Materialprüfung 39 (1997) H. 11/12, S. 460 - 463.
- [47] Pusch, G., A. Udoh u. W. Baer: Fließbruchmechanische Kennwerte von GGG-40 bei statischer und dynamischer Beanspruchung. konstruieren + gießen 22 (1997) H. 2, S. 12 - 16.
- [48] ESIS: Proposed standard methods for instrumented pre-cracked charpy impact testing of steels. Draft 18, April 2005.
- [49] Pusch, G., A. Udoh u. W. Baer: Fließbruchmechanische Bewertung einer artgleichen Schweißverbindung aus Gusseisen mit Kugelgraphit bei statischer und dynamischer Beanspruchung. konstruieren + gießen 24 (1999) Nr. 3, S. 25 - 28.
- [50] Motz, J. M.: Über Erstarrungsgefüge und Eigenschaften in dickwandigen Gussstücken aus ferritischem Gusseisen mit Kugelgraphit. Teil 2: Zähigkeit. Giessereiforschung 40 (1988) H. 4, S. 117 - 128.
- [51] Moulin, D., T. Yuritzinn u. G. Sert: An Overview of R & D Work Performed in France Concerning the Risk of Brittle Fracture of Transport Cask. RAMTRANS 6 (1995) H. 2/3, S. 145 - 148.
- [52] Kobayashi, T., H. Yamamoto u. K. Matsuo: Evaluation of Dynamic Fracture Toughness on Heavy Wall Ductile Cast Iron for Container. Eng. Fract. Mech. 30 (1988) H. 3, S. 397 - 407.
- [53] Frenz, H., u. a.: Effect of Sample Size and Loading Rate on the Fracture Toughness of Ductile Cast Iron. In: Proc. Int. Conf. On Mechanical Behavior of Ductile Cast Iron and other Cast Metals, Kitakyushu, August 1993, Tagungsband, S. 449 - 454.
- [54] Salzbrenner, R., u. T. B. Crenshaw: Effect of Sample Size and Loading Rate on the Transition Behavior of a DI Alloy. In: Proc. 23<sup>rd</sup> National Symp. On Fracture Mechanics, June 1991, College Station.
- [55] Gillot, R.: Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Rissstopp-Verhalten von Stählen und Gusseisenwerkstoffen. Techn.-wiss. Berichte MPA Stuttgart; 1988, Nr. 88 - 03.
- [56] Rosenfield, A. R., J. Ahmad, H. J. Cialone, M. P. Landow, P. N. Mincer u. V. Pappaspyropoulos: Crack arrest toughness and nodular iron. Nuclear Engineering and Design 116 (1989) S. 161 - 170.
- [57] Blumenauer, H., u. G. Pusch: Technische Bruchmechanik. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie. Leipzig/Stuttgart 1993.
- [58] Pusch, G.: Bruchmechanische Werkstoff- und Bauteilbewertung - Anwendungsbeispiele. MP Materialprüfung 44 (2002) H. 6, S. 224 - 232.
- [59] Pusch, G., C. Bittner, B. Komber, U. Draugelates u. C. Boppert: Bruchmechanische Bewertung spröder Gefügebestandteile in der Wärmeeinflusszone von ferritischem GGG-40. Schweißen und Schneiden 47 (1995) H. 12, S. 972 - 977.
- [60] Pusch, G., u. W. Baer: Bewertung der Bruchsicherheit einer artgleichen Schweißverbindung aus ferritischem Gusseisen mit Kugelgraphit GGG-40. Schweißen und Schneiden 46 (1994) H. 12, S. 639 - 642.
- [61] Pusch, G., W. Baer u. A. Michael: Beitrag zur Optimierung artgleicher Schweißverbindungen des ferritischen Gusseisenwerkstoffs GGG-40. Giesserei 80 (1993) H. 7, S. 227 - 231.
- [62] Tagungsband Fachseminar Maschinentechnik Wasserkraft: Probleme des Erkennens und der Bewertung von Rissen an Wasserkraftmaschinen am Beispiel von Schadensfällen. VEAG Hauptabteilung Kraftwerkstechnik, Markersbach, 18. bis 19. März 1997.
- [63] Hübner, P., G. Pusch, S. Butler u. W. von Nessen-Lapp: Bruchsicherheitsanalyse eines rissbehafteten Kugelschiebers in einem Pumpspeicherwerk. 24. MPA-Seminar, Stuttgart 8. bis 9. Oktober 1998, Tagungsband S. 35.1 - 35.19.
- [64] Hübner, P., u. G. Pusch: Bruchsicherheitsanalyse eines rissbehafteten Kugelschieberzapfens. konstruieren + giesen 25 (2000) H. 3, S. 4 - 9.
- [65] Hübner, P.: Ein Schädigungsmodell zur Vorhersage des Rissfortschritts in den Kugelschieberzapfen unter Berücksichtigung des korrosiven Einflusses. (Wie [62]), S. 83 - 91.
- [66] Fussenegger, F., M. Reinhard, E. Titze, J. Rammelsberg u. M. Schütz: Bruchmechanisch bemessene Turbinenleitung aus duktilen Gussrohren. konstruieren + giesen 23 (1998) H. 2, S. 14 - 19.
- [67] Pusch, G., u. W. Baer: Bruchmechanische Untersuchung an duktilem Gusseisen GGG-40. Prüfbericht 6/95. TU Bergakademie Freiberg. Institut für Werkstofftechnik.
- [68] Kuna, M., M. Springmann, K. Mädler, P. Hübner u. G. Pusch: Anwendung bruchmechanischer Bewertungskonzepte bei der Entwicklung von Eisenbahnradern aus bainitischem Gusseisen. konstruieren + giesen 27 (2002) H. 4, S. 27 - 32.
- [69] Mädler, K.: Zur Eignung von ADI als alternativer Radwerkstoff. in: Tagungsband zum CIATF Technical Forum 1999, 10.-11. Juni 1999, Düsseldorf, S. 440 - 447.
- [70] Aurich, D., R. Helms u. K. Wieser: Das sicherheitstechnische Konzept der BAM für Sphärogussbehälter. Amts- und Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM). 17 (1987) H. 4, S. 657 - 663.
- [71] Enderlein, M., A. Ricoeur, M. Kuna, R. Hüggenberg u. W. Völzer: Bruchmechanische Beanspruchungsanalyse eines CASTOR-Behälters bei Fallversuchen. 36. Tagung d. DVM-Arbeitskreises Bruchvorgänge, Köln, Febr. 2004. DVM-Bericht 236, S. 251 - 260.
- [72] Müller, K., V. Ballheimer, B. Droste, R. Rödel, H. Völzke u. U. Zenker: Die Anwendung der Bruchmechanik im Sicherheitsnachweis von Transportbehältern für die Beförderung radioaktiver Stoffe. Wie [71], S. 225 - 238.
- [73] Müller, K., S. Schriever, P. Wossidlo, A. Hamann u. P. Löwe: Bruchmechanische Untersuchungen von Gusseisen mit Kugelgraphit bei Stoß- und Schlagbiegebeanspruchung. 33. Tagung des DVM-Arbeitskreises Bruchvorgänge. Paderborn, 20. u. 21. Februar 2001. DVM-Bericht 233, S. 267 - 274.
- [74] Erneuter Gondelabsturz einer E-40. Neue Energie (1999) H. 4, S. 72.
- [75] Hengefeld, F.: Fatigue damage in cast structures. A fracture mechanics assessment. Graduation report. Hogeschool Enschede, 1998.