

# Werkstoffanwendungen im Maschinenbau

Band 18

Luisa-Marie Heine

## Schadenstolerante Auslegung mit hochfestem Gusseisen EN-GJS-700-2



Institut für  
Werkstoffan-  
wendungen im  
Maschinenbau

**RWTH**AACHEN  
UNIVERSITY



**Institut für Anwendungstechnik  
Pulvermetallurgie und Keramik**  
an der RWTH Aachen e.V.

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. C. Broeckmann

# **Schadenstolerante Auslegung mit hochfestem Gusseisen EN-GJS-700-2**

Damage Tolerant Design with  
High Strength Cast Iron EN-GJS-700-2

Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen  
Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades einer Doktorin der  
Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von  
Luisa-Marie Heine

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. C. Broeckmann  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Münstermann  
Tag der mündlichen Prüfung: 10. September 2018

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.



Werkstoffanwendungen im Maschinenbau  
hrsg. von Prof. Dr.-Ing. Christoph Broeckmann

Band 18

**Luisa-Marie Heine**

**Schadenstolerante Auslegung mit hochfestem  
Gusseisen EN-GJS-700-2**

Shaker Verlag  
Aachen 2018

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2018)

Copyright Shaker Verlag 2018

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6318-9

ISSN 2195-2981

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

*Meinen Eltern,*

*Heike und Heiko*



## Kurzdarstellung

Im Rahmen der Energiewende nehmen technisch zuverlässige Windenergieanlagen eine zentrale Rolle ein. Vornehmlich in deren Gondel werden großvolumige Gussstrukturbauteile verbaut, bei denen fertigungsbedingte Defekte nicht ausgeschlossen werden können. Infolgedessen fordern Zertifizierer häufig, als Ergänzung zum konventionellen, einen bruchmechanischen Festigkeitsnachweis. Dabei mangelt es oft an Verständnis zu den Versagensmechanismen im Werkstoff sowie an ausgereiften Auslegungskonzepten. Insbesondere bei dem Planetenträger des Hauptgetriebes, gefertigt aus der hochfesten Gusseisengüte EN-GJS-700-2, ist der Bedarf hoch.

Dieses Bauteil und sein Konstruktionswerkstoff sind folglich Untersuchungsgegenstand der vorliegenden Arbeit. Ziel ist die Entwicklung eines schadenstoleranten Auslegungskonzepts, welches alle drei Stadien der Werkstoffermüdung: Schwellenwertverhalten, Kurz- und Langrissfortschritt, erfasst. Der Lösungsansatz beinhaltet dabei sowohl experimentelle und metallographische als auch numerische Methoden.

Ergebnis der Untersuchungen sind Gesetzmäßigkeiten für alle drei Stadien der Schadensentwicklung. Zunächst wird das Schwellenwertverhalten in Abhängigkeit der Defektgröße beschrieben. Dies geschieht in Anlehnung an das Kitagawa-Takahashi-Diagramm sowie das Risswiderstandskurvenkonzept. Ferner wird ein funktionaler Zusammenhang zur Charakterisierung des Beanspruchungszustandes gusseisentypischer Defekte präsentiert. Dieser ist Grundlage für die Quantifizierung des Kurzrissfortschritts, bei dem insbesondere Mikrostruktureffekte und die risslängenabhängige Entwicklung des Riss-schließens im Fokus stehen. Sowohl letzteres als auch der Einfluss einer variierenden statischen Vorlast werden von den im Anschluss vorgestellten Langrissfortschrittsgesetzen adressiert.

Die Kombination aller Erkenntnisse resultiert im Vorschlag eines schadenstoleranten Auslegungskonzepts für EN-GJS-700-2, welches abschließend im Labormaßstab validiert wird. Im Übergang zum Langzeitfestigkeitsbereich zeigen die Vorhersagen dabei eine hohe Übereinstimmung mit experimentellen Beobachtungen.



## Abstract

In the course of the energy revolution, technically reliable wind energy plants play a central role. In particular within their nacelle, high-volume structural cast iron components are used. Here, production-related defects cannot be excluded. As a result, certifiers often demand a fracture mechanically based strength assessment, in addition to a conventional one. Thereby, it often lacks a profound knowledge of the failure mechanisms within the material and sophisticated design concepts. Especially for the main gear unit's planet carrier, manufactured out of the high strength cast iron EN-GJS-700-2, the demand is high.

This component as well as its construction material are consequently the present work's subject of investigation. The aim is the development of a damage tolerant design concept considering all the three stages of material fatigue: threshold behaviour, short and long crack growth. Thereby, the solution approach comprehends experimental and metallographic as well as numerical methods.

Laws, describing all the three stages of failure development, are the result of the investigations. First, the threshold behaviour is defined as a function of the defect size. This is done in the style of the Kitagawa-Takahashi-Diagram and of the cyclic resistance curve method. Further, functional relationships, describing the loading conditions of typical casting defects, are presented. They are the basis for the quantification of the short crack growth. Here, microstructural effects and the crack length dependent development of crack closure are of special interest. The latter one as well as the impact of a varying static preload are addressed by the subsequently presented long crack growth laws.

The combination of all findings results in the proposal of a damage tolerant design concept for EN-GJS-700-2. It is finally validated on laboratory scale. Thereby, in the transition region to long life fatigue, the predictions show a great accordance with experimental observations.



# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die zum Gelingen dieser Arbeit beitrugen.

Zuerst wäre hier Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Broeckmann zu nennen, der im Rahmen meiner Promotion diese Arbeit und die zugrundeliegenden Untersuchungen ermöglichte. Hierfür, und in besonderem Maße für die mir während meiner wissenschaftlichen Tätigkeit zugestandenen Freiräume und das mir stets entgegengebrachte Vertrauen, möchte ich mich bedanken. Ferner gilt mein Dank Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sebastian Münstermann für die Übernahme des Korreferats sowie die konstruktiven Diskussionen und Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Georg Jacobs für die Übernahme des Vorsitzes meiner Promotionsprüfung.

Darüber hinaus danke ich der Firma Eickhoff Antriebstechnik GmbH, die den Planetenträger für die experimentellen Untersuchungen zur Verfügung stellte.

Ebenso möchte ich mich bei allen Kollegen und Kolleginnen bedanken, die sowohl fachlich als auch menschlich ihren Beitrag zu dieser Arbeit leisteten.

Herrn Alexander Bezold danke ich für die zahlreichen guten Gespräche und die mir entgegengebrachte Wertschätzung. Den Mitarbeitern der Werkstatt gilt mein Dank für die in die Probenfertigung investierte Mühe und Sorgfalt. Dem Personal der Metallographie, und in besonderem Maße Herrn Ulrich Mohr, danke ich für die tatkräftige Unterstützung bei den metallographischen Untersuchungen sowie bei den in-situ Versuchen. Frau Johanna Haan und Herrn Karl Burkamp danke ich für die schöne Bürozeit, an die ich mich stets gerne erinnern werde. Herrn Bastian Smets danke ich für die Unterstützung bei den Kurzrissfortschrittsversuchen. Herrn Andreas Schumacher möchte ich meinen Dank aussprechen für die Begleitung der zahlreichen experimentellen und fraktographischen Untersuchungen sowie für die stets sorgfältige Arbeitsweise.

Außerhalb des Instituts richte ich meinen Dank an alle Freunde und Bekannte, die mich insbesondere in Phasen geringer Motivation bis hinreichender Frustration aufmunterten und ablenkten. Für das mir entgegengebrachte Verständnis bin ich sehr dankbar. Marko Hajeck, Miriam Kerler sowie Mario und Sarah Klein danke ich ferner für die Durchsicht der Arbeit und die erbarmungslose Suche nach Fehlern.

Zuletzt, aber doch an erster Stelle, danke ich von ganzem Herzen meinen Eltern Heike und Heiko Heine. Nur durch die mir in allen Phasen meines Lebens entgegengebrachte Liebe und ihr Vertrauen konnte ich den Weg gehen, den ich nun gekommen bin.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>I</b>
<b>Nomenklatur</b> .....	<b>V</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Stand der Wissenschaft</b> .....	<b>5</b>
2.1 Auslegungskonzept .....	5
2.1.1 Grundlagen der Ermüdung und Bruchmechanik .....	5
2.1.2 Schwellenwertverhalten .....	9
2.1.3 Kurzrissfortschritt .....	18
2.1.4 Langrissfortschritt .....	24
2.2 Werkstoff .....	34
2.2.1 Grundlagen der Eisengusswerkstoffe.....	34
2.2.2 Gusseisen mit Kugelgraphit .....	37
<b>3 Zielsetzung und Lösungsweg</b> .....	<b>45</b>
<b>4 Bauteil und Werkstoff</b> .....	<b>47</b>
4.1 Planetenträger.....	47
4.2 Hochfestes Gusseisen EN-GJS-700-2.....	48
<b>5 Methodisches Vorgehen</b> .....	<b>55</b>
5.1 Schwellenwertverhalten .....	55
5.1.1 Konventionelle Ermüdungsversuche .....	56
5.1.2 Modifizierte Ermüdungsversuche .....	58
5.1.3 Bruchflächenanalyse .....	59
5.1.4 Finite-Elemente-Analyse zur Bestimmung des Spannungsintensitätsfaktors halb-elliptischer Oberflächenrisse in Rundstäben unter Zug .....	60
5.2 Kurzrissfortschritt .....	66
5.2.1 Kurzrissfortschrittsversuche.....	67
5.2.2 Gefügeanalyse .....	72
5.3 Langrissfortschritt .....	72

---

5.3.1	Langrissfortschrittsversuche .....	73
5.3.2	Bestimmung der Bruchzähigkeit.....	77
5.3.3	In-situ Versuche im Rasterelektronenmikroskop.....	78
5.3.4	Verschiebungsfeldanalyse mittels digitaler Bildkorrelation .....	81
5.3.5	Untersuchungen zum Risssschließen.....	81
5.3.6	Bruchflächenanalyse .....	86
<b>6</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion .....</b>	<b>87</b>
6.1	Schwellenwertverhalten .....	87
6.1.1	Spannungsintensitäts- und Geometriefaktoren halbelliptischer Oberflächenrisse in Rundstäben unter Zug .....	87
6.1.2	Risslängenabhängiges Schwellenwertverhalten .....	93
6.2	Kurzrissfortschritt .....	98
6.2.1	Qualitative Beschreibung in Abhängigkeit der Mikrostruktur .....	99
6.2.2	Quantitative Beschreibung des Kurzrissfortschritts.....	102
6.3	Langrissfortschritt .....	108
6.3.1	Grundlegende Eigenschaften des Langrissfortschritts .....	108
6.3.2	Bruchzähigkeit .....	115
6.3.3	Qualitative Bewertung möglicher Risssschließmechanismen.....	116
6.3.4	Quantitative Beschreibung des Risssschließens .....	120
6.3.5	Ganzheitliche Beschreibung des Langrissfortschritts .....	129
<b>7</b>	<b>Vorschlag eines Auslegungskonzepts .....</b>	<b>139</b>
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>143</b>
<b>9</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>147</b>
<b>10</b>	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>161</b>
<b>11</b>	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>169</b>
<b>12</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>171</b>
12.1	Anhang zu Kapitel 4: Bauteil und Werkstoff.....	171
12.2	Anhang zu Kapitel 5: Methodisches Vorgehen .....	175
12.3	Anhang zu Kapitel 6.1: Schwellenwertverhalten (Ergebnisse und Diskussion).....	176

---

12.4	Anhang zu Kapitel 6.2: Kurzrissfortschritt (Ergebnisse und Diskussion).....	179
12.5	Anhang zu Kapitel 6.3: Langrissfortschritt (Ergebnisse und Diskussion).....	181
12.6	Anhang zu Kapitel 7: Vorschlag eines Auslegungskonzepts.....	193



# Nomenklatur

## Formelzeichen und Konstanten

$a$	[m]	Risslänge
$a^*$	[m]	Materialkonstante gemäß El Haddad et al.
$a_{eff}$	[m]	effektive Risslänge
$a_{grenz1}$	[m]	untere Grenze des Gültigkeitsbereichs der Riss-schließentwicklungsfunktion
$a_{grenz2}$	[m]	obere Grenze des Gültigkeitsbereichs der Riss-schließentwicklungsfunktion
$a_k$	[m]	Kerbtiefe
$a_L$	[m]	Risslänge, oberhalb der der risslängenabhängige zyklische Schwellenwert gleich dem LR-Schwellenwert ist
$a_n$	[m]	Anfangsrisslänge bzw. -defektgröße
$a_{normiert}$	[m]	auf den Maximalwert zu Versuchsende normierte Risslänge
$a_{start}$	[m]	Risslänge zu Versuchsbeginn
$area$	[m <sup>2</sup> ]	projizierte Defektfläche senkrecht zur maximalen Hauptspannung
$A$	[%]	Bruchdehnung
$A_D$	[m <sup>2</sup> ]	Defektfläche
$A_G$	[m <sup>2</sup> ]	Graphitkugelfläche
$b$	[m]	Tiefe eines halbelliptischen Oberflächenrisses
$b_D$	[m]	Tiefe eines halbelliptischen Oberflächendefekts
$b_S$	[m]	Tiefe einer Halbellipse, die eine Schwingbruchfläche repräsentiert
$b_{Sub}$	[m]	Tiefe eines halbelliptischen Submodells
$c$	[m]	halbe Breite eines halbelliptischen Oberflächenrisses
$c_D$	[m]	halbe Breite eines halbelliptischen Oberflächendefekts
$c_S$	[m]	halbe Breite einer Halbellipse, die eine Schwingbruchfläche repräsentiert
$c_{Sub}$	[m]	halbe Breite eines halbelliptischen Submodells
$C^*$	[m <sup>-1</sup> ]	Spannungsintensitätsfaktor-Gradient
$C_{D1}$	[m/(LZ(MPam) <sup>n</sup> )]	Rissfortschrittsparameter gemäß Dowling ( $n = n_{D1}$ )
$C_{D2}$	[m/(LZ(MPam <sup>0,5</sup> ) <sup>n</sup> )]	Rissfortschrittsparameter gemäß Dinda et al. ( $n = n_{D2}$ )

$C_E$	$[m(\text{MPam}^{0.5})^{1-n} / \text{LZ}]$	Rissfortschrittsparameter gemäß Erdogan und Ratwani ( $n = n_E$ )
$C_F$	$[m(\text{MPam}^{0.5})^{1-n} / \text{LZ}]$	Rissfortschrittsparameter gemäß Forman et al. ( $n = n_F$ )
$C_{Fr}$	$[\text{MPa}^3 \text{m}]$	werkstoffabhängige Konstante gemäß Frost et al.
$C_{H1}$	$[1/(\text{LZ}(\text{MPa}^n))]$	Rissfortschrittsparameter gemäß Hobson et al. ( $n = n_{H1}$ )
$C_{H2}$	$[1/\text{LZ}]$	Rissfortschrittsparameter gemäß Hobson et al.
$C_{H3}$	$[m/\text{LZ}]$	Rissfortschrittsparameter gemäß Hobson et al.
$C_K$	$[m/(\text{LZ}(\text{MPam}^{0.5})^n)]$	Rissfortschrittsparameter bei Beschreibung des Rissfortschritts als Funktion von $K_{max}$ ( $n = n_K$ )
$C_M$	$[1]$	werkstoffunabhängige Konstante gemäß Murakami et al.
$C_{Mc}$	$[m/(\text{LZ}(\text{MPam}^{0.5})^{n1+n2})]$	Rissfortschrittsparameter gemäß McEvily et al. ( $n1 = n_{Mc1}$ und $n2 = n_{Mc2}$ )
$C_N$	$[m/(\text{LZ}(\text{MPam}^{0.5})^n)]$	Rissfortschrittsparameter gemäß Newman ( $n = n_N$ )
$C_P$	$[m/(\text{LZ}(\text{MPam}^{0.5})^n)]$	Rissfortschrittsparameter gemäß Paris ( $n = n_P$ )
$d_H$	$[m]$	charakteristischer mikrostruktureller Hindernisabstand
$da/dN$	$[m/\text{LZ}]$	Rissfortschrittsrate
$E$	$[\text{MPa}]$	Elastizitätsmodul
$f$	$[1]$	Rissöffnungsfunktion
$F$	$[\text{N}]$	Kraft
$F_{max}$	$[\text{N}]$	maximale Kraft der schwingenden Beanspruchung
$F_{op}$	$[\text{N}]$	Rissöffnungskraft
$F_{cl}$	$[\text{N}]$	Rissschließkraft
$F(\Phi)$		Funktion plastischer Verschiebungen vor der Rissspitze
$G$	$[\text{MPa}]$	Schubmodul
$h_{sub}$	$[m]$	Höhe eines halb elliptischen Submodells
$H_B$	$[\text{kp}/\text{mm}^2]$	Brinell-Härte
$H_V$	$[\text{kp}/\text{mm}^2]$	Vickers-Härte
$J$	$[\text{MPam}]$	J-Integral
$K$	$[\text{MPam}^{0.5}]$	Spannungsintensitätsfaktor (ein optionaler Index bezieht sich auf den Rissmodus)
$K_c$	$[\text{MPam}^{0.5}]$	Bruchzähigkeit (ein optionaler Index bezieht sich auf den Rissmodus)
$K_{cl}$	$[\text{MPam}^{0.5}]$	Risschließspannungsintensitätsfaktor
$K_{max}$	$[\text{MPam}^{0.5}]$	maximaler Spannungsintensitätsfaktor der schwingenden Beanspruchung

$K_{max,th}$	[MPam <sup>0,5</sup> ]	zum LR-Schwellenwert zugehöriger maximaler Spannungsintensitätsfaktor
$K_{max,th}^*$	[MPam <sup>0,5</sup> ]	Schwellenwert des maximalen Spannungsintensitätsfaktors
$K_{min}$	[MPam <sup>0,5</sup> ]	minimaler Spannungsintensitätsfaktor der schwingenden Beanspruchung
$K_{normiert}$	[MPam <sup>0,5</sup> ]	auf den Maximalwert zu Versuchsende normierter Spannungsintensitätsfaktor
$K_{Op}$	[MPam <sup>0,5</sup> ]	Rissöffnungsspannungsintensitätsfaktor
$K_Q$	[MPam <sup>0,5</sup> ]	vorläufige Bruchzähigkeit (ein optionaler Index bezieht sich auf den Rissmodus)
$K_t$	[1]	Formzahl
$KB$	[J]	Kerbschlagarbeit, ermittelt an einer Probe mit Bohrung
$KO$	[J]	Kerbschlagarbeit, ermittelt an einer Probe ohne Kerbe
$KU$	[J]	Kerbschlagarbeit, ermittelt an einer Probe mit U-Kerbe
$KV$	[J]	Kerbschlagarbeit, ermittelt an einer Probe mit V-Kerbe
$l$	[m]	Messstrecke, über der die Rauheit bestimmt wird
$M$	[1]	Mittelspannungsempfindlichkeit
$M_b$	[Nm]	Biegemoment
$M_\sigma$	[1]	von der Mittelspannungsempfindlichkeit abhängige Neigung der Grenzgeraden gemäß FKM-Richtlinie im Haigh-Diagramm
$n_C$	[1]	werkstoffabhängiger Exponent gemäß Chapetti
$n_{D1}$	[1]	Rissfortschrittsparameter gemäß Dowling
$n_{D2}$	[1]	Rissfortschrittsparameter gemäß Dinda et al.
$n_E$	[1]	Rissfortschrittsparameter gemäß Erdogan und Ratwani
$n_F$	[1]	Rissfortschrittsparameter gemäß Forman et al.
$n_{H1}$	[1]	Rissfortschrittsparameter gemäß Hobson et al.
$n_{H2}$	[1]	Rissfortschrittsparameter gemäß Hobson et al.
$n_K$	[1]	Rissfortschrittsparameter bei Beschreibung des Rissfortschritts als Funktion von $K_{max}$
$n_{Mc1}$	[1]	Rissfortschrittsparameter gemäß McEvily et al.
$n_{Mc2}$	[1]	Rissfortschrittsparameter gemäß McEvily et al.
$n_N$	[1]	Rissfortschrittsparameter gemäß Newman
$n_P$	[1]	Rissfortschrittsparameter gemäß Paris
$N$	[1]	Schwingspielzahl

$N_G$	[1]	Grenzschwingspielzahl
$N_K$	[1]	Knickschwingspielzahl
$N_{normiert}$	[1]	auf den Maximalwert zu Versuchsende normierte Schwingspielzahl
$o$	[1]	Risschließentwicklungsfunktion
$p_{D2}$	[1]	Rissfortschrittsparameter gemäß Dinda et al.
$p_K$	[1]	Rissfortschrittsparameter bei Beschreibung des Rissfortschritts als Funktion von $K_{max}$
$p_N$	[1]	Rissfortschrittsparameter gemäß Newman
$P_{\ddot{u}}$	[%]	Überlebenswahrscheinlichkeit
$q_N$	[1]	Rissfortschrittsparameter gemäß Newman
$r$	[m]	Polarkoordinate (auch radiale Entfernung von der Rissspitze)
$r^2$	[1]	Regressionskoeffizient
$r_K$	[m]	Kerbradius
$r_{max}$	[m]	Distanz von der virtuellen Rissspitze bis zum Kerbgrund
$r_{min}$	[m]	Distanz von der Rissspitze bis zu dem Punkt, in dem die Rissöffnung die Rauheitsamplitude überwindet
$r_P$	[m]	Probenradius
$R$	[1]	Spannungsverhältnis
$R_{cl}$	[1]	Risschließspannungsverhältnis
$R_e$	[MPa]	Streckgrenze
$R_m$	[MPa]	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	[MPa]	0,2 %-Dehngrenze
$Ra$	[m]	Rauheit (auch arithmetischer Mittelwert der Absolutwerte der Profildordinaten)
$Ra_{loc}$	[m]	lokale Rauheit (auch arithmetischer Mittelwert der vorzeichenbehafteten Profildordinaten)
$s$	[m]	Probendicke
$s_{W1}$	[*]	werkstoffabhängiger Parameter zur Beschreibung der Zeitfestigkeit im Wöhler-Diagramm (* mit $[\sigma_a] = 1 \text{ MPa}$ , $[N] = 1$ , siehe Tabelle 12.2)
$s_{W2}$	[*]	werkstoffabhängiger Parameter zur Beschreibung der Zeitfestigkeit im Wöhler-Diagramm (* mit $[\sigma_a] = 1 \text{ MPa}$ , $[N] = 1$ , siehe Tabelle 12.2)

$t$	[s]	Zeit
$T$	[°C]	Temperatur
$T_{\bar{u}}$	[°C]	Übergangstemperatur der Kerbschlagzähigkeit
$u$	[m]	Verschiebung entlang der x-Achse
$U$	[1]	Rissöffnungsverhältnis
$v$	[m]	Verschiebung entlang der y-Achse
$W$	[m]	charakteristische Größe einer bruchmechanischen Probe
$x$	[1]	kartesische Koordinate (ein optionaler Index entspricht der Position (Laufnummer) entlang des Risses)
$X$	[1]	kartesische Koordinate
$y$	[1]	kartesische Koordinate
$Y$	[1]	Geometriefaktor
$Y_{OP}$	[1]	Geometriefaktor für den Oberflächenpunkt eines halbelliptischen Oberflächenrisses
$Y_{SP}$	[1]	Geometriefaktor für den Scheitelpunkt eines halbelliptischen Oberflächenrisses
$z$	[1]	kartesische Koordinate
$Z(x)$	[m]	Ordinatenwert des Rauheitsprofils eines Risses
$Z_{i,max}$	[m]	maximale Profilorinate an der Position $x_i$ eines Risses
$Z_{i,min}$	[m]	minimale Profilorinate an der Position $x_i$ eines Risses
$Z_{i,mittel}$	[m]	gemittelte Profilorinate an der Position $x_i$ eines Risses
$\alpha_D$	[1]	Gewichtungsexponent gemäß Dinda et al.
$\alpha_M$	[1]	Exponent gemäß Murakami
$\alpha_W$	[1]	Gewichtungsexponent gemäß Walker
$\delta$	[m]	Rissöffnung (auch Rissöffnungsverschiebung)
$\delta_i$	[m]	Rissöffnung an der Position $x_i$ eines Risses
$\delta_{max}$	[m]	maximale Rissöffnung der schwingenden Beanspruchung
$\Delta a$	[m]	Risszuwachs innerhalb eines Intervalls
$\Delta J$	[MPam]	zyklisches J-Integral
$\Delta K$	[MPam <sup>0,5</sup> ]	zyklischer Spannungsintensitätsfaktor
$\Delta K^+$	[MPam <sup>0,5</sup> ]	positiver Anteil des zyklischen Spannungsintensitätsfaktors
$\Delta K^*$	[MPam <sup>0,5</sup> ]	gemittelter zyklischer Spannungsintensitätsfaktor
$\Delta K_c$	[MPam <sup>0,5</sup> ]	kritischer zyklischer Spannungsintensitätsfaktor
$\Delta K_{eff}$	[MPam <sup>0,5</sup> ]	effektiver zyklischer Spannungsintensitätsfaktor

$\Delta K_{start}$	[MPam <sup>0,5</sup> ]	zyklischer Spannungsintensitätsfaktor zu Versuchsbeginn
$\Delta K_{th}$	[MPam <sup>0,5</sup> ]	zyklischer Schwellenwert
$\Delta K_{th}^*$	[MPam <sup>0,5</sup> ]	intrinsischer (auch mikrostruktureller) zyklischer Schwellenwert
$\Delta K_{th,L}$	[MPam <sup>0,5</sup> ]	zyklischer Schwellenwert des Langrissfortschritts (LR-Schwellenwert)
$\Delta K_{\epsilon}$	[MPam <sup>0,5</sup> ]	dehnungsbasierter zyklischer Spannungsintensitätsfaktor
$\Delta N$	[1]	Schwingspielzahl innerhalb eines Intervalls
$\Delta Z$	[m]	Rauheitsamplitude (auch Abweichung der Profildinate von der lokalen Rauheit)
$\overline{\Delta Z}$	[m]	über die Risslänge gemittelte Rauheitsamplitude
$\Delta \epsilon$	[1]	Dehnungsschwingbreite
$\Delta \sigma$	[MPa]	Spannungsschwingbreite
$\Delta \sigma_{th}$	[MPa]	Schwellenspannung
$\epsilon$	[1]	Dehnung
$\kappa$	[1]	auf der Querkontraktionszahl basierende Kenngröße
$\nu$	[1]	Querkontraktionszahl
$\sigma$	[MPa]	Spannung
$\sigma_a$	[MPa]	Ausschlagsspannung (auch Spannungsamplitude)
$\sigma_{a,L,NG}$	[MPa]	Langzeitfestigkeit bei einer gegebenen Grenzschwingspielzahl
$\sigma_{dB}$	[MPa]	Ausschlagsspannung bei Probenbruch (im Rahmen der modifizierten Ermüdungsversuche)
$\sigma_F$	[MPa]	Fließspannung unter einachsigen Zug
$\sigma_m$	[MPa]	Mittelspannung
$\sigma_{max}$	[MPa]	Maximalspannung der schwingenden Beanspruchung (auch Oberspannung)
$\sigma_{max,K}$	[MPa]	maximale Normalspannung im Kerbgrund
$\sigma_{min}$	[MPa]	Minimalspannung der schwingenden Beanspruchung (auch Unterspannung)
$\sigma_n$	[MPa]	Normalspannung im Nettoquerschnitt
$\sigma_{op}$	[MPa]	Rissöffnungsspannung
$\sigma_{vB}$	[MPa]	Ausschlagsspannung vor Probenbruch (im Rahmen der modifizierten Ermüdungsversuche)
$\sigma_{von Mises}$	[MPa]	Vergleichsspannung nach von Mises

$\sigma_x$	[MPa]	Normalspannung in x-Richtung
$\sigma_y$	[MPa]	Normalspannung in y-Richtung
$\sigma_z$	[MPa]	Normalspannung in z-Richtung
$\sigma_{zDW}$	[MPa]	Zug-Druck-Wechselfestigkeit
$\sigma_{zSch}$	[MPa]	Zug-Schwellfestigkeit
$\tau_{xy}$	[MPa]	Schubspannung in xy-Ebene
$\phi$	[rad]	Polarkoordinate
$\Phi$	[rad]	plastische Verschiebungen vor der Rissspitze
$\omega$	[m]	Größe der monotonen plastischen Zone in der Rissebene

### Abkürzungen

ADI	austempered ductile iron
C	Kohlenstoff als Graphit
CT	compact tension
DIN	Deutsches Institut für Normung
EBSD	electron backscatter diffraction
EDZ	ebener Dehnungszustand
EN	Europäische Norm
EPBM	elastisch-plastische Bruchmechanik
ESZ	ebener Spannungszustand
Fe <sub>3</sub> C	Zementit
FEA	Finite-Elemente-Analyse
FEM	Finite-Elemente-Methode
FKM	Forschungskuratorium Maschinenbau
GJL	Gusseisen mit Lamellengraphit
GJS	Gusseisen mit Kugelgraphit (auch Sphäroguss)
GJV	Gusseisen mit Vermiculargraphit
HCF	high cycle fatigue
IEC	International Electrotechnical Commission
IGF	Industrielle Gemeinschaftsforschung
ISO	International Organization for Standardization
KTD	Kitagawa-Takahashi-Diagramm
LCF	low cycle fatigue
LEBM	linear-elastische Bruchmechanik
LLF	long life fatigue

LR-Schwellenwert	zyklischer Schwellenwert des Langrissfortschritts
LT	low temperature
LZ	Lastzyklus
MK	Mischkristall
OP	Oberflächenpunkt eines halbelliptischen Oberflächenrisses
REM	Rasterelektronenmikroskop
SP	Scheitelpunkt eines halbelliptischen Oberflächenrisses
UHCF	ultra high cycle fatigue
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
XFEM	extended finite element method
$\alpha$ -MK	$\alpha$ -Ferrit
$\gamma$ -MK	Austenit
$\delta$ -MK	$\delta$ -Ferrit