

Dieter Radaj

---

Ermüdungsfestigkeit



Dieter Radaj

# Ermüdungsfestigkeit

Grundlagen für Leichtbau,  
Maschinen- und Stahlbau

Zweite, neubearbeitete und erweiterte Auflage  
mit 379 Abbildungen



Springer

Professor Dr.-Ing. habil. Dieter Radaj  
DaimlerChrysler AG, Stuttgart

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

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

ISBN 978-3-662-07108-3    ISBN 978-3-662-07107-6 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-662-07107-6

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

<http://www.springer.de>

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1995 and 2003

Ursprünglich erschienen bei Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 2003

Softcover reprint of the hardcover 2nd edition 2003

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buch berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Einband-Entwurf: medio Technologies AG, Berlin

Satz: medio Technologies AG, Berlin

Gedruckt auf säurefreiem Papier    62/3020Rw – 5 4 3 2 1 0

# Vorwort

Das vorliegende Fachbuch, das sich als Handbuch und Nachschlagewerk an Entwicklungs-, Berechnungs- und Versuchsingenieure sowie an Forscher, Hochschullehrer und Promotionsaspiranten wendet, behandelt die theoretischen und praktischen Grundlagen der Dimensionierung, Gestaltung und Optimierung ermüdungsfester Bauteile. Die dabei eingesetzten rechnerischen und experimentellen Verfahren der Lebensdauerprognose werden erläutert. Nennspannungs-, Strukturspannungs- und Kerbbeanspruchungskonzepte kommen ebenso wie schädigungs- und bruchmechanische Ansätze zur Sprache. Erstmals wird das Gebiet der Kurzrißbruchmechanik geschlossen dargestellt. Der Leser erhält einen umfassenden Einblick in die Abhängigkeit von Schädigung, Rißeinleitung und Rißfortschritt von den anwendungstechnisch bedeutsamen Einflußgrößen auf die Ermüdungsfestigkeit: Werkstoff (Art, Legierung, Mikrostruktur), Bauteilgeometrie (Form, Größe), Bauteiloberfläche (Rauigkeit, Härte, Eigenspannungen), Umgebungsbedingungen (Temperatur, Korrosion), Beanspruchungsart (Mittelspannung, Mehrachsigkeit) und Beanspruchungsablauf (Amplitudenfolge, Mittelspannungsänderung, Reihenfolgeeffekte). Die zukünftig maßgebende Richtlinie „Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile“ des Forschungskuratoriums Maschinenbau (FKM-Richtlinie) wird wiederholt angesprochen und in den Grundzügen erläutert.

Diese zugleich einführende, integrierende und vertiefende Darstellung der Grundlagen für Leichtbau, Maschinen- und Stahlbau (zahlreiche weitere Sparten bleiben ungenannt) kommt einem spürbaren Bedarf in Forschung und Lehre sowie in Industrie- und Dienstleistungsunternehmen nach. Die inhaltliche und strukturelle Komplexität des angesprochenen Wissensgebietes erfordert Einstiegshilfen für neu eintretende Fachleute. Selbst ausgewiesene Experten benötigen die aktualisierte Zusammenfassung des in Breite und Tiefe rasch anwachsenden Wissens. Das betrifft den Wissenschaftler, der Forschungsprojekte definiert und Lehrveranstaltungen vorbereitet, ebenso wie den Entwicklungsingenieur, der das vorhandene Wissen in innovative Produkte umsetzen will, oder den Verantwortlichen für Berechnungs- und Prüfvorschriften, der den jeweils neuesten Wissensstand in die laufende Überarbeitung einzubringen versucht.

Die 1995 erschienene Erstauflage des Buches ist seit vielen Jahren vergriffen. Die Neuauflage wurde gründlich überarbeitet, wobei durch Ausweitung des Umfangs den erheblichen Fortschritten in der Analyse der Ermüdungsphänomene Rechnung getragen wurde. Die Fortschritte betreffen insbesondere den Mehr-

achsigkeitseinfluß auf Schwingfestigkeit und Reißfortschritt, die Schädigungshypothesen und Schädigungsparameter sowie die bereits erwähnte FKM-Richtlinie. Die zahlreichen, zum Teil neu erfaßten Fachaufsätze (knapp 1400 Literaturzitate) zeugen von der ungebrochenen Vielseitigkeit und Lebendigkeit des angesprochenen Fachgebietes.

Das vorliegende Werk erhebt den Anspruch, umfassender zu sein als thematisch vergleichbare Publikationen. Das betrifft die erfaßte Breite des Fachgebiets ebenso wie die Integration der unterschiedlichen Ansätze und „Schulen“, wobei Vollständigkeit bei der Fülle des Stoffes (derzeit über 1000 Fachaufsätze pro Jahr, Tendenz steigend) ein unerreichbares Ziel bleibt. Eine umfassende Darstellung ist erwünscht, um die Einheit der Wissenschaft im angesprochenen Bereich zu wahren. Insbesondere jüngere, weniger erfahrene Fachkollegen sollen durch die Zusammenfassung in die Lage versetzt werden, sich am wissenschaftlichen Diskurs zu beteiligen, fundierte Urteile abzugeben und die Forschungsergebnisse in der Praxis umzusetzen.

Die Anwendung des in diesem Buch vermittelten Grundlagenwissens auf den industriell besonders bedeutsamen Bereich der Schweißverbindungen wird in einem parallel publizierten Fachbuch dargestellt (D. Radaj u. C. M. Sonsino: „Fatigue assessment of welded joints by local approaches“, Woodhead Publishing, Cambridge 1998), von dem eine deutschsprachige Kurzfassung vorliegt (erschienen 2000 im DVS-Verlag).

Bei der Abfassung des Manuskripts war mir mein Fachkollege Cetin Morris Sonsino ein freundschaftlich-kritischer Begleiter in vielen Detailfragen. Aber auch andere Fachkollegen haben mich auf Anfrage in uneigennütziger Weise mit Informationen versorgt, so Bernd Hänel, Paolo Lazzarin (Vicenza), Jiping Liu, Günter Schott, Karl-Heinz Schwalbe, Timm Seeger, David Taylor (Dublin), Michael Vormwald und Harald Zenner. Ihnen allen sage ich ein herzliches Dankeschön.

Die Neubearbeitung des vorliegenden Fachbuches erfolgte mit Förderung durch die DaimlerChrysler AG Stuttgart, das Unternehmen, in dem ich bis vor kurzem beruflich tätig war. Mein besonderer Dank gilt Werner Pollmann und Klaus-Dieter Vöhringer, die mir den Zugang zu den in Vorbereitung der Publikation erforderlichen Dienstleistungen (Textverarbeitung und Bilderstellung) auch noch nach meinem Ausscheiden offengehalten haben.

Die Textverarbeitung erfolgte durch Ute Keller, deren Sorgfalt und Zuverlässigkeit mir die Arbeit sehr erleichterte. Die Grafiken wurden von Helga Schmidt in hervorragender Qualität gezeichnet und von Roland Dierolf mittels Computer beschriftet und weiterverarbeitet. Die Lektorierung des Umbruchs besorgte Beate Herud. Ich bin den genannten Personen für ihre Mitwirkung überaus dankbar. Sie haben zum Gelingen des Werkes entscheidend beigetragen.

Den Mitarbeitern des Springer-Verlages und der medio Technologies AG, die das Buchprojekt verwirklicht haben, danke ich für die stets konstruktive und angenehme Zusammenarbeit.

Stuttgart, im Oktober 2002

Dieter Radaj

# Inhaltsverzeichnis

<b>Liste der Formelzeichen</b> . . . . .	IX
<b>1 Einführung</b> . . . . .	1
1.1 Problem des Ermüdungsschadens . . . . .	1
1.2 Phänomen der Materialermüdung . . . . .	5
1.3 Strukturierungen zur Ermüdungsfestigkeit . . . . .	7
1.4 Einschlägige Buchpublikationen . . . . .	10
<b>2 Schwingfestigkeit</b> . . . . .	11
2.1 Begriffe und Bezeichnungen . . . . .	11
2.2 Wöhler-Versuch und Wöhler-Linie . . . . .	14
2.3 Zeit- und Dauerfestigkeitsschaubild . . . . .	21
2.4 Dehnungs-Wöhler-Linie . . . . .	29
2.5 Statistische Auswertung von Schwingfestigkeitsversuchen . . . . .	37
<b>3 Weitere Einflußgrößen zur Schwingfestigkeit</b> . . . . .	53
3.1 Einfluß des Werkstoffs . . . . .	53
3.2 Einfluß der Belastungsart . . . . .	60
3.3 Einfluß der Beanspruchungsmehrachsigkeit . . . . .	60
3.4 Einfluß der Probengröße . . . . .	79
3.5 Einfluß der Oberflächenverfestigung . . . . .	84
3.6 Einfluß der Eigenspannungen . . . . .	90
3.7 Einfluß der Oberflächenrauigkeit . . . . .	94
3.8 Einfluß der Oberflächenbeschichtung . . . . .	101
3.9 Einfluß der Korrosion . . . . .	102
3.10 Einfluß der Temperatur . . . . .	107
<b>4 Kerbwirkung</b> . . . . .	113
4.1 Erscheinungsformen der Kerbwirkung . . . . .	113
4.2 Kerbbeanspruchung an eigentlichen Formkerben . . . . .	120
4.3 Kerbbeanspruchung an Öffnungen und Einschlüssen . . . . .	129

4.4	Elastisch-plastische Kerbbeanspruchung . . . . .	137
4.5	Kerbwirkung bei Dauerfestigkeit . . . . .	146
4.6	Spannungsgradientenansatz . . . . .	149
4.7	Spannungsmittelungsansatz . . . . .	155
4.8	Spannungsabstandsansatz . . . . .	160
4.9	Weitere Ansätze und Vergleich . . . . .	162
4.10	Kerbwirkung abhängig von der Mittelspannung . . . . .	166
4.11	Kerbwirkung abhängig von Eigenspannungen . . . . .	169
4.12	Kerbwirkung abhängig vom Oberflächenzustand . . . . .	171
4.13	Kerbwirkung bei Zeit- und Kurzzeitfestigkeit . . . . .	175
4.14	Kerbwirkung bei zusammengesetzter Belastung . . . . .	184
4.15	Kerbwirkung abhängig von der Temperatur . . . . .	190
<b>5</b>	<b>Betriebsfestigkeit . . . . .</b>	<b>193</b>
5.1	Beanspruchungs-Zeit-Funktion . . . . .	193
5.2	Lastkollektiv . . . . .	196
5.3	Betriebsfestigkeitsversuch und Lebensdauerlinie . . . . .	218
5.4	Schadensakkumulation und Schädigungsparameter . . . . .	232
5.5	Kerbmechanischer Ansatz . . . . .	258
5.6	Konzepte zur Lebensdauer vorhersage . . . . .	267
5.7	Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile . . . . .	271
<b>6</b>	<b>Langrißbruchmechanik zur Ermüdungsfestigkeit . . . . .</b>	<b>280</b>
6.1	Phänomene Anrißbildung und Rißfortschritt . . . . .	280
6.2	Rißfrontbeanspruchung . . . . .	283
6.3	Beanspruchung an Rissen im Kerbgrund . . . . .	294
6.4	Rißfortschrittsgleichungen . . . . .	305
6.5	Einfluß der Mittellast und der Probendicke . . . . .	326
6.6	Einfluß des Rißschließens . . . . .	331
6.7	Einfluß des Werkstoffs . . . . .	341
6.8	Einfluß der Korrosion, Frequenz und Temperatur . . . . .	346
6.9	Einfluß der nichteinstufigen Belastung . . . . .	354
<b>7</b>	<b>Kurzrißbruchmechanik zur Ermüdungsfestigkeit . . . . .</b>	<b>370</b>
7.1	Bedeutung des Kurzrißverhaltens . . . . .	370
7.2	Schwellenwert zum Kurzrißfortschritt . . . . .	374
7.3	Zyklische elastisch-plastische Beanspruchungskennwerte . . . . .	396
7.4	Kurzrißfortschrittsgleichungen . . . . .	407
7.5	Kurzriß im Kerbgrund . . . . .	417
7.6	Schadensakkumulation und Lebensdauer . . . . .	442
	<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>452</b>
	<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>513</b>



# Liste der Formelzeichen

Die Liste der wichtigsten Formelzeichen in den Gleichungen, im Text und in den Abbildungen folgt erst dem lateinischen, dann dem griechischen Alphabet. Innerhalb der einzelnen Buchstaben­gruppen wird zuerst die Großschreibung, dann die Kleinschreibung aufgelistet.

Spannungen werden mit  $\sigma$  bzw.  $\tau$ , Dehnungen mit  $\varepsilon$  bzw.  $\gamma$  bezeichnet. Beanspruchungskennwerte tragen im allgemeinen kleine Indizes, Festigkeitskennwerte große Indizes. Die historisch ältere Schreibweise  $\sigma_F$ ,  $\sigma_{0,1}$ ,  $\sigma_{0,2}$  und  $\sigma_Z$  wird anstelle der neueren Schreibweise  $R_e$ ,  $R_{p0,1}$ ,  $R_{p0,2}$  und  $R_m$  beibehalten, weil sie mit der Spannungsbezeichnung übereinstimmt und die Verwechslung mit dem Spannungsverhältnis  $R$  oder der Rauhtiefe  $R_t$  bzw.  $R_m$  ausgeschlossen wird. Nennspannungen und Nenndehnungen werden entgegen der angelsächsischen Konvention ( $S$  und  $e$ ) in herkömmlicher Weise sinnfällig durch den Index  $n$  am Spannungs- bzw. Dehnungszeichen ausgedrückt ( $\sigma_n$  und  $\varepsilon_n$ ). Die Exponentialfunktion  $e^x$  wird  $\exp(x)$  geschrieben.

Die Liste kann hinsichtlich der möglichen Kombinationen von Hauptbuchstabe und Indizes nur ein unvollständiges Orientierungsraster bieten. Weitere Zeichen sind durch Analogieschluß rekonstruierbar. Die doppelte oder gar mehrfache Bedeutung einzelner Zeichen war nicht zu vermeiden, denn von der Schreibweise in den maßgebenden Originalveröffentlichungen sollte möglichst nicht abgewichen werden.

$A_0$	Ausgangsquerschnitt	$b$	Schwingfestigkeitsexponent
$A_Z$	Bruchquerschnitt	$b$	Radius des Brutto- bzw. Netto- kerbquerschnitts
$A^*$	Projektionsfläche		
$a$	Rißlänge, Rißtiefe, Rißradius	$b$	halbe Stabbreite bzw. Recht- eckbreite
$a_0, a_0^*$	Anfangsrißlänge		
$a_0$	Vergleichsrißlänge, Grenzziß- länge	$b$ $b, \bar{b}$	Randabstand Ellipsenhalbachse
$a_0^{**}$	Grenzzißlänge nach Lukáš		
$\Delta a$	Rißlängenänderung	$C$	Kohlenstoffgehalt
$\Delta a^*$	Übergangslänge bei Rißverzö- gerung	$C, C', C_\varepsilon, C_\gamma$	Werkstoffkonstante zum zykli- schen Rißfortschritt
$a_0$	Oberflächenrißlänge	$C_{sc}$	Werkstoffkonstante zur Span- nungsrißkorrosion
$a_c$	kritische Rißtiefe		
$a, \bar{a}$	Ellipsenhalbachse	$c$	zyklischer Duktilitätsexponent
$\Delta a$	rißwirksamer Teil der Ellip- senhalbachse	$c$	Ellipsenhalbachse
$a$	halbe Breite bzw. Radius des Kerbquerschnitts	$c$	halbe Oberflächenrißlänge
$a$	halbe Länge des Rechtecks	$D, D_j$	Schädigung, Teilschädigung
$a^*, a^{**}$	Längenparameter für Kurzriß- verhalten nach El Hadad <i>et al.</i>	$D$	Stabdurchmesser
		$d_g$	Grübindendurchmesser
$a^*, a^{**}$	Längenparameter für Mikro- stützwirkung nach Peterson	$d_h$	mikrostruktureller Hindernis- abstand
	bzw. Heywood	$d_k$	Korndurchmesser
$a_s$	Ausdehnung der Schädigungs- zone an der Rißspitze	$d^*$	Längenparameter für Kurzriß- verhalten nach Sähn

X Liste der Formelzeichen

$E$	Elastizitätsmodul	$\Delta K_\varepsilon, \Delta K_{\varepsilon \text{ eff}}$	dehnungsbasierte zyklische (effektive) Spannungsintensität
$E_s$	Sekantenmodul	$\Delta K_0^*$	Schwellenwert der zyklischen Spannungsintensität beim Abknickriß bzw. Kurzriß
$F, F_a, \Delta F$	Kraft, Kraftamplitude, zyklische Kraft	$k, \bar{k}$	Neigungskennzahl der Wöhler- bzw. Lebensdauerlinie
$F_o, F_q, F_g$	Oberlast, Querkraft, Grenzlast	$k_v$	Kerbeinflußfaktor
$\bar{F}_a$	Größtwert der Lastamplitude im Lastkollektiv	$l$	Stablänge
$\bar{F}_m$	Mittellast des Lastkollektivs		
$f$	Frequenz		
$G_{Ic}, G_c$	kritische Rißerweiterungskraft	$M, M_b$	Moment, Biegemoment
$H_i$	Häufigkeit	$M$	Mittelspannungsempfindlichkeit
$\bar{H}$	Häufigkeit des Kollektivmittlerwerts	$M_E$	Eigen Spannungsempfindlichkeit
$H, H_0, H_V$	Härte, Bezugshärte, Vickers-Härte	$M_k$	Kerbmittelspannungsempfindlichkeit
$H$	Verfestigungsmodul	$m, m'$	zyklischer Rißfortschrittsexponent
$h$	Probendicke, halbe Streifenbreite		
$i_0$	Regelmäßigkeitsfaktor der Schwingung	$N, N_B, N_A$	Schwingenspielzahl, diese bis Bruch bzw. Anriß
$J$	$J$ -Integral	$N_D, N_D^*$	(Ersatz-)Grenzwahrscheinlichkeit zur Dauerfestigkeit
$\Delta J, \Delta J_{\text{eff}}$	zyklisches (effektives) $J$ -Integral	$N_{0,1}, N_{0,9}$	Schwingenspielzahl bei $P_{\bar{u}} = 10\%$ bzw. $90\%$
$\Delta J_{\text{el}}, \Delta J_{\text{pl}}$	elastischer bzw. plastischer Anteil des $\Delta J$ -Integrals	$N_T$	Übergangsschwingenspielzahl (transition life)
$j_\sigma, j_N$	Sicherheitszahl für Spannung bzw. Schwingenspielzahl	$N_i$	Überschreitungszahl
		$\bar{N}$	Mittelwertüberschreitungszahl, Kollektivumfang
		$\bar{N}_G$	Mittelwertüberschreitungszahl für Gauß-Normalkollektiv
$K, K_I, K_{II}, K_{III}$	Spannungsintensitätsfaktor	$N_{\text{äq}}$	äquivalente Schwingenspielzahl
$K_{I1}, K_{I2}$	Eckspannungsintensitätsfaktor	$\Delta N$	Schwingenspielzahl im Block
$K_{I \text{ max}}, K_{\text{max}}$	Größtwert der Spannungsintensität	$N_0, N_{\text{sp}}$	Nulldurchgangszahl, Spitzenwertzahl
$K_{I \text{ min}}, K_{\text{min}}$	Kleinstwert der Spannungsintensität	$N_R$	Restlebensdauer
$K_o, K_u, K_m$	Ober-, Unter- und Mittelwert der Spannungsintensität	$\Delta N^*$	Lebensdauergewinn durch Rißverzögerung
$K_{cl}, K_{op}$	Spannungsintensität beim Rißschließen bzw. Rißöffnen	$\bar{N}, \bar{N}^*$	Mittelwert bzw. Medianwert der Schwingenspielzahlen
$K_{Ic}, K_c$	kritischer Spannungsintensitätsfaktor	$n, n'$	zyklischer Verfestigungsexponent
$K_0$	Schwellenwert der Spannungsintensität	$n_\chi$	Stützziffer aus Spannungsgradient
$K_{a0}, K_{a0}^*$	Schwellenwert der (Kurzriß-) Spannungsintensitätsamplitude	$n_{\text{pl}}, n_{0,1}$	Stützziffer aus plastische Verformung
$K_{\text{Isc}}$	Schwellenspannungsintensität bei Spannungsrißkorrosion	$n_1, n_2, n_3$	Schwingenspielzahl im Block
$\Delta K, \Delta K_{\text{eff}}$	zyklische (effektive) Spannungsintensität	$P_a, P_{\bar{u}}, P_e$	Ausfall-, Überlebens- bzw. Eintretenswahrscheinlichkeit
$\Delta K_0, \Delta K_{0 \text{ eff}}$	Schwellenwert der zyklischen (effektiven) Spannungsintensität	$P_{\bar{u}}$	Überschreitungshäufigkeit
		$P, P_B$	Bruchwahrscheinlichkeit
		$P$	Schädigungsparameter

$P_{\text{SWT}}$	Schädigungsparameter nach Smith, Watson u. Topper	$W_{\text{el}}, W_{\text{pl}}$	elastische bzw. plastische Formänderungsenergiegedichte
$P_{\text{HL}}$	Schädigungsparameter nach Haibach u. Lehrke	$x, x_i$	Merkmalsgröße, Stichprobenwert
$P_{\text{DQ}}$	Schädigungsparameter nach DuQuesney <i>et al.</i>	$\bar{x}$	Erwartungswert des Mittelwerts
$P_{\text{KBM}}$	Schädigungsparameter nach Kandil, Brown u. Miller	$Y, Y^*, Y_o, Y_k$	Geometriefaktor zur Spannungsintensität
$P_J$	Schädigungsparameter nach Vormwald u. Seeger	$Z$	zyklisches $J$ -Integral nach Wüthrich
$P_J^*, P_{J0}$	dauerfest ertragbarer Schädigungsparameter $P_J$	$Z_d$	Schädigungsparameter nach Neumann <i>et al.</i>
$p$	Kollektivbeiwert	$\alpha_k, \alpha_{\text{kr}}$	elastische Kerbformzahl, diese bei Schubbeanspruchung
$p$	Größenfaktor	$\alpha_k^*, \alpha_{\text{ke}}^*$	rißwirksame Kerbformzahl
$p(x)$	Wahrscheinlichkeitsfunktion	$\alpha_\sigma, \alpha_\epsilon$	elastisch-plastische Spannungs- bzw. Dehnungsformzahl
$Q$	Konstante zur Schädigungsparameter-Wöhler-Linie	$\alpha_{\text{pl}}$	Grenzlastformzahl
$q$	Kollektivbeiwert	$\alpha$	Neigungswinkel
$R$	Spannungsverhältnis, Spannungsintensitätsverhältnis	$\beta, \beta_k$	Kerbwirkungszahl
$R_{\text{max}}$	Spannungsintensitätsverhältnis bei Spitzenlast	$\beta, \beta^*$	Neigungswinkel
$\bar{R}$	Last- bzw. Spannungsverhältnis im Kollektiv	$\gamma, \gamma_{\text{el}}, \gamma_{\text{pl}}$	Scherdehnung, elastischer bzw. plastischer Anteil
$R, R_1, R_m$	Lochradius, Rundstabsradius maximale bzw. mittlere Rauhtiefe	$\gamma_{\text{xy}}$	Scherdehnungskomponente
$R_0$	Schwellenwert der Rauhtiefe	$\gamma_r$	Abminderungsfaktor bei Oberflächenrauigkeit
$r$	radialer Rißspitzenabstand	$\gamma$	Entlastungszahl bei Kerbbreihe
$\Delta r$	kleiner Rißspitzenabstand	$\delta$	Phasenwinkel
$r_{\text{pl}}$	halbe Ausdehnung der plastischen Zone an der Rißspitze	$\delta_0, \delta_{0\text{eff}}$	Schwellenwert der (effektiven) Rißöffnungsverschiebung
$r$	Kerbradius am Rechteck	$\Delta\delta, \Delta\delta_{\text{eff}}$	zyklische (effektive) Rißöffnungsverschiebung
$S_{\text{max}}$	Spannungsintensitätsverhältnis bei Spitzenlast	$\epsilon, \epsilon_n$	Dehnung, Nenndehnung
$s$	Standardabweichung, Varianz der Streuung	$\epsilon_x, \epsilon_y$	Normaldehnungskomponente
$s$	Mikrostützwirkungsfaktor nach Neuber	$\epsilon_a, \epsilon_{\text{ael}}, \epsilon_{\text{apl}}$	Dehnungsamplitude, elastischer bzw. plastischer Anteil
$s_g$	Gleitschichtdicke	$\epsilon_A$	ertragbare Dehnungsamplitude
$T, T_0$	Temperatur, Umgebungstemperatur	$\epsilon_m, \epsilon_v$	Mitteldehnung, Vergleichsdehnung
$T_N, T_\sigma$	Streuspanne der Schwingzahl bzw. Spannung	$\epsilon_1, \epsilon_2$	Hauptdehnung
$t, \Delta t$	Zeit, Zeitspanne	$\epsilon_k$	Kerbdehnung
$t, t_{\text{eff}}$	Kerbtiefe, wirksame Kerbtiefe	$\epsilon_{k\text{max}}, \epsilon_{\text{max}}$	Höchstwert der Kerbdehnung
$t$	Tiefe unter der Oberfläche	$\epsilon_{\text{cl}}, \epsilon_{\text{op}}$	Dehnung beim Rißschließen bzw. Rißöffnen
$t$	Plattendicke	$\Delta\epsilon_{\text{el}}, \Delta\epsilon_{\text{pl}}$	elastischer bzw. plastischer Anteil der zyklischen Dehnung
$U, U_0$	Rißöffnungsverhältnis bzw. dessen Sättigungswert	$\Delta\epsilon, \Delta\epsilon_{\text{ges}}$	zyklische Dehnung bzw. Gesamtdehnung

XII Liste der Formelzeichen

$\Delta\varepsilon_D$	dauerfest ertragbare zyklische Dehnung	$\sigma_0, \sigma_{n0}$	Schwellenwert der Spannung bzw. Nennspannung
$\varepsilon'_Z$	zyklischer Duktilitätskoeffizient	$\sigma_{a0}$	Schwellenwert der Spannungsamplitude
$\varepsilon_Z$	wahre Bruchdehnung	$\Delta\sigma_0, \Delta\sigma_{n0}$	Schwellenwert der zyklischen Spannung bzw. Nennspannung
$\eta_k, \eta_k^*$	Kerbmempfindlichkeit	$\sigma_A, \sigma_{nA}$	ertragbare Spannungs- bzw. Nennspannungsamplitude
$\kappa$	Mehrachsigkeitsfaktor der Rißspitzenbeanspruchung	$\sigma_{AD}$	dauerfest ertragbare Spannungsamplitude
$\lambda$	Mehrachsigkeitszahl der Grundbeanspruchung	$\sigma_O, \sigma_{nO}$	ertragbare Oberspannung bzw. Obennennspannung
$\lambda_\nu$	Abmessungsverhältnis	$\sigma_U, \sigma_{nU}$	ertragbare Unterspannung bzw. Unternennspannung
$\nu$	Querkontraktionszahl	$\sigma_{AT}$	ertragbare Spannungsamplitude bei $N_T$
$\rho$	Kerbradius, Kerbkümmungsradius	$\bar{\sigma}_A$	ertragbare Höchstamplitude des Spannungskollektivs
$\rho_0$	Grenzkerbradius für Schädigung	$\sigma_D$	Dauerfestigkeit
$\rho_f$	fiktiver Kerbradius nach Neuber	$\sigma_W, \sigma_{Sch}$	Wechselfestigkeit, Schwellfestigkeit
$\rho^*$	Ersatzstrukturlänge nach Neuber	$\sigma_{bW}, \sigma_{zdW}$	Biegewechselfestigkeit, Zug-Druck-Wechselfestigkeit
$\rho^{**}$	Ersatzkerbradius nach Petersen	$\Delta\sigma_D, \Delta\sigma_{nD}$	dauerfest ertragbare zyklische Spannung bzw. Nennspannung
$\rho$	Dichte	$\Delta\sigma_F$	Schwingbreite zwischen Zug- und Druckfließgrenze
$\sigma, \sigma_n$	Spannung, Nennspannung	$\sigma_F, \sigma_{Fd}$	Fließgrenze, Druckfließgrenze
$\sigma_a, \sigma_m$	Spannungsamplitude, Mittelspannung	$\sigma_Z, \sigma_T$	Zugfestigkeit, Trennfestigkeit
$\sigma_o, \sigma_u$	Oberspannung, Unterspannung	$\bar{\sigma}_F$	Ersatzfließspannung
$\sigma_v, \sigma_c$	Vergleichsspannung, kritische Spannung	$\sigma'_{0,2}$	zyklische Fließgrenze
$\sigma_\infty$	Spannung am unendlich fernen Rand	$\sigma'_Z$	zyklischer Schwingfestigkeitskoeffizient
$\sigma_x, \sigma_y$	Normalspannungskomponente	$\sigma_{F^*}, \sigma_{0,2}^*$	Formdehngrenze
$\sigma_1, \sigma_2$	Hauptspannung	$\sigma_V$	ertragbare Vergleichsspannung
$\sigma_E, \sigma_L$	Eigenspannung, Lastspannung	$\tau, \tau_{xy}$	Schubspannung
$\sigma_k$	Kerbspannung	$\tau_1$	Hauptschubspannung
$\sigma_{kmax}, \sigma_{max}$	Höchstwert der Kerbspannung	$\tau_a$	Schubspannungsamplitude
$\bar{\sigma}_{kmax}$	festigkeitswirksamer Kerbspannungshöchstwert	$\tau_A$	ertragbare Schubspannungsamplitude
$\sigma_{a\ddot{a}q}$	äquivalente Spannungsamplitude	$\tau_W$	Schubwechselfestigkeit
$\sigma_{cl}, \sigma_{op}$	Spannung beim Rißschließen bzw. Rißöffnen	$\varphi_0$	Hauptrichtungswinkel des Spannungszustands
$\Delta\sigma, \Delta\sigma_{eff}$	zyklische (effektive) Spannung		
$\Delta\bar{\sigma}$	gemittelte zyklische Spannung		
$\bar{\sigma}_a$	höchste Amplitude des Spannungskollektivs	$\chi, \chi_0$	bezogener Spannungsgradient
$\bar{\sigma}_m$	Mittelspannung des Spannungskollektivs	$\psi$	Brucheinschnürung
$\bar{\sigma}$	Erwartungswert der Mittelspannung	$\omega$	Kerböffnungswinkel
$\sigma_0$	Spannung auf Horizont 0	$\omega_{pl}, \omega_0$	Ausdehnung der plastischen Zone an der Rißspitze