

Reihe 18

Mechanik/  
Bruchmechanik

Nr. 344

Dipl.-Ing. Alexander Eberlein,  
Paderborn

## Einfluss von Mixed-Mode-Beanspruchung auf das Ermüdungsrißwachstum in Bauteilen und Strukturen





# Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 18

Mechanik/  
Bruchmechanik

Dipl.-Ing. Alexander Eberlein,  
Paderborn

Nr. 344

Einfluss von Mixed-Mode-  
Beanspruchung auf das  
Ermüdungsrißwachstum in  
Bauteilen und Strukturen

VDI verlag

Eberlein, Alexander

## **Einfluss von Mixed-Mode-Beanspruchung auf das Ermüdungsrißwachstum in Bauteilen und Strukturen**

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 18 Nr. 344. Düsseldorf: VDI Verlag 2016.

138 Seiten, 91 Bilder, 8 Tabellen.

ISBN 978-3-18-334418-5, ISSN 0178-9457,

€ 52,00/VDI-Mitgliederpreis € 46,80.

**Für die Dokumentation:** Mixed-Mode-Beanspruchung – 3D-Risswachstum – Bruchmechanische Hypothesen – CTSR-Probe – Ermüdungsrißausbreitung – Schwellenwerte – Belastungsrichtungsänderung – Beanspruchungsniveauänderung – Facettenbildung – Nicht-proportionale Beanspruchung

Während eines Produktlebens können vielfältige Belastungen am Bauteil auftreten, welche u. U. die lokale Beanspruchungssituation an vorhandenen Defekten entscheidend verändern und dadurch maßgeblichen Einfluss auf die Bauteilbensdauer ausüben können. Diese Dissertation befasst sich daher mit dem Thema des Ermüdungsrißwachstums hauptsächlich bei überlagerten Beanspruchungen, sogenannten Mixed-Mode-Beanspruchungen. Dabei konzentrieren sich die experimentellen Untersuchungen u. a. auf die bruchmechanische Kennwertermittlung bei 3D-Mixed-Mode sowie auf Auswirkungen bezüglich des Risswachstums und der Rissorientierung infolge Belastungsrichtungs- und Beanspruchungsniveauänderungen. Weitere Untersuchungsgegenstände dieser Arbeit sind die Facettenbildung bei Mode I-Mode III-Beanspruchungsumverlagerungen sowie nicht-proportionale Mixed-Mode-Beanspruchungen. Die Untersuchungen zeigen, dass Belastungsrichtungs- und Beanspruchungsniveauänderungen sowie nicht-proportionale Mixed-Mode-Beanspr. das Risswachstum hinsichtlich dessen Fortschrittsrate und Orientierung beeinflussen.

### **Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek**

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

### **Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek**

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at <http://dnb.ddb.de>.

Universität Paderborn

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2016

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9457

ISBN 978-3-18-334418-5

## VORWORT

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter der Fachgruppe Angewandte Mechanik der Universität Paderborn.

In erster Linie möchte ich meinen besonderen Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans Albert Richard aussprechen, der durch konsequente Förderung und konstruktive Anregungen zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Für das gezeigte Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferats danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans Jürgen Maier. Ebenso danke ich den Herren Prof. Dr.-Ing. Volker Schöppner und Prof. Dr.-Ing. Gerson Meschut für die Mitarbeit in der Promotionskommission.

Für die exzellente fachliche Unterstützung und sehr hilfreichen Diskussionen und Anregungen bedanke ich mich ausdrücklich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunter Kullmer. Zudem möchte ich mich bei den derzeitigen und ehemaligen Arbeitskolleginnen und Arbeitskollegen Frau Dipl.-Medienwirtin (FH) Michaela Brock, Frau Dipl.-Ing. Katharina Dibblee, Herr M. Sc. Benjamin Bauer, Herr M. Sc. Jan-Peter Brüggemann, Herr M. Sc. Alexander Grübel, Herr M. Sc. Tintu David Joy, Herr Dr.-Ing. Viktor Kloster, Frau Stephanie Lummer, Herr M. Sc. Wadim Re-schetnik, Herr Dr.-Ing. Andre Riemer, Herr M. Sc. Karsten Schäfer, Herr Dr.-Ing. Nils-Henrik Schirmeisen, Frau Dr.-Ing. Britta Schramm, Herr Prof. Dr.-Ing. Benedikt Wiedemeier und Herr Dipl.-Ing. Markus Wirxel für die freundliche Arbeitsatmosphäre und Zusammenarbeit bedanken. Einschließen möchte ich ebenso die engagierten Studien-, Bachelor-, Master- und Diplomarbeiter/-innen, die studentischen Hilfskräfte sowie die Mitarbeiter der Zentralen Werkstatt der Fakultät für Maschinenbau, die mit einer zuverlässigen Anfertigung von Proben und Versuchsvorrichtungen auch wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Insbesondere danke ich meiner Familie und meiner Ehefrau Irina ganz herzlich für ihre Motivation, Rücksichtnahme, ihre unermüdliche Geduld und Unterstützung, aber auch für die notwendige Ablenkung.

Paderborn, im Februar 2016

Alexander Eberlein

Meiner Familie gewidmet.

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>Verzeichnis der verwendeten Symbole und Abkürzungen.....</b>	<b>VIII</b>
<b>Kurzfassung .....</b>	<b>XIII</b>
<b>1 Einleitung und Zielsetzung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Historie .....	1
1.2 Herausforderungen bei der Bewertung des Risswachstums .....	2
<b>2 Bruchmechanik bei komplexer Beanspruchung.....</b>	<b>5</b>
2.1 Kraftflusstörung durch Risse.....	5
2.2 Spannungsverteilungen in Rissnähe .....	6
2.2.1 Spannungsverteilungen ebener Rissprobleme.....	7
2.2.2 Spannungsverteilungen räumlicher Rissprobleme .....	9
2.3 Grundlegende Beanspruchungsarten am Riss.....	11
2.4 Spannungintensitätsfaktoren für Single-Mode-Beanspruchungen.....	12
2.5 Instabiles Risswachstum bei komplexer Beanspruchung.....	13
2.5.1 $K$ -Konzepte für Single-Mode-Beanspruchungen .....	14
2.5.2 $K$ -Konzept für 2D-Mixed-Mode-Beanspruchung .....	15
2.5.3 $K$ -Konzept für 3D-Mixed-Mode-Beanspruchung .....	17
2.6 Ermüdungsrißwachstum bei konstanter zyklischer Amplitude .....	18
2.6.1 Ermüdungsrißwachstum unter Mode I-Beanspruchung.....	19
2.6.2 Ermüdungsrißwachstum bei 2D-Mixed-Mode-Beanspruchung.....	23
2.6.3 Ermüdungsrißwachstum bei 3D-Mixed-Mode-Beanspruchung .....	24
2.7 Ermüdungsrißwachstum bei variabler zyklischer Amplitude .....	25
2.7.1 Reihenfolgeeffekte und deren Einfluss auf den Rissfortschritt .....	25
2.7.2 Mixed-Mode-Beanspruchung infolge einer Belastungsänderung .....	29
2.8 Lokale Plastizität an der Rissspitze .....	30
<b>3 Kriterien bei 3D-Mixed-Mode-Beanspruchung.....</b>	<b>32</b>
3.1 3D-Kriterium nach RICHARD .....	32
3.2 Rissausbreitungskriterium nach POOK .....	33
3.3 $\sigma'_1$ -Kriterium nach SCHÖLLMANN et al.....	34

3.4	Gegenüberstellung der Kriterien .....	36
3.5	Bruchmechanische Bewertung bei allgemeiner zyklischer Mixed-Mode-Beanspruchung.....	39
4	<b>Proben und Vorrichtungen für Risswachstumsuntersuchungen bei Mixed-Mode-Beanspruchungen.....</b>	41
4.1	<b>CTSR-Probe und Vorrichtung .....</b>	41
4.1.1	Realisierung von beliebigen 3D-Mixed-Mode-Zuständen .....	44
4.1.2	Experimentelle Voruntersuchungen .....	46
4.2	<b>CTMM-Probe und Vorrichtung.....</b>	48
4.2.1	Konzeptdarstellung und -beschreibung .....	48
4.2.2	Ermittlung der Geometriefaktorfunktionen .....	50
4.2.3	Experimentelle Voruntersuchungen .....	53
5	<b>Experimentelle Untersuchungen des Ermüdungsrißverhaltens bei Mixed-Mode-Beanspruchung.....</b>	56
5.1	<b>Versuchswerkstoffe.....</b>	56
5.1.1	Aluminiumlegierung EN AW-7075-T651 .....	56
5.1.2	Vergütungsstahl 34CrNiMo6 .....	57
5.2	<b>Schwellenwertermittlung bei räumlicher Mixed-Mode-Beanspruchung.....</b>	58
5.2.1	Versuchsaufbau und -durchführung .....	59
5.2.2	Schwellenwerte bei Mixed-Mode-Beanspruchung: Darstellung und Interpretation .....	63
5.2.3	Gegenüberstellung der Kriterien zur Vorhersage der Rissausbreitungsrichtung .....	65
5.3	<b>Risswachstum bei Belastungsrichtungsänderungen.....</b>	68
5.3.1	Beschreibung der Versuchsreihen .....	68
5.3.2	Belastungsrichtungsänderung bei konstanter zyklischer Kraftamplitude .....	69
5.3.3	Belastungsrichtungsänderung bei konstantem zyklischen Vergleichsspannungsintensitätsfaktor .....	71
5.3.4	Bewertung des Risswachstums infolge Belastungsrichtungsänderungen .....	74
5.4	<b>Risswachstum bei Beanspruchungsniveauänderungen.....</b>	78
5.4.1	Einfluss von Mode I-Mode III-Blocklasten auf ein Mode I-Grundlastniveau.....	78
5.4.2	Einfluss von Mode I-Mode II-Blocklasten auf ein Mode II-Grundlastniveau.....	80
5.4.3	Einfluss von Mode I-Mode III-Blocklasten auf ein Mode III-Grundlastniveau .....	81
5.4.4	Bewertung des Risswachstums infolge Beanspruchungsniveauänderungen.....	82
5.5	<b>Rissfrontsegmentierung bei Mode I-Mode III-Beanspruchungen .....</b>	85
5.5.1	Definition charakteristischer Größen .....	85
5.5.2	Facettenquantifizierung .....	86
5.6	<b>Einfluss des R-Verhältnisses auf das Rissabknickverhalten bei ebener Mixed-Mode-Beanspruchung.....</b>	90

---

5.6.1	Versuchsaufbau und -durchführung .....	90
5.6.2	Rissabknickverhalten bei positiven und negativen $R$ -Verhältnissen .....	92
<b>6</b>	<b>Ermüdungsrissverhalten bei nicht-proportionaler Mixed-Mode-Bearbeitung ..</b>	<b>94</b>
6.1	Vorrichtungskonzept zur Realisierung von nicht-proportionalen Mixed-Mode-Bearbeitungen .....	96
6.2	Risswachstum bei nicht-proportionaler Mixed-Mode-Bearbeitung .....	101
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Fazit für die praktische Anwendung .....</b>	<b>105</b>
7.1	Zusammenfassung der Einzelergebnisse .....	105
7.2	Anwendung auf Bauteile und Strukturen .....	107
<b>Anhang .....</b>		<b>109</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>		<b>113</b>

## VERZEICHNIS DER VERWENDETOEN SYMBOLE UND ABKÜRZUNGEN

### a) Lateinisch

$A$	Bruchdehnung
$A_0 - A_4$	Koeffizienten der Kalibrierfunktionen zur Risslängenberechnung
$A - G$	Koeffizienten der Geometriefaktorfunktionen der CTMM-Probe
$E$	Elastizitätsmodul
$F$	Kraft
$F_a$	Kraftamplitude
$F_{\max}, F_{\min}$	maximale bzw. minimale Kraft
$\Delta F$	Schwingbreite der Kraft
$\Delta F_{\text{St}}$	Zunahme der maximalen Kraft je Stufe im Laststeigerungsversuch
$\Delta F_0$	initiale Schwingbreite der Kraft
$G$	Gewichtskraft
$G_{\text{I}}, G_{\text{II}}, G_{\text{III}}$	Energiefreisetzungsrat für Mode I, Mode II und Mode III
$I_0$	konstanter elektrischer Strom
$K$	Spannungsintensitätsfaktor
$K_{\text{I}}, K_{\text{II}}, K_{\text{III}}$	Spannungsintensitätsfaktor für Mode I, Mode II und Mode III
$K_{\text{I}}(t), K_{\text{II}}(t), K_{\text{III}}(t)$	zeitabhängiger Spannungsintensitätsfaktor für Mode I, Mode II und Mode III
$K_{\text{I,a}}, K_{\text{II,a}}, K_{\text{III,a}}$	Spannungsintensitätsamplitude für Mode I, Mode II und Mode III
$K_{\text{I,block}}, K_{\text{II,block}}, K_{\text{III,block}}$	maximaler Spannungsintensitätsfaktor der Mode I-, Mode II- und Mode III-Blocklast
$K_{\text{IC}}, K_{\text{IIC}}, K_{\text{IIIC}}$	Risszähigkeit für Mode I, Mode II und Mode III
$K_{\text{I,m}}, K_{\text{II,m}}, K_{\text{III,m}}$	Mittelwert des Spannungsintensitätsfaktors für Mode I, Mode II und Mode III
$K_{\text{I,max}}, K_{\text{I,min}}$	maximaler und minimaler Spannungsintensitätsfaktor für Mode I
$K_{\text{I,max,zykl.}}, K_{\text{II,max,zykl.}}, K_{\text{III,max,zykl.}}$	max. Spannungsintensitätsfaktor der zyklischen Beanspruchungskomponente bei nicht-proportionalen Mixed-Mode-Beanspruchungen
$K_{\text{I}}^{\text{CP}}, K_{\text{II}}^{\text{CP}}$	kritischer Mode I- und Mode II-Spannungsintensitätsfaktor im Punkt P

$K_I^n$ , $K_{II}^n$ , $K_{III}^n$	normierter Spannungsintensitätsfaktor für Mode I, Mode II und Mode III
$K_{Bl,max}$ , $K_{Bl,min}$	maximaler u. minimaler Spannungsintensitätsfaktor der Grundbelastung
$K_{block}$	maximaler Spannungsintensitätsfaktor der Blocklast
$K_C$	kritischer Spannungsintensitätsfaktor
$K_{max}$ , $K_{min}$	maximaler bzw. minimaler Spannungsintensitätsfaktor
$K_V$	Vergleichsspannungsintensitätsfaktor
$K_{VI,II}$	Vergleichsspannungsintensitätsfaktor für ebene Mixed-Mode
$K_{VI,II,III}$	Vergleichsspannungsintensitätsfaktor für räumliche Mixed-Mode
$K_{V,block}$	maximaler Spannungsintensitätsfaktor der Mixed-Mode-Blocklast
$K_{V,max}$ , $K_{V,min}$	maximaler bzw. minimaler Vergleichsspannungsintensitätsfaktor
$\Delta K$	zyklischer Spannungsintensitätsfaktor
$\Delta K_I$ , $\Delta K_{II}$ , $\Delta K_{III}$	zyklischer Spannungsintensitätsfaktor für Mode I, Mode II und Mode III
$\Delta K_{I,0}$	initialer zyklischer Spannungsintensitätsfaktor für Mode I
$\Delta K_{I,Bl}$ , $\Delta K_{II,Bl}$ , $\Delta K_{III,Bl}$	zyklischer Spannungsintensitätsfaktor für ein Mode I-, Mode II- und Mode III-Grundlastniveau
$\Delta K_{I,Bw}$ , $\Delta K_{II,Bw}$	zyklischer Spannungsintensitätsfaktor für Mode I und Mode II bei Belastungswechsel bzw. Belastungsänderung
$\Delta K_{IC}$	kritischer zyklischer Spannungsintensitätsfaktor für Mode I
$\Delta K_{I,th}$ , $\Delta K_{II,th}$ , $\Delta K_{III,th}$	Schwellenwert für Mode I, Mode II und Mode III
$\Delta K_{Bl}$	zyklischer Spannungsintensitätsfaktor der Grundbelastung
$\Delta K_{th}$	Schwellenwert gegen Ermüdungsrissausbreitung
$\Delta K_V$	zyklischer Vergleichsspannungsintensitätsfaktor
$\Delta K_{V,0}$	initialer zyklischer Vergleichsspannungsintensitätsfaktor
$\Delta K_{V,zul}$	zulässiger zyklischer Vergleichsspannungsintensitätsfaktor
$M_T$	Torsionsmoment
$N$	Schwingspielzahl
$N_{block}$	Blockschwingspielzahl
$N_C$	Schwingspielzahl der Restlebensdauer bis zum Bauteilversagen
$N_{CA}$	Vergleichsschwingspielzahl bei konstanter Belastung
$N_D$	Verzögerungsschwingspielzahl
$N_{DI}$	korrigierte Verzögerungsschwingspielzahl
$N_R$	Schwingspielzahl nach einer Belastungsrichtungsänderung

$\Delta N$	inkrementelle Schwingpielzahl
$\Delta N_{\text{St}}$	Schwingpielzahl je Stufe beim Laststeigerungsversuch
$R$	Verhältnis von minimaler zu maximaler Beanspruchungskenngröße
$R_{\text{block}}$	Blocklastverhältnis
$R_e$	Streckgrenze
$R_m$	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	0,2 %-Dehngrenze
$R_{V,\text{block}}$	Blocklastverhältnis bei Mixed-Mode-Blocklasten
$U$	elektrische Potentialdifferenz
$U_0$ bzw. $U_{\text{ref}}$	elektrische Referenzpotentialdifferenz
$U/U_0$ bzw. $U/U_{\text{ref}}$	Potentialdifferenzenverhältnis zur Risslängenberechnung
$Y_I$ , $Y_{II}$ , $Y_{III}$	Geometriefaktoren, normierte Spannungsintensitätsfaktoren für Mode I, Mode II und Mode III
$a$	Halbachse einer Ellipse
$a, c$	Risslänge
$a_A$	Anrisslänge nach einer Druckschwellbelastung
$a_C$	kritische Risslänge
$a_{\text{pl,ESZ}}$	plastische Risslängenkorrektur für einen ebenen Spannungszustand
$a_{\text{ref}}$	Referenzrisslänge
$a_0$	Initialrisslänge
$\Delta a$	inkrementeller Rissfortschritt
$\Delta a_{\text{block}}$	Blockrisslängeninkrement
$\Delta a_{\text{CA}}$	Vergleichsrisslängeninkrement
$\Delta a_{\text{DI}}$	Verzögerungsrisslängeninkrement
$\Delta a_{\text{inf,D}}$	durch Verzögerung beeinflusstes Risslängeninkrement
$b$	Halbachse einer Ellipse
$c$	Facettenabstand
$d$	Projektion der Facettenlänge auf die Mittelebene des Ausgangsrisses
$da$	Risslängenänderung
$da/dN$	Rissgeschwindigkeit bzw. Rissfortschrittsrate

$dN$	Änderung der Schwingpielzahl
$e$	Breite des Überbrückungsbereichs von $f_{\text{st}}$ -Facetten
$f_{\text{fa}}$	Bezeichnung für abfallende Facetten
$f_{ij}^{\text{I}}, f_{ij}^{\text{II}}, f_{ij}^{\text{III}}$	dimensionslose Funktionen
$f_{\text{st}}$	Bezeichnung für aufsteigende Facetten
$l$	Probenlänge
$n$	natürliche Zahl
$r, \varphi$	Polarkoordinaten
$t$	Zeit, Probendicke
$u, v, w$	materialabhängige Exponenten
$w$	Probenbreite
$x, y, z$	kartesische Koordinaten

### b) Griechisch

$\Phi_{\text{I}}, \Phi_{\text{II}}, \Phi_{\text{III}}$	Phasenwinkel für Mode I, Mode II und Mode III
--	---

$\alpha$	Lasteinleitungswinkel beim CTSR-Konzept
$\alpha_1, \alpha_2$	Werkstoffparameter, die das Verhältnis der Risszähigkeiten beschreiben
$\beta$	Lasteinleitungswinkel beim CTSR-Konzept
$\gamma$	Lasteinleitungswinkel beim CTMM-Konzept
$\nu$	Querdehnzahl des Materials
$\rho$	Kerbradius
$\sigma$	Normalspannung
$\sigma_{\text{I}}$	größte Hauptnormalspannung
$\sigma'_{\text{I}}$	spezielle größte Hauptnormalspannung
$\sigma_{\text{a}}$	Spannungsamplitude bzw. Spannungsausschlag
$\sigma_{\text{a,zul}}$	zulässige Spannungsamplitude
$\sigma_{\text{F}}$	Fließspannung des Materials
$\sigma_{\text{max}}, \sigma_{\text{min}}$	maximale bzw. minimale Normalspannung
$\sigma_{\text{r}}, \sigma_{\varphi}, \sigma_z$	Normalspannungen in Zylinderkoordinaten
$\sigma_{\text{V}}$	Vergleichsspannung

$\sigma_{V,a}$	Vergleichsspannungsspannungsamplitude
$\sigma_{V,zul}$	zulässige Vergleichsspannung
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	Normalspannungen in kartesischen Koordinaten
$\Delta\sigma$	Schwingbreite der Normalspannung bzw. Spannungsschwingbreite
$\tau_H$	Hauptschubspannung
$\tau_{rp}, \tau_{rz}, \tau_{\varphi z}$	Schubspannungen in Zylinderkoordinaten
$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$	Schubspannungen in kartesischen Koordinaten
$\varphi$	Winkel
$\varphi_0$	Rissabknickwinkel
$\psi_F$	Facettenwinkel
$\psi_0$	Rissverdrehwinkel
$\omega$	Größe der plastischen Zone
$\omega_I, \omega_{II}, \omega_{III}$	Kreisfrequenz für Mode I-, Mode II- und Mode III-Beanspr.-Zeit-Fkt.
$\omega_{ESZ}$	Größe der plastischen Zone bei ebenem Spannungszustand

### c) Abkürzungen

AFM	All-Fracture-Mode
ASTM	American Society for Testing and Material
CTMM	Compact-Tension-Mixed-Mode
CTSR	Compact-Tension-Shear-Rotation
DIN	Deutsches Institut für Normung
ESZ	Ebener Spannungszustand
EVZ	Ebener Verzerrungszustand
FAM	Fachgruppe Angewandte Mechanik
FRANC	Fracture Analysis Code
GEH	Gestaltänderungsenergiehypothese nach VON MISES
LEBM	Linear-elastische Bruchmechanik
PMMA	Polymethylmethacrylat
SH	Schubspannungshypothese nach TRESCA

Alle weiteren verwendeten oder hiervon abweichenden Symbole und Bezeichnungen sind im Text erläutert.

## KURZFASSUNG

Während eines Produktlebens können vielfältige Belastungen am Bauteil auftreten. Unter Umständen können diese Belastungen die lokale Beanspruchungssituation an vorhandenen Defekten entscheidend verändern und dadurch maßgeblichen Einfluss auf die Bauteillebensdauer ausüben. Diese Dissertation befasst sich daher mit dem Thema des Ermüdungsrißwachstums hauptsächlich bei überlagerten Beanspruchungen, sogenannten Mixed-Mode-Beanspruchungen. Dabei konzentrieren sich die experimentellen Untersuchungen u. a. auf die bruchmechanische Kennwertermittlung bei 3D-Mixed-Mode sowie auf Auswirkungen bezüglich des Risswachstums und der Rissorientierung infolge Belastungsrichtungs- und Beanspruchungsniveauänderungen. Hierzu werden sowohl vorhandene als auch eigens entwickelte Proben- und Vorrichtungskonzepte vorgestellt und eingesetzt. Aufgrund der resultierenden Rissfrontsegmentierung, hervorgerufen durch eine vorhandene Mode III-Komponente bei der Mixed-Mode-Beanspruchung, widmet sich ein gesondertes Kapitel dieser Thematik. Des Weiteren wird ein in dieser Arbeit entwickeltes Vorrichtungskonzept gezeigt und verwendet, womit außerphasige Mixed-Mode-Beanspruchungen experimentell simuliert werden. Die experimentell ermittelten Kennwerte bestätigen die prinzipiell konservative Vorhersage vorhandener Hypothesen, welche weiterhin angewandt werden können. Abschließend lässt sich sagen, dass Belastungsrichtungs- und Beanspruchungsniveauänderungen sowie außerphasige Mixed-Mode-Beanspruchungen das Risswachstum hinsichtlich dessen Fortschrittsrate und Orientierung beeinflussen.

## ABSTRACT

During the product life cycle variable loads can appear on a structure. In some circumstances these loads can crucially change the local stress situation on an existing failure and thereby significantly affect structure's durability. With respect to the fatigue crack growth, this thesis mainly focuses on fatigue crack growth under combined loading conditions, the so-called mixed-mode-loadings. In this context, experimental investigations are presented dealing with aspects regarding characteristic fracture mechanical values at 3D-mixed-mode and the effect of varying loading directions and loading levels on crack growth. These experiments are performed by using both available and specially developed concepts of specimens and loading devices. Due to the resultant crack front segmentation arisen from the presence of mode III in mixed-mode-loadings, a separate chapter is created to deal with this issue explicitly. Furthermore, a loading device concept, that is developed within this thesis, enabling experimental crack growth simulations at different out-of-phase mixed-mode-loading conditions, is comprehensively illustrated and accordingly applied. Based on characteristic values identified, the experimental researches confirm, that existing criteria are conservative and can continue to be applied. As a final conclusion, the variation in loading directions and loading levels, as well as the out-of-phase mixed-mode-loadings, influence the crack's growth rate and its orientation.

