

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 Ermüdungsris- swachstum 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 – Ermüdungsrisssausbreitung – Schwellenwerte – Belastungsrichtungs-änderung – Beanspruchungsniveaüänderung – Facettenbildung – Nicht-proportionale Bean-spruchung

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 Bauteillebensdauer ausüben können. Diese Dissertation befasst sich daher mit dem Thema des Ermüdungsrissswachstums 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 Beanspruchungsniveaüänderungen. Weitere Untersuchungs-gegenstände dieser Arbeit sind die Facettenbildung bei Mode I-Mode III-Beanspruchungsüber-lagerungen sowie nicht-proportionale Mixed-Mode-Beanspruchungen. Die Untersuchungen zeigen, dass Belastungsrichtungs- und Beanspruchungsniveaüänderungen 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 Reschetnik, 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

Verzeichnis der verwendeten Symbole und Abkürzungen.....	VIII
Kurzfassung	XIII
1 Einleitung und Zielsetzung.....	1
1.1 Historie	1
1.2 Herausforderungen bei der Bewertung des Risswachstums	2
2 Bruchmechanik bei komplexer Beanspruchung.....	5
2.1 Kraftflussstörung 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 Spannungsintensitätsfaktoren 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
3 Kriterien bei 3D-Mixed-Mode-Beanspruchung.....	32
3.1 3D-Kriterium nach RICHARD	32
3.2 Rissausbreitungskriterium nach POOK	33
3.3 σ_I^I -Kriterium nach SCHÖLLMANN et al.	34

3.4	Gegenüberstellung der Kriterien	36
3.5	Bruchmechanische Bewertung bei allgemeiner zyklischer Mixed-Mode-Beanspruchung.....	39
4	Proben und Vorrichtungen für Risswachstumsuntersuchungen bei Mixed-Mode-Beanspruchungen.....	41
4.1	CTSR-Probe und Vorrichtung	41
4.1.1	Realisierung von beliebigen 3D-Mixed-Mode-Zuständen	44
4.1.2	Experimentelle Voruntersuchungen	46
4.2	CTMM-Probe und Vorrichtung.....	48
4.2.1	Konzeptdarstellung und -beschreibung	48
4.2.2	Ermittlung der Geometriefaktorfunktionen	50
4.2.3	Experimentelle Voruntersuchungen	53
5	Experimentelle Untersuchungen des Ermüdungsrisssverhaltens bei Mixed-Mode-Beanspruchung.....	56
5.1	Versuchswerkstoffe.....	56
5.1.1	Aluminiumlegierung EN AW-7075-T651	56
5.1.2	Vergütungsstahl 34CrNiMo6	57
5.2	Schwellenwertermittlung bei räumlicher Mixed-Mode-Beanspruchung.....	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	Risswachstum bei Belastungsrichtungsänderungen.....	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	Risswachstum bei Beanspruchungsniveauänderungen.....	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	Rissfrontsegmentierung bei Mode I-Mode III-Beanspruchungen	85
5.5.1	Definition charakteristischer Größen	85
5.5.2	Facettenquantifizierung	86
5.6	Einfluss des R -Verhältnisses auf das Rissabknickverhalten bei ebener Mixed-Mode-Beanspruchung.....	90

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

VERZEICHNIS DER VERWENDETEN 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
ΔF	Schwingbreite der Kraft
ΔF_{St}	Zunahme der maximalen Kraft je Stufe im Laststeigerungsversuch
ΔF_0	initiale Schwingbreite der Kraft
G	Gewichtskraft
G_I, G_{II}, G_{III}	Energiefreisetzungsrates für Mode I, Mode II und Mode III
I_0	konstanter elektrischer Strom
K	Spannungsintensitätsfaktor
K_I, K_{II}, K_{III}	Spannungsintensitätsfaktor für Mode I, Mode II und Mode III
$K_I(t), K_{II}(t), K_{III}(t)$	zeitabhängiger Spannungsintensitätsfaktor für Mode I, Mode II und Mode III
$K_{I,a}, K_{II,a}, K_{III,a}$	Spannungsintensitätsamplitude für Mode I, Mode II und Mode III
$K_{I,\text{block}}, K_{II,\text{block}}, K_{III,\text{block}}$	maximaler Spannungsintensitätsfaktor der Mode I-, Mode II- und Mode III-Blocklast
$K_{IC}, K_{IIC}, K_{IIIC}$	Risszähigkeit für Mode I, Mode II und Mode III
$K_{I,m}, K_{II,m}, K_{III,m}$	Mittelwert des Spannungsintensitätsfaktors für Mode I, Mode II und Mode III
$K_{I,\max}, K_{I,\min}$	maximaler und minimaler Spannungsintensitätsfaktor für Mode I
$K_{I,\max,\text{zykl}}, K_{II,\max,\text{zykl}}, K_{III,\max,\text{zykl}}$	max. Spannungsintensitätsfaktor der zyklischen Beanspruchungskomponente bei nicht-proportionalen Mixed-Mode-Beanspruchungen
$K_I^{\text{CP}}, K_{II}^{\text{CP}}$	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
ΔK	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
$\Delta K_{I,BI}, \Delta K_{II,BI}, \Delta K_{III,BI}$	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
ΔK_{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
ΔK_{BI}	zyklischer Spannungsintensitätsfaktor der Grundbelastung
ΔK_{th}	Schwellenwert gegen Ermüdungsrissausbreitung
ΔK_V	zyklischer Vergleichsspannungsintensitätsfaktor
$\Delta K_{V,0}$	initialer zyklischer Vergleichsspannungsintensitätsfaktor
$\Delta K_{V,zul}$	zulässiger zyklischer Vergleichsspannungsintensitätsfaktor
M_T	Torsionsmoment
N	Schwingenspielzahl
N_{block}	Blockschwingenspielzahl
N_C	Schwingenspielzahl der Restlebensdauer bis zum Bauteilversagen
N_{CA}	Vergleichsschwingenspielzahl bei konstanter Belastung
N_D	Verzögerungsschwingenspielzahl
N_{DI}	korrigierte Verzögerungsschwingenspielzahl
N_R	Schwingenspielzahl nach einer Belastungsrichtungsänderung

ΔN	inkrementelle Schwingenspielzahl
ΔN_{St}	Schwingenspielzahl je Stufe beim Laststeigerungsversuch
R	Verhältnis von minimaler zu maximaler Beanspruchungskenngröße
R_{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_{ref}	elektrische Referenzpotentialdifferenz
U/U_0 bzw. U/U_{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_{ref}	Referenzrisslänge
a_0	Initialrisslänge
Δa	inkrementeller Rissfortschritt
Δa_{block}	Blockrisslängeninkrement
Δa_{CA}	Vergleichsrisslängeninkrement
Δa_{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 Schwingenspielzahl
e	Breite des Überbrückungsbereichs von f_{st} -Facetten
f_{fa}	Bezeichnung für abfallende Facetten
$f_{ij}^I, f_{ij}^{II}, f_{ij}^{III}$	dimensionslose Funktionen
f_{st}	Bezeichnung für aufsteigende Facetten
l	Probenlänge
n	natürliche Zahl
r, φ	Polarkoordinaten
t	Zeit, Probendicke
u, v, w	materialabhängige Exponenten
w	Probenbreite
x, y, z	kartesische Koordinaten

b) Griechisch

$\Phi_I, \Phi_{II}, \Phi_{III}$	Phasenwinkel für Mode I, Mode II und Mode III
α	Lasteinleitungswinkel beim CTSR-Konzept
α_1, α_2	Werkstoffparameter, die das Verhältnis der Risszähigkeiten beschreiben
β	Lasteinleitungswinkel beim CTSR-Konzept
γ	Lasteinleitungswinkel beim CTMM-Konzept
ν	Querdehnzahl des Materials
ρ	Kerbradius
σ	Normalspannung
σ_1	größte Hauptnormalspannung
σ'_1	spezielle größte Hauptnormalspannung
σ_a	Spannungsamplitude bzw. Spannungsaussschlag
$\sigma_{a,zul}$	zulässige Spannungsamplitude
σ_F	Fließspannung des Materials
$\sigma_{max}, \sigma_{min}$	maximale bzw. minimale Normalspannung
$\sigma_r, \sigma_\varphi, \sigma_z$	Normalspannungen in Zylinderkoordinaten
σ_V	Vergleichsspannung

$\sigma_{V,a}$	Vergleichsspannungsamplitude
$\sigma_{V,zul}$	zulässige Vergleichsspannung
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	Normalspannungen in kartesischen Koordinaten
$\Delta\sigma$	Schwingbreite der Normalspannung bzw. Spannungsschwingbreite
τ_H	Hauptschubspannung
$\tau_{r\varphi}, \tau_{rz}, \tau_{\varphi z}$	Schubspannungen in Zylinderkoordinaten
$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$	Schubspannungen in kartesischen Koordinaten
φ	Winkel
φ_0	Rissabknickwinkel
ψ_F	Facettenwinkel
ψ_0	Rissverdrehwinkel
ω	Größe der plastischen Zone
$\omega_I, \omega_{II}, \omega_{III}$	Kreisfrequenz für Mode I-, Mode II- und Mode III-Beanspr.-Zeit-Fkt.
ω_{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 Ermüdungsrissswachstums 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.

