

Reihe 18

Mechanik/  
Bruchmechanik

Nr. 354

Dipl.-Ing. (FH) Stefan Keck,  
Zittau

## Rissverhalten von unidirektionalen Flachfaser-Epoxidharz- Verbunden infolge statischer Belastung



# Rissverhalten von unidirektionalen Flachsfaser-Epoxidharz-Verbunden infolge statischer Belastung

zur Erlangung des akademischen Grades  
DOKTOR DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)  
der Fakultät für Maschinenbau  
der Universität Paderborn

genehmigte  
DISSERTATION

von  
Dipl.-Ing. (FH) Stefan Keck M. A.  
aus Berlin

Tag des Kolloquiums: 20. August 2020  
Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. Hans Albert Richard  
Korreferenten: Prof. Dr. Maria Specovius-Neugebauer  
Prof. Dr.-Ing. Markus Fulland



# Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 18

Mechanik/  
Bruchmechanik

Dipl.-Ing. (FH) Stefan Keck,  
Zittau

Nr. 354

Rissverhalten von  
unidirektionalen  
Flachfaser-Epoxidharz-  
Verbunden infolge  
statischer Belastung

VDI verlag

Keck, Stefan

## **Rissverhalten von unidirektionalen Flachsfaser-Epoxidharz-Verbunden infolge statischer Belastung**

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 18 Nr. 354. Düsseldorf: VDI Verlag 2021.

124 Seiten, 71 Bilder, 26 Tabellen.

ISBN 978-3-18-335418-4, ISSN 0178-9457,

€ 48,00/VDI-Mitgliederpreis € 43,20.

**Für die Dokumentation:** Verbundwerkstoffe – Faserverbunde – Flachsfaser-Epoxidharz-Verbunde – Bruchmechanik – Rissausbreitung – Rissausbreitungsrichtung – Experimentelle Untersuchungen – Numerische Simulationen

Verbundwerkstoffe weisen ein anderes Rissverhalten als homogene und isotrope Materialien auf. In der vorliegenden Arbeit sind Flachsfaser-Epoxidharz-Verbunde, in denen die Fasern unidirektional orientiert sind, bruchmechanisch charakterisiert. Das Versagensverhalten und die Rissverläufe werden hinsichtlich verschiedener Konstellationen untersucht. Die Variation des Winkels zwischen Initialriss und Faserorientierung erfolgt hierbei in Kombination mit der Variation des Faservolumenanteils. Experimentelle Untersuchungen zeigen, dass sich Risse nicht ausschließlich beanspruchungsgesteuert ausbreiten, sondern Orientierung und Anzahl der Fasern eine Rolle spielen. Des Weiteren erfolgen numerische Simulationen für verschiedene Materialmodelle. Ein auf den experimentellen Daten basierendes Modell ermöglicht die Vorhersage der Rissausbreitungsrichtung in Abhängigkeit von dem Faserwinkel und dem Faservolumenanteil.

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

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter [www.dnb.de](http://www.dnb.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 [www.dnb.de](http://www.dnb.de).

Universität Paderborn

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2021

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 978-3-18-335418-4

# Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand mit Unterstützung eines Promotionsstipendiums der Hochschule Zittau/Görlitz.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Hans Albert Richard für das entgegengebrachte Vertrauen, die wertvollen Gespräche und die Übernahme des Referates.

Weiterhin danke ich Frau Prof. Dr. Maria Specovius-Neugebauer, Universität Kassel, für das gezeigte Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferates sowie den Herren Prof. Dr.-Ing. Volker Schöppner und Prof. Dr. rer. nat. Thomas Tröster für die Mitarbeit in der Promotionskommission.

Darüber hinaus gilt mein herzlicher Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Fulland für die Förderung, die unermüdliche Unterstützung, die Diskussionsbereitschaft und die Übernahme des Korreferates.

Ebenso möchte ich meinen Kolleginnen und Kollegen sowie Herrn Prof. Dr. rer. nat. Frank Pietschmann, Hochschule Zittau/Görlitz, für die Unterstützung und Diskussionen danken.

Ganz herzlich danken möchte ich meiner Familie für ihre Nachsicht, Geduld und uner-schöpfliche Unterstützung, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Zittau, im August 2020

Stefan Keck



# Inhaltsverzeichnis

<b>Notation</b>	<b>VII</b>
<b>Kurzfassung/Abstract</b>	<b>XIV</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Bruchmechanische Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1 Linear-elastische Bruchmechanik homogener und isotroper Materialien . . . . .	3
2.1.1 Spannungsverteilung an der Rissspitze . . . . .	3
2.1.2 Rissbeanspruchungsarten . . . . .	5
2.1.3 Rissverhalten infolge statischer Belastung . . . . .	6
2.1.4 Rissverhalten infolge zyklischer Belastung . . . . .	7
2.1.5 Weitere bruchmechanische Größen . . . . .	9
2.1.6 Bruchkriterien . . . . .	11
2.2 Linear-elastische Bruchmechanik inhomogener und anisotroper Materialien	15
2.2.1 Risse in anisotropen Körpern . . . . .	15
2.2.2 Bruchkriterien . . . . .	17
<b>3 Verbundwerkstoffe</b>	<b>21</b>
3.1 Definition, Einteilung und Beispiele . . . . .	21
3.2 Faserverbunde . . . . .	21
3.2.1 Verstärkungsfasern . . . . .	24
3.2.2 Naturfasern . . . . .	26
3.2.3 Polymere Matrixsysteme . . . . .	28
3.3 Faser-Kunststoff-Verbunde . . . . .	30
3.3.1 Herstellungsverfahren . . . . .	30
3.3.2 Einsatzbereiche und Anwendungsbeispiele . . . . .	31
3.3.3 Begriffe und Werkstoffgesetz . . . . .	32
3.3.4 Mechanische Eigenschaften . . . . .	37
3.3.5 Bruchmechanische Eigenschaften . . . . .	40
3.3.6 Versagensmechanismen . . . . .	46
<b>4 Experimentelle Untersuchungen</b>	<b>49</b>
4.1 Materialien und Proben . . . . .	49
4.1.1 Komponenten . . . . .	49
4.1.2 Herstellung und Präparation . . . . .	49
4.2 Versuche . . . . .	52
4.3 Ergebnisse . . . . .	53
4.3.1 Faservolumenanteile . . . . .	53
4.3.2 Zugelastizitätsmodul der Flachproben . . . . .	56

4.3.3	Maximalzugkräfte der Kompaktzugproben . . . . .	57
4.3.4	Einfluss der Faserorientierung und des Faservolumenanteils auf den Risspfad . . . . .	62
4.3.5	Einfluss der Faserorientierung und des Faservolumenanteils auf den Versagensmechanismus . . . . .	67
4.3.6	Schlussfolgerungen . . . . .	71
<b>5</b>	<b>Numerische Simulationen</b>	<b>73</b>
5.1	Ablauf . . . . .	73
5.2	Ermittlung bruchmechanischer Größen . . . . .	74
5.2.1	Rissschließungsintegral . . . . .	74
5.2.2	Programmsystem ADAPCRACK3D . . . . .	75
5.3	Anwendung auf Flachsfaser-Kunststoff-Verbunde . . . . .	79
5.3.1	Modellierung . . . . .	79
5.3.2	Materialparameter . . . . .	80
5.3.3	Belastungsparameter und Lagerung . . . . .	82
5.3.4	Ergebnisse . . . . .	83
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>91</b>

# Notation

## a) Lateinische Formelzeichen

$A_1, A_2$	Parameter im Bruchkriterium nach <i>Richard</i>
$A_f, A_m, A_v$	Querschnittsfläche der Faser, Matrix bzw. des Verbunds
$B_1, B_2, B_3, B_4$	Parameter im Bruchkriterium nach <i>Richard</i>
$C$	Integrationsweg
$C$	Steifigkeitsmatrix
$C_E$	Parameter im Rissfortschrittgesetz nach <i>Erdogan</i> und <i>Ratwani</i>
$C_P$	Parameter im Rissfortschrittgesetz nach <i>Paris</i>
$E$	Elastizitätsmodul, Zugelastizitätsmodul
$E'$	zustandsabhängiger Elastizitätsmodul, Elastizitätsmodul im Bruchkriterium nach <i>Hussain, Pu</i> und <i>Underwood</i>
$E_f, E_m$	Elastizitätsmodul der Faser bzw. Matrix
$E_{f\parallel}$	Elastizitätsmodul der Faser in Längsrichtung
$E_{\parallel}$	Elastizitätsmodul des Verbunds in Faserlängsrichtung
$E_{\perp}$	Elastizitätsmodul des Verbunds in Querrichtung
$E_x, E_y, E_z$	Elastizitätsmodul in Koordinatenrichtungen
$E_x^*, E_y^*, E_z^*$	Elastizitätsmodul im gedrehten Koordinatensystem
$F$	Kraft
$F_f, F_m$	Kraft in der Faser bzw. Matrix
$F_k$	Kraftkomponente am Knotenpunkt
$F_{\max}$	Maximalzugkraft
$F_y$	Kraft in y-Richtung
$F_{\parallel}$	Kraft in Faserlängsrichtung
$G$	Energiefreisetzungsrate
$G_{xy}, G_{xz}, G_{yz}$	Schubmodul in Koordinatenrichtungen
$G_I, G_{II}, G_{III}$	Energiefreisetzungsrate für Mode I, II bzw. III
$G_{Ic}$	kritische Energiefreisetzungsrate, Materialgrenzwert
$G(\varphi)$	winkelabhängige Energiefreisetzungsrate
$\Delta G$	zyklische Energiefreisetzungsrate

$\Delta G_I, \Delta G_{II}$	zyklische Energiefreisetzungsrate für Mode I bzw. II
$J$	Wert des J-Integrals
$J_{Ic}$	kritischer Wert des J-Integrals
$J_c(\varphi)$	winkelabhängiger, kritischer Wert des J-Integrals im Bruchkriterium nach <i>Judt</i>
$J_R(\varphi)$	winkelabhängiger Wert des J-Integrals im Bruchkriterium nach <i>Judt</i>
$J_c^{PD}, J_c^{TD}$	kritischer Wert des J-Integrals in transversaler bzw. senkrechter Richtung
$J_1, J_2$	Wert des J-Integrals in x- bzw. y-Richtung
$K$	Spannungsintensitätsfaktor
$K_I, K_{II}, K_{III}$	Spannungsintensitätsfaktor für Mode I, II bzw. III
$K_{I,max}, K_{I,min}$	maximaler bzw. minimaler Spannungsintensitätsfaktor
$K_V$	Vergleichsspannungsintensitätsfaktor
$\bar{K}_I, \bar{K}_{II}$	Spannungsintensitätsfaktor für Mode I bzw. II im Bruchkriterium nach <i>Nuismer</i>
$K_{Ic}, K_{IIc}$	Risszähigkeit für Mode I bzw. II
$K_{I,II,c}$	Risszähigkeit für Mixed-Mode Beanspruchung (Mode I und II)
$K_{Ic}(\varphi)$	winkelabhängige Risszähigkeit für Mode I
$K_{Ic,M1}, K_{Ic,M2}$	Risszähigkeit des Materials 1 bzw. 2 im Bruchkriterium nach <i>Schramm</i> und <i>Richard</i>
$K_I^C(\varphi)$	winkelabhängiger, normierter Spannungsintensitätsfaktor im Bruchkriterium nach <i>Schramm</i> und <i>Richard</i>
$K_I^{C,TSSR}$	Minimalwert der normierten Spannungsintensitätsfaktoren im Bruchkriterium nach <i>Schramm</i> und <i>Richard</i>
$K_{Ic}^{PD}, K_{Ic}^{TD}$	Spannungsintensitätsfaktor in senkrechter bzw. transversaler Richtung im Bruchkriterium nach <i>Judt</i>
$\Delta K_I, \Delta K_{II}, \Delta K_{III}$	Zyklischer Spannungsintensitätsfaktor für Mode I, II bzw. III
$\Delta K_{Ic}$	zyklische Risszähigkeit für Mode I
$\Delta K_{I,th}$	Schwellenwert des Ermüdungsrisswachstums für Mode I
$\Delta K_V$	zyklischer Vergleichsspannungsintensitätsfaktor
$N$	Lastwechselzahl
$P$	Knotenpunkt
$R$	Spannungsverhältnis, R-Verhältnis
$R_f, R_m$	Festigkeit der Faser bzw. Matrix
$R_{f  }$	Zugfestigkeit der Faser in Längsrichtung

$S$	Rissoberflächenenergie
$S$	Energiedichtefaktor
$S$	Nachgiebigkeitsmatrix
$S_{\min}$	minimaler Energiedichtefaktor
$S_{\min,c}$	kritischer Energiedichtefaktor, Materialgrenzwert
$T$	Transformationsmatrix
$U$	elastische Energie, Formänderungsenergie
$\bar{U}$	elastische Energiedichte
$V$	Verhältnis von Mode I und II
$V_f, V_m, V_v$	Faser-, Matrix- bzw. Verbundvolumen
$W$	Arbeit der äußeren Kräfte
$W$	Rissschließungsenergie, Rissschließungsarbeit
$Y$	Geometriefaktor
$Y_I, Y_{II}, Y_{III}$	Geometriefaktoren für Mode I, II bzw. III
$a$	Risslänge
$\bar{a}$	Länge eines abgeknickten Risses
$a, b$	Längen der großen bzw. kleinen Halbachse einer Kerbe
$a_1, a_2$	untere bzw. obere Grenze der Risslängen
$a_1, a_2$	Parameter zur Modifikation des Grauwerts eines Bildpunkts
$a_{11}, a_{12}, a_{22}$	Funktionen im Bruchkriterium nach <i>Sh</i>
$a_{ij}$	elastische Konstanten
$\Delta a$	Rissinkrement
$b_{mn}$	Wert eines Bildpunkts des Binärbilds
$c_{ij}$	elastische Steifigkeiten
$d_f$	Faserdurchmesser
$da$	Rissfortschritt
$da$	inkrementelle Risslänge
$da/dN$	Rissgeschwindigkeit
$dc/dN$	Rissgeschwindigkeit
$ds$	Wegkoordinate
$dx$	Länge eines Teilstücks
$dN$	Lastwechseldifferenz
$dW$	Arbeitsanteil
$e$	Elementgröße

$f(g_{mn})$	Funktion zur Modifikation des Grauwerts eines Bildpunkts
$f_i(\alpha, \varphi), f_j(\alpha, \varphi)$	Ansatzfunktionen
$f_{b,k}(\varphi)$	Bereichsfunktion
$f_{ij}(\varphi)$	winkelabhängige Funktion für das Rissspitzen Spannungsfeld
$f_{ij}^I(\varphi), f_{ij}^{II}(\varphi), f_{ij}^{III}(\varphi)$	winkelabhängige Funktionen für das Rissspitzen Spannungsfeld für Mode I, II bzw. III
$g_{mn}$	Wert eines Bildpunkts des Grauwertbilds
$g_{mn}^*$	modifizierter Wert eines Bildpunkts des Grauwertbilds
$g_{th}$	Schwellenwert eines Bildpunkts, Grauwertschwelle
$l$	Länge, Ausgangslänge
$l_f$	Faserlänge
$\Delta l$	Längenänderung
$m$	Masse
$m$	Wicklungsanzahl
$m, n$	Zeile bzw. Spalte der Bildmatrix
$m_E$	Parameter im Rissfortschrittgesetz nach <i>Erdogan</i> und <i>Ratwani</i>
$m_P$	Parameter im Rissfortschrittgesetz nach <i>Paris</i>
$r$	Polarcoordinate, Abstand zur Risspitze
$s$	Standardabweichung
$s_1, s_2, s_3, s_4$	komplexe Konstanten
$t$	Dicke, Probendicke
$t$	Zeit
$t_k$	Elementlänge
$\Delta t_k$	Elementlänge
$u, v, w$	Verschiebung in y-, x- bzw. z-Richtung
$\vec{u}$	Verschiebungsvektor
$\Delta u$	Rissuferverschiebung
$v$	Prüfgeschwindigkeit
$w$	spezifische Probenbreite
$x, y, z$	kartesische Koordinaten
$x^*, y^*$	kartesische Koordinaten des Materialkoordinatensystems

## b) Griechische Symbole

$\Pi$  potenzielle Energie

$\Psi$	Fasermasseanteil
$\alpha$	Faserwinkel, Winkel zwischen Initialriss und Faser
$\alpha_1, \alpha_2$	Parameter zur Krümmungsanpassung der Regressionsfunktion
$\alpha_1, \alpha_2$	Werkstoffparameter im Bruchkriterium nach <i>Richard</i>
$\beta$	Abknickwinkel, Winkel zwischen Initialriss und Risspfadende
$\beta_1$	Abknickwinkel, Winkel zwischen Initialriss und Risspfadbeginn
$\beta(\alpha, \varphi)$	Regressionsfunktion des Rissabknickwinkels
$\gamma$	Winkel im Bruchkriterium nach <i>Judt</i>
$\gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$	Gleitungen in kartesischen Koordinaten
$\delta_{\text{rms}}$	mittlerer quadratischer Fehler
$\varepsilon$	Abweichung
$\varepsilon_f, \varepsilon_m$	Bruchdehnung der Faser bzw. Matrix
$\varepsilon_{f\parallel}$	Bruchdehnung der Faser in Längsrichtung
$\varepsilon_{\parallel}$	Bruchdehnung des Verbunds in Faserlängsrichtung
$\varepsilon_{ij}$	Dehnungstensor
$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$	Dehnungen in kartesischen Koordinaten
$\lambda_0$	Exponentialkoeffizient
$\lambda_i, \lambda_j$	Regressionskoeffizient
$\mu$	Schubmodul
$\nu$	Querkontraktionszahl
$\nu_{xy}, \nu_{xz}, \nu_{yz}$	Querkontraktionszahlen in Koordinatenrichtungen
$\rho$	Krümmungsradius der Kerbe
$\rho_f, \rho_m$	Dichte der Faser bzw. Matrix
$\sigma$	Normalspannung, statische Spannung, äußere Bauteilbelastung
$\sigma_{ij}$	Spannungsfunktion
$\sigma_{ij}$	Spannungstensor
$\sigma_c$	Materialkennwert
$\sigma_f, \sigma_m$	Spannung in der Faser bzw. Matrix
$\sigma_{\text{max}}, \sigma_{\text{min}}$	maximale bzw. minimale Spannung
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	Spannungen in kartesischen Koordinaten
$\sigma_y^\infty$	äußere Belastung
$\sigma_r, \sigma_\varphi$	Spannungen in Polarkoordinaten
$\sigma_{\varphi\text{max}}$	maximale Tangentialspannung

$\sigma'_1$	Hauptnormalspannung des $\sigma'_1$ -Kriteriums
$\sigma_{\parallel}$	Spannung in Faserlängsrichtung
$\Delta\sigma$	Schwingbreite der Spannung bei zyklischer Belastung
$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$	Schubspannungen in kartesischen Koordinaten
$\tau_{yx}^{\infty}, \tau_{yz}^{\infty}$	äußere Belastung
$\tau_{r\varphi}, \tau_{\varphi z}$	Schubspannung in Polarkoordinaten
$\varphi$	Polarkoordinate, Winkel
$\varphi$	Faservolumenanteil
$\varphi^*$	Winkel im Bruchkriterium nach <i>Judt</i>
$\varphi_0$	Abknickwinkel
$\varphi_0$	Abknickwinkel im Bruchkriterium nach <i>Richard</i>
$\varphi_{0,MTS}$	Abknickwinkel im Bruchkriterium nach <i>Erdogan</i> und <i>Sih</i>
$\varphi_{th}$	Schwellenwert zur Bereichsabgrenzung
$\varphi_k$	Parameter der Bereichsfunktion
$\varphi_M$	Gradierungswinkel im Bruchkriterium nach <i>Schramm</i> und <i>Richard</i>
$\varphi_{TSSR}$	Abknickwinkel im Bruchkriterium nach <i>Schramm</i> und <i>Richard</i>
$\varphi_c$	Abknickwinkel im Bruchkriterium nach <i>Judt</i>
$\chi$	Verhältnis der richtungsabhängigen Risszähigkeiten im Bruchkriterium nach <i>Judt</i>
$\psi_0$	Verdrehwinkel

### c) Sonstige Abkürzungen und Symbole

BR	Butadien-Kautschuk (engl. butadiene rubber)
CAD	rechnerunterstützte Konstruktion (engl. computer-aided design)
CLT	Klassische Laminattheorie (engl. classical laminate theory)
CT	Kompaktzugprobe (engl. compact tension specimen)
EP	Epoxidharz
ESZ	ebener Spannungszustand
EVZ	ebener Verzerrungszustand
FE	Finite-Elemente
FEM	Finite-Elemente-Methode
HM	hoher Elastizitätsmodul (engl. high modulus)
HT	hohe Festigkeit (engl. high tenacity)

LM	Lichtmikroskop
M1, M2	Material 1 bzw. 2 im Bruchkriterium nach <i>Schramm</i> und <i>Richard</i>
MTS	maximale Tangentialspannung
MVCCI	modifizierte Rissschließungsintegralmethode (engl. modified virtual crack closure integral)
NR	Naturkautschuk (engl. natural rubber)
PA	Polyamid
PET	Polyethylenterephthalat
PD	Vorzugsrichtung (engl. predominant direction)
PF	Phenolharz
PP	Polypropylen
PPS	Polyphenylensulfid
REM	Rasterelektronenmikroskop
SS	Strahldurchmesser (engl. spot size)
SiC	Siliziumcarbid
TD	Querrichtung (engl. transverse direction)
TSSR	Kriterium der Tangentialspannung für gradierte Materialien nach <i>Schramm</i> und <i>Richard</i>
VE	Vinylesterharz
f	Faser
m	Matrix
	Längsrichtung

Weitere oder abweichende Formelzeichen und Symbole sind im Text beschrieben.

# Kurzfassung

Faserverstärkte Kunststoffe weisen aufgrund ihrer Zusammensetzung ein besonderes Eigenschaftsprofil auf, wobei insbesondere die dichtebezogenen Kennwerte ein Kriterium bei der Werkstoffwahl sind. Eine Vielzahl von Verstärkungsfasern hat dabei anisotrope Eigenschaften. Diese Dissertation behandelt die bruchmechanische Charakterisierung von Flachsfaser-Epoxidharz-Verbunden infolge statischer Belastung. Die Flachsgarne sind im Verbund unidirektional orientiert. Nach den Grundlagen zur linear-elastischen Bruchmechanik und zu Verbundwerkstoffen folgen die Beschreibung der experimentellen Untersuchungen und die Auswertung der Ergebnisse. Dabei werden insbesondere die Risspfade der Kompaktzugproben analysiert. Durch Variation des Winkels zwischen Faserorientierung und Belastungsrichtung (von  $0^\circ$  bis  $90^\circ$  mit einer Schrittweite von  $22,5^\circ$ ) in Kombination mit Faservolumenanteilen zwischen etwa 2 und 13 % ergeben sich unterschiedliche Risspfade. Die Rissausbreitungsrichtung wird neben der Belastungsrichtung gravierend von der Orientierung und Anzahl der Verstärkungsfasern beeinflusst. Des Weiteren erfolgen numerische Simulationen für homogene und inhomogene Materialmodelle. Ein auf den experimentellen Daten basierendes mathematisches Modell ermöglicht die Vorhersage der Rissabknickwinkel in Abhängigkeit von dem Faserwinkel und dem Faservolumenanteil.

# Abstract

Due to their composition, fibre-reinforced composites exhibit special characteristics. Density-related properties, in particular, are an important consideration when selecting a suitable material. Furthermore, a multitude of reinforcements are highly anisotropic. This doctoral thesis deals with the fracture mechanics of flax fibre-reinforced epoxy composites under static loading. The fibres used are flax yarns in unidirectional alignment. A review of the fundamentals of linear elastic fracture mechanics and composites is followed by the description of the experiments and the analysis of the findings. Special emphasis is placed on the crack paths occurring in the compact tension specimens. By varying the angle between fibre orientation and loading direction (from  $0^\circ$  up to  $90^\circ$  with an increment of  $22.5^\circ$ ) in conjunction with fibre volume fractions of between 2% and 13% approximately, the resulting crack paths are shown to be dependent on those two parameters. Not only are the crack paths governed by the loading direction, but they are also affected by the orientation and the amount of fibres. Numerical simulations are performed using homogeneous and heterogeneous models. Finally, a mathematical model based on the experimental data is presented. It can be used to predict crack kinking angles as a function of fibre angle and fibre volume fraction.