

Fortschritt-Berichte VDI

VDI

Reihe 18

Mechanik/
Bruchmechanik

Nr. 354

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

Rissverhalten von unidirektionalen Flachsfaserverbunden infolge statischer Belastung



Rissverhalten von unidirektionalen Flachsfaserver-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
Flachsfaserverbund-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 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.

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 unerschöpfliche Unterstützung, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Zittau, im August 2020

Stefan Keck

Inhaltsverzeichnis

Notation	VII
Kurzfassung/Abstract	XIV
1 Einleitung	1
2 Bruchmechanische Grundlagen	3
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
3 Verbundwerkstoffe	21
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
4 Experimentelle Untersuchungen	49
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 Zugelastizitätsmoduln 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
5	Numerische Simulationen	73
5.1	Ablauf	73
5.2	Ermittlung bruchmechanischer Größen	74
5.2.1	Risschließungsintegral	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
Literaturverzeichnis		91

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</i> , <i>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	Elastizitätsmoduln in Koordinatenrichtungen
E_x^*, E_y^*, E_z^*	Elastizitätsmoduln 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	Energiefreisetzungsrates
G_{xy}, G_{xz}, G_{yz}	Schubmodul in Koordinatenrichtungen
G_I, G_{II}, G_{III}	Energiefreisetzungsrates für Mode I, II bzw. III
G_{lc}	kritische Energiefreisetzungsrates, Materialgrenzwert
$G(\varphi)$	winkelabhängige Energiefreisetzungsrates
ΔG	zyklische Energiefreisetzungsrates

$\Delta G_I, \Delta G_{II}$	zyklische Energiefreisetzungsrates 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
$\overline{K}_I, \overline{K}_{II}$	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
ΔK_{Ic}	zyklische Risszähigkeit für Mode I
$\Delta K_{I,th}$	Schwellenwert des Ermüdungsrisswachstums für Mode I
ΔK_V	zyklischer Vergleichsspannungsintensitätsfaktor
N	Lastwechselzahl
P	Knotenpunkt
R	Spannungsverhältnis, R-Verhältnis
R_f, R_m	Festigkeit der Faser bzw. Matrix
$R_{f\parallel}$	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	Risschließungsenergie, Risschließungsarbeit
Y	Geometriefaktor
Y_I, Y_{II}, Y_{III}	Geometriefaktoren für Mode I, II bzw. III
a	Risslänge
\bar{a}	Länge eines abgeknickten Risses
a_1, a_2	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>Shih</i>
a_{ij}	elastische Konstanten
Δa	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 Riss spitzen spannungsfeld
$f_{ij}^I(\varphi), f_{ij}^{II}(\varphi), f_{ij}^{III}(\varphi)$	winkelabhängige Funktionen für das Riss spitzen 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
Δl	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	Polarkoordinate, Abstand zur Riss spitze
s	Standardabweichung
s_1, s_2, s_3, s_4	komplexe Konstanten
t	Dicke, Probendicke
t	Zeit
t_k	Elementlänge
Δt_k	Elementlänge
u, v, w	Verschiebung in y-, x- bzw. z-Richtung
\vec{u}	Verschiebungsvektor
Δu	Rissuferverschiebung
v	Prüfgeschwindigkeit
w	spezifische Probenbreite
x, y, z	kartesische Koordinaten
x^*, y^*	kartesische Koordinaten des Materialkoordinatensystems

b) Griechische Symbole

Π	potenzielle Energie
-------	---------------------

Ψ	Fasermasseanteil
α	Faserwinkel, Winkel zwischen Initialriss und Faser
α_1, α_2	Parameter zur Krümmungsanpassung der Regressionsfunktion
α_1, α_2	Werkstoffparameter im Bruchkriterium nach <i>Richard</i>
β	Abknickwinkel, Winkel zwischen Initialriss und Risspfadende
β_1	Abknickwinkel, Winkel zwischen Initialriss und Risspfadbeginn
$\beta(\alpha, \varphi)$	Regressionsfunktion des Rissabknickwinkels
γ	Winkel im Bruchkriterium nach <i>Judt</i>
$\gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$	Gleitungen in kartesischen Koordinaten
δ_{rms}	mittlerer quadratischer Fehler
ε	Abweichung
$\varepsilon_f, \varepsilon_m$	Bruchdehnung der Faser bzw. Matrix
$\varepsilon_{f\parallel}$	Bruchdehnung der Faser in Längsrichtung
ε_{\parallel}	Bruchdehnung des Verbunds in Faserlängsrichtung
ε_{ij}	Dehnungstensor
$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$	Dehnungen in kartesischen Koordinaten
λ_0	Exponentialkoeffizient
λ_i, λ_j	Regressionskoeffizient
μ	Schubmodul
ν	Querkontraktionszahl
$\nu_{xy}, \nu_{xz}, \nu_{yz}$	Querkontraktionszahlen in Koordinatenrichtungen
ρ	Krümmungsradius der Kerbe
ρ_f, ρ_m	Dichte der Faser bzw. Matrix
σ	Normalspannung, statische Spannung, äußere Bauteilbelastung
σ_{ij}	Spannungsfunktion
σ_{ij}	Spannungstensor
σ_c	Materialkennwert
σ_f, σ_m	Spannung in der Faser bzw. Matrix
$\sigma_{\max}, \sigma_{\min}$	maximale bzw. minimale Spannung
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	Spannungen in kartesischen Koordinaten
σ_y^{∞}	äußere Belastung
$\sigma_r, \sigma_{\varphi}$	Spannungen in Polarkoordinaten
$\sigma_{\varphi\max}$	maximale Tangentialspannung

σ'_1	Hauptnormalspannung des σ'_1 -Kriteriums
σ_{\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
φ	Polarkoordinate, Winkel
φ	Faservolumenanteil
φ^*	Winkel im Bruchkriterium nach <i>Judt</i>
φ_0	Abknickwinkel
φ_0	Abknickwinkel im Bruchkriterium nach <i>Richard</i>
$\varphi_{0,MTS}$	Abknickwinkel im Bruchkriterium nach <i>Erdogan</i> und <i>Sih</i>
φ_{th}	Schwellenwert zur Bereichsabgrenzung
φ_k	Parameter der Bereichsfunktion
φ_M	Gradierungswinkel im Bruchkriterium nach <i>Schramm</i> und <i>Richard</i>
φ_{TSSR}	Abknickwinkel im Bruchkriterium nach <i>Schramm</i> und <i>Richard</i>
φ_c	Abknickwinkel im Bruchkriterium nach <i>Judt</i>
χ	Verhältnis der richtungsabhängigen Risszähigkeiten im Bruchkriterium nach <i>Judt</i>
ψ_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 Risschließungsintegralmethode (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 Flachsfaserverstärkten 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° bis 90° 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° up to 90° with an increment of 22.5°) 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.