A Multiscale Finite Element Model for Damage Simulations in Fiber-Reinforced Composites

Vom Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Jan Grischa Maaß

aus Weilrod

Erstreferent:	Prof. Dr.-Ing. habil. F. Gruttmann
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. habil. D. Gross
Tag der Einreichung:	16.08.2016
Tag der mündlichen Prüfung:	20.10.2016

Darmstadt 2016
D42

Maaß, Jan Grischa
A Multiscale Finite Element Model for Damage Simulations in Fiber-Reinforced Composites
Forschungsberichte des Instituts für Mechanik der Technischen Universität Darmstadt
Band 42

Herausgeber der Reihe:
Studienbereich Mechanik, Technische Universität Darmstadt

Verlag:
Studienbereich Mechanik, Technische Universität Darmstadt
Franziska-Braun-Straße 7, 64287 Darmstadt

Druckerzeugung:
Lasertype GmbH, Darmstadt

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

ISBN 978-3-935868-42-6

Acknowledgement

This thesis is a result of my research occupation at the chair of Solid Mechanics, Technische Universität Darmstadt. At this point I would like to thank everyone who has contributed towards finishing my thesis.
Firstly, I would like to express my sincere gratitude to my advisor Professor Dr.-Ing. Friedrich Gruttmann for the continuous support of my studies and related research, for his professional guidance, supervising and for giving me the opportunity to work in such a friendly working environment. Furthermore, I thank Professor Dr.-Ing. Dietmar Gross for his interest in co-supervising this thesis and for his helpful suggestions.
Additionally, I want to use this opportunity to thank all my colleagues for the scientific discussions and after work activities. I especially thank Florian Niederhöfer, Dominik Heller and Simon Klarmann for their support to finish this work.
Particulary I would like to extend my thanks to my parents, my sister and my girlfriend Karina, who always supported me in all my decisions and stages of life.

Contents

Nomenclature

Abbreviations and names

0	Zero (can be vector- or tensor-valued)
BVP	Boundary-value problem
CDM	Continuum damage mechanics
CFRP	Carbon-fiber-reinforced polymer
DOF	Degree of freedom
EMOC	Enhanced method of cells
FE2, FE^2	Multi-scale finite element model
FEAP	Research FEM code [74]
FEM	Finite element method
FF	Fiber failure
FM	Fiber mode
FMC	Failure mode concept
FRP	Fiber-reinforced plastics
GFRP	Glass-fiber-reinforced polymers
GMC	Generalized method of cells
HFGMC	High fidelity generalized method of cells
IFF	Inter fiber failure
IMPL-EX	Implicit-explicit integration scheme
MM	Multiscale method
MOC	Method of cells
RVE	Representative volume element
WWFE	World wide failure exercise

Greek letters

α, β	Indexes 1, 2
$\boldsymbol{\gamma}$	Euler-Almansi strain tensor
Γ	Boundary of a domain Ω
δ_{eq}	Equivalent displacement
δ	Variational operator

δ_{ij}	Kronecker symbol
ε	Longitudinal strain (1d)
$\tilde{\varepsilon}$	Effective longitudinal strain (1d)
$\boldsymbol{\varepsilon}$	Linearized strain tensor
$\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}$	Effective linearized strain tensor
λ	Load factor
ξ, η	Isoparametric coordinates
Π	Potential energy
Π_{ext}	External potential energy
Π_{int}	Internal potential energy
ρ	Mass density in current configuration
ρ_0	Mass density in reference configuration
σ	Normal stress (1d)
σ_{eq}	Equivalent stress
$\boldsymbol{\sigma}_i$	Vector of stresses in integration point i
$\boldsymbol{\sigma}$	Linearized stress tensor
$\tilde{\boldsymbol{\sigma}}$	Effective linearized stress tensor
$\tilde{\sigma}$	Effective normal stress (1d)
$\boldsymbol{\tau}$	Kirchhoff stress tensor
φ_t	Mapping from reference to current configuration
φ_t^{-1}	Mapping from current to reference configuration
$\hat{\varphi}$	Mapping from reference to current configuration
$\hat{\varphi}^{-1}$	Mapping from current to reference configuration
Ψ	Helmholtz free energy
Ω	Spatial domain
$\partial\Omega$	Boundary of a domain Ω

Roman letters

$\mathbf{A}$	Assembly matrix
$\tilde{\mathbf{A}}$	Effective area element
$\mathcal{B}$	Domain of a continuum body in Euclidean space
$\mathcal{B}_0$	Domain of a continuum body in the reference configuration
$\mathcal{B}_i$	Domain of a local continuum body in Euclidean space
$\mathcal{B}_t$	Domain of a continuum body in the current configuration
$\partial\mathcal{B}$	Boundary of a continuum body in Euclidean space
$\partial\mathcal{B}_0$	Boundary of a continuum body in the reference configuration
$\partial\mathcal{B}_i$	Boundary of a local continuum body
$\partial\mathcal{B}_t$	Boundary of a continuum body in the current configuration

$\mathbf{b}$	left Cauchy-Green tensor
$\mathbf{b}_0$	Outer volume force or body force
C^n	Space of n-times continuously differentiable functions
$\mathbb{C}$	Elasticity tensor or elasticity matrix
$\mathbb{C}^{tan}$	Tangential material stiffness in nonlinear calculations
$\mathbb{C}$	Elasticity tensor or tangential material stiffness
$\mathbf{C}$	Right Cauchy-Green tensor
d	Damage variable in isotropic material
D_i	Damage variable in anisotropic material
$\mathrm{d}\mathbf{a}$	Area element in current configuration
$\mathrm{d}\mathbf{A}$	Area element in reference configuration
D	Gâteaux directional derivative
$\mathcal{D}_{int}$	Internal dissipation or entropy production
$\mathrm{d}v$	Infinitesimal volume in current configuration
$\mathrm{d}V$	Infinitesimal volume in reference configuration
$\mathrm{d}\mathbf{X}$	Line element in reference configuration
$\mathrm{d}\mathbf{x}$	Line element in current configuration
e_0	Internal mechanical energy per unit volume
$\mathbf{e}_i$	Orthonormal base system in Euclidean space
$\mathcal{E}$	Internal energy
$\mathbf{E}$	Green-Lagrange strain tensor
$\mathbf{f}_e^L$	Element residual vector in a local scale boundary value problem
$\mathbf{f}_0$	Resultant of outer forces
$\mathbf{F}_i^L$	Global residual vector in a local scale boundary value problem
$\mathbf{F}$	Deformation gradient
G	Shear modulus
G_c	Critical energy release rate
h	Height (length in z-direction)
$\mathbf{H}$	Displacement gradient
$\mathbb{H}$	Damage compliance matrix
i, j	Indexes 1, 2, 3
$\mathbf{I}$	Identity matrix or tensor
J	Jacobian determinant of deformation gradient
$\mathbf{J}$	Jacobian matrix
$\dot{\mathbf{J}}$	Time derivative of angular momentum
$\mathbf{k}^G$	Global scale element tangential stiffness matrix
$\mathbf{k}_e^L$	Element tangential stiffness matrix in a local scale boundary value problem
$\mathcal{K}$	Kinetic energy

$\mathbf{K}_T$	Global tangential stiffness matrix
$\mathbf{K}_i^L$	Global tangential stiffness matrix in a local scale boundary value problem
l_x	Length in x-direction
l_y	Length in y-direction
l_c	Characteristic element length
L	Linearization of functional
$\dot{\mathbf{L}}$	Time derivative of linear momentum
$\mathbb{M}$	Damage effect tensor or matrix
n_{eq}	Number of equations
$\mathbf{n}$	Unit normal vector in current configuration
$\mathbf{n}_0$	Unit normal vector in reference configuration
N_I	Interpolation functions
$\mathbf{N}$	Unit normal vector
$\mathcal{P}_{ext}$	External mechanical power
$\mathcal{P}_{int}$	Internal mechanical stress power
$\mathbf{P}$	First Piola-Kirchhoff stress tensor
$\mathbf{q}_0$	Cauchy heat flow
$\mathcal{Q}$	Thermal power
$\tilde{\mathcal{Q}}$	Rate of ingoing entropy
$\mathbf{Q}$	Orthogonal tensor
r_0	Heat source
r	Damage threshold
$\mathbf{r}$	Position vector to reference point
$\mathbf{R}$	Rotation tensor
$\mathbf{s}$	Stress deviator
s_0	Local entropy per unit volume
$\mathcal{S}$	Entropy integrated over volume
$\mathbf{S}$	Second Piola-Kirchhoff stress tensor
$\mathbb{S}$	Compliance Tensor or compliance matrix
t	Time; thickness
$\bar{\mathbf{t}}$	Surface force
$\mathbf{t}_i$	Local base vectors
t_0	Initial time for reference configuration
$\mathbf{t}_0$	Outer boundary force vector
$\mathbf{t}$	Cauchy traction vector
$\mathbf{T}$	Cauchy stress tensor
u_x, u_y, u_z	Displacement components in spatial directions x, y, z
$\mathbf{u}$	Displacement vector

$\delta\mathbf{u}$	Virtual displacement field
$\Delta\mathbf{u}$	Increment of displacement field
$\mathbf{U}$	Right stretch tensor
$\mathbf{v}_0$	Velocity vector of control volume
$\mathbf{v}$	Left stretch tensor (Ch. 2); vector of nodal displacements (Ch. 5–7)
$\mathbf{V}_i^L$	Global displacement vector in a local scale boundary value problem
w	Displacement in z-direction
W	Mechanical work
δW	Virtual work
δW_{ext}	External virtual work
δW_{int}	Internal virtual work
X, Y, Z	Material coordinates
x, y, z	Spatial coordinates
$\mathbf{X}$	Position vector in reference configuration
$\mathbf{x}$	Position vector in current configuration

Kurzfassung

Faserverbundwerkstoffe gewinnen in den verschiedensten Ingenieurwissenschaften immer mehr an Bedeutung. Dieser Trend wird sich in den nächsten Jahren, gerade im Hinblick auf E-Mobilty und immer höheren Materialanforderungen, noch verstärken. Mit der zunehmenden Verwendung wird auch die Nachfrage nach geeigneten Berechnungsverfahren zur Beschreibung des komplexen mechanischen Verhaltens dieser Werkstoffe immer größer. Diese Arbeit leistet einen Beitrag zur theoretischen Entwicklung und Implementierung von Schädigungsmodellen. Mit Hilfe von Schädigungsmodellen kann der Beginn der Schädigung lokalisiert, der Verlauf durch die Struktur verfolgt sowie deren Traglast bestimmt werden. In der vorliegenden Arbeit werden verschiedene Modellansätze verfolgt, die auf einem sogenannten Smeared-Crack-Ansatz basieren. Dabei wird die Schädigung im Material als kontinuierlich verteilt angenommen. Vorgestellt wird ein auf makroskopischer Betrachtung basierendes anisotropes Schädigungsmodell, das wahlweise das Bruchkriterium nach Hashin oder das Failure Mode Concept nach Cuntze zur Bestimmung des Schädigungsbeginns verwendet. Der Verlauf der Schädigung wird durch ein lineares Degradationsmodell beschrieben, dessen Steigung von der kritischen Energiefreisetzungsrate bestimmt wird. Um die dissipierte Energie in Finite-Elemente-Modellen korrekt zu berechnen, wird die charakteristische Elementlänge als zusätzlicher Parameter eingeführt. Mit den gewonnenen Erkenntnissen wird dann ein zweiter Ansatz verfolgt, der auf einem zweiskaligen Finite-Elemente-Modell basiert, das aus einem Mikromodell und einem Makromodell besteht. Hierbei werden die Verzerrungen des Makromodells als Verschiebungsrandbedingungen auf das Mikromodell aufgebracht. In dem Mikromodell wird die Beschreibung der Schädigung separat auf den einzelnen Faser- und Matrixanteilen durchgeführt. Die endgültigen inneren Verschiebungen des Mikrosystems werden mit dem Newton-Raphson-Verfahren bestimmt und die homogenisierten Spannungen und die Materialtangente werden an das Makrosystem zurückgegeben. Die Schädigung im verwendeten Mikromodell wird durch ein exponentielles Degradationsgesetz ohne elastische Anfangsregion beschrieben, das sich als besonders robust erwiesen hat. Ein Gegenargument zur Verwendung von Mehrskalenmodellen ist die erhebliche Rechenzeit, da in jedem Integrationspunkt des globalen Systems ein komplettes Mikrosystem gelöst werden muss. Da sich aber Mehrskalenmodelle, aufgrund ihrer Struktur, besonders zur simultanen parallelen Berechnung eignen, ist zu ist zu erwarten, dass sie mittelfristig die makroskopischen Modelle ersetzen werden.

Abstract

Fiber-reinforced plastics are of increasing relevance in a broad variety of engineering applications. Developments in E-Mobility and ever-increasing demands on materials guarantee that this trend will continue. The increasing use and importance of FRP will in turn increase demand for appropriate methodologies for describing the complex mechanical properties of these materials. This thesis contributes to this end to the theoretical development and implementation of damage models. These models build on the so called smeared crack approach, whereby the damage in the material is assumed to have a continuous distribution. With the help of damage models, maximum bearing load computations can be performed and the damage initiation and propagation can be precisely followed. A variety of approaches are used in this thesis: firstly, a macroscopic view of anisotropic damage models is presented. The model utilizes either Hashin's failure criterion or Cuntze's failure mode concept to determine damage initiation. At the onset of damage, a linear degradation model is used, the path of which is determined by the critical energy release rate. In conjunction with the characteristic element length, an accurate calculation of the dissipated energy in the finite element model is assured. A second approach is based on a coupled multi-scaled finite element model. The model presented here is a two-scale model consisting of a micro scale and a macro scale. The distortions in the macro scale are mapped onto the micro scale using appropriate boundary conditions. In the micro scale, the modeling of the damage is carried out separately on the individual fiber and polymer components. The nonlinear micro model is solved by means of Newton-Raphson method before the homogenized stresses and material tangents are delivered to the macro system. This process is repeated until global equilibrium is achieved. The micro scale model utilizes an exponential degradation law, which lacks an elastic initial region and has proven to be especially robust. The multi scale model affects damage at locations where it actually occurs, giving it a significant advantage over macroscopic models. The use of costly failure criterion is spared in this approach. Furthermore, use of the multi scale approach allows detailed observations of the failure in the material, and failure modes such as fiber-polymer separation can easily be implemented. The counter-argument to this approach is the significant computational cost, caused by the necessity of a complete iteration loop in the micro system for every integration point in the global system. However, the structure of the models makes them especially suitable for simultaneous parallel processing, so that it can be expected that they supersede macroscopic models in the mid term future.

Bisher sind in dieser Reihe erschienen

Band 1
Zur mikrorissinduzierten Schädigung spröder Materialien
B. Lauterbach, Dissertation 2001, ISBN 3-935868-01-4

Band 2
3D-Simulation der Mikrostrukturentwicklung in Zwei-Phasen-Materialien
R. Müller, Dissertation 2001, ISBN 3-935868-02-2

Band 3
Zur numerischen Simulation von Morphologieänderungen in mikroheterogenen Materialien
S. Kolling, Dissertation 2001, ISBN 3-935868-03-0

Band 4
Theoretische und numerische Untersuchung von Versagensmechanismen in Metall-Keramik-Verbundwerkstoffen
T. Emmel, Dissertation 2002, ISBN 3-935868-04-9

Band 5
On microcrack dominated problems in dynamics and statics of brittle fracture: a numerical study by boundary element techniques
S. Rafiee, Dissertation 2002, ISBN 3-935868-05-7

Band 6
Kontinuumsmechanik anisotroper Festkörper und Fluide
H. Ehrentraut, Habilitationsschrift 2002, ISBN 3-935868-06-5

Band 7
Plane unsteady inviscid incompressible hydrodynamics of a thin elastic profile
N. Blinkova, Dissertation 2002, ISBN 3-935868-07-3

Band 8
Anmerkungen zur Simulation von entfestigendem Materialverhalten
H. Baaser, Habilitationsschrift 2004, ISBN 3-935868-08-1

Band 9
Orts- und zeitadaptive DAE-Methoden zur Beschreibung elastisch-plastischen Materialverhaltens innerhalb der FEM
S. Eckert, Dissertation 2005, ISBN 3-935868-09-X

Band 10
Simulations of the Flow of the Ross Ice Shelf, Antarctica: Parameter Sensitivity Tests and Temperature-Dependent Rate Factor
A. Humbert, Dissertation 2005, ISBN 3-935868-10-3

Band 11
A Thermo-mechanical Continuum Theory with Internal Length of Cohesionless Granular Materials
Chung Fang, Dissertation 2006, ISBN 3-935868-11-1

Band 12
Modeling Dry Granular Avalanches past Different Obstructions: Numerical Simulation and Laboratory Analyses
Chiou Min-Ching, Dissertation 2006, ISBN 3-935868-12-X

Band 13
Configurational forces in defect mechanics and in computational methods
R. Müller, Habilitationsschrift 2005, ISBN 3-935868-13-8

Band 14
Hyperelastic dynamics in physical and material space
S. Kolling, Habilitationsschrift 2007, ISBN 978-3-935868-14-3

Band 15
Phenomenological modeling of ferroelectric material behavior
V. Mehling, Dissertation 2007, ISBN 978-3-935868-15-0

Band 16
Ein mischungsbasiertes Materialmodell zum Knochenumbau
R.-R. Kühn, Dissertation 2006, ISBN 978-3-935868-16-7

Band 17
Einige Erweiterungen der Rand-Finite-Elemente-Methode und deren Anwendung auf Randeffekte in ebenen Laminaten
J. Artel, Dissertation 2007, ISBN 978-3-935868-17-4

Band 18
Spannungskonzentrations-Effekte an Verstärkungspflaster-Ecken
H. Wigger, Dissertation 2008, ISBN 978-3-935868-18-1

Band 19
Rotationseffekte in der Kristallplastizität
C. Bröse, Dissertation 2007, ISBN 978-3-935868-19-8

Band 20
Finite-Element-Modelle zur Simulation von Delaminationen dünner Filme auf Substraten
V. D. Pham, Dissertation 2010, ISBN 978-3-935868-20-4

Band 21
Asymptotische Nahfeldanalysen ebener Multi-Materialverbindungsstellen mit der Methode komplexer Potentiale
C. Sator, Dissertation 2010, ISBN 978-3-935868-21-1

Band 22
Modellierung spröder Rissbildung an Spannungskonzentrationen mit der Bruchmechanik finiter Risse
J. Hebel, Dissertation 2010, ISBN 978-3-935868-22-8

Band 23
Some Contributions to the Homogenization of Macroscopically Isotropic Composites
V. Salit, Dissertation 2011, ISBN 978-3-935868-23-5

Band 24
Asymptotic Analysis of the Load Transfer on Double-Lap Bolted Joints
J. Kratochvíl, Dissertation 2012, ISBN 978-3-935868-24-2

Band 25
Spannungssingularitätsordnungen in linear-elastischen und piezoelektrischen Multimaterialkonfigurationen mit der Rand-Finite-Elemente-Methode
W. Mayland, Dissertation 2012, ISBN 978-3-935868-25-9

Band 26
Plastizität und Skaleneffekte sowie Deformations- und Versagensmodellierung dünner metallischer Schichten bei Nanoindentation
A. Trondl, Dissertation 2012, ISBN 978-3-935868-26-6

Band 27
Theoretical modeling and parallel programming of a nonlinear composite finite shell element based on a mixed global-local variational principle
M. Schürg, Dissertation 2012, ISBN 978-3-935868-27-3

Band 28
Strukturmechanische Modellierung und Analyse des Tragverhaltens von dünnwandigen hochbelasteten Composite-Biege- und Querkraftträgern
A. M. Kroker, Dissertation 2013, ISBN 978-3-935868-28-0

Band 30
Der Laminatrandeffekt und seine Analyse, insbesondere mit der Rand-Finite-Elemente-Methode
J. Lindemann, Dissertation 2013, ISBN 978-3-935868-30-3

Band 31
Avoidance of brake squeal by a separation of the brake disc's eigenfrequencies: A structural optimization problem
A. Wagner, Dissertation 2013, ISBN 978-3-935868-31-0

Band 32
Ultrasonic Generators for Energy Harvesting Applications: Self-Excitation and Mechanical Frequency Transformation
E. Heffel, Dissertation 2013, ISBN 978-3-935868-32-7

Band 33
Neue Ansätze zur Analyse der Lastübertragung und Initiierung finiter Risse in Klebverbindungen
P. Weißgraeber, Dissertation 2014, ISBN 978-3-935868-33-4

Band 34
Instabilities and Wear Propagation in Calenders: Interactions with Structural Dynamics and Contact Kinematics
M. Eckstein, Dissertation 2014, ISBN 978-3-935868-34-1

Band 35
Adaptive Camber Airfoil for Load Alleviation in Horizontal Axis Wind Turbines: Analytical and Numerical Study
H. Spiegelberg, Dissertation 2014, ISBN 978-3-935868-35-8

Band 36
Erweiterungen der Rand-Finite-Elemente-Methode zur Analyse von Platten und Laminaten mit besonderem Fokus auf der Ermittlung von Singularitätsordnungen an Rissen und Kerben
R. Dieringer, Dissertation 2015, ISBN 978-3-935868-36-5

Band 37
Entwicklung und Analyse mikromechanischer Modelle zur Beschreibung des Effektivverhaltens von geschlossenzelligen Polymerschäumen
N.-C. Fahlbusch, Dissertation 2015, ISBN 978-3-935868-37-2

Band 38
Reduktion niederfrequenter Schwingungen von Windenergieanlagen durch Tilgersysteme
S. Katz, Dissertation 2015, ISBN 978-3-935868-38-9

Band 39
Multistable Structures for Broad Bandwidth Vibration-based Energy Harvesters: An Analytical Design Investigation
M. Heymanns, Dissertation 2015, ISBN 978-3-935868-39-6

Band 40
A nonlinear multiscale finite element model for comb-like sandwich panels
D. Heller, Dissertation 2016, ISBN 978-3-935868-40-2

Band 41
Rückwirkung des Gleitlagermoments auf die Drehbewegung des Rotors
P. Felscher, Dissertation 2016, ISBN 978-3-935868-41-9