

Marek Fassin

Modeling of gradient-extended
anisotropic damage using a second
order damage tensor

Modeling of gradient-extended anisotropic damage using a second order damage tensor

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Marek Fassin

Berichter*innen: Prof. Dr.-Ing. Stefanie Reese
Prof. Dr.-Ing. Stephan Wulfinghoff

Tag der mündlichen Prüfung: 03. Juni 2019

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

Applied Mechanics – RWTH Aachen University
Editor: Prof. Dr.-Ing. Stefanie Reese

Volume 9

Marek Fassin

**Modeling of gradient-extended anisotropic damage
using a second order damage tensor**

Shaker Verlag
Düren 2019

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2019)

Copyright Shaker Verlag 2019

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6974-7

ISSN 2363-488X

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Acknowledgements

The present cumulative dissertation is the result of my work as research associate at the Institute of Applied Mechanics (IFAM) at the RWTH Aachen University. At this point, I would like to express my gratitude to all the people who assisted me and who have contributed directly or indirectly to the successful completion of this thesis. The English-speaking reader may forgive me my decision to write the following personal acknowledgements in German.

An erster Stelle möchte ich Frau Prof. Dr.-Ing. Stefanie Reese danken, der Betreuerin meiner Doktorarbeit, die mich im Jahr 2013 am IFAM anstellte und in ihre Forschergruppe aufnahm. Während meiner gesamten Zeit am IFAM konnte ich mir stets ihrer Unterstützung und Förderung gewiss sein. Ich möchte mich bei ihr für viele interessante und anregende Diskussionen bedanken aber auch für das hervorragende und sehr bereichernde wissenschaftliche Umfeld, in dem ich arbeiten durfte (wöchentliche Seminare, Besuch von Konferenzen und Workshops, Auslandsaufenthalt).

An zweiter Stelle, aber nicht weniger wichtig, möchte ich dem Zweitgutachter meiner Doktorarbeit, Herrn Prof. Dr.-Ing. Stephan Wulfinghoff, meinen Dank aussprechen. Seine intensive und persönliche Betreuung hat maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Danke dabei vor allem für das geduldige Beantworten all meiner Fragen, auf die er mit seinem fundierten Wissen stets ausführlich eingegangen ist.

Außerdem möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Blankenbach recht herzlich dafür bedanken, dass er den Vorsitz der Promotionskommission übernommen hat.

Im Rahmen meiner Projektarbeit für den SFB/Transregio 40 'Technologische Grundlagen für den Entwurf thermisch und mechanisch hochbelasteter Komponenten zukünftiger Raumtransportsysteme' möchte ich meinen direkten Projektpartnern Daniel Kowollik, Felix Hötte und Matthias Haupt für die stets verlässliche Zusammenarbeit danken. Darüber hinaus danke ich Torben Fiedler (Teilprojekt D2) und Fabian Breede (Teilprojekt D7) für die gute interdisziplinäre Zusammenarbeit.

Desweiteren möchte ich mich bei allen aktuellen und ehemaligen wissenschaftlichen aber auch nicht-wissenschaftlichen Kolleginnen und Kollegen für die tolle Zeit und die außergewöhnlich gute und offene Atmosphäre am Institut bedanken. Dabei habe ich besonders geschätzt, dass jederzeit bei jedem und für jeden die Bürotüren bei Fragen oder Problemen offen standen. Hierbei sollte insbesondere die Tür zum Büro von Tim Brepols hervorgehoben werden, hinter der besonders viele meiner Diskussionen stattfanden! Danke für deine Zeit, viele Tipps / Tricks und deine so verständlichen Erklärungen! Weiterhin möchte ich Jaan Simon danken: für die

intensive und motivierende Zusammenarbeit bei der Veranstaltung Kontinuumsmechanik, für fachliche aber auch außerfachliche Ratschläge!

Nicht unerwähnt bleiben dürfen meine täglichen Wegbegleiter (Bürokolleginnen und Bürokollegen) Annika Radermacher, Oliver Barfusz, Fabiola Cavaliere und Kiran Manjunatha. Ihr ward es mit denen ich in den letzten Jahren am meisten Zeit verbracht habe. Danke für zahlreiche fachliche Diskussionen und die kleinen Späße, die zum Glück auch nicht zu kurz kamen.

Erwähnen möchte ich an dieser Stelle auch die Zusammenarbeit mit meinen Studenten. Robert Eggersmann hat eine hervorragende Masterarbeit zum Thema anisotrope Schädigung geschrieben. Tim van der Velden hat eine ausgezeichnete Bachelorarbeit abgeliefert (gradientenerweiterte isotrope Schädigung) und war über meine gesamte Zeit am Institut mein zuverlässiger Wegbegleiter als Hiwi. Und Erik Prume hat sich durch verschiedenste Implementierungsaufgaben verdient gemacht, wobei ich vor allem die Einarbeitung in AceGen hervorheben möchte. Die Arbeit mit Euch hat mir immer viel Spaß gemacht und war überaus erfolgreich. Danke Euch dreien!

Neben den Menschen am Institut, möchte ich meiner gesamten Familie danken, die immer für mich da war und ist. Insbesondere meiner Mutter und meinem Vater, für die unermüdliche Stärkung und Motivation, sowie für das stets offene Ohr für meine Gedanken.

Tief verbunden und dankbar bin ich meiner Lebenspartnerin Nadja für ihre Geduld und ihr Verständnis, die mich während der gesamten Zeit dieser Arbeit begleitet haben. Danke!!

Aachen, 2019

Marek Fassin

Abstract

Numerical simulations are indispensable in many engineering disciplines since they can reduce the number of costly and time-consuming experiments. For the prediction of material and structural failure, damage and fracture models have been developed, which are constantly being further extended to consider more and more effects. State-of-the-art isotropic damage models apply scalar variables to describe damage/degradation of a material. Anisotropic damage models have already been developed for quite a time, but in this research field still pending issues exist. One challenging task concerns the mesh-objective description of anisotropic damage progression in finite element simulations. The present cumulative dissertation consists of three peer-reviewed articles that deal with state-of-the-art isotropic damage as well as anisotropic damage representations. In article 1, an application oriented design study utilizing a local isotropic damage model is presented. The other two articles (article 2 and 3) deal with gradient-extended anisotropic damage, for which a new formulation is established.

The application areas of damage models are versatile and include e.g. the design of components in the automotive and aerospace sector. For the latter sector, article 1 presents a design study of a subscale rocket engine experiment utilizing a viscoplastic isotropic damage model. The material model takes into account nonlinear Voce isotropic hardening, nonlinear Armstrong-Frederick kinematic hardening, Perzyna rate dependence and Lemaitre-type isotropic damage. The goal is to design the experiment, such that a specific failure mode of the cooling channel structure is obtained which should occur already after a relatively small number of cycles. Thermomechanical finite element analyses are performed, for which the influence of geometry parameters such as the width and height of the cooling channels is studied first. Afterwards, a final design is found by properly adapting thermal and static boundary conditions and taking into account constructional aspects. With the designed experiment and its measuring equipment, damage models can be validated in future.

The use of isotropic damage models, in which damage is described by one scalar damage variable, may be insufficient in certain situations (e.g. if the material exhibits preferred directions or two or more directional loads are applied sequentially). Furthermore, standard local material models with softening behaviour, such as the one used in article 1, show a pathological mesh dependence in finite element simulations due to localization. Therefore, a formulation including (i) anisotropic damage and (ii) a gradient extension is developed. For simplicity, plasticity is neglected. Article 2 presents this formulation, in which damage is represented by a second order tensor and the micromorphic approach is chosen to incorporate gradient effects. Although a damage tensor of second order is utilized, the proposed efficient gradient-extended formulation introduces only one additional scalar degree of freedom. The elastic strain energy of the model is derived starting from a general invariant representation of the strain tensor and

the damage tensor. Invariants, which may lead to artificial stiffening, are neglected a priori. Furthermore, a novel additional damage hardening is introduced ensuring that the eigenvalues of the damage tensor do not exceed the value one. Besides the finite element implementation, the implementation at integration point level including the derivation of the consistent tangent operators is described in detail. The model's behaviour is exemplified with uniaxial loading cases (performed at integration point level) in which damage anisotropy is readily apparent. Several representative structural examples are investigated and it is demonstrated that the formulation delivers mesh-objective results although using only one additional scalar degree of freedom. Depending on the specific boundary value problem and the material parameters either localized or diffuse damage patterns are observed. Here, a salient result is that especially in the case of diffuse damage differences between isotropic and anisotropic damage modeling appear.

In the last part of the thesis (article 3), the anisotropic damage model presented in article 2, is extended to consider tension compression asymmetry. The main reason for this extension is to prevent spurious failure in compression. The used tension compression asymmetry approach is based on the spectral decomposition of the strain tensor into a tension and a compression related part. The tension related part of the elastic strain energy function is fully damaged, whereas the compression related part is either only partially or not at all damaged. For the implementation of this approach, a new unifying algorithmic procedure is presented which reduces the implementation effort drastically. This is particularly evident for the derivation and implementation of the consistent tangent operators. Cyclic uniaxial and cyclic shear loading cases are studied at integration point level and show the effects of tension compression asymmetry: (i) different damage behaviour in tension and compression as well as (ii) stiffness recovery if the load is reversed from tension to compression. Finally, three representative structural examples are investigated in which mesh convergence upon mesh refinement is demonstrated. Spurious failure in compression is shown to be prevented and stiffness recovery takes place if the load is reversed. These two aspects successfully verify tension compression asymmetry on structural level and lead to a more realistic failure behaviour.

Kurzfassung

Numerische Simulationen sind heutzutage aus vielen Ingenieursdisziplinen nicht mehr wegzudenken, da sie helfen die Zahl an kostspieligen und zeitaufwändigen Versuchen zu reduzieren. Zur Vorhersage von Material- und Strukturversagen sind Schädigungs- und Bruchmodelle entwickelt worden, die bis heute kontinuierlich weiterentwickelt wurden um immer mehr Effekte in den Modellen zu berücksichtigen. State-of-the-art sind isotrope Schädigungsmodelle, die skalare Variablen zur Beschreibung von Schädigung bzw. Degradation eines Materials verwenden. Anisotrope Schädigungsmodelle werden nun schon seit längerem entwickelt, jedoch existieren immer noch viele offene Fragestellungen in diesem Bereich. Eine herausfordernde Aufgabe betrifft die netz-objektive Beschreibung von anisotroper Schädigungsentwicklung in Finite Elemente Simulationen. Die vorliegende kumulative Dissertation besteht aus drei, in wissenschaftlichen Fachzeitschriften veröffentlichten, Artikeln, die sich mit isotroper sowie anisotroper Schädigungsdarstellung beschäftigen. In Artikel 1 wird eine anwendungsorientierte Designstudie unter Verwendung eines lokalen isotropen Schädigungsmodells präsentiert. Die beiden anderen Artikel (Artikel 2 und 3) befassen sich mit gradientenerweiterter anisotroper Schädigung, für dessen Beschreibung eine neue Formulierung entwickelt wird.

Die Anwendungsgebiete von Schädigungsmodellen sind vielseitig und umfassen z.B. die Auslegung von Bauteilen im Automobil-, Luft- und Raumfahrtbereich. Für letzteren Bereich präsentiert Artikel 1 eine Auslegungsstudie eines Subskalen-Raketentriebwerks-Experiments unter Verwendung eines viskoplastischen isotropen Schädigungsmodells. Das Materialmodell beinhaltet nichtlineare isotrope Voce Verfestigung, nichtlineare kinematische Armstrong-Frederick Verfestigung, Perzyna Ratenabhängigkeit und isotrope Schädigung nach Lemaitre. Ziel ist es, das Experiment so zu designen, dass die Kühlkanalstruktur einen spezifischen Versagensmodus aufweist und dieser schon nach relativ wenigen Zyklen auftreten soll. Hierzu werden thermomechanische Finite Elemente Analysen durchgeführt, bei denen zunächst der Einfluss von Geometrieparametern wie Breite und Höhe der Kühlkanäle untersucht wird. Das endgültige Design wird iterativ durch Anpassung der thermischen und statischen Randbedingungen und unter Berücksichtigung konstruktiver Aspekte entwickelt. Mit dem entworfenen Versuch und den dazugehörigen Messgeräten können in Zukunft Schädigungsmodelle validiert werden.

Die Verwendung von isotropen Schädigungsmodellen (eine skalare Schädigungsvariable) kann in bestimmten Situationen unzureichend sein (z.B. wenn das Material Vorzugsrichtungen besitzt oder stark richtungsabhängige Lasten nacheinander aufgebracht werden). Darüber hinaus zeigen gewöhnliche lokale Materialmodelle mit entfestigendem Materialverhalten (wie das in Artikel 1 benutzte) aufgrund von Lokalisierung eine pathologische Netzabhängigkeit in Finite Elemente Simulationen. Aus diesen Gründen berücksichtigt die in Artikel 2 entwickelte

Formulierung (i) anisotrope Schädigung und (ii) eine Gradientenerweiterung. Der Einfachheit halber wird Plastizität vernachlässigt. Schädigung wird als zweistufiger Tensor dargestellt und die Gradientenerweiterung wird durch den mikromorphen Ansatz bewerkstelligt. Obwohl ein Schädigungstensor zweiter Stufe verwendet wird, führt die neue vorgestellte gradientenerweiterte Formulierung nur einen zusätzlichen skalaren Freiheitsgrad ein. Die elastische Verzerrungsenergie des Modells wird startend von einer allgemeinen Invariantendarstellung des Verzerrungs- und Schädigungstensors hergeleitet. Dabei werden Invarianten, die zu künstlichen Versteifungseffekten führen könnten, im Vorhinein ausgeschlossen. Darüber hinaus wird eine neue zusätzliche Schädigungsverfestigung eingeführt, die sicherstellt, dass die Eigenwerte des Schädigungstensors den Wert eins nicht überschreiten. Neben der Finite Elemente Implementierung wird im Detail auf die Implementierung auf Integrationspunktebene eingegangen, inklusive der Herleitung der konsistenten Tangenten. Das Modellverhalten wird exemplarisch anhand von uniaxialen Lastfällen auf Integrationspunktebene demonstriert, wobei die Anisotropie der Schädigung ersichtlich wird. Außerdem werden verschiedene repräsentative Strukturbeispiele gerechnet, an denen gezeigt wird, dass die Formulierung Netzkonvergenz bei Netzverfeinerung liefert, und das obwohl nur ein skalarer zusätzlicher Freiheitsgrad benutzt wird. Abhängig vom gewählten Randwertproblem sowie den Materialparametern kann entweder lokalisierte oder diffuse Schädigung beobachtet werden. Auffallend ist hierbei, dass insbesondere im Fall von diffuser Schädigung Unterschiede zwischen isotroper und anisotroper Schädigung auftreten.

Im letzten Teil der Dissertation (Artikel 3) wird das in Artikel 2 vorgestellte Modell um Zug-Druck Asymmetrie erweitert, welche künstliches Versagen im Druckbereich verhindert. Der benutzte Ansatz basiert auf der spektralen Zerlegung des Verzerrungstensors in einen Zug- und einen Druckteil. Der Zugteil der elastischen Verzerrungsenergiefunktion wird voll geschädigt, während der Druckteil teilweise oder gar nicht geschädigt wird. Zur Umsetzung dieses Ansatzes wird ein neues vereinheitlichendes Verfahren vorgestellt, welches den Implementierungsaufwand drastisch reduziert. Das macht sich vor allem bei der Herleitung und Implementierung der konsistenten Tangenten bemerkbar. Auf Integrationspunktebene werden zyklische uniaxiale und Scherlastfälle betrachtet, die die Effekte der Zug-Druck Asymmetrie verdeutlichen: (i) unterschiedliches Schädigungsverhalten im Zug- und Druckbereich und (ii) Steifigkeitsrückgewinnung beim Übergang von Zug- auf Druckbelastung. Zum Schluss werden drei repräsentative Strukturbeispiele untersucht, in denen Netzkonvergenz bei Netzverfeinerung gezeigt wird. Außerdem wird künstliches Versagen im Druckbereich erfolgreich verhindert und Steifigkeitsrückgewinnung bei Lastumkehr von Zug auf Druck ist zu beobachten. Diese beiden Aspekte zeigen erfolgreich Zug-Druck Asymmetrie auf Strukturebene und liefern einen Beitrag zur realistischeren Versagensbeschreibung.

Contents

1 Overall Introduction	1
1.1 Motivation	1
1.2 Isotropic damage modeling	5
1.2.1 Fundamental concepts of continuum damage mechanics	5
1.2.2 Ductile damage	6
1.3 Measurement of damage	8
1.4 Anisotropic damage modeling	9
1.4.1 Mathematical representation	9
1.4.2 Difficulties associated with anisotropic damage	11
1.5 Mesh-objective description in finite element simulations	13
1.6 Outline of the dissertation	17
2 Article 1:	
Design studies of rocket engine cooling structures for fatigue experiments	19
2.1 Introduction	20
2.2 Problem definition	24
2.2.1 Full scale application: a liquid rocket combustion chamber	26
2.2.2 Sub scale test: Modular rectangular GOX / GCH4 combustion chamber	26
2.2.3 Cooling of fatigue specimen	29
2.2.4 Fatigue specimen	30
2.2.5 Comparison between the rectangular sub scale rocket thrust chamber and the full scale application	31
2.3 Material Modelling	32
2.3.1 Motivation by a rheological model	32
2.3.2 Continuum mechanical extension within a small strain formulation	33
2.3.3 Material parameters	35
2.4 Thermal boundary conditions	38
2.4.1 1D conjugate heat transfer model	39
2.4.2 Hot gas convection	39

2.4.3	Cooling fluid convection	41
2.4.4	Iterative scheme	41
2.4.5	Cooling fluid estimation	42
2.4.6	Cooling fluid analysis	42
2.5	Design studies for doghouse failure	45
2.5.1	Transient thermal analysis	46
2.5.2	Quasi static analysis	49
2.5.3	Preliminary studies based on one cycle	52
2.5.4	Studies based on multiple cycles	54
2.6	Fatigue segment design outlook	62
2.7	Conclusions and outlook	63

3 Article 2:

	Gradient-extended anisotropic brittle damage modeling using a second order damage tensor – theory, implementation and numerical examples	67
3.1	Introduction	68
3.2	Gradient-extended modeling framework with generalized balance equations	72
3.2.1	Constitutive models with internal variables (without gradient-extension)	72
3.2.2	Gradient-extended material models	73
3.3	Application to anisotropic brittle damage	76
3.3.1	Free energy	77
3.3.2	Evaluation of the second law of thermodynamics	79
3.3.3	Suggestion of an elastic strain energy based on the damage growth criterion	80
3.3.4	Damage criterion and damage evolution	85
3.4	Special case: generalized standard materials	87
3.4.1	Local incremental potential	87
3.4.2	Global incremental potential	90
3.4.3	Linearization of the time-discrete weak form	91
3.5	Implementation at the integration point level	92
3.5.1	Equation system to be solved at the integration point level	92
3.5.2	Additional damage hardening	93
3.5.3	Quantities related to the dissipation potential	95
3.5.4	Solution of the equation system at the integration point level	96
3.5.5	Consistent tangent operators	98

3.6	Studies at integration point level	98
3.6.1	Uniaxial stretching	99
3.6.2	Uniaxial tension	101
3.7	Representative structural examples	102
3.7.1	Square plate with circular hole	104
3.7.2	Plate with elongated hole	112
3.7.3	Double-edge notched specimen	119
3.7.4	Cross specimen with circular inclusion	125
3.8	Conclusions	130
3.9	Appendix	132
3.9.1	More sophisticated degradation function	132
3.9.2	Principle of maximum dissipation for differentiable f	133
3.9.3	Interpretation of the rate-independent model with normality rule as generalized standard material	134
3.9.4	Dissipation potential for anisotropic damage	134
3.9.5	Finite element discretization	135
3.9.6	Derivatives appearing in the linearized residual equation	137
3.9.7	Derivatives appearing in the consistent tangent operators	140
3.9.8	Influence of the micromorphic parameters	141
4	Article 3:	
	Efficient algorithmic incorporation of tension compression asymmetry into an anisotropic damage model	145
4.1	Introduction	146
4.2	Gradient-extended modeling framework	150
4.2.1	Weak form of the problem and its linearization	151
4.2.2	Equation system to be solved at integration point level	153
4.3	Efficient algorithmic incorporation of tension compression asymmetry	154
4.3.1	Isotropic damage model	154
4.3.2	Anisotropic damage model	158
4.3.3	Concluding remarks on the implementation	165
4.4	Studies at integration point level	165
4.4.1	Uniaxial loading	166
4.4.2	Shear loading	168

4.5	Representative structural examples	170
4.5.1	Cantilever beam	172
4.5.2	Plate with elongated hole	178
4.5.3	Single-edge notched specimen	183
4.6	Conclusions	187
4.7	Appendix	189
4.7.1	Dissipation potential	189
4.7.2	Additional damage hardening	190
4.7.3	Computation of the consistent tangent operators	190
5	Overall Conclusions and Outlook	195
	List of Figures	199
	List of Tables	205
	Bibliography	207