Experimental and Numerical Multi Scale Analysis of Fiber Reinforced Composites

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

vorgelegt von

Bertram Stier

Berichter: Universitätsprofessorin Dr.-Ing. Stefanie Reese
Professor Wim van Paepegem

Tag der mündlichen Prüfung: 08.02.2017

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

Volume 5

Bertram Stier

Experimental and Numerical Multi Scale Analysis of Fiber Reinforced Composites

Shaker Verlag
Aachen 2017

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, 2017)

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5488-0
ISSN 2363-488X

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen
Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9
Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Dedicated to my parents Erwin and Christiane Stier

Acknowledgements

This dissertation is the result of my research activities as a research assistant at the Institute of Applied Mechanics, RWTH Aachen University. At this point, I would like to to express my gratitude and and deep appreciation to the people who supported me during this time.

First of all, I would like to thank my academic supervisor Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefanie Reese for the continuous support and encouragement throughout the duration of this work and particularly for providing the opportunity to collaborate with extraordinary researchers such as Prof. Waas at the University of Michigan and Dr. Brett Bednarcyk at the NASA Glenn Research Center. I would also like to thank Prof. Wim van Paepegem for being the outside reviewer of this dissertation.

Furthermore, I would like to thank my colleagues, Johannes Neumann, Deepanshu Sodhani and Daniel Höwer and Dr.-Ing. Jaan Simon for their friendship, and numerous scientific discussions. Of course, I want to express my gratitude to all colleagues of Ifam for the collaboration and sympathy. I also want to thank my student assistants Torben Böddeker and Raphael Springmann for the numerous hours of commitment, productivity and excitement for unique topics throughout the entire time.

I also want to thank my friends for their patience and moral support - for being at my side even when I did not find the time to be the friend they deserved.

Finally, I would like to thank my wonderful wife Carmen Schröter for the patience and the open heart whenever I struggled.

Abstract

Increasing energy costs necessitate efficient lightweight constructions particularly in the fields of mobility and transport. For these applications, tailorable materials like fiber reinforced plastics (FRP) are gaining more and more importance. However, the characterization and experimental validation of advanced numerical composites analysis techniques is challenging. A significant outstanding quandary is in regards to the proper, or most beneficial, scale on which the constitutive damage model defining the mechanical response of the material should function. The prediction of the global FRP weave response, particularly when exceeding the linear elastic regime, is only possible if the internal structure is taken into account. Thus, different scales need to be considered.

Treating the composites as fully homogenized via the macro scale approach is computationally efficient, but, since the physics induced by the intrinsic structure are lost, it is extremely challenging to devise a predictive model on this scale. In contrast, the meso scale approach, wherein the composite tows are treated as effective anisotropic materials, will always be more computationally expensive. It further requires a complex damage model to handle the extreme anisotropy of the tow material, with its directionally dependent multiple damage mechanisms. Advantageous is the better physical representation of the internal structure. The material model suitable for the tows needs to be fully characterized which can be done by verified micro scale analysis techniques. The micro scale approach, involving modeling the composite to the scale of the constituents (i.e. fiber and matrix materials) enables use of simpler models and avoids ad-hoc coupling rules for the various damage components. However, this approach can be very computationally demanding, and often, the constituent scale data best suited for characterizing the damage model are unavailable.

In this dissertation, the hierarchical multi scale method is applied to predict the mechanical response of a carbon fiber reinforced plastics plain weave composite. The validity of the method is verified by comparison of the numerically obtained material response with experimental data at all scales. The advantages and limitations of this technique are discussed. An anisotropic damage material model which is required for this approach, is presented. It is shown that it is suitable to describe the material behavior of the constituents of the micro scale as well as unidirectional composites.

Zusammenfassung

Steigende Energiekosten erforden besonders im Mobilitäts- und Transportwesen effiziente Leichtbaukonstruktionen. Für solche Anwendungen werden faserverstärkte Kunststoffe immer wichtiger. Allerdings sind die Herausforderungen bei der Charakterisierung und Validierung neuer numerischer Kompositanalysemethoden sehr groß. Eine weitere wichtige Fragestellung betrifft die Zwickmühle, auf welcher Skala das Konstitutivgesetz das die mechanische Antwort der Werkstoffe beschreibt am geschicktesten eingesetzt werden soll. Die Vorhersage von gewobenen Faserverbundwerkstoffen, besonders im nichtlinearen bereich, ist nur dann möglich, wenn die intrinsische Struktur des Materials berücksichtigt wird. Deshalb müssen mehrere Skalen in betrachtet werden.

Behandelt man das Komposit als homogenes Material, durch den numerisch effizienten Makroskalenansatzes, gehen die physikalischen Zusammenhänge, hervorgerufen durch die Mikrostruktur, verloren, was die Komplexität für prädiktive Materialmodelle enorm steigert. Dahingegen fordert der Mesoskalenansatz, bei dem das Roving als effektives Material behandelt wird, erhöhten nuermisch Aufwand. Ausserdem wird ein komplexes Schädigungsmodell benötigt um die starkte Anisotropie des Rovings mit den richtungsabhängigen Schädigungsmechanismen abbilden zu können. Die genauere physikalische Darstellung der internen Struktur ist vorteilhaft . Das Materialmodell, das zur Beschreibung des Rovings herangezogen wird, muss vollständig charakterisiert werden. Die Charakterisierung kann mittels verifizierter mikromechanischer Analyse erfolgen. Auf der Mikroskala, die das Material auf der Ebene der Konstituenten (Faser und Matrix) beschreibt, können einfachere Materialmodelle verwendet, und die willkürliche Annahme über die Interaktion der Schädigungsmechanismen vermieden werden. Leider ist diese Methode mit großem numerischem Aufwand verbunden, und die Materialparameter der Konstituenten oft nicht bekannt.

In dieser Dissertation wird der hierarchische Mehrskalenansatz herangezogen, um das mechanische Verhalten eines Kohlenstofffaser leinwandgewebeverstärkten Komposites vorherzusagen. Die Gültigkeit der Methode ist durch experimentellen Abgleich auf jeder Skala verifiziert. Die Vorteile und Grenzen der Methode sind erläutert. Das für die Methode benötigte anisotrope Schädigungsmatialmodell ist dargestellt. Es wurde gezeigt, dass das Materialmodell sowohl für die Konstituenten als auch für das unidirektionale Komposit geeignet ist.

Contents