

Simulationsmodell zur Entstehung und Detektion von Schäden in Faserverbundstrukturen

Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg-Harburg
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von
Sebastian Guder

aus
Bad Segeberg

2016

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Otto von Estorff
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Karl Schulte

Tag der mündlichen Prüfung: 24.05.2016

Schriftenreihe des Instituts für
Modellierung und Berechnung der
Technischen Universität Hamburg-Harburg

Band 22

Sebastian Guder

**Simulationsmodell zur Entstehung und Detektion
von Schäden in Faserverbundstrukturen**

Shaker Verlag
Aachen 2016

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.

Zugl.: Hamburg-Harburg, Techn. Univ., Diss., 2016

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Otto von Estorff

Technische Universität Hamburg-Harburg
Institut für Modellierung und Berechnung
Denickestraße 17
21073 Hamburg

Telefon: 040/42878-3032
Fax: 040/42878-4353
E-Mail: estorff@tu-harburg.de
Internet: <http://www.mub.tu-harburg.de>

Copyright Shaker Verlag 2016

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4545-1

ISSN 1860-8221

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Diese Arbeit entstand im Rahmen eines geförderten Luftfahrtforschungsprojekts während meiner Tätigkeiten als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Modellierung und Berechnung der TUHH.

Für die Betreuung am Institut danke ich vor allem meinem Doktorvater Prof. Otto von Estorff. Nur durch seine Unterstützung, Motivation und Förderung konnte diese Arbeit entstehen. Es freut mich besonders, dass mit dem Zweitgutachter Prof. Karl Schulte und dem Vorsitzenden der Prüfungskommission Prof. Wolfgang Hintze zwei Professoren zum Abschluss der Arbeit beigetragen haben, die ich schon während meiner Zeit als Student im Rahmen von Hiwi-Tätigkeiten und Studienarbeiten kennenlernen konnte. Dafür meinen herzlichen Dank.

Für den inhaltlichen Austausch im Rahmen des Verbundprojekts danke ich den Industriepartnern Automation Technology und Lufthansa Technik. Zudem möchte ich mich für die Unterstützung auf fachlicher und freundschaftlicher Ebene bei meinen Forschungspartnern Alejandro Garcia und Henrik Schmutzler bedanken.

Meinen Kollegen am Institut danke ich für die tolle gemeinsame Zeit, die von gegenseitiger Zusammenarbeit in der Lehre über zahlreiche Projekte innerhalb und außerhalb des Campus reichte und schließlich im Abschluss dieser Arbeit für mich ihren Sidepunkt gefunden hat. Meinem Zellengenossen Malte Gehlken möchte ich besonderen Dank aussprechen.

Ich danke auch meinen Kollegen von phi, die mir den Einstieg in das industrielle Arbeitsumfeld sehr leicht gemacht und mich auf dem Weg zum Abschluss dieser Arbeit immer unterstützt haben.

Schließlich danke ich meinen Freunden und meiner Familie für die offenen Ohren, den gespendeten Rückhalt und die daraus resultierende Motivation, die mir geholfen hat alle Durststrecken zu überwinden. Der herzlichste Dank geht an Eti. Durch deine Liebe habe ich den Glauben an mich selbst immer wiedergefunden.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen	iii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Stand der Forschung	3
1.2.1 Kohäsivzonenmodelle	3
1.2.2 Aktive Thermographie	6
1.3 Zielsetzung und Vorgehensweise	11
2 Grundlagen	13
2.1 Delaminationssimulation mit einem Kohäsivzonenmodell	13
2.1.1 Schäden an Faserverbundstrukturen	13
2.1.2 Das Kohäsivzonenmodell	18
2.1.3 Diskretisierung des Modells	25
2.2 Thermographiesimulation bei Faserverbundstrukturen	45
2.2.1 Strahlungsphysik	45
2.2.2 Wärmeübertragung	49
2.2.3 Verfahren der aktiven Impulsthermographie	54
2.2.4 Wärmeübertragung in der Thermographie	56
2.2.5 Diskretisierung der Wärmeleitungsgleichung	59
3 Schädigungssimulation	71
3.1 Parameter der Kohäsivzone	71
3.1.1 Steifigkeit der Kohäsivzone	72
3.1.2 Länge der Kohäsivzone	74
3.2 Verifikation mittels 1-Element-Test	75
3.3 Modelle zur Untersuchung der Belastungsrichtung	78
3.3.1 Double cantilever beam - DCB	78

3.3.2	End-notched flexure - ENF	90
3.3.3	Mixed-mode bending - MMB	93
3.4	Diskussion der Ergebnisse	98
4	Thermographiesimulation	101
4.1	Modellaufbau für die Thermographie	101
4.2	Verifikation mit generischem Modell	103
4.2.1	Variation der Elementgröße	104
4.2.2	Variation des Zeitschritts	106
4.2.3	Variation des Wärmeübergangskoeffizienten	107
4.3	Modelle mit künstlichem Defekt	110
4.3.1	Defekt ohne Material	111
4.3.2	Defektmaterial Luft	115
4.3.3	Defektmaterial Teflon	116
4.4	Diskussion der Ergebnisse	120
5	Gesamtsimulation - Kombination der Modelle	123
5.1	Modellaufbau	123
5.2	Modell ohne Risswachstum	126
5.3	Modell mit Risswachstum	133
5.4	Diskussion der Ergebnisse	139
6	Zusammenfassung und Ausblick	141
	Literaturverzeichnis	143