

Vitali Bitykov

Numerische Versagensmodellierung von hybriden Verbindungsstrukturen zwischen Metallen und Faserverbundwerkstoffen

Numerische Versagensmodellierung von hybriden Verbindungsstrukturen zwischen Metallen und Faserverbundwerkstoffen

Vom Fachbereich Produktionstechnik

der

UNIVERSITÄT BREMEN

zur Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Vitali Bitykov

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Reinhold Kienzler
Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhfuß

Tag der mündlichen Prüfung: 14.12.2018

Berichte aus dem Bremer Institut für Strukturmechanik und
Produktionsanlagen

Band 1/2019

Vitali Bitykov

**Numerische Versagensmodellierung von
hybriden Verbindungsstrukturen zwischen
Metallen und Faserverbundwerkstoffen**

D 46 (Diss. Universität Bremen)

Shaker Verlag
Aachen 2019

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.: Bremen, Univ., Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2019

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6531-2

ISSN 2196-2391

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

Vorwort und Danksagung

Die Untersuchungen sowie Arbeiten zur Modellierung und Berechnung sind während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am „Bremer Institut für Strukturmechanik und Produktionsanlagen“ (bime), der Universität Bremen, im Fachgebiet „Technische Mechanik – Strukturmechanik“ (FB 4 / FG 15) vom November 2009 bis September 2014 im Rahmen der Forschergruppe „Schwarz-Silber“ (FOR1224) durchgeführt worden. Die schriftliche Ausarbeitung ist ohne unerlaubte fremde Hilfe angefertigt worden und es wurden dabei keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt. Dabei sind die aus den verwendeten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht worden.

An dieser Stelle möchte ich mich bei einer Vielzahl von Personen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Mein größter Dank gilt Prof. Dr.-Ing. habil. Reinhold Kienzler, der mich als wissenschaftlichen Mitarbeiter in den kleinen Kreis der Mechaniker aufgenommen hat. Ich möchte mich bedanken für eine ausgesprochen gute Zusammenarbeit, für die Chance mich mit dem Thema „Versagensmodellierung von hybriden Verbindungsstrukturen“ auseinander zu setzen, für die Möglichkeit mich in der universitären Lehre einzubringen und für seine stetige Unterstützung.

Ein weiterer ganz besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Frank Jablonski, der ganz wesentlich dazu beigetragen hat, dass diese Arbeit zustande gekommen ist. Sowohl die vielen fachlichen Diskussionen und Anregungen, als auch und insbesondere das hartnäckige Nachhalten sowie die uneingeschränkte Unterstützung, ließen die schriftliche Ausarbeitung wahr werden.

Ein großer Dank geht auch an meinen langjährigen Bürokollegen und inzwischen guten Freund Dr.-Ing. Patrick Schneider für seine uneingeschränkte Kollegialität, die eine oder andere Hilfestellung im Bereich Informatik und Mathematik

sowie seine (vergeblichen) Bemühungen die Mathematik weniger trocken und kompliziert aussehen zu lassen.

Auch allen weiteren (ehemaligen und aktuellen) Kollegen aus der Mechanik, insbesondere Dipl.-Ing. Roland Schröder, möchte ich für viele fachliche und sehr nichtfachliche Diskussionen sowie eine „besondere“ Arbeitsatmosphäre danken.

Darüber hinaus möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhfuß für sein Engagement als Zweitgutachter der Dissertation sowie den weiteren Mitgliedern des Prüfungsausschusses bedanken.

Meine Eltern, Othilia und Viktor Bitykov, dürfen in dieser Danksagung nicht unerwähnt bleiben. Sie haben mich in allen Belangen meines Werdegangs unterstützt und ich habe ihnen vieles zu verdanken.

Für das aufmerksame Korrekturlesen, obwohl völlig fachfremd, und den stetigen Ansporn es doch noch fertig zu kriegen bedanke ich mich bei meiner Schwester Maria.

Meine Kinder Dominik und Patrick bitte ich um Entschuldigung, dass ich ihnen so viel unserer gemeinsamen Zeit und meiner Aufmerksamkeit stehlen musste, um diese Arbeit fertig stellen zu können.

Zu guter Letzt möchte ich mich bei meiner wunderbaren Frau Tatjana Bitykov bedanken, die mich uneingeschränkt und jederzeit unterstützt, bestärkt und ermutigt hat. Durch ihre Hilfe und den stets freien Rücken konnte ich mich in den entscheidenden Momenten auf die Arbeit konzentrieren, wodurch diese auch ihr Verdienst ist.

Kurzzusammenfassung

Eine der Kernherausforderungen des modernen Leichtbaus ist der gezielte lokale Einsatz des für die jeweilige Aufgabe geeigneten Werkstoffs sowie die dafür notwendige werkstoffgerechte Verbindungstechnik. In der vorliegenden Arbeit werden drei verschiedene Konzepte für Verbindungsstrukturen zwischen Aluminium und Faserverbundwerkstoffen hinsichtlich ihres Versagensverhaltens betrachtet. Experimentelle Untersuchungen der Projektpartner in der DFG-Forscherguppe (FOR 1224) Schwarz-Silber bilden die Grundlage für die numerische Versagensmodellierung.

Es wird sowohl eine deterministische als auch eine probabilistische Modellierung auf Basis der Finiten-Elemente-Methode durchgeführt. Für die deterministischen Untersuchungen werden schädigungsmechanische Werkstoffbeziehungswise Versagensmodelle verwendet, um sowohl die Versagensinitiierung als auch den Versagensverlauf abzubilden. Aufgrund der komplexen Geometrien und des nicht standardmäßigen Werkstoffverhaltens sind hierfür Erweiterungen der Werkstoff- und Kontaktmodelle in das Programm ABAQUS implementiert worden. Zusätzlich ist eine neue Art der kontinuumsmechanischen Modellierung von trockenen Faserbündeln implementiert und validiert worden. Die probabilistischen Untersuchungen der Konzepte beruhen auf einem in der Arbeit entwickelten zweistufigen Ansatz. In diesem Ansatz wird durch die Überlagerung von deterministischen linear-elastischen FEM-Ergebnissen mit Verteilungsfunktionen für die lokalen Festigkeiten die lokale Versagenswahrscheinlichkeit berechnet. Anschließend werden diese lokalen Versagenswahrscheinlichkeiten zu Lastpfaden durch Reihen- und Parallelschaltungen zusammengesetzt, um eine globale Bruchwahrscheinlichkeit zu bestimmen.

Durch den Einsatz der deterministischen Simulationen kann das experimentell beobachtete Versagensverhalten abgebildet werden, was im Umkehrschluss erlaubt, dadurch z. B. numerisch indirekt lokale Festigkeiten zu bestimmen. Durch

Parametervariationen relevanter Werkstoffdaten können einige im Experiment beobachtete Ergebnisse, Phänomene und Eigenheiten abgebildet werden, was den Rückschluss auf Ursachen und Wirkungen sowie das Verbesserungspotenzial erlaubt.

Die vorgeschlagene probabilistische Modellbildung liefert sowohl qualitativ als auch quantitativ gute Ergebnisse. Eine detaillierte Analyse der Ergebnisse ist aufgrund der experimentellen Datenlage nicht durchgängig möglich, jedoch vielversprechend. Auch hier werden durch Parametervariationen entweder offensichtliche Schwachstellen oder das jeweilige Verbesserungspotenzial aufgezeigt.

Inhalt

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 1.1 | Motivation | 2 |
| 1.2 | Aufgaben und Ziele..... | 3 |
| 2 | Theoretische Grundlagen | 5 |
| 2.1 | Werkstoffmechanische Grundlagen..... | 5 |
| 2.1.1 | Werkstoffe | 5 |
| 2.1.2 | Hybride Werkstoffe und Strukturen | 12 |
| 2.1.3 | Werkstoffmodelle | 15 |
| 2.1.4 | Verbindungstechnik..... | 17 |
| 2.1.5 | Versagensmechanismen..... | 22 |
| 2.1.6 | Festigkeitshypothesen..... | 23 |
| 2.2 | Probabilistik | 28 |
| 2.2.1 | Funktionen in der Probabilistik | 29 |
| 2.2.2 | Probabilistische Berechnungsmodelle..... | 32 |
| 2.3 | Finite-Elemente-Methode | 38 |
| 2.3.1 | Finite Elemente | 39 |
| 2.3.2 | Modellierung des Werkstoffverhaltens | 41 |
| 2.3.3 | Lösungsmethoden..... | 47 |
| 3 | Probenbeschreibung | 51 |
| 3.1 | Drahtkonzept | 51 |
| 3.1.1 | Auszugsversuch | 54 |
| 3.1.2 | Reduzierte Schlaufen-Teilverbindung | 56 |
| 3.1.3 | Gesamtverbindung..... | 62 |
| 3.2 | Folienkonzept | 68 |
| 3.2.1 | Reduzierte Laminat-Teilverbindung..... | 69 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 3.2.2 | Reduzierte Schweiß-Teilverbindung..... | 72 |
| 3.2.3 | Gesamtverbindung..... | 75 |
| 3.2.4 | Statistische Auswertung..... | 78 |
| 3.3 | Faserkonzept..... | 79 |
| 3.3.1 | Problemstellungen aus dem Versuch..... | 81 |
| 3.3.2 | Gesamtverbindung..... | 83 |
| 4 | Modellierung..... | 85 |
| 4.1 | Deterministische Modellierung..... | 85 |
| 4.1.1 | Grenzschichtmodellierung..... | 85 |
| 4.1.2 | Materialmodellierung..... | 89 |
| 4.1.3 | Modellierung von trockenen Faserbündeln..... | 91 |
| 4.2 | Probabilistische Modellierung..... | 95 |
| 4.2.1 | Überlebenswahrscheinlichkeit für heterogene Systeme..... | 96 |
| 4.2.2 | Lokale Versagenswahrscheinlichkeit..... | 97 |
| 4.2.3 | Globale Versagenswahrscheinlichkeit..... | 98 |
| 4.2.4 | Berechnungsvorschrift..... | 99 |
| 4.3 | Finite-Elemente-Modelle..... | 101 |
| 4.3.1 | Drahtkonzept..... | 102 |
| 4.3.2 | Folienkonzept..... | 107 |
| 4.3.3 | Faserkonzept..... | 108 |
| 5 | Numerische Untersuchungen..... | 112 |
| 5.1 | Drahtkonzept..... | 112 |
| 5.1.1 | Auszugsversuch..... | 112 |
| 5.1.2 | Reduzierte Schlaufen-Teilverbindung..... | 117 |
| 5.1.3 | Gesamtverbindung..... | 119 |
| 5.1.4 | Temperaturuntersuchungen..... | 130 |
| 5.1.5 | Probabilistische Untersuchungen..... | 134 |
| 5.1.6 | Ergebnisdiskussion..... | 137 |
| 5.2 | Folienkonzept..... | 139 |
| 5.2.1 | Reduzierte Laminat-Teilverbindung..... | 139 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 5.2.2 | Reduzierte Schweiß-Teilverbindung..... | 143 |
| 5.2.3 | Gesamtverbindung..... | 147 |
| 5.2.4 | Probabilistische Untersuchungen..... | 147 |
| 5.2.5 | Ergebnisdiskussion..... | 153 |
| 5.3 | Faserkonzept..... | 154 |
| 5.3.1 | Modellierung über Verbindungselemente..... | 154 |
| 5.3.2 | Gesamtverbindung..... | 156 |
| 5.3.3 | Ergebnisdiskussion..... | 158 |
| 6 | Ergebnisse und Diskussion..... | 160 |
| 7 | Zusammenfassung und Ausblick..... | 166 |
| | Literatur..... | 168 |
| | Anhang A Proben- und Prüfbeschreibung..... | 181 |
| | Anhang B Modellierung..... | 182 |
| | Anhang C Numerische Untersuchungen..... | 186 |
