

**Ein Beitrag zur Abschätzung der Lebensdauer von
Faser-Kunststoff-Verbunden mit einer Erweiterung
der nicht-linearen, klassischen Laminattheorie**

Randeffekte, Methoden, Prüfung

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

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

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Alexandra J. Heislitz

aus Bad Soden am Taunus

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Helmut Schürmann

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Peter Horst

Tag der Einreichung: 20.10.2015

Tag der mündlichen Prüfung: 08.12.2015

D17

Schriftenreihe Konstruktiver Leichtbau mit
Faser-Kunststoff-Verbunden

Alexandra J. Heislitz

**Ein Beitrag zur Abschätzung der Lebensdauer von
Faser-Kunststoff-Verbunden mit einer Erweiterung
der nicht-linearen, klassischen Laminattheorie**

Randeffekte, Methoden, Prüfung

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

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.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2015

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 978-3-8440-4839-1

ISSN 1439-7390

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

Diese Arbeit entstand während meiner Beschäftigung als wissenschaftliche Mitarbeiterin am *Fachgebiet Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen* der *TU Darmstadt* unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Helmut Schürmann.

Ich danke Prof. Dr.-Ing. Schürmann für die fachliche Betreuung, die Bereitschaft immer wieder komplexe Zusammenhänge zu diskutieren und die Spielräume, eigene Ideen zu verfolgen.

Mein Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Peter Horst vom *Institut für Flugzeugbau und Leichtbau der TU Braunschweig* für die Übernahme des Korreferats und die Diskussion und den Austausch über die Problematiken in der Lebensdauerabschätzung von FKV.

Ebenso danke ich Herrn Dr.-Ing. Erich Blohberger (akademischer Direktor des *KLuB*). Ohne die gute Zusammenarbeit und seine Expertise wären die umfangreichen und teilweise ausdauernden experimentellen Untersuchungen nicht möglich gewesen.

Die Umsetzung der Konstruktionen für Fertigungswerkzeuge und Prüfstandeinrichtung erfolgte durch die Mitarbeiter der Metallwerkstatt. Allen voran Herrn Kötting (Leiter), aber auch allen seinen Mitarbeitern möchte ich für die präzise und problemlose Umsetzung danken. Die Probekörper sind durch die Unterstützung mit dem Faserverbundtechnikum entstanden. Wofür ich mich herzlich bei Herrn Dadak (Leiter) und Herrn Rosmann bedanken möchte.

Meinen Kollegen und vor allem meinen langjährigen Bürokollegen möchte ich für die gute Zusammenarbeit, Diskussionsbereitschaft, das Korrektorat und die angenehme Arbeitsatmosphäre am *KLuB* danken. Ich werde die Zeit mit euch nicht vergessen.

Ebenso danken möchte ich meinen Studenten, die sich mit eigenen Ideen und durch die Unterstützung bei Versuchen für die vorliegenden und andere Themen eingebracht haben.

Hofheim im September 2016

Alexandra Heislitz



Für meine Familie

Diese Arbeit ist ein Teil meines Wissens,
aber mein Leben seid ihr.

Ihr habt mich unterstützt und gefördert, kritisiert und
mit mir diskutiert, ihr habt mir in schweren Zeiten
Rückhalt geboten und euch in guten Zeiten mit mir
geföhrt. Dafür und für vieles mehr danke ich euch.



Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	VII
1. Einleitung	1
2. Faser-Kunststoff-Verbunde unter schwingender Beanspruchung	6
2.1. Eigenschaften und Einflüsse unter schwingender Beanspruchung	6
2.2. Versagensverhalten	13
2.2.1. Versagen bei statischen Lasten	13
2.2.2. Versagen bei zyklischen Lasten	16
3. Reduzierung von Randspannungen	23
3.1. Berechnung der Randspannungen	24
3.2. Dreidimensionale Festigkeitsanalyse zur Abschätzung der Delaminationsgefahr	28
3.3. Entstehung von Randlelaminationen	31
3.4. Vermeidung von Randlelaminationen	35
3.5. Gezielte Einbringung von Eigenspannungen mittels thermisch-mechanischem Verfahren	45
3.5.1. Auslegung des Vorkonditionierungszyklus	46
3.5.2. Experimentelle Untersuchungen zur Wirksamkeit der Vorkonditionierung	65
4. Abschätzung der Lebensdauer bei FKV-Laminaten	71
4.1. Berechnungsmodelle zur Lebensdauervorhersage	71
4.2. Erweiterung der nichtlinearen, klassischen Laminattheorie für schwingende Beanspruchungen	78
4.2.1. Berechnung der Schichtspannungen bei schwingender Beanspruchung	79
4.2.2. Festigkeitsanalyse für schwingende Beanspruchungen	85
4.2.3. Lebensdauerabschätzung am MSV	95
4.3. Berechnungsprogramm zur Abschätzung der Lebensdauer von FKV-Laminaten	98
4.4. Fazit und Ausblick	100
5. Experimentelle Untersuchung zur Validierung der Lebensdauerabschätzung	102
5.1. Kennwerte zur Bestimmung der Lebensdauer	104
5.2. Herstellung der Probekörper	108
5.2.1. Probekörperauswahl	111
5.2.2. Universelle Faserhaspeleinheit	112

5.3. Versuche mit Bruchmodusabhängigkeit	122
5.3.1. Prüfung	123
5.4. Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen	128
6. Zusammenfassung und Ausblick	132
6.1. Zusammenfassung	132
6.2. Ausblick	134
Betreute studentische Arbeiten	137
Literaturverzeichnis	139
Anhang	147