

Sensitivitätsanalyse des Vorspannkraftverlustes von einschnittigen Schraubenverbindungen für kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades
einer Doktorin der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von
Stephanie Dallmeier

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Feldhusen
Univ.-Prof. Dr.-Ing. K.-U. Schröder
Tag der mündlichen Prüfung: 25. Januar 2016

Schriftenreihe Produktentwicklung und Konstruktionsmethodik

Band 22

Stephanie Dallmeier

**Sensitivitätsanalyse des Vorspannkraftverlustes von
einschnittigen Schraubenverbindungen für
kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe**

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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2016)

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 978-3-8440-4467-6

ISSN 1438-4930

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

Die vorliegende Dissertationsschrift entstand während meiner Zeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl und Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus an der RWTH Aachen (ikt).

Mein Dank gilt zunächst meinem Doktorvater Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Feldhusen, der mir die Möglichkeit zur Promotion am ikt gegeben hat. Die zahlreichen Diskussionen und die gewährten Freiräume haben maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Außerdem danke ich Uni.-Prof. Dr.-Ing. K.-U. Schröder für die Übernahme des Koreferates und Uni.-Prof. Prof. h.c. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. T. Gries für die Übernahme des Vorsitzes der Promotionskommission.

Allen Kollegen des ikt möchte ich für die gemeinsame Zeit am Institut und deren Unterstützung in fachlichen und persönlichen Belangen danken.

Mein besonderer Dank gilt dabei den Kollegen aus der Forschungsgruppe Hybride Strukturen bzw. Multi-Material Strukturen: Christoph Warkotsch, Martin Benders, Benedikt Günther, Liliane Ngahane Nana, Anna-Lena Berger, Zhuzhell Montano und Jonathan Schmidt. Vielen Dank für die fachlichen Diskussionen und Impulse.

Besonderer Dank gilt ebenfalls meiner Familie: Meinen Eltern Silvia und Uwe und meiner Schwester Nora, die mich immer unterstützt und gefördert haben. Euch verdanke ich es, überhaupt so weit im Leben gekommen zu sein.

Meinem Boris danke ich für die in den letzten Jahren entgegengebrachte Unterstützung in allen Lebenslagen, der mir in der heißen Phase den Rücken frei gehalten hat und immer an mich geglaubt hat.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	2
1.2	Zielsetzung.....	2
1.3	Aufbau der Arbeit	3
2	Schraubenverbindung	5
2.1	Tragverhalten von Schraubverbindungen	6
2.2	Entstehung von Vorspannkraftverlust	14
2.2.1	Vorspannkraftverlust infolge Lockerns	14
2.2.2	Vorspannkraftverlust infolge selbsttätigem Losdrehens	18
2.3	Auslegung von Schraubenverbindungen in CFK.....	20
2.3.1	Einfluss der geometrische Verhältnisse auf die Tragfähigkeit	23
2.3.2	Einfluss des Laminataufbaus auf die Tragfähigkeit der Verbindung.....	24
2.3.3	Bedeutung der Vorspannung	26
2.4	Vorspannkraftverlust in FKV.....	27
2.5	Aufgabenstellung und Vorgehensweise	33
3	Lastfall	37
3.1	Versuchsaufbau	37
3.2	Untersuchungsfaktoren	38
3.2.1	Untersuchungsfaktoren der Fügepartner (CFK-Platten).....	39
3.2.2	Untersuchungsfaktoren der Verbindungselemente	44
3.2.3	Sonstige Untersuchungsfaktoren	48
3.3	Zielgröße.....	50
4	Sensitivitätsanalyse	51
4.1	Grundlagen der Statistik.....	52
4.2	Elementareffektanalyse nach MORRIS.....	55
4.3	Erzeugung des Versuchsplans.....	60
5	Das Finite Elemente Modell	63
5.1	Aufbau des FE-Modells.....	63
5.1.1	Modellierung der CFK-Platten	64
5.1.2	Modellierung der Schraube	67
5.1.3	Kontaktmodellierung	68
5.1.4	Randbedingungen.....	69

5.1.5	Aufbringung der Vorspannung	70
5.2	Materialkennwerte für das numerische Modell	71
5.3	Validierung des Modellierungsansatzes	75
6	Ergebnisse	79
6.1	Qualitative Auswertung des Verformungsverhaltens	79
6.1.1	Verformung der oberen Platte	79
6.1.2	Verformung der unteren Platte	83
6.2	Quantitative Betrachtung des Vorspannkraftverlustes	89
6.2.1	Konfigurationen mit dem geringsten Vorspannkraftverlust	89
6.2.2	Konfigurationen mit dem höchsten Vorspannkraftverlust	92
6.2.3	Zusammenfassung der quantitativen Betrachtung	95
6.3	Sensitivitätsmaße	96
6.3.1	Sensitivitätsmaße des Kurzzeitverhaltens	96
6.3.2	Sensitivitätsmaße des Langzeitverhaltens	100
6.4	Diskussion der Ergebnisse	104
7	Zusammenfassung und Ausblick	111
7.1	Zusammenfassung	111
7.2	Ausblick	112