

Lokale Spannungseffekte in Sandwichelementen mit diskontinuierlicher Kernschicht

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

vorgelegt von
Christoph Alexander Warkotsch

Berichter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Feldhusen
	Univ.-Prof. Dr.-Ing. C. Hopmann
Tag der mündlichen Prüfung:	03. Mai 2013

Schriftenreihe Produktentwicklung und Konstruktionsmethodik

Band 17

Christoph Alexander Warkotsch

**Lokale Spannungseffekte in Sandwichelementen
mit diskontinuierlicher Kernschicht**

Shaker Verlag
Aachen 2013

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, 2013)

Copyright Shaker Verlag 2013

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2386-2

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

Danksagung

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

Eine Dissertation ist wahrscheinlich niemals gänzlich das Werk eines Einzelnen. Ich möchte daher an dieser Stelle den Menschen danken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Meinen Eltern danke ich dafür, dass sie mir ermöglichten zu studieren, mich auf dem langen Weg bis zu diesem Punkt begleitet und damit überhaupt den Grundstein für die vorliegende Schrift gelegt haben.

Mein besonderer Dank gilt meiner lieben Frau Negi, die während der schwierigen Zeit der Entstehung dieser Dissertation stets an meiner Seite stand und mich immer mit großem Verständnis und unendlicher Geduld unterstützt hat. Ohne sie wäre diese Arbeit nie entstanden. Diese gemeinsame Erfahrung hat uns noch enger miteinander verbunden.

Bei der gesamten Mannschaft des ikt bedanke ich mich für die freundschaftliche und vertrauensvolle Arbeitsatmosphäre. Insbesondere hervorheben möchte ich an dieser Stelle meine Kollegen von der Hybride-Strukturen-Gruppe Sivakumara Krishnamoorthy, Martin Benders, Stephanie Dallmeier und Benedikt Günther.

Mein Dank gilt überdies Herrn Professor Feldhusen für die Betreuung dieser Arbeit sowie Herrn Professor Hopmann und Herrn Professor Moormann für die Übernahme des Koreferats bzw. die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

München im September 2013

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen, Abkürzungen und Indizes	IX
1 Einleitung.....	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Ziel der Arbeit.....	3
1.3 Gliederung	4
2 Die Sandwichbauweise.....	5
2.1 Aufbau und allgemeine Eigenschaften	5
2.2 Werkstoffe.....	6
2.3 Grundlagen der Sandwichtheorie.....	6
2.3.1 Die Biegesteifigkeit.....	8
2.3.2 Spannungen und Dehnungen	9
2.3.3 Verformungen	10
2.4 Ausdehnung lokaler Phänomene in Sandwichwerkstoffen.....	11
2.4.1 Örtlich konzentrierte Krafteinleitung	11
2.4.2 Prinzip von Saint-Venant.....	11
3 Ausgangssituation.....	13
3.1 Verbindungstechnik für Sandwichelemente nach KEMPF	13
3.2 Handlungsbedarf.....	15
3.3 Stand der Forschung im Bereich der Kerndiskontinuitäten	17
3.3.1 Untersuchungen eines Sandwichs mit Kernspalt	17
3.3.2 Untersuchungen anderer Kerndiskontinuitäten	19
3.4 Aufgabenstellung und Vorgehensweise	22
4 Lastfall	25
4.1 Drei-Punkt-Biegeversuch	25
4.2 Einflussgrößen	28
4.3 Untersuchungsfaktoren	29
4.3.1 Materialabhängige Untersuchungsfaktoren.....	30
4.3.2 Geometrische Untersuchungsfaktoren.....	32
4.3.3 Sonstige Untersuchungsfaktoren	34
4.3.4 Einflussbereiche von Lasteinleitung und Spalt.....	36
4.3.5 Kritische Last.....	37

4.4	Zielgrößen	41
4.4.1	Art der Zielgrößen	43
4.4.2	Lage der Zielgrößen und Koordinatensysteme	43
4.5	Übersicht über Untersuchungsfaktoren und Zielgrößen	46
5	Sensitivitätsanalyse	47
5.1	Statistische Grundlagen	48
5.2	Elementareffekt-Methode nach MORRIS	51
5.3	Generierung des Versuchsplans	56
6	Finite-Elemente-Modellierung	59
6.1	Aufbau des FE-Modells	59
6.2	Konvergenzanalyse	61
6.3	Validierung	62
7	Ergebnisse	67
7.1	Betrachtung des Kerns	68
7.1.1	Spannungsverläufe	68
7.1.2	Sensitivitätsmaße	76
7.2	Betrachtung der Deckschicht	86
7.2.1	Spannungsverläufe	86
7.2.2	Sensitivitätsmaße	94
7.3	Diskussion	103
8	Zusammenfassung und Ausblick	111
Anhang A	Ergänzungen zu Kapitel 4: Lastfall	115
Anhang B	Vollständiger Versuchsplan	121
	Literaturverzeichnis	128
	Abbildungsverzeichnis	133
	Tabellenverzeichnis	139