



Aachener Berichte aus dem Leichtbau

# Efficient Damage Detection and Assessment Based on Structural Damage Indicators

Andreas Preisler



Institut für  
Strukturmechanik  
und Leichtbau

**RWTH**AACHEN  
UNIVERSITY

# **EFFICIENT DAMAGE DETECTION AND ASSESSMENT BASED ON STRUCTURAL DAMAGE INDICATORS**

**EFFIZIENTE SCHADENSDETEKTION UND -BEWERTUNG  
BASIEREND AUF STRUKTURELLEN SCHADENSINDIKATOREN**

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

vorgelegt von

**Andreas Preisler**

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai-Uwe Schröder  
Univ.-Prof. DI Dr. Martin Schagerl

Tag der mündlichen Prüfung: 12. Dezember 2019

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar



Aachener Berichte aus dem Leichtbau  
herausgegeben von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai-Uwe Schröder

Band 1/2019

**Andreas Preisler**

**Efficient Damage Detection and Assessment  
Based on Structural Damage Indicators**

Shaker Verlag  
Düren 2020

**Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek**

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2019)

Copyright Shaker Verlag 2020

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7203-7

ISSN 2509-663X

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • e-mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Strukturmechanik und Leichtbau der RWTH Aachen im Zeitraum vom November 2013 bis zum August 2019. Sie baut auf mehrere kleinere und größere Projekte und Kooperationen im Forschungsfeld *Structural Health Monitoring* auf. Seit April 2018 wurde meine Arbeit von der Ford Motor Company mit dem Förderkennzeichen FA-0222 finanziert. Im Rahmen dieser erfolgreichen Kooperation entstanden die Untersuchungen an der GFK-Blattfeder (siehe Kapitel 8).

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai-Uwe Schröder. Ich danke für die vielen konstruktiven und fachlichen Diskussionen, die eingebrachten Ideen, für die stetige Förderung und Forderung auf fachlicher und menschlicher Ebene, den gegebenen Freiraum zur Umsetzung meiner Ideen und das damit verbundene Vertrauen.

Weiterhin möchte ich mich bei Univ.-Prof. DI Dr. Martin Schagerl bedanken. Mehrfach kreuzten sich unsere Wege auf Fachkonferenzen und führten zu interessanten wie auch angenehmen Diskussionen. Besonders wertvoll war für mich das umfangreiche und konstruktive Feedback im Rahmen unserer Kooperation.

Ebenso gilt meinen Dank den aktuellen und ehemaligen Kollegen am Institut. Die vielen gemeinsamen Diskussionen, sowohl fachlich als auch fachfremd, und auch die Aktivitäten abseits der Arbeitszeiten haben sehr zu einem positiven und angenehmen Arbeitsklima beigetragen.

Unterstützung habe ich auch von der Arbeitsgruppe smartSHM erfahren. Sie setzt sich zusammen aus Vertretern von zwölf Instituten der RWTH Aachen und drei Fraunhofer-Instituten. Im Rahmen dieser Arbeitsgruppe entstanden die Arbeiten an der geflochtenen Welle (siehe Kapitel 7). Ich bedanke mich für die erfolgreiche Zusammenarbeit, die vielen Diskussionen und Ideen.

Natürlich gilt meinen Dank auch meiner Familie, meiner Freundin und meinen Freunden. Ich habe viel Nachsicht und Unterstützung erfahren, während ich mich in meine Arbeit vertieft hatte. Ich danke für die offenen Ohren, die Ratschläge, die Durchführung von Schreibtreffs - aber auch für vergnügliche Ablenkungen.



## Kurzfassung

Die strukturelle Zustandsüberwachung (*Structural Health Monitoring* - SHM) stellt eine logische Konsequenz der schadenstoleranten Auslegungsphilosophie moderner Leichtbaustrukturen dar. Schäden müssen jedoch rechtzeitig detektiert werden bevor ein Ausmaß erreicht wird, das die Sicherheit im Betrieb gefährdet. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt wird die schadenstolerante Auslegung zumeist in Kombination mit regelmäßigen Inspektionen verwendet. Es entsteht somit eine Kompromissfindung zwischen der Gewichtsreduktion und den dazu benötigten Überwachungskosten. Ein System, das in der Lage ist, diese Schädigungen im Betrieb automatisiert zu detektieren und zu bewerten, ermöglicht einen wirtschaftlicheren Einsatz von Leichtbaustrukturen.

SHM ist ein seit Jahrzehnten wachsendes Forschungsfeld. Trotzdem haben bis heute nur wenige Systeme den Sprung vom Labor in die Anwendung geschafft. Die meisten Ansätze beschäftigen sich überwiegend mit der Detektion und Lokalisation von Schädigungen. Sie kämpfen mit dem Einfluss von Störeffekten und der Mehrdeutigkeit von Ergebnissen, speziell wenn es um die Bewertung identifizierter Schäden geht. Eine Korrelation des Messwerts zur Restfestigkeit fehlt in den allermeisten Fällen.

Diese Arbeit betrachtet das interdisziplinäre Thema SHM aus der Sichtweise der Strukturmechanik. Aus dieser Perspektive werden Richtlinien zum Entwurf eines modellbasierten SHM-Systems unter der Berücksichtigung des Einfluss des Schadens auf das Strukturverhalten hergeleitet. Sie münden in der Definition von so genannten strukturellen Schadensindikatoren: (1) die Dehnung auf der neutralen Faser bei Biegung, (2) die Dehnung in Nulldehnungsrichtung und (3) die Dehnung am Nulldehnungspunkt für Klebverbindungen. All diese Schadensindikatoren eint, dass im unbeschädigten Zustand keine Dehnung vorliegt. Bei einem Schaden wird jedoch eine signifikante Abweichung von Null gemessen. Die Höhe der gemessenen Dehnung korreliert mit der Schadensgröße und somit mit der Restfestigkeit. Die Validierung der strukturellen Schadensindikatoren erfolgt zunächst an einem Vierpunktbiegebalken, an einem einfachen Stab und an einer einschnittigen Klebeverbindung. Anschließend wird der Ansatz auf eine geflochtene Welle und einer Blattfeder, jeweils aus glasfaserverstärktem Kunststoff, übertragen.



## Abstract

Structural Health Monitoring (SHM) is a logical consequence of the damage tolerant design of modern lightweight structures. Damages must be detected before an extent is reached that endangers a structure's safety. Today's damage tolerant design is primarily used in combination with scheduled inspections. This results in a compromise between weight reduction and monitoring costs. An automated system that detects and evaluates damage during operation would significantly improve the economical use of lightweight structures.

SHM is a growing research field, but to date only a few systems have leapt from the laboratory to an actual application. The majority of approaches focus on the detection and localisation of damage. They struggle with the influence of disturbances and the ambiguity of results, especially when it comes to assessing the identified damage. A correlation of the measured value to the residual strength is entirely missing in the majority of cases.

This thesis considers the interdisciplinary topic SHM from the structural mechanical point of view. Guidelines for the design of a model-based SHM system are derived by considering the influence of the damage on the structural behaviour. This allows to define three structural damage indicators: (1) the strain on the neutral axis at bending, (2) the strain in zero-strain direction, and (3) the strain at the zero-strain point for adhesive joints. The structural damage indicators have in common that there is no strain in the undamaged state. In the case of damage, however, a significant deviation from zero-strain is measured. The magnitude of the strain correlates with the size of the damage and thus with the residual strength. The proposed structural damage indicators are first validated on a four-point bending beam, a simple truss, and a single lap adhesive joint. The approach is then transferred to a braided shaft and a leaf spring, each made of glass-fibre-reinforced plastics.



# Contents

<b>Nomenclature</b>	<b>ix</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Classification of different SHM approaches . . . . .	4
1.3 State of art . . . . .	6
1.4 Objective, scope and structure of this thesis . . . . .	10
<b>2 Concepts for damage detection</b>	<b>13</b>
2.1 Definitions and requirements . . . . .	13
2.2 Common sensor technologies . . . . .	15
2.2.1 Electrical strain gauge . . . . .	15
2.2.2 Piezoelectric sensors . . . . .	16
2.2.3 Fibre optical sensors . . . . .	17
2.3 Measurement concepts . . . . .	18
2.3.1 Strain-based methods . . . . .	18
2.3.2 Vibration-based methods . . . . .	19
2.3.3 Ultrasonic-based methods . . . . .	20
<b>3 Guidelines for a model-based SHM</b>	<b>23</b>
<b>4 Strain-based structural damage indicators</b>	<b>27</b>
4.1 Strain at the neutral axis . . . . .	28
4.2 Strain in zero-strain direction . . . . .	30
4.3 Strain at the zero-strain point . . . . .	33
<b>5 Level 4 monitoring of beam structures</b>	<b>35</b>
5.1 Bending-dominated load cases . . . . .	36
5.1.1 Test setup . . . . .	36
5.1.2 Test results . . . . .	38
5.1.3 Numerical model . . . . .	40
5.1.4 Numerical results . . . . .	41
5.1.5 Further considerations for damage assessments . . . . .	43
5.2 Tension-dominated load cases . . . . .	45
5.2.1 Numerical model . . . . .	46
5.2.2 Results of the numerical study . . . . .	46

5.2.3	Further considerations for damage assessment . . . . .	49
5.3	Arbitrary loaded beam structures . . . . .	50
<b>6</b>	<b>Level 4 monitoring of single-lap adhesive joints</b>	<b>55</b>
6.1	Numerical model . . . . .	55
6.1.1	Static model . . . . .	56
6.1.2	Fatigue model . . . . .	57
6.2	Results and discussion . . . . .	58
6.3	Manufacturing defects . . . . .	64
6.3.1	One-sided notch . . . . .	64
6.3.2	Void . . . . .	66
<b>7</b>	<b>Application of SDI on a braided GFRP shaft</b>	<b>69</b>
7.1	Monitoring concept . . . . .	70
7.2	Manufacturing process and test setup . . . . .	71
7.2.1	Manufacturing and sensor integration . . . . .	71
7.2.2	Damage introduction . . . . .	72
7.2.3	Torsional test . . . . .	74
7.3	Numerical model . . . . .	75
7.4	Validation . . . . .	76
7.4.1	Numerical results . . . . .	77
7.4.2	Test results . . . . .	78
7.5	Consideration of sensor misalignments . . . . .	79
<b>8</b>	<b>Application of SDI on an automotive GFRP leaf spring</b>	<b>85</b>
8.1	Monitoring concept . . . . .	86
8.2	Numerical model . . . . .	87
8.3	Results and discussion . . . . .	89
8.4	Consequences for the sensor layout . . . . .	92
8.5	Reading of a virtual sensor . . . . .	93
<b>9</b>	<b>Conclusion and outlook</b>	<b>97</b>
	<b>Bibliography</b>	<b>101</b>