A Fuzzy Arithmetical Approach to Finite Element Model Updating Applied to an Automotive Brake System

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.–Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Andreas Hanselowski
aus Sokuluk

Hauptberichter:	Prof. Dr.–Ing. Michael Hanss
Mitberichter:	Prof. Thierry Tison

Tag der Mündlichen Prüfung: 20. Januar 2017

Institut für Technische und Numerische Mechanik
der Universität Stuttgart

2017

Schriften aus dem Institut für Technische und Numerische Mechanik der Universität Stuttgart

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Peter Eberhard

Band 50/2017

Andreas Hanselowski

A Fuzzy Arithmetical Approach to Finite Element Model Updating Applied to an Automotive Brake System

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Aachen 2017

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.: Stuttgart, Univ., Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017
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 978-3-8440-5237-4
ISSN 1861-1651

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen
Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9
Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Dissertationsschrift entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Technische und Numerische Mechanik der Universität Stuttgart und umfasst die wesentlichen Inhalte meiner Forschungsarbeit in dieser Zeit. Unterstützt wurde diese Arbeit von vielen Kollegen, aber auch von Leuten außerhalb des Instituts, und ich möchte an diese Stelle allen Beteiligten meinen Dank aussprechen.

Als Erstes würde ich mich gerne bei Prof. Michael Hanss bedanken, der mich im Laufe meine Promotion als Betreuer begleitet hat. Viele anregende Diskussionen mit ihm haben die Arbeit entscheidend geprägt. Ich danke ihm für den freundlichen und offenen Umgang und für die Freiheit, auch meine eigenen Forschungsineteressen während der Promotion verfolgen zu können. Mein Dank gilt auch Prof. Thierry Tison, der freundlicherweise den Mitbericht für diese Arbeit übernommen hat. Seine hilfreichen Ratschläge hatten auch einen Einfluss auf die Arbeit. Bedanken möchte ich mich auch bei Prof. Peter Eberhard, der als Leiter des Instituts mir die Möglichkeit gegeben hat, am Institut promovieren zu können und während dieser Zeit mich auch unterstützt hat.

Des Weiteren möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des Instituts bedanken, die mir bei meiner Forschungsarbeit mit Rat und Tat zur Seite standen. Besonderer Dank gilt hier Sebastian Ihrle, dessen Forschungsarbeit als Inspiration für meine Arbeit gedient hat, und Pascal Bestle, der mich beim praktischen Teil der Arbeit unterstützt hat. Neben den Kollegen haben auch viele Studenten zu meiner Arbeit beigetragen, denen ich auch meinen Dank aussprechen möchte. Nicht zuletzt möchte ich mich auch bei meinen Eltern bedanken, deren Rückhalt und Unterstützung mir wichtig sind und denen auch diese Arbeit gewidmet ist.

Spaichingen, im März 2017 Andreas Hanselowski

Meinen Eltern

Contents

Symbols and Abbreviations XI
Zusammenfassung XV
Abstract XVII

1 Introduction **1**
1.1 State of the Art 3
1.2 Goal and Content of this Thesis 5

2 Theoretical Background **9**
2.1 Uncertainty Classification 9
2.1.1 Aleatory Uncertainty 9
2.1.2 Epistemic Uncertainty 10
2.2 Statistical Modeling 11
2.2.1 Maximum Likelihood Estimation 12
2.2.2 Bayesian Estimation 13
2.2.3 Entropy as a Measure of Uncertainty 15
2.3 Fuzzy Arithmetic 16
2.3.1 Forward Uncertainty Analysis 17
2.3.2 Inverse Uncertainty Analysis 23

3 Epistemic Uncertainty Representation **33**
3.1 Discrete Distributions 34
3.1.1 Relation Between the Fuzzy Number and the Discrete Distribution 35
3.1.2 Computational Operations with Fuzzy Numbers which are Based on Discrete Distributions 41

3.2 Continuous Representations of Uncertainty 45
3.2.1 Derivation of Fuzzy Numbers from Continuous Distributions of Epistemic Information 46
3.2.2 Exemplary Problems of Encoding Continuous Epistemic Information into Fuzzy Numbers 52
3.2.3 Mergence of Fuzzy Numbers Based on Continuous Information . . . 56

4 Analysis of Epistemic Uncertainty 65
4.1 Forward Uncertainty Analysis 65
4.1.1 Monotonic One-Parameter Problems 66
4.1.2 The General Forward Problem 70
4.2 Inverse Uncertainty Analysis 79
4.2.1 Different Formulations of the Inverse Fuzzy Arithmetic for the Analysis of Various Types of Inverse Problems 80
4.2.2 Differentiated Inverse Fuzzy Arithmetic 87
4.2.3 Numerical Experiments 97
4.2.4 Model Selection 107
4.3 Inverse Uncertainty Analysis Including Prior Information 117
4.3.1 Fuzzy Bayesian Estimation 118
4.3.2 Numerical Example 121
4.3.3 Model Selection on the Basis of Bayesian Inference 125

5 Model Updating of a Brake Disc 133
5.1 Experimental Modal Analysis 133
5.1.1 Experimental Setup 134
5.1.2 Modal Analysis 135
5.2 Finite Element Brake-Disc Model 138
5.3 Estimation of the Uncertain Parameters on the basis of DIFA and FBE . . 140
5.3.1 Preliminary Analysis 143
5.3.2 Full Analysis 149
5.3.3 Final Remarks 155

6 Conclusion and Outlook **157**

Appendix **161**

A.1 Measured Eigenmodes from 7 to 14 162

A.2 Simulated Eigenmodes from 7 to 14 163

Literature **165**