

# Optimierung und Robustheitsbewertung in der Simulation mechanischer Systeme

Dissertation  
zur Erlangung des akademischen Grades  
doctor rerum naturalium  
(Dr. rer. nat.)

an der Fakultät Bauingenieurwesen  
der Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von:

Markus Könning, geboren am 10.10.1977 in Stadtlohn,  
aus: Stuttgart

Gutachter: 1. Prof. Dr.techn. Christian Bucher  
2. Prof. Dr. rer. nat. Ottmar Beucher  
3. Prof.em. Dr. rer. nat. Lorenz Hempel

Tag der Disputation: 30. November 2007



Industriemathematik und Angewandte Mathematik

**Markus Könning**

**Optimierung und Robustheitsbewertung  
in der Simulation mechanischer Systeme**

Shaker Verlag  
Aachen 2008

**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.: Weimar, BU, Diss., 2007

Copyright Shaker Verlag 2008

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-7436-8

ISSN 1615-6390

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

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

„Immer soll nach Verbesserung des bestehenden Zustands gestrebt werden, keiner soll mit dem Erreichten sich zufrieden geben, sondern stets danach trachten, seine Sache noch besser zu machen.“

(Robert Bosch)



# Danksagung

An dieser Stelle danke ich allen, die mir während meiner Promotionszeit im zentralen Bereich der Forschung und Vorausbildung der Robert Bosch GmbH mit Rat und Tat zur Seite standen und zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr. techn. Christian Bucher für das Vertrauen, dass er mir bei der Betreuung der Promotion entgegengebracht hat, und der stetigen Hilfsbereitschaft. Des Weiteren gilt mein besonderer Dank Herrn Prof. Dr. Ottmar Beucher. Sein stetes Interesse am Fortgang der Arbeit und die regelmäßigen mathematischen Diskussionen und Hilfestellungen machten den erfolgreichen Abschluss der Arbeit erst möglich. Herrn Prof. em. Dr. Lorenz Hempel danke ich für sein Interesse und seine Begutachtung der Arbeit.

Aus dem Hause Robert Bosch GmbH danke ich recht herzlich meinen Betreuern Herrn Dipl.-Ing. Henning Kreschel und Herrn Dipl.-Ing. Roland Schirmacher für Anregungen, die fachkundige Unterstützung sowie die unzähligen wertvollen Diskussionen. Meinen anderen Kollegen und Kolleginnen danke ich ebenfalls für die angenehme und freundschaftliche Arbeitsatmosphäre. Eine enge und gute Zusammenarbeit bestand außerdem zur Dynardo GmbH in Weimar. Den Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen danke ich ebenfalls für anregende fachliche Diskussionen und die freundschaftliche Atmosphäre, die meine Weimar-Besuche unvergessen machen.

Meinen Eltern danke ich für die Förderung und Unterstützung während meiner gesamten Schul- und Studienzeit. Nicht zuletzt möchte ich mich bei meiner Frau Judith und meiner kleinen Tochter Emma für ihre unermüdliche moralische Unterstützung und Motivation, ihre unendliche Geduld und ihr Verständnis während der Entstehung dieser Arbeit ganz herzlich bedanken.

Stuttgart, im Juni 2008

Markus Könning



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Einführende Beispiele . . . . .	3
1.1.1	Biegebalken . . . . .	3
1.1.2	PKW-Bremsscheibe . . . . .	5
1.2	Motivation . . . . .	7
1.3	Ziel der Arbeit . . . . .	8
1.4	Abgrenzung der Arbeit . . . . .	9
1.5	Begriffserläuterungen und Notationen . . . . .	9
1.5.1	Begriffserläuterungen . . . . .	9
1.5.2	Notationen . . . . .	10
1.5.3	Abkürzungen . . . . .	12
<b>2</b>	<b>Stand der Technik in der Optimierung und der Robustheitsbewertung</b>	<b>13</b>
2.1	Optimierung . . . . .	13
2.1.1	Behandlung von Restriktionen . . . . .	16
2.1.2	Klassifizierung der Optimierungsverfahren . . . . .	19
2.1.3	NLPQL-Verfahren . . . . .	21
2.1.4	(Adaptives) Antwortflächenverfahren . . . . .	22
2.1.5	Evolutionäre Algorithmen . . . . .	25
2.2	Vergleich von Optimierungsverfahren . . . . .	27
2.2.1	Einstellungen der Verfahren . . . . .	27
2.2.2	Ackley-Funktion . . . . .	29
2.2.3	Rosenbrock-Funktion . . . . .	31
2.2.4	Six-hump Camel-Funktion . . . . .	32

## Inhaltsverzeichnis

2.2.5	Zusammenfassung des Vergleichs . . . . .	33
2.3	Stochastik . . . . .	34
2.3.1	Methoden zur Bewertung der Robustheit . . . . .	35
2.3.2	Methoden zur Bewertung der Zuverlässigkeit . . . . .	39
2.3.3	Vergleich der Verfahren . . . . .	44
2.4	Robuste Optimierung . . . . .	50
2.4.1	Taguchi-Ansatz . . . . .	51
2.4.2	Methoden aus der Theorie der Strukturzuverlässigkeit . . . . .	53
2.4.3	Mathematische Methoden . . . . .	54
<b>3</b>	<b>Klassifizierung</b>	<b>57</b>
3.1	Verschiedene Anwendungsbeispiele . . . . .	58
3.1.1	Biegebalken . . . . .	58
3.1.2	Biegebalken II . . . . .	61
3.1.3	PKW-Bremsscheibe . . . . .	63
3.1.4	Schlagkette des Bohrhammers . . . . .	67
3.1.5	2D-Wischgummi-Modell . . . . .	68
3.1.6	Wischarm-Konzept . . . . .	72
3.2	Zuordnung der Optimierungsverfahren . . . . .	73
<b>4</b>	<b>Kombination von Optimierung und Robustheit</b>	<b>77</b>
4.1	Optimierungsverfahren . . . . .	77
4.1.1	Allgemeines Richtungssuchverfahren . . . . .	78
4.1.2	Dreiecksmethode . . . . .	79
4.1.3	Behandlung von Restriktionen . . . . .	84
4.1.4	Herleitung der Matrix $Mat_n$ . . . . .	84
4.1.5	Konvergenz der Dreiecksmethode . . . . .	87
4.1.6	Zufällige Rotation der Richtungen . . . . .	98
4.1.7	Auswirkungen auf die Konvergenz durch Restriktionen . . . . .	99
4.1.8	Anmerkungen zur Konvergenz der Dreiecksmethode . . . . .	101
4.1.9	Vergleich mit anderen Verfahren . . . . .	101
4.2	Robustheit . . . . .	103
4.2.1	Bestimmung der $c$ -Robustheit . . . . .	105
4.2.2	Behandlung von mehreren Restriktionen . . . . .	107

4.2.3	Konfidenzmethode vs. zuverlässigkeitsbasierte Verfahren . . . . .	108
4.3	Kombination . . . . .	109
4.3.1	Vorüberlegung zur robusten Optimierung . . . . .	109
4.3.2	Einbinden der Robustheitsbewertung . . . . .	110
<b>5</b>	<b>Anwendung der robusten Optimierung</b>	<b>113</b>
5.1	Anwendung - Biegebalken . . . . .	113
5.1.1	Problembeschreibung . . . . .	113
5.1.2	Ergebnisse der Optimierung . . . . .	115
5.1.3	Ergebnisse der robusten Optimierung . . . . .	118
5.1.4	Robuste Optimierung vs. Dreiecksmethode & FORM . . . . .	121
5.2	Anwendung - PKW-Bremsscheibe . . . . .	123
5.2.1	Problembeschreibung . . . . .	123
5.2.2	Ergebnisse der Optimierung . . . . .	124
5.2.3	Ergebnisse der robusten Optimierung . . . . .	126
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung / Ausblick</b>	<b>131</b>
6.1	Zusammenfassung . . . . .	131
6.2	Ausblick . . . . .	132
<b>A</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>135</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>139</b>