



Paralleles Simulationskonzept für zeitabhängige Zuverlässigkeitsanalysen bei stochastischen Ermüdungsprozessen

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen
der Ruhr-Universität Bochum zur Erlangung
des Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.) genehmigte

Dissertation

von

Andrés Wellmann Jelic

Ruhr-Universität Bochum
Bochum, im Februar 2007

Schriftenreihe des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau

Herausgeber:
Geschäftsführender Direktor des
Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau
Ruhr-Universität Bochum

Heft 2007-2

Andrés Wellmann Jelic

**Paralleles Simulationskonzept für zeitabhängige
Zuverlässigkeitsanalysen bei stochastischen
Ermüdungsprozessen**

Shaker Verlag
Aachen 2007

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.: Bochum, Univ., Diss., 2007

Copyright Shaker Verlag 2007

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-6022-4

ISSN 1614-4384

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

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2002 bis 2006 während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Ingenieurinformatik im Bauwesen an der Ruhr-Universität Bochum und wurde von der Fakultät für Bauingenieurwesen als Dissertation angenommen. Die inhaltlichen Schwerpunkte dieser Arbeit ergaben sich aus meiner wissenschaftlichen Mitarbeit im Sonderforschungsbereich 398 „Lebensdauerorientierte Entwurfskonzepte unter Schädigung- und Deteriorationsaspekten“. Daher möchte ich der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Finanzierung meiner wissenschaftlichen Tätigkeit im Rahmen dieses Forschungsprojekts danken.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Dietrich Hartmann für die Anregung zu dieser Arbeit, seine wissenschaftliche Betreuung sowie seine persönliche Unterstützung während meines lehrreichen Aufenthalts an seinem Lehrstuhl. Herrn Prof. Dr.-Ing. Yuri Petryna danke ich für die freundliche Übernahme des Koreferats und für das rege Interesse an der vorliegenden Arbeit. Für seine Tätigkeit als fachfremder Gutachter danke ich Herrn Professor Dr.-Ing. Wolfgang Willems.

Darüber hinaus danke ich allen Kollegen am Lehrstuhl für Ingenieurinformatik für ihre stete Hilfsbereitschaft. In diesem Zusammenhang möchte ich besonders meine Kollegen Jochen Bilek, Ingo Mittrup, Matthias Baitsch und Mozes Gálffy hervorheben, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Mein Dank gebührt auch Tobias Pfister und Alexander Lichius, die mich mit zahlreichen fachlichen Diskussionen und dem sorgfältigen Korrekturlesen dieser Arbeit unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt meiner Ehefrau Gerburg für ihre Geduld und durchgehende Unterstützung während der Fertigstellung dieser Arbeit. Schließlich danke ich vor allem meinen Eltern, die mich immer in jeder Hinsicht unterstützt haben, so dass sie die Voraussetzungen für diese Arbeit geschaffen haben.

Bochum, im Februar 2007

Andrés Wellmann Jelic

Tag der Einreichung: 27.10.2006

Tag der mündlichen Prüfung: 26.01.2007

- | | |
|--------------|--|
| 1. Gutachter | Prof. Dr.-Ing. D. Hartmann
Lehrstuhl für Ingenieurinformatik, Ruhr-Universität Bochum |
| 2. Gutachter | Prof. Dr.-Ing. Y. Petryna
Fachgebiet Statik und Dynamik, TU Berlin |

Meinen Eltern gewidmet

Dedicado a mis padres

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung und Motivation	1
1.2	Ziele der Arbeit	5
1.3	Aufbau der Arbeit	6
2	Lebensdauerorientierte Entwurfstrategien	9
2.1	Schadensfälle infolge Materialermüdung	9
2.2	Berücksichtigung der Tragwerkszuverlässigkeit im Entwurf	11
2.3	Lebensdauerorientierter Entwurf in den Normen	13
2.4	Stand der Forschung	17
2.4.1	Literatur	17
2.4.2	Sonderforschungsbereich 398	21
2.5	Zuschärfung der Arbeitsziele	24
3	Modellierung der Materialermüdung	25
3.1	Theoretische Grundlagen des Ermüdungsphänomens	25
3.1.1	Ermüdungsverhalten von Baustahl	26
3.1.2	Empirische Ermüdungskennwerte	28
3.1.3	Einflussgrößen der Kennwerte	30
3.2	Konzepte für Schädigungsberechnungen	31
3.2.1	Spannungsbasierte Nachweiskonzepte	32
3.2.2	Dehnungsbasierte Nachweiskonzepte	35
3.2.3	Rissfortschrittskonzept	36
3.3	Ermüdung unter mehrstufiger Belastung	37
3.3.1	Zählverfahren	37
3.3.2	Betriebsfestigkeitsversuche	39

3.3.3	Akkumulationshypothesen	39
3.3.4	Reihenfolgeeffekte	42
3.4	Vergleich der Konzepte	44
3.5	Ausblick auf aktuelle Forschungsschwerpunkte	45
4	Stochastische Aspekte in der Entwurfsphase	49
4.1	Modellierung von Unsicherheiten	49
4.2	Probabilistische Modellierung der Einwirkungen	52
4.2.1	Trennung der Zeitskala	52
4.2.2	Verkehrslasten	53
4.2.3	Windlasten	57
4.3	Probabilistische Modellierung der Widerstandsparameter	64
4.3.1	Erweiterung der Betriebsfestigkeitskonzepte	65
4.3.2	Erweiterung der Akkumulationshypothese	69
4.4	Lösungsmethoden für Zuverlässigkeitsprobleme	71
4.4.1	Mathematische Definition der Zuverlässigkeit	71
4.4.2	Stand der Forschung – Zeitinvariante Probleme	73
4.4.3	Stand der Forschung – Zeitvariante Probleme	77
5	Parallelisierung der Berechnungen	81
5.1	Theoretische Grundlagen	81
5.1.1	Klassifikation von Parallel-Architekturen	82
5.1.2	Parallele Leistungsmetriken	84
5.2	Prozesskommunikation bei verteilten Systemen	85
5.2.1	Verwendung des Message Passing Interface (MPI)	86
5.2.2	Einsatz von Agententechnologien	87
5.3	Parallelisierung der Lebensdaueranalyse	91
5.3.1	Aufteilung des Mikrozeitbereichs	92
5.3.2	Aufteilung des Makrozeitbereichs	93
6	Softwaresystem für Lebensdaueranalysen	99
6.1	Anforderung an die Software	99
6.2	Konzept einer eigenen Softwarelösung	101
6.2.1	Objektorientierte Softwaretechniken	101

6.2.2	Modul <i>RandomVariables</i>	103
6.2.3	Modul <i>FatigueAnalysis</i>	106
6.2.4	Modul <i>WindProcess</i>	111
6.2.5	Modul <i>ReliabilityAnalysis</i>	114
6.2.6	Modul <i>TimevariantReliabilityAnalysis</i>	116
6.3	Prototypische Implementierung	119
6.3.1	Umsetzung des eigenen Softwareentwurfs	119
6.3.2	Verwendung externer Softwaremodule	122
6.3.3	Testen der Implementierung	123
6.3.4	Betrachtung der Prozesseffizienz	125
6.4	Bewertung des Softwarekonzepts	127
7	Anwendungsbeispiele	129
7.1	Stahlrahmen mit Lasten aus Brückenkranfahrten	129
7.1.1	Problemdefinition	129
7.1.2	Simulation im Mikrozeitbereich	130
7.1.3	Simulation im Makrozeitbereich	133
7.1.4	Betrachtung der Rechenzeiten	138
7.2	Hängerstange einer Bogenbrücke unter Windlast	140
7.2.1	Problemdefinition	140
7.2.2	Simulation im Mikrozeitbereich	141
7.2.3	Simulation im Makrozeitbereich	147
7.2.4	Betrachtung der Rechenzeiten	151
8	Zusammenfassung und Ausblick	153
8.1	Zusammenfassung der Arbeit	153
8.2	Bewertung der Ergebnisse	154
8.3	Ausblick	155
	Literaturverzeichnis	157