

Aufwandsreduzierungen in der Fast-Multipole-Boundary-Elemente- Methode

Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg-Harburg
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von
Sören Keuchel

aus
Braunschweig

2016

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Otto von Estorff
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Kropp

Tag der mündlichen Prüfung: 16.11.2016

Schriftenreihe des Instituts für
Modellierung und Berechnung der
Technischen Universität Hamburg-Harburg

Band 24

Sören Keuchel

**Aufwandsreduzierungen in der
Fast-Multipole-Boundary-Elemente-Methode**

Shaker Verlag
Aachen 2017

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.: Hamburg-Harburg, Techn. Univ., Diss., 2016

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Otto von Estorff

Technische Universität Hamburg-Harburg
Institut für Modellierung und Berechnung
Denickestraße 17
21073 Hamburg

Telefon: 040/42878-3032
Fax: 040/42878-4353
E-Mail: estorff@tu-harburg.de
Internet: <http://www.mub.tu-harburg.de>

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5045-5
ISSN 1860-8221

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 Dissertation entstand im Rahmen des „Verbundprojektes Leiser Straßenverkehr 3“ während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Modellierung und Berechnung der Technischen Universität Hamburg-Harburg.

Ein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr. Otto von Estorff, der mich stets unterstützt hat und mir in jeder Situation helfen konnte. Zudem möchte ich mich sehr bei Prof. Dr. Wolfgang Kropp für die Übernahme des Zweitgutachtens und die lehrreiche Zeit während des gemeinsamen Forschungsprojektes bedanken. Prof. Dr. Alexander Düster danke ich sehr herzlich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Für die enge Zusammenarbeit im Forschungsprojekt bedanke ich mich beim Institut für Angewandte Mathematik der Leibniz Universität Hannover und dem Institut Applied Acoustics der Chalmers Universität Göteborg. Auf fachlicher und persönlicher Ebene gilt mein besonderer Dank Carsten Hoever, der auch in den fordernden Zeiten des Projektes immer für eine positive Stimmung gesorgt hat.

Außerdem bedanke ich mich ganz herzlich bei meinen Kollegen vom Institut für Modellierung und Berechnung. Besonders hervorzuheben sind dabei Jan Biermann und Malte Gehlken, die beide zunächst Studienarbeiten von mir betreuten und später, zur Zeit als Mitarbeiter, meine Forschungstätigkeiten stark beeinflusst haben. Für den sportlichen Ausgleich zur Arbeit möchte ich mich bei Kristof Heitmann und Sebastian Guder bedanken.

Zudem gilt ein großer Dank den Studenten, die bei mir eine Studienarbeit geschrieben haben oder mich als HiWi unterstützt haben. Die gemeinsame Arbeit, die auch meine Dissertation positiv beeinflusste, hat mir stets Spaß gemacht.

Auch den neuen Kollegen von Novicos danke ich für die tolle Aufnahme im Unternehmen. Durch das neue Umfeld konnte ich die notwendige Motivation für den letzten Abschnitt meines Promotionsverfahrens sammeln.

Der letzte und wichtigste Dank gilt meinen Eltern, meiner Familie und meinen Freunden für die tolle Unterstützung in jeder Lebenslage. Ohne meine Frau Annika und meine Tochter Lara, die sich während des Verfassens meiner Doktorarbeit angekündigt hatte, hätte ich die Arbeit sicherlich nicht so konsequent fertiggestellt.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen	v
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Stand der Forschung	3
1.3 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	9
2 Grundlagen der Boundary-Elemente-Methode zur Akustiksimulation	13
2.1 Helmholtz-Gleichung	13
2.2 Randintegralgleichung	15
2.3 Diskretisierung	19
2.3.1 Ansatzfunktionen	19
2.3.2 Geometriebeschreibung	21
2.4 Aufbau des Gleichungssystems	23
2.5 Numerische Integration	25
2.6 Lösungsverfahren	27
3 Fast-Multipole-Boundary-Elemente-Methode	29
3.1 Grundgleichungen der Fast-Multipole-Methode	31
3.2 Umsetzung des Verfahrens	35
3.2.1 Hierarchische Baumstruktur	35
3.2.2 Adaptive Entwicklungslänge	36
3.2.3 Ablauf des Algorithmus	40
3.3 Halbraum-Formulierung	43
3.3.1 Nahfeld	46
3.3.2 Fernfeld	47
3.4 Verifizierung	48

4	Diskontinuierliche Elemente beliebiger Ordnung	51
4.1	Elementtypen	53
4.1.1	Vierecke	53
4.1.2	Dreiecke	54
4.2	Spezielle Integrationsroutinen	57
4.2.1	Hypersinguläre Integration	58
4.2.2	Quasi-singuläre Integration	62
4.3	Ergebnisse	64
4.3.1	Innenraumproblem	64
4.3.2	Außenraumberechnung	69
4.3.3	Quasi-singuläre Integrale	74
5	Adaptive Verfeinerung	77
5.1	h-Methode	78
5.2	p-Methode	79
5.3	hp-Methode	81
5.4	A-posteriori Fehlerschätzer	82
5.4.1	Knotenbasierte Abschätzung	83
5.4.2	h-h/2 und p-p+1 Methode	85
5.5	Algorithmus	86
5.6	Ergebnisse	88
5.6.1	Vergleich der Fehlerindikatoren und hp-Algorithmen	88
5.6.2	Frequenzanalyse der hp-Verfeinerung	91
6	Schnelle Gleichungslöser	95
6.1	Iterative Lösungsverfahren	96
6.2	Krylov-Unterraumverfahren	98
6.2.1	Generalized Conjugate Residual	99
6.2.2	Generalized Minimal RESidual	100
6.2.3	Verfahren mit Restart	101
6.3	Krylov Subspace Recycling	102
6.3.1	Konzept des inneren Löasers	103
6.3.2	Subspace Recycling mit Generalized Conjugate Residual with inner Orthogonalization	104

6.3.3	Generalized Conjugate Residual with inner Orthogonalization and Deflated Restart	107
6.3.4	Generalized Conjugate Residual with inner Orthogonalization and optimal Truncation	109
6.4	Ergebnisse	111
6.4.1	Reifen-Rollgeräuschberechnung	112
6.4.2	Simulation eines Fahrzeuginnenraums	116
6.5	Diskussion	122
7	Zusammenfassung	125
A	Taylor-Reihenentwicklung des hypersingulären Integranden	129
	Literaturverzeichnis	133