Modellordnungsreduktion für substrukturierte mechanische Systeme

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

von
Philip Holzwarth
aus Sindelfingen

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Peter Eberhard
Mitberichter: Prof. dr.ir. Daniel J. Rixen

Tag der mündlichen Prüfung: 10. Februar 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 51/2017

Philip Holzwarth

Modellordnungsreduktion für substrukturierte mechanische Systeme

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

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.: Stuttgart, Univ., Diss., 2017

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 978-3-8440-5234-3
ISSN 1861-1651

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

Started from the bottom now we‘re here...

Bei meinem ersten Kontakt mit dem Institut für Technische und Numerische Mechanik war ich Student des Maschinenwesens und ganz am Anfang meiner akademischen Ausbildung. Die Vorlesungen von Prof. Peter Eberhard und die dazugehörigen Übungen waren für mich von Beginn an etwas Besonderes. Durch viele Vorlesungen, Hiwitätigkeiten, einer Studien- und einer Diplomarbeit lernte ich das ITM nach und nach immer besser kennen. Neben den Forschungsarbeiten am Institut beeindruckte mich auch die besondere Atmosphäre nachhaltig. Dementsprechend freute ich mich sehr, als Prof. Peter Eberhard mich fragte, ob ich als Doktorand am Institut beginnen möchte. Er hat mir die Welt der Mechanik vorgestellt und mich während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter immer mit großem Vertrauen ermutigt, „meinen Weg“ zu gehen und gleichzeitig wichtige Impulse für meine Forschungsarbeit gegeben. Dafür bin ich sehr dankbar! Ebenfalls herzlich bedanken möchte ich mich bei Prof. Daniel Rixen für die Übernahme des Mitberichts und die sehr hilfreichen Anmerkungen und Verbesserungsvorschläge.

Ich hatte das große Glück, in meiner Zeit am ITM zahlreiche besondere Menschen kennen zu lernen. Wir haben viel diskutiert, sowohl über Fachthemen als auch völlig Fachfremdes. Ebenfalls konnten wir einige tolle Geschichten miteinander erleben, die ich niemals vergessen werde. Neben meinen Doktorandenkollegen möchte ich mich bedanken bei Jörg Fehr, der mir das Thema „Modellreduktion“ nahe brachte, Michael Hanss, der mich auf meinem Weg durch die Vortragsübungen der TM begleitete, Pascal Ziegler, mit dem ich sehr viele wichtige fachliche und persönliche Gespräche führen durfte und Roswitha Prommersberger, ohne deren Arbeit vieles am ITM nicht so reibungslos funktionieren würde.

Für die Unterstützung außerhalb der Arbeit möchte ich mich bei meinen Freunden und meiner Familie bedanken. Insbesondere bei Anja, die mich immer unterstützt hat, mit mir lachte und mir auch durch schwierige Zeiten half.

Philip Holzwarth

Stuttgart, März 2017

Für Anja

Inhalt

Kurzfassung IX
Abstract XI

1 Einleitung **1**
1.1 Zielsetzung und Inhalt der Arbeit 3

2 Grundlagen **7**
2.1 Beschreibung verformbarer Körper mit der Finite-Elemente-Methode . . . 7
2.2 Lineare Modellordnungsreduktion durch Projektion 11
2.3 Systemdynamische Darstellung flexibler mechanischer Systeme 12
2.4 Elastische Mehrkörpersysteme 16

3 Verfahren linearer Modellordnungsreduktion **21**
3.1 Interpolationsbasierte Verfahren und Moment Matching 22
3.1.1 Klassische Berechnung 25
3.1.2 Berechnung mit Krylov-Unterraum-Verfahren 27
3.2 Modales Abschneiden 30
3.3 Balanciertes Abschneiden 31
3.4 Gemischte Verfahren 36

4 Modellordnungsreduktion für substrukturierte Systeme **37**
4.1 Lineare Modellierung gekoppelter mechanischer Systeme 43
4.1.1 Kopplung auf Basis von Bindungsgleichungen 44
4.1.2 Kopplung mit Feder-Dämpfer-Elementen 50
4.1.3 Modellierungsansätze im Vergleich 52

4.2 Anwendung von Reduktionsverfahren für gekoppelte Systeme 53
4.2.1 Blockstrukturkonservierende Reduktion 54
4.2.2 Separate-Basen-Reduktion 58
4.3 CMS-Gram: Ein neuer Ansatz zur Reduktion substrukturierter Systeme . . 65
4.4 Anwendung in nichtlinearen elastischen Mehrkörpersystemen 78

5 Interfacereduktion 91
5.1 Methoden zur Interfacereduktion 94
5.1.1 Polynome 94
5.1.2 Verallgemeinerte Singulärwertzerlegung und SVDMOR 95
5.1.3 Reduktion der Randdynamik 99
5.2 Anwendungsbeispiele 100

6 Zusammenfassung 109

Anhang 113
A.1 Modell Fachwerk 113
A.2 Modell Kurbeltrieb 114
A.3 Modelle Interfacereduktion 115

Formelzeichen und Notation 117

Literatur 121