

Zur Modellierung und Reduktion elastischer Bauteile unter verteilten Lasten für die Mehrkörpersimulation

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

von
Christine Nowakowski
aus Iserlohn

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Peter Eberhard
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Johannes Gerstmayr

Tag der mündlichen Prüfung: 15. Dezember 2014

Institut für Technische und Numerische Mechanik
der Universität Stuttgart

2015

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

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

Band 34/2015

Christine Nowakowski

**Zur Modellierung und Reduktion elastischer Bauteile
unter verteilten Lasten für die Mehrkörpersimulation**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Aachen 2015

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., 2014

Copyright Shaker Verlag 2015

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3537-7

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

Liebe Leser,

dieses Werk ist das Resultat meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Technische und Numerische Mechanik. Die Anfänge dieser Arbeit sind jedoch weit früher zu finden. Den ersten Kontakt mit dem Institut und dessen Leiter Prof. Peter Eberhard hatte ich bereits zu meiner Studentenzeit. Die vom Institut gehaltenen Lehrveranstaltungen, wie „Technische Mechanik“ oder „Maschinendynamik“, haben mich begeistert und meine Leidenschaft für Mechanik und Dynamik geweckt. Den Einstieg als Mitarbeiter ermöglichten mir eine Empfehlung von Prof. Werner Schiehlen nach einer überzeugenden Fahrzeugdynamikprüfung sowie meine Studienarbeit bei Jörg Fehr, der mich mit seinem Enthusiasmus über Modellreduktion angesteckt hat. Als mir Prof. Eberhard bereits vor Ende meines Studiums eine Stelle anbot, musste ich nicht lange überlegen. Das Ziel, die am Ende anstehende Promotion und der damit verbundene akademische Grad, spielte für mich nur eine untergeordnete Rolle. Viel wichtiger war mir die Chance weitere Jahre mit spannenden Herausforderungen in einem familiären Umfeld zu verbringen. Dabei habe ich es stets als große Ehre empfunden, hier arbeiten zu dürfen.

Mein ganz besonderer Dank gilt somit Prof. Eberhard, der mir die Zeit am Institut ermöglichte und immer um eine außergewöhnliche Atmosphäre am Institut bemüht war. Seine ausgestrahlte Ruhe, das Vertrauen in seine Mitarbeiter, die vielen konstruktiven sowie offenen Gespräche und nicht zuletzt seine grenzenlose Leidenschaft für das Institut, haben mich fasziniert und geprägt. Ebenso möchte ich mich bei Prof. Johannes Gerstmayr für seine freundliche Übernahme des Mitberichts bedanken. Zu etwas ganz Besonderes wurde die Zeit am Institut durch die vielen Kollegen mit Ihren unterschiedlichen Charakteren, die mich in der Zeit begleitet haben. Um Ihnen allen gerecht zu werden, ist ein Vorwort viel zu kurz. Dennoch möchte ich zunächst Frau Prommersberger erwähnen, die als gute Seele des Instituts immer ein paar freundliche Worte parat hatte. Genauso möchte ich den Mensaverweigerern für eine angenehme Mittagspause und all meinen Zimmerkollegen, die mir zu Beginn sehr geholfen und zum Ende sehr viel Spaß bereitet haben, danken. Für die vielen interessanten und auch anstrengenden Gespräche über Modellreduktion möchte ich einen Dank an Michael Fischer und Philip Holzwarth richten. Von Herzen danke ich denen, die ich mittlerweile auch zu meinen Freunden zählen darf, wie Markus Burkhardt, Christian Fischer, Timo Gaugele, Thomas Gorius, Alexander Held, Thomas Kurz, Sven Stühler und Nico Walz. Abschließen möchte ich mein Vorwort mit dem größten Dank an die Person, die mich immer unterstützt und motiviert hat, meinen Ehemann Adam.

Vordorf, Februar 2015

Christine Nowakowski geb. Geschwinder

Für Bianca, Anja und Adam

Inhalt

| | |
|--|-----------|
| Kurzfassung | XI |
| Abstract | XIII |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Ausgangspunkt und Motivation | 1 |
| 1.2 Ziel und Aufbau der Arbeit | 5 |
| 2 Analyse elastischer Mehrkörpersysteme | 9 |
| 2.1 Modellierung der Elastizität | 11 |
| 2.1.1 Ausgewählte kontinuumsmechanische Grundlagen | 11 |
| 2.1.2 Lineare Finite-Elemente-Modelle | 16 |
| 2.1.3 Modellordnungsreduktion | 18 |
| 2.2 Beschreibung eines elastischen Körpers | 22 |
| 2.2.1 Kinematik | 23 |
| 2.2.2 Kinetik | 24 |
| 2.2.3 Bewegungsgleichung | 25 |
| 2.3 Zusammenbau des flexiblen Mehrkörpersystems | 26 |
| 3 Modellierung und Simulation elastischer Mehrkörpersysteme | 29 |
| 3.1 Modellierung des elastischen Körpers | 30 |
| 3.1.1 Modellierung innerer Bindungen | 31 |
| 3.1.2 Modellierung äußerer Bindungen | 35 |
| 3.1.3 Dämpfungsmodellierung | 38 |
| 3.1.4 Systemtheoretische Beschreibung elastischer Körper | 42 |
| 3.2 Modellreduktionsverfahren | 45 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 3.2.1 | Component-Mode-Synthesis | 45 |
| 3.2.2 | Verfahren auf Basis von Krylov-Unterräumen | 48 |
| 3.2.3 | Verfahren auf Basis von Gramschen Matrizen | 52 |
| 3.3 | Integration der reduzierten Ansatzfunktionen | 57 |
| 3.3.1 | Zur Definition und Transformation des Bezugssystems | 59 |
| 3.3.2 | Datensatz zur Beschreibung eines elastischen Körpers | 61 |
| 3.4 | Simulation elastischer Mehrkörpersysteme | 64 |
| 3.4.1 | Numerische Integration | 64 |
| 3.4.2 | Auswertung des Simulationsaufwands | 65 |
| 3.5 | Qualitätsanalyse | 70 |
| 3.5.1 | Analysemethoden im Zeitbereich | 72 |
| 3.5.2 | Analysemethoden im Frequenzbereich | 74 |
| 3.5.3 | Interpretation der Gütekriterien | 76 |
| 3.5.4 | Schwingungsanalyse und Modal-Assurance-Kriterium | 79 |
| 4 | Elastische Körper mit verteilten Lasten | 83 |
| 4.1 | Problemstellung | 85 |
| 4.1.1 | Analyse methodischer Einschränkungen | 85 |
| 4.1.2 | Analyse qualitativer Auswirkungen | 88 |
| 4.1.3 | Analyse numerischer Aspekte | 92 |
| 4.2 | Modellierung von Lasten | 93 |
| 4.2.1 | Modellierung und Analyse der Ein- und Ausgangsmatrix | 94 |
| 4.2.2 | Berücksichtigung von Koppeltermen | 100 |
| 4.2.3 | Eingangsmatrix und Randbedingungen | 102 |
| 4.3 | Modellordnungsreduktion mit vielen Eingängen | 104 |
| 4.3.1 | Klassifizierung und Lösungsstrategien | 104 |
| 4.3.2 | Reduktion der Lasten vor der Modellordnungsreduktion | 106 |
| 4.3.3 | Lastreduktion während der Modellordnungsreduktion | 111 |
| 4.3.4 | Zweistufige Reduktion | 117 |
| 5 | Die Softwarefamilie Morembs | 121 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 5.1 | Konzept von MOREMBS | 122 |
| 5.1.1 | Funktioneller Aufbau und Workflow | 123 |
| 5.1.2 | Schnittstellen | 124 |
| 5.2 | MATMOREMBS Kurzbeschreibung | 126 |
| 5.2.1 | Interne Datenstruktur | 127 |
| 5.2.2 | MATMOREMBS Basisfunktionen | 131 |
| 5.3 | Die MATMOREMBS-GUI | 135 |
| 6 | Zusammenfassung | 137 |
| | Anhang | 139 |
| A.1 | Modelle | 139 |
| A.1.1 | Stabilisatorstab | 139 |
| A.1.2 | Trommelfell | 139 |
| A.1.3 | Kurbeltriebpleuel | 140 |
| A.1.4 | Pleuel eines 2-Zylinder-Motors | 141 |
| A.1.5 | Kurbelwelle eines 2-Zylinder-Motors | 142 |
| A.1.6 | Kurbelwelle eines 4-Zylinder-Motors in der ersten Diskretisierungsstufe | 142 |
| A.1.7 | Kurbelwelle eines 4-Zylinder-Motors in der zweiten Diskretisierungsstufe | 143 |
| | Formelzeichen und Notation | 145 |
| | Literatur | 150 |