

Alexander Warsewa

Energy-based modeling and decentralized observers for adaptive structures

Band 59

**Berichte aus dem
Institut für Systemdynamik
Universität Stuttgart**



Energy-based modeling and decentralized observers for adaptive structures

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

Vorgelegt von
Alexander Warsewa
geboren in Filderstadt

Hauptberichterin: Prof. Dr.-Ing. Cristina Tarín
Mitberichter: PD Dr.-Ing. habil. Paul Kotyczka

Tag der mündlichen Prüfung: 26. April 2021

Institut für Systemdynamik der Universität Stuttgart

2021

Berichte aus dem
Institut für Systemdynamik
Universität Stuttgart

Band 59

Alexander Warsewa

**Energy-based modeling and decentralized observers
for adaptive structures**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Düren 2021

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8040-7

ISSN 1863-9046

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Vorwort

»Du meine Güte«, staunte Smeik. »Was ist das denn?«
[...]
»Nichts.«
»Wie: nichts?«
»Es ist nichts von Bedeutung«
[...]
»Raus mit der Sprache, Doktor – was ist das?«
»Das ist, äh, eine Doktorarbeit.«
»Eine Doktorarbeit?« lachte Smeik. »Jetzt bin ich aber erleichtert. Ich dachte schon,
es sei eine schreckliche Krankheit.«
»Das ist eine Doktorarbeit gewissermaßen auch.«¹

Zum schlussendlich erfolgreichen Abschluss meiner Promotion haben viele Menschen einen wertvollen Beitrag geleistet. Mein besonderer Dank gilt Cristina Tarín für die angenehme Betreuung meiner Arbeit, ihre Wertschätzung und das mir entgegengebrachte Vertrauen. Ohne Ihre Kompromissbereitschaft und Ihr offenes Ohr bei Schwierigkeiten gäbe es diese Doktorarbeit nicht. Auch Oliver Sawodny danke ich für die Ermöglichung von Teilzeit, die Wertschätzung meines Beitrags zum SFB und seinen Einsatz für ein Gemeinschaftsgefühl am Institut. Paul Kotyczka danke ich für die Übernahme des Mitberichts, die gründliche Lektüre meiner Arbeit und das konstruktive und wohlwollende Feedback. Bernd Bertsche für seine Bereitschaft mir als Vorsitzender des Prüfungsausschusses im Covid-19-Format neben Luftreinigern die Prüfung abzunehmen.

Ohne tolle Kolleg:innen ist die Arbeit etwas trostlos und deshalb danke ich neben allen anderen besonders meinen SFB-Mitstreiter:innen am ISYS – Michael Böhm, Julia Wagner, Marius Oei, Andreas Gienger, Philipp Arnold und Spasena Dakova – für den prima Austausch und viele motivierende Worte. Bei meinem Projektpartner Flavio Guerra bedanke mich für die entspannte und produktive Zusammenarbeit! Mit meinen Bürokollegen Dominik Esslinger und Martin Oberdorfer habe ich mich immer sehr wohl gefühlt. Dominik war mir ein hervorragendes Vorbild was die zeitnahe Fertigstellung meiner Dissertation angeht. Martin hat für den nötigen Ernst bei der Arbeit ... nein. Es hat Spaß gemacht mit dir das Büro zu teilen, zu kochen und ab und an zu bouldern! Gerlind Preisenhammer und Corina Hommel waren mit ihrer geduldischen und freundlichen Art stets eine große Hilfe bei allen organisatorischen Aufgaben. Joachim Endler und Sven Gutekunst haben meinen Dank für ihre Unterstützung in Sachen Versuchsaufbauten und IT. Michael Zeitz für seine wertvolle Rückmeldung zu manchem Probektivortrag. Bei Marion Fleischer bedanke ich mich für die Pflege unserer Büropflanze und ihre beeindruckende Auswahl Weihnachtsplätzchen. Die

¹Moers, Walter: „Rumo & Die Wunder im Dunkeln“, 8. Auflage. Piper Verlag GmbH, München, 2009, S. 142

Kantine „Rolands“ sei hier noch erwähnt für die Erweiterung meines Repertoires an vegetarischen Gerichten um „geschmorte Möhre à la Currywurst“.

Eine große Stütze während dieser nicht unbedingt leichten Zeit waren mir Jonas Poehlmann, Laura Faul, Asuka Okawa, Carolin Kraft, Sophia Größchen, Marie Graef, Anna Donat, Dominic Hillerkuss und Ruben Danner. Ihr wunderbaren Menschen, ich liebe euch!

Zu guter Letzt möchte ich noch meine persönliche Meinung zum SFB 1244 zum Ausdruck bringen. Die grundlegende Idee den Energie- und Ressourcenverbrauch des Bauwesens zu senken vertrete ich voll und ganz. Die jetzigen Lösungsansätze und -beispiele sind mir allerdings noch zu konform mit einem Narrativ des Wirtschaftswachstums und eignen sich am meisten für den hochverdichteten urbanen Raum der Industrienationen. Ich würde es begrüßen, wenn zukünftige Entwicklungen in dieser Hinsicht breiter aufgestellt sind.

Tübingen, im April 2021

Alexander Warsewa

Abstract

Responsible for a major amount of global waste production, greenhouse gas emission, energy and resource consumption, the construction sector is far from being considered a green industry. To reduce its future environmental impact, it is of utmost importance to save materials and energy on construction of new structures. Adaptive structures constitute a novel technological remedy that enables crossing the limits of classical lightweight construction. With the ability of an adaptive structure to change its shape or structural properties in reaction to external loads, it can utilize the load-carrying capacity of its elements in a near-optimal way. This requires, however, active and reliable control of the state of the structure – in this context its deformation and vibrations – which is considered a challenging task.

This thesis is concerned with two associated problem complexes. On the one hand, suitable dynamic modeling of adaptive structures and on the other hand, approaches for state estimation as a prerequisite for control. For system description, the theory of port-Hamiltonian systems is employed. Due to its modularity, the energy-based approach is especially suitable for complex systems of heterogeneous nature. The systems also exhibit convenient properties that can be exploited for both state estimation and control. Regarding the state estimation problem, a decentralized approach with local observers is proposed.

Port-Hamiltonian modeling of adaptive structures begins with the introduction of models for structural components. This includes the classical beam elements as well as a disk and plate element for two-dimensional continua. The coupling of hydraulic actuators with the mechanical structure is also discussed. For the spatial discretization of the infinite-dimensional systems, the structure-preserving partitioned finite element method (PFEM) is employed and compared to classical FEM. In order to automatically assemble complex system from individual elements, a port-based approach is introduced that works with algebraic constraints.

Decentralization of the observers for state estimation is conducted on the level of the dynamic models. If a system model of the overall structure is available, local models can be derived from it by means of transformations. Otherwise, decentralized structures can also be composed of individual modules, without the need to know the global system model in advance. In both cases, Luenberger observers can be designed for local state estimation in a way that the observers themselves constitute a port-Hamiltonian system. The presented methods are assessed and compared to each other with the help of simulation models of adaptive structure and using an experimental platform that represents a scaled version of an adaptive high-rise building.

Aim of this thesis was to demonstrate and harness the potential of energy-based methods for the application to adaptive structures. With the presented methods and approaches, an appropriate basis was successfully developed, which can be consequently built on.

Kurzfassung

Das Bauwesen ist verantwortlich für einen erheblichen Anteil am weltweiten Massenmüllaufkommen, CO₂-Ausstoß, Energie- und Ressourcenverbrauch. Um dem entgegenzusteuern, ist es von entscheidender Bedeutung, beim Bau neuer Strukturen mit weniger Material und Energie auszukommen. Adaptive Strukturen stellen einen neuen technologischen Lösungsansatz dar, welcher es ermöglicht die Grenzen des klassischen Leichtbaus zu überschreiten. Indem ein adaptives Tragwerk seine Form oder strukturellen Eigenschaften an wechselnde äußere Lasten anpasst, kann die Tragfähigkeit der Strukturelemente nahezu optimal ausgenutzt werden. Dafür ist jedoch eine aktive und zuverlässige Regelung des Gebäudezustands – hier Verformungen und Schwingungen des Tragwerks – notwendig, was eine besondere Herausforderung darstellt.

In der vorliegenden Arbeit werden zwei zugehörige Problematiken thematisiert. Zum einen geeignete dynamische Modellierung adaptiver Tragwerke und zum anderen, die für die Regelung erforderliche Schätzung des Systemzustands. Zur Systembeschreibung wird die Port-Hamilton-Modellierung eingesetzt. Der energiebasierte Ansatz eignet sich durch seine Modularität besonders für komplexe Systeme heterogener Natur und weist günstige Eigenschaften für den Regler- und Beobachterentwurf auf. Bezüglich der Zustandsschätzung wird ein dezentraler Ansatz mit lokalen Beobachtern verfolgt.

Zunächst werden verteilparametrische Port-Hamilton-Modelle für Tragwerkskomponenten adaptiver Strukturen vorgestellt. Dazu gehören Balkenmodelle und ein Scheiben- und Plattenmodell für zweidimensionale Kontinua. Weiterhin wird auf hydraulische Aktorik und deren Kopplung mit der mechanischen Struktur eingegangen. Zur Ortsdiskretisierung der unendlichdimensionalen Systeme wird die strukturerhaltende partitionierten Finite-Elemente-Methode (PFEM) angewandt und ein Vergleich mit klassischer FEM angestellt. Um automatisch komplexe Systeme aus Einzelementen zusammenzusetzen, wird ein Port-basierter Ansatz vorgestellt.

Die Dezentralisierung der Zustandsschätzung erfolgt auf Basis der dynamischen Modelle. Ist ein Systemmodell der Gesamtstruktur vorhanden, können lokale Modelle mittels Transformation von diesem abgeleitet werden. Andererseits können dezentrale Strukturen auch aus Einzelmodulen aufgebaut werden, ohne dass ein Gesamtsystem bekannt ist. In beiden Fällen können lokale Luenberger-Beobachter so entworfen werden, dass diese ebenfalls Port-Hamilton-Systeme darstellen. Die Methoden werden sowohl mit Simulationsmodellen, als auch anhand einer Experimentalplattform, welche eine skalierte Version eines adaptiven Hochhaustragwerks darstellt, überprüft und miteinander verglichen.

Ziel dieser Arbeit war es, das Potential energiebasierter Methoden für die Anwendung auf adaptive Strukturen aufzuzeigen und nutzbar zu machen. Mit den vorgestellten Ansätzen und Methoden wurde erfolgreich eine entsprechende Basis geschaffen, auf die konsequent weiter aufgebaut werden kann.

Contents

1	Introduction	1
1.1	General context and motivation	2
1.2	The CRC 1244	4
1.3	Aim and focus of this thesis	4
1.4	State of the art	5
1.4.1	Active and adaptive structural control	5
1.4.2	Decentralized observers for civil structures	7
1.4.3	Port-Hamiltonian systems	8
1.4.4	Summary	10
1.5	Contributions	10
1.6	Outline	11
2	Energy-based modeling	13
2.1	Introduction to port-based physical modeling	14
2.2	Basic components of physical systems	16
2.3	Port-Hamiltonian systems	22
2.4	Distributed parameter port-Hamiltonian systems	26
3	Elastodynamics	31
3.1	Fundamentals of the mechanics of elastic bodies	32
3.1.1	Stress-strain relationships	32
3.1.2	Virtual work and the equations of motion	34
3.2	Port-Hamiltonian dynamics of beams	35
3.2.1	Rod element	36
3.2.2	Torque bar	37
3.2.3	Timoshenko beam	38
3.2.4	Euler-Bernoulli beam	39
3.3	Port-Hamiltonian dynamics of plates	40
3.3.1	Disk	41
3.3.2	Mindlin-Reissner plate	43
4	Discretization	47
4.1	On spatial discretization of distributed parameter pH systems	48
4.2	Recall on the finite element method	49
4.3	Applying the partitioned finite element method to elastic bodies	52
4.3.1	Systems of one spatial dimension	52

4.3.2	Elements for two-dimensional systems	56
4.4	Comparison between FEM and PFEM	60
4.5	Approximation error analysis	63
4.5.1	Beam elements	63
4.5.2	Disk and plate elements	66
4.6	A note on time discretization	69
5	Assembly of complex systems	71
5.1	System concatenation	73
5.2	Formulation of constraint equations	74
5.3	Algebraic constraint elimination	76
5.4	Elimination of linearly dependent states	77
5.5	Transformation to global coordinates	78
5.6	Coupling with other domains	79
6	Hydraulic actuators	81
6.1	Fundamentals of hydraulic systems	82
6.2	Double-acting piston actuator	84
6.3	Simulation of an adaptive frame structure	86
7	Decentralized state estimation	91
7.1	Damping injection observers	93
7.2	Local models from a global system model	95
7.3	Modular approach with coupling at the interfaces	97
7.4	Notes regarding the numerical implementation	99
7.5	Filters to increase agreement between local estimates	101
8	Application to adaptive structures	103
8.1	State estimation on an adaptive structures test bench	106
8.1.1	Experimental setup	107
8.1.2	System dynamics	111
8.1.3	Centralized and decentralized sensor fusion	113
8.1.4	Self-tuning algorithm	114
8.1.5	Results and discussion	115
8.2	Decentralized observers for the high-rise demonstrator	123
8.2.1	System dynamics	123
8.2.2	Observers	126
8.2.3	Results and discussion	128
9	Conclusion	133
A	From virtual work to the equations of motion	137
A.1	The principle of virtual work	137

A.2 Equations of motion	138
B Intermediate steps in discretization	141
List of Figures	143
List of Tables	145
List of Symbols	147
Bibliography	151