

Entwicklung eines Hardware-in-the-Loop-Prüfstands und modellbasierte nichtlineare Regelung für hydrostatische Getriebe

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
der Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik
der Universität Rostock

vorgelegt von
Jöran Ritzke,
geb. am 29.07.1978 in Rostock

Rostock
6. Februar 2014

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Harald Aschemann
Lehrstuhl für Mechatronik / Universität Rostock
Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Christoph Woernle
Lehrstuhl für Technische Mechanik/Dynamik / Universität Rostock
Drittgutachter: Prof. Dr.-Ing. Horst Schulte
Lehrstuhl für Regelungstechnik und Modellbildung / HTW Berlin

Tag der Verteidigung: 23. August 2013

Berichte aus dem
Lehrstuhl für Mechatronik
Universität Rostock

Band 2

Jöran Ritzke

**Entwicklung eines Hardware-in-the-Loop-Prüfstands
und modellbasierte nichtlineare Regelung für
hydrostatische Getriebe**

Shaker Verlag
Aachen 2014

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.: Rostock, Univ., Diss., 2013

Copyright Shaker Verlag 2014

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2607-8

ISSN 2195-9234

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 im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Mechatronik der Universität Rostock unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Harald Aschemann. Ihm gilt insbesondere mein Dank für die gute fachliche Betreuung sowie die vielen Anregungen und Verbesserungsvorschläge im Rahmen der Erstellung dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Christoph Woernle danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens, insbesondere für seine kritische Prüfung der formalen Aspekte und den externen Blickwinkel auf die Arbeit. Herrn Prof. Dr.-Ing. Horst Schulte (Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin (HTW)) danke ich für seine Bereitschaft zur Übernahme des externen Gutachtens, vor allen Dingen für die Anregungen und Unterstützung bei der Beschaffung der Prüfstandscomponenten, die stete Diskussions- und Hilfsbereitschaft und das inhaltliche Interesse an dieser Arbeit. Für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Hermann Seitz bedanken.

Den Mitarbeitern des Lehrstuhls für Mechatronik, speziell Dr.-Ing. Dominik Schindele, Dipl.-Ing. Robert Prabel, Dipl.-Ing. Thomas Dötschel, MSc. Barry Dolan, MSc. Hao Sun und besonders Herrn Dipl.-Ing. (FH) Ernst Langnau gilt mein Dank für die freundschaftliche Zusammenarbeit und die offenen Diskussionen, ebenso den Mitarbeitern, hier vor allem Dipl.-Phys. Matthias Cornelsen, der anderen Lehrstühle der Forschungskoooperation.

Ohne die Unterstützung durch studentische Arbeiten und Hilfwissenschaftler, Dipl.-Ing. Daniel Frahm, MSc. Jens Windelberg und MSc. Daniel Schwarz wäre die Arbeit nicht in diesem Umfang fertiggestellt worden. Ich danke ebenfalls den Mitarbeitern des Labors, namentlich Herrn Dipl.-Ing. (FH) Bernd Hesse für die hydraulischen Installationen und Umbauten des Prüfstands, Herrn Enrico Voß für die Installation der Leistungs- und Informationselektronik des Prüfstands, sowie den Herren Fred Sokolowski und Jörn Daebeler für die Anfertigung der mechanischen Komponenten. An dieser Stelle sei auch den Mitarbeiterinnen des Sekretariats Frau Angela Frankenberg, Kathrin Hollatz und Angelika Gehl für ihre Hilfe in administrativen Dingen gedankt.

Mein größter Dank gilt meinen Eltern und meiner Frau Manuela, denen diese Arbeit gewidmet sei.

Kurzfassung

Hydrostatische Fahrtriebe werden aufgrund ihrer Vorteile vor allem bei schweren und langsam fahrenden Arbeitsmaschinen eingesetzt. Bei ihrem Einsatz sind sie dabei vielfältigen Anforderungen hinsichtlich Betriebssicherheit und Emissionsgrenzen unterworfen. Andererseits zählen für den Anwender des Produkts hauptsächlich die wirtschaftlichen Aspekte. Neben der Produktivität und Funktionalität sollen die Forderungen nach Ergonomie und einfacher Handhabung erfüllt werden. Um diesen und den zukünftigen Herausforderungen zu entsprechen, kann das Potential moderner Entwicklungsmethodik und systemdynamischer Ansätze genutzt werden.

Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag zum Einsatz von systemdynamischen Methoden bei fluidtechnischen Antrieben liefern. Basierend auf dem Stand der Technik bezüglich aktuell eingesetzter Steuerungs- und Regelungskonzepte werden innovative Ansätze aus der industriellen Forschung vorgestellt. Diese neuen Ansätze und Algorithmen werden aus Kostengründen in der Praxis an Hardware-in-the-Loop-Prüfständen (HiL) untersucht, die bereits in der Entwicklungsphase wertvolle Erkenntnisse liefern können. Dazu wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Entwicklung und Inbetriebnahme eines solchen Prüfstands vorgestellt, der die vollständige Nachbildung eines hydrostatischen Fahrtriebs ermöglicht. Nach der detaillierten Modellbildung des Fahrtriebs zur simulativen Validierung und zum Einsatz in weiterführenden Simulationen werden die für den späteren Regelungsentwurf benötigten Parameter der Prüfstandskomponenten experimentell identifiziert, um eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen Modell und Realität zu erreichen. Dies konnte durch den Einsatz geeigneter Optimierungsverfahren erreicht werden. Im Zuge dieser Untersuchungen wurden u.a. die Statik und Dynamik der Verdrängungseinheiten der eingesetzten Hydrokomponenten detailliert betrachtet.

Im Rahmen der Reglersynthese wird ein flachheitsbasierter Ansatz mit verschiedenen Methoden zur Fehlerstabilisierung verfolgt. Nach umfangreichen Simulationsstudien wurde dieser Ansatz mit Erfolg am HiL-Prüfstand umgesetzt. Das bereits gute Folgeverhalten bezüglich der Sollgrößen konnte mit Hilfe von nichtlinearen Störbeobachtern und vorhergehender Kompensation der Nichtlinearitäten der Aktoren nochmals verbessert werden. Zukünftige Arbeiten können die Möglichkeiten des Prüfstands voll ausnutzen und den Einsatz innovativer Regelungsansätze untersuchen.

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	VII
Abbildungsverzeichnis	IX
Symbolverzeichnis	XV
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und thematische Einordnung	2
1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	3
2 Stand der Technik	5
2.1 Modellierungsansätze für hydrostatische Leistungsübertragung	6
2.2 Regelungskonzepte für hydrostatische Leistungsübertragung	7
3 Laboraufbau des Prüfstands eines hydrostatischen Getriebes	19
3.1 Aufbau eines hydrostatischen Getriebes	19
3.2 Hauptkomponenten des hydrostatischen Getriebes	22
3.3 Prüfstand mit hydraulisch-mechanischer Lasterzeugung	26
3.4 Prüfstand mit elektromotorischer Lasterzeugung	31
3.5 Hardware-in-the-Loop-Konzept	34
3.6 Prüfstandssteuerung	48
4 Modellbildung	65
4.1 Hydraulisches System	68
4.2 Mechanisches System	82
4.3 Modellierung des Gesamtsystems	85
4.4 Mechatronische Modellbildung	87

5	Parameteridentifikation	91
5.1	Untersuchung der HiL-Fähigkeit des Prüfstandes	94
5.2	Identifikation der Elektromaschinen	95
5.3	Statische Nichtlinearität der Verdrängungseinheiten	100
5.4	Identifikation der Aktordynamik	113
5.5	Identifikation eines integrierten polynomialen Aktormodells	124
6	Nichtlinearer Reglerentwurf	133
6.1	Entwurf einer flachheitsbasierten Vorsteuerung	133
6.2	Fehlerstabilisierung	137
6.3	Nichtlinearer Störbeobachter	139
6.4	Simulative Ergebnisse des geregelten Systems	142
6.5	Simulationsergebnisse	145
6.6	Experimentelle Ergebnisse des geregelten Systems	151
7	Zusammenfassung und Ausblick	157
	Literaturverzeichnis	159
8	Anhang	163
8.1	Ergänzende Erläuterungen zur PEM und Definition der Anpassungsgüte	163
8.2	Ergebnisse der statischen Nichtlinearität der Verdrängungseinheiten . .	165
8.3	Dynamik der Verdrängungseinheiten	168
8.4	Identifikation des hydraulischen Teilsystems	174