

Prädiktive Fahrermodelle zur Simulation und Teilautomatisierung eines Hydraulikbaggers

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

Vorgelegt von
Frank Alexander Bender
geboren in Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Oliver Sawodny
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss
Tag der mündlichen Prüfung: 13. Oktober 2016

Institut für Systemdynamik der Universität Stuttgart

2016

Berichte aus dem
Institut für Systemdynamik
Universität Stuttgart

Band 29

Frank Alexander Bender

**Prädiktive Fahrermodelle zur Simulation und
Teilautomatisierung eines Hydraulikbaggers**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Aachen 2016

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., 2016

Copyright Shaker Verlag 2016

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4876-6

ISSN 1863-9046

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 Mitarbeiter am Institut für Systemdynamik der Universität Stuttgart. Ich danke daher insbesondere dem Institutsdirektor, Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Oliver Sawodny, für die Möglichkeit zur Mitarbeit und Promotion am ISYS, vor allem für das entgegengebrachte Vertrauen, die gewährten Freiheiten und die Übernahme des Hauptberichts bei dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss vom Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen der Universität Stuttgart danke ich für die freundliche Übernahme des Mitberichts. Für die bereitwillige Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Alexander Verl vom Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen der Universität Stuttgart.

Mein Dank gilt zudem Herrn Prof. Dr. Thomas Bräunl für die Einladung zu einem Forschungsaufenthalt an der University of Western Australia in Perth im Rahmen eines *Endeavour Research Fellowships* der australischen Regierung. Meine Zeit in „down under“ wird mir unvergesslich bleiben.

Wesentliche Inhalte dieser Arbeit entstanden im Rahmen zweier Kooperationsprojekte mit der Bosch Rexroth AG in Elchingen. Mein Dank gilt daher zunächst Dr.-Ing. Martin Kaszynski und Dr.-Ing. Jürgen Winkelhake für die Betreuung während des Kooperationsprojektes „Prädiktionsbasierte Betriebsstrategien für hydraulische Hybridfahrzeuge“. Bei Dipl.-Ing. Martin Stangl und Dr. rer. nat. Christine Brach bedanke ich mich für die Möglichkeit zur Mitarbeit am virtuellen Bagger im Rahmen des Projektes „Fahrermodelle für mobile Arbeitsmaschinen“. Die kompetente inhaltliche Betreuung, die vielen hilfreichen Anregungen und die gute Zusammenarbeit mit allen Kollegen der Entwicklungsabteilungen EMF und EMY haben dafür gesorgt, dass ich mich in Elchingen stets willkommen gefühlt habe.

Meinen Institutskollegen danke ich ganz herzlich für die vielfältige fachliche Unterstützung und das freundschaftliche Miteinander in all den Jahren. Ihr habt das Institut für mich zu einem besonderen Ort gemacht und mir durch manche Schaffenskrise geholfen. Ganz besonders danke ich Valentin Falkenhahn, Gunter Heppeler, Alexander Keck, Dr.-Ing. Karl-Lukas Knierim, Dr.-Ing. Alexander Lutz, Philipp Rapp, Markus Richter, Conrad Sagert, Marcus Sonntag und Mark Wörner. Herrn Dr.-Ing. Eckhard Arnold danke ich für die vielen guten Gespräche, die Möglichkeit zur Mitarbeit im Optimierungs-Team sowie für das Korrekturlesen der Dissertation. Bei Corina Hommel und Gerlind Preisenhammer bedanke ich mich für die organisatorische Unterstützung. Peter Bachhuber, Joachim Endler und Sven Gutekunst gilt mein Dank für ihren tatkräftigen Einsatz bei technischen Modifikationen am Müllfahrzeug und dem Mini-Bagger.

Meinen Studenten danke ich für ihre vielfältige Unterstützung in Form von Diskussionen, Abschlussarbeiten und wissenschaftlichen Hilfstätigkeiten.

Ganz besonders danke ich meiner Familie für die verlässliche und liebevolle Unterstützung und den bedingungslosen Rückhalt während Studium und Promotion. Ihr habt mir stets Beistand geleistet und an mich geglaubt.

Schließlich gilt mein Dank dir, liebe Sophia, für die fortwährende Unterstützung, dein Verständnis und deine Geduld.

Stuttgart, im Oktober 2016

Frank Alexander Bender

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	VII
Abstract	IX
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Ziel der Arbeit	6
1.3 Gliederung der Arbeit	8
2 Stand der Technik	9
2.1 Mobile Bau- und Arbeitsmaschinen	9
2.1.1 Konventionelle Antriebskomponenten	10
2.1.2 Hybridantriebe	13
2.1.3 Assistenzsysteme und Automatisierungsansätze	15
2.2 Entwicklungsmethodik	17
2.2.1 Virtual Prototyping	17
2.2.2 Rapid Control Prototyping	19
2.2.3 Simulationsumgebungen	20
2.3 Fahrer-Modelle	21
2.3.1 Modellierungsansätze	22
2.3.2 Fahrermodelle für mobile Arbeits- und Baumaschinen	29
3 Modellierung eines Hydraulikbaggers	31
3.1 Komponenten des Antriebssystems	31
3.1.1 Dieselmotor	33
3.1.2 Verstelldoppelpumpe	35
3.1.3 Druckbegrenzungsventile	37
3.1.4 Ventilblock	37
3.1.5 Zylinderantriebe	42
3.1.6 Drehwerk	45
3.1.7 Volumenfluss-Bedarfssteuerung	46
3.2 Kinematik	50
3.3 Bewegungsgleichungen	53
3.4 Mensch-Maschine-Schnittstelle	54
3.5 Grabkraftmodellierung	56
4 Modellierung des Fahrers als prädiktive Regelung	63
4.1 Erfassung der Zyklusaufgabe	63
4.2 Analyse des realen Fahrerhaltens	65

4.3	Anforderungen an das Fahrermodell	69
4.4	Struktur des Fahrermodells	72
4.5	Task-Koordination	74
4.5.1	Erzeugung synthetischer Zyklen mittels Zustandsautomat	74
4.5.2	Automatisierte Ableitung von Zyklen aus Messungen	77
4.6	Ansätze zur Folgeregelung für das Fahrermodell	81
4.6.1	Zwei-Freiheitsgrade-Regelung als Basis-Fahrermodell	82
4.6.2	Prädiktive Fahrermodelle	87
4.6.3	Eignung der Ansätze zur Fahrermodellierung	108
4.7	Simulationsergebnisse	110
4.7.1	Basis-Fahrermodell	110
4.7.2	Prädiktives Fahrermodell	112
4.7.3	Vergleich der Fahrermodelle	113
5	Teilautomatisierung eines Hydraulikbaggers	119
5.1	Erprobungsträger AMX-300	120
5.1.1	Hydraulische und elektrische Komponenten	120
5.1.2	Ansteuerung	123
5.1.3	Messtechnik	123
5.1.4	Lageschätzung	125
5.2	Simulation des Funktionalmodells	131
5.2.1	Modell-Anpassungen am physikalischen Simulationsmodell	131
5.2.2	Vereinfachtes Zustandsraum-Modell der E/A-Dynamik	133
5.2.3	Modell-Validierung	136
5.3	Teilautomatisierung	138
5.3.1	Anpassungen am Fahrermodell	138
5.3.2	Automatisiertes Abfahren von vorgegebenen Zyklen	141
5.3.3	Assistenzfunktion zur vereinfachten Baggersteuerung	147
6	Zusammenfassung	153
A	Bagger-Kinematik	157
B	Verfahren zur Online-Schätzung von Hammerstein-Nichtlinearitäten	161
C	Accelerated Proximal Gradient Optimierung	165
C.1	Primales Problem	165
C.2	Duales Problem	169
D	Visualisierung	171
E	Kalibrierung Magnetkompass	173
	Abbildungsverzeichnis	177
	Tabellenverzeichnis	181
	Literaturverzeichnis	183