

Michael Laukenmann

Modellbasierte Steuerung und Regelung von hybriden Doppelkupplungsgetrieben

Band 64

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



Modellbasierte Steuerung und Regelung von hybriden Doppelkupplungsgetrieben

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

vorgelegt von

Michael Alexander Laukenmann
(geb. Mrochen)

geboren in Mellrichstadt

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Oliver Sawodny
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Harald Aschemann
Tag der mündlichen Prüfung: 01.04.2022

Institut für Systemdynamik der Universität Stuttgart

2022

Berichte aus dem
Institut für Systemdynamik
Universität Stuttgart

Band 64

Michael Laukenmann

**Modellbasierte Steuerung und Regelung
von hybriden Doppelkupplungsgetrieben**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Düren 2022

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., 2022

Copyright Shaker Verlag 2022

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8613-3

ISSN 1863-9046

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

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner wissenschaftlichen Tätigkeit am Institut für Systemdynamik (ISYS) der Universität Stuttgart im Zeitraum von Oktober 2017 bis August 2021. Die Forschungsarbeiten wurden im Rahmen eines Kooperationsprojekts mit der Magna PT B.V. & Co. KG in Untergruppenbach durchgeführt.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Oliver Sawodny für die Betreuung der Arbeit und das entgegengebrachte Vertrauen. Außerdem gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Harald Aschemann der Universität Rostock mein besonderer Dank für das Interesse an der Arbeit und die Übernahme des Mitberichts. Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Philipp Berendes der Universität Stuttgart für den Vorsitz der Prüfungskommission.

Die wesentlichen Inhalte der Arbeit entstanden während einer Kooperation mit der Magna PT B.V. & Co. KG. Daher gilt mein aufrichtiger Dank all jenen Kollegen, mit denen ich während der Projektarbeit zusammenarbeiten durfte. Insbesondere danke ich Jörg Meißner, Yang Yu, Muhammed Awad, Mario Ott, Moritz Wendt, Thorsten Stepper und Clemencia Nino-Serna für die fachliche Betreuung, die Unterstützung und die vielen hilfreichen Anregungen.

Großer Dank gebührt Gerlind Preisenhammer und Corina Hommel, die mir bei Fragen jeglicher Art immer mit Rat und Tat zur Seite standen und den Rücken für die wissenschaftliche Tätigkeit freihielten. Für die bereitwillige und kontinuierliche Unterstützung beim Aufbau und der Inbetriebnahme des Prüfstands danke ich Joachim Endler, Sven Gutekunst und Philipp Arnold. Außerdem möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Eckhard Arnold für die zahlreichen fachlichen Diskussionen und die exzellente Unterstützung in der Lehre bedanken.

Ein großes Dankeschön gebührt meinen ehemaligen Kollegen am ISYS für die schöne Zeit und das freundschaftliche Miteinander. Insbesondere bei meinen Bürokollegen und -nachbarn Carina Kurth, Dr.-Ing. Kevin Schmidt, Dr.-Ing. Michael Ringkowski und Daniel Müller möchte ich mich für die vielen fachlichen und nicht-fachlichen Diskussionen bedanken. Ganz besonders möchte ich den fleißigen Korrekturlesern für ihren Einsatz und die wertvollen Kommentare danken, darunter Mark Burkhardt, Michel Bauer, Dr.-Ing. Michael Ringkowski, Carina Kurth, Dr.-Ing. Kevin Schmidt, Daniel Müller, Dr.-Ing. Eckhard Arnold, Felix Reusch, Andreas Mehling, Julia Laukenmann und Sandra Laukenmann.

Zuletzt gilt mein ausdrücklicher Dank meiner Familie und meinen Freunden, besonders Daniel Schanz für das tolle Miteinander und die Unterstützung in unserer Wohngemeinschaft. Insbesondere meiner Frau Sandra bin ich von ganzem Herzen dankbar für den bedingungslosen Rückhalt, ihr Verständnis und die immerwährende Unterstützung während meines Studiums und meiner Promotion.

Gründelhardt, im April 2022

Michael Laukenmann

Kurzfassung

Hybridelektrische Fahrzeuge spielen bei der Reduktion des Kraftstoffverbrauchs und der CO₂-Emissionen im Individualverkehr eine immer wichtigere Rolle. Hybridfahrzeuge vereinen dabei die Vorteile der Verbrennungsmotortechnologie mit denen der Elektromobilität und bieten neue Funktionalitäten, die über die beiden Basistechnologien hinausgehen. Im Gegenzug haben diese einen komplexen Aufbau durch die hinzukommenden Antriebsaggregate. Dadurch ergeben sich erhöhte Anforderungen an die Ansteuerung der Einzelkomponenten und deren Koordination. Die beiden Schwerpunkte dabei sind ein hoher Fahrkomfort und ein dynamisches Ansprechverhalten des Hybridfahrzeugs. Um die Fahrerakzeptanz zu gewährleisten, gilt es diese offenen Fragen zu beantworten.

In der vorliegenden Dissertation werden modellbasierte Ansätze zur Beantwortung der regelungstechnischen Fragestellungen im Kontext von hybriden Doppelkupplungsgetrieben untersucht. Konkretisiert werden die erarbeiteten Methoden an einem Antriebsstrang mit einem Doppelkupplungsgetriebe mit integrierter Traktionsmaschine vom Typ Magna 7HDT300. Dieses Getriebe stellt aufgrund seiner besonderen Hybridarchitektur und neu entwickelten Kupplungsaktoren besondere Anforderungen an die entworfenen Steuerungs- und Regelungsalgorithmen, wie z. B. die Echtzeitanforderung an die verwendeten Algorithmen. Daher werden modellbasierte Methoden zum Entwurf der Regelungsalgorithmen auf Aktorebene eingesetzt. Diese werden in ein übergeordnetes Schema zur Realisierung der Hybridfunktionen eingebettet. In Kombination mit geeigneten Methoden der Trajektoriengenerierung wird so ein gesamtheitlicher Ansatz zur Regelung der Aktoren des hybriden Getriebes aufgestellt. Für die Konzeptvalidierung wird eine Fallstudie zum geregelten Kupplungsstart durchgeführt. Dabei wird der Verbrennungsmotor aus der rein elektrischen Fahrt über eine Kupplung angeschleppt, während die Traktionsmaschine diesen Anschleppvorgang kompensiert.

Um das Fahrverhalten des geregelten Hybridgetriebes über den gesamten Lebenszyklus hinweg auf einem konstant hohen Niveau zu halten, werden die modellbasierten Konzepte um verschiedene Adaptionsmechanismen erweitert. Dabei kommen zum einen lernbasierte Methoden zur Kompensation von langsam wirkenden Effekten, wie Bauteilverschleiß zum Einsatz. Zum anderen werden schätzungsbasierte Verfahren zur Kompensation von schnell wirkenden Störungen wie dem Einfluss von hydraulischen Nebenaggregaten eingesetzt. Insgesamt werden so robuste und performante Konzepte zur Ansteuerung eines hybriden Doppelkupplungsgetriebes mit integrierter E-Maschine vorgestellt. Neben einer simulativen Untersuchung der erarbeiteten Konzepte werden diese anhand eines Versuchsaufbaus mit einem Getriebeprüfstand experimentell validiert.

Abstract

Hybrid vehicles play a key role in the reduction of fuel consumption and CO₂ emissions for private transport. Hybrid electric vehicles combine the advantages of the combustion engine technology with those of the electromobility and thus offer new functionalities that extend the two basic technologies. In return, they have a more complex structure due to the additional propulsion sources. This results in increased specifications for the control of the components and their coordination. The two main aspects are a high comfort and a dynamic response of the hybrid vehicle. To ensure the driver's acceptance, these open issues must be solved.

The present work investigates model-based approaches with a focus on control-related questions in the context of hybrid dual-clutch transmissions. The methods are applied to a drivetrain equipped with the hybrid dual-clutch transmission Magna 7HDT300 with an integrated electric machine. Due to its special architecture and newly developed clutch actuators, this transmission poses special demands on the used control algorithms, such as real-time requirements for the used algorithms. Therefore, model-based methods are used to develop control algorithms on the actuator-level. These are embedded in a high-level scheme for the realization of hybrid functions. In combination with suitable methods for trajectory generation, a holistic control approach for the actuators of the hybrid dual-clutch transmission is established. To validate the proposed concepts, a case study of a controlled clutch-startup is conducted. In a clutch-startup the vehicle drives electrically and the combustion engine is towed via a clutch while the traction machine compensates for this towing process.

In order to maintain a consistently high level of driving performance of the controlled hybrid transmission throughout the entire life cycle, the model-based concepts are extended with adaptation mechanisms. Learning-based methods are used to compensate for slow-acting effects such as component wear. In addition, estimation-based methods are used to compensate for fast-acting disturbances such as the influence of hydraulic auxiliaries. Overall, robust and performant concepts for the control of a hybrid dual-clutch transmission with an integrated electric machine are presented and implemented. The component models and developed control concepts are thoroughly validated through simulative examinations and experiments using a test setup with a transmission test bench.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Hybridelektrische Antriebsstränge	3
1.1.1	Hybridelektrofahrzeuge	3
1.1.2	Fahrzeuggetriebe	4
1.1.3	Hybride Doppelkupplungsgetriebe	8
1.2	Stand der Technik und Abgrenzung des Forschungsthemas	10
1.2.1	Stand der Technik bei der Regelung von Hybridfunktionen	10
1.2.2	Stand der Technik bei der Regelung von Antriebsstrangkomponenten	13
1.2.3	Anforderung an die Regelung von hybriden Doppelkupplungsgetrieben	16
1.3	Aufbau, Struktur und Ziele der Arbeit	18
1.3.1	Ziele der Dissertation	19
1.3.2	Inhaltliche Gliederung	21
2	Modellierung hybridelektrischer Antriebsstränge	23
2.1	Aufbau eines hybriden Gesamtfahrzeuges	24
2.2	Getriebeprüfstand	26
2.3	Kinetik des Antriebsstranges	28
2.4	Verbrennungskraftmaschinen	33
2.5	Elektrische Maschinen	35
2.6	Reibkupplungen	37
2.7	Fahrwiderstände	52
2.8	Kurzzusammenfassung	53
3	Modellbasierte Steuerung und Regelung hybrider Doppelkupplungsgetriebe	55
3.1	Systemtheoretische Analyse	57
3.1.1	Analyse der Kupplungsaktuierung	57
3.1.2	Analyse der Antriebsstrangkinetik	66
3.2	Steuerungsentwurf für die Traktionsmaschine	72
3.3	Steuerungs- und Regelungsentwurf für die Kupplung	74
3.3.1	Druckbasierter Regelungsansatz	74
3.3.2	Positionsbasierter Regelungsansatz	83
3.3.3	Experimentelle Validierung und Vergleich der beiden Regelungsansätze	94
3.4	Generierung systemverträglicher Trajektorien	104
3.4.1	Übersicht bekannter Verfahren zur Trajektoriengenerierung	104
3.4.2	Anforderungen an die Trajektoriengenerierung	106
3.4.3	Modellprädiktive Trajektoriengenerierung	108
3.4.4	Einfach stetig differenzierbare Referenztrajektorien	110

3.4.5	Zweifach stetig differenzierbare Referenztrajektorien	112
3.4.6	Verteilung der Momente im Antriebsstrang	115
3.5	Fallstudie: Geregelter Kupplungsstart	120
3.5.1	Modellprädiktiv bestimmte Referenztrajektorien	122
3.5.2	Polynomielle Referenztrajektorien mit stationären Übergängen	124
3.5.3	Polynomielle Referenztrajektorien mit instationären Übergängen	132
3.5.4	Vergleich der Referenztrajektorien	139
3.6	Kurzzusammenfassung	141
4	Adaptionsmechanismen in hybriden Doppelkupplungsgetrieben	143
4.1	Iterativ lernende Regelung	144
4.1.1	ILC in hybriden Getrieben	146
4.1.2	Initiale Adaption des Kiss Points mittels ILC	152
4.1.3	Online Adaption des Kiss Points mittels ILC	156
4.2	Modellbasierte Störgrößenschätzung und -kompensation	161
4.2.1	Störeffekte im Doppelkupplungsgetriebe	162
4.2.2	Modellbasierte Störgrößenschätzung	164
4.2.3	Störgrößenkompensation mittels differentieller Parametrierung	169
4.3	Kurzzusammenfassung	176
5	Zusammenfassung	179
A	Steuerbarkeit, Flachheit und Beobachtbarkeit von dynamischen Systemen	183
B	Singuläre Störtheorie	187
C	Inversionsbasierter Steuerungsentwurf für flache Systeme	189
D	Definition und Systemverträglichkeit einer Trajektorie	191
	Abkürzungen	193
	Nomenklatur	195
	Abbildungsverzeichnis	203
	Tabellenverzeichnis	205
	Literaturverzeichnis	207