

Regelungstechnische Ansätze zur aktiven Dämpfung von durch Kupplungsrupfen verursachten Schwingungen im Antriebsstrang

Dissertation

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

vorgelegt von
Robert Prabel,
geb. am 10.01.1982 in Rostock

Rostock
31. August 2017

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Harald Aschemann
Lehrstuhl für Mechatronik / Universität Rostock
Zweitgutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Joachim Horn
Lehrstuhl für Regelungstechnik /
Universität der Bundeswehr Hamburg

Tag der Verteidigung: 11. November 2016

Lehrstuhl für Mechatronik der Universität Rostock
2017

Berichte aus dem
Lehrstuhl für Mechatronik
Universität Rostock

Band 7

Robert Prabel

**Regelungstechnische Ansätze
zur aktiven Dämpfung von durch Kupplungsrupfen
verursachten Schwingungen im Antriebsstrang**

Shaker Verlag
Aachen 2017

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., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5528-3

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 Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mechatronik der Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik der Universität Rostock.

Mein außerordentlicher Dank gilt dem Lehrstuhlinhaber Herrn Prof. Dr.-Ing. Harald Aschemann, der mich durch die fachliche Betreuung sowie den vielen Anregungen und Verbesserungsvorschläge bei der Lösung der gegebenen Problemstellung unterstützt hat. Dankbar bin ich darüber hinaus für die vertrauensvolle Zusammenarbeit und die mir übertragene Verantwortung.

Des Weiteren möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Joachim Horn für die Erstellung des Zweitgutachtens und vielen hilfreichen Anmerkungen bedanken. Einen herzlichen Dank geht auch an Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h. Klaus Brökel für die Übernahme des Vorsitzes der Promotionskommission.

Zudem möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des Lehrstuhls für Mechatronik für die angenehme Zusammenarbeit und den konstruktiven Ideenaustausch bedanken, im Besonderen bei meinen ehemaligen Bürokollegen Dr.-Ing. Maik Leska und Dr.-Ing. Saif Siddique Butt sowie bei Dipl.-Ing. (FH) Ernst Langnau und Raimund Harms für die technische Umsetzung und Erweiterung der verwendeten Prüfstands aufgebauten.

Bedanken möchte ich mich bei meiner Familie, die mich während des Studiums nach Kräften unterstützt und motiviert haben. Vielen Dank geht zudem an meine Kinder Anna und Timon, die in der verbleibenden Zeit für viel Abwechslung und Spaß gesorgt haben.

Von Herzen möchte ich auch meiner Frau Kathy für ihre Geduld und fortwährende Unterstützung danken, zudem widme ich ihr diese Arbeit.

Rostock, im August 2017

Robert Prabel

Kurzfassung

Fahrzeuggetriebe ermöglichen ein sinnvolles Zusammenspiel von Verbrennungsmotor und Fahrzeug. Erst durch ihren Einsatz kann das limitierte Drehzahlband des Verbrennungsmotors sinnvoll für den Vortrieb genutzt werden. Zudem wird durch das Fahrzeuggetriebe auch ein Rückwärtsfahren ermöglicht. Je nach Fahrsituation können durch die Verwendung von unterschiedlichen Schaltstufen auftretende Fahrwiderstandskräfte überwunden werden. Entsprechend den Kundenwünschen sowie den auftretenden Anforderungen an das Getriebe werden manuell oder automatisch betätigte Getriebe verbaut. Um den Komfort von automatisch betätigten Getrieben vollständig umsetzen zu können, ist es sinnvoll, eine automatisch arbeitende Reibkupplung oder einen Momentenwandler mit Überbrückungskupplung zwischen Verbrennungsmotor und Getriebe vorzusehen. Für den Fahrer entfallen somit hohe Pedalkräfte, die Konzentration auf die Gangwahl sowie die Vorgabe des richtigen Kupplungsdrucks. Weiterhin kann der durch Fehlbetätigungen verursachte Verschleiß reduziert werden, was wiederum zu einem geringeren Ausfallrisiko sowie einer höheren Lebensdauer des Reibbelags führt. Entsprechend hoch sind daher die Anforderungen an das auf dem Getriebesteuergerät hinterlegte Regelungskonzept für den Betrieb und der Überwachung der automatisierten Kupplung.

Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag zur aktiven Dämpfung von durch Kupplungsrupfen verursachten Schwingungen im Antriebsstrang liefern. Zur Aufschaltung eines berechneten Dämpfungsmoments an der Kupplung ist neben dem Antriebsstrang auch die Kupplung selbst zu betrachten. In dieser Arbeit wird der Ausrücker der Kupplung durch einen elektropneumatisch angesteuerten Kupplungssteller betätigt. Hieraus resultieren zwei Problemstellungen, die in dieser Arbeit detailliert betrachtet werden. Zum Einem wird eine Regelung für die Position des Kupplungsstellers entworfen. Zum Anderen erfolgt eine Gegenüberstellung von drei Regelungskonzepten zur aktiven Schwingungsdämpfung im Antriebsstrang eines Lkw. Weiterhin ist das dynamische Verhalten der geregelten Kupplung in der Regelungsstruktur zur aktiven Schwingungsdämpfung berücksichtigt.

Zur Regelung der Position des Kupplungsstellers wird in dieser Arbeit ein modellbasierter Optimalregelungsansatz vorgeschlagen. Hierzu wird in einem ersten Schritt ein nichtlineares regelungsorientiertes Modell für den Regelungsentwurf aufgestellt.

Besonderes Augenmerk liegt hierbei auf der nichtlinearen hysteresebehafteten Ausrückkraftkennlinie, wobei sich die Hysterese durch ein geeignetes Bouc-Wen-Hysterese Modell modellieren lässt. Zur Kosteneinsparung wird im Serieneinsatz auf die Messung des Zylinderinnendruckes des Kupplungsstellers verzichtet. Neben dem Positions- und Geschwindigkeitssignal des Kupplungsstellers ist das Drucksignal jedoch erforderlich für die vollständige Zustandsrückführung des Optimalregelungsansatzes. Durch die Verwendung eines nichtlinearen reduzierten Beobachters kann der nicht gemessene Druck aus den vorhandenen Messsignalen rekonstruiert werden und steht für die Zustandsrückführung zur Verfügung. Vervollständigt wird das Regelungskonzept durch eine adaptive dynamische Vorsteuerung. Abschließend erfolgt eine Validierung der vorgeschlagenen Regelungsstruktur an einem geeigneten Prüfstands Aufbau. Die erzielten Ergebnisse zeigen sowohl ein sehr gutes Trajektorienfolgeverhalten als auch eine hohe stationäre Genauigkeit.

Die aktive Dämpfung von Schwingungen im Antriebsstrang erfolgt durch eine Umschaltung eines zusätzlichen Moments an der Kupplung. In dieser Arbeit ist der Entwurf von drei Konzepten zur unterschiedlichen Berechnung des aufzuschaltenden Dämpfungsmoments dargestellt. Zur Berücksichtigung der interessierenden Dynamiken der infolge von Kupplungsrufen angeregten Schwingungen des Antriebsstrangs wird ein Torsionsschwinger mit zwei Drehmassen als Entwurfsmodell hergeleitet. Eine Validierung der entworfenen Dämpfungskonzepte an einem vorhandenen Prüfstands Aufbau zeigt, dass eine deutliche Reduzierung der Schwingungsamplituden erzielt werden kann.

Abschließend erfolgt im Rahmen dieser Arbeit eine Berücksichtigung des Übertragungsverhaltens des geregelten Kupplungsstellers für die aktive Schwingungsdämpfung in Form einer zusätzlichen Aktordynamik. Das Übertragungsverhalten des geregelten Kupplungsstellers wird sowohl am Prüfstands Aufbau als auch in Simulationen in verschiedenen Arbeitspunkten identifiziert und anschließend invertiert. Zur Berücksichtigung des Übertragungsverhaltens wird für die experimentellen Untersuchungen am Torsions-Prüfstand ein modellbasiertes Simulationsmodell des geregelten Kupplungsstellers implementiert und in Echtzeit ausgewertet. Versuche am Torsions-Prüfstand zeigen, dass auch bei Einbeziehung des Übertragungsverhaltens des geregelten Kupplungsstellers sehr gute Ergebnisse für die aktive Schwingungsdämpfung erzielt werden.

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	VII
Abbildungsverzeichnis	IX
Symbolverzeichnis	XIII
1 Einleitung	1
1.1 Gliederung der Arbeit	2
1.2 Stand der Technik	5
1.2.1 Regelungskonzepte für Fahrzeugkupplungen	6
1.2.2 Schwingungsdämpfung im Antriebsstrang von Fahrzeugen	7
2 Regelungsorientierte Modellbildung des Kupplungsstellers	9
2.1 Prüfstands Aufbau	9
2.2 Modellierung des mechanischen Teilsystems	11
2.3 Modellierung des Hystereseanteils in der Ausrückkraftkennlinie	15
2.4 Modellierung des pneumatischen Teilsystems	17
2.5 Modellierung der Ventileinheit	20
3 Entwurf einer Positionsregelung für den Kupplungssteller	23
3.1 Entwurfsmodell auf Basis der Erweiterten Linearisierung	25
3.2 Adaptive Riccati-Zustandsrückführung	27
3.3 Stabilitätsanalyse für den geregelten Kupplungssteller	30
3.4 Adaptiver Vorsteuerungsentwurf	31
4 Nichtlinearer reduzierter Druckbeobachter	33
4.1 Betrachtungen zur Beobachtbarkeit des Zylinderinnendrucks	34
4.2 Entwurf des Beobachters zur Schätzung des effektiven Zylinderinnendrucks	36
4.3 Erweiterung des Beobachters zur Schätzung von Massenstromfehlern	39

5	Experimentelle Ergebnisse zur Kupplungsregelung	43
5.1	Vorbetrachtungen zu den experimentellen Versuchen	44
5.2	Ergebnisse zur Trajektorienfolge	45
6	Regelungsorientierte Modellbildung des Lkw-Antriebsstrangs	51
6.1	Darstellung des Gesamtsystems	51
6.2	Regelungsorientiertes Modell des Antriebsstrangs	53
7	Regelungsansätze zur Reduktion der Amplituden von Drehschwingungen im Antriebsstrang	57
7.1	Bandpassbasierte Dämpfung	59
7.2	DT_1 -Rückführung der Getriebeeingangswinkelgeschwindigkeit	61
7.3	Modellbasierte aktive Schwingungsdämpfung	63
7.4	Sliding-Mode-Zustands- und Störbeobachter	64
8	Experimentelle Ergebnisse zur Schwingungsdämpfung	69
8.1	Prüfstands Aufbau zur Nachbildung von Torsionsschwingungen im Antriebsstrang	69
8.2	Identifikation der Prüfstandsparameter des Torsionsschwingers	71
8.3	Implementierung und Test der Dämpfungskonzepte	74
8.3.1	Validierung des Sliding-Mode-Zustands- und Störbeobachters	75
8.3.2	Validierung der Konzepte zur aktiven Schwingungsdämpfung	76
8.3.3	Aktive Schwingungsdämpfung mit veränderlichem Fahrermoment	80
9	Berücksichtigung der geregelten Kupplung in der Schwingungsdämpfung	85
9.1	Identifikation des Übertragungsverhaltens des geregelten Kupplungsstellers	86
9.1.1	Kreuzkorrelation zur Identifikation des Übertragungsverhaltens	86
9.1.2	Identifikation der Übertragungsfunktion	89
9.2	Validierung der identifizierten Übertragungsfunktion anhand von Simulationen	90
9.3	Erweiterung des Regelungskonzepts zur aktiven Schwingungsdämpfung	93
9.4	Validierung der Erweiterung am Torsionsschwinger-Prüfstand	95
10	Zusammenfassung und Ausblick	101
	Literaturverzeichnis	105