

Schwingungsoptimierung an einem Parallel-Hybridfahrzeug

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Jan Steiner

aus: Nordhorn

eingereicht am: 24.07.2015

mündliche Prüfung am: 04.12.2015

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Georg-Peter Ostermeyer
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Meywerk

2015

Schriftenreihe Institut für Dynamik und Schwingungen
TU Braunschweig

Jan Steiner

**Schwingungsoptimierung
an einem Parallel-Hybridfahrzeug**

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.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2015

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 978-3-8440-4162-0

ISSN 1865-9101

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 Dissertation ist im Rahmen meiner Tätigkeit als Doktorand und als Angestellter bei der Volkswagen AG in der Abteilung für Hybridkomponenten entstanden.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. habil. Georg-Peter Ostermeyer für die Betreuung meiner Promotion. Sein anhaltendes Interesse sowie die fruchtbaren Diskussionen und die Motivationen waren die Grundlage für das Gelingen dieser Arbeit. Des Weiteren möchte ich mich ganz herzlich bei Prof. Dr.-Ing. Martin Meywerk für die Übernahme des Zweitgutachtens sowie für die damit verbundenen Bemühungen und sein entgegengebrachtes Interesse bedanken. Weiterhin danke ich Prof. Dr.-Ing. Rainer Tutsch für die Übernahme des Vorsitzes des Verfahrens.

Seitens meines Arbeitgebers wurde ich betreut durch Dr.-Ing. Robert Plikat und dies später sogar über Abteilungsgrenzen hinweg. Er hat mich immer wieder motiviert und stand mir jederzeit mit Rat und Tat zur Seite. Dafür möchte ich mich an dieser Stelle ganz besonders bedanken. Weiterhin bedanke ich mich bei Dipl.-Ing. Peter Lück, dem Leiter der Abteilung, dafür dass er diese Arbeit überhaupt erst möglich gemacht hat und für das lang anhaltende Vertrauen. Ferner bedanke ich mich bei all meinen Kollegen der Abteilung für die gute Zusammenarbeit. Für die Unterstützung bzgl. der Erstellung der Software möchte ich mich bei Dr.-Ing. Andrea Arenz sowie Dr.-Ing. Stefan Detering bedanken. Weiterhin bedanke ich mich herzlich bei Dipl.-Ing. Rainer Wrede für die kollegiale Unterstützung insbesondere bei Simulationsthemen. Außerdem möchte ich mich bei den Mitarbeitern des IDS an der TU Braunschweig für die fachlichen Diskussionen und die freundschaftliche Atmosphäre bedanken.

Herzlich bedanke ich mich bei meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, die mich in allen Lebensabschnitten bedingungslos unterstützt und jederzeit Anteil genommen haben. Schließlich kann ich mich bei meiner Frau Sarah gar nicht genug bedanken, dafür dass Sie mir den Rücken freigehalten, mich immer unterstützt und zwei bezaubernde Söhne, Elias und Joshua, geschenkt hat. Ich liebe euch drei sehr.

Braunschweig im Dezember 2015

Jan Steiner

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen AG.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	VII
Symbolverzeichnis	IX
Kurzfassung	XV
Abstract	XVII
1 Einleitung	1
2 Antriebsstrang im Hybridfahrzeug	7
2.1 Hybridisierung des Antriebsstrangs	7
2.1.1 Grad der Elektrifizierung	7
2.1.2 Hybridtopologien	9
2.1.3 Hybridkomponenten	13
2.1.4 Hybridfunktionen	17
2.2 Schwingungen im Antriebsstrang	19
2.2.1 Schwingungsanregung	20
2.2.2 Schwingungsdämpfung	27
2.3 Zusammenfassung	31
3 Schwingungsanalyse des Antriebsstrangs	33
3.1 System Antriebsstrang	33
3.2 Varianten mechanischer und elektrischer Schwingungsdämpfung	34
3.3 Aufbau Lineares Modell	35
3.3.1 Modellherleitung	35
3.3.2 Mathematische Beschreibung	38
3.4 Bewertung der Kombination EM und ZMS	41
3.5 Definition von Maßnahmen zur Schwingungsoptimierung	47
3.6 Zusammenfassung	48
4 Aufbau eines Simulationsmodells	51

4.1	Stand der Technik	51
4.2	Gesamtmodell	53
4.2.1	Lineare Grundelemente	53
4.2.2	Fahrzeug	54
4.2.3	Getriebe	56
4.2.4	E-Antrieb	58
4.2.5	Kupplung K0	63
4.2.6	Batterie	63
4.2.7	Verbrennungsmotor	64
4.2.8	Betriebsstrategie	68
4.3	Abgleich mit Fahrzeugmessungen	69
4.4	Zusammenfassung	71
5	Bewertung von Maßnahmen zur Schwingungsoptimierung	73
5.1	Abstimmung von erzwungenen Schwingungen	73
5.2	Aktiver Eingriff durch die Elektromaschine	74
5.2.1	Verfahren zur Ermittlung von Schwingungen	74
5.2.2	Virtuelle Trägheit	80
5.2.3	Aktive Schwingungsdämpfung	82
5.3	Reduzierung der Reibung im ZMS	91
5.4	Zusammenfassung und Bewertung der Maßnahmen	94
6	Aktive Dämpfung im Fahrzeug	97
6.1	Randbedingungen an die Umsetzbarkeit	97
6.2	Aufbau des Zustandsschätzer	97
6.3	Fahrversuche und Auswertung	99
6.4	Zusammenfassung und Bewertung	101
7	Zusammenfassung und Ausblick	103
	Anhang	107
A	Blockstruktur des Reglers	108
	Abbildungsverzeichnis	109
	Tabellenverzeichnis	110
	Literaturverzeichnis	112