
Aktive Beruhigung verbrennungsmotorisch erregter Drehschwingungen im hybriden Fahrzeugantriebsstrang

Am Fachbereich Maschinenbau an der Technischen Universität Darmstadt

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. David Christopher Buch

aus Bad Soden am Taunus

Berichterstatter:	Prof. Dr. techn. Christian Beidl
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Stephan Rinderknecht
Tag der Einreichung:	19.04.2016
Tag der mündlichen Prüfung:	14.06.2016

Darmstadt 2016

D17



Schriftenreihe des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und
Fahrzeugantriebe

Band 6

David Christopher Buch

**Aktive Beruhigung verbrennungsmotorisch
erregter Drehschwingungen im hybriden
Fahrzeugantriebsstrang**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

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.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2016

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 978-3-8440-5125-4

ISSN 2365-3795

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



Meinen lieben Eltern gewidmet





Vorwort des Autors

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe der Technischen Universität Darmstadt.

Ich danke meinem Doktorvater und Fachgebietsleiter Herrn Prof. Dr. techn. C. Beidl für die Möglichkeit zu promovieren und über die Jahre an hochspannenden Themen zu forschen. Vor allem das mir entgegengebrachte Vertrauen diese Themen mit großem Freiraum bearbeiten zu können habe ich sehr geschätzt. Die regelmäßigen fachlichen Diskussion und wertvollen Ratschläge haben mich stets vorwärtsgebracht und auch wesentlich zu dem Gelingen der Arbeit beigetragen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. S. Rinderknecht danke ich für die Übernahme des Korreferats, seinem Interesse an der Arbeit, sowie für die vielen wertvollen inhaltlichen Vorschläge.

Besonderer Dank gilt auch Herrn Prof. Dr.-Ing. G. Hohenberg für die vielen intensiven und fruchtbaren Diskussionen und guten Ratschläge, die mir geholfen haben den Fokus zu finden, sowie für sein stets offenes Ohr.

Es hat mir besondere Freude bereitet mit solch tollen Kollegen in einer kameradschaftlichen Atmosphäre am Fachgebiet zusammenzuarbeiten. Ich möchte mich bei allen für die vielseitigen fachlichen Gespräche und die schöne Zeit bedanken. Explizit gilt der Dank den Herren Maximilian Bier und Raja Vadamalu für die Unterstützung in Hybrid- und Regelungstechnikfragen, sowie Herrn Christoph Halscheidt für die Unterstützung am Prüfstand.

Allen Studenten, die durch ihre wissenschaftlichen Arbeiten und Tätigkeiten als Hilfswissenschaftler einen wesentlichen Beitrag zu der Arbeit geleistet haben, möchte ich ebenfalls ganz besonders danken.

Für das Korrekturlesen der Arbeit und die vielen inhaltlichen Ratschläge und Diskussionen danke ich Herrn Andreas Viehmann.

Zu guter Letzt gebührt mein herzlichster Dank meiner Familie, die mich in jeder Lebensphase uneingeschränkt unterstützt hat, sowie meiner lieben Freundin Maja für das Verständnis, die Geduld und die unglaubliche Unterstützung gerade in der Fertigstellungsphase der Arbeit. Ohne euch wäre das Vorhaben nicht möglich gewesen.

Darmstadt, im April 2016

David C. Buch



Abstract

Focus of the work is the systematic analysis and implementation of an innovative approach termed directE for active reduction of torsional oscillations of an automotive hybrid powertrain. The effect is based on reduction of the excitation frequency resulting from the internal combustion engine using pulsating torque from the electric traction machine (EM) and short-term combustion engine torque reduction, which reduces the amplitude of excitation. The combination of the effects improves the isolation of a dual mass flywheel (DMF), which is pushed to limits with the reduced number of cylinders. This fact motivates an arrangement on the primary side of the DMF. The technique is investigated on the parallel Plug-In-Hybrid EV-CEA (Electric Vehicle – Combustion Engine Assist) with a two cylinder combustion engine.

A concept of feed-forward control was formulated based on theoretical analysis of the reduction effect of pulsed operation of the EM. Triggering of the pulses is done with reference to spark timing of the combustion engine. The concept was compared with classic compensation on the secondary side of the DMF using simulation. In operation around a mean electrical machine torque, the electrical losses of both the variants lie in a comparable range. In case of directE, there is a shift of the mechanical losses of the DMF to the electrical path and hence reducing the burden of the DMF.

Experimental investigations of the proposed concept were performed on a test setup with hybrid powertrain components. The test setup reproduces similar conditions as in the vehicle by emulating torsional dynamics of a powertrain with DMF. The feed-forward control concept was implemented in resonance operation and in acceleration maneuvers, which enabled the validation of the theoretical results of vibration reduction at powertrain- and component-level. The dynamic response of the test setup was identified to increase fidelity of the model used for simulative studies.

directE shifts the operating point of the combustion engine and the EM, hence interoperation with an hybrid vehicle operating strategy and efficiency in driving cycles in charge sustaining operation have been investigated. Owing to the short time directE operation in critical operating points from vibration perspective, resulted in reduced vibration with negligible energy consumption.

The gathered knowledge show advantages and feasibility of directE and can be used for application in hybrid powertrains with different power or torque ratios of combustion engine and EM.



Kurzfassung

Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit ist die systematische Analyse und Umsetzung eines neuartigen Verfahrens namens directE zur aktiven Beruhigung von Drehschwingungen im Hybridantriebsstrang. Der Beruhigungseffekt beruht zum einen auf der Erhöhung der Anregungsfrequenz des Verbrennungsmotors (VM) durch ein pulsartig aufgeprägtes E-Motormoment und zum anderen auf einer kurzzeitigen Lastabsenkung des VMs, wodurch die Anregungsamplitude verringert wird. Somit wird die Isolation eines Zweimassenschwungrads (ZMS), das bei Motoren mit niedriger Zylinderzahl an seine Grenzen stößt, verbessert. Daher bietet sich eine Anordnung auf der Primärseite des ZMS an. Das Verfahren wird exemplarisch an dem parallelen Plug-In-Hybrid EV-CEA (Electric Vehicle – Combustion Engine Assist) mit Zweizylindermotor untersucht.

Aus einer theoretischen Betrachtung der Beruhigungswirkung durch das Pulsen lässt sich ein Steuerungskonzept ableiten, das in Abhängigkeit des Zündzeitpunkts die Pulse aufprägt. Zur Bewertung von directE wird ein Konzeptvergleich mittels Simulation zwischen directE und einer Kompensation auf der Sekundärseite mit gegenphasigem E-Motormoment durchgeführt. Bei vergleichbarer Triebstrangberuhigung und Abgabe eines mittleren E-Motormoments liegen die elektrischen Mehrverluste beider Varianten auf vergleichbarem geringem Niveau. Im Fall directE verschieben sich zum Teil die mechanischen Verluste des ZMS in den elektrischen Pfad und es findet somit eine Entlastung des ZMS statt.

Für den experimentellen Funktionsnachweis wird das Verfahren fahrzeugnah am Prüfstand mit Hybridaggregat umgesetzt, der sich schwingungstechnisch ZMS-ähnlich verhält. Das Steuerungskonzept lässt sich sowohl im Bereich der Resonanz als auch bei Beschleunigungsvorgängen stabil umsetzen, wodurch die theoretischen Ergebnisse hinsichtlich der Beruhigungswirkung auf Triebstrang- und Aggregateschwingung bestätigt werden. Da sich durch directE die Betriebspunkte von VM und E-Motor verschieben, wird ein Ansatz zur Integration in die Hybrid-Betriebsstrategie entwickelt und die Effizienz mittels Fahrzeugsimulation im Fahrzyklus mit ausgeglichener Ladebilanz analysiert. Es stellt sich ein vernachlässigbarer Energiebedarf bei gleichzeitig niedrigen Schwingungsamplituden ein, da directE nur kurzzeitig in kritischen Betriebsbereichen zum Einsatz kommt.

Die gewonnen Erkenntnisse zeigen die Vorteile und Umsetzbarkeit von directE und ermöglichen einen Übertrag für den Einsatz von directE in Hybriden mit anderen Leistungs- bzw. Drehmomentverhältnissen von VM und E-Motor.



Inhaltsverzeichnis

Vorwort des Autors	i
Abstract	iii
Kurzfassung	v
Inhaltsverzeichnis	vii
Abbildungsverzeichnis	xi
Tabellenverzeichnis	xvii
Abkürzungsverzeichnis	xix
Verzeichnis der Formelzeichen und Indizes	xxi
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	2
1.2 Beitrag der Arbeit	3
1.3 Aufbau der Arbeit	5
2 Grundlagen und Stand der Technik	7
2.1 Ursachen von Drehschwingungen	7
2.1.1 Gaskräfte des VMs	7
2.1.2 Massenkkräfte des VMs	10
2.1.3 Gesamtmoment des VMs	12
2.2 Schwingungsphänomene und Auswirkungen	13
2.2.1 Schwingungsphänomene und Übertragungspfade	13
2.2.2 Antriebsstrangresonanz und Übertragungsverhalten	16
2.3 Beurteilung von Drehschwingungen	18
2.4 Maßnahmen zur Drehschwingungsberuhigung	20
2.4.1 Passive Maßnahmen	22
2.4.2 Aktive Maßnahmen	26
2.5 Hybridantriebe	29

2.6	E-Motoren und Leistungselektronik.....	32
3	Beruhigungsvariante und Modellbildung des CEA-Hybrids	39
3.1	Das EV-CEA-Konzept	39
3.2	Beruhigungsvarianten	41
3.2.1	Variante 1 - EM auf Primärseite.....	41
3.2.2	Variante 2 - EM auf Sekundärseite	43
3.2.3	Einordnung beider Varianten	45
3.3	Modellbildung.....	47
3.3.1	Simulationsmodelle von Drehschwingungen in Fahrzeugantrieben.....	47
3.3.2	Zweizylindermotor	48
3.3.3	Elektrische Komponenten	53
3.3.4	Gesamttriebstrangmodell	58
3.3.5	Erweiterung für die Zyklussimulation.....	63
3.4	Bewertungskriterien	64
3.4.1	Fahrmanöver	64
3.4.2	Beruhigungswirkung	65
3.4.3	Energiebedarf und Verluste.....	66
4	Entwicklung und Analyse des directE-Verfahrens	71
4.1	Beruhigungswirkung durch Pulsen.....	71
4.1.1	Pulsform.....	76
4.1.2	Momentengradient.....	78
4.1.3	Phasenlage	80
4.1.4	Pulskennfeld.....	82
4.2	Steuerungskonzept.....	83
4.2.1	Anforderungen und Ziele	83
4.2.2	Entwurf directE	86
4.2.3	Generierung des Stellsignals	89
4.3	Analyse in der Triebstrangsimulation und Vergleich zu alternativen Beruhigungsstrategien.....	93

4.3.1	Beruhigungswirkung.....	94
4.3.2	Betrachtung der Verluste	97
4.3.3	Fazit.....	98
5	Experimenteller Funktionsnachweis am CEA-Hybridprüfstand	101
5.1	Schwingungsuntersuchung am Prüfstand	101
5.1.1	Höchstdynamischer Motorenprüfstand	102
5.1.2	Realer (Teil)-Antriebsstrang am Prüfstand.....	103
5.1.3	Diskussion und Auswahl der Methode	104
5.2	Prüfstands Aufbau - Komponenten und Messtechnik.....	104
5.2.1	Prüfstandssteuerung und Komponenten des Basisaufbaus	105
5.2.2	Relevante Messtechnik.....	108
5.2.3	Drehsteifer Aufbau für Umsetzung von directE	110
5.3	Identifikation und Modellbildung des Prüfstandsverhaltens	113
5.3.1	Belastungsmaschine (Dyno).....	114
5.3.2	Drehsteifer Prüfstandaufbau	116
5.3.3	Analyse des Gesamtsystems und Validierung des Prüfstandsmodells .	120
5.3.4	Vergleich zum Fahrzeugtriebstrang	122
5.3.5	Lagerschwingung zur Bewertung der Karosserieanregung	124
5.3.6	Fazit.....	125
5.4	Experimentelle Verifizierung und Ergebnisdarstellung	126
5.4.1	Beruhigungswirkung.....	126
5.4.2	Betrachtung der Verluste	134
5.5	Fazit.....	136
6	Betriebsstrategische Umsetzung	139
6.1	CEA-Basis-Betriebsstrategie	139
6.2	directE-Betriebsstrategie	140
6.2.1	Annahmen und Gütekriterium	141
6.2.2	Entwicklung und Integration der directE-Betriebsstrategie	142
6.3	Analyse im Zyklus im Charge Sustaining Betrieb	148

6.4	Fazit	151
7	Zusammenfassung und Ausblick	153
7.1	Zusammenfassung.....	153
7.2	Ausblick.....	158
Anhang		161
A.	Modellbildung.....	161
A.1	Fahrzeug und Triebstrang	161
A.2	Identifikation der EM-Dynamik	162
B.	Daten der Komponenten	164
B.1	Weber MPE 850 DOHC NA.....	164
B.2	IMG 300 und LE	166
C.	Fourierreihe	166
D.	Echtzeitsystem.....	167
E.	Weitere experimentelle und simulative Ergebnisse.....	168
E.1	Experimentelle Ergebnisse.....	168
E.2	Simulative Ergebnisse	171
Literaturverzeichnis		173