

Schriftenreihe
des Instituts für
Fahrzeugtechnik
TU Braunschweig



Nr: 56

M.Sc.
Mark Schudeleit
2018

Emissionsreduzierung von Hybridantrieben im Zyklus- und Kundenbetrieb

Herausgegeben von:
Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay

Emissionsreduzierung von Hybridantrieben im Zyklus- und Kundenbetrieb

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

zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von
Mark Simon Schudeleit
aus Goslar

eingereicht am: 23.05.2017

mündliche Prüfung am: 11.12.2017

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. F. Küçükay

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. P. Eilts

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. L. Frerichs

2017

Schriftenreihe des Instituts für Fahrzeugtechnik
TU Braunschweig

Band 56

Mark Schudeleit

**Emissionsreduzierung von Hybridantrieben
im Zyklus- und Kundenbetrieb**

Shaker Verlag
Aachen 2018

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., 2017

Copyright Shaker Verlag 2018

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5721-8

ISSN 1619-6325

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 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Carolo Wilhelmina zu Braunschweig. Ich möchte an dieser Stelle allen Personen meinen Dank aussprechen, die mich direkt und indirekt bei der Erstellung der Arbeit unterstützt haben.

Meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. F. Küçükay möchte ich für die aktive Unterstützung sowie die fachliche und überfachliche Förderung sehr danken. Die von Beginn an übergebene Verantwortung und das damit entgegengebrachte Vertrauen haben wesentlich zu meiner persönlichen Weiterentwicklung beigetragen.

Weiterhin gilt mein Dank den Mitgliedern der Prüfungskommission, dem Vorsitzenden Prof. Dr.-Ing. L. Frerichs, Leiter des Instituts für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge der Technischen Universität Braunschweig, und dem Mitberichterstatte Prof. Dr.-Ing. P. Eilts, Leiter des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen der Technischen Universität Braunschweig.

Allen aktiven und ehemaligen Mitarbeitern des Instituts für Fahrzeugtechnik und des Niedersächsischen Forschungszentrums Fahrzeugtechnik sei an dieser Stelle für ihre Unterstützung und die stets gute Zusammenarbeit gedankt. Insbesondere sind hier Frau Dr.-Ing. Kathrin Inderwisch-Bitter, Frau Dr. Kerstin Schmidt und Herr Dipl.-Ing. Axel Sturm für den fachlichen Austausch und die zahlreichen Ratschläge zu nennen.

Ich möchte mich, neben Weiteren, namentlich bei meinem Bruder, Dr. Sc. Timo Schudeleit, M. Sc. Jörn Hinrichs, Dipl.-Ing. Christian Stamme und M. Sc. Meng Zhang bedanken, die ihre Freizeit für die Korrektur der vollständigen Arbeit aufgewendet haben.

Besonderer Dank gilt meinen Eltern, die jederzeit hinter mir standen und mich auf meinem Lebensweg uneingeschränkt unterstützt haben. Danke!

Braunschweig, 11.12.2017

Mark Simon Schudeleit

Emissionsreduzierung von Hybridantrieben im Zyklus- und Kundenbetrieb

von Mark Simon Schudeleit

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit liefert einen Beitrag zur ganzheitlichen Reduzierung von CO₂- und Schadstoffemissionen von Hybridfahrzeugen im Zulassungszyklus und realen Fahrbetrieb durch repräsentative Auslegung der Antriebskomponenten und multikriterielle Optimierung der Hybrid-Betriebsstrategie. Es wird beantwortet, mit welchen Maßnahmen im Antrieb, in der Betriebsstrategie sowie in der Abgasnachbehandlung heutige und zukünftige Emissionsgrenzwerte eingehalten werden können.

Zur Abbildung des Emissionsverhaltens von CO₂ sowie der Schadstoffe Stickoxid (NO_x) und Ruß im realen Fahrbetrieb eines Diesel-Fahrzeugs werden dynamische Emissionsmodelle aufgebaut und verifiziert. Um diese Modelle abzuleiten, werden repräsentative Prüfstandsabläufe erstellt, das Emissionsverhalten des Verbrennungsmotors vermessen und das Systemverhalten analysiert. Die Auslegung der Antriebskomponenten des Hybridantriebs erfolgt für den Kundenbetrieb anhand von Messdaten aus der 3F-Messdatenbasis (Fahrer, Fahrzeug, Fahrumgebung). Zur Bewertung der Betriebsstrategien werden neben gesetzlichen Zyklen Kundenzyklen erzeugt, die hinsichtlich der Emissionen den realen Fahrbetrieb für unterschiedliche Fahrer und Fahrumgebungen in geraffter Form wiedergeben.

Ausgehend von einer zur Reduktion von Energieverbräuchen und somit CO₂-Emissionen definierten Basis-Betriebsstrategie werden weitere Betriebsstrategiegrenzen abgeleitet, um gezielt Einfluss auf die Schadstoffemissionen zu nehmen. Für die erweiterte Betriebsstrategie werden die Emissionseinsparungspotenziale für CO₂, NO_x und Ruß im Zyklus- und Kundenbetrieb unter anderem abhängig von der Effizienz der Abgasnachbehandlung ermittelt. Im Ergebnis erlaubt dies konkrete Aussagen zu Anpassungen, mit denen künftige, verschärfte Emissionsgesetzgebungen eingehalten werden können.

Da die optimale Parametrierung der Betriebsstrategie vom Fahrstil und der Fahrumgebung abhängig ist, wird zur Anpassung während des Fahrbetriebs eine adaptive Betriebsstrategie unter Nutzung von Fahrstil- und Fahrumgebungsidentifikatoren umgesetzt. Das Konzept wird durch Algorithmen des maschinellen Lernens erweitert und im Kundeneinsatz bewertet.

Die Untersuchungen in dieser Arbeit haben ergeben, dass eine auf CO₂-Emissionen optimierte Betriebsstrategie zu erhöhten NO_x-Emissionen gegenüber konventionellen Fahrzeugen führt. Zukünftige Emissionsbeschränkungen, gerade im realen Fahrbetrieb, können bei Verwendung dieser Betriebsstrategie nur durch eine weitere Verbesserung der Abgasnachbehandlung eingehalten werden. Die erweiterte Betriebsstrategie bietet das Potenzial, gezielt Emissionen zu beeinflussen. Ausgehend von einer CO₂-optimalen Betriebsstrategie erlauben geringfügige Anpassungen bereits signifikante Einsparungen von NO_x-Rohemissionen im Zyklus sowie im realen Fahrbetrieb. Zukünftige Emissionsgesetzgebungen wie auch Verschärfungen des Fahrstils in Tests des praktischen Fahrbetriebs können somit durch eine vereinfachte und kostengünstige Abgasnachbehandlung erfüllt werden.

Abschließend wird dargestellt, dass Betriebsstrategien mit Algorithmen des maschinellen Lernens durch die individuelle Anpassung der Parametrierung an bevorstehende Fahrsituationen weitere Emissionseinsparungspotenziale bergen.

Reducing Emissions from Hybrid Electric Vehicles in Driving Cycles and Customer Use

by Mark Simon Schudeleit

Abstract

This paper provides a contribution to the complete reduction of CO₂ and pollutant emissions from hybrid vehicles in driving cycles and real-life driving through the representative layout of the drivetrain components and a multi-criteria optimisation of the hybrid control strategy. It will be shown what measures in terms of drivetrain, control strategy and exhaust aftertreatment can be used in order to meet present and future emissions limits.

In order to represent the emission behaviour of CO₂ and the pollutants nitrogen oxide (NO_x) as well as soot in real driving of a diesel vehicle, dynamic emission models are created and verified. To derive those models, representative test bench processes are generated, the emissions of the internal combustion engine are measured and the system behaviour is analysed. The layout of the hybrid drivetrain components is done for customer operation based on measured data from the 3D measurement data base (driver, driven vehicle, driving environment). In addition to legal driving cycles, customer driving cycles – representing the real driving emissions for different drivers and driving environments in a condensed form – are generated to evaluate the control strategy.

Based on the basic control strategy defined to reduce energy consumption and thus CO₂ emission, further control strategy rules are developed to specifically affect pollutant emissions. For this enhanced control strategy, the emissions reduction potentials in CO₂, NO_x and soot are determined inter alia with regard to the efficiency of exhaust aftertreatment in driving cycles and customer use. Thus, conclusions can be drawn about the adjustments that are required to meet tighter emissions standards in the future.

Since the optimal parameterisation of the control strategy depends on driving style and driving environment, an adaptive control strategy is applied where both driving style and driving environment are identified while driving for the adjustment of the control strategy. The concept is enhanced through algorithms of machine learning and evaluated in real-life driving.

The analyses revealed that a control strategy optimised in terms of CO₂ emissions results in higher NO_x emissions compared to conventional vehicles. If this control strategy is used, future emissions limits – particularly in real-life driving – will only be met if exhaust aftertreatment is further enhanced. The advanced control strategy, however, can specifically affect emissions. Coming from a CO₂-optimised control strategy, minor adjustments already allow for significant reductions in NO_x raw emissions in driving cycles and real-life driving. Therefore, future emissions standards and further intensification of the driving style in *Real Driving Emissions* tests can also be met through simplified and cost-efficient exhaust aftertreatment.

Finally, it will be shown that control strategies with algorithms of machine learning offer further emissions saving potential due to the individual adjustment of the parameters to upcoming driving situations.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	ix
Formelzeichen und Abkürzungen	xi
1 Einführung.....	1
1.1 Motivation und Zielsetzung	3
1.2 Aufbau der Arbeit	4
2 Stand der Technik	9
2.1 3F-Parameterraum.....	9
2.2 Dieselmotorische Grundlagen	10
2.2.1 Entstehung von Emissionen.....	10
2.2.2 Maßnahmen zur Reduzierung von Emissionen	11
2.3 Experimentelle Modellbildung.....	13
2.3.1 Statistische Versuchsplanung	14
2.3.2 Metamodellierung durch künstliche neuronale Netze	15
2.4 Optimierungsverfahren.....	17
2.5 Maschinelles Lernen	18
3 Modellierung hybrider Antriebsstränge	21
3.1 Fahrer und Fahrumgebung	22
3.2 Fahrzeug.....	22
3.2.1 Fahrzeugaufbau	23
3.2.2 Antriebsstrang.....	24
3.2.3 Betriebsstrategie.....	27
3.2.4 Rekuperatives Bremssystem.....	28
4 Modellierung der Emissionen	31
4.1 Betriebspunkte im Kundenbetrieb	31
4.2 Dynamik im Kundenbetrieb	33
4.3 Dynamische Emissionsmodellierung	34
4.3.1 Vorgehen zur Erzeugung von dynamischen Emissionsmodellen	35
4.3.2 Erstellung repräsentativer Prüfabläufe	36
4.3.3 Vermessung am Prüfstand.....	37
4.3.4 Identifikation von geeigneten Ersatzmodellen.....	38
4.3.5 Validierung der dynamischen Emissionsmodelle	41
5 Repräsentative Auslegung des Antriebsstrangs.....	45
5.1 Bestimmung des Bedarfskennfelds.....	45

5.2	Bestimmung der VKM-Leistung im 3F-Raum	48
5.3	Bestimmung Leistung des Elektromotors.....	50
5.4	Bestimmung Batteriekapazität	52
5.5	Resultierende Fahrzeugparameter des elektrifizierten Fahrzeugs	55
6	Repräsentative Kundenzyklen zur Bewertung von Emissionen	57
7	Betriebsstrategie zur Minimierung von Emissionen	63
7.1	Charakterisierung der minimalen Emissionen in Abhängigkeit der Leistung.....	63
7.2	Basis-Betriebsstrategie	66
7.3	Erweiterung um Maßnahmen zur Reduzierung von Emissionen	68
7.4	Emissionsreduzierungspotenziale von HEV.....	70
7.4.1	Ergebnisse der Parametervariation am Beispiel des WLTP	71
7.4.2	Maximale Emissionseinsparungen durch Elektrifizierung	73
7.4.3	Multikriterielle Bewertung von Betriebsstrategie-Anpassungen	76
7.4.4	Bewertung von NO _x -Abgasnachbehandlungssystemen in HEV	78
7.4.5	Einfluss von NO _x -Abgasnachbehandlungssystemen auf die optimale Wahl der Betriebsstrategie	79
7.5	Schlussfolgerung.....	83
8	Potenziale adaptiver und lernender Systeme	85
8.1	Adaptive Betriebsstrategie	86
8.2	Erweiterung der Betriebsstrategie durch Algorithmen maschinellen Lernens.....	86
8.2.1	Struktur des lernenden Ansatzes	87
8.2.2	Lernmodul zur Vorhersage des Systemverhaltens mittels symbolischer Regression	88
8.2.3	Test-Modul	89
8.3	Bewertung im Kundenbetrieb	90
8.4	Cloudbasierte Flottenanwendungen intelligenter Betriebsstrategien	94
	Zusammenfassung.....	97
	Literaturverzeichnis	99
	Anhang.....	105