





---

# Durchgängige modellbasierte Methoden zur Entwicklung vernetzter Betriebsstrategien für ottomotorische Hybridantriebe

Am Fachbereich Maschinenbau  
an der Technischen Universität Darmstadt  
zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte

## Dissertation

vorgelegt von

**Dipl.-Ing. Matthias Kluin**  
aus Würzburg

Berichterstatter: Prof. Dr. techn. Christian Beidl  
Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende  
Tag der Einreichung: 26.01.2015  
Tag der mündlichen Prüfung: 29.04.2015

Darmstadt 2015

D17

---

---

---

## **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., 2015

Copyright Shaker Verlag 2015

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3894-1

ISSN 2365-3795

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

---

---

Schriftenreihe  
des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe

Band 1

Matthias Kluin

**Durchgängige modellbasierte Methoden zur Entwicklung vernetzter  
Betriebsstrategien für ottomotorische Hybridantriebe**

D17 (Dissertation TU Darmstadt)

Shaker Verlag

Aachen 2015

---



---

*Man muss etwas vom Wesen der Bewegung verstehen,  
um einen Sinn für die Zukunft zu erlangen.*

Aristoteles

---



---

---

## Vorwort

---

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

Meinem Doktorvater und Fachgebietsleiter Herrn Prof. Dr. techn. C. Beidl danke ich daher zum einen für seine Förderung und die Möglichkeit diese Arbeit unter Nutzung der Fachgebietsinfrastruktur anfertigen zu können, zum anderen aber vor allem für seine persönliche Unterstützung. Unsere Gespräche und Diskussionen haben stets dabei geholfen den Fokus zu finden, herauszuarbeiten, dabei immer wieder zu hinterfragen und schlussendlich zu dokumentieren. Seine Ratschläge und das mir entgegengebrachte Vertrauen haben sehr viel zu dieser Arbeit beigetragen.

Herrn Prof. Dr. Bargende gilt mein Dank für die Übernahme des Korreferats, sein Interesse an der Arbeit sowie die wertvollen inhaltlichen Ratschläge.

Einen ganz wesentlichen Beitrag für die Entstehung dieser Arbeit haben das angenehme Arbeitsklima und die Kollegialität am Fachgebiet und darüber hinaus beigetragen. Dafür vielen Dank an alle Kollegen!

Mein expliziter Dank gilt Herrn Peter Korzenietz, der mich im Rahmen von Projekten jahrelang begleitet und durch unsere intensiven Diskussionen immer für neue Anregungen gesorgt hat. Den Herren Maximilian Bier und Hauke Maschmeyer bin ich für deren hybride Kompetenz, die stets zu Simulation und Test beigetragen hat, ebenfalls sehr dankbar. Herrn Sebastian Martin danke ich für seine experimentelle Unterstützung unter Hochdruck.

Besonders danken ich allen Studenten, die mir durch ihre wissenschaftlichen Arbeiten, oder ihre Tätigkeit als Hilfswissenschaftler stets eine große Hilfe waren und die Arbeit ganz wesentlich bereicherten.

Mein herzlicher Dank gebührt zu guter Letzt meiner Freundin und meiner Familie. Ohne Euer aller Zutun, gleich welcher Art, wäre das Vorhaben grundsätzlich nicht möglich und nicht durchführbar gewesen. Für Eure Unterstützung auf diesem Weg: Danke!

Darmstadt, im Januar 2015

Matthias Kluin

---



---

---

## Abstract

---

Lowest emission limits and real-world homologation processes which will be introduced in industrialized countries in the short and midterm demand among further improvement of established and highly available technologies like the internal combustion engine a quick implementation of innovative measures to meet legal guidelines next to satisfying customer value.

The hybridization or electrification is an effective measure to significantly improve vehicle efficiency and reduce pollutant emission. Further potential is given by connecting the operating strategy with the entire vehicle and with the vehicle environment by the use of advanced driver assistance systems. However, the a priori or predictive consideration of this information extends the optimization range massively by the environment. In summary the changed homologation process and the vehicle network form consequently new complex boundary conditions and degrees of freedom which dominate the development targets and which are considered unrewardingly at conventional development processes.

As a result new methodologies are necessary to develop connected operating strategies efficiently and raise their degree of engineering. The derivation of these methodologies is subject of this thesis which relies on model-based practices. Therefore the structuring of the complex operating strategies and the consistent systematic consideration of the vehicle environment by simulation in all phases of the development process forms the basis. An additional scalable definition of test scenarios enables the application of methodologies to consider the complex multidimensional operating range of the operating strategy entirely at reasonable effort during the development process. This comprises multi-criteria optimization of functions considering the overall system interaction with driver and environment as well as the validation of development targets based on general profiles of use which also describe in contrast to set-value-based measures statistical variances in the test definition. The safety validation by simulation-based approaches finally enables the robust design of the operating strategy considering all possible use scenarios.

The proof of the methodology is given conclusively by three representative examples for connected operating strategies with different practice-oriented foci under multi-criteria consideration of the main targets of powertrain development: efficiency, emissions and drivability.

---



---

---

## Kurzfassung

---

Niedrigste Emissionslimits und Homologationsverfahren mit Realfahrten, die insbesondere in Industriestaaten kurz und mittelfristig eingeführt werden, erfordern in der Antriebsentwicklung neben der evolutionären Verbesserung etablierter und hochverfügbarer Technologien wie dem Verbrennungsmotor die rasche Einführung innovativer Maßnahmen, um die gesetzlichen Vorgaben bei zufriedenstellendem Kundennutzen weiterhin zu erfüllen.

Eine wirkungsvolle Maßnahme zur signifikanten Steigerung der Fahrzeugeffizienz und zur Reduktion der Schadstoffemissionen ist die Hybridisierung bzw. Elektrifizierung des Fahrzeugs. Weiteres erhebliches Potential ergibt sich durch die Vernetzung der Betriebsstrategie mit dem Gesamtfahrzeug und mit der Fahrzeugumwelt durch Interaktion mit Fahrerassistenzsystemen. Die Berücksichtigung der damit verfügbaren Informationen a priori und durch prädiktive Verfahren erweitert jedoch den Optimierungsraum sprunghaft um das Fahrzeugumfeld. Insgesamt entstehen aus der neuen Homologation und der Vernetzung somit neue komplexe Randbedingungen und Freiheitsgrade, die dominierenden Einfluss hinsichtlich der Entwicklungsziele besitzen und mit herkömmlichen Entwicklungsprozessen nicht zielführend berücksichtigt werden.

Um vernetzte Betriebsstrategien effizient zu entwickeln und deren Reifegrad bis hin zum Serieneinsatz zu steigern sind daher neue Entwicklungsmethoden notwendig. Die Ableitung dieser Methoden ist Gegenstand der vorliegenden Arbeit, die sich auf modellbasierte Verfahren stützt. Grundlegend hierfür sind die Strukturierung der komplexen Betriebsstrategien und die durchgängige systematische Betrachtung der Fahrzeugumwelt durch Simulation in allen Phasen des Entwicklungsprozesses. Zusammen mit einer skalierbaren Definition des Versuchsszenarios entsteht die Möglichkeit, Methoden so anzuwenden, dass der komplexe mehrdimensionale Funktionsbereich der Betriebsstrategien bei vernünftigem Aufwand vollständig in der Entwicklung betrachtet wird. Dies umfasst die multikriterielle Optimierung einzelner Funktionen unter Berücksichtigung der Gesamtsysteminteraktion mit Fahrer und Umwelt, aber auch die Validierung von Entwicklungszielen auf Basis allgemeingültiger Nutzungsprofile, die im Gegensatz zu sollwertbasierten Verfahren auch (statistische) Varianzen in der Versuchsdefinition abbilden. Die Absicherung mit simulationsgestützten Verfahren ermöglicht schließlich die robuste Gestaltung der Betriebsstrategie unter allen möglichen Nutzungsszenarien.

Die Validierung der Methodik durch drei repräsentative Beispiele für vernetzte Betriebsstrategien unterschiedlicher praxisrelevanter Ausrichtungen erfolgt abschließend unter multikriterieller Berücksichtigung der Kernziele der Antriebsentwicklung: Effizienz, Emissionen und Fahrbarkeit.

---



---

---

## Inhaltsverzeichnis

---

Vorwort.....	7
Abstract.....	9
Kurzfassung .....	11
Inhaltsverzeichnis.....	i
Abbildungsverzeichnis.....	v
Tabellenverzeichnis.....	ix
Formelverzeichnis .....	xi
Abkürzungsverzeichnis.....	xiii
Verzeichnis der Formelzeichen und Indizes .....	xvii
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation .....	1
1.2 Konkretisierung der Problemstellung.....	2
1.3 Gliederung der Arbeit .....	3
<b>2 Stand der Technik für die Entwicklung vernetzter Betriebsstrategien.....</b>	<b>5</b>
2.1 Ottomotorische Fahrzeugantriebe.....	5
2.1.1 Trends bei Ottomotoren.....	5
2.1.2 Emissionsverhalten und Abgasnachbehandlung.....	8
2.1.3 Hybridisierung.....	12
2.2 Vernetzung .....	15
2.2.1 Onboardsensorik.....	16
2.2.2 Digitale Karten.....	20
2.2.3 Intelligente Verkehrssysteme .....	21
2.2.4 Umweltmodelle .....	23
2.3 Betriebsstrategien .....	24
2.3.1 Generelle Zielsetzung .....	24

---

---

2.3.2	Klassierung nach Berechnungsverfahren .....	25
2.3.3	Interaktionskonzepte.....	27
2.3.4	Prädiktive Optimierungsansätze.....	29
2.4	Grundlegende Strategien und Werkzeuge für die Entwicklung .....	32
2.4.1	Entwicklungsziele der Antriebsentwicklung .....	33
2.4.2	Modellbasierter Entwicklungsprozess.....	33
2.4.3	Prüfumgebungen.....	39
2.4.4	Optimierung, Validierung und Absicherung in der Entwicklung.....	42
<b>3</b>	<b>Durchgängiger Entwicklungsprozess für vernetzte Betriebsstrategien .....</b>	<b>46</b>
3.1	Randbedingungen für die Entwicklung .....	46
3.1.1	Zukünftige Abgasgesetzgebung .....	47
3.1.2	Systemgrenzen für die Entwicklung vernetzter Antriebssysteme .....	49
3.2	Anforderungen bei offenen selbstoptimierenden Systemen .....	55
3.2.1	Regelbasierte vs. selbstoptimierende Betriebsstrategien .....	55
3.2.2	Fahrweise vs. Betriebsweise .....	56
3.2.3	Offline vs. X-in-the-Loop vs. Fahrversuch .....	57
3.3	Notwendige Erweiterungen und Zielsetzungen .....	58
3.3.1	Entwicklungsstrategie .....	58
3.3.2	Optimierung, Validierung und Absicherung von Betriebsstrategien.....	59
3.3.3	Entwicklungswerkzeuge.....	60
<b>4</b>	<b>Modellbasierte Entwicklungsmethodik für vernetzte Betriebsstrategien .....</b>	<b>61</b>
4.1	Durchgängiger modellbasierter Ansatz.....	61
4.1.1	Erweiterte Untersuchung durch domänenübergreifende Modelle.....	61
4.1.2	Modulare Funktionsstrukturen .....	63
4.1.3	Simulation von Umweltrandbedingungen .....	68
4.1.4	Zusammenfassung.....	71
4.2	Skalierbare Definition von Versuchsszenarien .....	71
4.2.1	Anwendungsorientierter Entwurf von Versuchsszenarien.....	72
4.2.2	Parametrierung signifikanter Szenarienrandbedingungen.....	75

4.2.3	Zusammenfassung .....	80
4.3	Durchgängige Optimierungsansätze .....	82
4.3.1	Strukturierung des Funktionsparameterraums .....	82
4.3.2	Systematische Variation von Parametern und Randbedingungen.....	84
4.3.3	Optimierungsansätze .....	85
4.3.4	Zusammenfassung .....	87
4.4	Validierung von Entwicklungszielen .....	87
4.4.1	Bestimmung des globalen Funktionsverhaltens.....	87
4.4.2	Szenarienbezogene Ermittlung der Zielgrößen .....	88
4.4.3	Zusammenfassung .....	89
4.5	Absicherung von Funktionen .....	89
4.5.1	Falsifikation von Fehlerfällen.....	90
4.5.2	Zusammenfassung .....	90
<b>5</b>	<b>Implementierung und Umsetzung der Methodik.....</b>	<b>92</b>
5.1	Simulationsplattform .....	92
5.1.1	Werkzeuge und deren Erweiterungen.....	92
5.1.2	Erweiterungen des Fahrzeugmodells .....	98
5.2	Engine-in-the-Loop Prüfstand .....	104
5.2.1	Grundlegender Prüfstands Aufbau .....	104
5.2.2	Einbindung der Simulationsplattform .....	109
5.3	Versuchsplanung und Optimierung.....	111
5.3.1	Anbindung des erweiterten DoE-Werkzeugs .....	111
5.3.2	Szenariengenerator.....	112
5.4	Basismodule der vernetzten Betriebsstrategien .....	113
5.4.1	Umweltmodell .....	114
5.4.2	Automatisierte Längsregelung .....	116
5.4.3	Effizienzmodell.....	118
<b>6</b>	<b>Validierung der Methodik .....</b>	<b>123</b>
6.1	Auswahl von beispielhaften Anwendungen.....	123

---

6.2	Effizienzsteigerung durch prädiktives Ampelassistenzsystem .....	126
6.2.1	Entwurf und Implementierung der Ampelassistenz .....	126
6.2.2	Absicherung der robusten Funktionsausführung .....	132
6.2.3	Validierung der Funktionsgüte und des Effizienzpotentials .....	135
6.3	Emissionsreduktion durch prädiktive Lastpunktoptimierung .....	142
6.3.1	Entwurf und Implementierung der Lastpunktoptimierung .....	143
6.3.2	Analyse des Emissionsminderungspotentials .....	145
6.4	Verbesserte Fahrbarkeit durch prädiktive elektrische Zusatzaufladung ..	152
6.4.1	Entwurf und Implementierung der EZV-Ansteuerung.....	152
6.4.2	Validierung der Potentiale zur Steigerung der Fahrbarkeit.....	156
6.4.3	Optimierung der Prädiktionszeit hinsichtlich Bordnetzleistung .....	160
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>164</b>
<b>Anhang</b> .....	<b>169</b>	
A	Motoren .....	169
A.1	Versuchsmotor 1 .....	169
A.2	Versuchsmotor 2 .....	170
B	Messtechnik .....	170
B.1	Temperatur und Druck.....	170
B.2	Motorbetriebspunkt.....	172
B.3	Abgas .....	172
C	Echtzeitplattform .....	173
C.1	Hardware .....	173
C.2	I/O-Liste.....	173
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>175</b>	