





---

# **Differenzierte Analyse von konstruktiven, applikativen und hybriden Maßnahmen zur Verbesserung der Fahrbarkeit von Turbomotoren**

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

## **Dissertation**

vorgelegt von  
**Dipl.-Ing. Sebastian Martin**  
aus Fulda

Berichterstatter: Prof. Dr. techn. Christian Beidl  
Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Hermann Rottengruber  
Tag der Einreichung: 19.04.2016  
Tag der mündlichen Prüfung: 22.06.2016

Darmstadt 2016

D17

---



Schriftenreihe des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und  
Fahrzeugantriebe

Band 4

**Sebastian Martin**

**Differenzierte Analyse von konstruktiven, applikativen  
und hybriden Maßnahmen zur Verbesserung der  
Fahrbarkeit von Turbomotoren**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

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

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 978-3-8440-4915-2

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)

---

*„Wenn wir wollen, dass die Dinge so bleiben, wie sie sind, müssen sich die Dinge ändern.“*

Giuseppe Tomasi di Lampedusa

Der Leopard

---



---

---

## Vorwort

---

Die vorliegende Arbeit entstand während einer vierjährigen Tätigkeit als Doktorand am Fachgebiet für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe der Technischen Universität Darmstadt. Dem Fachgebietsleiter Herrn Prof. Dr. techn. Christian Beidl danke ich für das entgegengebrachte Vertrauen, welches er mir mit der Beauftragung der Forschungsarbeit auf dem Gebiet von hybriden Antriebssträngen für Downsizing-Verbrennungsmotoren entgegengebracht hat. Mit Visionärsblick aber auch Pragmatismus hat er mir gelehrt, Grenzen und Möglichkeiten im wissenschaftlichen Umfeld zu erkennen und voneinander zu unterscheiden. Die Diskussionen und Ratschläge haben maßgeblich dazu beigetragen, den rechten Weg zu finden. Ohne die Gewährung von umfangreichen infrastrukturellen, finanziellen und personellen Mitteln wäre darüber hinaus die Umsetzung einer solchen Forschungsarbeit nicht möglich.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Hermann Rottengruber danke ich für das große Interesse an der Arbeit, die erfrischenden Diskussionen und die Übernahme des Koreferats.

Für die Koordination zahlloser Belange, die die Arbeit am Fachgebiet erleichtern, und darüber hinaus für die vielen aufmunternden Worte danke ich Frau Renate Schreiber. Die Kollegialität, die gegenseitige Unterstützung und die kritischen Diskussionen schaffen am Fachgebiet eine einzigartige Arbeitsatmosphäre, die einen deutlichen Mehrwert auch der vorliegenden Arbeit verschafft. Vielen Dank allen Kollegen!

Ein ausdrücklicher Dank für die Begeisterungsfähigkeit, die Professionalität und die Strapazierfähigkeit sei meinen zahlreichen studentischen Mitarbeitern in Form von hilfswissenschaftlicher Tätigkeit oder bei der Verfassung von Abschluss- oder Recherchearbeiten ausgesprochen. Insbesondere danke ich den Herren Sebastian Fischer und Markus Münz für die wertvolle Unterstützung meiner Arbeit während ihrer studentischen Tätigkeit und freue mich darüber, dass auch ihr euch für den Weg der Promotion am Fachgebiet entschieden habt!

Dem Kollegen Dr.-Ing. Matthias Kluin danke ich für die lehrreiche Zusammenarbeit auf dem Gebiet der prädiktiven Ansteuerstrategien hybrider Antriebstränge. Hieraus leiten sich wertvolle Ergebnisse auf dem Gebiet der elektrischen Zusatzaufladung von Downsizingmotoren ab.

Seitens der Firma MAHLE International GmbH danke ich stellvertretend für viele mehr den Herren Jörg Rückauf, Andreas Frank, Matthias Rinderle, Rolf Müller und Peter Wieske für das Interesse und die Unterstützung auf wissenschaftlicher Ebene ebenso wie im Management, die maßgeblich zum Erfolg der umfangreichen Projektarbeit und der Publikationen beigetragen haben.

Darmstadt im April 2016,

Sebastian Martin

---



---

---

## Abstract

---

The future limitation of passenger cars' CO<sub>2</sub>-emission was pronounced in 2009 and is being established since then. In the year 2015 the UN world climate conference decided to stop increasing the atmosphere CO<sub>2</sub>-concentration until 2050 and to work for its reduction. The climate aim of the German federal government is a 40 % reduction of overall CO<sub>2</sub>-emission compared to 1990.

Besides others passenger car industry introduced the measure of combustion engine downsizing to reduce fuel consumption and thus CO<sub>2</sub>-emissions. Until shortly the upper limit of the combustion engines power density was called 100 kW/l. Some special engines have now reached and exceeded this limit. Some series engines are already close to this specific power density. Today power densities of up to 200 kW/l and aims in best specific fuel consumption of 200 g/kWh are expected in the medium term [1]. In that technological environment and due to an increasing cost pressure onto powertrain components in a global vehicle market the diversity of variants drops. Aims in emissions, power and driveability shall be covered by modular strategies varying software, number of cylinder and hybridization measures.

The presented work discusses different hybridization strategies against the background of increasing torque and power density of modern downsizing combustion engines. The potentials in driveability are evaluated for a high efficient downsizing demonstrator engine. Hybridization measures are compared to constructive and calibration changes at the combustion engine. Their limits and opportunities are evaluated using modern tools in engine development like 1D engine process simulation and 3D computational fluid dynamics simulation. The main focus is laying on a dynamization of torque response. By use of fluid dynamics and rotational kinetics the macroscopic effects of flow compressor, turbine and displacement compressor are discussed. Further on the availability of electric power and energy are giving important limitations in electrified mild-hybrid powertrain systems.

The evaluation of the calculated results regarding emissions and fuel consumption is being conducted at a modern highly dynamic test bed. For the first time the comparison of electromechanic and thermodynamic hybridization regarding their demands in electric power and energy is being conducted in the same real-time capable integrated simulation tool of the test bed automation. Thus a fundamental and reproducible evaluation of increased driveability versus electric expenses is being conducted. A very high value of reproducibility including particulate number emissions validates this test methodology.

---



---

---

## Kurzfassung

---

Mit der Verordnung Nr. 443/2009 des Europäischen Parlamentes wurde im Jahre 2009 die Einführung einer gesetzlichen CO<sub>2</sub>-Limitierung von PKW verabschiedet und befindet sich heute am Anfang ihrer Umsetzung. 2015 hat darüber hinaus die UN-Weltklimakonferenz beschlossen, die Zunahme der Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre bis 2050 zu stoppen und an deren Abbau zu arbeiten. Das Klimaziel der deutschen Bundesregierung lautet für das Jahr 2020, einen um 40 % reduzierten CO<sub>2</sub>-Ausstoß gegenüber 1990 zu realisieren. Der PKW-Sektor hat zur Kraftstoffverbrauchs-einsparung und damit zur Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes neben anderen Maßnahmen das Mittel des Downsizings eingeführt und vorangetrieben. Ein noch vor kurzer Zeit proklamiertes Limit der Leistungsdichte von maximal 100 kW/l in der Serienanwendung ist nun mit ausgewählten Aggregaten im PKW-Bau überschritten. Der mittelfristige Trend, der sich abzuzeichnen scheint, geht bei Ottomotoren in Richtung einer Leistungsdichte von bis zu 200 kW/l und einem spezifischen Kraftstoffverbrauch von 200 g/kWh [1]. Gleichzeitig nimmt – im heute stärker globalisierten Markt als jemals zuvor – der Kostendruck zu und die Variantenvielfalt der Motorkomponenten ab. Unterschiedliche Emissions-, Leistungs- und Fahrbarkeitsanforderungen sollen mit Baukastensystemen abgedeckt und möglichst durch Software, Anzahl an Zylindern und Hybridisierung dargestellt werden können.

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Diskussion unterschiedlicher Hybridisierungsstrategien vor dem Hintergrund zunehmender Momenten- und Leistungsdichte. Unter Anwendung moderner Entwicklungswerkzeuge der Fahrzeugsimulation, der 1D-Motorprozessrechnung und 3D-Strömungssimulation werden Grenzen und Möglichkeiten der Fahrbarkeitsverbesserung durch Ansätze konstruktiver und applikativer Modifikation mit Maßnahmen der Hybridisierung verglichen. Dabei liegt der Fokus auf einer Dynamisierung des modernen Turbomotors. Mittels Strömungsdynamik und Rotationskinetik wird das Systemverhalten von Strömungsverdichter, Turbine und Verdrängerlader am Hubkolbenmotor unter Berücksichtigung der Leistungs- und Energiebereitstellung im elektrifizierten Fahrzeugantriebsstrang diskutiert.

Die Überprüfung der Simulationsergebnisse und die Bewertung von Emissionen und Verbrauch finden am hochdynamischen Motorenprüfstand statt. Mit der Implementierung von elektromechanischer Hybridisierung und elektrifizierter Ladedruckerzeugung in dieselbe Ebene der echtzeitfähigen Prüfstandsautomatisierung kann am Engine in the Loop Motorenprüfstand erstmals eine vergleichende Bewertung von Fahrbarkeitsgewinn zu Leistungs- und Energieverbrauch der betrachteten Hybridtechnologien durchgeführt werden. Ein hohes Maß an Reproduzierbarkeit bis in die Partikelanzahlemissionen bestätigt diese Testmethodik.

---



---

---

## Inhaltsverzeichnis

---

Vorwort .....	
Abstract .....	
Kurzfassung .....	
Inhaltsverzeichnis.....	i
Abbildungsverzeichnis .....	v
Tabellenverzeichnis .....	xii
Formelverzeichnis .....	xiii
Abkürzungsverzeichnis .....	xiv
Verzeichnis der Formelzeichen und Indizes .....	xvi
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1    Legislative der Europäischen Union bezüglich PKW-Antriebe .....	4
1.1.1    Kohlendioxidemissionen .....	4
1.1.2    Schadstoffemissionen .....	6
1.2    Kundenanforderungen an PKW-Antriebe .....	8
1.3    Technologische Zielkonflikte .....	11
1.4    Gliederung der Arbeit .....	13
<b>2 Stand der Technik aufgeladener Ottomotoren.....</b>	<b>15</b>
2.1    Kompressoraufladung .....	16
2.2    Abgasturboaufladung.....	18
2.3    Ladeluftkühlung .....	22
2.4    Ausgeführte aufgeladene Ottomotoren .....	24
<b>3 Analyse des Effektes von Downsizing auf den Realfahrverbrauch .....</b>	<b>27</b>
3.1    Recherche zum Verhältnis von Realfahrverbrauch gegenüber Zertifizierungsangaben für Downsizingmotoren .....	28

---

---

3.2	Simulation der Verbrauchssensitivität eines 100 kW/1 Otto-Downsizingmotors gegenüber Zyklus und Fahrzeugschwungmassenklasse .....	32
3.2.1	Modellerzeugung und Bedatung der Fahrzeuge .....	33
3.2.2	Modellerzeugung und Bedatung des Motors .....	35
3.2.3	Testszenarioszenarien .....	37
3.2.4	Auswertung .....	38
<b>4</b>	<b>Potenzialanalyse der Abgasturboaufladung für Downsizing-Ottomotoren ..</b>	<b>42</b>
4.1	Potenziale der VTG-Abgasturboaufladung am 100 kW/1-Ottomotor.....	42
4.1.1	1-D-Motorprozesssimulation mit VTG-Abgasturbolader, stationär .....	45
4.1.2	1-D-Motorprozesssimulation mit VTG-Abgasturbolader, dynamisch .....	49
4.2	Potenziale der Waste Gate Abgasturboaufladung für 100 kW/1.....	54
4.2.1	Massenträgheitsmoment des Turboladerlaufzeuges .....	56
4.2.2	Lagerung des Turboladerlaufzeugs .....	58
4.2.3	Wärmeisolierung des Abgaskrümmers.....	60
4.2.4	Keramische Innenisolierung von Turbinengehäuse und Abgaskrümmern .....	65
4.2.5	Potenzialdarstellung der Technologiekombinationen .....	66
<b>5</b>	<b>Low-End-Torque im Niedrigdrehzahlbereich unter RDE-Randbedingungen</b>	<b>69</b>
5.1	Spülendes Brennverfahren - global stöchiometrisch .....	69
5.1.1	Thermische Zustände stationär .....	75
5.1.2	Auswirkungen des global stöchiometrischen spülenden Brennverfahrens auf das Motoransprechverhalten.....	79
<b>6</b>	<b>Hybridisierungsansätze für Otto-Downsizingmotoren .....</b>	<b>82</b>
6.1	Auswahl der Hybridisierungsvarianten.....	84
6.2	Elektromechanische Mild-Hybridisierung .....	85
6.3	Thermodynamische Hybridisierung.....	86
<b>7</b>	<b>Elektrische Zusatzaufladung am Ottomotor.....</b>	<b>88</b>
7.1	Stand der Technik .....	88
7.1.1	Patentsituation .....	92

7.1.2	Elektrifizierter ATL (euATL) vs. Elektrische Zusatzaufladung (EZV) ....	92
7.1.3	Konkurrenzfähigkeit des EZV .....	93
7.2	Untersuchung relevanter Komponenten und Geometrieparameter zur thermodynamischen Hybridisierung .....	93
7.2.1	Variation der Verdichterstufen im Luftpfad mittels 1D-Motorprozessrechnung .....	94
7.2.2	Optimierung der Strömungsquerschnitte im Luftpfad mittels 3D-CFD-Rechnung .....	96
7.2.3	Simulative Untersuchung unterschiedlicher Aufladeprozesse .....	101
7.3	Vorausberechnung der Energie- und Leistungsbilanz im CAD .....	107
7.4	Zusammenfassung der Untersuchung von Komponenten und Geometrieparameter einer sequenziellen elektrischen Zusatzaufladung .....	109
<b>8</b>	<b>Gegenüberstellende Analyse von Hybridisierungsstrategien für Downsizingmotoren .....</b>	<b>111</b>
8.1	Vorstellung der ausgewählten XiL-Konfiguration .....	112
8.1.1	Umsetzung verschiedenartiger Hybridisierungsstrategien mit einem integrierten Simulationswerkzeug .....	113
8.1.2	Ansteuerung der virtuellen elektromechanischen und der thermodynamischen Hybridisierung .....	115
8.2	Einfluss des Aufladeprozesses auf den elektrischen Leistungsbedarf .....	118
8.3	XiL-Fahrzeuguntersuchungen .....	123
8.3.1	Potenziale der unterschiedlichen Hybridisierungsstrategien in Fahrzyklen .....	125
8.3.2	Einfluss von Startdrehzahl und Winkelbeschleunigung auf die elektrische Leistungsaufnahme .....	128
<b>9</b>	<b>Potenzialanalyse einer prädiktiven elektrischen Zusatzaufladung .....</b>	<b>130</b>
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>135</b>
<b>Anhang</b>	<b>.....</b>	<b>139</b>



A	139
A.1	Patentrecherche zu elektrifizierten Aufladeverfahren ..... 139
A.2	Qualitative Gegenüberstellung der Systeme euATL und EZV nach der Literatur 142
A.3	Analyse der Konkurrenzfähigkeit von EZV..... 143
A.4	Übersicht der bekannten Patente aus dem Bereich elektrifizierte Aufladeverfahren ..... 148
B	Kenndaten der verwendeten Aufladeaggregate ..... 149
B.1	Radialverdichter ..... 149
B.2	Drehkolbenlader..... 150
B.3	Wirkungsgradfreischnitt des elektromechanischen Antriebs des verwendeten EZV ..... 151
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>152</b>