



CO<sub>2</sub>-optimierter Antrieb eines Kleinfahrzeuges

Sebastian Wohlgemuth

CO<sub>2</sub>-optimierter Antrieb eines Kleinfahrzeuges

Sebastian Wohlgemuth



# TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Institut für Energietechnik

Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen

## **CO<sub>2</sub>-optimierter Antrieb eines Kleinfahrzeuges**

Sebastian Wohlgemuth

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen

Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)**

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Veit Senner

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Georg Wachtmeister  
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hermann Rottengruber,  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Die Dissertation wurde am 08.02.2016 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 17.06.2016 angenommen.

## Kurzfassung

Für zukunftsfähige Mobilitätskonzepte sind ein geringer Treibhausgas- und Schadstoffausstoß darzustellen und es ist neben den Emissionen auf einen schonenden Ressourceneinsatz im Antriebsstrang zu achten. Im Hinblick auf den Einsatz im Kleinwagensegment sind zudem die Systemkosten des Antriebssystems gering zu halten. Weiterhin ist die Frage nach einem geeigneten Kraftstoff für nachhaltige Mobilität zu beantworten.

Im vorliegenden Forschungsprojekt wird ein Antriebskonzept für den Stadt- und Pendelverkehr entwickelt, welches diese Fragestellung aufgreift. Dabei wird ein Zweizylinder-Motor mit einem hydraulischen Hybridsystem kombiniert. Für den Verbrennungsmotor wird ein überstöchiometrisches Erdgasbrennverfahren entwickelt, wobei die Brennraumgeometrie, das Zündsystem, das Aufladekonzept sowie die Abgasnachbehandlung betrachtet werden. Auf den unterschiedlichen Teilgebieten werden Konzepte entwickelt und in Simulationen sowie am Prüfstand untersucht.

Das Hybridsystem wird gezielt auf die Anforderungen des Antriebsstrangs und des Fahrzeugeinsatzes ausgelegt. Im Mittelpunkt steht dabei eine geringe Systemkomplexität bei gleichzeitiger Darstellung vollumfänglicher Hybridfunktionalitäten wie Start-Stopp, Boost, Rekuperation und Lastpunktverschiebung.

Abschließend wird das Antriebskonzept in einer Gesamtfahrzeugsimulation bewertet. Dabei wird untersucht, inwieweit der präsentierte Fahrzeugantrieb die gesetzlichen Vorgaben und darüber hinaus einen realitätsnahen Fahrzyklus erfüllen kann.

## Abstract

Concepts for future mobility have to focus on low greenhouse gas and pollutant emissions, while ensuring an efficient use of resources. Especially for applications in compact passenger cars, low system costs have to be realized. Furthermore, a suitable fuel for sustainable mobility has to be chosen.

In the presented research project a drivetrain concept for urban and commuter traffic is developed with regard to these aspects. Therefore, a two-cylinder engine is combined with a hydraulic hybrid system. A lean-burn natural gas combustion concept is pursued for the internal combustion engine. The research examines the geometry of the combustion chamber, the ignition system, the charging concept and the exhaust gas aftertreatment. Different concepts and approaches are developed and investigated in simulations and experiments.

The hybrid system is designed with regard to the requirements of the drivetrain and the vehicle operation. One main focus is to present a system with low complexity, realizing the functionalities of a full hybrid system as start-stop, boost, recuperation and operation point shift at the same time.

Finally, the drivetrain concept is evaluated in an entire vehicle simulation. It is analyzed whether the legal requirements as well as a realistic driving cycle can be met by the introduced drivetrain.

# Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	iii
Abbildungsverzeichnis	vii
Tabellenverzeichnis	xi
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation und Zielsetzung . . . . .	1
1.2 Kraftstoff für nachhaltige Mobilität . . . . .	1
1.3 Struktur der Arbeit . . . . .	4
<b>2 Grundlagen und Konzeptentwicklung</b>	<b>5</b>
2.1 Stand der Technik . . . . .	5
2.1.1 Entwicklungstendenzen bei Ottomotoren . . . . .	5
2.1.2 Erdgasfahrzeuge . . . . .	6
2.1.3 Arbeiten in Wissenschaft und Forschung . . . . .	7
2.1.4 Hybridantriebe . . . . .	9
2.2 Antriebsstrangkonzent . . . . .	11
<b>3 Entwicklungswerkzeuge und -methodik</b>	<b>13</b>
3.1 Versuchsmotor . . . . .	13
3.2 Motorprüfstand und Messtechnik . . . . .	14
3.3 Simulations- und Auswertemethodik . . . . .	18
3.3.1 Verbrennungsanalyse . . . . .	18
3.3.2 Motorprozesssimulation . . . . .	20
3.3.3 CFD-Simulation . . . . .	20
3.3.4 Gesamtfahrzeugsimulation . . . . .	23
<b>4 Zweizylinder-Erdgasmotor</b>	<b>25</b>
4.1 Grundlagen der Brennverfahrensentwicklung . . . . .	25
4.1.1 Die überstöchiometrische Verbrennung . . . . .	25
4.1.2 Entflammung und Verbrennung . . . . .	26
4.1.3 Untersuchte Systeme und Lösungsansätze . . . . .	30
4.2 Zylinderinnenströmung . . . . .	31
4.2.1 Einflussmöglichkeiten . . . . .	31
4.2.2 Untersuchung der Brennraumgeometrie . . . . .	33
4.3 Zündsystem . . . . .	46
4.3.1 Stand der Wissenschaft und Forschung . . . . .	47

4.3.2	Vorkammerzündkerze . . . . .	50
4.3.3	Vorkammerzündsystem . . . . .	51
4.4	Aufladekonzept . . . . .	67
4.4.1	Abgasturbolader . . . . .	67
4.4.2	Spirallader . . . . .	74
4.4.3	Vergleich der Aufladekonzepte . . . . .	76
4.5	Abgasnachbehandlung . . . . .	79
4.6	Bewertung der Untersuchungen . . . . .	82
<b>5</b>	<b>Hydraulisches Hybridsystem</b>	<b>85</b>
5.1	Einordnung und Motivation . . . . .	85
5.2	Stand der Technik . . . . .	87
5.3	Systementwicklung . . . . .	87
5.3.1	Innenzahnradpumpe . . . . .	88
5.3.2	Energiespeicher . . . . .	90
5.3.3	Gesamtsystem . . . . .	95
5.3.4	Hybridbetriebsstrategie . . . . .	96
5.4	Prüfstandsvalidierung . . . . .	98
<b>6</b>	<b>Bewertung des Antriebsstrangkonzpts</b>	<b>103</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>111</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>113</b>
	<b>Projektbezogene Studienarbeiten</b>	<b>133</b>
	<b>Publikationsliste</b>	<b>137</b>

Herausgegeben von:  
Prof. Dr.-Ing. Georg Wachtmeister  
**LVK** - Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen  
Technische Universität München

Zugleich:  
Dissertation, München, Technische Universität München, 2016

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben - auch bei nur auszugsweiser Verwendung - vorbehalten.

Die Informationen in diesem Buch wurden mit großer Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht völlig ausgeschlossen werden. Verlag und Autor übernehmen keine juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für eventuell verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen.

Layout und Satz: Sebastian Wohlgemuth  
Copyright © Sebastian Wohlgemuth, 2016  
ISBN: 978-3-943813-19-7  
1. Auflage