

Wissenschaftliche Reihe  
Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart

RESEARCH

Jing Cheng

# Wirkungsgradoptimales ottomotorisches Konzept für einen Hybridantriebsstrang



---

# **Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart**

## **Reihe herausgegeben von**

Michael Bargende, Stuttgart, Deutschland

Hans-Christian Reuss, Stuttgart, Deutschland

Jochen Wiedemann, Stuttgart, Deutschland

Das Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK) an der Universität Stuttgart erforscht, entwickelt, appliziert und erprobt, in enger Zusammenarbeit mit der Industrie, Elemente bzw. Technologien aus dem Bereich moderner Fahrzeugkonzepte. Das Institut gliedert sich in die drei Bereiche Kraftfahrwesen, Fahrzeugantriebe und Kraftfahrzeug-Mechatronik. Aufgabe dieser Bereiche ist die Ausarbeitung des Themengebietes im Prüfstandsbetrieb, in Theorie und Simulation. Schwerpunkte des Kraftfahrwesens sind hierbei die Aerodynamik, Akustik (NVH), Fahrdynamik und Fahrermodellierung, Leichtbau, Sicherheit, Kraftübertragung sowie Energie und Thermomanagement – auch in Verbindung mit hybriden und batterieelektrischen Fahrzeugkonzepten. Der Bereich Fahrzeugantriebe widmet sich den Themen Brennverfahrensentwicklung einschließlich Regelungs- und Steuerungskonzeptionen bei zugleich minimierten Emissionen, komplexe Abgasnachbehandlung, Aufladesysteme und -strategien, Hybridsysteme und Betriebsstrategien sowie mechanisch-akustischen Fragestellungen. Themen der Kraftfahrzeug-Mechatronik sind die Antriebsstrangregelung/Hybride, Elektromobilität, Bordnetz und Energiemanagement, Funktions- und Softwareentwicklung sowie Test und Diagnose. Die Erfüllung dieser Aufgaben wird prüfstandsseitig neben vielem anderen unterstützt durch 19 Motorenprüfstände, zwei Rollenprüfstände, einen 1:1-Fahrsimulator, einen Antriebsstrangprüfstand, einen Thermowindkanal sowie einen 1:1-Aeroakustikwindkanal. Die wissenschaftliche Reihe „Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart“ präsentiert über die am Institut entstandenen Promotionen die hervorragenden Arbeitsergebnisse der Forschungstätigkeiten am IVK.

**Reihe herausgegeben von**

Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende  
Lehrstuhl Fahrzeugantriebe  
Institut für Verbrennungsmotoren und  
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart  
Stuttgart, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann  
Lehrstuhl Kraftfahrwesen  
Institut für Verbrennungsmotoren und  
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart  
Stuttgart, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss  
Lehrstuhl Kraftfahrzeugmechatronik  
Institut für Verbrennungsmotoren und  
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart  
Stuttgart, Deutschland

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/13535>

---

Jing Cheng

# Wirkungsgradoptimales ottomotorisches Konzept für einen Hybridantriebsstrang

 Springer Vieweg

Jing Cheng  
IVK, Fakultät 7, Lehrstuhl für Fahrzeugantriebe  
Universität Stuttgart  
Stuttgart, Deutschland

Zugl.: Dissertation Universität Stuttgart, 2019

D93

ISSN 2567-0042                      ISSN 2567-0352 (electronic)  
Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart  
ISBN 978-3-658-28143-4              ISBN 978-3-658-28144-1 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-28144-1>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2019

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin im Rahmen des Promotionskollegs HYBRID beim Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK) der Universität Stuttgart. Ich möchte für die Förderung des Promotionskollegs HYBRID der Daimler AG und dem Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg danken.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Michael Bargende, dem Leiter des Lehrstuhls Fahrzeugantriebe im Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen, für die wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit sowie die Übernahme des Hauptreferates. Herrn Prof. Dr. Christian Beidl, Leiter des Instituts Verbrennungskraftmaschinen (VKM) an der Technischen Universität Darmstadt, danke ich für sein Interesse an meiner Arbeit und für die Übernahme des Korreferates.

Des Weiteren möchte ich auf Seite des Kooperationspartners Daimler AG den Mitarbeitern der Abteilung RD/PGD und RD/PGC für die Anregungen und den fachlichen Austausch danken. Ein besonderer Dank gilt dabei Herrn Dr. Frank Altenschmidt für seine Initiative und Vorschläge für die wissenschaftliche Arbeit und Herrn Christoph Ley für die Unterstützung bei der Modellierung.

Außerdem möchte ich meiner ganzen Familie für das Verständnis und die Unterstützung danken. Ganz besonders möchte ich mich bei meinem Ehemann Tobias Plaumann für seine Geduld sowie fachliche und sprachliche Unterstützung während der Promotion bedanken.

Stuttgart

Jing Cheng

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort .....	VII
Abbildungsverzeichnis .....	IX
Tabellenverzeichnis .....	XIII
Abkürzungsverzeichnis .....	XV
Kurzfassung .....	XIX
Abstract .....	XXI
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik .....</b>	<b>3</b>
2.1 Ottomotoren mit Direkteinspritzung .....	3
2.1.1 Gemischbildung und Brennverfahren .....	3
2.1.2 Betriebsarten .....	7
2.2 Hybridantrieb .....	9
2.2.1 Grundlage zum Hybridantrieb .....	9
2.2.2 Betriebsmodi eines P2-Hybridfahrzeugs .....	17
2.2.3 Auslegung der Betriebsstrategie .....	19
<b>3 Gesamtsystemmodellierung für Hybridfahrzeug .....</b>	<b>23</b>
<b>4 Datenbasis für Kalibrierung und Validierung .....</b>	<b>29</b>
<b>5 Streckenmodell für Verbrennungsmotoren .....</b>	<b>35</b>
5.1 Varianten der Streckenmodelle .....	35
5.2 Motorsteuergerätemodell .....	37

---

5.3	Das Mittelwertmotormodell.....	53
5.4	Das Rohemissionsmodell.....	65
5.5	Abgasnachbehandlungsmodell.....	76
<b>6</b>	<b>Simulation mit regelbasierter Betriebsstrategie .....</b>	<b>79</b>
6.1	Regelbasierte Betriebsstrategie und Simulationsmethodik .....	79
6.2	Verbrauchseinfluss des Brennverfahrens und Hubraums .....	83
<b>7</b>	<b>Simulation mit optimierender Betriebsstrategie .....</b>	<b>87</b>
7.1	Theoretische Grundlage des Optimierungsansatzes.....	87
7.2	Implementierung der ECMS ins Simulationsmodell .....	92
7.3	Ermittlung und Analyse verschiedener Motorkonzepte.....	96
7.4	Schadstoffemissionen .....	104
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>107</b>
	Literaturverzeichnis .....	111

# Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 2.1:</b>	Ladungswechsel in homogener und geschichteter Verbrennung [1].....	4
<b>Abbildung 2.2:</b>	Schematische Darstellung der Struktur einer Tripelflamme [2].....	5
<b>Abbildung 2.3:</b>	Einteilung der Brennverfahren von Ottomotoren mit Direkteinspritzung [3].....	6
<b>Abbildung 2.4:</b>	Hauptbetriebsarten im Motorkennfeld [4] .....	8
<b>Abbildung 2.5:</b>	Drehzahl-Drehmomentverläufe verschiedener Antriebsselemente .....	11
<b>Abbildung 2.6:</b>	Ragone-Diagramm für elektrische Energiespeicher [5].....	12
<b>Abbildung 2.7:</b>	drei klassische Konfigurationen des Hybridfahrzeugs.....	14
<b>Abbildung 2.8:</b>	Unterteilung des parallelen Hybridfahrzeugs [6] .....	15
<b>Abbildung 2.9:</b>	Betriebsmodi eines P2-Hybridfahrzeugs.....	18
<b>Abbildung 3.1:</b>	Regelkreis des Gesamtsystemmodells .....	23
<b>Abbildung 3.2:</b>	Ersatzschaltbild des stationären Niedervoltbatterie-modells.....	25
<b>Abbildung 3.3:</b>	Ersatzschaltbild des dynamischen Hochvoltbatterie-modells.....	26
<b>Abbildung 4.1:</b>	Konfiguration des Hybrid-Antriebsstrangs [7] .....	30
<b>Abbildung 4.2:</b>	Messstellenplan des Versuchsträgers.....	32
<b>Abbildung 4.3:</b>	Messprogramme und deren Nutzung .....	32
<b>Abbildung 5.1:</b>	Struktur des Motorstreckenmodells im Gesamtsystem .....	35
<b>Abbildung 5.2:</b>	Struktur des Motorstreckenmodells im Gesamtsystem .....	37
<b>Abbildung 5.3:</b>	Beispiel der Ladedruckreglung und simulative Ausführungen.....	39

---

<b>Abbildung 5.4:</b>	Darstellung der motornahen ECU-Funktionen .....	40
<b>Abbildung 5.5:</b>	Struktur der importierten ECU-Funktionen .....	42
<b>Abbildung 5.6:</b>	Steuerungsablauf einer Momentenerhöhung.....	44
<b>Abbildung 5.7:</b>	Zusammensetzung der Zylinderfüllung: .....	45
<b>Abbildung 5.8:</b>	Steuerung des Luftmassenstroms .....	46
<b>Abbildung 5.9:</b>	Nockenwellensteuerung und Eispritzwinkel.....	48
<b>Abbildung 5.10:</b>	ZW-Steuerung im Homogenbetrieb.....	50
<b>Abbildung 5.11:</b>	Steuerungen in Zünd- und Kraftstoffpfad während des Betriebsartenwechsels.....	50
<b>Abbildung 5.12:</b>	Simulationsergebnisse der momentanen Kraftstoff- verbräuche.....	52
<b>Abbildung 5.13:</b>	Modellierung des Luftfilters .....	54
<b>Abbildung 5.14:</b>	Kennfeld und Grenzen des Verdichters [8].....	58
<b>Abbildung 5.15:</b>	Modellstruktur des MWM für M270 .....	62
<b>Abbildung 5.16:</b>	Momentgenerierung und Luftmassen in WLTC .....	63
<b>Abbildung 5.17:</b>	Temperatur und Druck im Abgaskrümmen und nach der Turbine.....	64
<b>Abbildung 5.18:</b>	Vergleich stationäre Simulationsergebnisse mit Messung .....	65
<b>Abbildung 5.19:</b>	Arbeitsprinzip des Rohemissionsmodells und Auf- bau des KNNs .....	67
<b>Abbildung 5.20:</b>	Arbeitsablauf der IVS [9].....	69
<b>Abbildung 5.21:</b>	Pareto-Diagramm am Beispiel CO- Entstehung im HOM-Betrieb .....	70
<b>Abbildung 5.22:</b>	Ablauf der Kalibrierung REM .....	70
<b>Abbildung 5.23:</b>	Zwischenergebnisse der Iteration KNN-Generierung....	71
<b>Abbildung 5.24:</b>	Vergleich Simulation und Messung der NO <sub>x</sub> Emis- sionen.....	74
<b>Abbildung 5.25:</b>	Vergleich der HC- und CO-Emissionen von Simula- tion und Messung.....	75

---

<b>Abbildung 5.26:</b>	Aufbau des untersuchten Abgasnachbehandlungssystems und Arbeitsprinzip der Simulation .....	76
<b>Abbildung 6.1:</b>	Beispiel einer regelbasierten Hybridbetriebsstrategie [10].....	81
<b>Abbildung 6.2:</b>	Vergleich der Lastpunktverschiebung von zwei verschiedenen Verbrennungsmotoren.....	83
<b>Abbildung 6.3:</b>	Motorbetriebszeiten und akkumulierte Verbräuche zweier Ottomotoren im NEFZ .....	84
<b>Abbildung 6.4:</b>	Verbrennungsmotorischer Betrieb der Ottomotoren mit drei Hubraumvarianten .....	84
<b>Abbildung 6.5:</b>	Verbrauchsvergleich im NEFZ der betrachteten Hubraum- und Motorvarianten .....	85
<b>Abbildung 7.1:</b>	Flussdiagramm einer Offline-Optimierung mittels ECMS.....	93
<b>Abbildung 7.2:</b>	schematische Darstellung von $P_{Krst}$ und $P_{ele}$ in Abhängigkeit des Verteilungsfaktors $u$ .....	94
<b>Abbildung 7.3:</b>	Beispiel einer Cost-to-Go-Matrix bei $1200 \text{ min}^{-1}$ .....	95
<b>Abbildung 7.4:</b>	die Geschwindigkeitsprofile NEFZ, RTS-95-high/low .....	97
<b>Abbildung 7.5:</b>	Verteilung der Betriebspunkte in drei Fahrzyklen .....	97
<b>Abbildung 7.6:</b>	SOC-Verläufe der vier Simulationsvarianten .....	99
<b>Abbildung 7.7:</b>	Vergleich Cost to Go ( $1200 \text{ min}^{-1}$ ) .....	99
<b>Abbildung 7.8:</b>	Häufigkeit von EM Momenten bei verschiedenen Motorkonzepten im RTS-95-high.....	100
<b>Abbildung 7.9:</b>	Verteilung der Betriebspunkte in vier Simulationskombinationen.....	101
<b>Abbildung 7.10:</b>	spezifische Kraftstoffverbräuche der drei Betriebsarten .....	102
<b>Abbildung 7.11:</b>	Zeitlicher Ablauf der Betriebsarten im RTS-95 high/low .....	103

# Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 2.1:</b>	Hybridfahrzeuge unterteilt nach Elektrifizierungsgrad und jeweils verfügbare Funktionen [11] .....	17
<b>Tabelle 4.1:</b>	Technische Daten des Versuchsträgers.....	31
<b>Tabelle 4.2:</b>	Übersicht aller ausgeführten Variationen.....	34
<b>Tabelle 5.1:</b>	Eingänge der KNN in HOM, HOS und SCH.....	73
<b>Tabelle 6.1:</b>	Versuchsplan für die Simulation.....	80
<b>Tabelle 7.1:</b>	$\lambda_0$ in verschiedenen Simulationsvarianten.....	98

# Abkürzungsverzeichnis

m	Massenstrom
q	Durchfluss
Q	Wärmeübertragung
Ag	Abgase
AGN	Abgasnachbehandlungssystem
AGR	Abgasrückführung
AÖ	Auslassventil Öffnen
AS	Auslassventil Schließen
ASR	Antriebsschlupfregelung
A <sub>w</sub>	Wandoberfläche
BMS	Batterie Management System
C	<i>Capacitor</i> (Kondensator)
c <sub>K</sub>	Wärmekapazität
CO	Kohlenmonoxide
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
c <sub>p</sub> /c <sub>v</sub>	spezifischen Wärmekapazität
CPC	<i>Central Powertrain Controller</i>
DOD	<i>Depth Of Discharge</i> (Entladungsgrad)
DP	Dynamische Programmierung
ECMS	<i>Equivalent Consumption Minimization Strategy</i> (äquivalente Optimierungsstrategie des Verbrauchs)
ECU	Steuergerätemodell
EÖ	Einlassventil Öffnen
ES	Einlassventil Schließen
ET	Einspritzteilung
GA	genetisches Algorithmus
Gb	Getriebe
H	Enthalpie, Elektrifizierungsgrad
H	Hamiltonische Funktion
HC	Kohlenwasserstoffe
HOM	Homogenbetrieb
HOS	Homogen-Schicht-Betrieb
HSP	Homogen-Split-Betrieb
H <sub>u</sub>	unterer Heizwert

---

$I_{\text{Batt}}$	Batteriestrom
ICCT	<i>International Council on Clean Transportation</i>
IVS	<i>Input Variable Selection</i> (Eingangsauswahl)
J	Gesamtkostenindex
$K_{\text{FW}}$	Beiwert Stromwiderstand
KNN	künstliches neuronales Netz
Krst	Kraftstoff
LWOT	Ladungswechsel oberer Totpunkt
m	Masse
MSE	<i>Mean Squared Error</i> (mittlere quadratische Abweichung)
MWM	Mittelwertmotormodell
NAK	Nassanfahrkupplung
NEFZ	Neue Europäische Fahrzyklus
$N_{\text{Gang}}$	eingelegter Gang
$\text{NO}_x$	Stickoxide
NSC	<i>NO<sub>x</sub> Storage Catalyst</i> (NO <sub>x</sub> -Speicherkatalysator)
NW	Nockenwelle
OBD	On-Board-Diagnose
p	Druck
P	Leistung
PEMS	<i>Portable Emission Measuring System</i> (Mobiles Emissionsmessgerät)
$p_{\text{me}}$	<i>mean effective pressure</i> (effektiver Mitteldruck)
PMP	Pontrjaginsches Minimierungsprinzip
$p_{\text{mr}}$	Reibmitteldruck, Reibmitteldruck
Q	Batterie Kapazität
QSS	quasi-stationär
RC(-Glieder)	<i>Resistor Capacitor</i> (Widerstand Kondensator)
RDE	<i>Real Driving Emissions</i> (Emissionen im praktischen Fahrbetrieb)
$R_{\text{Diff}}$	Diffusionswiderstand
$R_{\text{Dur}}$	Durchtrittswiderstand
REM	Rohemissionsmodell
$R_i$	Innenwiderstand
$s_0$	äquivalenter Faktor
SCH	Schichtbetrieb
SOC	<i>State Of Charge</i> (Ladezustand)
SOF	<i>State Of Function</i> (Batteriezustand)