

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
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	3
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
3 Gesamtsystemmodellierung für Hybridfahrzeug	23
4 Datenbasis für Kalibrierung und Validierung	29
5 Streckenmodell für Verbrennungsmotoren	35
5.1 Varianten der Streckenmodelle	35
5.2 Motorsteuergerätemodell	37

5.3	Das Mittelwertmotormodell.....	53
5.4	Das Rohemissionsmodell.....	65
5.5	Abgasnachbehandlungsmodell.....	76
6	Simulation mit regelbasierter Betriebsstrategie	79
6.1	Regelbasierte Betriebsstrategie und Simulationsmethodik	79
6.2	Verbrauchseinfluss des Brennverfahrens und Hubraums	83
7	Simulation mit optimierender Betriebsstrategie	87
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
8	Zusammenfassung und Ausblick	107
	Literaturverzeichnis	111

Abbildungsverzeichnis

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

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

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

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Hybridfahrzeuge unterteilt nach Elektrifizierungsgrad und jeweils verfügbare Funktionen [11]	17
Tabelle 4.1:	Technische Daten des Versuchsträgers.....	31
Tabelle 4.2:	Übersicht aller ausgeführten Variationen.....	34
Tabelle 5.1:	Eingänge der KNN in HOM, HOS und SCH.....	73
Tabelle 6.1:	Versuchsplan für die Simulation.....	80
Tabelle 7.1:	λ_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 _w	Wandoberfläche
BMS	Batterie Management System
C	<i>Capacitor</i> (Kondensator)
c _K	Wärmekapazität
CO	Kohlenmonoxide
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
c _p /c _v	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 _u	unterer Heizwert

I_{Batt}	Batteriestrom
ICCT	<i>International Council on Clean Transportation</i>
IVS	<i>Input Variable Selection</i> (Eingangsauswahl)
J	Gesamtkostenindex
K_{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_{Gang}	eingelegter Gang
NO_x	Stickoxide
NSC	<i>NO_x Storage Catalyst</i> (NO _x -Speicherkatalysator)
NW	Nockenwelle
OBD	On-Board-Diagnose
p	Druck
P	Leistung
PEMS	<i>Portable Emission Measuring System</i> (Mobiles Emissionsmessgerät)
p_{me}	<i>mean effective pressure</i> (effektiver Mitteldruck)
PMP	Pontrjaginsches Minimierungsprinzip
p_{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_{Diff}	Diffusionswiderstand
R_{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)