

Wissenschaftliche Reihe
Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart

RESEARCH

Daniel Görke

Untersuchungen zur kraft-
stoffoptimalen Betriebsweise
von Parallelhybridfahrzeugen
und darauf basierende
Auslegung regelbasierter
Betriebsstrategien



Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart

Herausgegeben von

M. Bargende, Stuttgart, Deutschland

H.-C. Reuss, Stuttgart, Deutschland

J. 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.

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

Daniel Görke

Untersuchungen zur
kraftstoffoptimalen
Betriebsweise von
Parallelhybridfahrzeugen
und darauf basierende
Auslegung regelbasierter
Betriebsstrategien

 Springer Vieweg

Daniel Görke
Stuttgart, Deutschland

Zugl.: Dissertation Universität Stuttgart, 2015

D93

Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart
ISBN 978-3-658-14162-2 ISBN 978-3-658-14163-9 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-658-14163-9

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 2016

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 Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

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.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen der Universität Stuttgart. Die Forschungsarbeiten hierfür wurden im Rahmen des Promotionskollegs HYBRID in Kooperation mit der Daimler AG durchgeführt. Der Daimler AG und dem Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg möchte ich für die Förderung des Projekts herzlich danken.

Mein besonderer Dank gebührt Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende für seine Unterstützung und die wissenschaftliche Betreuung sowie die Übernahme des Hauptreferates. Darüber hinaus möchte ich Herrn Prof. Bargende für seine Initiative und sein Engagement im Rahmen des Promotionskollegs HYBRID danken.

Herrn Prof. em. Dr.-Ing. Günter Hohenberg danke ich herzlich für das entgegengebrachte Interesse an dieser Arbeit und die Übernahme des Korreferates.

Des Weiteren möchte ich seitens des Kooperationspartners Daimler AG den Mitarbeitern der Abteilung RD/PGH für die Anregungen und vielen interessanten Gespräche danken. Ein besonderer Dank gilt dabei Herrn Stefan Schmiedler, Herrn Dr.-Ing. Uwe Keller und Herrn Norbert Ruzicka für die Unterstützung und industrieseitige Betreuung.

Zudem danke ich meinen beiden Doktorandenkollegen Philipp Bergmeir und Andreas Haag sowie allen anderen des Promotionskollegs HYBRID für die vielen interessanten Diskussionen und die schöne Zeit.

Abschließend möchte ich meiner Familie, meiner Freundin Susanne und allen meinen Freunden danken, die mich während dieser oft sehr arbeitsintensiven Zeit in jeglicher Hinsicht unterstützt haben.

Stuttgart

Daniel Görke

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XVII
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	XIX
Kurzfassung	XXV
Abstract	XXVII
1 Einleitung und Zielsetzung	1
2 Grundlagen der Hybridfahrzeuge	5
2.1 Hybride Antriebsstrangstrukturen	5
2.2 Vorteile bezüglich des Kraftstoffverbrauchs	10
3 Stand der Technik der Betriebsstrategien	15
3.1 Einteilung der Betriebsstrategien.....	17
3.2 Optimierungsbasierte Betriebsstrategien	18
3.3 Regelbasierte Betriebsstrategien.....	28
4 Modellbildung und Berechnung der optimalen Betriebsweise	41
4.1 Verwendeter Hybridantriebsstrang	41
4.2 Simulationsmodelle	43
4.2.1 Rückwärtsgerichteter Modellansatz	44
4.2.2 Vorwärtsgerichteter Modellansatz.....	46
4.2.3 Modellierung der Antriebsstrangkomponenten	48
4.3 Berechnung der optimalen Betriebsweise mittels Dynamischer Programmierung	54
5 Untersuchungen zur kraftstoffoptimalen Betriebsweise	61
5.1 Betriebspunktabhängige Effizienzanalyse der Hybridbetriebszustände ..	61
5.1.1 Spezifische Energiekosten und Kraftstoffersparnisse.....	62
5.1.2 Analyse der Lastpunktverschiebung	65

5.1.3	Analyse der elektrischen Fahrt	71
5.1.4	Einfluss verschiedener Verbrennungsmotoren	74
5.2	Kraftstoffoptimale Lastpunktverschiebung	79
5.2.1	Untersuchung und Herleitung der Zusammenhänge	80
5.2.2	Abbildung in Form von Kennfeldern	86
5.3	Kraftstoffoptimale elektrische Fahrt.....	88
5.3.1	Untersuchung und Herleitung der Zusammenhänge	89
5.3.2	Grenzlينien kraftstoffoptimaler elektrischer Fahrt	97
5.4	Einfluss verschiedener Randbedingungen	99
5.4.1	Einfluss auf der Leistungsebene	100
5.4.2	Einfluss auf der Energieebene	104
6	Regelbasierter Betriebsstrategieansatz	109
6.1	Implementierung und Auslegung der Regeln	109
6.2	Bestimmung der Eingangsgröße Lambda.....	114
6.2.1	Vergleich verschiedener Ansätze und Auslegung der Anpassung	116
6.2.2	Berücksichtigung weiterer Einflussgrößen.....	124
6.3	Global optimale Entscheidung zwischen elektrischer Fahrt und Hybridbetrieb.....	126
6.3.1	Ansatz über äquivalenten Kraftstoffmassenstrom	130
6.3.2	Ansatz über statistische Analysen	137
7	Bewertung und Vergleich mit anderen Betriebsstrategieansätzen	145
7.1	Vergleich mit der global optimalen Betriebsweise	145
7.2	Vergleich mit kausalen Betriebsstrategien	150
7.2.1	Vergleich mit einer auf spezifischen Kosten und Ersparnissen basierenden Betriebsstrategie.....	151
7.2.2	Vergleich mit der ECMS.....	154
8	Zusammenfassung und Ausblick	159
A	Anhang	163
	Literaturverzeichnis	173

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Schematische Darstellung der drei Grundstrukturen hybridelektrischer Antriebsstränge (seriell, parallel und leistungsverzweigt).....	6
Abbildung 2.2:	Lastpunktverschiebung beim parallelen Hybridantriebsstrang	8
Abbildung 2.3:	Unterscheidung des parallelen Hybridantriebsstrangs nach dem Einbauort der E-Maschine (P1 bis P4).....	9
Abbildung 3.1:	Schematische Darstellung des Antriebsstrangmanagements mit Einbindung und Aufgaben der Betriebsstrategie in der Hybridsteuerung.....	15
Abbildung 3.2:	Einteilung der Betriebsstrategien nach der Funktionsweise ...	17
Abbildung 3.3:	Zusammensetzung der Hamiltonischen H und Verlauf über der Steuergröße $u = T_{VM}$	23
Abbildung 3.4:	Iterative Bestimmung der Adjungierten λ mit dem Ziel den Ladezustand SOC_f zum Zeitpunkt t_f zu erreichen	24
Abbildung 3.5:	Schematische Darstellung einer typischen regelbasierten Betriebsstrategie eines Parallelhybridfahrzeugs, nach [19] und [43]	29
Abbildung 3.6:	Prinzip der Berechnung der optimalen E-Fahrt-Grenze (links) und sich daraus ergebende E-Fahrt-Grenzen für zwei verschiedene E-Maschinen (rechts) [12].....	31
Abbildung 3.7:	Auswahl der Lade- und Entladekennfelder der regelbasierten Betriebsstrategie aus [32]	32
Abbildung 3.8:	Ladewirkungsgrad über dem Lastpunktverschiebungs- moment für verschiedene Drehmomentanforderungen [32]... ..	33
Abbildung 3.9:	Wahl der Betriebszustände der auf spezifischen Kosten und Ersparnissen basierenden Betriebsstrategie [30].....	36
Abbildung 4.1:	Antriebsstranganordnung des verwendeten P2-Hybridantriebsstrangs	41
Abbildung 4.2:	Schematische Darstellung des Prinzips des rückwärtsgerichteten Modellansatzes	44
Abbildung 4.3:	Schematische Darstellung des Prinzips des vorwärtsgerichteten Modellansatzes	47

Abbildung 4.4:	Ersatzschaltbild des statischen Batteriemodells	52
Abbildung 4.5:	Ersatzschaltbild des dynamischen Batteriemodells	52
Abbildung 4.6:	Schematische Darstellung der Berechnung der Cost-to-go der Dynamischen Programmierung	56
Abbildung 4.7:	Kopplung der DPM-Funktion [111] mit dem rückwärtsgerichteten Simulationsmodell und Ablauf der Berechnung der optimalen Betriebsweise	57
Abbildung 5.1:	Schematische Darstellung einer Lastpunktanhebung im Verbrennungsmotorkennfeld (links) und in Form der Willans-Linien (rechts).....	62
Abbildung 5.2:	Spezifische Energiekosten der Lastpunktanhebung über dem Lastpunktverschiebungsmoment für verschiedene Drehmomentanforderungen.....	66
Abbildung 5.3:	Verlustleistung (links) und differentieller Wirkungsgrad (rechts) der zugrunde liegenden E-Maschine inkl. Leistungselektronik im generatorischen Betrieb	67
Abbildung 5.4:	Spezifische Energiekosten der Lastpunktanhebung über der Drehzahl und dem Lastpunktverschiebungsmoment für eine Drehmomentanforderung von 100 Nm	68
Abbildung 5.5:	Willans-Linien (oben) des zugrunde liegenden Verbrennungsmotors und deren Steigung (unten) für verschiedene Drehzahlen.....	69
Abbildung 5.6:	Spezifische Kraftstoffersparnisse der Lastpunktabsenkung und spezifische Energiekosten der Lastpunktanhebung für verschiedene Drehmomentanforderungen	71
Abbildung 5.7:	Spezifische Kraftstoffersparnisse der elektrischen Fahrt.....	72
Abbildung 5.8:	Vergleich der spezifischen Kraftstoffersparnisse zwischen elektrischer Fahrt (einzelne Punkte) und Lastpunktabsenkung (Linien)	73
Abbildung 5.9:	Vergleich der spezifischen Energiekosten der Lastpunktanhebung für drei verschiedene Verbrennungsmotoren (bei $n = 1500 \text{ min}^{-1}$)	75
Abbildung 5.10:	Vergleich der spezifischen Kraftstoffersparnisse der elektrischen Fahrt für drei verschiedene Verbrennungsmotoren	77

Abbildung 5.11: Spezifische Energiekosten der Lastpunktanhebung (graue Kurven) und spezifische Kraftstoffersparnisse der elektrischen Fahrt (farbige Linien) für verschiedene Drehmomentanforderungen	78
Abbildung 5.12: Ergebnis der Untersuchung der kraftstoffoptimalen Lastpunktverschiebung anhand von zwei verschiedenen Betriebspunkten	81
Abbildung 5.13: Schematische Darstellung des Unterschieds zwischen Lambda λ und den spezifischen Energiekosten b_{LPan}	82
Abbildung 5.14: Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Delta Kraftstoffmassenstrom und Delta Batterieleistung	82
Abbildung 5.15: Schematische Darstellung der Berechnung des optimalen Lastpunktverschiebungsmoments	86
Abbildung 5.16: Optimales Lastpunktverschiebungsmoment in Abhängigkeit von Drehmomentanforderung und Drehzahl für zwei verschiedene Lambda-Werte	88
Abbildung 5.17: Grafische Darstellung der kraftstoffoptimalen Betriebsweise im WLTC, berechnet mittels Dynamischer Programmierung	90
Abbildung 5.18: Grafische Darstellung und Erläuterung des verwendeten Duty-Cycle-Betriebs	91
Abbildung 5.19: Abhängigkeit des Kraftstoffverbrauchs vom Lastpunktverschiebungsmoment sowie den spezifischen Energiekosten und Kraftstoffersparnissen bei einem Duty-Cycle-Betrieb im zugrunde liegenden Betriebspunkt	93
Abbildung 5.20: Zusammenhang des minimalen Kraftstoffverbrauchs eines Duty-Cycle-Betriebs mit den Größen Lambda und spezifische Kraftstoffersparnisse	94
Abbildung 5.21: Kraftstoffoptimale Betriebsweise für eine kontinuierliche Verteilung an Betriebspunkten, berechnet mittels Dynamischer Programmierung	97
Abbildung 5.22: Grenzdrehmoment kraftstoffoptimaler elektrischer Fahrt über der Drehzahl für verschiedene Lambda-Werte	98
Abbildung 5.23: Einfluss der Temperatur der Hochvoltbatterie auf den Verlauf der E-Fahrt-Grenzen (links) sowie die Lastpunktverschiebungskennfelder bei einer Temperaturänderung von 25°C auf 5°C (rechts)	100

Abbildung 5.24:	Einfluss der Nebenverbraucherleistung auf den Verlauf der E-Fahrt-Grenzen (links) sowie die Lastpunktverschiebungskennfelder bei einer Änderung der Nebenverbraucher von 0 W auf 4000 W (rechts).....	102
Abbildung 5.25:	Einfluss verschiedener Verbrennungsmotoren auf den Verlauf der E-Fahrt-Grenzen verschiedener Lambda-Werte	103
Abbildung 5.26:	Einfluss verschiedener Verbrennungsmotoren auf die Lastpunktverschiebungskennfelder	104
Abbildung 5.27:	Energiebilanz des Hochvoltsystems für die kraftstoffoptimale Betriebsweise im WLTC mit und ohne Nebenverbraucher.....	105
Abbildung 5.28:	Darstellung des zweigeteilten Einflusses der Nebenverbraucher auf der Leistungs- und Energieebene anhand der optimalen E-Fahrt-Grenze.....	106
Abbildung 5.29:	Einfluss verschiedener Randbedingungen auf den kraftstoffoptimalen Lambda-Wert im WLTC.....	107
Abbildung 6.1:	Schematische Darstellung des Steuerungsprinzips des regelbasierten Betriebsstrategieansatzes.....	110
Abbildung 6.2:	Funktionsweise des regelbasierten Betriebsstrategieansatzes in den ersten 200 Sekunden des NEFZ.....	111
Abbildung 6.3:	Korrektur der optimalen E-Fahrt-Grenzen in Abhängigkeit der Nebenverbraucherleistung (links) und der Batterietemperatur (rechts).....	113
Abbildung 6.4:	Schematische Darstellung der sich durch die Rückführung des aktuellen Ladezustands (SOC) ergebenden Regelstruktur	115
Abbildung 6.5:	Unterschied einer kubischen und tangensförmigen Anpassungsfunktion	117
Abbildung 6.6:	Verlauf der kubischen Anpassungsfunktion für verschiedene Werte k_{p2}	117
Abbildung 6.7:	Grafische Darstellung der Auslegung des Proportionalterms mit oberem und unterem Worst Case Lambda-Wert λ_{wco} , λ_{wcu}	119
Abbildung 6.8:	Vergleich eines linearen und kubischen Proportionalterms anhand des Verlaufs des Ladezustands sowie der Lambda-Anpassung in einem Stadt-Umland-Fahrprofil.....	122

Abbildung 6.9:	Auswirkung eines zusätzlichen I-Anteils der Lambda-Anpassung am Beispiel einer längeren Autobahnfahrt.....	124
Abbildung 6.10:	Unterschied der Entwicklung des SOC-Verlaufs bei Berücksichtigung der Nebenverbraucherleistung in λ_0 am Beispiel des Zuschaltens der Klimaanlage	125
Abbildung 6.11:	Einfluss der Nebenverbraucherleistung auf den optimalen Lambda-Wert in verschiedenen Fahrprofilen und gewählter mittlerer Wert.....	126
Abbildung 6.12:	Darstellung der Entscheidung, ab wann sich ein Wechsel zwischen elektrischer Fahrt und Hybridbetrieb unter Einbeziehung der Kraftstoffmenge für den Verbrennungsmotorstart lohnt	127
Abbildung 6.13:	Einfluss der Fahrzeugbeschleunigung auf die Drehmomentanforderung in verschiedenen Gängen.....	128
Abbildung 6.14:	Drehmomentanforderung und E-Fahrt-Grenze eines Stadtfahrprofils	128
Abbildung 6.15:	Verlauf des äquivalenten Kraftstoffmassenstroms der elektrischen Fahrt und des Hybridbetriebs im Zusammenhang mit der Drehmomentanforderung und der lokal optimalen E-Fahrt-Grenze	131
Abbildung 6.16:	Schematische Darstellung des Ansatzes der Erweiterung der regelbasierten Betriebsstrategie zur global optimalen Entscheidung zwischen Hybridbetrieb und elektrischer Fahrt.....	134
Abbildung 6.17:	Vergleich der Betriebsweise des erweiterten regelbasierten Betriebsstrategieansatzes mit idealer Vorausschau mit dem global optimalen Betrieb, berechnet mittels Dynamischer Programmierung	135
Abbildung 6.18:	Vorgehensweise des „Ansatzes über statistische Analysen“ zur Erweiterung der global optimalen Entscheidung zwischen elektrischer Fahrt und Hybridbetrieb.....	137
Abbildung 6.19:	Delta äquivalenter Kraftstoff zwischen elektrischer Fahrt und Hybridbetrieb aller E-Fahrt-Phasen (rechts) und Hybridbetrieb-Phasen (links) der zur Analyse herangezogenen Fahrprofile	138
Abbildung 6.20:	Korrelationen zwischen unrentablen Wechseln zwischen elektrischer Fahrt und Hybridbetrieb und verschiedenen, den Fahrzustand beschreibenden Kenngrößen.....	140

Abbildung 6.21: Implementierung der zusätzlichen Regeln des erweiterten Ansatzes, basierend auf den statistischen Analysen	141
Abbildung 6.22: Vergleich des erweiterten Ansatzes, basierend auf den statistischen Analysen mit der Basis-Betriebsstrategie anhand eines Histogramms der Dauer der E-Fahrt und Hybridbetrieb-Phasen	144
Abbildung 7.1: Vergleich der mit der regelbasierten Basis-Betriebsstrategie (Lambda iterativ bestimmt) erzielten Betriebsweise mit den Ergebnissen der Dynamischen Programmierung (ohne Berücksichtigung von Verbrennungsmotorstartkosten) im Stadt-Umland-Fahrprofil.....	146
Abbildung 7.2: Vergleich der mit der erweiterten regelbasierten Betriebsstrategie erzielten Betriebsweise mit dem Ergebnis der Dynamischen Programmierung im Artemis-Zyklus.....	147
Abbildung 7.3: Darstellung der einzelnen Schritte und der Auswirkungen im Kraftstoffverbrauch von der global optimalen Betriebsweise bis zu der erweiterten regelbasierten Betriebsstrategie	149
Abbildung 7.4: Vergleich der regelbasierten Basis-Betriebsstrategie mit der auf spezifischen Kosten und Ersparnissen basierenden Betriebsstrategie in den ersten 200 Sekunden des NEFZ	152
Abbildung 7.5: Vergleich der regelbasierten Basis-Betriebsstrategie mit der ECMS im Stadt-Umland-Fahrprofil (Lambda und Äquivalenzfaktor iterativ bestimmt).....	154
Abbildung A.1: Verlauf des Schleppmoments der verwendeten nassen Anfahrkupplung (NAK) über der Differenzdrehzahl für verschiedene Temperaturen.....	164
Abbildung A.2: Kraftstoffmassenstrom des verwendeten 6-Zylinder Ottomotors über dem effektiven Drehmoment für verschiedene Drehzahlen (Willans-Linien)	164
Abbildung A.3: Elektrische Leistung der verwendeten E-Maschine inkl. Leistungselektronik als Funktion des Drehmoments und der Drehzahl	164
Abbildung A.4: Verwendeter Verlauf der Ruhespannung über dem Ladezustand der Hochvoltbatterie	165
Abbildung A.5: Verwendeter Innenwiderstand der Hochvoltbatterie (10s-Werte) für Entladen (links) und Laden (rechts).....	165

Abbildung A.6: Willans-Linien des 2,0 Liter 4-Zylinder Ottomotors	166
Abbildung A.7: Willans-Linien des 2,2 Liter 4-Zylinder Dieselmotors	166
Abbildung A.8: Darstellung des Unterschieds des differentiellen und effektiven Wirkungsgrads.....	167
Abbildung A.9: Geschwindigkeitsprofil des Artemis-Mix-Fahrprofils	170
Abbildung A.10: Geschwindigkeitsprofil des Stadt-Umland-Fahrprofils	171
Abbildung A.11: Geschwindigkeitsprofil des Stadt-Autobahn-Fahrprofils	171
Abbildung A.12: Geschwindigkeitsprofil des vorausschauend gefahrenen Stadt-Fahrprofils	171
Abbildung A.13: Geschwindigkeitsprofil des vorausschauend gefahrenen Überland-Fahrprofils	172
Abbildung A.14: Geschwindigkeitsprofil des dynamisch gefahrenen Überland-Fahrprofils	172

Tabellenverzeichnis

Tabelle 6.1:	Einfluss verschiedener Regelparameter (P-Regler mit linearer Abhängigkeit) auf den Kraftstoffverbrauch und die Differenz des Ladezustands am Ende des Fahrprofils	118
Tabelle 6.2:	Einfluss einer kubischen Abhängigkeit des P-Anteils auf den Kraftstoffverbrauch und Ladezustand am Ende des Fahrprofils	121
Tabelle 6.3:	Einfluss verschiedener I-Anteile auf den Kraftstoffverbrauch und den Ladezustand am Ende des Fahrprofils (P-Anteil kubisch $k_{p2} = 0,02$)	123
Tabelle 6.4:	Vergleich verschiedener Ansätze zur Vermeidung unrentabler Wechsel zwischen elektrischer Fahrt und Hybridbetrieb in verschiedenen realen Fahrprofilen	142
Tabelle 7.1:	Vergleich des Kraftstoffverbrauchs und der Anzahl der Verbrennungsmotorstarts der erweiterten regelbasierten Betriebsstrategie mit dem globalen Optimum der Dynamischen Programmierung	149
Tabelle 7.2:	Vergleich des Kraftstoffverbrauchs der regelbasierten Basis-Betriebsstrategie mit der auf den spezifischen Kosten und Ersparnissen basierenden Betriebsstrategie	153
Tabelle A.1:	Fahrzeugdaten des zugrunde liegenden Hybridfahrzeugs [52], [97]	163
Tabelle A.2:	Lambda-Wert, Kraftstoffverbrauch und Anzahl der Verbrennungsmotorstarts der global optimalen Betriebsweise ..	170

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzungen

äquiv.	äquivalent
A-ECMS	adaptive ECMS
ASM	Asynchronmaschine
bspw.	beispielsweise
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
Batt	Batterie
BS	Betriebsstrategie
dyn.	dynamisch
CAFE	Corporate Average Fuel Economy
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
d.h.	das heißt
DP	Dynamische Programmierung
eAC	elektrische Klimaanlage
erw.	erweitert
etc.	et cetera
ECMS	Equivalent Consumption Minimization Strategy
E-Fahrt	elektrische Fahrt
EKI	Energiekostenindikator
EM	elektrische Maschine
EU	Europäische Union
FP	Fahrprofil
konst.	konstant
kub.	kubisch
lin.	linear
LE	Leistungselektronik
LPV	Lastpunktverschiebung
Min	Minimum
NAK	nasse Anfahrkupplung

NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NV	Nebenverbraucher
OCV	Open-Circuit Voltage (Leerlaufspannung)
Pkw	Personenkraftwagen
PMP	Pontrjaginsches Minimumprinzip
PSM	permanent erregte Synchronmaschine
RB	regelbasiert
spez.	spezifisch
SOC	State of Charge (Ladezustand)
u.	und
USA	Vereinigte Staaten von Amerika
vgl.	vergleiche
voraus.	vorausschauend
VM	Verbrennungsmotor
VM-Fahrt	verbrennungsmotorische Fahrt
VS	Vorausschau
WLTC	Worldwide harmonized Light duty Test Cycles
z.B.	zum Beispiel
zw.	zwischen
Zyl.	Zylinder

Indizes

0	Startwert
ab	abgeführt
äqv	äquivalent
Anf	Anforderung
Br	Bremse
Diff	Differential
eff	effektiv
ein	Eingang
el	elektrisch
entlad	entladen
EF	elektrische Fahrt

ES	Energiespeicher
f	final
FW	Fahrwiderstand
Fzg	Fahrzeug
gen	generatorisch
ges	gesamt
Getr	Getriebe
Hyb	Hybridbetrieb
i	Zustandsindex
ist	aktueller Wert
k	Zeitindex
Klemm	Klemme
KS	Kraftstoff
lad	laden
LL	Leerlauf
LPab	Lastpunktabenkung
LPan	Lastpunktanhebung
Luft	Luftwiderstand
max	maximal
min	minimal
mot	motorisch
NV	Nebenverbraucher
opt	optimal
ref	Referenz
Roll	Rollwiderstand
soll	Vorgabewert
Schlepp	Schleppmoment
Steig	Steigung
Verl	Verlust
wco	oberer Worst Case Wert
wcu	unterer Worst Case Wert
zu	zugeführt
Zyk	Fahrzyklus

Lateinische Symbole

a	Beschleunigung	[m/s ²]
A	projizierte Stirnfläche	[m ²]
b _e	spezifischer Kraftstoffverbrauch	[g/kWh]
b _{EF}	spezifische Kraftstoffersparnisse der elektrischen Fahrt	[g/kWh]
b _{EF-LPV}	spezifische Kraftstoffersparnisse unter Berücksichtigung optimaler Lastpunktverschiebung	[g/kWh]
b _{LPab}	spezifische Kraftstoffersparnisse der Lastpunktabsenkung	[g/kWh]
b _{LPan}	spezifische Energiekosten der Lastpunktanhebung	[g/kWh]
B _{korrr}	korrigierter Kraftstoffverbrauch	[l/100km]
c _w	Luftwiderstandsbeiwert	[-]
C ₁	Kapazität des dynamischen Batteriemodells	[F]
E	Energie	[Wh]
fl	Zustand	[-]
f _R	Rollwiderstandskoeffizient	[-]
F	Kraft	[N]
g	Erdbeschleunigung	[m/s ²]
G	Grenzwert der Betriebsstrategie der spez. Kosten und Ersparnisse	[g/kWh]
H	Hamiltonische Funktion	[g/s]
H _u	unterer Heizwert	[kWh/kg]
i	Übersetzungsverhältnis	[-]
I	Strom	[A]
J	Kostenfunktional	[g]
J _k	Cost-to-go	[g]
k _{p1} , k _{p2} , k _I	Regelparameter der Lambda-Anpassung	[-]
L	momentane Kosten	[g/s]
L	Lagrange-Funktion	[g]
m	Masse	[kg]
\dot{m}	Massenstrom	[g/s]
m _r	äquivalente Masse der rotierenden Bauteile	[kg]

m_{Start}	Kraftstoffmenge Verbrennungsmotorstart (Verbrennungsmotorstartkosten)	[g]
n	Drehzahl	[1/min]
N_{Start}	Anzahl der Verbrennungsmotorstarts	[-]
p	Korrekturterm der ECMS	[-]
P	Leistung	[W]
Q_0	Kapazität der Batterie	[Ah]
r_{dyn}	dynamischer Radhalbmesser	[m]
R_0, R_1	Widerstände des dynamischen Batteriemodells	[Ω]
R_i	Innenwiderstand	[Ω]
s	Äquivalenzfaktor der ECMS	[g/kWh]
SOC	Ladezustand der Batterie	[%]
t	Zeit	[s]
T	Drehmoment	[Nm]
T_{EFGrenz}	Grenzdrehmoment der optimalen elektrischen Fahrt	[Nm]
T_{LPVopt}	optimales Lastpunktverschiebungsmoment	[Nm]
u	Steuergröße	[-]
u_{TS}	Drehmomentaufteilungsfaktor	[-]
U	Spannung	[V]
v	Geschwindigkeit	[km/h]
x	Zustandsgröße	[-]

Griechische Symbole

α	Fahrpedalstellung	[-]
α_{St}	Steigungswinkel	[$^\circ$]
β	Bremspedalstellung	[-]
γ	Getriebebang	[-]
η	Wirkungsgrad	[-]
$\Delta\eta$	differentieller Wirkungsgrad	[-]
Θ	Trägheitsmoment	[kg m ²]
ϑ	Temperatur	[$^\circ\text{C}$]
λ	Adjungierte	[g/kWh]
λ	Lambda-Wert	[g/kWh]