

Wissenschaftliche Reihe
Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart

RESEARCH

Raphael Pfeil

Methodischer Ansatz zur Optimierung von Energieladestrategien für elektrisch angetriebene Fahrzeuge



Springer Vieweg

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 Brennvorgangsentwicklung 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. Hans-Christian Reuss
Lehrstuhl Kraftfahrzeugmechatronik
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

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

Raphael Pfeil

Methodischer Ansatz zur Optimierung von Energieładestrategien für elektrisch angetriebene Fahrzeuge

 Springer Vieweg

Raphael Pfeil
IVK Fakultät 7, Lehrstuhl für
Kraftfahrzeugmechatronik
Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Zugl.: Dissertation Universität Stuttgart, 2018

D93

ISSN 2567-0042 ISSN 2567-0352 (electronic)
Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart
ISBN 978-3-658-25862-7 ISBN 978-3-658-25863-4 (eBook)
<http://doi.org/10.1007/978-3-658-25863-4>

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 wissenschaftlicher Mitarbeiter und Projektleiter am Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS). Die Grundlagen dieser Arbeit bildete das vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur geförderte Projekt GuEST. Allen am Projekt beteiligten Kollegen am FKFS, dem Zentrum für Interdisziplinäre Risiko- und Innovationsforschung der Universität Stuttgart, der Robert Bosch GmbH, der DEKRA Automobil GmbH, der Taxi-Auto-Zentrale Stuttgart e.G. und der als assoziierten Partner beteiligten Daimler AG danke ich für die gute Zusammenarbeit.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss, dem Leiter des Lehrstuhls Kraftfahrzeugmechatronik und Vorstandsmitglied des FKFS, für das Ermöglichen dieser Dissertation und die Betreuung sowie Förderung meiner Arbeit. Frau Prof. Dr.-Ing. Nejila Parspour danke ich für die freundliche Übernahme des Mitberichts.

Des Weiteren bedanke ich mich bei allen Mitarbeitern und Kollegen des FKFS und des Instituts für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK), insbesondere herzlich bei meinen Kolleginnen und Kollegen der Kraftfahrzeugmechatronik sowie meinem Bereichsleiter Dr.-Ing. Michael Grimm. Ebenso bedanke ich mich bei den Bearbeitern der Studien- und Abschlussarbeiten sowie bei den hilfswissenschaftlichen Mitarbeitern für ihre Unterstützung.

Abschließend möchte ich mich ganz herzlich bei meiner Partnerin Stephanie Conrad, meiner Familie und meinen Freunden für ihre geduldige Unterstützung bedanken.

Raphael Julius Pfeil

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis	XIII
Abkürzungen und Formelzeichen	XV
Kurzfassung	XXI
Abstract	XXIII
1 Einleitung	1
1.1 Bedeutung der Elektromobilität	1
1.2 Problemstellung	3
1.3 Abgrenzung	4
1.4 Forschungsfragen mit Zielsetzung	6
1.5 Struktur der Arbeit	7
2 Stand der Technik	9
2.1 Taxibetrieb	9
2.2 Verkehrsdynamikmodell	11
2.2.1 Emissions- und Energiemodelle	13
2.2.2 Routing	15
2.3 Antriebsstrangmodellierung	15
2.3.1 Energetische Betrachtung	16
2.3.2 Kinematischer Ansatz	18
2.3.3 Dynamischer Ansatz	20
2.4 Batteriemodellierung	21
2.4.1 Ersatzschaltbildmodelle	21
2.4.2 Physikalisch-chemische Modelle	22
2.4.3 Weitere Modelle	22

2.4.4	Ladezustandsermittlung	23
2.5	Ladetechnologie	24
2.6	Optimierung	25
2.6.1	Optimierungsverfahren	26
2.6.2	Partikelschwarmoptimierung	29
3	Relevante Betriebsparameter	33
3.1	Identifikation der Betriebsparameter	33
3.2	Einfluss der Betriebsparameter auf den Energieverbrauch	35
4	Optimierung	37
4.1	Methodischer Ansatz	37
4.2	Optimierungsgegenstand	39
4.2.1	Optimierungsparameter	40
4.2.2	Zielfunktion	41
4.2.3	Randbedingungen	42
4.3	Optimierungsalgorithmus mit Parameterwahl	43
5	Modellbildung und Simulation	49
5.1	Simulations- und Optimierungs-Framework	50
5.2	Dynamische Simulationssteuerung	51
5.3	Verkehrsdynamikmodell	53
5.3.1	Infrastruktur	54
5.3.2	Routing	57
5.4	Fahrzeugmodell	57
5.4.1	Leistungsanforderungsmodell	58
5.4.2	Batteriemodell	63
5.5	Parametrisierung Fahrzeugmodell	67
5.5.1	Fahrzyklus - FKFS Rundkurs	68
5.5.2	Datengrundlage	69
5.5.3	Ergebnis der dynamischen Vorwärtssimulation	71

5.5.4	Ergebnis der kinematischen Rückwärtssimulation . . .	72
5.5.5	Übertragbarkeit des Modellierungsansatzes	74
6	Anwendung der Methode am Beispiel E-Taxi	77
6.1	Motivation	77
6.2	Nutzungsprofil	78
6.3	Konstante Parameter der Betriebsparameterstudie	81
6.4	Variable Parameter der Betriebsparameterstudie	83
6.5	Betriebsparameterstudie	85
6.5.1	Ergebnisse der Umwelt-Parametervariation	86
6.5.2	Ergebnisse der Infrastruktur-Parametervariation	90
6.6	Optimierung der Ladestrategie	94
6.6.1	Randbedingungen	95
6.6.2	Ergebnisse	96
6.7	Fazit	101
7	Zusammenfassung und Ausblick	103
	Literaturverzeichnis	107
	Anhang	119

Abbildungsverzeichnis

1.1	Abgrenzung des Transportwesens	5
2.1	Abstrahierter Betriebsablauf am Bsp. E-Taxi	10
2.2	Vergleich von Verkehrsdynamikmodellierungen	12
2.3	Kinematischer Modellierungsansatz des Antriebsstrangs	18
2.4	Dynamischer Modellierungsansatz des Antriebsstrangs	20
2.5	Ablaufdiagramm der Partikelschwarmoptimierung	31
3.1	3x3 Parametermatrix	35
4.1	Methodischer Optimierungsansatz	38
4.2	Abstrahierte Darstellung des GVRP für BEV	40
4.3	Parametervariation des TV-MOPSO Algorithmus	46
5.1	Simulations- und Optimierungs-Framework	50
5.2	Straßennetz der Stuttgarter Innenstadt in SUMO	56
5.3	Modellierung des Leistungsanforderungsmodells	59
5.4	Schematische Darstellung des Leistungsanforderungsmodells	63
5.5	Schematische Darstellung des Batteriemodells	64
5.6	Detaillierte Darstellung des Batteriemodells	65
5.7	Iterative Bestimmung des Spannungsabfalls am Innenwiderstand der Batterie	66
5.8	MB B-Klasse ED als E-Taxi	68
5.9	Höhen- und Steigungsprofil des FKFS-Rundkurses	70
5.10	Energieverbrauch und SOC einer Realfahrt und DVS für die MB B-Klasse ED	72
5.11	Energieverbrauch und SOC der Realfahrt und KRS für die MB B-Klasse ED	73
5.12	Energieverbrauch und SOC der Realfahrt und KRS für den Tesla Roadster	75
6.1	Bewegungsprofil des E-Taxis ohne ZL-Strategie	79
6.2	Nutzungs- und Fahrprofil des E-Taxis	80
6.3	Simulationsergebnisse der Parametergruppe Umwelt	91
6.4	Simulationsergebnisse der Parametergruppe Infrastruktur	94

6.5	Optimierungsergebnisse	97
6.6	Detaillierte Optimierungsergebnisse	99
A.1	Leistungskennfeld stationär der MB B-Klasse ED	120
A.2	Leistungskennfeld stationär des Tesla Roadster	121

Tabellenverzeichnis

1.1	Vergleich von Ladezeiten und Reichweiten	3
3.1	Innere e-taxispezifische Betriebsparameter	33
3.2	Äußere e-taxispezifische Betriebsparameter	34
4.1	Optimierungsparameter der Ladestrategie	41
4.2	Parametervariation des TV-MOPSO Optimierungsalgorithmus	45
5.1	Komponenten der Simulationsumgebung SUMO	55
5.2	Technische Daten der Mercedes Benz B-Klasse ED	68
5.3	Streckenanteile des FKFS Rundkurses	69
5.4	Technische Daten des Tesla Roadster	74
6.1	Variation der Ladezeit und SOC-Schwelle	83
6.2	Variation der Umgebungstemperatur	84
6.3	Variation der Infrastrukturparameter	85
6.4	Simulationsergebnisse der Parametergruppe Umwelt	87
6.5	Simulationsergebnisse der Parametergruppe Infrastruktur	92
6.6	Parameter der pareto-optimalen ZL-Strategien	99
6.7	Ergebnisse der pareto-optimalen ZL-Strategien	100
A.1	Relevante Messgrößen der MB B-Klasse ED	119
A.2	Technische Daten des Simulationscomputers	119

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

AC	Alternating Current
Antr	Antrieb
BEV	Battery Electric Vehicle
BP	Betriebsparameter
BW	Beschleunigungswiderstand
C2C	Car-to-Car Communication
C2I	Car-to-Infrastructure Communication
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
COLOMBO	Cooperative Self-Organizing System for low Carbon Mobility at low Penetration Rates
D	Depot
DC	Direct Current
DLR	Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt
DVS	Dynamische Vorwärtssimulation
dyn	dynamisch
EA	Evolutionäre Algorithmen
ED	Electric Drive
EmiL	Elektromobilität mittels induktiver Ladung
FKFS	Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart
FMS	Flottenmanagementsystem
Fzg	Fahrzeug
GBZ	Gesamtbetriebszeit
GPS	Global Positioning System
GuEST	Gemeinschaftsprojekt Nutzungsuntersuchung Elektrotaxis Stuttgart
GUI	Graphical User Interface
GVRP	Green Vehicle Routing Problem
HBEFA	Handbuch für Emissionsfaktoren
Hbf	Hauptbahnhof

HC	Kohlenwasserstoff
HEV	Hybrid Electric Vehicle
HV	Hoch Volt
ICEV	Internal Combustion Engine Vehicle
IEC	International Electrotechnical Commission
It	Iteration
Kfz	Kraftfahrzeug
KRS	Kinematische Rückwärtssimulation
Lkw	Lastkraftwagen
LP	Ladepunkt
LSA	Lichtsignalanlage
LUT	Look-up-Table
LV	Ladevorgang
LW	Luftwiderstand
MB	Mercedes Benz
MOPSO	Multiple Objective Particle Swarm Optimization
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NN	Normalnull
NO	Stickoxid
NSGA	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm
NSGA-II	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II
NV	Nebenverbraucher
OBD	On-Board-Diagnose
OCV	Open Circuit Voltage
ODX	Open Diagnose Data Exchange
OP	Optimierungsparameter
OSM	OpenStreetMap
P	Passagier
PBefG	Personenbeförderungsgesetz
PESA	Pareto Envelope-based Selection Algorithm
PESA-II	Pareto Envelope-based Selection Algorithm II
PHEM	Passenger Car and Heavy Duty Emission Model
Pkw	Personenkraftwagen
PM	Partikel
POI	Points of Interest
Pop	Population
PSO	Partikel Schwarm Optimierung
RB	Randbedingung