

Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik
Universität Stuttgart

RESEARCH

Markus Auer

Ein Beitrag zur Erhöhung
der Reichweite eines
batterieelektrischen
Fahrzeugs durch prädiktives
Thermomanagement



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

Markus Auer

Ein Beitrag zur Erhöhung
der Reichweite eines
batterieelektrischen
Fahrzeugs durch
prädiktives
Thermomanagement

 Springer Vieweg

Markus Auer
Stuttgart, Deutschland

Zugl.: Dissertation Universität Stuttgart, 2015

D93

Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart
ISBN 978-3-658-13208-8 ISBN 978-3-658-13209-5 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-658-13209-5

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 (IVK) der Universität Stuttgart. Als Grundlage dienen ein aus Mitteln der Landesstiftung Baden-Württemberg gefördertes Projekt sowie ein Projekt, das von der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. gefördert wurde. Dem Obmann des FVV Projekts Dr.-Ing. Ernst Peter Weidmann möchte ich für die Unterstützung und die interessanten Diskussionen danken.

Ganz besonders möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann für die Übernahme des Erstberichts und für den allzeit anregenden und motivierenden Gedankenaustausch danken.

Frau Prof. Dr.-Ing. Nejila Parspour möchte ich für den Mitbericht der vorliegenden Arbeit danken.

Dr.-Ing. Timo Kuthada und Dipl.-Ing. Nils Widdecke danke ich herzlichst für die fruchtbaren Meinungs austausch und die sehr gute Zusammenarbeit während meiner Zeit am IVK. Darüber hinaus möchte ich mich bei meinem Lektor Martin Romer für die gute Zusammenarbeit danken.

Abschließend gilt mein Dank allen Kollegen des IVK und des FKFS, die mich während dieser Arbeit unterstützt haben und jederzeit für interessante Diskussionen bereit waren. Ein besonderer Dank gilt dem Hilfswissenschaftler Joachim Zanker für seine wertvolle Unterstützung.

Markus Auer

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	V
Abbildungsverzeichnis.....	XI
Tabellenverzeichnis	XIX
Abkürzungsverzeichnis.....	XXI
Zusammenfassung	XXIX
Abstract.....	XXXIII

1 Einleitung und Ziel..... 1

2 Stand der Technik..... 3

2.1 Komponenten eines batterieelektrischen Fahrzeugs	3
2.1.1 Entstehungsgeschichte des batterieelektrischen Fahrzeugs	3
2.1.2 Aufbau	4
2.1.3 Elektrische Maschinen.....	4
2.1.4 Leistungselektronik.....	5
2.1.5 Chemische Energiespeicher	5
2.1.6 Batteriemodellierung	7
2.2 Energie- und Thermomanagement.....	12
2.2.1 Thermomanagement am batterieelektrischen Fahrzeug.....	12
2.2.2 Prädiktives Thermomanagement	15
2.2.3 Prädiktives Energiemanagement.....	17
2.2.4 Numerische Methoden im Thermomanagement auf Systemebene	19

3 Modellierung und Validierung..... 21

3.1 Untersuchtes Fahrzeug.....	21
3.1.1 Konfigurationen.....	22
3.1.2 Lastfälle	24
3.2 Modellierung des Fahrzeugs	24
3.2.1 Gekoppeltes Simulationsmodell	24
3.2.2 Fahrermodell.....	26
3.2.3 Batteriemodell.....	27

3.2.4	Motormodell	34
3.2.5	Leistungselektronikmodell	38
3.2.6	Regelung und Steuerung	38
3.2.7	Für Optimierungen nötige Erweiterungen	39
3.2.8	Schnell rechnendes Simulationsmodell	46
3.3	Validierung der Simulationsmodelle	47
3.3.1	Messumgebung	48
3.3.2	Messtechnik	48
3.3.3	Aufbau	52
3.3.4	Wärmepumpe.....	55
3.3.5	Motor und Leistungselektronik.....	62
3.3.6	Batterie	63
3.3.7	Innenraum.....	65
3.3.8	Schnell rechnendes Fahrzeugmodell	66
3.4	Entwicklung einer Geschwindigkeits-Kennzahl	67

4 Optimierung des Energie- und Thermomanagements.....73

4.1	Einfluss verschiedener Zyklen	73
4.1.1	Reichweite im Ausgangszustand	73
4.1.2	Bestimmung des Reichweitenpotenzials.....	75
4.1.3	Reichweite bei „End of Life“ der Batterie	76
4.2	Reichweitenerhöhung durch Energiebedarfssenkung	77
4.2.1	Verwendung von Umluft	78
4.2.2	Anpassung der Solltemperatur im Innenraum	79
4.2.3	Isolation der Kabine.....	81
4.2.4	Heizung des Innenraums.....	82
4.2.5	Entfall der Klimaanlage (AC).....	84
4.2.6	Motortemperaturregelung	85
4.2.7	Isolation von Motor und Inverter.....	87
4.2.8	Abwärmenutzung zur Batterieheizung	90
4.2.9	Isolation der Batterie	91
4.2.10	Maximale Verzögerung bei der Rekuperation.....	93
4.2.11	Abgestimmte Pumpen- und Lüfterregelung.....	94
4.2.12	Entfall des Chillers	96
4.2.13	Kombination von Maßnahmen	97
4.3	Vorkonditionierung und Laden.....	99
4.3.1	Bedarfsgerechtes Laden der Batterie	100
4.3.2	Thermische Vorkonditionierung der Batterie	102
4.3.3	Thermische Vorkonditionierung des Innenraums.....	104

- 5 Prädiktives Thermomanagement 107**
 - 5.1 Vollständig bekanntes Lastprofil 107
 - 5.1.1 Vorgehensweise bei der Simulation..... 108
 - 5.1.2 Vorgaben und Auswirkungen 108
 - 5.1.3 Validierung der Methode 109
 - 5.1.4 Minimierung des Fahrzeugenergiebedarfs..... 112
 - 5.1.5 Minimierung des Gesamtenergiebedarfs 114
 - 5.2 Teilweise bekanntes Lastprofil 116
 - 5.2.1 Vorgehensweise bei der Simulation..... 116
 - 5.2.2 Vorgaben und Auswirkungen 117
 - 5.2.3 Voruntersuchung..... 118
 - 5.2.4 Ergebnisse..... 119
 - 5.3 Erhöhung der Reichweite durch weitere Energiemanagementmaßnahmen 123

- 6 Schlussfolgerung und Ausblick..... 127**

- Literaturverzeichnis 129**

- Anhang..... 139**

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Spannungsantwort einer 20 Ah Lithium-Eisen-Phosphat-Batterie bei einem Strompuls von -2,5 C (-50 A)	11
Abbildung 2:	Wohlfühltemperatur im Fahrzeuginnenraum als Funktion der Außentemperatur, Daten aus [69]	15
Abbildung 3:	Relative Reichweite für ein Mittelklassefahrzeug in Abhängigkeit der Geschwindigkeit bei Konstantfahrt und der Antriebsform	22
Abbildung 4:	Thermomanagementsystem des Fahrzeuges bei der Konfiguration mit Wärmepumpe (Standardkonfiguration)	23
Abbildung 5:	Aufbau des gekoppelten Simulationsmodells	26
Abbildung 6:	Ersatzschaltbild des Modells R3RC	27
Abbildung 7:	Verlauf der Zeitkonstanten τ_1 und τ_2 über der verwendeten Wartezeit bei der Parameterfindung	30
Abbildung 8:	Restkapazität über der Zykluszahl für eine LiFePO ₄ Zelle (Messdaten aus [95])	32
Abbildung 9:	Kapazitätsverlust über der Zeit und Vorgehensweise zur Bestimmung des kalendarischen Kapazitätsverlusts bei mehreren Temperaturen	33
Abbildung 10:	Relative Kapazitätsänderung über Kapazitätsänderung für eine 18650-Zelle (aus [97] berechnet)	33
Abbildung 11:	Wirkungsgradkennfeld des verwendeten Asynchronmotors	34
Abbildung 12:	Temperaturabhängiges Wirkungsgradverhalten des Motors bei 500 min ⁻¹ und 70% Vollast (links) sowie 4000 min ⁻¹ und 40% Vollast (rechts)	35
Abbildung 13:	Temperaturabhängiges Wirkungsgradverhalten des Motors im Kennfeld	35
Abbildung 14:	Vergleich zwischen Näherungsfunktion und Messung für temperaturabhängiges Wirkungsgradverhalten des Motors	37
Abbildung 15:	Wirkungsgradkennfeld der verwendeten Leistungselektronik für U=100 V	38
Abbildung 16:	Kühlmitteltemperatur als Funktion der Leistungsaufnahmen von Kühlmittelpumpe und Lüfter, angelehnt an [106]	41
Abbildung 17:	Übertragener Wärmestrom eines exemplarischen Kühlers in Abhängigkeit von Luft- und Kühlmittelvolumenstrom	41
Abbildung 18:	Optimale Lüfterdrehzahl über der Pumpendrehzahl in Abhängigkeit der Fahrtgeschwindigkeit	42

Abbildung 19: Mittlerer Wirkungsgrad des Motors bei der Durchfahrt verschiedener Zyklen unter Annahme konstanter Motortemperaturen	43
Abbildung 20: Aufbau des FKFS Multikonfigurationsprüfstands [109]	48
Abbildung 21: Fehler im Wärmestrom in Abhängigkeit von ΔT	52
Abbildung 22: Prüfstands Aufbau der untersuchten Wärmepumpe.....	54
Abbildung 23: Vergleich der Kompressoraustrittstemperatur zwischen Messung und Simulation im AC-Modus	56
Abbildung 24: Vergleich der Kompressoreintrittstemperatur zwischen Messung und Simulation im AC-Modus	57
Abbildung 25: Vergleich der Verdampferaustrittstemperatur zwischen Messung und Simulation im AC-Modus	57
Abbildung 26: Vergleich der Chilleraustrittstemperatur zwischen Messung und Simulation im AC-Modus.....	58
Abbildung 27: Vergleich der AWT-Austrittstemperatur zwischen Messung und Simulation im AC-Modus.....	58
Abbildung 28: Vergleich der Verdichterleistung zwischen Messung und Simulation im AC-Modus.....	59
Abbildung 29: Vergleich der Verdichterleistung zwischen Messung und Simulation im WP-Modus	60
Abbildung 30: Vergleich des Druckverlaufs nach Kompressor (links) und vor Kompressor (rechts) zwischen Messung und Simulation bei einem Zu- und Abschaltvorgang des Chillers	60
Abbildung 31: Vergleich des Temperaturverlaufs nach Kompressor (links) und vor Kompressor (rechts) zwischen Messung und Simulation bei einem Zu- und Abschaltvorgang des Chillers...	61
Abbildung 32: Vergleich des Temperaturverlaufs nach Verdampfer zwischen Messung und Simulation bei einem Zu- und Abschaltvorgang des Chillers	62
Abbildung 33: Vergleich des Wärmestromverlaufs des Chillers (links) und der Kompressorleistung (rechts) zwischen Messung und Simulation bei einem Zu- und Abschaltvorgang des Chillers...	62
Abbildung 34: Vergleich von Messung und Simulation des Aufheiz- verhaltens von Motor (oben) und Leistungselektronik (unten) im NEFZ.....	63
Abbildung 35: Vergleich der Spannung (links) und der prozentualen Abweichung (links) zwischen den Modellen R, RRC, R2RC und R3RC und der Messung	64
Abbildung 36: Gemessene und simulierte Temperaturverläufe in NEFZ (links) und bei einer Entladung mit 4C (rechts).....	65

Abbildung 37: Vergleich von Messung und Simulation des Aufheizverhaltens des Fahrzeuginnenraums	66
Abbildung 38: Vergleich der Batterietemperatur (links) und der Motortemperatur (rechts) der Simulation mit gekoppeltem Modell und der Simulation mit dem schnell rechnenden Fahrzeugmodell	67
Abbildung 39: Vergleich des Ladezustands der Simulation mit gekoppeltem Modell und der Simulation mit dem schnell rechnenden Fahrzeugmodell	67
Abbildung 40: Reichweite bei einer festen Klimatisierungsleistung von 1 kW über der Geschwindigkeits-Kennzahl für CADC, NEFZ und NYCC	71
Abbildung 41: Geschwindigkeits-Kennzahl bei konstanter Geschwindigkeit: Vergleich Vorhersage mit Simulation.....	71
Abbildung 42: Reichweite des untersuchten BEFs in den untersuchten Zyklen für die Standardkonfiguration.....	74
Abbildung 43: Geschwindigkeits-Kennzahl für das untersuchte BEF in den untersuchten Zyklen für die Standardkonfiguration.....	75
Abbildung 44: Reichweitenpotenzial für das untersuchte BEF in den untersuchten Zyklen für die Standardkonfiguration.....	75
Abbildung 45: Reduktion der Reichweite für das untersuchte BEF in den untersuchten Zyklen für die Standardkonfiguration für eine auf EoL gealterte Batterie	77
Abbildung 46: Erhöhung der Reichweite des untersuchten BEFs in verschiedenen Zyklen für die Standardkonfiguration mit 50% Umluftanteil	79
Abbildung 47: Erhöhung der Reichweite des untersuchten BEFs in verschiedenen Zyklen für die Standardkonfiguration bei einer Absenkung der Innenraumsolltemperatur von 5 K und 7 K mit Kompensation des Wärmedefizits	80
Abbildung 48: Erhöhung der Reichweite des untersuchten BEFs in verschiedenen Zyklen für die Standardkonfiguration bei einer Absenkung der Innenraumsolltemperatur von 5 K (Wärmepumpenpunkt) bzw. 7 K (Kiruna) mit Kompensation des Wärmedefizits über der Anzahl der Passagiere	80
Abbildung 49: Einfluss des Wärmewiderstands von Türen und Dach auf Reichweite bei der Randbedingung Kiruna für das untersuchte BEF mit Standardkonfiguration.....	81

Abbildung 50:	Reduktion der Reichweite (links bei -18°C ; rechts bei 10°C) des untersuchten BEFs in verschiedenen Zyklen bei Entfall des Innenraumheizers und der Wärmepumpe (Heizung nur durch den PTC).....	82
Abbildung 51:	Reduktion der Reichweite (links bei -18°C ; rechts bei 10°C) des untersuchten BEFs in verschiedenen Zyklen bei Entfall des Innenraumheizers (Heizung durch Wärmepumpe und PTC).....	83
Abbildung 52:	Reduktion der Reichweite des untersuchten BEFs im Wärmepumpenpunkt in verschiedenen Zyklen bei Entfall der Wärmepumpe (Heizung nur durch den Innenraumheizer und den PTC).....	84
Abbildung 53:	Erhöhung der Reichweite des untersuchten BEFs in den untersuchten Zyklen für die Standardkonfiguration bei Entfall der Klimaanlage	85
Abbildung 54:	Summe aus den Verlusten des Motor plus der Antriebsenergie der Pumpe im Zyklus NYCC bei der Umweltbedingung Málaga	86
Abbildung 55:	Motortemperaturverlauf mit und ohne beschleunigtem Aufheizen des Motors im NEFZ bei der Umweltbedingung Málaga	87
Abbildung 56:	Ergebnisse der Voruntersuchung zur Variation von Kapselung und thermischen Massen für das untersuchte BEF für die Standardkonfiguration im NEFZ.....	88
Abbildung 57:	Einfluss auf die Reichweite des untersuchten BEFs in verschiedenen Zyklen für die Standardkonfiguration bei 70% Motormasse	89
Abbildung 58:	Erhöhung der Reichweite des untersuchten BEFs in verschiedenen Zyklen für die Standardkonfiguration mit Abwärmenutzung zur Heizung der Batterie.....	90
Abbildung 59:	Betrag der Wärme, die von der Batterie an die Umgebung übertragen wird bezogen auf die in der Batterie entstehende Wärme bei einer Durchfahrt des NEFZ	91
Abbildung 60:	Reduktion der Reichweite des untersuchten BEFs in verschiedenen Zyklen für die Standardkonfiguration bei einem Wärmeübertragungskoeffizienten von $10\text{ W/m}^2\text{K}$ an der Außenseite der Batterie.....	92
Abbildung 61:	Abkühlverhalten der Batterie von 30°C bei einer Umgebungstemperatur von 10°C in Abhängigkeit des Wärmeübertragungskoeffizienten.....	93

Abbildung 62:	Erhöhung der Reichweite im NEFZ als Funktion des Motormoments bei der Rekuperation.....	94
Abbildung 63:	Reduktion des Pumpen- und Lüfterenergiebedarfs für die Fahrt des untersuchten BEFs mit Konfiguration ohne AC in verschiedenen Zyklen jeweils ca. 3600 s	95
Abbildung 64:	Änderung der mittleren Motortemperatur bei der Fahrt des Fahrzeugs mit Konfiguration ohne AC in verschiedenen Zyklen, jeweils ca. 3600 s lang	96
Abbildung 65:	Erhöhung der Reichweite des untersuchten BEFs in verschiedenen Zyklen für die Standardkonfiguration bei Entfall des Chillers.....	97
Abbildung 66:	Erhöhung der Reichweite des untersuchten BEFs in verschiedenen Zyklen für die Standardkonfiguration bei Verwendung aller positiven Maßnahmen, bezogen auf die Reichweite aus Kapitel 4.1.1.....	98
Abbildung 67:	Erhöhung der Reichweite des untersuchten BEFs in verschiedenen Zyklen für die Standardkonfiguration bei Verwendung aller positiven Maßnahmen, bezogen auf die Reichweite eines Fahrzeugs ohne HT-NT-Verbindung, Innenraumheizung und Wärmepumpe	99
Abbildung 68:	Reichweite des untersuchten BEFs in verschiedenen Zyklen für die Standardkonfiguration bei Verwendung aller positiven Maßnahmen.....	99
Abbildung 69:	Entladekapazität von Zelle 1 als Funktion von Temperatur und Entladestrom	100
Abbildung 70:	Batteriewirkungsgrad von Zelle 1 in Abhängigkeit von Temperatur und Ladezustand bei ca. 100 kW Belastung der Gesamtbatterie	101
Abbildung 71:	Widerstände R_i und R_c von Zelle 1 bei 20°C als Funktion des Ladezustands	102
Abbildung 72:	Leistungsgrenzen von Zelle 1 in Abhängigkeit der Temperatur bei 90% SoC.....	103
Abbildung 73:	Energiebedarf für die Durchfahrt des NEFZ bei den Umgebungsbedingungen Frankfurt (links) und Málaga (rechts) als Funktion von $T_{\text{Batterie,start}}$ ohne und mit Berücksichtigung des Energiebedarfs für die Vorkonditionierung.....	104
Abbildung 74:	Energiebedarf für Durchfahrt des NEFZ und Energiebedarf für Durchfahrt des NEFZ plus Energiebedarf für Vorkonditionierung in Abhängigkeit der Vorkonditionierungstemperatur des Innenraums im Lastfall Kiruna.....	105

Abbildung 75:	Innenraumtemperatur bei einem Aufheizvorgang bei einer Umgebungstemperatur von -18°C	106
Abbildung 76:	Reduktion des Energiebedarfs des untersuchten BEFs in verschiedenen Zyklen für die Standardkonfiguration bei Vorkonditionierung des Innenraums auf Wohlfühltemperatur.	106
Abbildung 77:	Integration der Optimierung in das Gesamtmodell beim prädiktiven Wärmemanagement mit vollständig bekanntem Lastprofil	108
Abbildung 78:	Ergebnisse für die Überprüfung des durch das schnell rechnende Modell gefundenen Optimums bei FKFS, Málaga	110
Abbildung 79:	Vergleich der durch das schnell rechnende und das gekoppelte Modell gefundenen Parameter für das prädiktive Thermomanagement für „NEFZ Stau“ bei der Randbedingung Frankfurt	111
Abbildung 80:	Senkung des Fahrzeugenergiebedarfs des untersuchten BEFs in verschiedenen Zyklen für die Standardkonfiguration mit prädiktivem Wärmemanagement bei vollständig bekanntem Lastprofil bei Minimierung des Fahrzeugenergiebedarfs	113
Abbildung 81:	Senkung des Gesamtenergiebedarfs für das untersuchte BEF in verschiedenen Zyklen für die Standardkonfiguration mit prädiktivem Wärmemanagement bei vollständig bekanntem Lastprofil bei Minimierung des Fahrzeugenergiebedarfs	114
Abbildung 82:	Senkung des Fahrzeugenergiebedarfs für das untersuchte BEF in verschiedenen Zyklen für die Standardkonfiguration mit prädiktivem Wärmemanagement bei vollständig bekanntem Lastprofil bei Minimierung des Gesamtenergiebedarfs.....	115
Abbildung 83:	Senkung des Gesamtenergiebedarfs für das untersuchte BEF in verschiedenen Zyklen für die Standardkonfiguration mit prädiktivem Wärmemanagement bei vollständig bekanntem Lastprofil bei Minimierung des Gesamtenergiebedarfs	115
Abbildung 84:	Integration der Optimierung in das Gesamtmodell beim prädiktiven Wärmemanagement mit teilweise bekanntem Lastprofil	117
Abbildung 85:	Darstellung der Summe der Fehlerquadrate zwischen Motortemperatur und vorhergesagtem Grenzwert in Abhängigkeit von Kopplungsintervall und Vorausschauhorizont	119

Abbildung 86:	Reduktion des Energiebedarfs des untersuchten BEFs in Abhängigkeit des Vorausschauhorizonts für die Standardkonfiguration mit prädiktivem Wärmemanagement bei teilweise bekanntem Lastprofil im FKFS Zyklus bei der Randbedingung Málaga.....	121
Abbildung 87:	Verlauf der Motortemperatur (links) und Verlauf der Batterietemperatur (rechts) beim untersuchten BEF in Abhängigkeit des Vorausschauhorizonts für die Standardkonfiguration mit prädiktivem Wärmemanagement bei teilweise bekanntem Lastprofil im FKFS Zyklus bei der Randbedingung Málaga	121
Abbildung 88:	Durchschnittliche Reduktion des Energiebedarfs des untersuchten BEFs für die Standardkonfiguration mit prädiktivem Wärmemanagement bei teilweise bekanntem Lastprofil für die untersuchten Zyklen in Abhängigkeit des Vorausschauhorizonts.....	122
Abbildung 89:	Reduktion des Energiebedarfs des untersuchten BEFs für die Standardkonfiguration mit prädiktivem Wärmemanagement bei teilweise bekanntem Lastprofil in verschiedenen Zyklen bei einem Vorausschauhorizont von 300 s.....	123
Abbildung 90:	Ladezustand über der gefahrenen Strecke bei einer Fahrt mit und ohne Reichweitenregler	124
Abbildung 91:	Verlauf der Nebenverbraucherleistung (links) und der Durchschnittsgeschwindigkeit (rechts) bei einer Fahrt mit und ohne Reichweitenregelung.....	125
Abbildung 92:	Verlauf der Klimakennzahl bei einer Fahrt mit und ohne Reichweitenregelung.....	125
Abbildung 93:	Thermomanagementsystem des Fahrzeugs bei der Konfiguration ohne AC.....	139
Abbildung 94:	Thermomanagementsystem des Fahrzeugs bei der Konfiguration ohne Chiller	140
Abbildung 95:	Thermomanagementsystem des Fahrzeugs bei der Konfiguration mit Chiller.....	140
Abbildung 96:	Bestätigung des gefundenen Optimums des prädiktiven Wärmemanagements in der $T_{\text{Motor,soll}}\text{-SoC}_{\text{start}}$ -Ebene für den FKFS Zyklus.....	142
Abbildung 97:	Bestätigung des gefundenen Optimums des prädiktiven Wärmemanagements in der $T_{\text{Motor,soll}}\text{-SoC}_{\text{start}}$ -Ebene für den Zyklus „NEFZ Berg“	143

Abbildung 98: Bestätigung des gefundenen Optimums des prädiktiven Wärmemanagements in der $T_{\text{Motor,soll}}\text{-SoC}_{\text{start}}$ -Ebene für den Zyklus „NEFZ Stau“	143
Abbildung 99: Bestätigung des gefundenen Optimums des prädiktiven Wärmemanagements in der $T_{\text{Motor,soll}}\text{-SoC}_{\text{start}}$ -Ebene für eine dreifache Durchfahrt des NEFZ	144

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Verfügbare Batterietechnologien für Elektrofahrzeuge aus [16], Daten für Einzelzellen	6
Tabelle 2:	Eignung verschiedener elektrischer Modelle für unterschiedliche Anwendungen [32].....	9
Tabelle 3:	Übersicht der Konfigurationen des Thermomanagement-systems und deren Funktionen	23
Tabelle 4:	Übersicht der untersuchten Umweltbedingungen	24
Tabelle 5:	Untersuchte Zellen	28
Tabelle 6:	Optimierungsparameter für das vorausschauende Wärmemanagement	47
Tabelle 7:	Messgenauigkeiten des WT3000 Messsystems	50
Tabelle 8:	Umgesetzte Optimierungen in Abhängigkeit des Lastfalls	98
Tabelle 9:	Konfigurationen für die Überprüfung des gefundenen Optimums bei FKFS, Málaga	109
Tabelle 10:	Technische Daten des simulierten Fahrzeugs	139
Tabelle 11:	Schnittstellenvariablen für Co-Simulation	141
Tabelle 12:	Technische Daten des FKFS Multikonfigurations-prüfstands [109]	142