

André Suchaneck

Energiemanagement-Strategien für batterieelektrische Fahrzeuge



Scientific
Publishing

André Suchaneck

**Energiemanagement-Strategien
für batterieelektrische Fahrzeuge**

Forschungsberichte aus der Industriellen Informationstechnik
Band 17

Institut für Industrielle Informationstechnik
Karlsruher Institut für Technologie
Hrsg. Prof. Dr.-Ing. Fernando Puente León
Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Dostert

Eine Übersicht aller bisher in dieser Schriftenreihe erschienenen Bände
finden Sie am Ende des Buchs.

Energiemanagement-Strategien für batterieelektrische Fahrzeuge

von
André Suchaneck

Karlsruher Institut für Technologie
Institut für Industrielle Informationstechnik

Energiemanagement-Strategien für batterieelektrische Fahrzeuge

Zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs
von der KIT-Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) genehmigte Dissertation

von André Suchaneck, geboren in Leningrad

Tag der mündlichen Prüfung: 17. April 2018

Referent: Prof. Dr.-Ing. Fernando Puente León, KIT

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Martin Doppelbauer, KIT

Impressum



Scientific
Publishing

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark
of Karlsruhe Institute of Technology.
Reprint using the book cover is not allowed.

www.ksp.kit.edu



*This document – excluding the cover, pictures and graphs – is licensed
under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License
(CC BY-SA 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en>*



*The cover page is licensed under a Creative Commons
Attribution-No Derivatives 4.0 International License (CC BY-ND 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.en>*

Print on Demand 2018 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISSN 2190-6629

ISBN 978-3-7315-0773-4

DOI 10.5445/KSP/1000081011

Für Saskia

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Industrielle Informationstechnik (IIIT) der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Ich möchte Professor Fernando Puente León danken, der diese Arbeit ermöglicht und betreut hat. Mein Dank gilt außerdem Professor Martin Doppelbauer für die Übernahme des Korreferats.

Meinen Kollegen am IIIT, allen Studenten und allen weiteren Personen, die mich unterstützt haben und damit zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, sei an dieser Stelle gedankt.

Meiner Verlobten, meiner Familie und meinen Freunden möchte ich für den Rückhalt, den es braucht eine Promotion mit all seinen Herausforderungen erfolgreich abzuschließen, ebenfalls danken.

Karlsruhe, im April 2018

André Suchaneck

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	v
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	2
1.2 Stand der Technik	3
1.3 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit	9
2 Systemmodellierung und -simulation	11
2.1 Aufbau des Fahrzeugs	11
2.1.1 Antriebsleistung	13
2.1.2 Fahrzyklen	13
2.1.3 Bremslastverteilung	14
2.1.4 Kritische Fahrsituationen	15
2.2 Thermodynamische Grundgleichungen	15
2.3 Traktionsbatterie	17
2.3.1 Elektrisches Modell	18
2.3.2 Thermisches Modell	19
2.3.3 Betriebsgrenzen	20
2.3.4 Lebensdauer und Alterungsmodell	21
2.4 Traktionssystem	24
2.4.1 Elektrisch-mechanisches Modell	24
2.4.2 Thermisches Modell	26
2.5 Nebenverbraucher	26
2.5.1 Klimatisierung	26
2.5.2 Heiz- und Kühlkreisläufe	27
2.5.3 Wärmeübertrager	28
2.5.4 Lüfter	28
2.5.5 Heizer	29
2.5.6 Klimakreislauf	30
2.5.7 Pumpen	31

2.5.8	Bordnetz-DCDC-Wandler	32
2.5.9	Weitere Nebenverbraucher	32
2.6	Fahrgastraum und Fahrerkomfort	33
2.7	Simulationsmodell	35
3	Problemformulierung	39
3.1	Anforderungen	39
3.1.1	Sicherheit	40
3.1.2	Reichweite und Lebensdauer	40
3.1.3	Komfort	41
3.1.4	Methodik	42
3.2	Systemanalyse	43
3.3	Klassifikation der Nebenverbraucher	46
3.4	Mathematische Formulierung	49
3.4.1	Wahl der Steuergrößen	49
3.4.2	Wahl der Systemzustände	50
3.4.3	Zustandsgrenzen	51
3.4.4	Wahl des Gütefunktionalen	52
3.4.5	Zeitdiskretisierung	54
3.5	Auswahl der Optimierungsmethoden	54
3.5.1	Heuristische Verfahren	55
3.5.2	Stochastische Verfahren	56
3.5.3	Gradientenverfahren	56
3.5.4	Dynamische Programmierung	57
3.5.5	Maximumprinzip von Pontrjagin	62
4	Optimierung im Entwicklungsprozess	65
4.1	Entkopplung in Teilprobleme	66
4.2	Fahrverlaufsabhängiges Optimierungsproblem	66
4.2.1	Analyse der Optimierungsergebnisse	68
4.2.2	Erweiterung um den Komfort	81
4.2.3	Reduktion des Lösungsraums	82
4.2.4	Modellprädiktive Regelung	85
4.3	Optimierungsproblem der Komponentensteuerung	86
4.3.1	Konstruktion des mehrstufigen Problems	86
4.3.2	Diskretisierung der Zustands- und Steuergrößen	88
4.3.3	Optimierung des Graphen	90

4.3.4	Gütefunktional	92
4.3.5	Strategie für nicht erreichbare Zielwerte	92
4.3.6	Parametersatz	93
4.3.7	Anwendung	93
4.3.8	Ergebnisse	94
5	Energiemanagement im Fahrbetrieb	105
5.1	Referenzstrategie	105
5.2	Stochastische Dynamische Programmierung	106
5.2.1	Schätzung der Wahrscheinlichkeitsverteilung	106
5.2.2	Erweiterung des Zustandsvektors	108
5.2.3	Anwendung im Fahrzeug	108
5.3	Maximumprinzip von Pontrjagin	109
5.3.1	Zustandsgleichungen und -grenzen	109
5.3.2	Koppelgleichung	111
5.3.3	Kozustandsdifferenzialgleichungen	112
5.3.4	Transversalitätsbedingung	112
5.3.5	Lösung des Differenzialgleichungssystems	113
5.3.6	Schätzung der Anfangswerte der Kozustände	116
5.3.7	Ergebnisse der Optimierung	118
5.3.8	Anwendung im Fahrzeug	119
5.3.9	Simulationsergebnisse	125
5.3.10	Schlussfolgerung	134
6	Zusammenfassung und Ausblick	137
A	Simulationsparameter	143
	Literaturverzeichnis	159
	Eigene Veröffentlichungen	173
	Betreute studentische Arbeiten	173

Symbolverzeichnis

Allgemeine Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
BMS	Batteriemanagementsystem
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DP	Dynamische Programmierung
ECE	<i>Economic Commission for Europe</i>
EM	Energiemanagement
EOL	<i>End of life</i>
FTP75	<i>Federal Test Procedure 75</i>
HV-NV	<i>High voltage</i> -Nebenverbraucher, Nebenverbraucher mit Spannungsniveau der Traktionsbatterie
HX	<i>Heat exchanger</i> , Wärmetauscher
LV-NV	<i>Low voltage</i> -Nebenverbraucher, Nebenverbraucher mit 12/14 V Spannungsniveau
MP	Maximumprinzip von Pontrjagin
NYCC	<i>New York City Cycle</i>
OBL	<i>On-Board</i> -Ladegerät
PMV	<i>Predicted Mean Vote</i>
RAM	<i>Random-access memory</i> , Arbeitsspeicher, Hauptspeicher
SDP	Stochastische Dynamische Programmierung
SEI	<i>Solid Electrolyte Interface</i>
SFTP-US06	<i>Supplemental Federal Test Procedure US06</i>
VCU	<i>Vehicle Control Unit</i>
WLTP/C3	<i>Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedures – Class 3</i>

Symbole

Lateinische Buchstaben

Symbol	Bedeutung	Einheit
0	Nullwert	–
A	Fläche	m^2
COP	Leistungszahl, engl. <i>coefficient of performance</i>	–
c_p	spezifische isobare Wärmekapazität	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
E	Energie	J
ETD	Eintrittstemperaturdifferenz	K
F	Kraft	N
f	Zustandsupdatefunktion	–
G	Wärmeübergangskoeffizient einer Fläche	W K^{-1}
g	Einzelschritt-Kostenfunktion	–
g_{nfeas}	Kosten für nicht erreichbare Zustände	–
H	Enthalpie	J
\mathcal{H}	Hamilton-Funktion	–
h	Kostenfunktion des Endzustands	–
I	elektrische Stromstärke	A
\mathcal{I}	verfügbare Information zum Fahrzeug und Fahrverlauf (Zustandswerte, Parameter, Routenplanung, ...)	–
J	Gütefunktional	–
k_{th}	Wärmeübergangskoeffizient	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$
M	Drehmoment	N m
m	Masse	kg
\dot{m}	Massenstrom	kg s^{-1}
P	elektrische Leistung	W
p	Funktion zur Berechnung der erforderlichen elektrischen Leistung der Nebenverbraucher	–
p	Druck	Pa
Δp	Druckunterschied, Druckverlust	Pa
\mathcal{P}	Wahrscheinlichkeit	–
Q	Wärme	J
q	Lösung des Differenzialgleichungssystems	–
R	elektrischer Widerstand	Ω
T	thermodynamische Temperatur	K

Symbol	Bedeutung	Einheit
t	Zeit, Zeitpunkt	s
U	elektrische Spannung	V
u	Steuergröße	—
\mathcal{U}	Menge aller zulässigen Steuergrößenwerte	—
V	Volumen	m ³
\dot{V}	Volumenstrom	m ³ /s
v	Geschwindigkeit	m s ⁻¹
w	Störgröße	—
x	Zustandsgröße	—
\mathcal{X}	Menge aller zulässigen Zustandswerte	—

Griechische Buchstaben

Symbol	Bedeutung	Einheit
α_x	Steigung der Fahrbahn in Fahrtrichtung x	°
α	relative Fahrleistungsabweichung	—
β	Anteil der mechanischen Bremsleistung an der Gesamtbremsleistung	—
Γ	normierter Alterungszustand	—
ζ	Druckverlustbeiwert, Druckverlustkoeffizient, Widerstandsbeiwert	—
η	Wirkungsgrad	—
ϑ	Celsius-Temperatur	°C
κ	Funktion zur Bewertung des Komforts	—
λ	Funktion zur Berechnung der Alterungszustandsänderung	—
μ	Regelgesetz	—
ν	Viskosität	m ² /s
ξ	Ladezustand (engl. <i>State of Charge</i>)	—
Π	Funktion zur Bewertung der aktuellen maximalen Antriebsleistung	—
π	Steuerungspolitik	—
ρ	Massendichte	kg/m ³
τ	Zeitgröße	s
ϕ	Wärmestrom	W
ψ	Kozustand, Lagrange-Multiplikator	—
ω	Gewichtungsfaktor	—

Hochgestellte Indizes

Index	Bedeutung
$(\bullet)^o$	optimal
$(\bullet)^+$	oberer Schwellwert
$(\bullet)^-$	unterer Schwellwert

Tiefgestellte Indizes

Index	Bedeutung
$(\bullet)_0$	Startwert
$(\bullet)_A$	Körper A, Medium A
$(\bullet)_{air}$	Luft
$(\bullet)_{amb}$	Umgebung
$(\bullet)_{aux}$	Nebenaggregate
$(\bullet)_B$	Körper B, Medium B
$(\bullet)_b$	Batterie
$(\bullet)_{br}$	Bremse
$(\bullet)_{cab}$	Fahrgastraum/Kabine
$(\bullet)_{cal}$	kalendarische Alterung
$(\bullet)_{chg}$	Aufladen, in Laderichtung
$(\bullet)_{comp}$	Kompressor
$(\bullet)_{cyc}$	zyklische Alterung
$(\bullet)_{dchg}$	Entladen, in Entladerichtung
$(\bullet)_e$	Endwert
$(\bullet)_{ext}$	extern
$(\bullet)_{fan}$	Lüfter
$(\bullet)_{front}$	Vorderachse
$(\bullet)_{gen}$	Generator, generatorisch
$(\bullet)_{htr}$	Heizer
$(\bullet)_{hvac}$	Klimatisierung
$(\bullet)_{hx}$	Wärmetauscher
$(\bullet)_{in}$	Eingangswert
$(\bullet)_{int}$	intern
$(\bullet)_{irr}$	irreversibel
$(\bullet)_{lam}$	laminar

Index	Bedeutung
(•) _{loss}	Verluste
(•) _{max}	Maximalwert
(•) _{mech}	mechanisch
(•) _{min}	Minimalwert
(•) _{mot}	Motor, motorisch
(•) _{nom}	Nennwert
(•) _{oc}	elektrischer Leerlauf, engl. <i>open circuit</i>
(•) _{off}	deaktiviert, ausgeschaltet
(•) _{out}	Ausgangswert
(•) _{pg}	Teilproblem der Komponentensteuerung, engl. Abkürzung <i>power generation</i>
(•) _{pla}	Alterung durch <i>lithium plating</i>
(•) _{pmp}	Pumpe
(•) _{res}	Fahrwiderstand
(•) _{rear}	Hinterachse
(•) _{ref}	Referenzwert
(•) _{req}	Sollwert
(•) _{rev}	reversibel
(•) _{th}	thermisch
(•) _{tr}	Traktion
(•) _{tub}	turbulent
(•) _{veh}	Fahrzeug

Mathematische Operatoren

Operator	Bedeutung
$E\{\}$	Erwartungswertoperator

Parameter und Konstanten

Symbol	Bedeutung	Wert	Einheit
A_{veh}	Stirnfläche des Fahrzeugs	2,8	m^2
c_w	Luftwiderstandsbeiwert des Fahrzeugs	0,31	—
$f_{R,0}$	konstanter Rollwiderstandskoeffizient	0,011	—
$f_{R,1}$	geschwindigkeitsabhängiger Rollwiderstandskoeffizient	0,0003	s m^{-1}
g	Erdbeschleunigung	9,81	m/s^2
R	Universelle Gaskonstante	8,3144598	$\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$
ρ_{air}	Luftdichte (als konstant angenommen)	1,2	kg/m^3

1 Einleitung

Das elektrisch angetriebene Fahrzeug wurde bereits Ende des 19. Jahrhunderts erfunden [18]. Es zeichnet sich gegenüber verbrennungsmotorischen Fahrzeugen durch eine Reihe von Vorteilen aus. Dazu gehören unter anderem der hohe Wirkungsgrad, der mechanisch einfache Aufbau, die Fähigkeit, kinetische Energie bei Bremsvorgängen zurückzugewinnen, ein geringer Lärmpegel, hohes Drehmoment bei niedrigen Drehzahlen, lokale Emissionsfreiheit und CO₂-Neutralität beim Einsatz regenerativer Energien zum Laden [25, 36, 66, 151]. Ein wesentlicher Nachteil gegenüber verbrennungsmotorischen Fahrzeugkonzepten besteht allerdings bis heute und ist der Grund für den bisher sehr begrenzten Erfolg: die geringe Energiedichte der Traktionsbatterie und die daraus resultierende geringe Reichweite [108]. Daher sind entweder sehr große und damit auch sehr teure elektrische Speicher notwendig oder die Reichweite ist stark begrenzt [18, 25, 151].

Durch den technischen Fortschritt bei Energiespeichern und Antriebstechnik sind elektrisch angetriebene Fahrzeuge als mögliches alternatives Antriebskonzept der Zukunft wieder ins Blickfeld der Gesellschaft gerückt. Dazu geführt haben die zu erwartende Verknappung fossiler Brennstoffe sowie das gestiegene Umweltbewusstsein der Gesellschaft in Hinblick auf Emissionen verbrennungsmotorischer Fahrzeuge und den damit verbundenen Treibhauseffekt. Dies hat die Regierungen zahlreicher Länder dazu bewogen, Gesetze zur Begrenzung der Emissionen einzuführen. Das wiederum hat Automobilhersteller veranlasst, ihre Entwicklung auch in Richtung elektrisch angetriebener Fahrzeuge zu verstärken, da diese die Emissionen der Fahrzeugflotte reduzieren und damit gesetzliche Strafzahlungen reduzieren [151].

Als mittelfristiger Zwischenschritt zu rein elektrisch angetriebenen Fahrzeugen gilt das Hybridfahrzeug, welches sowohl über einen Elektromotor als auch über einen Verbrennungsmotor verfügt. Es vereint die Vorteile beider Konzepte und kann die Kundenanforderungen bereits heute erfüllen [151]. Eine langfristige Lösung stellt dieses Fahrzeugkonzept aufgrund endlicher fossiler Brennstoffe nicht dar, sodass auch die Entwicklung rein elektrisch angetriebener Fahrzeuge vorangetrieben werden muss. Aktuelle batterieelektrische Elektrofahrzeuge, wie der *BMW i3*, der *smart fortwo electric drive* und die Fahrzeuge der Firma *Tesla* zeigen die Machbarkeit von Serienelektrofahrzeugen, aber auch deren Schwächen, auf.

Es wird intensiv an neuen Energiespeichertechnologien mit höheren Energiedichten geforscht [1, 99, 140]. Darüber hinaus sollte der Energieverbrauch im Fahrzeug selbst gesenkt werden. Dies kann durch eine Optimierung der Komponenten und der Antriebsstrangstruktur sowie durch ein optimales Energiemanagement erfolgen [19, 50, 134]. In dieser Arbeit wird ein möglicher Lösungsansatz für ein optimales Energiemanagement vorgestellt. Die Problemstellung bei der Entwicklung des Energiemanagements und der Stand der Technik im zugehörigen Forschungsgebiet werden nachfolgend erläutert. Daraus werden die Zielsetzung dieser Arbeit abgeleitet und die Gliederung der Arbeit beschrieben.

1.1 Problemstellung

Die Aufgabe des Energiemanagements ist die Steuerung und Regelung aller Komponenten im Fahrzeug zur Erfüllung der Fahreranforderungen unter Einhaltung von Sicherheits- und Komfortkriterien [23]. Die zusätzlich zur Traktionsleistung erforderliche Nebenverbraucherleistung führt bei Elektrofahrzeugen zu einer deutlichen Verkürzung der Reichweite von bis zu 50 % und muss daher minimiert werden [65, 75, 82, 97]. Durch die Optimierung der Komponenten und passive Maßnahmen kann der Energieaufwand reduziert werden, für einen gegebenen Fahrzeugaufbau kann das volle Optimierungspotenzial aber nur durch ein optimiertes Energiemanagement ausgeschöpft werden. Eine generische und ganzheit-

liche Methodik für die Entwicklung einer Energiemanagementstrategie ist erforderlich, um unterschiedliche Fahrzeugkonfigurationen und Parameter zu berücksichtigen. Eine mögliche Methodik wird in dieser Arbeit vorgestellt und am Beispiel eines batterieelektrischen Fahrzeugs angewendet. Dabei müssen die Sicherheits- und Lebensdauieranforderungen der Traktionsbatterie und die Komfortanforderungen des Fahrers berücksichtigt werden, sodass gleichzeitig das Thermomanagement betrachtet wird [156].

1.2 Stand der Technik

Das Energiemanagement in verbrennungsmotorischen und Hybridfahrzeugen ist bereits intensiv untersucht worden, und es sind eine Vielzahl von Lösungsansätzen bekannt. Dazu gehören Methoden zur Leistungsverteilung zwischen Traktionsbatterie und Verbrennungsmotor, Strategien für das Nebenaggregatemanagement und Ansätze zur Berücksichtigung der Kopplungen im elektrischen Antriebsstrang sowie verschiedene passive Maßnahmen zur Energieverbrauchsreduktion. Der Stand der Technik für die genannten Aspekte wird im Folgenden beschrieben.

Energiemanagement von Hybrid- und Brennstoffzellenfahrzeugen

Das Hybridfahrzeug vereint einen verbrennungsmotorischen und einen elektrischen Antriebsstrang. Daher lässt sich eine Vielzahl der entwickelten Methoden für das Energiemanagement im batterieelektrischen Fahrzeug nutzen. Insbesondere Strategien für die Leistungsaufteilung zwischen Verbrennungsmotor und Elektromotor für die unterschiedlichen Konfigurationen des Antriebsstrangs von Hybridfahrzeugen werden in zahlreichen Arbeiten untersucht. Dabei werden verschiedene Optimierungsmethoden mit dem Ziel eingesetzt, den Kraftstoffverbrauch und die Abgasemissionen zu verringern. Für ladungserhaltende Hybrid-Konfigurationen muss als Nebenbedingung der Ladezustand der Traktionsbatterie am En-

de dem Anfangsladezustand entsprechen, woraus sich Vorteile für die Optimierungsmethoden ergeben.

Die Methode der Dynamischen Programmierung (DP) wird häufig eingesetzt, um das globale Optimum für die Leistungsverteilung im Hybridfahrzeug zu ermitteln. Sie wird beispielsweise in [2] eingesetzt, wobei diese aufgrund des hohen Rechenaufwands nur als Benchmark dient. Die Arbeit [127] setzt DP ein, um eine optimale Steuerungsstrategie für ein Plug-in-Hybridfahrzeug zu berechnen. Anhand der Ergebnisse wird der Einfluss der Temperatur des Verbrennungsmotors sowie der Fahrgastraumbeheizung aufgezeigt. Aus den Ergebnissen der DP werden in [86] heuristische Regeln für die Steuerung eines Hybridfahrzeugs abgeleitet. Die Dimensionierung eines Hybridsystems mit einem Doppelschichtkondensator und das Energiemanagement unter Berücksichtigung der Lebensdauer und der Kosten einer Traktionsbatterie werden in [90] berechnet. In [6, 76] wird versucht, den Rechenaufwand der DP zu begrenzen, indem der Lösungsraum basierend auf extremalen Zustandstrajektorien eingegrenzt wird. Einen stochastischen Ansatz der DP verfolgt dagegen [59] mit dem Ziel, eine – im Mittel – optimale Lösung in Form einer Wertetabelle zu berechnen. In [101] wird ein stochastischer Ansatz zur Berücksichtigung einer ungenauen Vorhersage des zukünftigen Fahrverlaufs für das Energiemanagement eines Hybridfahrzeugs genutzt.

Eine alternative Optimierungsmethode ist das Maximumprinzip von Pontrjagin. Ein darauf basierender analytischer Ansatz zur Optimierung der Leistungsverteilung im Hybridfahrzeug wird in [2, 130, 135] verwendet. Dabei wird ein vereinfachtes Modell eines hybriden Antriebsstrangs zugrunde gelegt und darauf basierend eine Regelungsstrategie entwickelt. Die genannten Methoden werden beispielsweise in [93, 113] auch für Brennstoffzellenfahrzeuge sowie in [114, 147] für Hybridspeicher bestehend aus einer Traktionsbatterie und einem Doppelschichtkondensator eingesetzt, um die Leistungsverteilung zwischen den beiden Energiequellen zu optimieren.

Die Alterung der Traktionsbatterie wird bei der Entwicklung von Strategien für das Energiemanagement in zahlreichen Arbeiten berücksichtigt. Die Arbeit [92] beschreibt die Optimierung der Lastverteilung in einem

Plug-in-Hybridfahrzeug. Die Alterung der Traktionsbatterie wird dabei mittels eines nichtlinearen Kennfelds, basierend auf einem elektrochemischen Modell, beschrieben. Die Lösung des Optimierungsproblems wird durch Anwendung der Stochastischen Dynamischen Programmierung (SDP) berechnet. In [89] dient ein semi-empirisches Lebensdauermodell für die Optimierung eines Brennstoffzellen-Batterie-Hybridfahrzeugs mittels DP. Das Maximumprinzip von Pontrjagin mit Berücksichtigung der Alterung der Traktionsbatterie wird in mehreren Arbeiten eingesetzt, um für Hybridfahrzeuge eine optimierte Regelungsstrategie der Lastverteilung zu bestimmen. In [125] wird ein Alterungsmodell basierend auf dem aktuellen Ladungsdurchsatz angenommen. Dagegen legt [102] einen Gewichtungsfaktor für die Alterung abhängig von der Zelltemperatur für die Optimierung zugrunde.

Nebenaggregatemanagement

Das Energiemanagement für das elektrische Bordnetz verbrennungsmotorischer Fahrzeuge wurde bereits intensiv untersucht. Die Methoden können auf elektrisch angetriebene Fahrzeuge übertragen werden und werden daher kurz vorgestellt.

Die Arbeit [44] betrachtet eine Kühlsystemregelung, welche durch die Klassifikation von Fahrertyp und Fahrsituation höhere mittlere Bauteiltemperaturen ermöglicht und damit den Kraftstoffverbrauch senkt. Das Einsparpotenzial für Lastkraftwagen durch eine bedarfsgerechte Steuerung bestimmter Nebenverbraucher (Lüfter, Pumpen etc.) wird in [38] aufgezeigt. Darüber hinaus wird im Ausblick der Arbeit vorgeschlagen, vor einer Steigung pro-aktiv die Kühlmitteltemperatur abzusenken und damit die spätere Aktivierung eines Nebenverbrauchers zu vermeiden. Eine Strategie für ein Thermomanagement für ein Brennstoffzellenfahrzeug wird in [120] beschrieben, wobei die besonderen Anforderungen einer Brennstoffzelle bei extremen Umgebungsbedingungen (z. B. Kaltstart bei sehr niedrigen Temperaturen) und allen Fahrzuständen berücksichtigt werden. In [106] werden für einen Elektrobus Stromspitzen der Batterie reduziert und dadurch die Lebensdauer verlängert. Dazu wird die *Equiva-*

lent Consumption Minimization Strategy unter Berücksichtigung des thermischen Kabinenkomforts angewendet.

Für elektrisch angetriebene Fahrzeuge finden sich in der Literatur eine Reihe von Ansätzen zur Reduktion des Energieverbrauchs der Nebenaggregate. Eine ausführliche Patentrecherche wurde in [75] durchgeführt. Die wichtigsten Ansätze sind dabei die Abwärmenutzung [31], die Vorkonditionierung [30] sowie der Einsatz eines elektrischen Heizers zur Umwandlung von Bremsenergie in thermische Leistung [94]. Ein weiterer methodischer Ansatz wird in [24] erläutert. Darin wird die optimale Erzeugung der thermischen Leistung für die Kühlung einer elektrischen Energiequelle mittels eines Lüfters und einer Kältekompressionsmaschine untersucht. Darüber hinaus kann ein Bremswiderstand eingesetzt werden, der die elektrische Bremsleistung in Wärme umwandelt und an die Umgebung abgibt [84, 126, 155] bzw. als thermischer Speicher zum Heizen dient.

Der zum Heizen bzw. Kühlen der Batterie erforderliche Energieaufwand kann durch Abwärmenutzung und Vorkonditionieren der Traktionsbatterie während des Ladevorgangs am Stromnetz, wie in [10, 104] vorgeschlagen, reduziert werden. In Hinblick auf die Lebensdauer der Traktionsbatterie wird in [57, 69] vorgeschlagen, die Traktionsbatterie auch nach der Fahrt weiter zu temperieren. In [17] wird vorgeschlagen, die Traktionsbatterie sowohl elektrisch als auch thermisch aufzuladen, um die gespeicherte thermische Energie während der Fahrt für den Fahrgastraum zu nutzen. Ein analoges Vorgehen wird ebenfalls in [158] beschrieben, wobei die Auswirkung auf die Lebensdauer der Traktionsbatterie berücksichtigt wird.

Die Nebenverbraucher sind an den Antriebsstrang gekoppelt und beeinflussen somit den Gesamtverbrauch. Daher muss deren Einfluss bei der Verbrauchsanalyse berücksichtigt werden. In zahlreichen wissenschaftlichen Arbeiten wird die Nebenverbraucherleistung als konstant angenommen [2, 135] oder als gegebene Eingangsgröße berücksichtigt [54, 78]. Das Optimierungspotenzial durch die Steuerung der Nebenverbraucherleistung zur Reduktion des Gesamtverbrauchs bleibt damit unberücksichtigt. In [58] wird die Steuerung der Nebenverbraucher bei der Optimierung

des Energiemanagements in einem Gelände-Hybridfahrzeug mit Verbrennungsmotor, Batterie und Doppelschichtkondensator berücksichtigt, die zugrunde liegende Strategie beruht dabei allerdings auf einer Heuristik und berücksichtigt nicht den zukünftigen Fahrverlauf.

In elektrisch angetriebenen Fahrzeugen kann in Bremsphasen die zurückgewonnene Energie direkt für die Nebenverbraucher eingesetzt werden. Eine Methode wird beispielsweise in [126] beschrieben. Darin wird die zurückgewonnene elektrische Leistung direkt zum Klimatisieren eingesetzt. Kann die Traktionsbatterie nicht weiter geladen werden, wird die Kompressorleistung zum Kühlen bzw. die Heizleistung zum Heizen erhöht und damit die überschüssige Energie durch Laden thermischer Speicher genutzt. Im Anschluss wird die Kompressor- bzw. Heizleistung für eine bestimmte Dauer reduziert, ohne dass die Temperaturanforderungen verletzt werden. Die Methode berücksichtigt des Weiteren, dass der Leistungsverbrauch zum Klimatisieren reduziert wird, wenn die Restenergie der Traktionsbatterie nicht ausreicht. Der Ansatz der zeitlichen Entkopplung von Erzeugung und Nutzung elektrischer Energie wird auch in [23] als eine mögliche Strategie für ein Hybridfahrzeug vorgeschlagen. Der Innenwiderstand der meisten Traktionsbatterietypen sinkt mit zunehmender Temperatur. Damit kann aktives Heizen, wie es in [68] vorgeschlagen wird, trotz des hierfür erforderlichen Energieaufwands, prinzipiell zu einer größeren nutzbaren Energiemenge führen.

Eine Optimierung des Heiz- und Kühlkreislaufs mit einer Vielzahl von Optimierungsgrößen mittels genetischer Algorithmen wird in [53] beschrieben. Dabei werden unter anderem die optimalen Stellwerte im Kältemittelkreislauf unter Berücksichtigung von Stellgrößenbeschränkungen bestimmt.

Der Energieumsatz der Nebenverbraucher führt zu einer Verringerung der Reichweite. Im ungünstigsten Fall führt dies dazu, dass der geforderte Fahrzyklus nicht beendet werden kann. Daher muss die Nebenverbraucherleistung reduziert werden. Eine mögliche Strategie wird z. B. in [5] beschrieben.

Rückkopplung der Nebenverbraucher zum Antriebsstrang

Durch die Kopplung an den Antriebsstrang beeinflussen die Nebenverbraucher auch die elektrischen Verluste im Antriebsstrang.

Für ein Brennstoffzellenfahrzeug wird der Einfluss und der daraus resultierende Freiheitsgrad zur Optimierung in [81] untersucht. Eine Analyse der Nebenverbrauchersteuerung hinsichtlich Sicherheit- und Komfortanforderungen zur Senkung des Energieverbrauchs kommt dabei zu dem Ergebnis, dass die Fahrzeugklimatisierung das größte Optimierungspotenzial besitzt. Die vorgeschlagene Steuerungsstrategie ordnet jedem Nebenverbraucher eine Flexibilität bei dessen Leistungsaufnahme zu und bestimmt darauf basierend die Steuergrößen.

Eine ähnliche Betrachtung erfolgt für die Klimatisierung des Fahrgastraums und der Traktionsbatterie für ein batterieelektrisches Fahrzeug in [115]. Die Steuerungsstrategie passt, abhängig von der aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeit, die elektrische Leistung zum Klimatisieren an, gleichzeitig wird auf eine Solltemperatur geregelt.

Die Auswirkung der Klimatisierung auf die Lebensdauer der Batterie wird in [144] betrachtet. Die Arbeit führt mittels Sequenzieller Quadratischer Programmierung eine Optimierung der aufgewendeten Nebenverbraucherleistung, der Batteriebensdauer und der Fahrgastraumtemperatur mit mehreren Randbedingungen an die Steuer- und Zustandsgrößen durch. Durch eine Rückführung der Zustandsgrößen ergibt sich eine modellprädiktive Regelung. Das Ergebnis zeigt, dass in Zeitabschnitten mit geringer Antriebsleistung die Kabine vorgekühlt wird und bei hohen Antriebsleistungen die Klimatisierung reduziert wird.

In [116] wird festgestellt, dass zum Energiemanagement in batterieelektrischen Fahrzeugen bisher nur wenige Arbeiten existieren. Die Arbeit führt eine Optimierung für ein batterieelektrisches Fahrzeug mittels Dynamischer Programmierung durch. Es wird die Heizleistung gesteuert, wobei die Fahrgastraumtemperatur und der Energieumsatz berücksichtigt werden. Zudem fließt die Abweichung der aktuellen von der mittleren Batterieleistung in die Optimierung mit ein, mit dem Ziel, den Batteriestrom zu glätten und damit die Batteriebensdauer zu erhöhen.

Passive Maßnahmen

Ein weiterer Ansatz, die benötigte Energie für das Heizen und Kühlen des Traktionssystems und Fahrgastraums zu reduzieren, sind passive Maßnahmen. Hierzu gehören beispielsweise der Einsatz einer Wärmepumpe [63, 134], körpernahe Klimatisierung [73], die Verbesserung der Isolierung [75] sowie der Einsatz von *phase-change material* (PCM) [72, 110]. Diese Ansätze werden in dieser Arbeit nicht explizit betrachtet, da sich diese zwar auf die Resultate, nicht aber auf die Methodik zur Bestimmung einer Energiemanagementstrategie auswirken. Für weitere Ausführungen zu passiven Maßnahmen sei z. B. auf [48], [75], [122] und [134] verwiesen.

1.3 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit

Die Zielsetzung dieser Arbeit ist, allgemein formuliert, ein „ganzheitliches Energie- und Thermomanagement auf Gesamtfahrzeugebene“, wie es in [4] gefordert wird. Die Methodik soll für einen gegebenen Fahrzeugaufbau mit gegebenen Komponenten und definierten Betriebsgrenzen eine Energiemanagementstrategie bestimmen, welche die Reichweite, unter Einhaltung von Sicherheits-, Lebensdauer- und Komfortanforderungen bei begrenzter Entwicklungszeit, maximiert. Die Steuerung der Nebenverbraucherleistung sowie das regenerative Bremsen sollen dabei für den normalen Fahrbetrieb berücksichtigt werden. Die Methodik soll durch eine modellbasierte Beschreibung des Fahrzeugverhaltens ermöglichen, möglichst alle Einflüsse und die aus dem Stand der Technik (Abschnitt 1.2) bekannten Optimierungsansätze (Vorkonditionierung, zeitliche Anpassung der Nebenverbraucherleistung, Abwärmenutzung etc.) zu berücksichtigen. Dies soll ohne heuristische Regeln und ohne Tuning-Parameter erfolgen, um den erforderlichen Testaufwand zur Absicherung der Algorithmen gering zu halten. Dabei wird zwischen dem Entwicklungsprozess, bei dem alle Einflüsse als bekannt angenommen werden (Offline-Optimierung [50]), und dem Fahrbetrieb, bei dem unter anderem der Fahrverlauf nicht genau bekannt ist (Online-Optimierung [50]), unterschieden. Aus dem Stand der Technik ist dem Autor eine solche Methodik für batterieelektri-

sche Fahrzeuge und basierend auf einem Modell des Fahrzeugsverhaltens nicht bekannt. Die Validierung der Methodik soll simulativ am Beispiel eines gegebenen Fahrzeugaufbaus mit einem komplexen Heiz- und Kühlsystem erfolgen. Das Fahrzeug wurde im Rahmen der Arbeit detailliert vermessen und basierend auf den Messungen ein Simulationsmodell für die Bewertung der Methodik implementiert.

Die Arbeit ist wie folgt gegliedert. In Kapitel 2 werden zunächst die erforderlichen Grundlagen zur modellbasierten Beschreibung des Elektrofahrzeugs vorgestellt. Anschließend werden in Kapitel 3 die Anforderungen an das Energiemanagement definiert, darauf aufbauend das vorliegende Problem analysiert und mathematisch beschrieben. Basierend auf den Anforderungen wird eine Auswahl geeigneter Optimierungsmethoden getroffen. In Kapitel 4 wird eine Methode für den Entwicklungsprozess vorgestellt, welche modellbasiert alle wesentlichen Einflüsse berücksichtigt und für einen gegebenen Fahrzyklus durch Anwendung von Dynamischer Programmierung eine optimierte Steuerungsstrategie liefert. Anhand der Optimierungsergebnisse mehrerer Szenarien wird aufgezeigt, dass die Methodik die aus dem Stand der Technik bekannten heuristischen Optimierungsansätze ganzheitlich berücksichtigen kann. Der Rechenaufwand für die Dynamische Programmierung ist für aktuelle Steuergeräte zu hoch, um eine echtzeitfähige Implementierung zu realisieren. Daher werden in Kapitel 5 zwei Ansätze für die Implementierung im Fahrbetrieb betrachtet. Der Fahrzyklus ist im Allgemeinen nicht bekannt, daher wird in Abschnitt 5.2 eine stochastische Beschreibung der Problemstellung entwickelt und aufgezeigt, wie mittels Stochastischer Dynamischer Programmierung ein Regelgesetz in Form einer Wertetabelle berechnet werden kann. Ein analytischer Ansatz, basierend auf dem Maximumprinzip von Pontrjagin, wird in Abschnitt 5.3 hergeleitet. Dieser Ansatz weist gegenüber der Dynamischen Programmierung einen deutlich geringen Rechenaufwand auf und ist daher für den Einsatz im Fahrbetrieb geeignet. Der Ansatz wird in Abschnitt 5.3.8 simulativ mittels eines Fahrzeugmodells untersucht und mit einer Referenzstrategie verglichen. Abschließend werden die Ergebnisse in Kapitel 6 zusammengefasst und ein Ausblick auf weitere Arbeiten gegeben.

2 Systemmodellierung und -simulation

In dieser Arbeit wird eine modellbasierte Energiemanagementstrategie entwickelt und mittels eines Simulationsmodells des Fahrzeugs bewertet. Die eingesetzten Modelle zur Berechnung der elektrischen Antriebsleistung aus der Fahranforderung des Fahrers und der Längsdynamik des Fahrzeugs, die Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs, bestehend aus Traktionsbatterie, Traktionssystem und Nebenverbrauchern, sowie ein grundlegendes Modell der Fahrerkabine zur Bewertung des Fahrgastraumkomforts werden im Folgenden vorgestellt und das resultierende Simulationsmodell beschrieben.

2.1 Aufbau des Fahrzeugs

Der grundlegende Aufbau eines Elektrofahrzeugs ist in Abb. 2.1 dargestellt [18, 36]. Der Fahrer gibt über das Gas- und Bremspedal eine Momentenanforderung an das Traktionssystem, über das Lenksystem wird seine Lenkvorgabe an die Räder übertragen. Die Signale werden von einem Fahrzeugregler (engl. *vehicle control unit*, Abk. VCU) vorverarbeitet und anschließend an eine oder mehrere Antriebseinheiten, bestehend aus Antriebselektronik und elektrischem Motor, verteilt. Die jeweilige Antriebselektronik steuert den bidirektionalen elektrischen Leistungsfluss zwischen der Traktionsbatterie und dem zugehörigen elektrischen Motor, welcher die elektrische Energie in eine Rotationsbewegung umwandelt. Über eine mechanische Kraftübertragung wird die mechanische Leistung an die Räder übertragen und das Fahrzeug angetrieben. Die elektrischen

Motoren können als Generatoren eingesetzt werden, um das Fahrzeug zu bremsen und dabei die kinetische Energie des Fahrzeugs in die Traktionsbatterie zurückzuspeisen. Zusätzlich sind mechanische Bremsen erforderlich, um sehr hohe Bremsmomentenanforderungen zu gewährleisten und die elektrische Leistung, beispielsweise bei vollgeladener Traktionsbatterie, zu begrenzen [25]. Das Traktionssystem kann aus Zentralmotoren und radindividuellen Motoren bestehen. Die Zentralmotoren treiben über ein Getriebe und ein Differenzial eine Achse an. Bei radindividuellen Antrieben kann das Differenzial entfallen [18, 36]. Die Traktionsbatterie wird durch ein Batteriemanagementsystem (BMS) überwacht und vom zugehörigen On-Board-Ladegerät (OBL) über das Stromnetz geladen. Des Weiteren umfasst der Fahrzeugaufbau die Nebenaggregate mit hoher Leistungsaufnahme (HV-NV), die auf der Spannungslage der Traktionsbatterie betrieben werden, wie z. B. die Komponenten zur Klimatisierung des Fahrzeugs. Ein Teil der Nebenaggregate (LV-NV) arbeitet auf einer niedrigeren Spannungslage als die Traktionsbatterie und wird daher über einen Spannungswandler (DC/DC) angeschlossen.

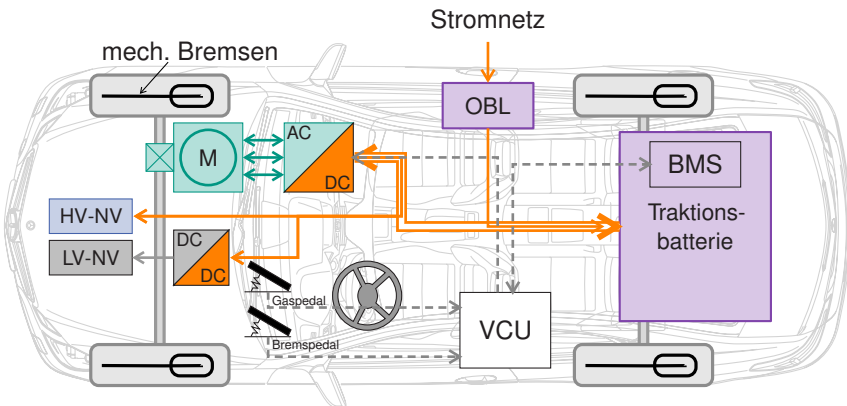


Abbildung 2.1 Schematischer Aufbau des elektrisch angetriebenen Fahrzeugs (— orange — positiver elektrischer Leistungsfluss mit Gleichstrom, — blau — positiver elektrischer Leistungsfluss mit Wechselstrom, — grau — positiver elektrischer Leistungsfluss bei 12/14 V Spannungslage, --- Informationsfluss).

2.1.1 Antriebsleistung

Die erforderliche mechanische Leistung zum Antreiben des Fahrzeugs ergibt sich mit der Gravitationskonstante g aus der mechanischen Leistung zum Beschleunigen des Fahrzeugs mit der Geschwindigkeit v und der Fahrzeugmasse m auf einem Untergrund mit der Steigung α_x und dem zu überwindenden Fahrwiderstand F_{res} zu

$$P_{\text{tr,mech}} = m\dot{v} + mg \sin \alpha_x v + v F_{\text{res}}, \quad (2.1)$$

wobei sich der Fahrwiderstand aus Luft- und Rollwiderstand zusammensetzt und näherungsweise¹ mit

$$F_{\text{res}} = F_{\text{air}} + F_{\text{R}} \\ = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} A_{\text{veh}} c_w v^2 + mg (f_{\text{R},1} v + f_{\text{R},0}) \cos \alpha_x, \quad (2.2)$$

mit den Rollreibungskoeffizienten $f_{\text{R},1}$ und $f_{\text{R},0}$, der Luftdichte ρ_{air} , der Fahrzeugstirnfläche A_{veh} und dem Luftwiderstandsbeiwert c_w des Fahrzeugs, berechnet werden kann [36, 50].

2.1.2 Fahrzyklen

Der Vergleich unterschiedlicher Fahrzeuge hinsichtlich des Energieverbrauchs erfolgt mittels definierter Fahrzyklen. Ein Fahrzyklus legt ein Geschwindigkeits- und Höhenprofil fest, dem das Fahrzeug folgen soll [9, 50]. Für gegebene Fahrzeug- und Streckenparameter kann daraus die erforderliche Traktionsleistung berechnet werden, vorausgesetzt, dass das Fahrzeug die erforderliche Traktionsleistung auch aufbringen kann [36]. Die in dieser Arbeit verwendeten Fahrzyklen sind in [9] und [143] beschrieben. Für die Fahrzeugsimulation in Abschnitt 5.3.9 wird aufgrund der auftretenden Leistungsgrenzen der Batterie eine Vorwärtssimulation durchgeführt [154]. Der Fahrerwunsch entspricht dabei der Regelung auf

¹ Die Reibungsverluste im Antriebsstrang und die Trägheitsmomente der rotierenden Komponenten des Antriebsstrangs werden vernachlässigt.

den Geschwindigkeitsverlauf des vorgegebenen Fahrzyklus und wird durch einen PID-Regler realisiert.

2.1.3 Bremslastverteilung

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der energetischen Betrachtung der Leistungsflüsse im Fahrzeug bei normalem Fahrbetrieb, daher soll ausschließlich die Längsdynamik des Fahrzeugs untersucht werden. Für den Bremsfall muss dabei beachtet werden, dass die Verteilung der Bremskraft auf Vorder- und Hinterräder innerhalb definierter Grenzen, dargestellt in Abb. 2.2, erfolgt [36, 42].

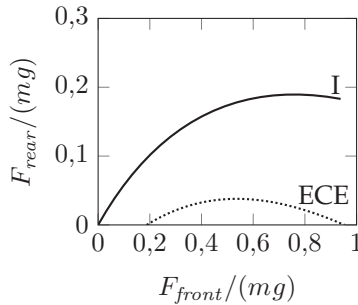


Abbildung 2.2 Grenzen der Bremskraftverteilung auf Vorder- und Hinterachse (*front* und *rear*) für gegebene Fahrzeugparameter [43].

Ein Blockieren der Hinterräder führt zum Verlust der Fahrzeugstabilität, daher sollen die Hinterräder nie vor den Vorderrädern blockieren. Die Kurve I zeigt den idealen Verlauf, der sich ergibt, wenn Vorder- und Hinterräder gleichzeitig blockieren und damit die maximale Bremskraft abhängig vom Untergrund ausgenutzt wird. Durch die *Economic Commission for Europe* (ECE) ist darüber hinaus eine weitere untere Begrenzungskurve ECE der Bremskraftverteilung festgeschrieben. Für das Energiemanagement resultiert aus den genannten Grenzen eine mögliche Beschränkung der maximal rekuperierbaren Bremsenergie abhängig von der Konfiguration des Traktionssystems (Frontantrieb, Heckantrieb, Front- und Heckantrieb). In dieser Arbeit wird angenommen, dass sowohl an der Vorder- als auch der

Hinterachse jeweils ein Elektromotor gleicher Bauart installiert ist, woraus folgt, dass die maximale elektrische Bremskraft durch die Maximalleistung der Motoren und nicht durch die Bremslastverteilung begrenzt wird. Bei höheren Bremsleistungen übernehmen die mechanischen Bremsen einen Teil der Bremsenergie und wandeln diese in Wärme um. Für weitere Details hinsichtlich der Verteilung auf Vorder- und Hinterräder sei auf [36, 42, 133] verwiesen.

2.1.4 Kritische Fahrsituationen

Bei ungünstigen Streckenverhältnissen (z. B. Glatteis) kann es zu fahrdynamisch kritischen Situationen kommen [91]. Es wird vorausgesetzt, dass derartige Situationen von einer übergeordneten Steuereinheit behandelt werden und somit in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet werden müssen.

2.2 Thermodynamische Grundgleichungen

Die thermodynamischen Modelle aller Komponenten des Fahrzeugaufbaus basieren auf den gleichen physikalischen Grundgleichungen, welche im Folgenden kurz eingeführt werden.

Thermische Modellierung von homogenen Körpern Das thermische Verhalten der Komponenten des Fahrzeugs kann näherungsweise durch die Beschreibung als homogenen Körper A modelliert werden. Die notwendige Wärmemenge, um den Körper A mit der spezifischen isobaren Wärmekapazität $c_{p,A}$ und der Masse m_A bzw. der Wärmekapazität $C_{th,A} = c_{p,A}m_A$ um die Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta_A$ zu erwärmen, berechnet sich mit

$$Q_A = c_{p,A}m_A\Delta\vartheta_A = C_{th,A}\Delta\vartheta_A. \quad (2.3)$$

Dann gilt mit der Anfangstemperatur $\vartheta_{A,0}$ und der Summe aller ab- und zugeführten Wärmeströme $\phi_{A,i}(t)$

$$\vartheta_A(t) = \vartheta_{A,0} + \frac{1}{C_{th,A}} \int_0^t \left(\sum_i \phi_{A,i}(\tau) \right) d\tau. \quad (2.4)$$

Wärmeübergang Der Wärmeübergang zwischen zwei Körpern A und B wird unter Annahme homogener und isotroper Wärmeleistung und unter Vernachlässigung von Wärmestrahlung durch den Temperaturunterschied und das Produkt aus dem Wärmeübergangskoeffizienten k_{th} und der Fläche A bzw. dem Wärmeübergangskoeffizienten $G_{A,B}$ der Fläche A zur Fläche B beschrieben

$$\phi_{A,B} = k_{th} A (\vartheta_A - \vartheta_B) = G_{A,B} (\vartheta_A - \vartheta_B), \quad (2.5)$$

wobei Wärme vom System mit der höheren thermodynamischen Temperatur zum System mit der niedrigeren thermodynamischen Temperatur übergeht [7].

Modellierung von Fluiden Für ein Fluid wird die zeitliche Ableitung von (2.3)

$$\phi_A = c_{p,A} \dot{m}_A \Delta \vartheta_A \quad (2.6)$$

gebildet, um die Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Austritt bei einem Massestrom \dot{m}_A bedingt durch den Wärmeübergang ϕ_A zu bestimmen [48, 49]. Ist der Volumenstrom \dot{V}_A gegeben, wird der Massestrom mit der temperaturabhängigen Dichte ρ_A mit

$$\dot{m}_A = \rho_A(\vartheta_A) \dot{V}_A \quad (2.7)$$

bestimmt, wobei angenommen ist, dass die zeitliche Änderung der Dichte vernachlässigbar ist. Für alle Komponenten wird angenommen, dass deren thermische Kapazität deutlich größer als die des Kühlmittels ist. Damit kann für die Modellierung für das durchfließende Kühlmittel angenom-

men werden, dass es sich näherungsweise gegenüber einer konstanten Temperatur aufheizt bzw. abkühlt.

Stoffwerte Die Dichte und Viskosität von Luft sowie des Kühlmittels (Äthylenglykol-Wassermischung) sind aus [145] und [48] entnommen.

2.3 Traktionsbatterie

Derzeit kommen elektrochemische Akkumulatoren (wiederaufladbare Batterie) mit der Lithium-Ionen-Technologie als Energiequelle für rein elektrisch angetriebene Fahrzeuge zum Einsatz [142]. Der Vorteil der Lithium-Ionen-Technologie liegt in der hohen Energie- und Leistungsdichte, der hohen Lade- und Entladewirkungsgrade und der hohen Zyklenfestigkeit verglichen mit anderen Technologien (bspw. Nickel-Metallhydrid). Dabei kommen unterschiedliche Zellchemien, wie z. B. Nickel-Kobalt-Aluminiumoxid (NCA), Nickel-Mangan-Kobaltoxid (NMC) oder Eisenphosphat (LFP), zum Einsatz. In dieser Arbeit werden eine Traktionsbatterie (elektrochemischer Akkumulator) mit Lithium-Ionen-Technologie betrachtet und die Parameter einer Lithium-Eisenphosphat-Zelle zugrunde gelegt, ohne dass die Methodik dadurch in ihrer Allgemeinheit begrenzt wird. Die 12/14 V-Bordnetz-Batterie wird in dieser Arbeit nicht betrachtet. Im Folgenden wird daher die Traktionsbatterie zur besseren Lesbarkeit als Batterie bezeichnet werden.

Die erforderliche Spannung und der erforderliche maximale Strom einer Batterie werden durch Serien- und Parallelschaltung von Batteriezellen in Modulen und anschließender Serien- und Parallelschaltung mehrerer Module zu einem Pack erreicht [3, 77, 142]. Im Rahmen dieser Arbeit werden Zellen mit gleichen Parametern und idealer Verschaltung vorausgesetzt, sodass ein Ladungsausgleich zwischen den Zellen (engl. *cell balancing*)² nicht erforderlich ist.

² Für weitere Informationen zu *cell balancing* siehe z. B. [3, 77].

2.3.1 Elektrisches Modell

Der Ladezustand (engl. *state of charge*) der Batterie ξ wird relativ zur aktuellen³ nominellen Ladungsmenge $Q_{b,0}$ der geladenen Batterie mit der dimensionslosen Größe

$$\xi(t) = \frac{Q_b(t)}{Q_{b,0}} \quad \text{mit} \quad \dot{Q}_b(t) = -I_b(t) \quad (2.8)$$

angegeben [36, 50]. Die Batterie wird vereinfacht durch ein stationäres Modell, bestehend aus einer Spannungsquelle mit der Spannung U_{oc} und einem in Reihe geschalteten Innenwiderstand R , entsprechend Abb. 2.3, beschrieben [36, 50], da für dieses Modell die Parameterdaten in Datenblättern verfügbar sind. Prinzipiell sind aber auch genauere Modelle möglich (siehe hierzu z. B. [3, 50]).

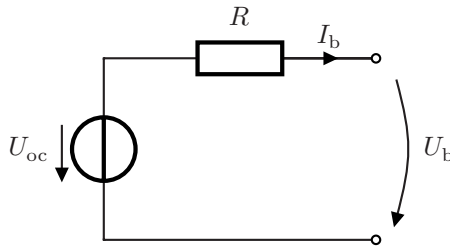


Abbildung 2.3 Elektrisches Ersatzschaltbild einer Batterie.

Die Leerlaufspannung U_{oc} wird nachfolgend als eine Funktion des Ladezustands

$$U_{oc} = U_{oc}(\xi) \quad (2.9)$$

beschrieben. Der Innenwiderstand

$$R = R(\xi, \vartheta, \text{sign}(I_b)) \quad (2.10)$$

³ Die Ladungsmenge, die bei Nennstrom und Nenntemperatur entnommen werden kann, nimmt durch irreversible Reaktionen in der Zelle mit der Zeit ab [146].

wird abhängig von dem Ladezustand, der Temperatur und der Stromrichtung modelliert. Für positive Stromwerte I_b wird die Batterie entladen und für negative Werte geladen [3, 50]. Die Verläufe (2.9) und (2.10) können durch Kennfelder beschrieben werden [50] und hängen wesentlich von der Zellchemie ab [3, 62]. In Abb. 2.4 und Abb. 2.5 sind die qualitativen Verläufe einer Lithium-Ionen-Batterie dargestellt.

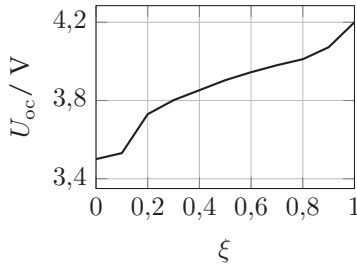


Abbildung 2.4 Leerlaufspannung einer Batteriezelle U_{oc} [117].

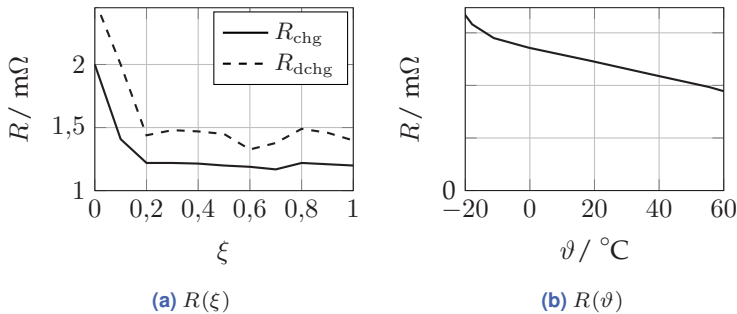


Abbildung 2.5 Innenwiderstand R einer Batteriezelle in Abhängigkeit vom Ladezustand ξ mit Daten aus [117] und qualitativer Verlauf abhängig von der Temperatur ϑ mit Daten aus [3].

2.3.2 Thermisches Modell

Eine flüssigkeitsgekühlte Batterie, wie sie in dieser Arbeit betrachtet wird, kann thermisch als homogener Körper mit der thermischen Kapazität $C_{th,b}$

nach (2.3) modelliert werden [50]. Aufgrund der Temperaturdifferenzen ergibt sich die Summe der Wärmeströme

$$\phi_{\text{ext}} = G_{\text{b,fl}} (\vartheta - \vartheta_{\text{fl}}) + G_{\text{b,amb}} (\vartheta - \vartheta_{\text{amb}}) \quad (2.11)$$

zwischen der Batterie und dem Kühlmittel sowie zwischen der Batterie und der Umgebungsluft durch Wärmeleitung und Konvektion⁴. Die innere erzeugte Wärme ergibt sich aus einem reversiblen und einem irreversiblen Anteil zu

$$\phi_{\text{int}} = \phi_{\text{rev}} + \phi_{\text{irr}} = \phi_{\text{rev}} + I_{\text{b}}^2 R, \quad (2.12)$$

wobei der reversible Wärmeanteil ϕ_{rev} im Weiteren als klein und damit vernachlässigbar angenommen wird [8, 50, 121].

2.3.3 Betriebsgrenzen

Die Batterie darf zur Gewährleistung der Sicherheit nur innerhalb definierter Betriebsgrenzen betrieben werden. Die Batterietemperatur ist begrenzt durch

$$\vartheta_{\text{min}} \leq \vartheta \leq \vartheta_{\text{max}}. \quad (2.13)$$

Die maximale Stromstärke muss im Dauerbetrieb, abhängig von der Temperatur und dem Ladezustand, innerhalb eines maximalen Entlade- und Ladestroms

$$I_{\text{b,chg,max}}(\vartheta, \xi) \leq I_{\text{b}} \leq I_{\text{b,dchg,max}}(\vartheta, \xi) \quad (2.14)$$

liegen. Für eine maximale (kurze) Zeitdauer ist eine definierte höhere Stromstärke zulässig. Die Batterie darf nicht überladen oder zu weit entladen werden, hierfür werden eine Lade- und Entladeabschaltspannung

⁴ Der Anteil der Wärmestrahlung wird vernachlässigt.

definiert [77]. Im Rahmen dieser Arbeit wird diese Grenze durch den Ladezustand und die Stromgrenzen mit

$$\xi_{\min} \leq \xi \leq \xi_{\max} \quad (2.15)$$

berücksichtigt. Außerhalb der Bereiche (2.13), (2.14) und (2.15) wird die Batterie geschädigt oder gar zerstört [3].

2.3.4 Lebensdauer und Alterungsmodell

Eine Batterie wird im Allgemeinen bis zum Erreichen des EOL-Zeitpunkts (engl. *end of life*) betrieben. Dieser Punkt bezeichnet den Batteriezustand, ab dem die Batterie nicht mehr die Spezifikationen bezüglich Kapazität und elektrischer Leistung erfüllt und somit ausgetauscht werden muss. Im Automobilbereich wird typischerweise ein Kapazitätsverlust von $\Delta C_b = 0,2 \cdot C_{\text{nom}}$ als EOL definiert [125]⁵. Der Kapazitäts- und Leistungsverlust, im Folgenden als Alterung bezeichnet, wird durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst, wobei die Ursachen bisher nicht vollständig verstanden sind [146]. Bei hohen Temperaturen kommt es unter anderem zur Zersetzung des Elektrolyts und einem Wachstum der SEI-Schicht⁶, woraus ein Ansteigen des Innenwiderstands und damit eine Leistungsabnahme resultiert [11, 21, 56, 142, 146]. Bei niedrigen Temperaturen und hohen Stromstärken kann ein Ladevorgang *lithium plating*⁷ verursachen, wodurch die Kapazität irreversibel reduziert wird [141]. Darüber hinaus wird die Entladeschlussspannung bei gleicher Stromstärke schneller erreicht, wodurch die verfügbare Kapazität sinkt [62]. Ungünstig wirkt sich zudem ein zu hoher Temperaturgradient in den Zellen aus [153]. In [92] wird die Alterung ausgehend von einem elektrochemischen Modell beschrieben. Aufgrund der komplexen Berechnungen wird statt der eigentlichen Modellgleichung ein Kennfeld abgeleitet, das die Wachstumsrate der SEI-Schicht als Maß für die Alterung in Abhängigkeit des Ladezustands und

⁵ Alternativ wird auch eine Fahrzeugreichweite von 160000 km für einen definierten Fahrzyklus gefordert [34].

⁶ Passivierungsschicht [142], engl. *Solid Electrolyte Interface* (SEI)

⁷ Abscheidung von metallischem Lithium auf der Anode.

des Stroms beschreibt. Die Arbeiten [35, 64, 119] geben basierend auf umfangreichen Messungen ein Parameterkennfeld in Abhängigkeit von der Temperatur und des Ladezustands an und leiten daraus semi-empirische Alterungsmodelle ab. Ein weiterer Ansatz zur Beschreibung der Alterung basierend auf dem Ladungsdurchsatz (*effective Ah-throughput*) wird in [125] und [137] beschrieben. Der Betrag des Stroms wird in Abhängigkeit von der Temperatur und des Ladezustands gewichtet integriert und anschließend auf einen batteriespezifischen Parameter normiert, der in gleicher Weise für einen definierten Stromverlauf bestimmt wurde.

Im batterieelektrischen Fahrzeug ist primär der Kapazitätsverlust durch Alterung von Bedeutung. Die aktuelle nominelle Kapazität wird durch die Alterung λ bestimmt und ergibt sich aus

$$C_b(t) = C_b(t_0) - \int_{t_0}^t \lambda(\tau) d\tau. \quad (2.16)$$

Die Alterung in einem Fahrzyklus wird im Folgenden durch den Alterungszustand Γ beschrieben und ergibt sich durch Integration der Alterung λ bezogen auf den Referenzwert Γ_{ref} zu

$$\Gamma(t) = \Gamma(t_0) - \frac{1}{\Gamma_{\text{ref}}} \int_{t_0}^t \lambda(\tau) d\tau. \quad (2.17)$$

Der Referenzwert Γ_{ref} wird für diese Arbeit durch die Alterung bei Anwendung des WLTP/C3-Fahrzyklus mit der Anfangstemperatur $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$ und dem Anfangsladezustand $\xi = 0,8$ festgelegt. Für das Alterungsmodell λ wird in Anlehnung an [28, 141] der Zusammenhang

$$\begin{aligned} \lambda(t) = & \lambda_{\text{cal}}(t) \ x \ (t_0 + t)^{x-1} \\ & + \lambda_{\text{cyc}}(t) \ z \ (Q_{\text{As},0} + Q_{\text{As}}(t))^{z-1} |I_b(t)| + \lambda_{\text{pla}}(t) \end{aligned} \quad (2.18)$$

bestehend aus den drei Einflüssen von kalendarischer Alterung bei Stillstand (λ_{cal}), zyklischer Alterung bei elektrischem Stromfluss (λ_{cyc}) sowie durch *lithium plating* verursachter Alterung (λ_{pla}) angenommen. Die ka-

alendarische Alterung ist abhängig von der Zeit t , die zyklische Alterung wird durch den Ladungsdurchsatz

$$Q_{As}(t) = \int_{t_0}^t |I_b(\tau)| d\tau \quad (2.19)$$

bestimmt, wobei mit t_0 und $Q_{As,0}$ berücksichtigt wird, dass die Zelle bereits gealtert ist. Die Alterungseinflüsse werden mit

$$\lambda_{cal}(t) = a_{cal} \exp(b_{cal} \xi(t)) \exp\left(\frac{-E_{a,cal}}{R T_b(t)}\right) \quad (2.20)$$

$$\lambda_{cyc}(t) = a_{cyc} \exp\left(\frac{-E_{a,cyc}}{R T_b(t)}\right) \quad (2.21)$$

$$\lambda_{pla}(t) = a_{pla} \lambda_{pla,map}(T_b(t), I_b(t)) \quad (2.22)$$

berechnet. Die Funktion $\lambda_{pla,map}(T_b, I_b)$ ist ein Kennfeld entsprechend Abb. 2.6. Die Aktivierungsenergien ($E_{a,cal}$, $E_{a,cyc}$) und Parameter (a_{cal} , b_{cal} , a_{cyc} , a_{pla}) wurden basierend auf den Ergebnissen in [32, 46, 141] geschätzt. Ausgehend von [150] wird angenommen, dass die Alterung aufgrund von *lithium plating* beim Laden mit einem Strom in Höhe der nominellen Kapazität der Zelle der zyklischen Alterung bei Laden und Entladen mit der gleichen Stromhöhe bei 70 °C entspricht. Nach [32, 46] seien die Exponenten $x = 0,5$ und $z = 0,5$ angenommen. Das Ziel des Alterungsmodells (2.18) ist vorrangig, das qualitative Verhalten abzubilden und alle wesentlichen Auswirkungen in dieser Arbeit verdeutlichen zu können, ohne dass dabei die Zellchemie und die quantitative Ausprägung der Alterungseffekte zueinander berücksichtigt werden muss. Somit ist für diese Arbeit zu beachten, dass der resultierende Alterungsverlauf nicht der tatsächlichen Alterung einer realen Batteriezelle entspricht. In dieser Arbeit ist der Einfluss von *lithium plating* hoch, um die resultierenden Schlussfolgerungen z. B. für das regenerative Bremsen darzustellen. Dies muss, wie aus [67] hervorgeht, nicht für jede Zellvariante gelten. Entsprechend muss die Alterung für jede Zellvariante individuell bestimmt werden, um quantitative Aussagen zu treffen.

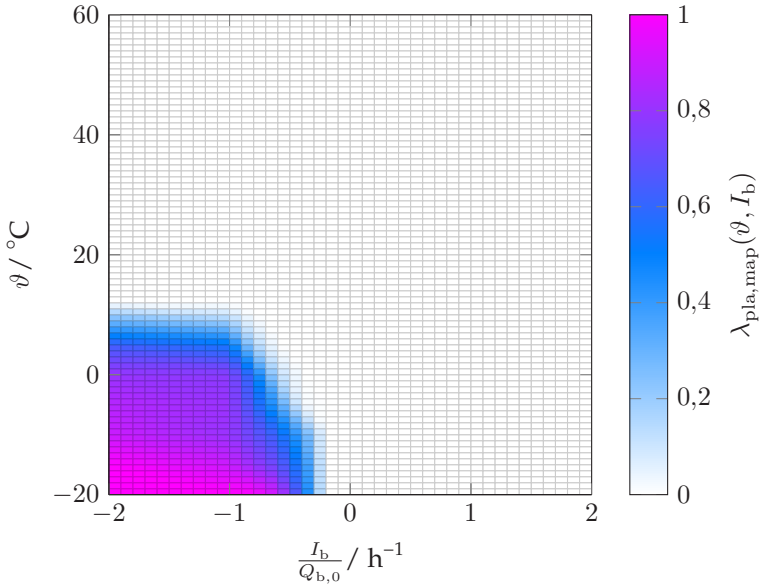


Abbildung 2.6 Kennfeld $\lambda_{\text{pla,map}}$ zur Berechnung der Alterung durch *lithium plating*.

2.4 Traktionssystem

2.4.1 Elektrisch-mechanisches Modell

Für den Einsatz in Elektrofahrzeugen werden verschiedenen Maschinentypen (Asynchronmaschine, permanentmagneterregte Synchronmaschine, geschaltete Reluktanzmaschine, Gleichstrommaschine etc.) in Betracht gezogen [18, 40, 50]. Allgemein lässt sich der Wirkungsgrad der Maschine einschließlich des Inverters⁸ durch ein Kennfeld

$$\eta_{\text{mot}} = \eta_{\text{mot}}(M_{\text{mot}}, N_{\text{mot}}, U_{\text{mot}}) \quad (2.23)$$

beschreiben (siehe auch Abb. 2.7), wobei M_{mot} das Moment an der Maschine und N_{mot} die mechanische Drehzahl beschreibt [18, 50, 100]. Die

⁸ auch Wechselrichter genannt

Abhängigkeit von der Eingangsspannung U_{mot} wird in dieser Arbeit vernachlässigt. Das maximale Moment ist in Abhängigkeit von der Drehzahl N_{mot} begrenzt:

$$M_{\text{mot,max}} = M_{\text{mot,max}}(N_{\text{mot}}) . \quad (2.24)$$

Für Drehzahlen über $N_{\text{mot,nom}}$ arbeitet die Maschine im Feldschwächbereich und begrenzt das maximale Moment durch die maximale Leistung. Für eine definierte Zeitdauer kann die Maschine auch im Überlastbereich über ihrem maximalen Nennmoment $M_{\text{mot,nom}}$ betrieben werden [18].

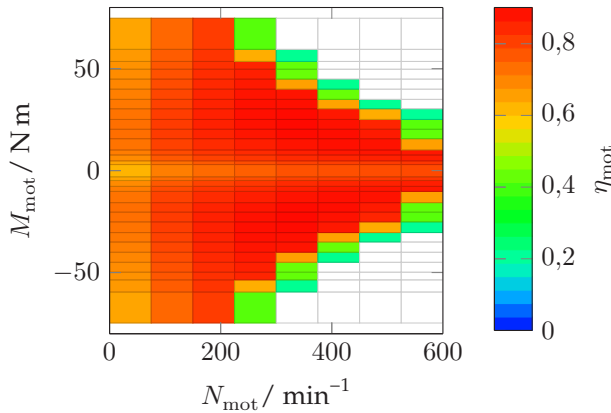


Abbildung 2.7 Qualitativer Verlauf eines Maschinenkennfelds (Daten entnommen aus [39]). Weiße Flächen beschreiben Arbeitspunkte außerhalb des zulässigen Betriebsbereichs.

Im Elektrofahrzeug wird im Allgemeinen ein ein- oder zweistufiges⁹ Getriebe eingesetzt [36]. In dieser Arbeit wird ein einstufiges Getriebe mit

$$N_{\text{mot,1}} = i_{\text{gear}} N_{\text{mot,2}} \quad (2.25)$$

$$M_{\text{mot,2}} = i_{\text{gear}} M_{\text{mot,1}} \quad (2.26)$$

mit der Übersetzung $i_{\text{gear}} > 1$ zugrunde gelegt. Der Wirkungsgrad wird im Kennfeld der Maschine (2.23) berücksichtigt.

⁹ Der Einsatz eines zweistufigen Getriebes wird beispielsweise in [16] vorgeschlagen.

Im Bremsfall arbeitet die elektrische Maschine als Generator. Dabei wird die maximale elektrische Leistung durch (2.24) begrenzt.

2.4.2 Thermisches Modell

Die Maschine wird thermisch als homogener Körper mit einer Wärmekapazität $C_{\text{th,mot}}$ modelliert. Damit ergibt sich für den zeitlichen Temperaturverlauf mit der Anfangstemperatur $\vartheta_{\text{mot}}(t_0)$ der Zusammenhang

$$\begin{aligned} \vartheta_{\text{mot}}(t) = & \vartheta_{\text{mot}}(t_0) \\ & + \frac{1}{C_{\text{th,mot}}} \int_{t_0}^t (P_{\text{mot,loss}}(\tau) + \phi_{\text{mot,ext}}(\tau)) d\tau \end{aligned} \quad (2.27)$$

mit den elektrischen Verlusten $P_{\text{mot,loss}}$ in der Maschine und dem Wärmestrom $\phi_{\text{mot,ext}}$ an die Umgebung und das Kühlmittel.

2.5 Nebenverbraucher

Neben der eigentlichen Aufgabe des Antriebsstrangs, ein Fahrzeug anzutreiben, müssen eine Vielzahl von Sicherheits- und Komfortfunktionen durch Nebenverbraucher umgesetzt werden. Die eingesetzten Modelle der Nebenverbraucher werden nachfolgend beschrieben.

2.5.1 Klimatisierung

Die Klimatisierung des Fahrzeugs stellt ein komplexes System mit einer Vielzahl an Einflussgrößen, Anforderungen und Stellgrößen dar. Im Fahrzeug muss der Fahrgastraum zur Gewährleistung der Aufmerksamkeit und des Komforts des Fahrers im Winter geheizt bzw. im Sommer gekühlt werden [33, 48]. Im Elektrofahrzeug muss zudem die Batterie im Sommer gekühlt werden, um die Betriebsgrenzen der Batterie einzuhalten und die Alterung zu begrenzen. Im Winter muss die Batterie geheizt werden, um die Leistungsanforderungen zu erfüllen. Durch den hohen Energieumsatz stellt die Klimatisierung den Hauptnebenverbraucher dar, was

insbesondere im Winter bzw. Sommer zu einer deutlichen Reichweitenverringerung führt [156]. Im Winter kann die Reichweitenverkürzung durch die reduzierte Batteriekapazität und die Innenraumheizung bis zu 50 % betragen [156].

2.5.2 Heiz- und Kühlkreisläufe

Das Heiz- und Kühlsystem des Fahrzeugs kann prinzipiell sehr unterschiedlich ausgeführt werden. Der Fahrgastraum kann mittels einer Kompressionskältemaschine gekühlt werden. Die temperierte Fahrgastraumlufte kann durch Luftführungskanäle in der Batterie geführt werden, um die Batterie auch bei hohen Umgebungstemperaturen ausreichend zu kühlen. Eine höhere Kühlleistung lässt sich erzielen, indem eine Verdampferplatte direkt in das Gehäuse der Batterie integriert wird und sowohl der Fahrgastraum als auch die Batterie mit der Kältekompresseionsmaschine gekühlt werden. Anstelle der direkten Kühlung über ein Kältemittel kann die Batterie auch von einem Kühlmittel durchflossen werden. Dies ermöglicht es, die Batterie mittels Umgebungsluft über das Kühlmittel, bei geringen Kühlleistungsanforderungen zu kühlen. Wird eine höhere Kühlleistung benötigt, so wird das Kühlmittel durch Umschalten eines Ventils auf einen anderen Zweig mit einem Wärmetauscher (auch als Chiller bezeichnet [98, 156]) geschaltet. Durch die Expansion des Kältemittels wird Wärme aus dem Kühlmittel entzogen, welches durch die Batterie fließt. Ein weiterer Vorteil eines solchen Aufbaus ist die Möglichkeit, einen Flüssigkeitsheizer direkt in den Kreislauf zu integrieren [55, 156]. Prinzipiell kann auch ein direktes Beheizen der Batteriezellen durch elektrische Heizelemente im Batteriepack oder durch erwärmte Fahrgastraumlufte erfolgen [156]. Darüber hinaus sind auch Konzepte mit Wärmepumpen und Verlustwärmenutzung denkbar [156]. Für weitere Informationen zu möglichen Heiz- und Kühlkonzepten sei auf [20, 51, 55, 98, 105, 131, 156] verwiesen.

In dieser Arbeit wird der Aufbau entsprechend Abb. 2.8 zugrunde gelegt, ähnliche Strukturen sind beispielsweise in [53, 107] beschrieben. Die Anzahl der Heiz- und Kühlkreisläufe wird anhand der auftretenden Tem-

peraturniveaus bestimmt. Die Batterie wird über ein Kühlmittel im Batteriekreislauf mit Umgebungsluft und den Kältekreislauf gekühlt bzw. mit dem Heizer über einen Wärmetauscher (HX 1) beheizt. Der Heizer befindet sich in einem separaten Heizkreislauf und kann damit höhere Temperaturniveaus annehmen. Über einen zusätzlichen Lüfter kann der Heizkreislauf gekühlt werden. Das Traktionssystem wird mit Umgebungsluft gekühlt. Über einen zweiten Wärmetauscher (HX 2) kann Wärme zwischen dem Traktionskreislauf und dem Batteriekreislauf übertragen werden, um beispielsweise Abwärme des Traktionssystems oder des *On-Board*-Laders (OBL) zu nutzen. Der Fahrgastraum wird über den inneren Wärmetauscher (HX cab) beheizt bzw. getrennt von der Batterie mit dem Kältekreislauf über den Verdampfer im Fahrgastraum gekühlt.

2.5.3 Wärmeübertrager

Die eingesetzten Wärmeübertrager¹⁰ werden unabhängig von deren konkretem Aufbau¹¹ näherungsweise durch ein Wärmestromfeld

$$G_{A,B} = G_{A,B}(\dot{m}_A, \dot{m}_B) \quad (2.28)$$

beschrieben. Mit der Eingangstemperaturdifferenz ETD ergibt sich ein Wärmestrom

$$\phi_{A,B} = G_{A,B}(\text{ETD}) \quad (2.29)$$

zwischen den Medien A und B [48].

2.5.4 Lüfter

Der Luftmassenstrom \dot{m}_{fan} eines Lüfters ergibt sich aus dessen Drehzahl N_{fan} :

$$\dot{m}_{\text{fan}} = \dot{m}_{\text{fan}}(N_{\text{fan}}) . \quad (2.30)$$

¹⁰ auch Wärmeaustauscher, Wärmetauscher

¹¹ z. B. Gegenstromwärmetauscher oder Kreuzstromwärmetauscher [48]

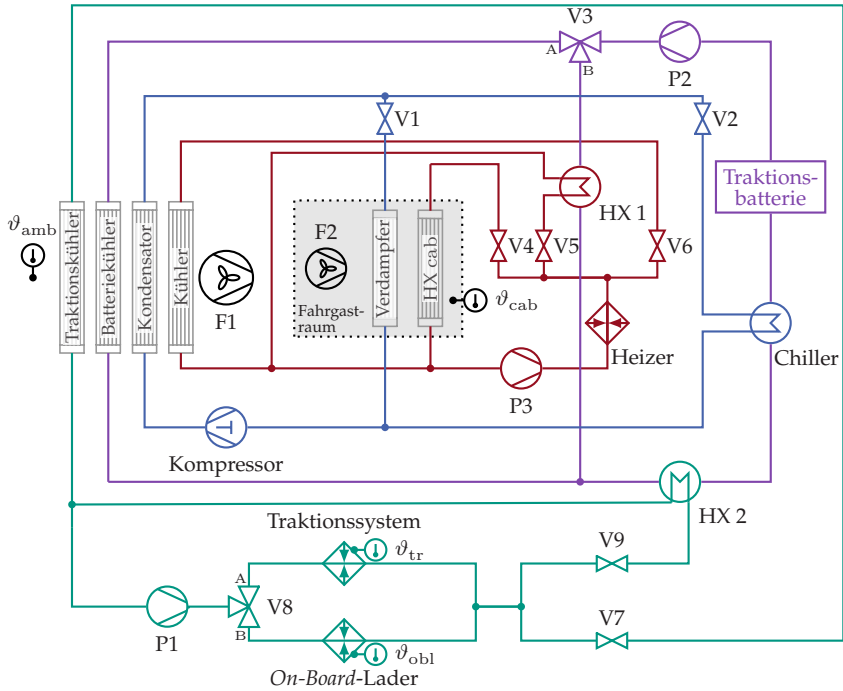


Abbildung 2.8 Schematischer Aufbau des Heiz- und Kühlsystems mit — : Kühlkreis Antriebssystem, — : Kühlkreis Batterie, — : Kältemittelkreis und — : Heizkreislauf und zusätzliche Umgebungskühlung.

Die dabei notwendige Leistungsaufnahme P_{fan} kann bei konstant angenommener Spannung in Abhängigkeit vom Luftmassenstrom mit

$$P_{\text{fan}} = P_{\text{fan}}(N_{\text{fan}}) \quad (2.31)$$

modelliert werden [48].

2.5.5 Heizer

Die Erzeugung thermischer Leistung zum Heizen kann unterschiedlich realisiert werden. In dieser Arbeit wird eine elektrische Widerstandshei-

zung mit der Heizzahl 1 eingesetzt [7]. Damit gilt näherungsweise, dass die thermische Leistung der elektrischen Leistung entspricht:

$$P_{\text{htr}} = \phi_{\text{htr}} \cdot \quad (2.32)$$

Denkbar ist auch der Einsatz einer Wärmepumpe, die eine höhere Heizzahl aufweist. Dies wird in dieser Arbeit aber nicht näher betrachtet. Hier sei beispielsweise auf [63, 134] verwiesen. Abhängig von der Dimensionierung des Heizers muss dessen thermische Kapazität $C_{\text{th,htr}}$ berücksichtigt werden. Es wird angenommen, dass die thermische Kapazität für einen Heizer bis $P_{\text{htr}} = 3 \text{ kW}$ Leistungsaufnahme vernachlässigt werden kann. Des Weiteren wird der elektrische Heizer über ein pulsweitenmoduliertes Signal angesteuert, um für unterschiedliche Eingangsspannungen gleiche mittlere thermische Leistungen zu erhalten.

2.5.6 Klimakreislauf

Der Fahrgastraum und die Batterie müssen auch bei hohen Außentemperaturen ausreichend gekühlt werden. Übersteigt die Außentemperatur die Solltemperatur, so muss aktiv gekühlt werden. Dies erfolgt über eine Kaltdampf-Kompressionskälteanlage. Dazu wird ein Kältemittel (z. B. R134a) von einem Kompressor¹² verdichtet und im Kondensator¹³ mit der Umgebungsluft abgekühlt. Über ein Expansionsventil wird das verdichtete Kältemittel entspannt und kühlt sich ab. Das am Verdampfer vorbeifließende Medium wird dadurch abgekühlt. Die Kühlleistung

$$\phi_{\text{hvac}} = \phi_{\text{hvac}}(N_{\text{comp}}, \vartheta_{\text{amb}}) \quad (2.33)$$

hängt dabei im Wesentlichen von der Umgebungstemperatur ϑ_{amb} und der Kompressordrehzahl N_{comp} ab.

¹² auch Verdichter [48], Kältemittelverdichter [49]

¹³ auch Verflüssiger

Die erforderliche stationäre Leistung wird mittels der Leistungszahl COP (*coefficient of performance*) mit

$$P_{\text{hvac}} = \text{COP}(N_{\text{comp}}, \vartheta_{\text{amb}}) \phi_{\text{hvac}} \quad (2.34)$$

berechnet [48, 49]. Das Zu- und Abschalten des Kompressors führt zu weiteren Verlusten [81], welche in dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden. Der Klimakreislauf kann für elektrisch angetriebene Fahrzeuge, wie in Abb. 2.8 gezeigt, um einen zusätzlichen Verdampfer erweitert werden, der das Batteriekühlmittel abkühlt und damit ein aktives Abkühlen der Batterie getrennt vom Fahrgastraum zulässt [55].

2.5.7 Pumpen

Die betrachteten Kühlmittelpumpen regeln deren Drehzahl N_{pmp} auf einen Solldurchfluss

$$\dot{V} = \dot{V}(N_{\text{pmp}}) , \quad (2.35)$$

wobei die stationäre elektrische Leistung

$$P_{\text{pmp}} = \eta_{\text{pmp}} \Delta p \dot{V} \quad (2.36)$$

erforderlich ist, um bei einem Wirkungsgrad von η_{pmp} den Druckverlust Δp zu überwinden. Der Leistungsanteil zum Beschleunigen des Kühlmittels wird nicht berücksichtigt. Der Druckverlust einer Rohrleitung hängt für turbulente Strömungen quadratisch und für laminare Strömungen linear vom Durchfluss ab. Daher wird der Druckverlust als Polynom

$$\Delta p = \zeta_{\text{tub}}(\nu(\vartheta)) \dot{V}^2 + \zeta_{\text{lam}}(\nu(\vartheta)) \dot{V} \quad (2.37)$$

beschrieben, wobei die Koeffizienten ζ_{tub} und ζ_{lam} von der Viskosität ν und damit der Kühlmitteltemperatur abhängen [48]. Bei niedrigen Temperaturen steigt die Leistungsaufnahme stark an, da die Viskosität des Kühlmittels steigt und somit auch die Druckverluste. Die Werte ζ_{tub} und

ζ_{lam} wurden für jeden Kreislauf und jede Ventilstellung messtechnisch bestimmt. Der Wirkungsgrad η_{pmp} ist, abhängig vom Durchfluss und dem Druckverlust, als Kennfeld

$$\eta_{\text{pmp}}(\dot{V}, \Delta p) \quad (2.38)$$

gegeben. Der qualitative Verlauf des Kennfelds ist in Abb. 2.9 dargestellt.

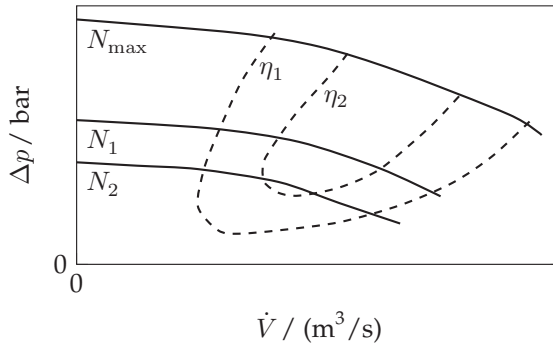


Abbildung 2.9 Qualitative Darstellung eines Pumpenkennfeldes für die Drehzahlen N mit $N_1 < N_2 < N_{\text{max}}$ und Wirkungsgrade η mit $\eta_1 < \eta_2$ (nach [138]).

2.5.8 Bordnetz-DCDC-Wandler

Ein Teil der Nebenverbraucher wird bei der Spannungslage 12 V/14 V betrieben [23, 142]. Hierfür werden eine zusätzliche Batterie sowie ein Bordnetz-DCDC-Wandler, der die höhere Spannungslage der Batterie auf die niedrige Spannungslage heruntersetzt, eingesetzt. Für die Wandlung wird ein stromabhängiger Wirkungsgrad zugrunde gelegt, dessen Verlauf qualitativ in Abb. 2.10 dargestellt ist.

2.5.9 Weitere Nebenverbraucher

Alle weiteren Nebenverbraucher (siehe Tab. 3.1 auf S. 48) werden mit einer konstanten elektrischen Gesamtleistungsaufnahme berücksichtigt.

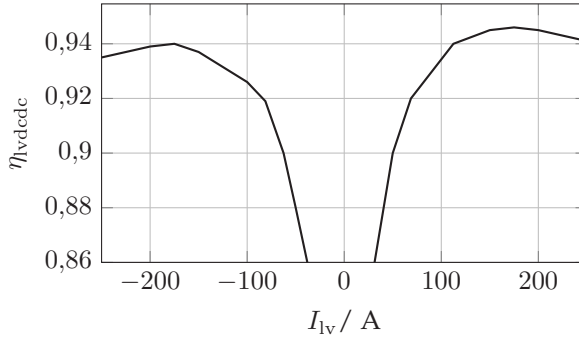


Abbildung 2.10 Qualitativer Verlauf des Wirkungsgrads eines Bordnetz-DCDC-Wandlers bei konstanter Ein- und Ausgangsspannung (Daten aus [22]).

2.6 Fahrgastraum und Fahrerkomfort

Der Fahrgastraum wird im Rahmen dieser Arbeit als Volumen V_{cab} mit einer homogenen spezifischen Wärmekapazität $c_{p,\text{cab}}$ und der Temperatur ϑ_{cab} modelliert. Entsprechend [12] ist ein solches Modell für energetische Analysen ausreichend.

Die zu- und abfließenden Luft- und Wärmeströme sind in Abb. 2.11 dargestellt. In den vorderen Teil des Fahrgastraums strömt im Außenluftbetrieb Außenluft mit der Temperatur $\vartheta_{\text{cab,in}} = \vartheta_{\text{amb}}$ bzw. im Umluftbetrieb Fahrgastraumluf mit der Temperatur $\vartheta_{\text{cab,in}} = \vartheta_{\text{cab}}$ ein. Die Luft wird durch die Fahrzeugklimatisierung erwärmt und/oder¹⁴ gekühlt. Im hinteren Teil des Fahrzeugs tritt Luft mit der Temperatur $\vartheta_{\text{cab,out}} = \vartheta_{\text{cab}}$ als Abluftstrom aus. Damit ergibt sich, unter der Annahme eines gleichen Zu- und Abluftmassenstroms $\dot{m}_{\text{cab,air}}$, eine Enthalpieänderung

$$\Delta \dot{H}_{\text{cab}} = \dot{m}_{\text{air}} c_{p,\text{cab}} (\vartheta_{\text{cab,in}} - \vartheta_{\text{cab,out}}). \quad (2.39)$$

Die Wärmeströme umfassen die Wärmeabgabe durch Wärmeleitung und Konvektion $\phi_{\text{cab,amb}}$, den Wärmeeintrag durch die Sonneneinstrahlung

¹⁴ Zur Entfeuchtung/Trocknung der Luft gegen das Beschlagen der Scheiben wird durch den *Reheat*-Betrieb die Luft zunächst stärker abgekühlt und anschließend wieder auf die Solltemperatur erwärmt [87].

ϕ_{solar} , den Wärmeeintrag durch die Insassen ϕ_{persons} und den Wärmeeintrag durch die Fahrzeugklimatisierung ϕ_{hvac} . Damit ergibt sich die Energiebilanz

$$m_{\text{cab}} c_{p,\text{cab}} \frac{d\vartheta_{\text{cab}}}{dt} = \Delta \dot{H}_{\text{cab}} - \phi_{\text{cab,amb}} + \phi_{\text{persons}} + \phi_{\text{solar}} + \phi_{\text{hvac}} \quad (2.40)$$

für den Fahrgastraum [88, 93]. Der Wärmestrom $\phi_{\text{cab,amb}}$ ergibt sich näherungsweise aus der Temperaturdifferenz zwischen Fahrgastraum und Umgebungsluft zu:

$$\phi_{\text{cab,amb}} = G_{\text{cab,amb}} (\vartheta_{\text{cab}} - \vartheta_{\text{amb}}) . \quad (2.41)$$

Die Wärmeströme ϕ_{persons} und ϕ_{solar} werden in dieser Arbeit als konstant und bekannt angenommen.

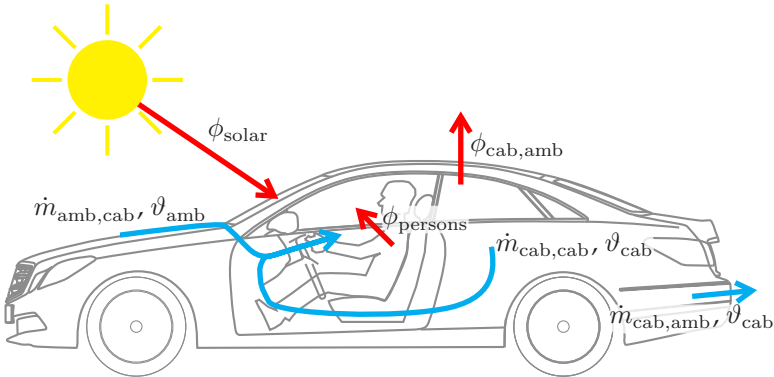


Abbildung 2.11 Luft- und Wärmeströme des Fahrgastraums (nach [48]).

Ein wesentliches Kriterium bei der Fahrzeugentwicklung ist der Fahrerkomfort κ . Dieser hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab. Dazu gehören die Luftfeuchtigkeit, -qualität, -geschwindigkeit, die Sonneneinstrahlung, der Geräuschpegel, die Temperatur im Fußraum und auf Kopfhöhe etc. [33]. Im Rahmen dieser Arbeit soll zur Vereinfachung der energetischen

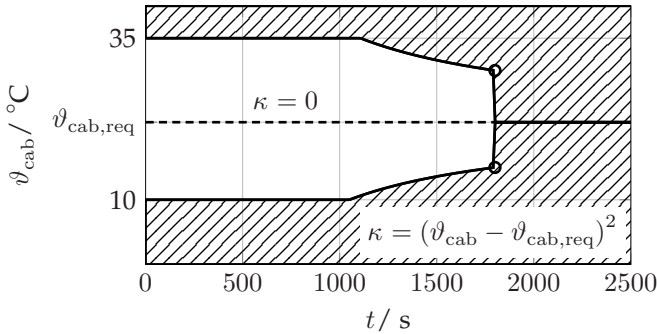


Abbildung 2.12 Temperaturgrenzen der Komfortfunktion $\kappa(t, \vartheta_{cab})$.

Analyse die Abweichung von der Sollkabinentemperatur entsprechend Abb. 2.12 mit ideal gemischter Fahrgastraumluft als Komfortkriterium dienen¹⁵. Zusätzlich müssen die Mindestanforderungen nach [33] erfüllt sein, wonach die mittlere Fahrgastraumtemperatur im Außenluftbetrieb nach $t_\kappa = 30$ min mindestens $\vartheta_{cab} = 20^\circ\text{C}$ im Winter und $\vartheta_{cab} = 25^\circ\text{C}$ im Sommer bei $\vartheta_{amb} = 40^\circ\text{C}$ und definierter Sonneneinstrahlung betragen muss. Da es sich bei elektrisch angetriebenen Fahrzeugen um verbrauchsarme Fahrzeuge handelt, wäre auch $\vartheta_{cab} = 15^\circ\text{C}$ im Winter und $\vartheta_{cab} = 30^\circ\text{C}$ im Sommer zulässig [33]. Die Sollkabinentemperatur kann vom Fahrer eingestellt werden. Für diese Arbeit wird vereinfachend angenommen, dass die Sollkabinentemperatur $\vartheta_{cab,req} = 22^\circ\text{C}$ beträgt. Im Folgenden bezieht sich der Fahrerkomfort ausschließlich auf die Temperatur im Fahrgastraum und wird zur besseren Lesbarkeit als Komfort bezeichnet.

2.7 Simulationsmodell

Basierend auf den zuvor beschriebenen Modellen der Komponenten eines Fahrzeugs wurde eine Simulationsmodell implementiert. Die grundlegen-

¹⁵ Als detailliertes Kriterium kann z. B. das *Predicted Mean Vote*-Kriterium (PMV) eingesetzt werden (siehe z. B. [33]).

de Struktur des Simulationsmodells ist Abb. 2.13 dargestellt und wird im Folgenden kurz erläutert.

Der Fahrer kann über das Navigationssystem eine Route eingeben und eine Fahrgastraumtemperatur $\vartheta_{\text{cab,req}}$ vorgeben. Über das Gas- und Bremspedal gibt der Fahrer die Antriebs- und Bremsmomente ($M_{\text{tr,req}}, M_{\text{br,req}}$) vor, die an die Fahrzeugsteuerung (VCU) übergeben und verarbeitet werden. Das Energiemanagement (EM) bestimmt parallel aus dem aktuellen Fahrzeugzustand \mathbf{x} mit einer Optimierungsstrategie den Bremsfaktor β und die Steuergrößen der Nebenverbraucher \mathbf{u}_{aux} . Die Steuerwerte β und \mathbf{u}_{aux} werden im Fahrzeug umgesetzt.

Die Momentenvorgaben der VCU ($\mathbf{M}_{\text{tr,vcu}}, \mathbf{M}_{\text{br,vcu}}$) sind dabei Vektoren, da mehrmotorige Antriebskonzepte möglich sind und die Bremsmomentenverteilung entsprechend Abschnitt 2.1.3 zu berücksichtigen ist. Die Momentenvektoren und der Bremsfaktor β des Energiemanagements (EM) werden an das Traktionssystem im Fahrzeug übergeben. Das Traktionssystem setzt die Momentenvorgabe im Rahmen der aktuellen Betriebsgrenzen des Traktionssystems und der Batterie um und überträgt das Moment an die Räder. Abhängig von den Fahrzeugparametern, vom aktuellen Fahrwiderstand und der Fahrbahnsteigung ergibt sich die Fahrzeuggeschwindigkeit. Die gemessene bzw. geschätzte Fahrzeuggeschwindigkeit \tilde{v} wird an den Fahrer als Geschwindigkeitsregler zurückgeführt. Für die Regelung im Energiemanagement wird der Zustandsmesswertevektor $\tilde{\mathbf{x}}$ zurückgeführt, wobei die Steuergrößen des Energiemanagements in jedem Zeitschritt anhand der aktuellen Eingaben des Fahrers aktualisiert werden. Der zeitliche Verlauf der Zustandsgrößen des Simulationsmodells wird durch numerische Integration mit dem Runge-Kutta-Verfahren 4. Ordnung mit fester Schrittweite $\tau = 0,5 \text{ s}$ berechnet.

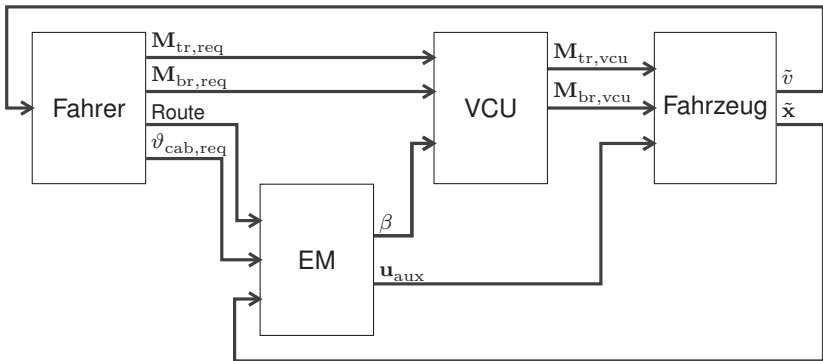


Abbildung 2.13 Struktur des Simulationsmodells.

3 Problemformulierung

Die Problemstellung dieser Arbeit wurde bisher sehr allgemein formuliert und soll daher in diesem Kapitel präzisiert werden. Dazu werden zunächst die Anforderungen spezifiziert. Darauf aufbauend wird das Optimierungsproblem formuliert. Es wird aufgezeigt, dass die Steuerung der Nebenverbraucherleistung einen Freiheitsgrad für die Optimierung darstellt, aufgrund der gestellten Anforderungen aber nicht jeder Nebenverbraucher gesteuert werden darf. Aus diesem Grund wird eine Klassifikation der Nebenverbraucher durchgeführt. Für das resultierende Optimierungsproblem werden mehrere Optimierungsmethoden vorgestellt und unter Berücksichtigung der gestellten Anforderungen eine Auswahl getroffen.

3.1 Anforderungen

Für den Einsatz im Fahrzeug müssen Anforderungen hinsichtlich Sicherheit, Antriebsleistung, Reichweite bzw. Verbrauch, Lebensdauer, Komfort, Kundenakzeptanz und technische Begrenzungen von Steuergeräten berücksichtigt werden. In Elektrofahrzeugen sind die Anforderungen an die Reichweite und die Lebensdauer aufgrund der begrenzten Energiedichte und der hohen Kosten aktueller Batterietechnologie von besonderer Bedeutung [151]. Die einzelnen Anforderungen werden im Folgenden detailliert analysiert.

3.1.1 Sicherheit

Die wichtigste Anforderung ist die Sicherheit. Diese beinhaltet die System-sicherheit durch Einhaltung aller Betriebsgrenzen und die Sicherheit bei der Fahrzeugführung.

Das Fahrzeugverhalten muss zur sicheren Fahrzeugführung den Erfahrungen eines Normalfahrers entsprechen. Eine Begrenzung der Fahrleistung aus energetischen Gesichtspunkten ist daher nicht oder nur stark eingeschränkt zulässig. Es wird für diese Arbeit daher vorausgesetzt, dass dem Fahrer zu jedem Zeitpunkt die maximale Fahrleistung, nur begrenzt durch die Betriebsgrenzen der Komponenten, zur Verfügung gestellt wird. Bei niedrigen Temperaturen ist die zulässige elektrische Leistungsabgabe der Batterie begrenzt, entsprechend muss diese aufgeheizt werden [156]. Bei hohen Temperaturen wird die maximale Leistung abgeregelt und die Batterie muss gekühlt werden, um eine Schädigung oder sicherheitskritische Zustände zu vermeiden [156].

Im Bremsfall muss die Verteilung auf die Vorder- und Hinterräder zur Erhaltung der Fahrstabilität innerhalb definierter Grenzen liegen [112]. Für diese Arbeit wird angenommen, dass die Verteilung auf die Vorder- und Hinterräder durch ein externes System bestimmt ist und somit die Fahrstabilität gesichert ist. Das energetische Optimierungspotenzial hinsichtlich der Leistungsverteilung auf die Vorder- und Hinterräder soll in dieser Arbeit nicht näher untersucht werden. Hier sei z. B. auf [133] verwiesen. Im Elektrofahrzeug sind die Betriebsgrenzen der Batterie besonders kritisch. Die Überwachung kritischer Betriebszustände erfolgt durch das Batteriemanagementsystem [79]. Die Aufgabe des in dieser Arbeit vorgestellten Energiemanagements soll es sein, diese Zustände möglichst nicht zu erreichen. Die wesentlichen Betriebsgrenzen sind dabei die Lade- und Entladestromstärke sowie die Temperatur.

3.1.2 Reichweite und Lebensdauer

Die Anforderung an eine maximale Reichweite des Fahrzeugs ist gleichbedeutend mit dem Energieumsatz der Batterie. Das Ziel sollte daher sein, unter Einhaltung aller Anforderungen, am Ende einer jeden Fahrt

einen möglichst hohen Ladezustand der Batterie zu erreichen. Für eine energetische Bewertung werden Fahrzyklen, also Geschwindigkeits- und Höhenprofile ohne Lenkwinkelvorgaben, verwendet, sodass die Querdynamik in dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden muss.

Die elektrische Leistung für Nebenverbraucher in elektrischen Antriebssträngen führt zu einer teils deutlichen Reichweitenverkürzung [47, 75]. Der Hauptverbraucher ist dabei die Klimatisierung, welche im Winter zum Beheizen und im Sommer zum Kühlen des Fahrgastraums dient. Im Elektrofahrzeug ist dies hinsichtlich der Reichweite besonders kritisch, da keine Abwärme vom Verbrennungsmotor zum Heizen genutzt werden kann, sodass elektrisch aus der Batterie geheizt werden muss. Im Winter muss zudem die Batterie selbst geheizt werden, da andernfalls die maximale Leistung und die Reichweite stark begrenzt sind.

In batterieelektrischen Fahrzeugen muss des Weiteren die Lebensdauer der Batterie berücksichtigt werden. Es wird im Automobilbereich gefordert, dass der EOL-Punkt der Batterie frühestens nach 8 bis 10 Jahren, bei definierter Belastung und definierten Umgebungsbedingungen, erreicht werden darf [34, 125, 156]. Diese Forderung lässt sich durch eine ausreichende Temperierung der Batterie erreichen [98, 105].

Eine ungleichmäßige Temperaturverteilung in den Zellen der Batterie führt zu unterschiedlicher Alterung der Zellen und sollte daher vermieden werden [110, 156]. Daher wird in dieser Arbeit für die gegebene Flüssigkeitskühlung ein Mindestkühlmittelstrom durch die Batterie durch entsprechende Wahl der Steuergrößen sichergestellt.

3.1.3 Komfort

Für die sichere Fahrzeugführung muss der Fahrerkomfort gewährleistet sein, um dessen Aufmerksamkeit nicht negativ zu beeinflussen [33]. Darüber hinaus erwartet der Fahrer von einem Fahrzeug die Möglichkeit, ein Wunschklima im Fahrgastraum einstellen zu können. Hinzu kommen weitere Komfortfunktionen, wie z. B. Radio und Zigarettensanzünder, von denen der Fahrer erwartet, dass diese ohne Einschränkungen bereitgestellt werden. Diese Funktionen sind für die Kundenakzeptanz unerlässlich.

Der Fahrerkomfort wird durch eine Vielzahl von Einflussfaktoren (Luftströmung, Außentemperatur, Luftfeuchte, Sonneneinstrahlung, Bekleidung, Temperaturverteilung im Fahrzeug, Geräuschentwicklung etc.) bestimmt [33, 48]. Die Klimatisierung des Fahrgastraums kann mit Außenluft oder Umluft erfolgen, wobei der Umluftbetrieb energetisch effizienter ist, aber auch Trocknungsmaßnahmen erfordert, um das Beschlagen der Scheiben zu verhindern [33, 48]. Da das sprunghafte Umschalten von Außen- auf Umluftbetrieb aufgrund der Druckschwankung als störend empfunden werden kann [33] und somit gesondert untersucht werden muss, soll diese Stellmöglichkeit im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet werden.

3.1.4 Methodik

Es wird vorausgesetzt, dass der Fahrzeugaufbau und alle Komponenten fest vorgegeben sind. Damit reduziert sich das vorliegende Problem auf eine regelungstechnische Aufgabe. Die interne Regelung der Komponenten, die Optimierung der Komponenten und eine Strukturoptimierung des Fahrzeugaufbaus durch alternative oder zusätzliche Komponenten werden somit nicht betrachtet. Die Methodik soll in der Art allgemein und erweiterbar formuliert sein, so dass diese auch auf andere Fahrzeugaufbauten übertragbar ist. Damit soll sichergestellt werden, dass unterschiedliche Kühlkreislaufstrukturen, siehe beispielsweise [52, 55, 60, 95, 98, 157], berücksichtigt werden können. Darüber hinaus soll der Einsatz neuer Komponenten, wie z. B. Wärmepumpen [63], möglich sein. Die Detailtiefe der Modelle der Komponenten wird in dieser Arbeit bestimmt durch die zur Verfügung stehenden Parameter. Darüber hinaus soll die Methodik insbesondere im Entwicklungsprozess erlauben, auch komplexere Modelle einsetzen zu können.

Die Entwicklung des Energiemanagements erfolgt in zwei wesentlichen Schritten. Im ersten Schritt wird basierend auf bekanntem Fahrverhalten eine möglichst optimale Steuerstrategie gesucht. Diese kann unabhängig vom Fahrzeug mittels Simulation erfolgen, sodass die Steuergeräteresourcen und Laufzeitanforderung zunächst nicht berücksichtigt werden

müssen. Grundsätzlich sollen Tuning-Parameter bei der Optimierung vermieden werden, da diese aufwendige Tests zur Validierung der Robustheit der Strategie nach sich ziehen. Die Optimierung im Entwicklungsprozess dient als Referenz für die Bewertung der Strategien im Fahrbetrieb. Aus diesem Grund muss sichergestellt sein, dass die Optimierungsmethode das globale Optimum des gestellten (diskretisierten) Problems findet. Im zweiten Schritt muss die Methode im Fahrzeug implementiert werden und im Fahrbetrieb echtzeitfähig laufen, wobei der zukünftige Fahrverlauf im Allgemeinen nicht oder nur geschätzt (z. B. durch ein Navigationssystem) bekannt ist. Die Steuergeräteressourcen sind hinsichtlich Rechenleistung und Speicherplatz begrenzt. Insbesondere die Rechenleistung stellt zumeist die begrenzende Größe dar [118]. Im Fahrbetrieb muss das Ergebnis für jeden Schritt innerhalb einer definierten Zeit vorliegen und somit die Berechnung echtzeitfähig sein. Die Rechenschritte des Energiemanagements müssen daher echtzeitfähig und ressourcenschonend sein.

3.2 Systemanalyse

Das Ziel soll eine Methodik sein, die möglichst alle wesentlichen Einflüsse berücksichtigt. Um ein besseres Verständnis für die erwarteten Ergebnisse zu erhalten, werden zunächst die einzelnen Einflüsse qualitativ untersucht, ohne einzuschränken, dass diese möglicherweise bei einer quantitativen Betrachtung ohne Wirkung sind.

Im ersten Schritt werden die möglichen Leistungsflüsse im Fahrbetrieb, dargestellt in Abb. 3.1, betrachtet. Im normalen Fahrbetrieb beim Anreiben (siehe Abb. 3.1(a)) fließt Leistung von der Batterie (Bat) in das Traktionssystem (Mot), welches die Antriebsräder (Rad) beschleunigt, und in die Nebenverbraucher (NV). Prinzipiell ist auch der Fall in Abb. 3.1(b) möglich, dass ein Teil der Antriebsleistung von den Nebenverbrauchern aus fließt, welche Energie gespeichert haben können, aktuell sind aber keine Nebenverbraucher verbaut, deren Energiespeicher ausreichend groß ist. Beim Bremsen werden zwei Fälle unterschieden. Wenn weniger Bremsleistung erzeugt als von den Nebenverbrauchern gefordert wird (Abb. 3.1(c)),

können die Nebenverbraucher direkt mit der Bremsleistung versorgt werden und der restliche Leistungsanteil fließt aus der Batterie. Ist dagegen die Bremsleistung größer als die geforderte Nebenverbraucherleistung (Abb. 3.1(d)), so können die Batterie geladen werden und gleichzeitig die Nebenverbraucher versorgt werden. Die Ladeleistung wird dabei durch die Betriebsgrenzen der Batterie oder die Lebensdauieranforderungen begrenzt. Die erforderliche Restbremsleistung wird dabei von den mechanischen Bremsen (Brk) in Wärme umgewandelt.

Der nächste Schritt ist die Analyse der Einflüsse und der daraus resultierenden möglichen Optimierungsansätze, welche im Einzelnen zum Teil aus dem Stand der Technik (siehe Abschnitt 1.2) bekannt sind. Daraus können die folgenden Heuristiken abgeleitet werden. Das Ziel der Optimierung sollte sein, diese Heuristiken implizit zu berücksichtigen.

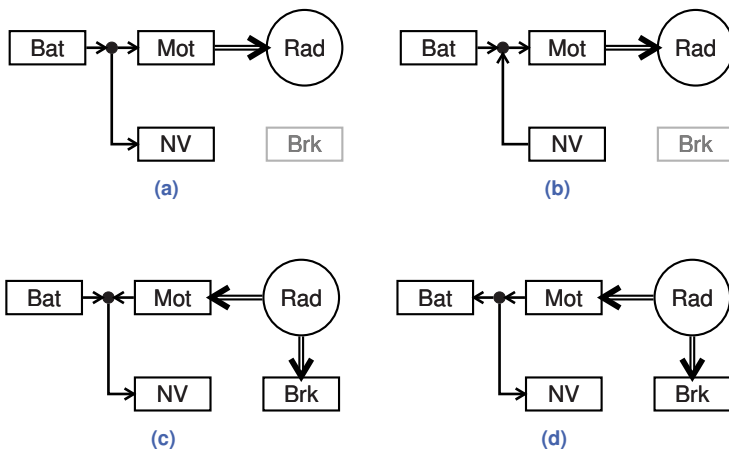


Abbildung 3.1 Leistungsflüsse im Fahrbetrieb abhängig von der Fahrsituation (— positiver elektrischer Leistungsfluss, == positiver mechanischer Leistungsfluss, — inaktiv für Energiemanagement).

- Der Innenwiderstand der Batterie sinkt mit steigender Temperatur. Damit ist es prinzipiell möglich, die Batterie aktiv zu heizen und den zusätzlichen Energieumsatz im weiteren Fahrverlauf einzusparen. Dabei muss berücksichtigt werden, dass der Energieumsatz zu

einem Absinken des Ladezustands und damit zu einem Ansteigen des Innenwiderstands führt.

- Eine weitere Möglichkeit, die Verluste in der Batterie zu reduzieren, ist die Vermeidung von hohen Strömen. Dies kann durch eine zeitliche Verschiebung der Nebenverbraucherleistung realisiert werden. Bei hohen Antriebsleistungen wird die Nebenverbraucherleistung reduziert und in Phasen geringer Antriebsleistung erhöht. Damit wird in Summe die gleiche Energie für Nebenverbraucher aufgewendet; demgegenüber stehen geringere Verlustleistungen in der Batterie. Umgekehrt lässt sich dieser Umstand beim Heizen der Batterie ausnutzen, um die Batterie aktiv mit dem Heizer und zusätzlich mit der Verlustwärme schneller aufzuheizen.
- Wird die Batterie vorausschauend mit überschüssiger Energie oder in anderweitig günstigen Situationen unter die Zieltemperatur gekühlt, kann berücksichtigt werden, dass möglicherweise eine Aufheizung während der weiteren Fahrt stattfindet. Dies gilt z. B. dann, wenn bei einer Talfahrt viel Bremsenergie rekuperiert wird und diese proaktiv zum Kühlen eingesetzt wird. Auf diese Weise muss bei der anschließenden Bergauffahrt und der damit verbundenen starken Aufheizung der Batterie weniger gekühlt werden.
- Wenn der maximale Ladezustand der Batterie nahezu erreicht ist oder die Batterietemperatur sehr niedrig ist, kann in Bremsphasen die zulässige Ladeleistung erreicht werden. Die Bremsleistung kann im Rahmen der Betriebsgrenzen zum Laden der Batterie eingesetzt werden. Darüber hinaus sollte die Bremsleistung direkt zum Heizen bzw. Kühlen eingesetzt werden, vorausgesetzt, dass dies im weiteren Fahrverlauf vorteilhaft für die Lebensdauer, den Innenwiderstand oder die maximale Ladeleistung ist. Erst wenn die geforderte Bremsleistung die Summe aus maximaler Ladeleistung und Nebenverbraucherleistung übersteigt, sollten die mechanischen Bremsen eingesetzt werden.

- Für Hybridfahrzeuge hat sich gezeigt, dass die Bremsenergie grundsätzlich gespeichert werden sollte [6]. Denkbar ist allerdings, dass das Laden der Batterie in Bremsphasen zu einer Aufheizung führt, die im weiteren Fahrverlauf mit mehr Energieaufwand gekühlt werden muss. Daher kann es von Vorteil sein, nicht die volle Bremsenergie auszunutzen und stattdessen einen Teil über die mechanischen Bremsen abzuführen.
- Bei sehr niedrigem Ladezustand lassen sich aufgrund der noch verbleibenden kurzen Fahrtdauer kaum noch Vorteile bei der Temperatur erzielen, dafür würde eine Erhöhung der Nebenverbraucherleistung schneller zum Erreichen der Entladegrenzen führen. Aus diesem Grund sollte die Nebenverbraucherleistung soweit möglich reduziert bzw. abgeschaltet werden.
- Die erforderliche thermische Leistung zum Heizen der Batterie und des Fahrgastraums kann reduziert werden, wenn ein Teil der thermischen Energie aus der Abwärme des Traktionssystems stammt. Dabei muss elektrische Leistung für die Pumpen aufgewendet werden, entsprechend muss der energetische Vorteil den energetischen Aufwand zum Pumpen des Kühlmittels überwiegen.

3.3 Klassifikation der Nebenverbraucher

Die Leistungsaufnahme eines jeden Nebenverbrauchers darf nur unter Berücksichtigung der in Abschnitt 3.1 formulierten Anforderungen gesteuert werden. Daher müssen die Nebenverbraucher für eine Optimierung zunächst in steuerbare und nicht-steuerbare Nebenverbraucher eingeteilt werden, indem die Einhaltung der gestellten Anforderungen (Sicherheit, Reichweite, Lebensdauer, Kundenakzeptanz und Komfort) geprüft wird. Die Problemstellung kann darüber hinaus vereinfacht werden, wenn Nebenverbraucher, die nur sehr selten eingesetzt werden und eine geringe Leistungsaufnahme haben, für die Betrachtung aufgrund ihres geringen Einflusses auf die Reichweite zugunsten einer schnelleren Entwicklungszeit vernachlässigt werden. Dazu wird die Einschaltdauer betrachtet. Die

Einschaltdauer kann in die drei Gruppen Dauer-, Langzeit- und Kurzzeitbetrieb unterschieden werden [23, 25, 112]. Für diese Arbeit genügt die Einteilung in Kurz- (kurz) und Langzeitbetrieb (lang).

In [81] wird die Möglichkeit der Steuerung von Nebenverbrauchern für ein Brennstoffzellenfahrzeug untersucht. Hierfür werden die Nebenverbraucher anhand ihrer Flexibilität bei der Steuerung in die Klassen *flexible-buffered* (fb), *flexible-unbuffered* (fu), *rigid-varying* (rv) und *rigid-invarying* (ri) eingeteilt. Dabei bezeichnet *buffered*, dass es sich um Systeme handelt, die aufgrund physikalischer Zusammenhänge träge sind und somit ihre Energie mit einer Zeitkonstante $\tau \geq 1$ s umwandeln. Die Systeme der Klasse *rigid* stellen Störgrößen dar, die nicht gesteuert werden können, aber in die Summe der Leistung aller Nebenverbraucher einfließen. Dabei ist die Leistung der *rigid-invarying* Systeme fest und kann somit leicht bei der Optimierung berücksichtigt werden, dagegen schwankt die Leistung der *rigid-varying* Systeme und muss als variable Störgröße berücksichtigt werden. Für diese Arbeit sind somit nur Nebenverbraucher der Klasse fb (*flexible-buffered*) als Freiheitsgrad für die Optimierung von Interesse, also insbesondere Komfortfunktionen, wie auch in [23] festgestellt wird.

In Tab. 3.1 sind die Nebenverbraucher und deren Leistungswerte sowie die Klassifizierung als Kurzzeitverbraucher entsprechend [25, 81, 112] aufgelistet. Der Kunde erwartet von einer Vielzahl der Nebenverbraucher, dass diese sich immer in gleicher Weise und entsprechend seinen Vorgaben verhalten. Entsprechend können alle Nebenverbraucher mit dem Eintrag „ja“ in der Spalte Kundenakzeptanz nicht gesteuert werden. Lediglich Nebenverbraucher mit dem Eintrag „(ja)“ können innerhalb bestimmter Grenzen gesteuert werden, da der Kunde den Einfluss nicht wahrnehmen kann und keine sicherheitskritischen Situationen aus der Steuerung resultieren können.

Tabelle 3.1 Liste elektrischer Nebenverbraucher und deren Zuordnung (Daten aus [25, 81, 112]).

Nebenverbraucher	<i>mittlere Leistungs- aufnahme in W</i>	<i>sicherheitskritisch</i>	<i>Kundenakzeptanz</i>	<i>Klasse</i>	<i>Einschaltdauer</i>
Autoradio	15 - 30	nein	ja	ri	lang
El. Kühlergebläse	200 - 800	ja	nein	fb	lang
El. Fahrgastraumgebläse	100 - 400	ja	ja	fb	lang
El. Fensterheber	150	nein	ja	ri	kurz
El. Schiebedach	150 - 200	nein	ja	ri	kurz
El. Heizung	3000	ja	ja	fb	lang
El. Sitz-, Spiegel-, Lenksäulenverstellung	je 20 - 150	ja	ja	ri	kurz
El. Tür-, Heckklappenöffner	je 30 - 100	ja	nein	ri	kurz
Energiemanagementsystem	150	ja	ja	ri	kurz
Frontscheibenheizung	250	ja	ja	ri	kurz
Heckscheibenheizung	120 - 200	ja	ja	ri	kurz
Heckscheibenwischer	30 - 65	ja	ja	ri	kurz
Hörner und Fanfaren	je 25 - 40	ja	ja	ri	kurz
Klimakompressor	0 - 6000	(ja)	(ja)	fb	lang
Kühlmittelpumpen	0 - 100	(ja)	(ja)	fb	lang
Kurzzeit Fahrzeugbeleuchtung ^a	je 2 - 60	ja	ja	fu	kurz
Laden Bordnetzbatteie	120	nein	ja	fb	lang
Lenkradheizung	50 - 80	nein	ja	fb	kurz
Langzeit Fahrzeugbeleuchtung ^b	je 2 - 60	ja	ja	fu	lang
Motorantenne	60	nein	ja	ri	kurz
Navigationssystem	15 - 20	nein	ja	ri	lang
Scheiben-/Scheinwerferreinigung	50 - 100	ja	ja	ri	kurz
Scheibenwischer	80 - 150	ja	ja	ri	lang
Servolenkung	800	ja	ja	rv	kurz
Sitzheizung je Sitz	100 - 200	nein	(ja)	fb	lang
Steuergeräte	175 - 200	ja	ja	rv	lang
Vakuumpumpen	200	ja	ja	rv	kurz
Zigarettenanzünder	100	nein	ja	fb	kurz

^a Blink-, Brems-, Deckenleuchte, Rückfahrleuchte, -scheinwerfer, Zusatz-Fernscheinwerfer

^b Begrenzungs-, Kennzeichen-, Park-, Schlussleuchten, Abblend-/Fernlicht, Scheinwerfer, Nebelscheinwerfer

3.4 Mathematische Formulierung

Die Aufgabe des Energiemanagements im Elektrofahrzeug ist die Steuerung der Leistungsflüsse unter Einhaltung aller gestellten Anforderungen einschließlich der Minimierung eines Gütefunktional. Es handelt sich somit um ein Optimierungsproblem, welches mathematisch beschrieben werden kann. Die Wahl der Zustands- und Steuergrößen sowie des erforderlichen Gütefunktional wird im Folgenden vorgestellt.

3.4.1 Wahl der Steuergrößen

Die Steuergrößen des Energiemanagements für das Bordnetz sind alle darin enthaltenen Stellglieder von Quellen, Speichern, Wandlern, Verteilern und Senken [23]. Analog gilt dies für den elektrischen Antriebsstrang, womit für das vorliegende Problem alle Nebenverbraucher prinzipiell Steuergrößen sind. Unter Einhaltung der gestellten Anforderungen dürfen nur die in Abschnitt 3.3 als steuerbar klassifizierten Nebenverbraucher durch das Energiemanagement gesteuert werden. Zusätzlich können die mechanischen Bremsen im Bremsfall eingesetzt werden, um die elektrische Bremsleistung zu reduzieren, was beispielsweise erforderlich wird, wenn nach mehreren Bremsungen die Temperatur der Batterie deutlich angestiegen ist [112] oder bei hohem Ladezustand die Ladeleistung begrenzt ist. Daher wird eine weitere Steuergröße

$$\beta = \frac{P_{\text{br,mech}}}{P_{\text{tr}}} \quad \text{mit} \quad \beta \in [0, 1] \quad (3.1)$$

definiert, welche den relativen Anteil der mechanischen Bremsleistung $P_{\text{br,mech}}$ an der Gesamtbremsleistung P_{tr} festlegt. Die Antriebsleistung stellt keine Steuergröße für die Optimierung dar, da diese entsprechend den Anforderungen nur durch die Bauteilgrenzen begrenzt werden soll.

Der Steuervektor ist somit

$$\mathbf{u} = (u_1, \dots, u_m, \beta)^T \quad (3.2)$$

mit den m Steuergrößen u_i aller steuerbaren Nebenverbraucher¹.

3.4.2 Wahl der Systemzustände

Die Systemzustände ergeben sich grundsätzlich aus allen speichernden Systemkomponenten. Dies ist zum einen der Ladezustand der Batterie ξ als Maß für die gespeicherte chemische Energie. Zum anderen sollten alle thermischen Komponenten i mit den Temperaturen ϑ_i als Maß für die thermische Energie berücksichtigt werden, deren thermische Zeitkonstanten deutlich höher sind als die Zeitkonstante der Fahrdynamik. Hierzu zählen insbesondere die Temperaturen der Batterie ϑ , des Traktionssystems ϑ_{tr} und des Fahrgastraums ϑ_{cab} . Die Geschwindigkeit des Fahrzeugs v als Maß für die kinetische Energie des Fahrzeugaufbaus ist unter Annahme eines fest vorbestimmten Fahrzyklus nur dann relevant, wenn Fahrleistungsbegrenzungen auftreten, da dann die Bremsenergie begrenzt ist. Der Alterungszustand Γ stellt ebenfalls eine speichernde Größe dar und muss daher als Zustand berücksichtigt werden.

Die Anforderung an eine definierte Lebensdauer kann als zur Verfügung stehendes Budget für den betrachteten Zeitabschnitt verstanden werden. Wird dieses Budget immer eingehalten, so wird auch die Lebensdaueranforderung bis zum Lebensdauerende erfüllt. Für den Fahrzyklus gilt somit, dass solange das Budget nicht ausgeschöpft wird, kein Handeln erforderlich ist, andernfalls müssen Gegenmaßnahmen durchgeführt werden. Die Änderung des verfügbaren Lebensdauerbudgets ergibt sich durch die Belastung der Batterie in jedem Zeitpunkt und wird über die Zeit integriert.²

¹ Ein Nebenverbraucher kann prinzipiell mehrere Steuergrößen aufweisen.

² Der Lebensdauereinfluss wird oft im Gütefunktional berücksichtigt [34, 92, 125, 139]. Das resultierende Problem minimiert den gewichteten Lebensdauereinfluss, anstatt die Lebensdauerforderung einzuhalten.

Damit ergibt sich der Zustandsvektor

$$\mathbf{x} = (\xi, \vartheta, \Gamma, v)^T \quad \text{mit} \quad \vartheta = (\vartheta_b, \vartheta_{tr}, \vartheta_{cab}, \dots)^T. \quad (3.3)$$

Der Fall, dass sowohl das Traktionssystem als auch die Batterie kurzzeitige Überlasten zulassen, wird im Rahmen der Optimierung nicht betrachtet. Dies würde zusätzliche Zustände erfordern und damit den Rechenaufwand erhöhen. Demgegenüber steht ein geringer energetischer Vorteil, da diese Situationen selten auftreten, wenn vorausgesetzt wird, dass das Traktionssystem und die Batterie entsprechend dimensioniert sind.

3.4.3 Zustandsgrenzen

Die Zustandsgrenzen ergeben sich aus den Bauteilgrenzen. Für die Batterie ist der Ladezustand durch

$$\xi \in [\xi_{\min}, \xi_{\max}] \quad (3.4)$$

begrenzt.

Die Temperaturen der Komponenten i (z. B. Batterie und Antriebseinheit) müssen die Forderungen

$$\vartheta_i \in [\vartheta_{i,\min}, \vartheta_{i,\max}], \quad i \in \{b, tr, \dots\} \quad (3.5)$$

erfüllen.

Der Alterungszustand Γ wird auf einen Referenzwert Γ_{ref} normiert angegeben. Zu Fahrtbeginn weist dieser das volle Alterungsbudget $\Gamma = 1$ auf. Für $\Gamma = 0$ ist das definierte Alterungsbudget im betrachteten Zeitabschnitt (z. B. Fahrzyklus) erreicht. Es ist prinzipiell möglich, dass eine Belastung der Batterie sich positiv auf den Alterungszustand auswirkt. Unter sehr ungünstigen Umständen, wie z. B. sehr hohen Temperaturen, kann die Lebensdauervoranforderung trotz maximalem Entgegenwirken nicht eingehalten werden. Aus den beiden genannten Gründen werden für den Alterungszustand keine Zustandsgrenzen definiert.

In [34] wird für die Optimierung angenommen, dass die zu erwartende Lebensdauer bis zum Lebensdauerende einen linearen Alterungsverlauf aufweist. In [13] wird festgestellt, dass die Alterung nur abschnittsweise linear approximierbare Zeitabschnitte aufweist. In dieser Arbeit wird daher für die Fahrtdauer, welche sehr kurz gegenüber der Gesamtlebensdauer ist, ein linearer Verlauf angenommen. Durch Anpassung des Referenzwerts Γ_{ref} über die Lebensdauer hinweg kann der nichtlineare Verlauf näherungsweise berücksichtigt werden.

3.4.4 Wahl des Gütefunktional

Für das vorliegende Problem soll die Reichweite maximiert werden, wobei die vom Fahrer geforderte Fahrleistung im Rahmen der Betriebsgrenzen eingehalten werden soll. Gleichzeitig sollen die Lebensduranforderung der Batterie zum Fahrtende t_e und die Komfortanforderung eingehalten werden. Die Abweichung von der geforderten Fahrleistung wird in dieser Arbeit relativ zu geforderten Antriebsleistung $P_{\text{tr,req}}$ mit

$$\alpha = \begin{cases} 1 - \frac{P_{\text{tr}}(t)}{P_{\text{tr,req}}(t)} & | P_{\text{tr,req}}(t) \geq 0 \\ 0 & | P_{\text{tr,req}}(t) < 0 \end{cases} \quad (3.6)$$

angegeben. Dabei wird die Abweichung nur im Antriebsfall betrachtet, da im Bremsfall die mechanischen Bremsen den verbleibenden Leistungsanteil aufnehmen können und die reduzierte elektrische Leistung bereits durch eine Änderung des Ladezustands berücksichtigt wird. Als weitere Anforderung kommt hinzu, dass dem Fahrer eine Antriebsleistung $P_{\text{max,req}}$ innerhalb kürzester Zeit zur Verfügung stehen soll. Dies wird durch den Kostenanteil

$$\Pi = \begin{cases} 1 - \frac{P_{\text{max}}(t)}{P_{\text{max,req}}} & | P_{\text{max}}(t) < P_{\text{max,req}} \\ 0 & | \text{sonst} \end{cases} \quad (3.7)$$

mit dem Gewichtungsfaktor ω_{Π} berücksichtigt³, wobei diese Kosten erst während der Fahrt auftreten, also z. B. nicht in einer Vorkonditionierungs- oder Parkphase. Die eingesetzte elektrische Leistung wird durch die Ladezustandsänderung $\dot{\xi}$ berücksichtigt⁴. Der gewichtete negative Komforteinfluss aus Abschnitt 2.6 wird mit $\omega_{\kappa}\kappa$ berechnet. Dann ergibt sich das zu minimierende Gütefunktional⁵ zu:

$$J(t_e) = h(t_e) + \int_{t_0}^{t_e} \left(-\dot{\xi}(\tau) + \omega_{\alpha}\alpha(\tau) + \omega_{\Pi}\Pi + \omega_{\kappa}\kappa(\tau) \right) d\tau \quad (3.8)$$

mit

$$h(t_e) = \omega_{\Gamma} \frac{(\Gamma(t_e) - a_1)^2}{1 + \exp(a_2 \cdot \Gamma(t_e) + a_3)}. \quad (3.9)$$

Die Funktion h wurde dabei so gewählt, dass eine stetige Funktion vorliegt. Für diese gilt, dass bis $\Gamma \approx 0$ vernachlässigbar kleine Kosten auftreten, da in diesem Fall das Lebensdauerbudget eingehalten wird. Für $\Gamma < 0$ steigen die Kosten deutlich an, um diesen Zustand bestmöglich zu vermeiden. Der Anstieg der Kosten verringert sich für $\Gamma \ll 0$, um bei der späteren numerischen Berechnung mittels Dynamischer Programmierung den Wert g_{nfeas} möglichst klein wählen zu können. Es sei angemerkt, dass für die Dynamische Programmierung auch eine andere Funktion $h(t_e)$ mit der zusätzlichen Bedingung $h(t_e) = 0$ für $\Gamma > 0$ definiert werden kann, um das Lebensdauerbudget exakt einzuhalten.

Es wird gefordert, dass die Fahrleistung möglichst zu keiner Zeit begrenzt ist. Dies wird sichergestellt, indem der Gewichtungsfaktor ω_{α} sehr hoch gewählt wird und damit quasi unabhängig vom erforderlichen Energieaufwand die notwendigen Bedingungen hergestellt werden. Die Gewich-

³ Für eine definierte Zeit, innerhalb der eine Antriebsleistung zur Verfügung stehen soll, kann ein zeitabhängiger Kostenanteil $P_{\text{max,req}}(t)$ eingesetzt werden.

⁴ Alternativ wird in [102] vorgeschlagen, den *state of energy* zu verwenden.

⁵ Wenn regeneratives Bremsen durch ein externes System geregelt wird und sichergestellt ist, dass die Fahrleistung im Rahmen der Betriebsgrenzen eingehalten wird, kann anstelle der Ladezustandsänderung auch nur der Energieumsatz der Nebenverbraucher P_{aux} im Gütefunktional eingesetzt werden.

tungsfaktoren ω_{Γ} , ω_{κ} , ω_{Π} legen fest, wie stark die jeweilige Forderung gegenüber dem erforderlichen Energieaufwand durchgesetzt wird. Damit stellen diese Gewichtungsfaktoren Designparameter dar und müssen vom Fahrzeughersteller definiert werden. Dabei ist denkbar, die Gewichtungsfaktoren abhängig von einem vom Fahrer eingestellten Fahrmodus (z. B. „Sport-Modus“ oder „Eco-Modus“) zu wählen.

Die Auswirkung der Lebensdauer nach Ende des Fahrzyklus wird in dieser Arbeit durch Verlängerung des Fahrzyklus mit der Leistung $P_b = 0$ berücksichtigt. Alternativ kann die Abkühlkurve und die resultierende Alterung ausgehend von der Temperatur am Fahrzyklusende berechnet werden und in die Endkostenfunktion h eingehen.

3.4.5 Zeitdiskretisierung

Die Berechnung auf einem Steuergerät erfolgt digital, sodass eine zeitliche Diskretisierung notwendig ist. Ausgehend von Erfahrungswerten für Energiemanagementstrategien im Bereich der Hybridfahrzeuge, beispielsweise [6, 59, 85], wird eine Diskretisierung von $\Delta t = 1 \text{ s}$ gewählt. Der Wert ist maßgeblich durch die Zeitkonstante der Fahrdynamik bestimmt, da die thermodynamischen Vorgänge deutlich langsamer sind und die sehr schnellen elektrischen Vorgänge für ein Energiemanagement vernachlässigt werden können.

3.5 Auswahl der Optimierungsmethoden

Das Ziel der Optimierung ist die Minimierung eines Gütefunktionalis

$$J = h(\mathbf{x}(t_e), t_e) + \int_{t_0}^{t_e} g(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) dt \quad (3.10)$$

mit dem Anfangszeitpunkt t_0 und dem Endzeitpunkt t_e , welches das Verhalten eines zeitkontinuierlichen und zeitvarianten steuerbaren Prozesses, beschrieben durch ein System gewöhnlicher Differenzialgleichungen

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{w}, t), \quad (3.11)$$

mit den Zustandsgrößen \mathbf{x} , Steuergrößen \mathbf{u} und den Störgrößen \mathbf{w} , unter Berücksichtigung der zeitvarianten Beschränkungen

$$\mathbf{x}(t) \in \mathcal{X}(t) \quad (3.12)$$

$$\mathbf{u}(t) \in \mathcal{U}(t), \quad (3.13)$$

bewertet [41]. Durch die Wahl des Vorzeichens des Gütefunktionalen auch das Maximum bestimmt werden [41]. Die Zeitvariable t muss dabei nicht zwingend der physikalischen Zeit entsprechen, sondern kann auch eine andere Verlaufsgröße oder eine künstliche Größe darstellen. Die Steuergrößen werden als „trägheitslos“ [109] vorausgesetzt und können somit Unstetigkeitsstellen aufweisen. Die Beschränkungen (3.12) und (3.13) werden für praktische Probleme im Allgemeinen durch eine Wertemenge zwischen einem Minimal- und einem Maximalwert beschrieben, prinzipiell sind aber auch beliebige Wertemengen denkbar.

Die Bestimmung des Extremums von (3.10) kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Eine Auswahl an Optimierungsmethoden und deren Eignung für das vorliegende Problem wird im Folgenden betrachtet. Für alle weiteren Betrachtungen sei außerdem angenommen, dass die Existenz einer optimalen Lösung gesichert ist, mit dem gewählten Gütefunktional sich genau eine Lösung ergibt und der Endzeitpunkt t_e bekannt ist. Zudem wird angenommen, dass alle im Regelkreis zurückgeführten Zustandswerte exakt bekannt sind.

3.5.1 Heuristische Verfahren

Eine Möglichkeit der Optimierung ist die Definition eines Regelwerks. Dieses kann auf unterschiedliche Art, z. B. mit Expertenwissen, Fuzzy-Logik oder mit den Ergebnissen einer anderen Optimierungsmethode, bestimmt werden. Der Vorteil einer regelbasierten Strategie ist die einfache Implementierbarkeit und der meist geringe Rechenaufwand. Insbesondere bei einer Vielzahl von Einflussgrößen kann nur schwer sichergestellt werden, dass alle Einflussgrößen korrekt berücksichtigt werden, sodass es sich um eine suboptimale Strategie handelt [76]. Darüber hinaus kann

bei jeder Änderung am zugrunde gelegten System die Bestimmung eines neuen Regelwerks erforderlich werden. Für das Energiemanagement in Hybridfahrzeugen wird beispielsweise in [50] eine Heuristik und in [124] Fuzzy-Logik eingesetzt. In [86] werden die Resultate der Optimierung mittels Dynamischer Programmierung genutzt, um Regeln abzuleiten. Heuristische Verfahren sind mit den hier gestellten Anforderungen an die Methodik hinsichtlich Allgemeinheit und Erweiterbarkeit nicht geeignet und werden nicht weiter verfolgt.

3.5.2 Stochastische Verfahren

Eine weitere Möglichkeit, das Extremum eines Gütefunktionalen zu bestimmen, sind stochastische Verfahren, wie z. B. *simulated annealing* und evolutionäre Algorithmen⁶ [103]. Evolutionäre Algorithmen werden beispielsweise in [23] für das Bordnetz in Kraftfahrzeugen und simuliertes Ausglühen in [152] für ein Hybridfahrzeug betrachtet. Durch den Einsatz von Zufallsvariablen wird nach dem globalen Extremum gesucht. Dabei wird ein iterativer Algorithmus bis zum Erreichen eines Abbruchkriteriums angewendet, wodurch das Verfahren bei einem ergebnisbasierten Abbruchkriterium nicht echtzeitfähig ist. Für die Optimierung im Fahrbetrieb scheiden stochastische Verfahren daher grundsätzlich aus. Dagegen ist der Einsatz für die Optimierung im Entwicklungsprozess prinzipiell denkbar, wenn eine großen Anzahl von Einflussgrößen gleichzeitig betrachtet wird und andere Verfahren aufgrund von begrenztem Arbeitsspeicher nicht anwendbar sind. Die Dauer für die Bestimmung der Lösung ist nicht-deterministisch und ein Abbruchkriterium ist erforderlich [23]. Aus diesen Gründen werden die genannten stochastischen Verfahren in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

3.5.3 Gradientenverfahren

Die Gradientenverfahren bestimmen iterativ durch die Berechnung eines Gradienten das Extremum einer Funktion, bis ein Abbruchkriterium

⁶ auch genetische Algorithmen genannt

erreicht ist [103]. Angewendet wird es beispielsweise in [61]. Dabei konvergiert das Verfahren gegen ein lokales Extremum. Nur für konvexe Probleme ist die Konvergenz gegen das globale Extremum gesichert [103]. Für das vorliegende Problem sollen beliebige Modellgleichungen zulässig sein, sodass keine gesicherte Konvergenz zum globalen Extremum vorliegt. Damit muss für jede Änderung der Modellgleichungen und -parameter geprüft werden, ob das Verfahren für alle denkbaren Situationen konvergiert. Zudem ist die Dauer zur Bestimmung der Lösung aufgrund der iterativen Berechnung nicht-deterministisch und somit nicht gesichert echtzeitfähig. Aus den genannten Gründen werden in dieser Arbeit Gradientenverfahren nicht weiter betrachtet.

3.5.4 Dynamische Programmierung

Die Dynamische Programmierung ist ein weiteres Verfahren zur Optimierung. Es geht im Wesentlichen auf die Arbeit [14] zurück, in der BELLMAN das Optimalitätsprinzip formulierte [41]:

„Die Gesamtstrategie kann nur dann optimal sein, wenn jede Reststrategie optimal ist, ganz gleich, von welchem Zwischenzustand sie ausgeht.“

Dieses Prinzip lässt sich anwenden, wenn ein mehrstufiges Problem vorliegt. Bei einem einstufigen Problem, also ein solches, bei dem alle Entscheidungen gleichzeitig getroffen werden, muss zunächst durch eine geeignete Transformation ein mehrstufiges Problem gefunden werden. Das Optimalitätsprinzip reduziert den Rechenaufwand des mehrstufigen Problems deutlich gegenüber der Untersuchung aller Möglichkeiten [41]. Mathematisch formuliert führt das Optimalitätsprinzip für ein zeitdiskretes System

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{f}_k(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, \mathbf{w}_k) \quad (3.14)$$

mit den zeitvarianten Zustands- und Steuergrenzen

$$\mathbf{x}_k \in \mathcal{X}_k \quad (3.15)$$

$$\mathbf{u}_k \in \mathcal{U}_k \quad (3.16)$$

und dem zeitdiskreten Gütefunktional

$$J(\mathbf{x}_0) = h(\mathbf{x}_N) + \sum_{k=0}^{N-1} g_k(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, \mathbf{w}_k) \quad (3.17)$$

auf die Rekursionsgleichungen

$$J_N(\mathbf{x}_N) = h(\mathbf{x}_N) \quad (3.18)$$

$$J_k(\mathbf{x}_k) = \min_{\mathbf{u}_k \in \mathcal{U}_k} \{g_k(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, \mathbf{w}_k) + J_{k+1}(f_k(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, \mathbf{w}_k))\} \quad (3.19)$$

mit deren Hilfe ein globales Optimum $J^o(\mathbf{x}_0)$ für beliebige nichtlineare Zustandsgleichungen \mathbf{f}_k bei bekannten Störgrößen \mathbf{w}_k und fester Schrittzahl N gefunden werden kann [15, 41, 103, 123]. Aus (3.19) ergibt sich gleichzeitig die zugehörige optimale Steuerungsstrategie $\pi^o = \{\mathbf{u}_0, \mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_{N-1}\}$. Die Anwendung auf ein Problem mit kontinuierlichen Größen führt auf die Hamilton-Jacobi-Bellman-Gleichung, eine nichtlineare partielle Differenzialgleichung, für die im Allgemeinen keine geschlossene Lösung bestimmt werden kann [15, 103]. Aus diesem Grund werden die Rekursionsgleichungen (3.19) numerisch mittels eines Digitalrechners gelöst, indem die Zustands- und Steuergrößen begrenzt⁷ und quantisiert werden [15, 103]. Entsprechend (3.19) startet die Rechnung beim letzten Schritt und wird durch Rückwärtsrechnung ausgeführt. Zu jedem Zustandswert werden der zugehörige optimale Steuerwert und die zugehörigen Kosten der Resttrajektorie tabellarisch in einer Kostenmatrix gespeichert. Nach dem Erreichen des ersten Schrittes wird durch Vorwärtsrechnung die optimale Steuertrajektorie für einen gegebenen Anfangswert mittels der Kostenmatrix bestimmt [6, 96]. Die Zustände \mathbf{x}_k und die Stufen k können als beliebige Größen definiert werden und müssen somit nicht zwin-

⁷ Im Allgemeinen sind die Zustands- und Steuergrößen durch das Problem bereits begrenzt.

gend reale Zustände des Systems beschreiben. Dies ermöglicht, beliebige wertdiskrete Probleme zu lösen, die keinen zeitlichen Verlauf beschreiben [96]. Der entscheidende Vorteil der Dynamischen Programmierung ist die gesicherte Bestimmung eines⁸ globalen Optimums des zeit- und wertdiskreten Problems unter Berücksichtigung beliebiger zeitvarianter Zustandsgrößen- und Steuergrößenbeschränkungen [6, 15, 41, 103]. Ein wesentlicher Nachteil ist der erforderliche Rechenaufwand, wenn das Problem nur numerisch gelöst werden kann [15, 50]. Dieser steigt linear mit der Schrittzahl N und exponentiell mit der Ordnung des Systems [41]. Daher ist die Anwendung der Dynamischen Programmierung im Allgemeinen auf Probleme mit einer geringen Anzahl an Zuständen begrenzt [41, 103]. Bei der Berechnung können sich Zustandswerte ergeben, die nicht auf dem diskreten Punktgitter liegen. In diesem Fall kann näherungsweise durch Interpolation (z. B. lineare Interpolation) der zugehörige Wert des Gütefunktional zwischen benachbarten Zustandspunkten bestimmt werden [103]. Der zugehörige Steuerwert eines Zustandswertes der optimalen Lösung kann auf einen Zustandswert führen, der nicht auf dem Punktgitter liegt, sodass auch hier eine Interpolation zur Bestimmung des Steuerwertes notwendig ist [103]. Darüber hinaus können sich Zustandswerte außerhalb der zulässigen Zustandsgrenzen ergeben. Mathematisch werden diese mit unendlichen Kosten belegt und sind damit nicht erreichbar. Da diese Kosten bei der Interpolation nicht berücksichtigt werden können, wird anstelle unendlicher Kosten ein hoher Wert $g_{\text{nfeas}} \ll \infty$ gesetzt oder die Zustandsgrenzen zwischen erreichbarem und nicht-erreichbarem Bereich bestimmt [50]. Für die Endbedingung muss sichergestellt werden, dass der geforderte Endzustand auch nach der Diskretisierung erreicht werden kann, beispielsweise durch die Definition eines Toleranzbandes [103]. Die Genauigkeit der Lösung wird durch die Diskretisierung bestimmt; dabei ist der erforderliche Rechenaufwand zu beachten. Die Implementierung des Algorithmus (3.19) wird in [136] beschrieben und in dieser Arbeit erweitert auf eine beliebige Anzahl von Zuständen pro Schritt eingesetzt.

⁸ Existieren mehrere Optima, so wird nur ein Optimum davon bestimmt.

Durch die Prädiktion des Störgrößenverlaufs und die Rückkopplung der Zustandsgrößen lässt sich eine nichtlineare modellprädiktive Regelung realisieren, deren erster Schritt als Stellgröße dient [6]. Damit verbunden ist für viele Optimierungsprobleme ein hoher Rechenaufwand, wodurch der Einsatz im realen System schwer realisierbar ist. Die Dynamische Programmierung ist somit insbesondere für die Optimierung im Entwicklungsprozess von Interesse.

3.5.4.1 Stochastische Dynamische Programmierung

Die zuvor vorgestellte Methode der Dynamischen Programmierung (Abschnitt 3.5.4) setzt voraus, dass der zukünftige Verlauf der Störgröße \mathbf{w} bekannt ist, was im Allgemeinen nicht gegeben ist. Ein möglicher Lösungsansatz für die Betrachtung des diskreten Optimierungsproblems ist dann, die als bekannt vorausgesetzte diskrete Wahrscheinlichkeitsverteilung der Störgröße

$$\mathcal{P}(\mathbf{w} \mid \mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, k) \quad (3.20)$$

mittels Stochastischer Dynamischer Programmierung (SDP) zu berücksichtigen [15, 103]. Dabei wird der Erwartungswert des Gütefunktional

$$J = \mathbb{E} \left\{ h(\mathbf{x}_N, N) + \sum_{k=0}^{N-1} g(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, \mathbf{w}_k, k) \right\} \quad (3.21)$$

minimiert und ergibt die im Mittel optimale Steuerungspolitik

$$\pi = \{\boldsymbol{\mu}_0, \dots, \boldsymbol{\mu}_{N-1}\} \quad (3.22)$$

mit dem optimalen zeitvarianten Regelungsgesetz

$$\mathbf{u}_k = \boldsymbol{\mu}(\mathbf{x}_k, k), \quad (3.23)$$

welches im Zeitschritt k , abhängig vom tatsächlich eingetretenen Zustandsvektor \mathbf{x}_k , den Steuervektor \mathbf{u}_k wählt. Damit reduziert sich die Implemen-

tierung im Fahrzeug auf die Interpolation von Werten basierend auf einer Wertetabelle, sodass man davon ausgehen kann, dass die Rechenzeitanforderung im Fahrbetrieb erfüllt wird.

Sind alle auftretenden Zustandsübergänge durch die Übergangswahrscheinlichkeit $\mathcal{P} = 1$ gegeben, so geht die Stochastische Dynamische Programmierung in die deterministische Dynamische Programmierung aus Abschnitt 3.5.4 über [15].

Das zeitvariante Problem mit endlichem Horizont stellt eine Verallgemeinerung des deterministischen Falls aus (3.19) dar. Dabei wird in jedem Zeitschritt der Erwartungswert des Gütefunktionalen minimiert:

$$J_N(\mathbf{x}_N) = h(\mathbf{x}_N) \quad (3.24)$$

$$J_k(\mathbf{x}_k) = \min_{u_k \in \mathcal{U}_k} \{E \{g_k(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, \mathbf{w}_k) + J_{k+1}(f_k(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, \mathbf{w}_k))\}\}. \quad (3.25)$$

Für ein diskretes Problem ergibt sich der Erwartungswert aus der Summe über alle m Folgezustände $\mathbf{x}_{k+1} = j$ gewichtet mit der bedingten Übergangswahrscheinlichkeit vom Zustand $\mathbf{x}_k = i$ zum Zustand $\mathbf{x}_{k+1} = j$:

$$J_k(\mathbf{x}_k) = \min_{u_k \in \mathcal{U}_k} \left\{ g_k(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) \right. \quad (3.26)$$

$$\left. + \sum_{j=1}^m \mathcal{P}(\mathbf{x}_{k+1} = j \mid \mathbf{x}_k = i, \mathbf{u}) J_{k+1}(\mathbf{x}_{k+1} = j) \right\}. \quad (3.27)$$

In jedem Zeitschritt wird der Erwartungswert über alle Zufallsgrößen mit n_i diskreten Werten gebildet. Damit erhöht sich der Rechenaufwand um den Faktor $\prod_i n_i$ [103]. Da die Berechnung im Entwicklungsprozess erfolgt, stellt dies keine grundsätzliche Einschränkung für den Einsatz im Fahrbetrieb dar.

3.5.5 Maximumprinzip von Pontrjagin

Das Maximumprinzip⁹ von Pontrjagin wird in [109] beschrieben. Darin weist PONTRJAGIN nach, dass für ein dynamisches System

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) \quad (3.28)$$

beschränkt durch

$$\mathbf{u} \in \mathcal{U} \quad (3.29)$$

mit dem Gütefunktional

$$J = h(\mathbf{x}_e, t_e) + \int_{t_0}^{t_e} g(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) dt \quad (3.30)$$

die nachfolgend beschriebenen notwendigen Bedingungen für die optimale Steuerstrategie $\mathbf{u}^o(t)$ gelten müssen, die das Gütefunktional (3.30) minimieren. Hierfür wird der Kozustandsvektor $\boldsymbol{\psi}$ eingeführt und die Hamilton-Funktion

$$\mathcal{H}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \boldsymbol{\psi}, t) = -g(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) + \boldsymbol{\psi}^T(t) \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) \quad (3.31)$$

definiert. Es müssen die Zustandsgleichungen

$$\dot{\mathbf{x}} = \nabla_{\boldsymbol{\psi}} \mathcal{H} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) \quad (3.32)$$

und die Kozustandsdifferenzialgleichungen¹⁰

$$\dot{\boldsymbol{\psi}} = -\nabla_{\mathbf{x}} \mathcal{H} \quad (3.33)$$

erfüllt sein. Für die Koppelgleichung muss

$$\mathcal{H} = \max_{\mathbf{u} \in \mathcal{U}} \mathcal{H}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \boldsymbol{\psi}, t) \quad (3.34)$$

⁹ für ein äquivalentes Minimierungsproblem: Minimumprinzip [103]

¹⁰ auch: adjungierte Differenzialgleichungen

gelten. Die Randbedingungen mit fester Endzeit t_e und freiem Endzustand \mathbf{x}_e sind für den Zustandsvektor durch die Transversalitätsbedingungen gegeben¹¹

$$\psi_e = \nabla_{\mathbf{x}} h|_{t_e} \quad (3.35)$$

und die Anfangsbedingung

$$\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0 \quad (3.36)$$

für den Zustandsvektor [15, 41, 109]. Die Lagrange-Multiplikatoren ψ werden im Kontext der Optimierung als Kozustände¹² bezeichnet und müssen stetig sein [41]. Eine Erweiterung zur Berücksichtigung von Zustandsgrenzen wird in Abschnitt 5.3.1 diskutiert. Die Schwierigkeit besteht zumeist darin, das sich ergebende differenzial-algebraische Gleichungssystem analytisch zu lösen. Ein Teilstück der optimalen Lösung kann unabhängig von den Steuergrößen werden. Dieser Fall tritt in dieser Arbeit nicht auf, daher sei für weitere Details dazu auf [41] verwiesen.

Lässt sich eine geschlossene analytische Lösung für das differenzial-algebraische Gleichungssystem ((3.32), (3.33), (3.34)) finden, so liegen modellbasierte analytische Gleichungen vor, die sich einfach implementieren lassen, einen geringen Rechenaufwand aufweisen und hinsichtlich der Parameter skaliert werden können. Im Allgemeinen kann nur für einfache Probleme eine geschlossene analytische Lösung gefunden werden [41] und muss mit hohem Rechenaufwand numerisch gelöst werden. Durch vereinfachende Annahmen kann das Problem in der Weise reduziert werden, dass eine (stückweise) analytische Lösung bestimmt werden kann. Dabei gilt zu beachten, dass geprüft werden muss, ob die Abweichung der Lösung des reduzierten Problems von der Lösung des vollständigen Problems für die vorliegende Anwendung tolerierbar ist.

¹¹ Für den in dieser Arbeit nicht auftretenden Fall einer freien Endzeit t_e und eines festen oder beschränkten Endzustands \mathbf{x}_e wird auf [41] verwiesen.

¹² auch: adjungierte Variablen [103]

Der benötigte Anfangswertvektor der Kozustände hängt vom Verlauf der Störgrößen ab und wird daher mittels eines Schätzverfahrens bestimmt. Ein solches Verfahren wird beispielsweise für Hybridfahrzeuge mit Verbrennungsmotor in [2, 135] beschrieben.

Aufgrund der zu erwartenden einfachen Implementierung und der Möglichkeit, Informationen wie Routenplanung und Fahrertyp über die Anfangskozustände zu berücksichtigen, wird das Maximumprinzips von Pontrjagin insbesondere für den Einsatz im Fahrbetrieb genauer untersucht.

4 Optimierung im Entwicklungsprozess

Die Optimierung im Entwicklungsprozess ermöglicht es, die Vielzahl an Einflüssen zuverlässig zu berücksichtigen und damit beim Entwickler ein Verständnis zu generieren, wie eine Strategie im Fahrbetrieb grundsätzlich arbeiten sollte. Darüber hinaus dient die Offline-Optimierung als Referenz zur Bewertung des maximalen Optimierungspotenzials möglicher Strategien für den Fahrbetrieb. Dafür wird ein Fahrzyklus – meist ein herstellerspezifischer – vorgegeben. Die Rechen- und Speicherkapazität des Steuergerätes werden zunächst nicht berücksichtigt. Die Rechendauer der Optimierung wird durch die Anforderung an eine möglichst kurze Zeit zur Entwicklung des Fahrzeugs bis zur Serienproduktion begrenzt, sodass ein Kompromiss zwischen der Genauigkeit der Lösung und der Rechendauer getroffen wird. In diesem Kapitel wird das in Abschnitt 3.4 definierte Problem in zwei Teilprobleme unterteilt: ein fahrverlaufsabhängiges Problem und die Komponentensteuerung. Die beiden Teilprobleme werden mithilfe der Dynamischen Programmierung gelöst. Das Ziel ist, aufzuzeigen, welche qualitativen Schlussfolgerungen unabhängig von konkreten Systemparametern gezogen werden können. Der Fokus bei den weiteren Betrachtungen des fahrverlaufsabhängigen Problems liegt auf der Batterie als wesentliche Komponente des Elektrofahrzeugs. Die Vorgehensweise zur methodischen Erweiterung auf den Komfort und die Antriebseinheit wird an einem Beispiel in Abschnitt 4.2.2 erläutert. Die Komponentensteuerung zur optimierten Erzeugung der thermischen Leistungen wird anschließend in Abschnitt 4.3 ausführlich erläutert.

4.1 Entkopplung in Teilprobleme

Eine hohe Anzahl an Steuer- und Zustandsgrößen führt zu einem sehr komplexen Problem, das sich im Allgemeinen nur mit hohem Rechenaufwand lösen lässt. Daraus resultiert eine lange Entwicklungszeit, sodass es erforderlich ist, die Zahl an Steuer- und Zustandsgrößen zu reduzieren und, soweit möglich, voneinander zu entkoppeln. Eine Möglichkeit der Entkopplung ergibt sich aus der Betrachtung der einzelnen Energiespeicher. Die Batterie, das Traktionssystem und der Fahrgastraum stellen sehr große Energiespeicher dar¹, sodass der zeitliche Verlauf der zugehörigen Zustandsgrößen über den Fahrverlauf hinweg Auswirkung auf die optimale Strategie hat. Die optimale Erzeugung der erforderlichen thermischen Leistungen ist dagegen nur in sehr kurzen Zeitabschnitten relevant, da die gespeicherten Energien (z. B. Rotationsenergie des Kompressors) gering sind. Somit kann dieses Problem näherungsweise als entkoppelt vom Fahrverlauf betrachtet und damit separat optimiert werden. Damit ergeben sich die beiden Teilprobleme des fahrverlaufsabhängigen Problems und der optimalen Erzeugung thermischer Leistung. Diese werden jeweils in Abschnitt 4.2 und Abschnitt 4.3 formuliert und unabhängig voneinander untersucht.

4.2 Fahrverlaufsabhängiges Optimierungsproblem

Durch die Entkopplung des fahrverlaufsabhängigen Problems von der Erzeugung der thermischen Leistung können anstelle der einzelnen Steuergrößen für jeden Nebenverbraucher u_i die thermischen Leistungen an den jeweiligen Komponenten betrachtet werden. Im Folgenden sei zur

¹ Die thermische Kapazität des Kühlmittels in jedem Kühlkreislauf ist gegenüber den durchflossenen Komponenten (Batterie, Traktionssystem, ...) deutlich geringer und soll daher vernachlässigt werden.

besseren Lesbarkeit $\vartheta = \vartheta_b$. Damit ergeben sich für die Betrachtung der Batterie die Zustandsgrößen

$$\mathbf{x} = (\xi, \vartheta, v, \Gamma)^T \quad (4.1)$$

mit dem Ladezustand der Traktionsbatterie ξ , der Temperatur der Batterie ϑ , der Fahrzeuggeschwindigkeit v und dem Alterungszustand der Batterie Γ . Die resultierenden Steuergrößen sind

$$\mathbf{u} = (\phi, \beta)^T \quad (4.2)$$

mit der zum Kühlen bzw. Heizen generierten thermischen Leistung ϕ an der Batterie und dem mechanischen Bremsanteil β .

Das dynamische Verhalten der Zustände wird basierend auf Kapitel 2 mit (2.8), (2.11), (2.12) und (2.18) durch die Zustandsgleichungen

$$\dot{\xi} = -\frac{I_b}{Q_0} \quad (4.3a)$$

$$\dot{\vartheta} = \frac{1}{C_{th,b}} \left(I_b^2 R + \phi + \phi_{ext} \right) \quad (4.3b)$$

$$\dot{\Gamma} = -\frac{\lambda}{\Gamma_{ref}} \quad (4.3c)$$

$$\dot{v} = \frac{\eta_{tr} P_{tr} - P_{res}}{mv} \quad (4.3d)$$

mit

$$I_b = \frac{U_{oc} - \sqrt{U_{oc}^2 - 4R(P_{tr} + P_{aux})}}{2R} \quad (4.4)$$

$$\phi_{ext} = G_{b,fl} (\vartheta - \vartheta_{fl}) + G_{b,amb} (\vartheta - \vartheta_{amb}) \quad (4.5)$$

und den Anfangswerten

$$\mathbf{x}_0 = (\xi_0, \vartheta_0, v_0, \Gamma_0)^T \quad \text{mit} \quad v_0 = 0, \Gamma_0 = 1 \quad (4.6)$$

beschrieben. Die Berücksichtigung des aktuellen Ladungsdurchsatzes Q_{As} würde einen zusätzlichen Zustand und damit einen deutlich höheren Rechenaufwand erfordern. Demgegenüber steht, dass der Ladungsdurchsatz Q_{As} in einem Fahrzyklus deutlich kleiner als der bisherige Ladungsdurchsatz $Q_{As,0}$ ist, daher wird vereinfachend $Q_{As} = 0$ angenommen. Mit $P_{aux} = p(\phi, \vartheta_{amb})$ wird die elektrische Leistung der Nebenverbraucher zur Generierung der thermischen Leistungen ϕ berechnet. Die Funktion p stellt dabei eine Näherung dar, da die Temperaturen der Medien in den Kühlkreisläufen und die aktuellen Zustände der Nebenverbraucher (z. B. Drehzahl des Kompressors) Einfluss auf die elektrische Leistung P_{aux} haben. Das Gütefunktional ist gegeben durch (3.8). Ein mehrstufiger Entscheidungsprozess ist implizit durch die zeitdiskreten Zeitschritte gegeben, sodass die Methode der Dynamischen Programmierung direkt angewendet werden kann.²

4.2.1 Analyse der Optimierungsergebnisse

Es wurden für den gegebenen Fahrzeugaufbau mehrere Szenarien mit den jeweils maßgeblichen Parametersätzen (Fahrzyklus, Anfangstemperatur ϑ_0 , Anfangsladezustand ξ_0) betrachtet; alle Parameter sind in Anhang A aufgelistet. Aus der Optimierung des beschriebenen Problems mittels Dynamischer Programmierung (DP) resultieren die nachfolgend beschriebenen Schlussfolgerungen. Zum Vergleich wird für einzelne Szenarien die Strategie $\mathbf{u}_{off} = (\phi \equiv 0, \beta(I_{b,min}))$ dargestellt, die angibt, dass keine thermische Leistung aufgewendet wird und β lediglich zur Einhaltung der Ladeleistungsgrenze eingestellt wird. Zunächst wird der Lebensdauereinfluss zur Erläuterung der einzelnen Einflüsse vernachlässigt ($\omega_\Gamma = 0$). In Abschnitt 4.2.1.3 wird dann der Lebensdauereinfluss in die Optimierung einbezogen. Am Beispiel des Komforts wird in Abschnitt 4.2.2 abschließend dargestellt, wie eine Erweiterung des Optimierungsproblems

² Prinzipiell kann für die Offline-Optimierung auch das Maximumprinzip von Pontrjagin eingesetzt werden. Der Vorteil der Dynamischen Programmierung liegt in der impliziten Berücksichtigung von Zustandsgrenzen und der deterministischen Zeitdauer zur Berechnung der global optimalen Lösung.

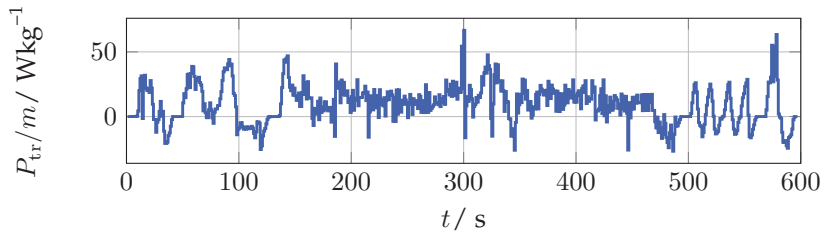
auf weitere Komponenten erfolgen kann. Für alle Ergebnisse gilt gleichermaßen, dass für die Optimierung angenommen ist, dass die berechneten Sollwerte der thermischen Leistungen direkt umgesetzt werden. Dadurch ergibt sich durch die hohe Dynamik der Fahrleistung auch eine hohe Dynamik der Steuergrößen. Die Fahrleistungen P_{tr} der betrachteten Fahrzyklen bezogen auf die Fahrzeugmasse m sind in Abb. 4.1 gezeigt.

4.2.1.1 Vorausschauendes Heizen

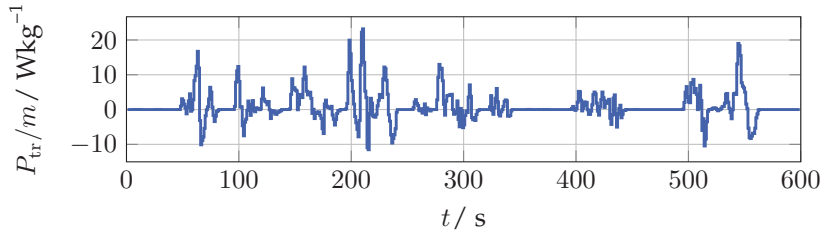
Für verschiedene Fahrzyklen hat sich gezeigt, dass bei einer ausschließlich energetischen Optimierung ($\omega_I = 0, \omega_{II} = 0$), wenn keine Fahrleistungsbegrenzungen $\alpha > 0$ auftreten, unabhängig von der Anfangstemperatur weder geheizt noch gekühlt wird. Daraus kann geschlossen werden, dass ein aktives Heizen zum Absenken des Innenwiderstands für die gegebenen Fahrzeugparameter kein Optimierungspotenzial bietet.

4.2.1.2 Fahrleistungsbegrenzungen

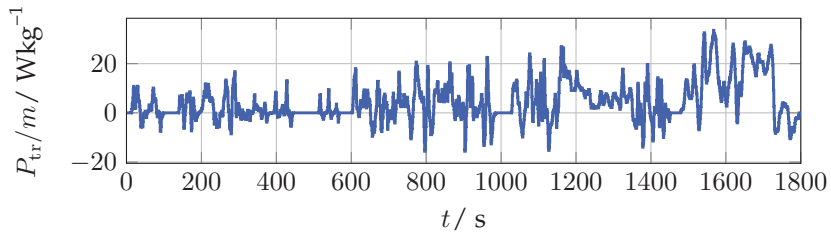
Heizen zur Vermeidung von Fahrleistungsbegrenzungen Bei sehr niedrigen und sehr hohen Temperaturen kommt es zu einer Begrenzung der Fahrleistung durch die Batterie, da diese sonst geschädigt wird. Die Fahrleistungsbegrenzung soll entsprechend den Anforderungen aus Abschnitt 3.1.1 unabhängig vom erforderlichen Energieaufwand vermieden werden. Dies wird durch einen hohen Gewichtungsfaktor ω_α sichergestellt, die Lebensdauernforderung sei mit $\omega_I = 0$ zunächst vernachlässigt. Das Optimierungsergebnis einer solchen Situation für den Fahrzyklus SFTP-US06 (*Supplemental Federal Test Procedure US06*) bei $\vartheta_0 = 0^\circ\text{C}$ ist in Abb. 4.2 dargestellt. Daraus geht hervor, dass geheizt werden muss, um eine Fahrleistungsbegrenzung bei $t = 300\text{ s}$ zu verhindern. Die optimierte Strategie führt dabei auf ein geringeres Gütemaß, verglichen mit der Strategie für eine definierte Dauer ab Fahrtbeginn zu heizen bzw. bis zu einer Schwellwerttemperatur zu heizen. Aufgrund des komplexen Zusammenspiels zwischen Ladezustand, Temperatur, Innenwiderstand und Stromstärke lässt sich dabei keine einfache Heuristik hinsichtlich der optimalen Zeitpunkte zum Heizen formulieren. Zum Vergleich ist das



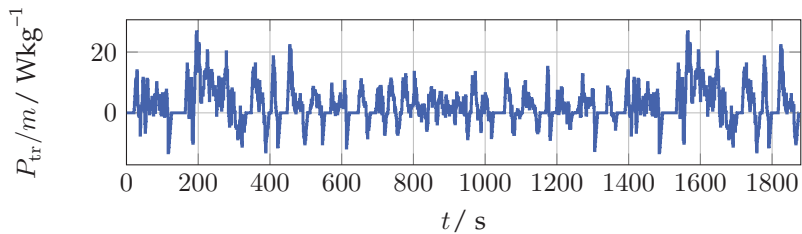
(a) SFTP-US06



(b) NYCC



(c) WLTP/C3



(d) FTP75

Abbildung 4.1 Normierte Fahrleistungen der Fahrzyklen.

Zum Vergleich ist das Resultat ohne Einsatz von thermischer Leistung \mathbf{u}_{off} dargestellt, bei dem es zu Begrenzungen in der Fahrleistung kommt ($\alpha > 0$).

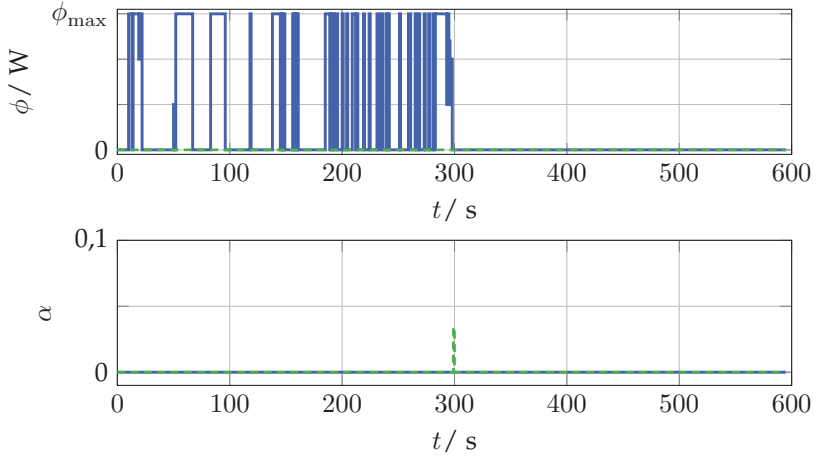


Abbildung 4.2 Heizen zur Vermeidung von Fahrleistungsbegrenzungen mit Reduktion der Heizleistung bei auftretender Fahrleistungsbegrenzung ($\omega_T = 0$, Fahrzyklus: SFTP-US06, $\xi_0 = 0,8$; $\vartheta_0 = 0^\circ\text{C}$; — : DP, - - : \mathbf{u}_{off}).

Das gleiche Szenario mit $\vartheta_0 = -11^\circ\text{C}$ zeigt in Abb. 4.3, dass bei hohen Fahrleistungen begrenzt werden muss und somit $\alpha > 0$ auftritt. Zusätzliches Heizen zu diesem Zeitpunkt würde ein weiteres Absenken der Fahrleistung erfordern und damit zu einer stärkeren Fahrleistungsbegrenzung α mit höheren Kosten führen. Aus diesem Grund wird in den Situationen begrenzter Fahrleistung (z. B. $t = 91\text{ s}$) die Heizleistung reduziert. Anschließend wird weiter geheizt, um die sonst auftretende Fahrleistungsbegrenzung bei $t = 300\text{ s}$ und $t = 577\text{ s}$ zu verhindern. Da in diesem Szenario keine Alterung berücksichtigt wird, folgt, dass ausschließlich zur Vermeidung der Fahrleistungsgrenzen geheizt wird. Entsprechend wird nach Erreichen der letztmöglichen Fahrleistungsbegrenzung bis zum Ende des Fahrzyklus nicht weiter geheizt. Ein analoges Ergebnis ergibt sich bei hohen Temperaturen, wenn gekühlt werden muss.

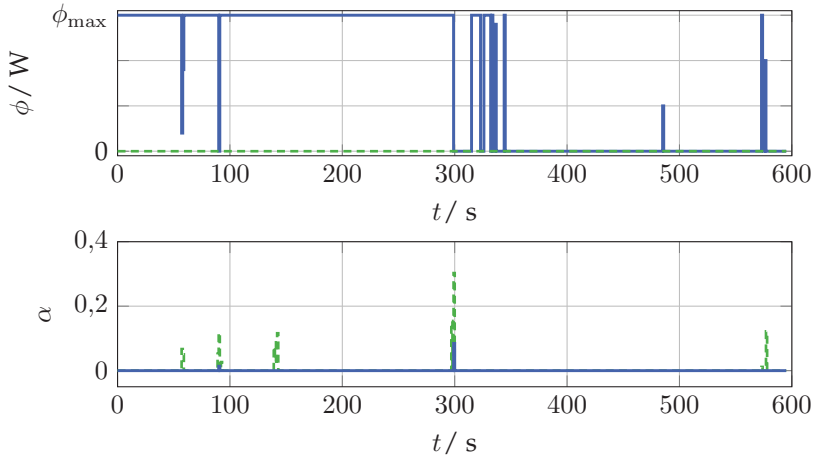


Abbildung 4.3 Heizen zur Vermeidung von Fahrleistungsbegrenzungen mit Reduktion der Heizleistung bei auftretender Fahrleistungsbegrenzung ($\omega_{\Gamma} = 0$, Fahrzyklus: SFTP-US06, $\xi_0 = 0,8$; $\vartheta_0 = -11^{\circ}\text{C}$; —: DP, - - - : u_{off}).

Heizen zur Erhöhung der rekuperierbaren Leistung Die maximale Ladeleistung ist bei sehr niedrigen Temperaturen stark begrenzt. Durch die Erhöhung der Batterietemperatur kann die Ladeleistung erhöht werden. Das Optimierungsergebnis und das Resultat für u_{off} für einen solchen Fall sind in Abb. 4.4 zusammen dargestellt. Dabei wurde der NYCC (*New York City Cycle*) verwendet, da für diesen keine Fahrleistungsbegrenzung $\alpha > 0$ auftritt. Die Ladeleistung muss bei der niedrigen Temperatur begrenzt werden, indem $\beta > 0$ gewählt wird. Zur Erhöhung der Ladeleistung wird in Phasen begrenzter Ladeleistung geheizt und damit β im aktuellen Zeitpunkt reduziert, sodass im weiteren Verlauf (geringfügig) mehr Bremsenergie rekuperiert werden kann. In Antriebsphasen wird nicht geheizt, da der erforderliche Energieaufwand für eine Temperatur- und damit Ladeleistungserhöhung die zusätzliche Bremsenergie im weiteren Fahrverlauf übersteigt. Erst für eine Batterie mit steileren Ladeleistungskurven oder deutlich geringerer thermischer Kapazität würde sich Heizen in Antriebsphasen positiv auswirken.

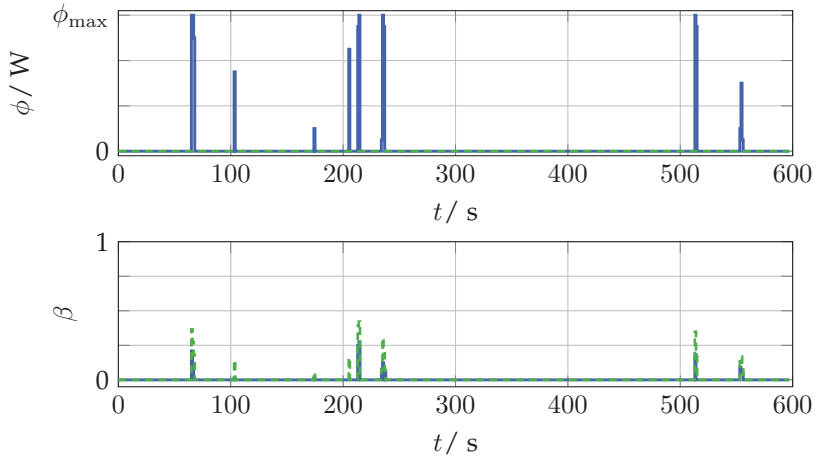


Abbildung 4.4 Heizen zur Erhöhung der rekuperierbaren Leistung. Nutzung von Phasen bei begrenzter Ladeleistung ($\omega_r = 0$, Fahrzyklus: NYCC, $\vartheta_0 = -12^\circ\text{C}$, $\xi_0 = 0,8$, —: DP, - - - : u_{off}).

Für die bereits gezeigten und nachfolgenden Ergebnisse müssen mehr Aspekte bei deren Bewertung beachtet werden. Grundsätzlich gilt, dass die numerische Dynamische Programmierung immer nur die optimale Lösung des quantisierten und zeitdiskretisierten Problems liefert. Damit gilt, dass sich theoretisch eine bessere Lösung finden lässt. Dies kann durch eine feinere Quantisierung der Zustände, kürze Zeitschritte oder die Berücksichtigung von mehr Steuerwerten erreicht werden.

Ein weiterer Aspekt ist, dass in jedem Zeitpunkt der Steuerwert aus der gesamten Wertemenge an zulässigen Steuerwerten gewählt wird. Damit ergibt sich mit einem sehr dynamischen Fahrzyklus auch ein sehr dynamisches Verhalten der Steuergrößen. Soll dies vermieden werden, so muss die Problemformulierung um einen zusätzlichen Zustand und Kostenanteil erweitert werden. Der Zustand gibt dabei den Steuerwert im Vorgängerschritt an. Durch den zusätzlichen Kostenanteil werden starke Änderungen der Steuergrößen berücksichtigt.

Die Quantisierung der Steuergrößen hat einen wesentlichen Einfluss auf das Gütemaß, da aufgrund des Rechenaufwands meist nur ein Teil der

tatsächlich zulässigen Wertemenge an Steuergrößen berücksichtigt wird. Insbesondere die Steuergröße β kann einen erheblichen Einfluss haben, wenn die elektrischen Bremsleistungen im Fahrzyklus sehr hoch sind. Eine grobe Quantisierung kann dazu führen, dass die elektrische Bremsleistung stärker begrenzt wird, als wenn dies nur durch Betriebsgrenzen erfolgt, so dass weniger Leistung rekuperiert wird. Daher gilt zu beachten, dass die Optimierung ohne Berücksichtigung von β zu einer besseren Lösung gegenüber der Lösung mit einer groben Quantisierung führen kann.

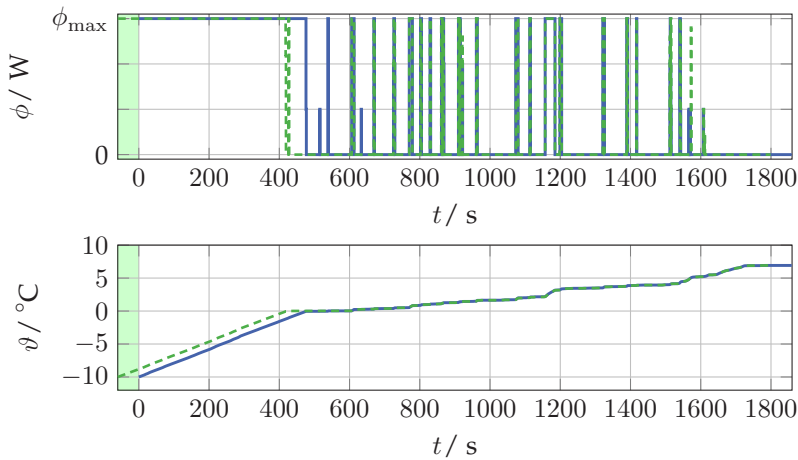


Abbildung 4.5 Heizen zur Gewährleistung einer minimal verfügbaren Antriebsleistung ($\omega_{\Gamma} = 0$, Fahrzyklus: WLTP/C3, $\vartheta_0 = -10^\circ\text{C}$, $\xi_0 = 0,8$), : Vorheizphase, —: ohne Vorheizphase, - - -: mit Vorheizphase.

Heizen zur Erreichung einer minimal verfügbaren Antriebsleistung mit Vorkonditionierung Dem Fahrer soll entsprechend den Anforderungen zu jedem Zeitpunkt, soweit möglich, eine minimal verfügbare Antriebsleistung zur Verfügung stehen. Bei sehr niedrigen Temperaturen ist diese begrenzt, sodass unabhängig vom Energieaufwand geheizt wird, bis die minimale Fahrleistung bereitgestellt werden kann. Ein entsprechendes Verhalten ergibt sich bei der Optimierung für den Fahrzyklus WLTP/C3

(*Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedures – Class 3*), dargestellt in Abb. 4.5. Zusätzlich ist das Ergebnis unter Berücksichtigung einer Vorheizphase $t_{\text{precond}} = 60\text{ s}$ gezeigt. Das Vorkonditionieren der Batterie mit Energie aus der Batterie lässt sich analysieren, indem dem eigentlichen Fahrzyklus eine Stillstandsphase der definierten Dauer vorgeschaltet und der resultierende Fahrzyklus für die Optimierung eingesetzt wird. Dabei ist zu beachten, dass erst ab Fahrtbeginn Kosten für die Anforderung an eine minimale Leistung anfallen. Die Vorheizphase wird bestmöglich genutzt, um zu Fahrtbeginn die geforderte minimale Antriebsleistung zu erreichen – bzw. da diese nicht möglich ist, die bis dahin maximal verfügbare Fahrleistung bereitzustellen.

Abschaltung der Nebenverbraucher Bei sehr niedrigem Ladezustand ist die Fahrleistung stark begrenzt, sodass im Extremfall kann das Fahrtziel nicht erreicht werden. In einem solchen Fall wird daher die Nebenverbraucherleistung bis hin zur vollständigen Abschaltung reduziert, um ein weiteres Absinken des Ladezustands und damit auch der maximal verfügbaren Fahrleistung entgegenzuwirken. Tritt eine Fahrleistungsbegrenzung auf, so kann dem geforderten Geschwindigkeitsverlauf des Fahrzyklus nicht weiter gefolgt werden. Zudem kann bei niedrigen Geschwindigkeiten weniger Bremsenergie rekuperiert werden, da das Fahrzeug früher zum Stillstand kommt. Aus den genannten Gründen ist es erforderlich, für dieses Szenario die Geschwindigkeit v als Zustandsgröße zu berücksichtigen. Das Optimierungsergebnis bei unterschiedlichen Anfangsladezuständen ist in Abb. 4.6 dargestellt. Es wird ersichtlich, dass trotz auftretender Fahrleistungsbegrenzung bei niedrigen Ladezuständen ($\xi_0 = 0,25$) im Vergleich zu einem höheren Anfangsladezustand ($\xi_0 = 0,4$) nicht geheizt wird, da sich dies negativ auf die nachfolgende Fahrleistungsbegrenzung auswirkt.

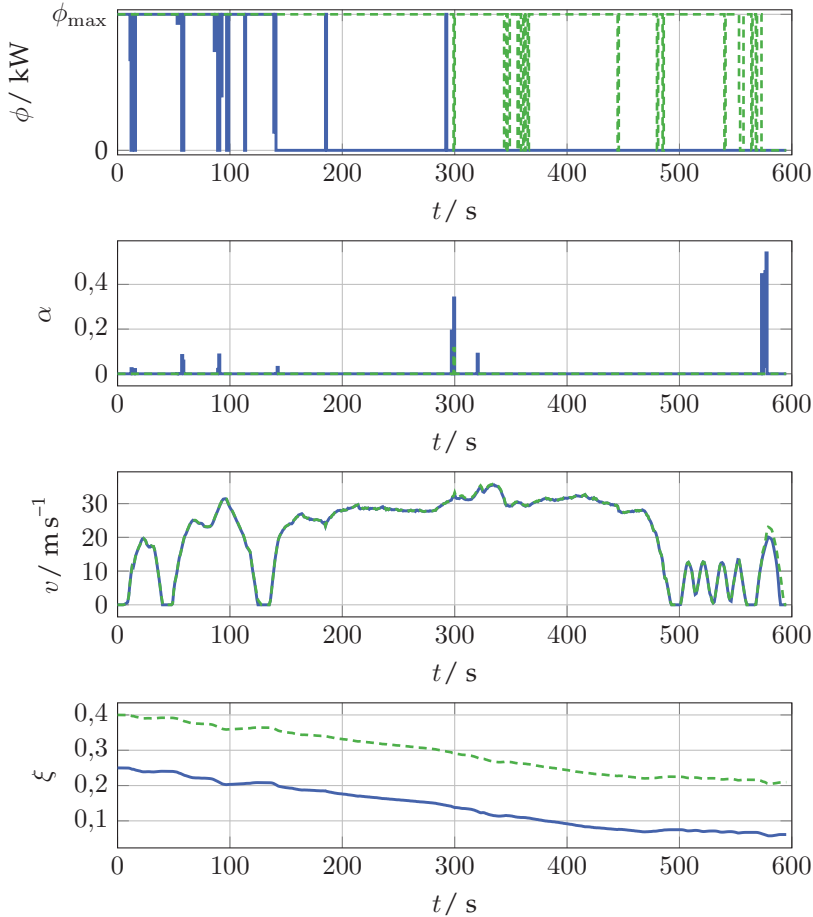


Abbildung 4.6 Nebenverbraucher-Abschaltung bei niedrigem Ladezustand. ($\omega_T = 0$, Fahrzyklus: SFTP-US06, $\vartheta_0 = -5^\circ\text{C}$; — : $\xi_0 = 0,25$, - - : $\xi_0 = 0,4$).

Begrenzte Ladeleistung bei maximalem Ladezustand Die Ergebnisse für den Fall einer vollgeladenen Batterie sind in Abb. 4.7 dargestellt. In frühen Bremsphasen kann aufgrund der Ladeleistungsbegrenzung bei hohen Ladezuständen nicht die volle Bremsleistung zum Laden und für

die Nebenverbraucher eingesetzt werden. Daher ist der Einsatz der mechanischen Bremsen erforderlich ($\beta > 0$). Da der Anteil der Bremsleistung von den mechanischen Bremsen in nicht nutzbare Wärme umgewandelt wird, ist es sinnvoll, die Bremsleistung durch die Nebenverbraucher möglichst stark auszunutzen. Im konkreten Fall ist das Heizen im weiteren Fahrverlauf vorteilhaft, da aufgrund der Temperaturerhöhung der Innenwiderstand und damit der Energieumsatz sinkt. Analog würde für andere Szenarien gekühlt werden, wenn dies im weiteren Fahrverlauf Vorteile bringt. Die Aufteilung zwischen Ladeleistung und Nebenverbraucherleistung hängt dabei wesentlich vom weiteren Fahrverlauf ab.

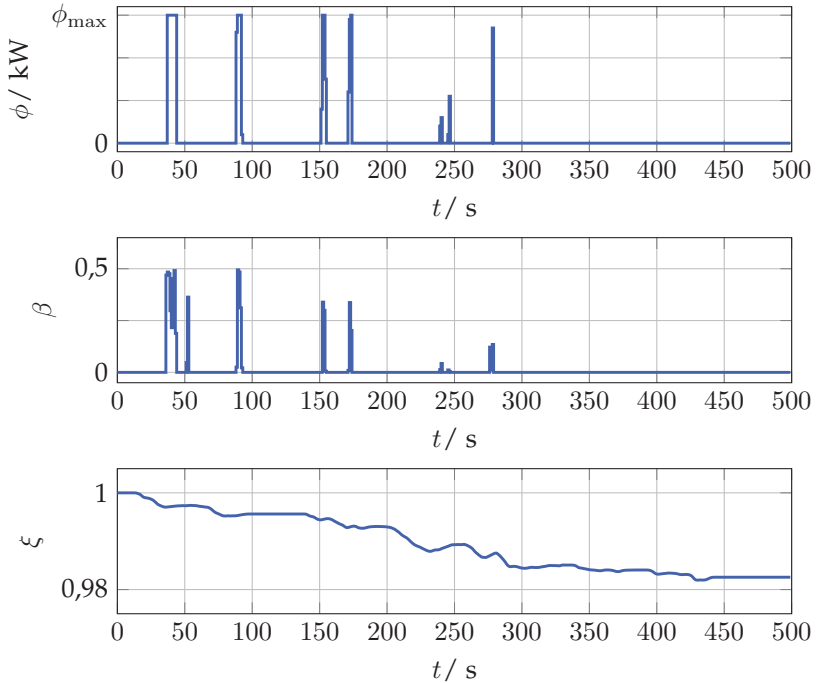


Abbildung 4.7 Reduktion der elektrischen Bremsleistung durch $\beta > 0$ bei voller Batterie ($\omega_{\Gamma} = 0$, Fahrzyklus: WLTP/C3, Fahrtdauer 500 s, $\vartheta_0 = 20^{\circ}\text{C}$, $\xi_0 = 1$).

4.2.1.3 Lebensdauieranforderung

Das nächste Szenario berücksichtigt die Alterung ($\omega_\Gamma > 0$). Bei sehr hohen Temperaturen der Batterie ist der negative Einfluss sehr hoch und sollte daher durch Kühlen vermieden werden, solange der erforderliche Energieaufwand dazu im Verhältnis steht. In Abb. 4.8 sind die Optimierungsergebnisse bei hohen Temperaturen dargestellt. Es wird gekühlt, bis der negative Lebensdauereinfluss ausreichend gering ist und die Lebensdauieranforderung bis zum Fahrtende eingehalten werden kann. Dabei können drei Phasen unterschieden werden. In der ersten Phase ist der Lebensdauereinfluss sehr hoch, sodass maximal gekühlt wird. In der zweiten Phase kommt zum Tragen, dass in Bremsphasen die Bremsleistung direkt vom Traktionssystem ohne negativen Lebensdauereinfluss genutzt werden kann, daher wird in diesen Situationen die thermische Leistungsanforderung erhöht und anschließend wieder abgesenkt. In der letzten Phase ist die Temperatur weit genug abgesenkt, sodass bis zum Fahrtende die Lebensdauieranforderung eingehalten werden kann, und es wird keine weitere elektrische Leistung aufgewendet. Grundsätzlich gilt, dass ein frühes Temperieren sich positiv auf die Lebensdauer im weiteren Fahrverlauf auswirkt, sodass bei normaler Fahrt überwiegend zu Beginn temperiert wird und zum Ende hin die Temperierung abgeschaltet wird. Das Ziel der Strategie ist dabei immer, dass der Zustand Γ am Ende des Fahrzyklus abhängig von $h(\Gamma_e)$ bei $\Gamma_e \approx 0$ oder ohne Kühlung darüber liegt, da in diesem Fall ein Minimum an Energie aufgewendet wurde, um der Lebensdauieranforderung gerecht zu werden. Ist die Temperatur zu Beginn sehr hoch oder die Fahrleistung sehr hoch, so folgt daraus ein hoher negativer Lebensdauereinfluss, dem nur durch sehr starkes Kühlen entgegengewirkt werden kann. Insbesondere bei kurzen Fahrzyklen mit hoher mittlerer Leistung kann die Lebensdauieranforderung $\Gamma_e > 0$, wie in Abb. 4.8 für den Fahrzyklus SFTP-US06 dargestellt, nicht erfüllt werden. Bis zu welcher Temperatur gekühlt werden muss, hängt dabei von der Belastung im Fahrzyklus und vom definierten Referenzwert Γ_{ref} ab. Kann die Lebensdauieranforderung auch ohne Kühlmaßnahmen einhalten werden, so wird auch nicht gekühlt.

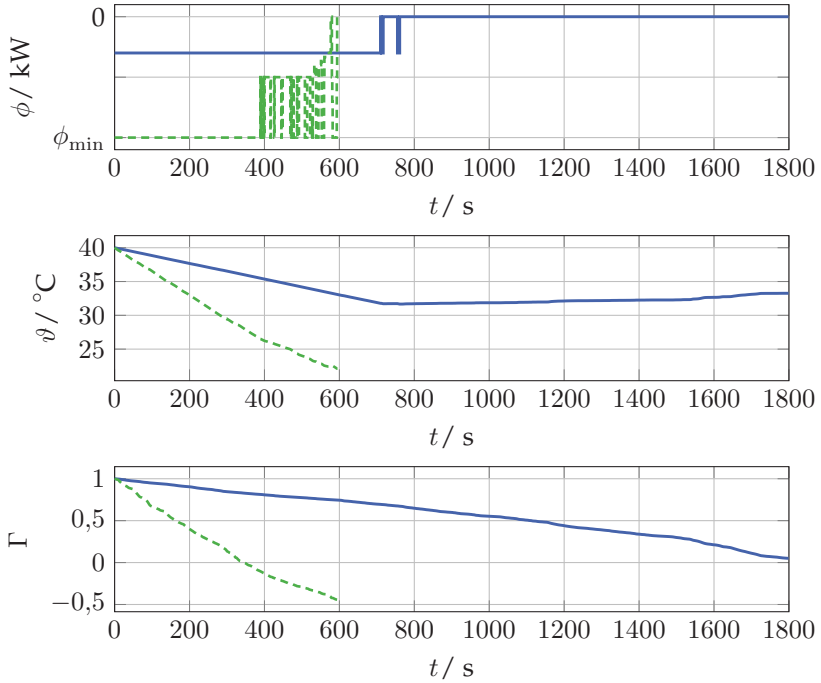


Abbildung 4.8 Kühlen der Batterie zur Einhaltung der Lebensdauervorgaben ($\vartheta_0 = 40^{\circ}\text{C}$, $\xi_0 = 0,8$, — : Fahrzyklus: WLTP/C3; - - : Fahrzyklus: SFTP-US06).

4.2.1.4 Reduktion und Begrenzung der elektrischen Bremsleistung

Bei sehr niedrigen Temperaturen wirkt sich das Laden der Batterie stark auf die Alterung aus. Dies wird teilweise durch den Kostenanteil Π kompensiert, daher wird in diesem Szenario $\omega_{\Pi} = 0$ gesetzt. Das Ergebnis ist in Abb. 4.9 gezeigt. In solchen Situationen wird die elektrische Bremsleistung mit $\beta > 0$ reduziert, obwohl die Betriebsgrenze der Ladeleistung noch nicht erreicht ist. Ein Teil der Bremsleistung (bei $\beta > 0$) wird dabei vorteilhaft eingesetzt, um die Batterie zu heizen und damit im weiteren Fahrverlauf mehr Bremsenergie zurückzugewinnen. Der restliche Teil der Bremsleistung wird bei $\beta > 0$ durch die mechanischen Bremsen aufgenommen.

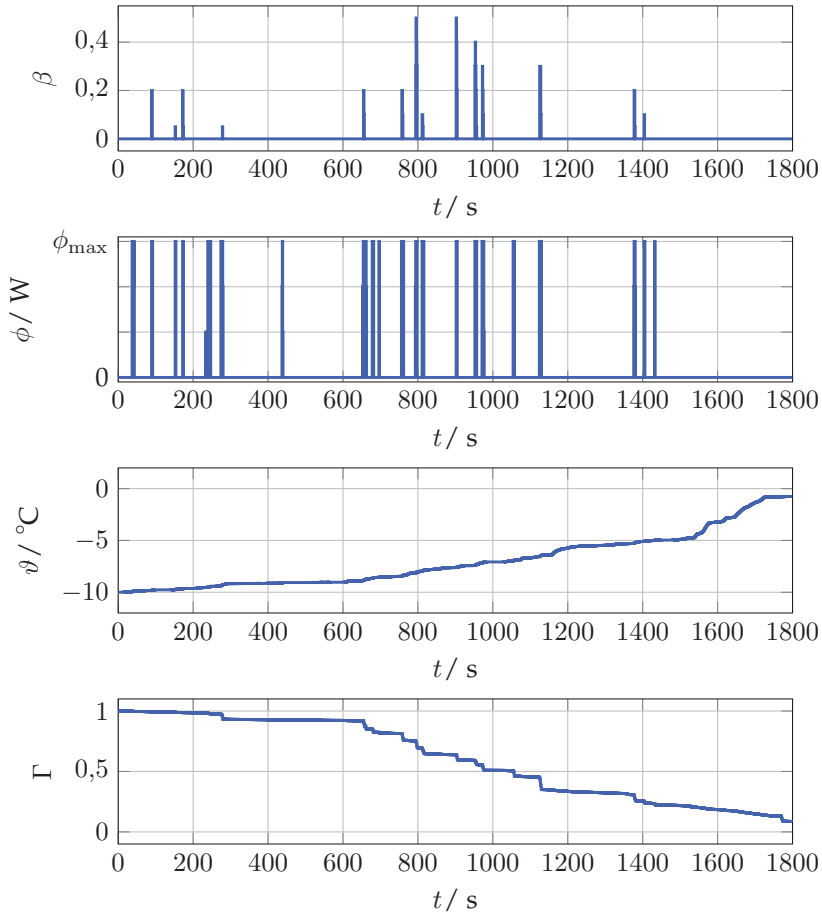


Abbildung 4.9 Reduktion der elektrischen Bremsleistung bei niedrigen Temperaturen bedingt durch die stärkere Alterung beim Laden der Batterie (Fahrzyklus: WLTP/C3, $\omega_{\text{II}} = 0$, $\vartheta_0 = -10^\circ\text{C}$, $\xi_0 = 0,8$).

4.2.2 Erweiterung um den Komfort

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Batterie. Eine Erweiterung der Methode auf weitere Anforderungen ist direkt möglich, bringt dabei aber einen höheren Rechenaufwand mit sich. Am Beispiel der Erweiterung auf die Betrachtung des Komforts wird das erforderliche Vorgehen dargestellt. In analoger Weise ist auch eine Erweiterung auf das Traktionssystem möglich.

Zur Berücksichtigung des Komforts werden der Zustandsvektor um die Fahrgastraumtemperatur ϑ_{cab} und der Steuervektor um die thermische Leistung für den Fahrgastraum ϕ_{cab} erweitert. Der Zustand v und die Steuergröße β können im nachfolgend betrachteten Fall zugunsten der Rechendauer entfallen, da im auftretenden Temperaturbereich der Batterie die Ladeleistungs- und Fahrleistungsbegrenzungen nicht relevant sind. Der Zustand ξ wird unter der Annahme eines geringen Einflusses für das Szenario aufgrund des sehr hohen Rechenaufwands nicht berücksichtigt. Damit ergibt sich der Zustandsgrößenvektor

$$\mathbf{x} = (\Gamma, \vartheta, \vartheta_{\text{cab}})^T \quad (4.7)$$

und der Steuergrößenvektor

$$\mathbf{u} = (\phi, \phi_{\text{cab}})^T. \quad (4.8)$$

Für die thermischen Leistungen lassen sich keine unabhängigen Steuergrenzen angeben, da diese voneinander abhängen. Beispielsweise werden die Batterie und der Fahrgastraum über den gemeinsamen Heizer geheizt. Aus diesem Grund werden die maximal möglichen thermischen Leistungen der Komponenten i als Steuergrenzen entsprechend

$$\phi_{i,\min} < \phi_i < \phi_{i,\max} \quad (4.9)$$

gewählt und unzulässige Kombinationen von thermischen Leistungen bei der Optimierung als nicht zulässige Lösung behandelt und verworfen. Der Anteil des Komforts im Gütefunktional wird mit $\omega_\kappa > 0$ durch

zeitabhängige Temperaturgrenzen, entsprechend Abb. 2.12, begrenzt und mit $\kappa(t, \vartheta_{\text{cab}})$ berechnet. Die Solltemperatur für den Fahrgastraum beträgt $\vartheta_{\text{cab}} = 22^\circ\text{C}$. Innerhalb der Temperaturgrenzen ist der Wert $\kappa = 0$, außerhalb wird er durch die quadratische Abweichung von der Solltemperatur berechnet. Damit wird gewährleistet, dass die Komfortanforderungen entsprechend Abschnitt 2.6 eingehalten werden, soweit dies durch das Heiz- und Kühlsystem möglich ist. Feste Zustandsgrenzen sollten für die Fahrgastraumtemperatur nicht gewählt werden, da bei zu stark begrenzter Heiz- bzw. Kühlleistung möglicherweise keine zulässige Lösung existiert. Die Ergebnisse der Optimierung mittels Dynamischer Programmierung sind in Abb. 4.10 dargestellt. Daraus geht hervor, dass zu Fahrtbeginn der Fahrgastraum mit maximaler Leistung gekühlt wird, um die Komfortanforderungen zu erfüllen. Anschließend kann die Kühlleistung für den Fahrgastraum reduziert und im Gegenzug die Kühlleistung für die Batterie zum Erreichen der Lebensdauieranforderung erhöht werden. Sobald beide Bedingungen erfüllt sind, wird das Kühlen bis zum Ende eingestellt.

4.2.3 Reduktion des Lösungsraums

Eine wesentliche Einschränkung für den Einsatz im Fahrbetrieb stellt der hohe Rechenaufwand dar. In [6] und [34, 37] werden daher die Methode der extremalen Trajektorien und des *Backwards Reachable Space* vorgestellt, welche den erreichbaren Lösungsraum sowie die Auflösung der diskreten Zustandswerte verringern und damit den Rechenaufwand insgesamt reduzieren. Die grundlegende Idee der beiden Methoden ist dabei, ausgehend vom gegebenen Anfangszustand \mathbf{x}_0 und dem zulässigen Bereich für den Endzustand $\mathbf{x}_e \in \mathcal{X}$ die durch die Zustandsgleichungen gegebene Grenzfläche zwischen erreichbarem und nicht erreichbarem Lösungsraum vor der Anwendung der Dynamischen Programmierung zu bestimmen. Durch eine variable Schrittweite kann der Rechenaufwand weiter reduziert werden [6].

Für das vorliegende Problem ist dies beispielhaft für die Temperatur, den Ladezustand und die Alterung in Abb. 4.11 veranschaulicht. Die obere Temperaturgrenze ergibt sich dabei bei maximaler Heizleistung und unter

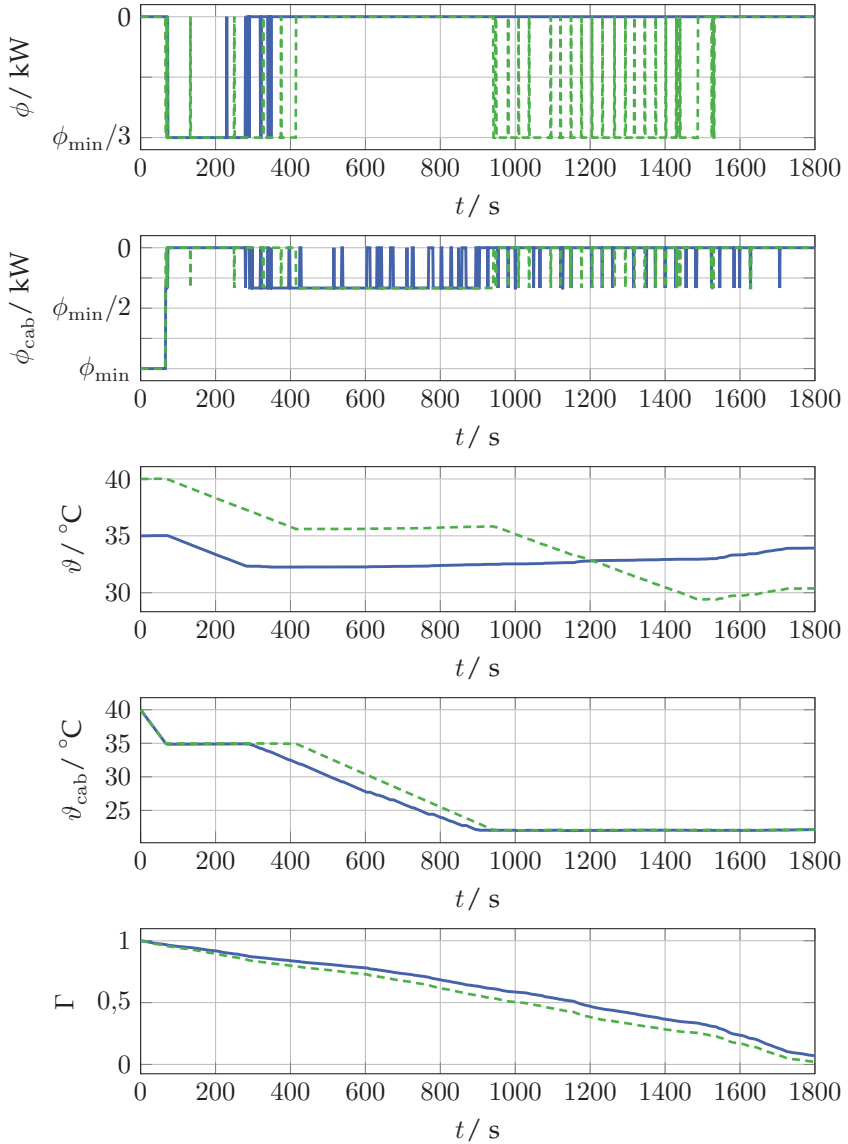


Abbildung 4.10 Ergebnisse unter Berücksichtigung des Komforts bei $\vartheta_{\text{amb}} = 35^{\circ}\text{C}$ für den FTP75-Fahrzyklus, $\vartheta_{\text{cab},0} = 40^{\circ}\text{C}$, — : $\vartheta_0 = 35^{\circ}\text{C}$, - - : $\vartheta_0 = 40^{\circ}\text{C}$, $\xi_0 = 0,8$.

Annahme des maximalen Innenwiderstands, die untere Temperaturgrenze resultiert aus der maximalen Kühlleistung und der Annahme eines minimalen Innenwiderstands. Nach Erreichen der Betriebsgrenzen bilden diese die Grenze zum nicht-erreichbaren Lösungsraum. Die Grenzen des Lösungsraums für den Ladezustand ξ ergeben sich bei Einsatz maximaler und minimaler elektrischer Leistung P_{aux} . Die Anforderung an die Lebensdauer wird bei der gegebenen Anfangstemperatur näherungsweise bei maximaler Kühlung erreicht und bei maximalem Heizen tritt die stärkste Alterung auf.

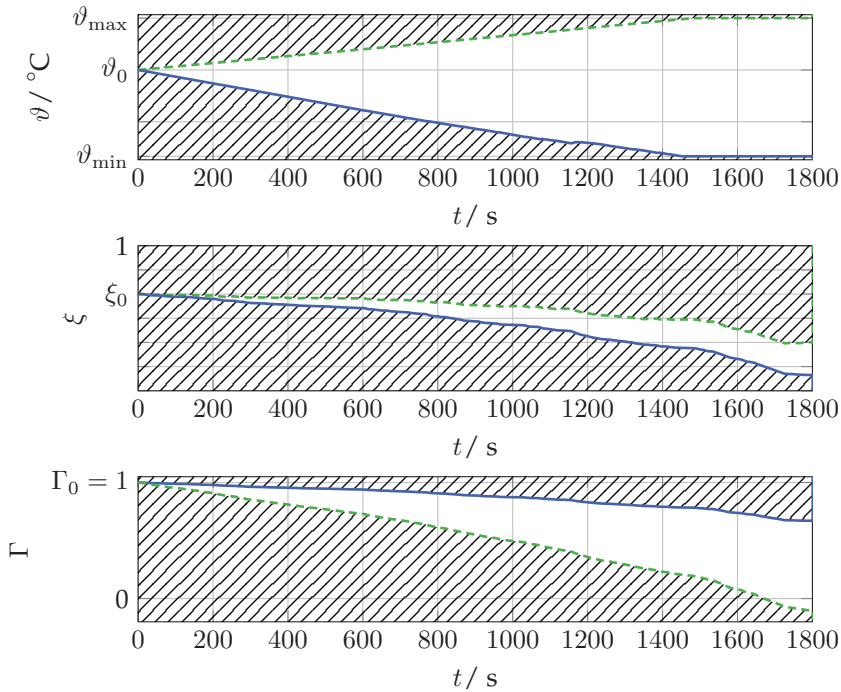



Abbildung 4.11 Extremale Trajektorien (Fahrzyklus: WLTP/C3, $\xi_0 = 0,8$, $\vartheta_0 = 30^{\circ}\text{C}$; —: maximales Kühlen bis zum Erreichen der Betriebsgrenzen, - - -: maximales Heizen bis zum Erreichen der Betriebsgrenzen, : nicht erreichbarer Lösungsraum).

Für das vorliegende Problem ist zu beachten, dass die Zustandsgrößen gekoppelt sind, sodass die beschriebenen Regeln zur Berechnung der Grenzflächen zum nicht-erreichbaren Zustandsraum lediglich parameterspezifische heuristische Regeln darstellen, deren Gültigkeit für jeden Parametersatz neu geprüft werden muss. Die Bestimmung exakter Grenzflächen stellt ein eigenes Optimierungsproblem dar [6]. Durch weitere heuristische Regeln kann eine Reduktion der möglichen Steuergrößen u erfolgen; so kann man im Allgemeinen davon ausgehen, dass bei sehr hohen Temperaturen lediglich gekühlt und bei sehr niedrigen Temperaturen nur geheizt wird. Ist zudem aus dem Entwicklungsprozess bekannt, dass eine Reduktion der Bremsleistung innerhalb eines bestimmten Temperaturbereichs nur innerhalb der Betriebsgrenzen sinnvoll ist, so kann die Steuergröße β in diesem Bereich entfallen und der Wert basierend auf den Betriebsgrenzen bestimmt werden. Ist aus der Optimierung im Entwicklungsprozess außerdem bekannt, dass begründet durch die Lebensdaueranforderung der Batterie die Temperatur für alle möglichen Fälle nach einer Zeitdauer innerhalb eines bekannten Intervalls liegt, so kann der Lösungsraum auch zeitlich rückwärtslaufend begrenzt werden.

4.2.4 Modellprädiktive Regelung

Die Methode der Dynamischen Programmierung kann durch eine Rückkopplung des aktuellen Zustands von einer Steuerung in eine modellprädiktive Regelung überführt werden. Dazu wird in jedem Zeitschritt eine neue Optimierung für die verbleibende Fahrtdauer durchgeführt, wobei der aktuelle Zustand der Startwert für die Optimierung ist und somit jeweils nur der erste Steuerwert der aktuellen Optimierung angewendet wird. Diese Vorgehensweise führte für das vorliegende Problem zu einem weiterhin hohen Rechenaufwand, der auf aktuellen Steuergeräten nicht realisierbar ist. Im Entwicklungsprozess kann die Methode als fahrzeugspezifische Bewertungsgrundlage für Optimierungsmethoden im Fahrbetrieb genutzt werden, hier sei z. B. auf [2], [6] und [149] verwiesen.

4.3 Optimierungsproblem der Komponentensteuerung

Die Optimierung des ersten Teilproblems liefert als Steuergrößen die thermischen Leistungen an den Komponenten. Das zweite Teilproblem betrachtet nun die Steuerung der Nebenverbraucher zur Erzeugung der geforderten thermischen Leistungen ϕ an den Komponenten (Batterie ϕ , Traktionssystem ϕ_{tr} , Fahrerkabine ϕ_{cab}), im Folgenden Zielwerte genannt, mit minimaler elektrischer Leistung.

Eine Betrachtung der Zustandswerte über der Zeit führt aufgrund der hohen Zahl an Zustands- und Steuergrößen zu einem sehr hohen Rechenaufwand. Daher wird für eine Näherungslösung eine lokale Minimierung in jedem Zeitschritt durchgeführt. Für jeden Zeitschritt wird dabei ein Satz von Parametern in Abhängigkeit vom aktuellen Systemzustand (z. B. Temperaturen des Kühlmittels am Startpunkt des Umlaufs) vorgegeben und jede Kombination von möglichen Parameterwerten als eigenständiges Optimierungsproblem gelöst. Die Parameter werden im Fahrbetrieb durch Mess- oder Schätzwerte bestimmt. Der Vorteil dieser Näherung ist, dass für den Fahrbetrieb eine Wertetabelle genügt, welche in jedem Zeitschritt abhängig vom aktuellen Zustand \mathbf{x}_{pg} die zugehörige Steuerstrategie $\mu_{pg}(\mathbf{x}_{pg})$ beinhaltet und entsprechend einfach implementiert werden kann. Des Weiteren kann das Optimierungsproblem für einen Zeitschritt von einem einstufigen in ein mehrstufiges Problem transformiert werden, um damit die Rechendauer im Entwicklungsprozess deutlich zu reduzieren. Da kein Zeitverlauf betrachtet wird, ist keine direkte Beschreibung als mehrstufiger Entscheidungsprozess gegeben. Eine Möglichkeit der Transformation wird daher im Folgenden erläutert.

4.3.1 Konstruktion des mehrstufigen Problems

Der Aufbau der Heiz- und Kühlsysteme wird in einem Graphen (siehe Abb. 4.12 auf S. 95) dargestellt, um ein mehrstufiges Problem zu konstruieren. Dabei werden ein oder mehrere Umläufe des Kühlmittels beschrieben. Dazu werden Zustandsgrößen (Temperaturen, thermische Leistungsflüs-

se, Volumenströme und Ventilstellungen) als Knoten definiert und deren Abhängigkeiten über Kanten dargestellt. Jeder Zustand hängt von den von links verbundenen Zuständen und Steuergrößen ab. Jede Kante stellt somit einen physikalischen Zusammenhang dar. Alle Steuergrößen, die in mehreren Optimierungsschritten benötigt werden, müssen als Zustände mitgeführt werden, um eine Entkopplung der einzelnen Schritte zu erreichen. Äußere Zwangsbedingungen, wie z. B. der vom Fahrer vorgegebene Fahrgastraumlüfter, werden als konstante Parameter bei der Berechnung der Zustandsübergänge berücksichtigt. Die Einführung zusätzlicher Zustände im Graphen ermöglicht es, spezielle Anforderungen zu berücksichtigen. Beispielsweise kann ein Wärmeübertrager, der nur für den Fall eines positiven Wärmestroms in eine Richtung eingesetzt werden soll, durch einen Zustand ϕ_{hx} und die zugehörige Forderung an den Wertebereich $\phi_{hx} > 0$ bei der Optimierung realisiert werden. Die Dynamische Programmierung wird diese Forderung als Zustandsgrenze berücksichtigen.

Der Graph wird in der Weise aufgebaut, dass die Zielwerte am Ende einer Kette stehen, die nicht zwingend im letzten Schritt enden und sich zuvor verzweigen können. Dabei muss beachtet werden, dass nur die berücksichtigten Abhängigkeiten in die Optimierung einfließen. Die Berücksichtigung von Zusammenhängen, welche im zweiten Durchlauf des Kühlmittels zum Tragen kommen, erfordert einen deutlich komplexeren Graphen mit einer hohen Zahl an mitgeführten Zustands- und Steuergrößen und damit einen höheren Rechenaufwand. Aus diesem Grund sollen zunächst nur die Zusammenhänge in einem Durchlauf mit den wesentlichen Einflüssen betrachtet werden.

Die Auswirkung einer in ein Kühlmittelvolumenelement eingebrachten thermischen Leistung weist aufgrund der Kühlmittelaufzeit abhängig von der Kühlmittelgeschwindigkeit eine Verzögerung auf, welche für den in dieser Arbeit betrachteten Aufbau mehrere Sekunden betragen kann. Zur Vereinfachung wird zusätzlich angenommen, dass die eingebrachten thermischen Leistungen sich ohne zeitliche Verzögerung durch den Kühlmittelfluss direkt auf die Komponenten auswirken. Die Kühlmittelaufzeiten werden dafür in den Zustandsgleichungen im Sinne einer Mittelung

über ein ausreichend großes Zeitintervall berücksichtigt. Die Ein- und Ausschaltverluste von Nebenverbrauchern werden als vernachlässigbar angenommen.

4.3.2 Diskretisierung der Zustands- und Steuergrößen

Für eine numerische Berechnung müssen Zustands- und Steuergrößen diskretisiert werden. Abhängig von der Diskretisierung ergeben sich die Genauigkeit der Lösung und der Rechenaufwand. Die Zustandsgrößen in jedem Optimierungsschritt ergeben sich aus dem Graphen. Die Steuergrößen sind die Steuerwerte

$$\mathbf{u} = (u_1, \dots, u_m)^T \quad (4.10)$$

der m Nebenverbraucher. Es ist zweckmäßig, Steuergrößen mit parameter-abhängigen Wertebereichen (z. B. Durchfluss von Pumpen, Heizleistung, Umdrehungszahl des Kompressors) durch eine relative Größe bezogen auf deren Maximalwert

$$u_i \in \{0, \dots, 1\} \quad (4.11)$$

anzugeben, da dies das Verständnis der Optimierungsergebnisse erleichtert. Für Steuergrößen mit der normierten Mindestanforderungen $u_{i,\min}$ (z. B. Durchfluss durch Batterie) wird der Wertebereich zu

$$u_i \in \{u_{i,\min}, \dots, 1\} \quad (4.12)$$

reduziert. Die von den Komponenten an die Umgebung übertragenen thermischen Leistungen sind bereits im fahrverlaufsabhängigen Teilproblem berücksichtigt, sodass die Zielwerte $\phi_{\text{req}} = \mathbf{0}$ ohne Berücksichtigung von Mindestanforderungen zu einer Strategie mit Abschaltung aller Nebenverbraucher führt. Der Steuerwert $\phi_{\text{req},i} = 0$ der Komponente i sollte daher

Der Steuerwert $\phi_{\text{req } i} = 0$ der Komponente i sollte daher immer in der Menge der (diskretisierten) Steuerwerte enthalten sein. Die Wertemenge der Schaltventile ist

$$u_i \in \{0, 1\} , \quad (4.13)$$

wobei $u_i = 0$ den geschlossenen Zustand und $u_i = 1$ offenen Zustand beschreibt.

Mehrere Zustände in einem Kreislauf können in Kombination Restriktionen hinsichtlich der zulässigen Zustände aufweisen. Beispielsweise ist ein nicht zulässiger Zustand, dass alle Schaltventile eines Kreislaufs geschlossen sind, wenn dadurch der komplette Kreislauf unterbrochen wird. Ein weiteres Beispiel ist die Wahl der Durchflusswerte, wenn mehrere Pumpen in einem Kreislauf eingesetzt werden. Die zugehörigen Zustände werden zu einem Zustand zusammengefasst, der nur die zulässigen Kombinationen annehmen darf, wodurch implizit sichergestellt ist, dass auch nur diese Kombinationen bei der Lösung auftreten können und unzulässige Lösung nicht mitberechnet werden müssen. Für zwei zu einer Steuergröße zusammengefasste Schaltventile ergibt sich für den Fall, dass beide nicht gleichzeitig geschlossen sein dürfen, die Wertemenge

$$u_i \in \{1/1, 1/0, 0/1\} . \quad (4.14)$$

Die thermischen Leistungen an den Komponenten werden als zeitabhängiger Zielwert durch das fahrverlaufsabhängige Problem bestimmt und an die Komponentensteuerung als Parameter übergeben. Dabei wurde bisher nicht berücksichtigt, dass der Wert mit der gewählten Diskretisierung der Steuerwerte möglicherweise nicht mit minimaler elektrischer Leistung umsetzbar ist. Ein fester Zielwert würde daher zu keiner erreichbaren Lösung oder zu nicht sinnvollen Lösungen führen. Soll beispielsweise entsprechend dem Zielwert geheizt werden und liegt die resultierende thermische Leistung über dem Zielwert, wird gleichzeitig mit zusätzlichem Energieaufwand gekühlt. Der Fall kann vermieden werden, indem ein Zielintervall für den Zielwert definiert wird. Das Zielintervall ergibt sich aus dem Zielwert selbst und einer ausreichenden Intervallbreite, welche

ein stärkeres Heizen bzw. Kühlen der Komponente mit dem nächsthöheren Diskretisierungsschritt der Steuergröße zulässt. Eine alternative Herangehensweise ist, anstatt eines Zustands für die thermischen Leistungen Kosten für die Abweichung vom Zielwert im Gütefunktional einzuführen. Dadurch kann sichergestellt werden, dass die Existenz einer Lösung nicht durch die thermische Leistung eingeschränkt wird. Bei ausreichend steilem Anstieg der Kosten ausgehend vom Zielwert wird automatisch die maximal mögliche Leistung bei der Optimierung erzwungen. Damit verbunden ist allerdings der Nachteil, dass für die numerische Berechnung der Wert g_{nfeas} für nicht erreichbare Zustände sehr hoch gewählt werden muss und damit die Genauigkeit der Lösung negativ beeinflusst wird.

4.3.3 Optimierung des Graphen

Mithilfe des konstruierten Graphen wird ein Optimierungsproblem definiert, das in dieser Arbeit mittels Dynamischer Programmierung gelöst wird. Um den Gesamtrechenaufwand zu reduzieren, kann der Graph selbst noch optimiert werden. Dazu werden Entscheidungen in der Weise auf die einzelnen Entscheidungsschritte verteilt, dass die Anzahl an Entscheidungskombinationen und Zustandskombinationen in einem Schritt möglichst klein ist. Bei der Erstellung des Graphen können die Zustandsgrößen beliebig gewählt werden, was zu unterschiedlichen Graphen mit unterschiedlichem Rechenaufwand bei der Optimierung führt. Eine mögliche Herangehensweise ist, dass bei der Erstellung möglichst alle Zustandsgrößen berücksichtigt werden und der Graph anschließend reduziert wird. Umgekehrt ist es auch zulässig, möglichst wenige Zustandsgrößen zu verwenden und den Graphen anschließend zu erweitern, um die Zahl gleichzeitig betrachteter Zustands- und Steuergrößen und damit den Rechenaufwand zu reduzieren.

Im Rahmen dieser Arbeit haben sich folgende Erkenntnisse hinsichtlich der Graphenoptimierung ergeben:

- Alle Optimierungsschritte, in denen keine Entscheidungen getroffen werden, können grundsätzlich mit dem nachfolgenden Schritt zusammengefasst werden.

- Durch Einführung eines neuen Zustands können Entscheidungen getrennt werden. Dies führt allerdings auch dazu, dass andere Entscheidungen als Zustände mitgeführt werden. Ein zusätzlicher Zustand ist zumeist dann sinnvoll, wenn eine große Zahl an Steuerwerten vorliegt, beispielsweise für Pumpen mit 11 möglichen Steuerwerten.
- Eine Entscheidung kann dazu führen, dass andere Entscheidungen beliebig getroffen werden können. Dieser Fall tritt unter anderem auf, wenn der Durchfluss und mehrere Ventilstellungen zusammengefasst werden, da für den Durchfluss $\dot{V} = 0$ die Ventilstellung keinen Einfluss hat und damit eine beliebige Kombination festgelegt werden kann. In diesem Fall können die zugehörigen Steuergrößen durch Bildung ihrer relevanten Kombinationen vereinigt werden. Dies führt zu einer geringen Anzahl an zu betrachtenden Kombinationen und damit einem geringen Rechenaufwand.
- Alle Entscheidungen, die in Kombination einen untrennbaren Einfluss haben, sollten zusammengefasst werden, da dies zu einer geringeren Anzahl an Kombinationen führt. Dies gilt beispielsweise für Schaltventile in einem Kühlkreislauf, die zusammen den Durchfluss in mehreren Teilsträngen beeinflussen.
- Wenn in einem Schritt bereits alle Entscheidungen aufgrund eines anderen Zustands getroffen wurden, können alle weiteren von den Steuergrößen abhängigen Zustände zusammengefasst werden.
- Eine weitere Möglichkeit der Graphenoptimierung ergibt sich aus den zugrunde liegenden physikalischen Zusammenhängen. Diese sind vom individuellen Aufbau der Kreisläufe abhängig und gehen nicht aus dem Graphen selbst hervor. Hierzu gehört der Fall, wenn eine Schaltventilstellung den Durchfluss in zwei daran angeschlossenen Teilzweigen bestimmt und die beiden Teilzweige anschließend wieder zusammengeführt werden. Dann ist es ausreichend, abhängig von der Ventilstellung nur einen Zweig zu bestimmen, da der andere Zweig keinen Durchfluss aufweist und somit keinen Einfluss

nimmt. Es wird somit erst eine Fallunterscheidung getroffen und anschließend eine statt zwei Berechnungen durchgeführt.

4.3.4 Gütefunktional

Das Gütefunktional berücksichtigt die Summe der elektrischen Leistungsanforderungen aller Nebenverbraucher. Der Einfluss der Fahrleistung auf den Ladezustand, die Fahrleistungsabweichung, die Alterung und der Komfort sind bereits durch die vorgegebenen thermischen Leistungen aus dem fahrverlaufsabhängigen Teilproblem berücksichtigt, sodass das vereinfachte Gütefunktional

$$J = \sum_{k=0}^N P_{\text{aux},i} \quad (4.15)$$

eingesetzt wird. Dabei muss für den Graphen beachtet werden, dass zur Berechnung der erforderlichen elektrischen Leistung der Pumpen der Durchfluss und die Druckverluste abhängig von den Ventilstellungen im Kühlkreislauf im gleichen Schritt vorliegen müssen. Die Schaltenergie für die Ventile selbst wird vernachlässigt.

Für die numerische Berechnung muss ein Kostenwert g_{nfeas} festgelegt werden, welcher nicht erreichbare Lösungen beschreibt. Dieser Fall tritt beispielsweise auf, wenn eine Pumpe aufgrund zu hoher Druckverluste den geforderten Durchfluss nicht erzeugen kann. Der Wert g_{nfeas} sollte möglichst klein gewählt werden, aber groß genug, um keine zulässige Lösung durch Interpolation der Kosten zu verwerfen [2, 34]. In dieser Arbeit wird die Summe der maximalen Leistungen aller Nebenverbraucher für g_{nfeas} gewählt.

4.3.5 Strategie für nicht erreichbare Zielwerte

Die Optimierung liefert die optimale Lösung für das diskretisierte Problem. Abhängig von dem Parametersatz (z. B. Kühlkreislauftemperaturen) existiert keine erreichbare Lösung. Daher ist eine Strategie, hier Rückfallebene genannt, erforderlich, die greift, sobald keine optimale Lösung existiert.

Eine Lösung ist insbesondere dann nicht erreichbar, wenn die geforderte thermische Leistung zu hoch ist. Daher muss als Rückfallebene eine Strategie verfolgt werden, welche im nachfolgenden Schritt hin zu einer erreichbaren Lösung führt. Dies entspricht für den Fall des Heizens einem maximalen Heizen und für den Fall des Kühlens einem maximalen Kühlen. Dabei kann komponentenabhängig in mehrere Strategien unterschieden werden (z. B. Batterie maximal heizen, restliche Nebenverbraucher auf Minimum betreiben).

4.3.6 Parametersatz

Das vorgestellte Verfahren geht von einem Satz fester Parameter (z. B. Kühlkreislauf-, Komponenten- und Umgebungstemperatur) aus und berechnet für diesen Fall die optimale Steuerungsstrategie. Damit alle möglichen Situationen berücksichtigt werden, muss über die Kombinationen aller Werte der Parameter iteriert werden. Dabei können Parameterkombinationen auftreten, die in der Praxis nicht oder nur sehr selten auftreten. Diese können durch Anwendung von Ausschlussregeln auf die Menge aller Kombinationen unberücksichtigt bleiben, wodurch die Zahl an Kombinationen verringert wird. Derartige Ausschlussregeln können z. B. sein, dass das Traktionssystem, der *On-Board*-Lader und das Kühlmittel im Traktions- und Heizkreislauf nie kälter als die Umgebungstemperatur sind³.

4.3.7 Anwendung

Die zuvor vorgestellte Methodik wird nun auf den vorliegenden Fahrzeugaufbau angewendet. Der resultierende Graph unter Berücksichtigung aller nach Ansicht des Autors maßgeblichen Abhängigkeiten ist in Abb. 4.12 dargestellt, wobei dieser Graph eine von vielen Möglichkeiten darstellt. Die geringe Zahl an verwendeten Zustandsgrößen bringt den Vorteil mit

³ Es sind Situationen möglich, in denen die getroffene Annahme nicht gilt; zugunsten des Rechenaufwands werden diese sehr seltenen Situationen vernachlässigt. Eine solche Situation ist beispielsweise das Verlassen einer kühlen Tiefgarage in eine heiße Umgebung.

sich, die Zustandsgrenzen einfach wählen zu können; nachteilig ist allerdings der erhöhte Rechenaufwand aufgrund der hohen Zahl an simultanen Entscheidungen. Es wurde zuvor bereits erläutert, dass nur die Zusammenhänge in einem Durchlauf des Kühlmittels betrachtet werden, wodurch die Ergebnisse leichter nachvollziehbar sind und der Rechenaufwand geringer ist. Für den gewählten Graphen wird im vorliegenden Fall somit nicht berücksichtigt, dass z. B. Abwärme von der Batterie an Fahrgastraum übertragen werden kann. Durch eine Erweiterung des Graphen oder eine alternative Beschreibung, die diesen Zusammenhang im ersten Durchlauf berücksichtigt und dafür einen anderen Zusammenhang unberücksichtigt lässt, könnte die Situation betrachtet werden.

Die Zustandsübergangsgleichungen werden basierend auf den Gleichungen aus Kapitel 2 aufgestellt, wobei die folgenden Annahmen getroffen werden. Die Wärmekapazität des Heizers wird als sehr klein angenommen, sodass sich dieser sehr schnell aufheizt und die erzeugte Wärme innerhalb kurzer Zeit an das Kühlmittel übertragen wird. Es gilt somit näherungsweise, dass die elektrische Leistung vollständig in thermische Leistung umgewandelt wird. Für einen Heizer mit deutlich größerer Wärmekapazität müsste die thermische Leistung in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz und dem thermischen Leitwert abhängig vom Durchfluss bestimmt werden. Das Traktionssystem und der *On-Board*-Lader werden nur gekühlt, da Heizen in dem zugrunde gelegten Modell keine Vorteile bringt. Für den Volumenstrom durch die Batterie wird ein Minimalwert berücksichtigt, um eine möglichst homogene Temperaturverteilung zwischen den einzelnen Zellen der Batterie zu gewährleisten, ohne dass diese explizit betrachtet werden. Für den Verdampfer zur Kühlung der Batterie über das Kühlmittel wird vereinfachend angenommen, dass die thermische Leistung unabhängig von der Temperatur des Kühlmittels ist.

4.3.8 Ergebnisse

Die Optimierung führt auf mehrdimensionale Resultate, welche sich als Ganzes nicht sinnvoll darstellen lassen. Daher werden im Folgenden meh-

rere zweidimensionale Teilmengen des mehrdimensionalen Gesamtergebnisses erläutert. Zunächst werden allgemeingültige Schlussfolgerungen gezogen. Anschließend wird auf jede einzelne Teilmenge eingegangen.

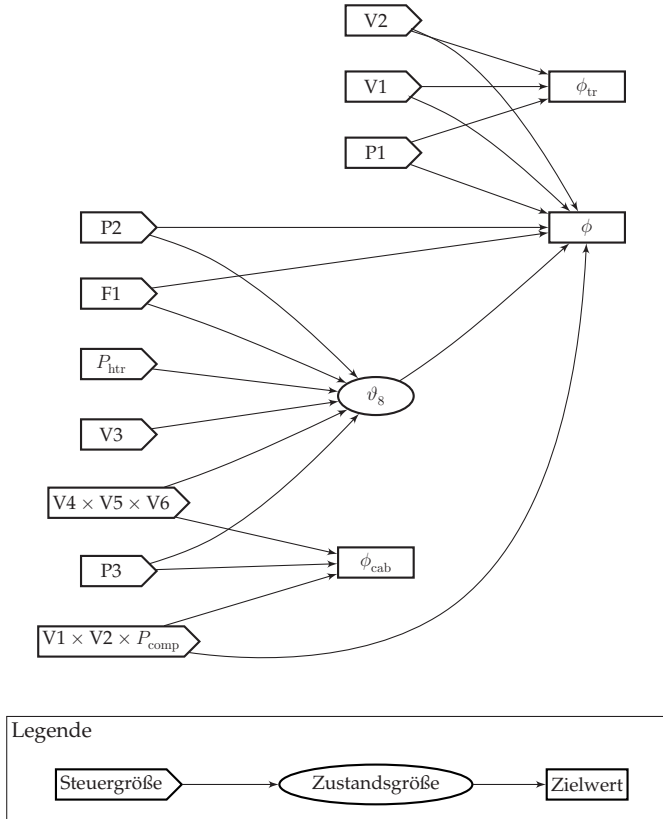


Abbildung 4.12 Resultierender Graph für das Heiz- und Kühlsystem (siehe 2.8 auf S. 29). Die Steuergrößen der Pumpen P, Ventile V, Lüfter F und der Heiz- und Kühlleistungen P sowie zulässige Kombinationen von diesen, verknüpft durch den Operator \times , ergeben die Zustände ϑ und Zielwerte ϕ .

Für alle Teilmengen gilt gleichermaßen, dass die beiden Parameterwerte der Abszissen- und Ordinatenachse variieren, alle weiteren Parameter

sind in der Darstellung konstant. Das führt dazu, dass bestimmte Fälle im Fahrbetrieb typischerweise nicht oder nur sehr selten auftreten, beispielsweise ein sehr kalter Fahrgastraum bei hohen Umgebungstemperaturen. Mit den in Abschnitt 4.3.6 eingeführten Ausschlussregeln können solche Fälle unberücksichtigt bleiben, für die nachfolgenden Teilmengen wird zum besseren Verständnis aber der volle Parameterraum genutzt.

Allgemeine Schlussfolgerungen Die geforderten thermischen Leistungen im Kühl- und Heizkreislauf (siehe Abb. 2.8) werden über den Lüfter, den Kompressor und den elektrischen Heizer in die Kühlmittelvolumina eingebracht. Der Einsatz des Lüfters erfordert eine deutlich geringere elektrische Leistung, daher wird dieser bevorzugt eingesetzt. Die Batterie wird dabei durch Schalten des Ventils V3 auf den Lüfterpfad und Aktivieren der Pumpe P2 temperiert. Der Fahrgastraum wird durch Öffnen der Ventile V4 und V6 sowie Zuschalten der Pumpe P3 temperiert. Für die Kühlung des Traktionssystems muss das Ventil V7 geöffnet und die Pumpe P1 einen Durchfluss erzeugen, wobei das Ventil V9 geschlossen ist. Durch Einsatz des Kompressors im Kältekreislauf können die Batterie und der Fahrgastraum mit höheren Kühlleistungen gekühlt werden. Für die Batterie wird hier das Ventil V1 und für den Fahrgastraum das Ventil V2 geöffnet. Dies ist ebenfalls notwendig, wenn aufgrund der Temperaturdifferenz am Lüfter die geforderte thermische Leistung nicht realisierbar ist. Die Erzeugung hoher thermischer Heizleistungen erfolgt durch den elektrischen Heizer. Dabei muss grundsätzlich die Pumpe P3 aktiv sein. Das Beheizen der Batterie erfordert zusätzlich das Öffnen des Ventils V5 und einen Durchfluss im Batteriekreislauf, um eine Wärmeübertragung am Wärmeübertrager HX 1 zu ermöglichen.

Die Pumpe P2 erzeugt immer einen minimalen Durchfluss im Batteriekreislauf, um die Verteilung der Zellentemperaturen der Batterie anzugleichen. Für hohe Umgebungstemperaturen ist daher eine Bypass-Strategie erforderlich, um ein Aufheizen des Kühlmittels zu verhindern. Diese wird über den Pfad des Wärmeübertragers HX 1 (V3=B) und Schließen des Ventils V5 realisiert. Auch bei nachteiligen Auswirkungen durch die Kopplung der Kühlkreisläufe über den gemeinsamen Lüfter, beispielsweise bei zu

hoher Kühlleistung der Batterie aufgrund hoher Kühlanforderung des Traktionssystems, wird die Bypass-Strategie eingesetzt.

Begründet durch die Forderung nach einer minimalen Gesamtleistung der Nebenverbraucher wird der Durchfluss der Pumpen auf den minimalen Wert eingestellt und die Ventilstellung hinsichtlich minimalem Druckverlust gewählt, wenn damit die geforderten thermischen Leistungen erzeugt werden können. Beispielsweise wird die Ventilstellung B von V3 aufgrund der geringeren Druckverluste im Batteriekreislauf präferiert, wenn gegenüber der Ventilstellung A kein Unterschied hinsichtlich der Zielwerte vorliegt. Die Pumpe P3 wird nur eingesetzt, wenn mit dem Heizer geheizt wird oder der Fahrgastraum über den Lüfter temperiert wird. Aus dem gleichen Grund wird die Pumpe P1 nur aktiviert, wenn die Kühlung des Traktionssystems oder des *On-Board*-Laders gefordert wird.

Die Viskosität des Kühlmittels und damit die Druckverluste sind temperaturabhängig. Damit hängt die optimale Steuerungsstrategie einschließlich des Durchflusses nicht nur von dem Temperaturunterschied, sondern auch von der absoluten Temperatur ab. Dieses Verhalten wird ohne weiteres Zutun im Modell durch die Berechnung der elektrischen Pumpenleistung berücksichtigt. Die Lüfterdrehzahl beeinflusst die Kühlleistung des Antriebs- und des Batteriekreislaufs. Daraus folgt, dass zur Einhaltung der Zielwerte der jeweils höhere der erforderlichen Lüfterwerte eingesetzt wird. Für den Fall, dass die Batterie gekühlt werden kann aber nicht muss, wird dies ausgenutzt, da ein minimaler Durchfluss gefordert wird. Soll die Batterie nicht gekühlt werden, wird durch eine entsprechende Ventilstellung von V3 verhindert, dass das Kühlmittel am Lüfter entlang geführt und damit gekühlt wird.

Die resultierenden Steuergrößen können zur Veranschaulichung der Ergebnisse gemeinsam in einem zweidimensionalen Diagramm entsprechend Abb. 4.13 dargestellt werden, wobei einzelne Punkte zu Regionen zusammengefasst werden. Die Regionen beschreiben dabei eine Teilmenge aller Steuergrößen der aktiven Nebenverbraucher und Ventilstellungen. Für die Darstellung werden Füllmuster verwendet, welche die wesentlichen Strategien

 \mathcal{F}_c - Kühlen mit Lüfter,

 \mathcal{F}_h - Heizen mit Lüfter,

 \mathcal{C} - Kühlen mit Kompressor,

 \mathcal{H} - Heizen mit elektrischem Heizer,

 \mathcal{W}_h - Abwärmenutzung durch Pumpenansteuerung und Ventilstellung und

 \mathcal{W}_c - Kühlen durch Wärmesenke Traktionssystem, Pumpenansteuerung und Ventilstellung

repräsentieren. Auftretende Überlappungen von Regionen geben an, dass mehrere Aktionen gleichzeitig aktiv sind, beispielsweise Kühlen mit Kompressor und Lüfter. Auf der Abszissenachse wird im Folgenden einer der Zielwerte angegeben und auf der Ordinatenachse ein relevanter Parameter. Alle weiteren Parameter werden konstant gehalten.

In allen Szenarien ergeben sich die beiden Regionen \mathcal{O} und \mathcal{I} . Die Region \mathcal{O} resultiert aus den diskreten Steuerwerten bzw. der Diskretisierung der Zustands- und Steuerwerte, die dazu führt, dass keine beliebig kleinen Beträge thermischer Leistungen erzeugt werden können und somit eine untere Grenze entsteht. Die Zielwerte, die aufgrund der Steuerwertbegrenzungen abhängig vom Parametersatz nicht erzeugt werden können, führen zu der nicht erreichbaren Region \mathcal{I} . Für diese Region muss die zuvor beschriebene Rückfallebene eingesetzt werden.

Teilmengen 1 und 2 Die erste Teilmenge des mehrdimensionalen Gesamtergebnisses umfasst das Temperieren der Batterie in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur. Die Optimierung führt zu der in Abb. 4.13 dargestellten Strategie. Daraus geht hervor, dass bei niedrigen Temperaturen mit dem Lüfter gekühlt werden kann bzw. mit dem Heizer geheizt werden muss. Mit zunehmender Umgebungstemperatur muss zusätzlich der Kompressor eingeschaltet werden. Übersteigt die Umgebungstemperatur die Temperatur der Batterie, kann nur über den Kältekreislauf ausreichend gekühlt werden. Liegt bei hohen Temperaturen die Anforderung zum Heizen vor, so wird in diesem Fall über den Lüfter geheizt.

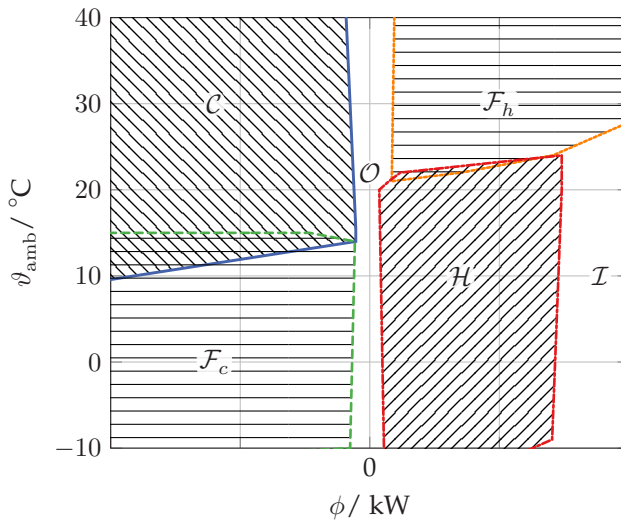


Abbildung 4.13 Regionenbasierte Darstellung für Teilmenge 1.

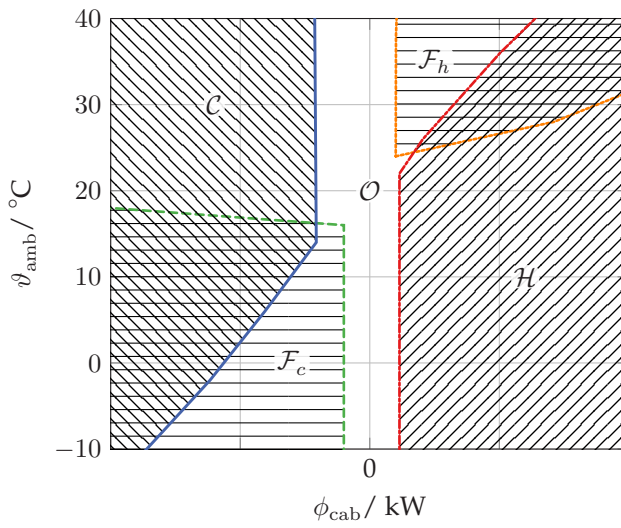


Abbildung 4.14 Regionenbasierte Darstellung für Teilmenge 2.

Ein analoges Verhalten ergibt sich für das Temperieren des Fahrgastraums (siehe Abb. 4.14). Der Unterschied beider Teilmengen ergibt sich durch die Wahl der Ventilstellungen und den konkreten Verlauf der Regionen. Die Wärmeerzeugung für den Fahrgastraum ist dabei nicht durch den Wärmeübertrager HX 1 begrenzt und ermöglicht daher höhere thermische Leistungen.

Wird in Teilmenge 1 zusätzlich das simultane Heizen des Fahrgastraums gefordert, so ist für das Kühlen der Batterie die Strategie entkoppelt und der Lüfter wird bei hohen bzw. der Heizer bei niedrigen Temperaturen zugeschaltet. Das Heizen der Batterie ist dagegen mit dem Heizvorgang des Fahrgastraums gekoppelt. Dies führt zu einer Aufteilung des Durchflusses in den Teilsträngen des Heizkreislaufs, wodurch ein höherer Durchfluss erforderlich wird und bei hohen thermischen Leistungen die Heizleistung erhöht werden muss. Die maximale thermische Leistungsgrenze verringert sich dadurch und die Region \mathcal{H} wird verkleinert. In gleicher Weise führt das simultane Kühlen der Batterie und des Fahrgastraums aufgrund deren Kopplung zu einer Verkleinerung der Region \mathcal{C} . Die Ergebnisse gelten gleichermaßen für die Teilmenge 2.

Teilmenge 3 Die nächste Teilmenge betrachtet den Einfluss der Temperatur des Traktionssystems. Die Verlustwärme kann prinzipiell eingesetzt werden, um die Batterie zu heizen. Da dies für das betrachtete Fahrzeugmodell energetisch günstiger ist, erhält man in Abb. 4.15 für Zielwerte $\phi > 0$ und ausreichend hohe Temperaturen ϑ_{tr} die zugehörige Steuerstrategie. Dabei wird das Ventil V9 geöffnet, sodass Wärme über den Wärmeübertrager HX 2 an den Batteriekreislauf übertragen wird. Für niedrige Temperaturen ϑ_{tr} muss über den Heizer geheizt werden. Die Kühlung der Batterie ($\phi < 0$) erfolgt für hohe Motortemperaturen über den Kompressor, da aufgrund der gewählten konstant hohen Umgebungstemperatur nicht über den Lüfter gekühlt werden kann. Für ein sehr kaltes Traktionssystem tritt eine Besonderheit auf. Vergleichbar mit der Abwärmenutzung wird das Traktionssystem statt als Wärmequelle als Wärmesenke genutzt und das für die Berechnung als wärmer festgelegte Kühlmittel abgekühlt.

Auf diese Weise wird mit eingeschalteter Pumpe P1 und geschlossenem Ventil V7 am Wärmetauscher HX 2 Wärme vom Batteriekreislauf in den Traktionskreislauf übertragen und die Batterie gekühlt.

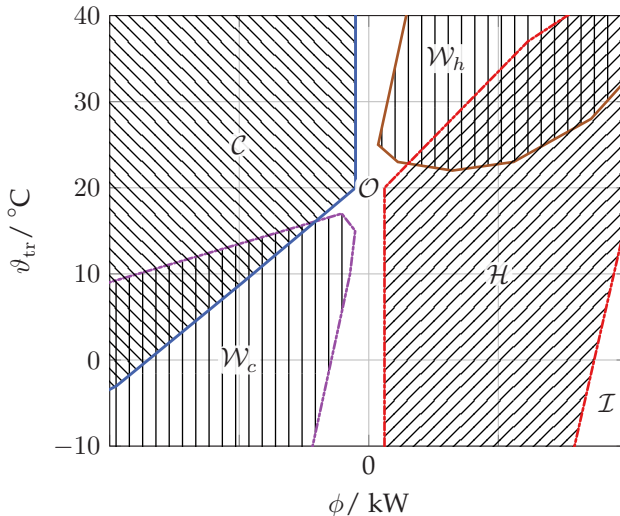


Abbildung 4.15 Regionenbasierte Darstellung für Teilmenge 3.

Teilmenge 4 Zuletzt wird das simultane Temperieren der Batterie, Kühlen des Traktionssystems und Heizen des Fahrgastraums analysiert. Das Traktionssystem und die Batterie weisen in dieser Teilmenge eine hohe Temperatur auf, der Fahrgastraum ist kalt. Die Ergebnisse werden in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur in Abb. 4.16 dargestellt. Zum Kühlen des Traktionssystems sind zu jeder Zeit der Lüfter und die Pumpe P1 aktiv und das Ventil V7 geöffnet. Mit zunehmender Umgebungstemperatur nimmt die Temperaturdifferenz ab, sodass die Lüfterdrehzahl und der Durchfluss der Pumpe P1 erhöht werden müssen. Das Kühlen der Batterie erfolgt für niedrige Kühlleistungen über den Lüfter und für hohe Kühlleistungen über den Kompressor, wobei die Umschaltgrenze mit steigender Umgebungstemperatur hin zu niedrigeren Kühlleistungen

abfällt. Das gleichzeitige Heizen des Fahrgastraums erfolgt durch Öffnen des Ventils V4 und Einschalten der Pumpe P3. Dabei wird für niedrige Umgebungstemperaturen der Heizer zugeschaltet. Bei hohen Umgebungstemperaturen kann über den Lüfter durch Öffnen des Ventils V6 geheizt werden. Die Region \mathcal{I} erstreckt sich über alle positiven thermischen Leistungen, da aufgrund der hohen Temperatur der Batterie keine positiven thermischen Leistungen an der Batterie generiert werden können.

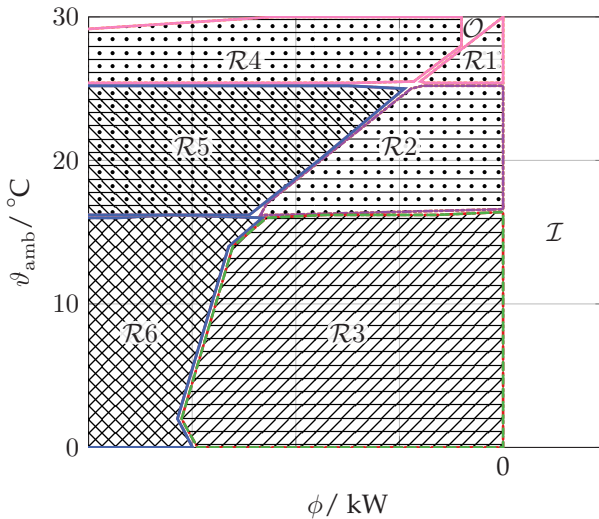



Abbildung 4.16 Regionenbasierte Darstellung für Teilmenge 4. Das Füllmuster  zeigt an, dass das Ventil V6 geöffnet ist. Die nummerierten Regionen \mathcal{R}_n stellen unterschiedliche Kombinationen von Steuergrößen dar.

Modifizierte Kühlkreislaufstruktur In [132] wurden für eine ähnliche Kühlkreislaufstruktur ähnliche Szenarien untersucht und führten zu vergleichbaren Ergebnissen. Aufgrund der modifizierten Kreislaufstruktur ist in [132] als zusätzlicher Fall die Abwärmenutzung vom On-Board-Lader für den Fahrgastraum, beispielsweise nach einem Schnellladevorgang, möglich. Die Anpassung der Struktur hin zur aktuellen Struktur aus Abb. 2.8 konnte im Rahmen dieser Arbeit mit geringem Entwicklungsauf-

wand durchgeführt werden. Die Anforderung hinsichtlich einer kurzen Entwicklungsdauer kann damit als erfüllt betrachtet werden. Für beide Strukturen können durch eine Erweiterung des Graphen mit entsprechend höherem Rechenaufwand weitere Ansätze berücksichtigt werden.

Reduzierte Steuerstrategien Die vorgestellte Methodik ermöglicht, eine Strategie mit geringer Speicheranforderung aus den Optimierungsergebnissen abzuleiten, wenn zusätzliches Expertenwissen berücksichtigt wird. Wenn man beispielsweise dem Expertenwissen feste Durchflüsse für die Pumpen definiert, dann können die optimalen Temperaturen bestimmt werden, bei denen zwischen Lüfterkühlung und Kompressorkühlung bzw. Abwärmenutzung und elektrischem Heizen umgeschaltet werden sollte.

Anwendung im Fahrzeug Mit der vorgestellten Methode wird im Entwicklungsprozess eine mehrdimensionale Wertetabelle berechnet. Aus den Ergebnissen der zuvor beschriebenen Teilmengen wird ersichtlich, wie die resultierende Steuerstrategie aussieht und dass diese dem zu erwarteten Vorgehen entspricht. Die Wertetabelle wird im Fahrbetrieb genutzt, um zu jedem Zeitpunkt dem aktuellen Zustand des Kühl- und Heizsystems einen Steuervektor zuzuordnen. Der resultierende Steuervektor wird im Fahrzeug direkt angewendet. Die Implementierung für den Fahrbetrieb ist somit sehr einfach zu realisieren.

5 Energiemanagement im Fahrbetrieb

Das Energiemanagement im Fahrzeug erfordert eine echtzeitfähige Strategie bei begrenzter Rechenleistung des Steuergerätes. Eine Methode, die Echtzeitfähigkeit zu erreichen, ist eine Heuristik bestehend aus einfachen Regeln, wie z. B. die nachfolgend vorgestellte schwellwertbasierte Referenzstrategie, zu definieren. Ein höheres Gütemaß kann mit modellbasierten Optimierungsmethoden erreicht werden. Im Bereich Hybridfahrzeuge haben sich für sehr ähnliche Problemstellungen zwei Ansätze bewährt, zum einen die Stochastische Dynamische Programmierung und zum anderen das Maximumprinzip von Pontrjagin. Für beide Methoden wird nachfolgend jeweils dargestellt, wie diese auf das fahrverlaufsabhängige Optimierungsproblem angewendet werden können.

5.1 Referenzstrategie

Die Referenzstrategie zur Bewertung der Optimierungsergebnisse definiert eine einfache Heuristik und beruht auf der Annahme, dass die Temperatur der Batterie den wesentlichen Einfluss auf die Alterung und die Fahrleistung hat und somit als Entscheidungskriterium eingesetzt wird. Hierzu werden zwei Schwellwerte ϑ^- und ϑ^+ definiert. Diese bestimmen, bis zu welcher unteren Temperatur ϑ^- mit maximaler Leistung geheizt wird und ab welcher oberen Temperaturgrenze ϑ^+ maximal gekühlt wird. Zwischen den Temperaturgrenzen wird nicht temperiert. Bei Temperaturen bis ϑ^- wird zudem das Laden der Batterie unterbunden, um eine zu starke Alterung der Batterie zu verhindern. Die zugehörigen Schwellwerte beschreiben den „idealen“ Betriebsbereich [156]. Es ist davon auszugehen,

dass in heutigen Fahrzeugen komplexere Strategien (z. B. unter Berücksichtigung des Ladezustands) eingesetzt werden. Diese sind nicht öffentlich zugänglich, sodass ein Vergleich mit diesen Strategien im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich war.

5.2 Stochastische Dynamische Programmierung

Der zukünftige Leistungsverlauf des Fahrzyklus ist im Allgemeinen nicht exakt bekannt. In diesem Fall kann eine stochastische Beschreibung des Fahrverhaltens verwendet werden, um eine im Mittel optimale Lösung zu bestimmen. Die in Abschnitt 3.5.4.1 vorgestellte Methode der Stochastischen Dynamischen Programmierung verknüpft die Dynamische Programmierung mit der Annahme eines bekannten stochastischen Prozesses für die Störgröße w , anstatt einen bekannten Verlauf anzunehmen. Das Ergebnis der Optimierung ist eine Wertetabelle, die in jedem Zeitschritt durch Interpolation dem aktuellen Zustand einen Steuervektor zuordnet. Damit ist implizit ein Regelungsgesetz gegeben. Die Anwendung der Methode auf das vorliegende Problem wird im Folgenden beschrieben.

5.2.1 Schätzung der Wahrscheinlichkeitsverteilung

Die Stochastische Dynamische Programmierung ermöglicht es, den stochastischen Prozess der Störgröße w bei der Optimierung zu berücksichtigen. Im vorliegenden Problem ist die Fahrleistung P_{tr} die Störgröße. Deren stochastischer Prozess kann durch den Übergang von der aktuellen Fahrleistung P_{tr}^i bei der Geschwindigkeit v^j zur nachfolgenden Fahrleistung P_{tr}^m beschrieben werden [74, 85, 92]. Die nachfolgende Geschwindigkeit v^m nach einem Zeitschritt der Länge Δt ergibt sich mit (4.3d) und der Näherung $P_{\text{res}} = \text{const.}$ bei bekannter Steigung deterministisch aus

$$v^m = \sqrt{\frac{2}{m} \left(\eta_{\text{tr}} P_{\text{tr}}^i - P_{\text{res}}^i \right) \Delta t + (v^j)^2}, \quad (5.1)$$

wobei für den Wirkungsgrad η_{tr} die Leistungsflussrichtung, also der motorische ($\eta_{\text{tr}} = \eta_{\text{tr,mot}}$) und generatorische ($\eta_{\text{tr}} = \eta_{\text{tr,gen}}^{-1}$) Fall, zu unterscheiden sind [85].

Es ergibt sich somit die eindimensionale Markov-Kette

$$\mathcal{P} \left(P_{\text{tr}}^m \mid P_{\text{tr}}^i, v^j \right) = p_{i,j,m}. \quad (5.2)$$

Die Transitionsmatrix¹ kann aus aufgezeichneten Leistungs- und Geschwindigkeitsverläufen geschätzt werden. Dazu werden die Leistungs- und Geschwindigkeitsverläufe quantisiert und die Anzahl $n_{i,j,m}$ der Zustandsübergänge

$$(P_{\text{tr}}^i, v^j)^{\text{T}} \rightarrow (P_{\text{tr}}^m, v^m)^{\text{T}} \quad (5.3)$$

ins Verhältnis zur Anzahl $n_{i,j}$ der aufgetretenen Zustände

$$(P_{\text{tr}}^i, v^j)^{\text{T}} \quad (5.4)$$

mit

$$p_{i,j,m} = \frac{n_{i,j,m}}{n_{i,j}} \quad \text{und} \quad n_{i,j} \neq 0 \quad (5.5)$$

gesetzt. Wird der Zeitpunkt k des Auftretens des Zustands $(P_{\text{tr}}^i, v^j)^{\text{T}}$ nicht betrachtet, so ergibt sich eine stationäre Transitionsmatrix.

¹ Prinzipiell ist denkbar mehrere Transitionsmatrizen jeweils in Abhängigkeit von weiteren Einflüssen zu bestimmen, z. B. dem Fahrertyp.

5.2.2 Erweiterung des Zustandsvektors

Die Zufallsgrößen P_{tr}^i und v^j beeinflussen den nachfolgenden Zustand und müssen daher in der Problemformulierung berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wird der Zustandsvektor wie folgt erweitert:

$$\mathbf{x} = (\xi, \vartheta, \Gamma, P_{\text{tr}}, v)^T. \quad (5.6)$$

Für das diskrete Problem werden die Zustände P_{tr} und v mit ΔP_{tr} bzw. Δv diskretisiert.

5.2.3 Anwendung im Fahrzeug

Die Anwendung der Stochastischen Dynamischen Programmierung im Fahrzeug ist für das vorliegende Problem in Abb. 5.1 dargestellt. Im Entwicklungsprozess wird eine zeitabhängige Wertetabelle berechnet. Anhand des aktuellen Zustands wird aus der Wertetabelle durch Interpolation der zugehörige Steuervektor ausgewählt und angewendet.

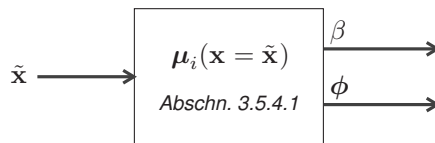


Abbildung 5.1 Energiemanagement bei Anwendung der Stochastischen Dynamischen Programmierung im Fahrzeug.

Durch die Erweiterung des Zustandsvektors steigt der Rechenaufwand für die vorliegende Problemstellung erheblich an und kann mit einem aktuellen² herkömmlichen Desktop-Rechner (16 GB RAM) nicht mit ausreichend hoher Diskretisierung der Zustandswerte gelöst werden. Zudem ist eine große Menge an gemessenen Fahrdaten erforderlich, um eine aussagekräftige statistische Auswertung durchzuführen. Eine mögliche Vereinfachung

² Stand: 2016

zur Lösung wäre, die Alterung in der Kostenfunktion zu berücksichtigen und dadurch zu minimieren. Damit würden der Alterungszustand nicht explizit berücksichtigt werden und der Rechenaufwand deutlich sinken. Der Ansatz wird in [80] beschrieben, stellt aber eine grundlegende Abweichung vom gestellten Problem dar. Aus den genannten Gründen wird daher die Anwendung der Stochastischen Dynamischen Programmierung für das vorliegende Problem nicht weiter vertieft.

5.3 Maximumprinzip von Pontrjagin

Das Maximumprinzip von Pontrjagin definiert notwendige Bedingungen für die optimale Lösung der Problemstellung. Unter bestimmten Voraussetzungen können diese Bedingungen analytisch gelöst werden. Damit reduziert sich das Problem auf die Berechnung elementarer Gleichungen und die Schätzung des initialen Kozustands. Dadurch ist zum einen eine analytische Lösung gegeben, die direkt für andere Fahrzeugparameter angewendet werden kann, zum anderen können zusätzliche Informationen, wie Routeninformationen, in die Schätzung des initialen Kozustands einfließen. Der Nachweis, dass die notwendigen Bedingungen auch hinreichend sind, kann nur für bestimmte Problemstellungen geführt werden [45]. In dieser Arbeit werden daher die Ergebnisse des Maximumprinzips mit den Ergebnissen der Dynamischen Programmierung verglichen, um die Gültigkeit der Bedingungen zu prüfen. Im Folgenden werden zunächst die notwendigen Bedingungen für die optimale Lösung nach dem Maximumprinzip von Pontrjagin hergeleitet. Im nächsten Schritt werden die Voraussetzungen für eine analytische Lösung untersucht und eine Regelungsstrategie entwickelt. Abschließend wird die Regelungsstrategie mittels des Simulationsmodells aus Abschnitt 2.7 bewertet.

5.3.1 Zustandsgleichungen und -grenzen

Die Zustandsgleichungen sind gegeben durch (4.3). Im Fahrbetrieb können die Fahrleistung und damit Fahrleistungsbegrenzungen $\alpha(t) > 0$ über lange Zeiträume nur ungenau vorhergesagt werden. Aus diesem Grund

wird die Fahrleistung nur durch den Kostenanteil Π berücksichtigt und $\omega_\alpha = 0$ gesetzt. Damit kann auch die Geschwindigkeit v im Zustandsvektor unberücksichtigt bleiben. Es ergeben sich somit drei Zustände, für die die jeweils zugehörigen Kozustände ψ_ξ , ψ_ϑ und ψ_Γ eingeführt werden. Entsprechend (3.31) folgt für die Hamilton-Funktion der Zusammenhang

$$\mathcal{H} = -J + \psi_\xi \dot{\xi} + \psi_\vartheta \dot{\vartheta} + \psi_\Gamma \dot{\Gamma} \quad (5.7)$$

$$\mathcal{H} = \frac{-I_b}{Q_0} - \omega_\Pi \Pi \quad (5.8)$$

$$- \psi_\xi \frac{I_b}{Q_0} + \psi_\vartheta \frac{I_b^2 R + \phi + \phi_{\text{ext}}}{C_{\text{th},b}} - \psi_\Gamma \frac{1}{\Gamma_{\text{ref}}} \lambda. \quad (5.9)$$

Die Zustände des vorliegenden Problems müssen innerhalb der definierten Zustandsgrenzen (2.13) und (2.15) liegen. Der minimale Ladezustand sollte während des normalen Fahrbetriebs nicht auftreten, da andernfalls das Fahrzeug nicht bis zur nächsten Ladestation gefahren werden kann. Der maximale Ladezustand tritt nach jeder Vollladung auf. Allerdings fällt dieser im Fahrbetrieb aufgrund der erforderlichen Antriebsleistung sofort ab und kann nur in seltenen Situationen³ während der Fahrt noch erreicht werden. Die Lebensdauer der Batterie wird zu hohen Temperaturen hin deutlich verkürzt. Für sehr niedrige Temperaturen ist die verfügbare Fahrleistung stark begrenzt. Damit sollte eine optimale Steuerstrategie immer von den Betriebsgrenzen wegführen. Dadurch wäre implizit berücksichtigt, dass die Temperaturgrenzen möglichst nicht während der Fahrt erreicht werden. Durch eine übergelagerte Strategie muss zudem verhindert werden, dass eine Fahrt außerhalb der Temperaturgrenzen stattfindet. Prinzipiell lassen sich die Zustandsgrenzen bei der Optimierung mittels des Maximumprinzips von Pontrjagin berücksichtigen. Dies führt auf zusätzliche Bedingungen für die Trajektorie auf dem Zustandsrand und Sprungbedingungen für den Übergang zwischen zulässigem Zustandsraum und Zustandsrand [27, 109], wodurch die mathematische

³ Beispielsweise nach Laden der Batterie auf einer deutlich höheren geografischen Höhe und anschließender Bergabfahrt.

Lösung deutlich schwieriger wird [2, 41, 45, 109]. Da die Zustandsgrenzen für den Ladezustand nur in seltenen Situationen relevant sind, die Temperaturgrenzen indirekt über die Lebensdauernforderung berücksichtigt werden und aufgrund der hohen elektrischen und thermischen Kapazität ein schneller Ladezustands- und Temperaturwechsel nicht möglich ist, werden zugunsten einer vereinfachten Lösung die Zustandsgrenzen für das Maximumprinzip nicht berücksichtigt. Es wird stattdessen durch eine übergeordnete Strategie abgesichert, dass die Zustandsgrenzen nicht verletzt werden und das Maximumprinzip nur innerhalb der Zustandsgrenzen eingesetzt wird. Die übergeordnete Strategie umfasst dabei das Heizen bzw. Kühlen bis zum Erreichen der Zustandsgrenzen sowie die Begrenzung der Ladeleistung bei hohem Ladezustand.

5.3.2 Koppelgleichung

Durch analytische Extremwertbildung der Hamilton-Funktion können die möglichen Lösungskandidaten auf die Randpunkte sowie die Extrema zwischen den Randpunkten reduziert werden [103, 135]. In [2] wird dieses Vorgehen angewendet und als *selective Hamiltonian minimization* bezeichnet. Die notwendige Voraussetzung ist, dass die Hamilton-Funktion stückweise differenzierbar ist und die erste Ableitung der Hamilton-Funktion analytisch nach der Steuergröße aufgelöst werden kann. Dabei kann eine Fallunterscheidung, z. B. nach der aktuellen Fahrsituation (Antreiben, Bremsen), durchgeführt werden [135]. Die Koppelgleichung (3.34) kann im vorliegenden Fall nicht explizit nach den Steuergrößen \mathbf{u} aufgelöst werden und soll daher in der allgemeinen Form

$$\mathbf{u}^o = \arg \max_{\mathbf{u} \in \mathcal{U}} \mathcal{H} \quad (5.10)$$

eingesetzt werden.

5.3.3 Kozustandsdifferenzialgleichungen

Die Kozustandsdifferenzialgleichungen ergeben sich aus (5.9) und (3.33) zu

$$\begin{aligned} \dot{\psi}_\xi = -\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \xi} = & -\frac{\partial I_b}{C_b \partial \xi} - \omega_\Pi \frac{\partial P_{\max}}{P_{\max, \text{req}} \partial \xi} + \psi_\xi \frac{\partial I_b}{C_b \partial \xi} \\ & - \psi_\vartheta \frac{\frac{\partial R}{\partial \xi} I_b^2 + 2 \frac{\partial I_b}{\partial \xi} I_b R}{C_{\text{th}, b}} + \psi_\Gamma \frac{\partial \lambda}{\Gamma_{\text{ref}} \partial \xi} \end{aligned} \quad (5.11a)$$

$$\begin{aligned} \dot{\psi}_\vartheta = -\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \vartheta} = & \frac{\partial I_b}{C_b \partial \vartheta} - \omega_\Pi \frac{\partial P_{\max}}{P_{\max, \text{req}} \partial \vartheta} + \psi_\xi \frac{\partial I_b}{C_b \partial \vartheta} \\ & - \psi_\vartheta \frac{\frac{\partial R}{\partial \vartheta} I_b^2 + 2 \frac{\partial I_b}{\partial \vartheta} I_b R}{C_{\text{th}, b}} + \psi_\Gamma \frac{\partial \lambda}{\Gamma_{\text{ref}} \partial \vartheta} \end{aligned} \quad (5.11b)$$

$$\dot{\psi}_\Gamma = -\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \Gamma} = 0. \quad (5.11c)$$

Aus (5.11) wird ersichtlich, dass die beiden Kozustände ψ_ξ und ψ_ϑ sich zeitlich ändern und gekoppelt sind. Zudem ist die zeitliche Änderung der beiden Kozustände abhängig von der Ableitung mehrerer Größen nach den Zustandsgrößen. Der Kozustand ψ_Γ ist konstant.

5.3.4 Transversalitätsbedingung

Der Zustandsvektor \mathbf{x} ist im Endpunkt frei, damit ergeben sich aus (3.35) die Transversalitätsbedingungen

$$\psi_{\xi, e} = -\left. \frac{\partial h}{\partial \xi} \right|_{t_e} = 0 \quad (5.12a)$$

$$\psi_{\vartheta, e} = -\left. \frac{\partial h}{\partial \vartheta} \right|_{t_e} = 0 \quad (5.12b)$$

$$\psi_{\Gamma, e} = -\left. \frac{\partial h}{\partial \Gamma} \right|_{t_e} = \omega_\Gamma \frac{(\Gamma_e - a_1)(2 + \nu(2 + a_1 a_2 - a_2 \Gamma_e))}{(1 + \nu)^2} \quad (5.12c)$$

mit

$$\nu = \exp(a_2 \Gamma_e + a_3). \quad (5.12d)$$

5.3.5 Lösung des Differenzialgleichungssystems

Die Gleichungen (3.32) und (5.11) bis (5.12c) lassen sich prinzipiell direkt anwenden, um eine zeitdiskrete Steuerungsstrategie zu bestimmen. Hierfür müssen die Anfangswerte der Kozustände ψ_0 bekannt sein, welche zum bekannten Endzeitpunkt auf die Transversalitätsbedingungen (5.12c) führen. Dabei wird schrittweise der Steuerwert u , für den die Hamilton-Funktion maximal wird, analytisch oder numerisch bestimmt. Anschließend werden die adjungierte Kozustandsgleichung und die Zustandsdifferenzialgleichungen für eine gegebene Schrittweite durch eine bekannte Lösung des Differenzialgleichungssystems oder durch numerische Integration berechnet.

Eine analytische Lösung des vollständigen Differenzialgleichungssystems kann mit gängigen Methoden nicht hergeleitet werden. Die numerische Berechnung erfordert eine sehr hohe Rechenzeit, da in jedem Schritt das gekoppelte Differenzialgleichungssystem numerisch integriert werden muss. Daher werden vereinfachende Annahmen getroffen, um eine analytische Lösung zu bestimmen. Es hat sich gezeigt, dass unter den folgenden Annahmen die Lösung des Differenzialgleichungssystems für einen Zeitschritt bestimmt werden kann:

- Der Innenwiderstand R und die Leerlaufspannung U_{oc} sind konstant ($\frac{\partial R}{\partial \xi} = \frac{\partial R}{\partial \vartheta} = \frac{\partial U_{oc}}{\partial \xi} = 0$).
- Die aktuell verfügbare Maximalleistung P_{max} hängt nur von der Temperatur ab ($\frac{\partial P_{max}}{\partial \xi} = 0$).
- Die Alterung λ in der Zustandsgleichung (4.3c) ist konstant.
- Der Einfluss des Ladezustands ξ auf die Alterung kann vernachlässigt werden ($\frac{\partial \lambda}{\partial \xi} \approx 0$).

Durch die getroffenen Annahmen ergibt sich eine Abhängigkeit vom gewählten Parametersatz, daher müssen diese Annahmen vor der Anwendung auf einen anderen Parametersatz kritisch geprüft werden. Der Einfluss der Annahmen auf die Optimalität für den gewählten Parametersatz wird in Abschnitt 5.3.7 untersucht.

Aus den genannten Annahmen resultiert während eines Zeitschritts ein konstanter Strom I_b und es gilt

$$\frac{\partial I_b}{\partial \xi} = \frac{\partial I_b}{\partial \vartheta} = 0. \quad (5.13)$$

Die Kozustandsdifferenzialgleichungen (5.11) vereinfachen sich damit zu

$$\dot{\psi}_\xi = 0 \quad (5.14a)$$

$$\dot{\psi}_\vartheta = \psi_\Gamma \frac{\partial \lambda}{\Gamma_{\text{ref}} \partial \vartheta} + \omega_\Pi \frac{\partial P_{\text{max}}}{P_{\text{max, req}} \partial \vartheta} \quad (5.14b)$$

$$\dot{\psi}_\Gamma = 0. \quad (5.14c)$$

Mit (5.14a) und unter Berücksichtigung der Transversalitätsbedingung (5.12a) gilt somit

$$\psi_\xi(t) = 0. \quad (5.15)$$

Die Lösung des aus (3.32) und (5.14) resultierenden Differenzialgleichungssystems kann nun analytisch bestimmt werden und ergibt

$$\xi(t) = \xi_0 - t \frac{I_b}{C} \quad (5.16a)$$

$$\vartheta(t) = \vartheta_0 + t \dot{\vartheta} \quad (5.16b)$$

$$\Gamma(t) = \Gamma_0 - t \frac{\lambda(\vartheta_0, I_b)}{\Gamma_{\text{ref}}} \quad (5.16c)$$

$$\psi_\xi(t) = 0 \quad (5.16d)$$

$$\psi_\vartheta(t) = \psi_{\vartheta,0} + \begin{cases} \Delta\psi_{\vartheta,1} & \text{für } \dot{\vartheta} = 0 \\ \Delta\psi_{\vartheta,2} & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.16e)$$

$$\psi_\Gamma(t) = \psi_{\Gamma,e} \quad (5.16f)$$

mit

$$\Delta\psi_{\vartheta,1} = t \left(\psi_\Gamma \frac{\partial \lambda(I_b = 0)}{\Gamma_{\text{ref}} \partial \vartheta} + \omega_\Pi \frac{\partial P_{\text{max}}}{P_{\text{max,req}} \partial \vartheta} \right) \quad (5.16g)$$

$$\Delta\psi_{\vartheta,2} = \frac{1}{\dot{\vartheta}} \left(\psi_\Gamma \frac{\Delta \lambda}{\Gamma_{\text{ref}}} - \omega_\Pi \frac{\Delta P_{\text{max}}}{P_{\text{max,req}}} \right) \quad (5.16h)$$

$$\Delta P_{\text{max}} = P_{\text{max}}(\vartheta_0) - P_{\text{max}}(\vartheta(t)) \quad (5.16i)$$

$$\dot{\vartheta} = \frac{I_b^2 R + \phi + \phi_{\text{ext}}}{C_{\text{th,b}}} . \quad (5.16j)$$

Aus dem Alterungsmodell (2.18) folgt

$$\begin{aligned} \lambda(\vartheta_0, I_b) &= a_{\text{cal}} \exp \left(b_{\text{cal}} \xi - \frac{E_{\text{a,cal}}}{R T_0} \right) x t_0^{x-1} \\ &+ a_{\text{cyc}} \exp \left(-\frac{E_{\text{a,cyc}}}{R T_0} \right) Q_{\text{As},0}^{z-1} |I_b| \\ &+ a_{\text{pla}} \lambda_{\text{pla}}(\vartheta_0) \end{aligned} \quad (5.17)$$

sowie

$$\frac{\partial \lambda(I_b = 0)}{\partial \vartheta} = \frac{a_{\text{cal}} E_{\text{a,cal}}}{R T_0^2} \exp \left(b_{\text{cal}} \xi - \frac{E_{\text{a,cal}}}{R T_0} \right) x t_0^{x-1} \quad (5.18)$$

und

$$\begin{aligned}
 \Delta\lambda &= \lambda(\vartheta(t)) - \lambda(\vartheta_0) \\
 &= a_{\text{cal}} E_{\text{a,cal}} \exp(b_{\text{cal}}\xi) f_E(E_{\text{a,cal}}) x t_0^{x-1} \\
 &\quad + a_{\text{cyc}} f_E(E_{\text{a,cyc}}) Q_{\text{As},0}^{z-1} |I_b| \\
 &\quad + a_{\text{pla}} (\lambda_{\text{pla}}(\vartheta_e) - \lambda_{\text{pla}}(\vartheta_0))
 \end{aligned} \tag{5.19}$$

mit

$$f_E(E_a) = \exp\left(-\frac{E_a}{R T_e}\right) - \exp\left(-\frac{E_a}{R T_0}\right). \tag{5.20}$$

Die Ableitung

$$\frac{\partial P_{\text{max}}}{\partial \vartheta} \tag{5.21}$$

wird in dieser Arbeit durch numerische Gradientenbildung bestimmt, da kein analytischer Zusammenhang vorliegt. Die Lösung $\mathbf{q}(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, \psi_k)$ aus (5.16) ermöglicht eine deutliche Rechenzeitverkürzung für die Berechnung eines Zeitschritts. Die Gesamtlösung ergibt sich damit unter Annahme eines bekannten initialen Kozustands durch schrittweise Anwendung von (5.10) und der Lösung (5.16) sowie Einsetzen des zugrunde gelegten Verlaufs der Fahrleistung $P_{\text{tr}}(t)$.

5.3.6 Schätzung der Anfangswerte der Kozustände

Das Optimierungsproblem reduziert sich durch das Maximumprinzip von Pontrjagin im Fahrzeug auf die Schätzung der Anfangswerte der Kozustände $(\psi_{\vartheta,0}, \psi_{\Gamma,0})^T$, die die Transversalitätsbedingungen (5.12c) bei Fahrtende t_e erfüllen. Die Schätzung kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. In [26] und [71] wird eine iterative Suche mit einem Shooting-Algorithmus durchgeführt. Eine Suche von zwei Seiten (engl. *dichotic search*), begründet durch die gegebenen Anfangs- und Endbedingungen, wird in [125] für die Offlineoptimierung verwendet und ein zustandsabhängiger Schätzwert

bei der Onlineoptimierung bestimmt. Die Arbeit [83] untersucht eine große Menge von Anfangswerten und wählt den Wert aus, der die gestellten Anforderungen am besten erfüllt. In dieser Arbeit wird der zuletzt genannte Ansatz angewendet.

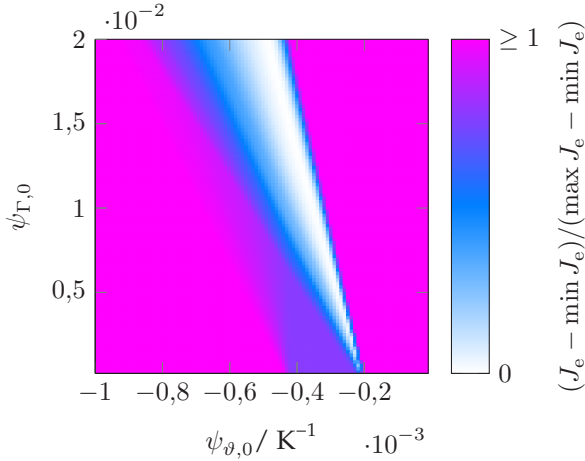


Abbildung 5.2 Resultierendes Kennfeld für die Gesamtkosten abhängig von den Anfangswerten der Kozustände für den WLTP/C3-Fahrzyklus mit $\vartheta_0 = 40^\circ\text{C}$ und $\xi_0 = 0,8$.

Die Menge an Anfangswerten kann unabhängig voneinander durch parallele Berechnung untersucht werden.⁴ Die Transversalitätsbedingungen können bei der numerischen Berechnung nie exakt erfüllt werden. Es hat sich gezeigt, dass eine Verringerung des euklidischen Abstands der Endzustände ψ_e von der geforderten Transversalitätsbedingung nicht zwingend eine Verbesserung der Kosten $J(t_e)$ bedeutet. Aus diesem Grund werden die Anfangswerte der Kozustände anhand der Endkosten $J(t_e)$ bewertet und ausgewählt. Damit wird sichergestellt, dass auch bei einer kleinen Menge an betrachteten Werten diejenigen mit den geringsten Endkosten ausgewählt werden. Das Ergebnis für eine Menge an möglichen Anfangswerten der Kozustände für einen gegebenen Fahrzyklus und gegebenem

⁴ Sollen im Entwicklungsprozess die Anfangswerte der Kozustände weiter verbessert werden, so hat sich für das vorliegende Problem die *particle swarm optimization* [70, 129] bewährt.

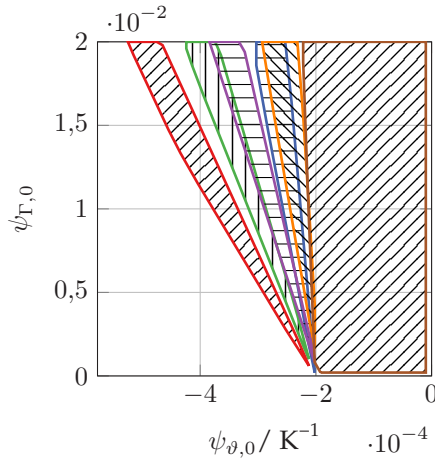


Abbildung 5.3 Anfangswerte der Kozustände abhängig von Anfangstemperatur und Fahrzyklus mit Endkosten $J_e \leq 1,001 J_e^0$ mit \square : WLTP/C3, $\vartheta_0 = 30^\circ\text{C}$; \square : WLTP/C3, $\vartheta_0 = 35^\circ\text{C}$; \square : WLTP/C3, $\vartheta_0 = 38^\circ\text{C}$; \square : WLTP/C3, $\vartheta_0 = 40^\circ\text{C}$; \square : FTP75, $\vartheta_0 = 38^\circ\text{C}$ und \square : FTP75, $\vartheta_0 = 40^\circ\text{C}$.

Anfangszustand ist in Abb. 5.2 gezeigt. Aus Abb. 5.3 geht zudem hervor, dass die zu betrachtende Menge an Anfangskozuständen durch die Temperatur und den Fahrzyklus begrenzt wird und somit auch der Rechenaufwand begrenzt werden kann.

5.3.7 Ergebnisse der Optimierung

Die berechneten Anfangswerte werden für mehrere Fälle unter Annahme eines bekannten Fahrverlaufs beispielhaft angewendet. Es wird zum einen der Fall hoher Temperaturen, bei dem aufgrund der beschleunigten Alterung gekühlt wird, und zum anderen der Fall niedriger Temperaturen betrachtet, bei dem zum Erreichen der minimal verfügbaren Antriebsleistung geheizt wird. Die Ergebnisse sind in Abb. 5.4, Abb. 5.5 und Abb. 5.6 gezeigt. Zum Vergleich sind die zugehörigen Ergebnisse der Dynamischen Programmierung dargestellt, um die getroffenen Vereinfachungen zu bewerten. Die Unterschiede beider Methoden resultieren aus der Zeit- und

Wertdiskretisierung bei der Dynamischen Programmierung und der begrenzten Genauigkeit der Anfangswerte der Kozustände beim Maximumprinzip. Die Abweichungen sind für alle drei Ergebnisse gering, sodass die getroffenen Vereinfachungen auf eine Strategie nahe am Optimum führen. Da Maximumprinzip (MP) und Dynamische Programmierung (DP) mit den gleichen Vereinfachungen nahezu gleiche Ergebnisse liefern, sei im Folgenden angenommen, dass die notwendigen Bedingungen des Maximumprinzips für das vorliegende Problem auch hinreichend sind. Der Kozustand ψ_{Γ} ist konstant. Für den Kozustand ψ_{ϑ} kann anhand der Darstellung der Steuergröße in Abb. 5.7 für gegebene Zustandsgrößen ξ , ϑ und Störgröße P_{tr} die allgemeine Strategie nachvollzogen werden. Der initiale Kozustand $\psi_{\vartheta,0}$ nimmt abhängig von den Anfangszuständen \mathbf{x}_0 einen negativen oder positiven Wert an und strebt im Endpunkt entsprechend der Transversalitätsbedingung (5.12c) gegen den Wert $\psi_{\vartheta,e} = 0$.

5.3.8 Anwendung im Fahrzeug

Die Ergebnisse aus dem vorherigen Abschnitt beruhen auf einem exakt bekannten Störgrößenverlauf und der direkten Auswirkung der thermischen Leistung auf die Batterie. Daher wird im folgenden Schritt die Methode von einer Steuerung durch Rückführung des aktuellen Zustands zu einer Regelung weiterentwickelt. Dabei wird der Störgrößenverlauf geschätzt und die Stellgrößen der Komponenten des Fahrzeugs werden basierend auf dem Ergebnis aus Abschnitt 4.3 gewählt. Der Einsatz im Fahrzeug wird mittels des Simulationsmodells eines Forschungsfahrzeugs aus Abschnitt 2.7 bewertet. Das Simulationsmodell berücksichtigt gegenüber dem Modell der Optimierung insbesondere die Temperaturen und Laufzeiten der Kühlmittelflüssigkeiten sowie das Anlauf- und Abfahrverhalten des Kompressors, was zu einer Verzögerung der Auswirkung der Kühl- und Heizleistungsanforderung führt.

Die grundsätzliche Anwendung der beiden in Abschnitt 4.1 entkoppelten Optimierungsprobleme ist in Abb. 5.8 dargestellt. Anhand der Routenplanung vom Fahrer (Route) und weiteren zur Verfügung stehenden Informationen (\mathcal{I}) wird der Fahrverlauf $\hat{P}_{tr}(t)$ geschätzt. Darauf basierend wird

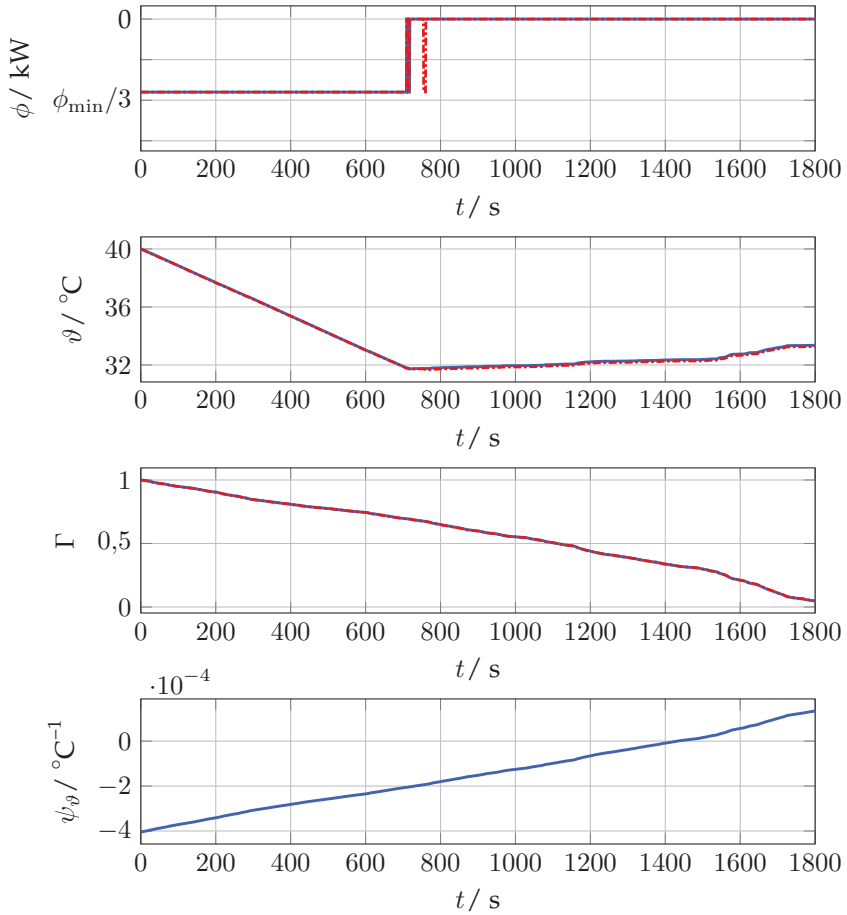


Abbildung 5.4 Vergleich der Ergebnisse von MP und DP für den WLTP/C3-Fahrzyklus, $\vartheta_0 = 40^\circ\text{C}$, —: MP, - - -: DP.

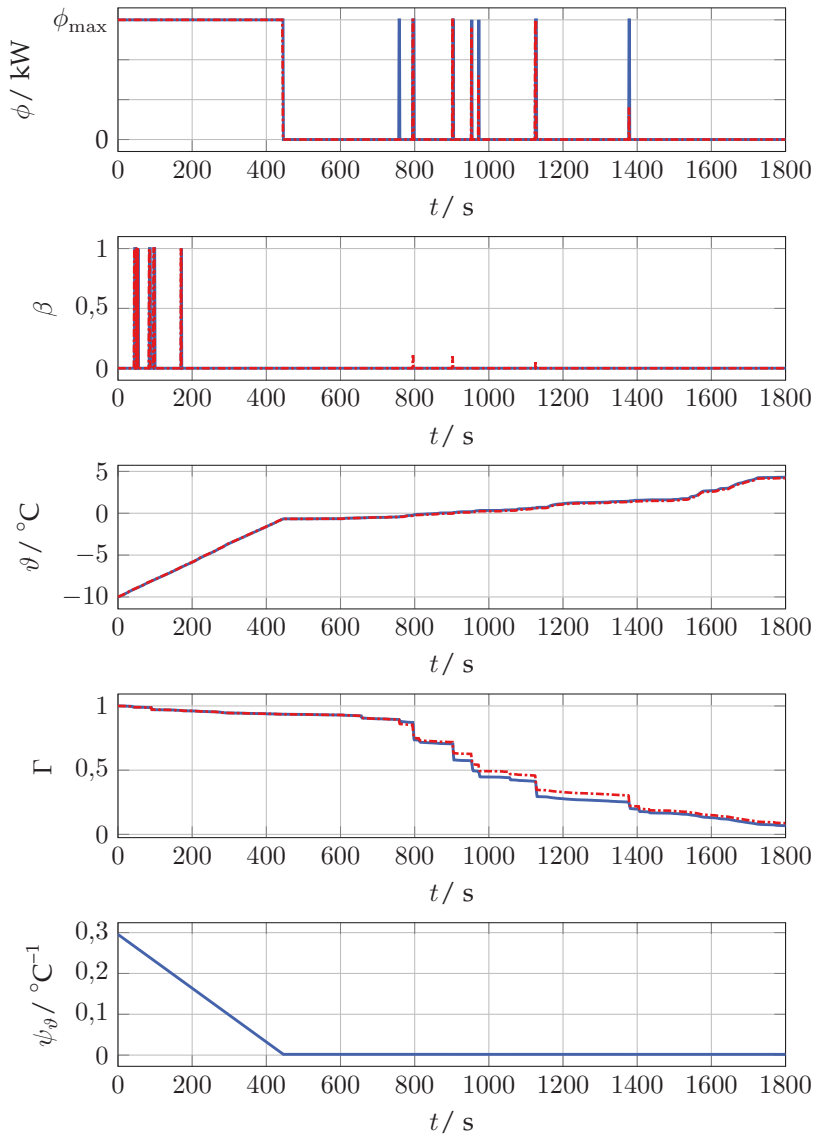


Abbildung 5.5 Vergleich der Ergebnisse von MP und DP für den WLTP/C3-Fahrzyklus unter Berücksichtigung der verfügbaren Antriebsleistung ($\omega_{\Pi} \geq 0$), $\vartheta_0 = -10^\circ\text{C}$, —: MP, - - -: DP.

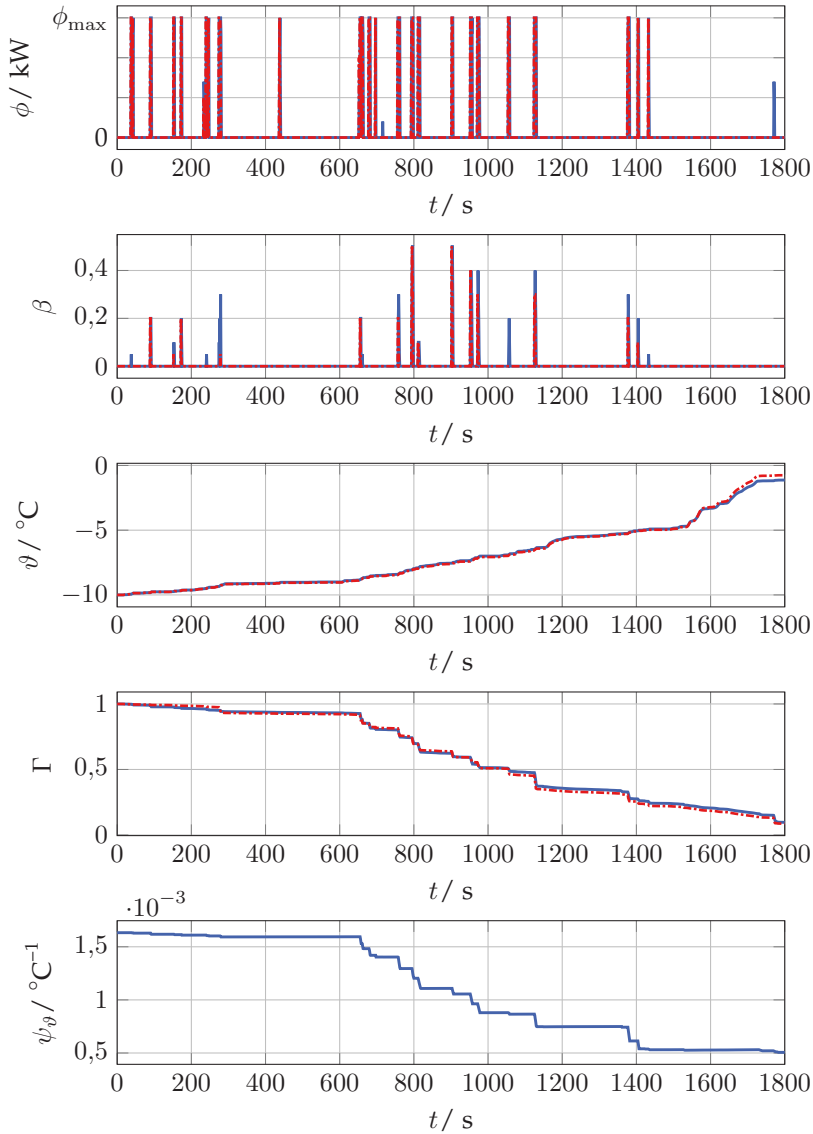


Abbildung 5.6 Vergleich der Ergebnisse von MP und DP für den WLTP/C3-Fahrzyklus ohne Berücksichtigung der verfügbaren Antriebsleistung ($\omega_{II} = 0$), $\vartheta_0 = -10^\circ C$, —: MP, - - -: DP.

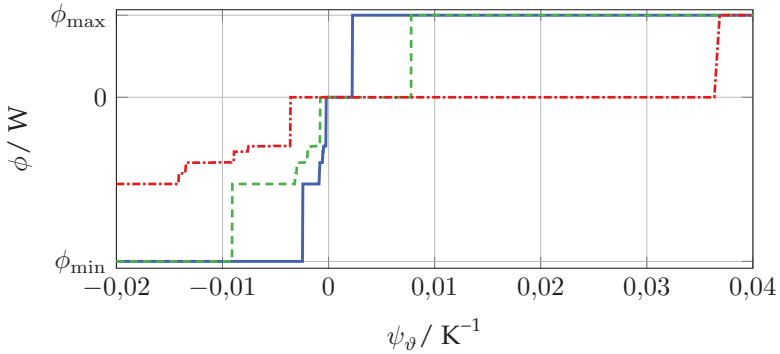


Abbildung 5.7 Steuerstrategie in Abhängigkeit vom Kozustand bei Ladezustand $\xi = 0,8$ und unterschiedlicher Fahrleistung sowie Temperatur mit —: $\psi_\Gamma = 18,3492$; $\vartheta = 40^\circ\text{C}$; $P_{\text{tr}} = 40\text{ kW}$; - - - : $\psi_\Gamma = 0,11283$; $\vartheta = 10^\circ\text{C}$; $P_{\text{tr}} = -20\text{ kW}$; - · - · : $\psi_\Gamma = 1,4436$; $\vartheta = 40^\circ\text{C}$; $P_{\text{tr}} = 40\text{ kW}$.

mittels des Maximumprinzips eine Optimierung durchgeführt, woraus sich die Steuerungsstrategie für β und die thermischen Leistungen an den Komponenten ϕ ergeben. Mit der offline durchgeführten Optimierung aus Abschnitt 4.3 wird den thermischen Leistungen der Steuervektor der Nebenverbraucher \mathbf{u}_{aux} zugeordnet. Der Steuervektor \mathbf{u}_{aux} beinhaltet z. B. die Drehzahl des Kompressors und die Solldurchflusswerte der Pumpen. Da häufiges An- und Ausschalten der Pumpen sich negativ auf die Lebensdauer der Pumpen auswirken kann, werden die Pumpen erst dann zugeschaltet bzw. abgeschaltet, wenn diese eine definierte Dauer (in dieser Arbeit $t_{\text{pmp}} = 10\text{ s}$) eingeschaltet bzw. abgeschaltet werden soll. Das Kühlmittel dient dabei als thermischer Speicher, sodass sich die eingebrachte bzw. abgeführte Wärme zu einem späteren Zeitpunkt positiv auswirkt. Die Energiemanagementstrategie ist in Abb. 5.9 dargestellt und umfasst die folgenden Schritte. Der geschätzte Fahrverlauf fließt zusammen mit den im Fahrzeug ermittelten Zustandswerten $\hat{\mathbf{x}}$ in die Schätzung des Anfangswertes des Kozustandsvektors ψ_0 ein. Zu Fahrtbeginn wird der aktuelle Anfangswert mittels einer im Entwicklungsprozess berechneten Wertetabelle $\psi_0 = f(\vartheta, \xi, \dots)$ ermittelt. Anschließend wird im Fahrbetrieb eine verbesserte Schätzung der Fahrleistung durchgeführt und darauf ba-

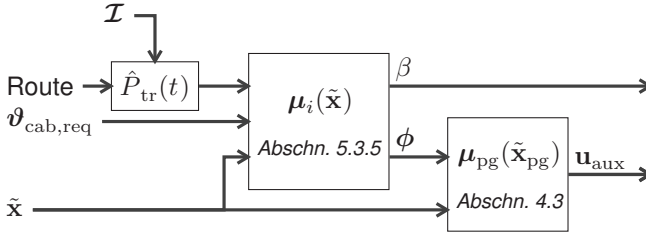


Abbildung 5.8 Struktur des Energiemanagements im Fahrzeug.

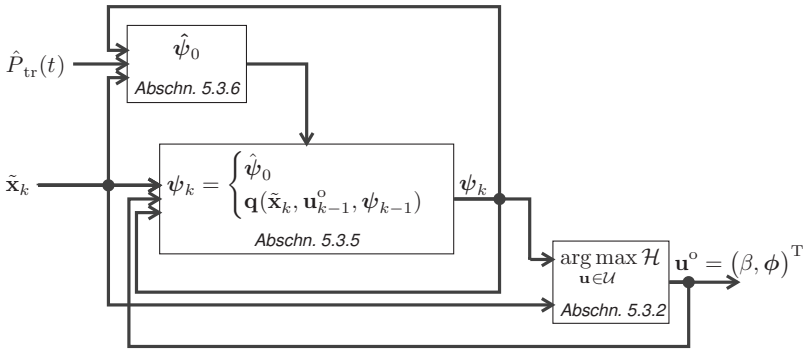


Abbildung 5.9 Energiemanagement bei Anwendung des Maximumprinzips im Fahrzeug.

sierend der Kozustand geschätzt. Im Fahrbetrieb ist die Rechenzeit für die Schätzung stark begrenzt. Daher werden ausgehend vom aktuellen Wert des Kozustandsvektors entsprechend Abschnitt 5.3.6 die resultierenden Kosten durch definierte Menge von Anfangswerten oder Optimierungsverfahren mit einer zeitlich begrenzten Laufzeit berechnet. Der Kozustandsvektor mit minimalen Endkosten wird als neuer Anfangswert gesetzt. Der Anfangswert $\hat{\psi}_0$ wird in definierten Zeitabständen basierend auf den aktuellen Zustandswerten und zu definierten Ereignissen entsprechend Abschnitt 5.3.6 neu geschätzt und überschreibt den aktuellen Wert. Die Menge möglicher Anfangswerte kann dabei abhängig vom aktuellen Zustand \mathbf{x} und Kozustand ψ beschränkt werden, um die Rechenzeit zu verkürzen. Damit geht die bisherige Steuerung in eine Regelung über

und berücksichtigt die auftretende Abweichung der Zustandswerte von den prädizierten Zustandswerten. Die Ursachen für die Abweichung sind dabei ein abweichender Fahrverlauf, ein ungenau geschätzter Fahrverlauf und das vereinfachte Optimierungsmodell, das für die Anfangswertschätzung zugrunde gelegt wurde. Eine Aktualisierung des Kozustands erfolgt außerdem, wenn eine Änderung der Routeninformation auftritt oder der Kozustand $\psi_{\vartheta,k+1}$ den Wert $\psi_{\vartheta,k+1} = 0$ annimmt, da in diesem Fall die Transversalitätsbedingung erfüllt ist.

5.3.9 Simulationsergebnisse

Das Maximumprinzip wurde bisher auf das zugrunde gelegte Optimierungsmodell angewendet. Das Simulationsmodell bildet die physikalischen Zusammenhänge genauer ab und setzt die thermischen Leistungen in die Stellgrößen der Komponenten um. Dies führt zu einer Abweichung zwischen dem Zustandsverlauf des Simulationsmodells und des prädizierten Zustandsverlaufs. Im Fahrzeug sind zudem der Fahrverlauf nicht exakt bekannt und die Rechenleistung begrenzt. Im folgenden Abschnitt wird daher bewertet, wie sich die genannten Einflüsse auswirken. Die vollständigen Parametersätze der nachfolgenden Ergebnisse sind in Anhang A aufgelistet.

5.3.9.1 Kühlung der Batterie bei hohen Temperaturen

Bei hohen Temperaturen muss die Batterie zur Einhaltung der Lebensdauervorgabe gekühlt werden. Zur Bewertung der Regelungsstrategie für diese Situation werden in Abb. 5.10 vier Fälle miteinander verglichen, wobei der Fahrverlauf als bekannt angenommen wird. Die resultierenden Kosten sind in Abb. 5.11 gegenübergestellt.

Für den ersten Fall werden die Anfangswerte basierend auf dem Optimierungsmodell ohne weitere Anpassungen bestimmt und als Steuerung angewendet. Damit ist der Haupteinfluss die Abweichung des Zustandsverlaufs. Der optimale initiale Kozustand wurde entsprechend Abschnitt 5.3.6 mittels des Optimierungsmodells mit einer großen Menge an Kozuständen bestimmt. Das Lebensdauerbudget wird erwartungsgemäß nahezu

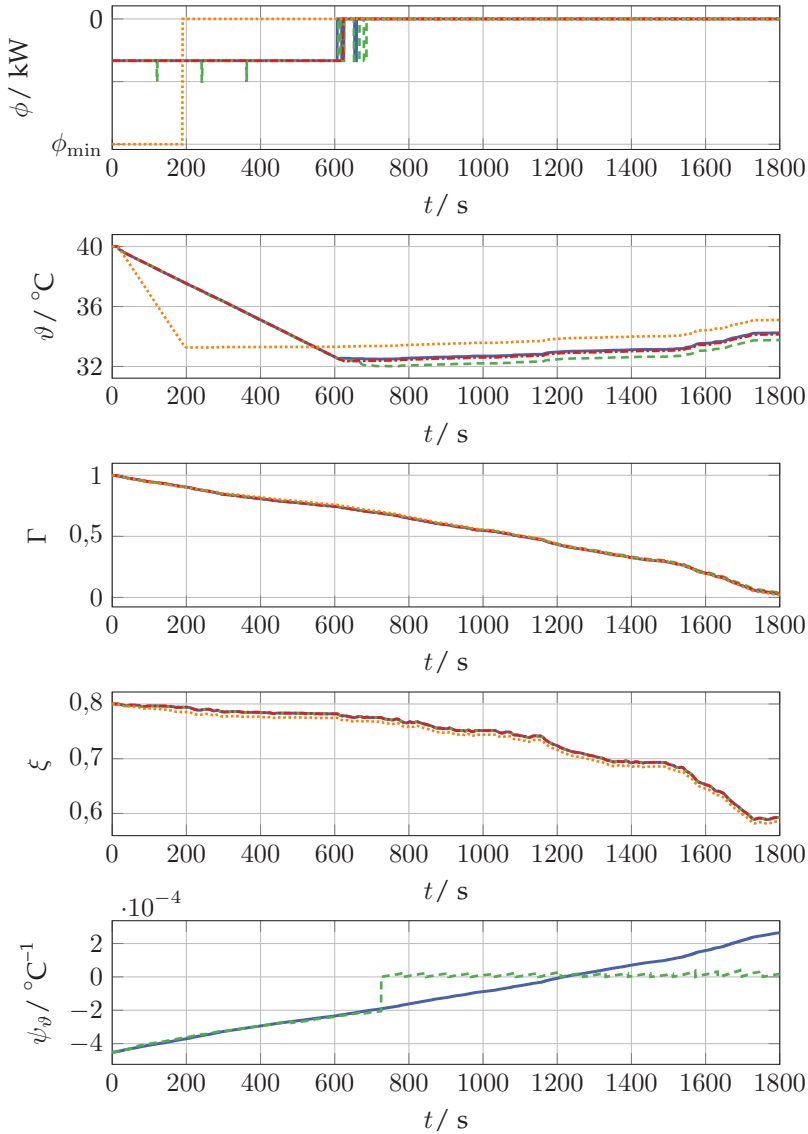


Abbildung 5.10 Ergebnis der Simulation mit bekanntem Fahrverlauf für den WLTP/C3-Fahrzyklus, $\vartheta_0 = 40^\circ\text{C}$, —: Steuerung, - - - : Regelung mit $\Delta t = 60$ s, - · - · : Referenzstrategie mit Lüfterkühlung, ····· : Referenzstrategie mit Kältekreisgekühlung.

vollständig ausgeschöpft und somit nur soviel wie nötig und so wenig wie möglich gekühlt. Der initiale Kozustand ist zu Beginn, wie erwartet, negativ und endet abweichend von der Transversalitätsbedingung. Dies ist begründet durch die zur Herleitung getroffenen vereinfachenden Annahmen und die Berücksichtigung des abnehmenden Ladezustands in der Simulation. Es sei angemerkt, dass sich bei der Berechnung des initialen Kozustands auch Werte ergeben, deren Endwerte näher an der Transversalitätsbedingung liegen und nur geringfügig höhere Kosten aufweisen. Das Simulationsmodell weist gegenüber dem Optimierungsmodell Unterschiede auf. Die sich ergebende Abweichung der Zustandsverläufe kann berücksichtigt werden, indem die Steuerung durch Rückführung der Zustandsgrößen zu einer Regelung erweitert wird. Dies macht die Schätzung eines neuen Kozustands erforderlich. Prinzipiell kann die Schätzung in jedem Zeitschritt erfolgen; unter Annahme einer begrenzten Rechenleistung sei beispielhaft festgelegt, dass ein Update nur alle $\Delta t = 60 \text{ s}$ erfolgen kann. Der Verlauf des Kozustands zeigt deutlich, dass sich beim Update nur geringe Abweichungen gegenüber der Steuerung im ersten Fall ergeben, da diese bereits optimal für den bekannten Fahrverlauf bestimmt wurde. Erst bei $t = 725 \text{ s}$ springt der Kozustand fast auf $\psi_{\vartheta} = 0$. Der Grund hierfür ist, dass sich für eine Menge von Kozuständen die gleiche Strategie mit gleichen Kosten ergibt und keine spezifische Heuristik implementiert wurde, um bestimmte Werte aus dieser Menge auszuwählen. Eine solche Heuristik kann Vorteile in Bezug auf mit Unsicherheiten behaftete prädiizierte Fahrzyklen bringen, ist aber fahrzeugspezifisch und daher nicht Bestandteil dieser Arbeit.

Zum Vergleich ist die Referenzstrategie aus Abschnitt 5.1 mit Lüfter- und Kältekreis Kühlung dargestellt, wobei zuvor jeweils die optimalen Umschalttemperaturen ϑ^+ für den gegebenen Fahrzyklus bestimmt wurden. Die Lüfterkühlung weist geringere Kosten gegenüber der Kältekreis Kühlung auf. Der Vergleich mit dem geregelten MP zeigt, dass die entwickelte Methode für hohe Temperaturen eine Verbesserung gegenüber der Referenzstrategie erreicht. Da die Referenzstrategie bereits nah am Optimum ist, ist der Unterschied in diesem Fall gering.

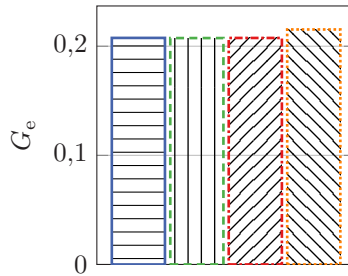


Abbildung 5.11 Vergleich der Endkosten für die Ergebnisse aus Abb. 5.10.

5.3.9.2 Mittlere Anfangstemperaturen

Bei mittleren Anfangstemperaturen wird das Lebensdauerbudget ohne weitere Maßnahmen eingehalten. Damit ist kein Temperieren der Batterie erforderlich. Dieses erwartete Verhalten ergibt sich, wie in Abb. 5.12 dargestellt, bei Anwendung der entwickelten Methode. Auch hier sei darauf hingewiesen, dass sich für eine Menge von initialen Kozuständen die gleiche Steuerstrategie mit gleichen Kosten ergibt, sodass für diesen Fall auch der Kozustand $\psi_0 = 0$ eine optimale Lösung darstellt.

5.3.9.3 Heizen der Batterie bei niedrigen Temperaturen

Die Anforderung an eine minimal verfügbare Leistung und die starke Alterung beim Rekuperieren wirken sich bei sehr niedrigen Temperaturen sehr stark auf die Regelungsstrategie aus. Auch für diesen Fall wird zunächst der Fahrverlauf als bekannt angenommen. Dabei ist zu beachten, dass durch die Regelung auf den geforderten Geschwindigkeitsverlauf leichte Abweichungen in der Fahrleistung gegenüber dem Optimierungsmodell auftreten. Da die Anforderung an eine minimal verfügbare Leistung sehr stark in die Kosten eingeht, werden die beiden Fälle $\omega_{II} \geq 0$ und $\omega_{II} = 0$ betrachtet.

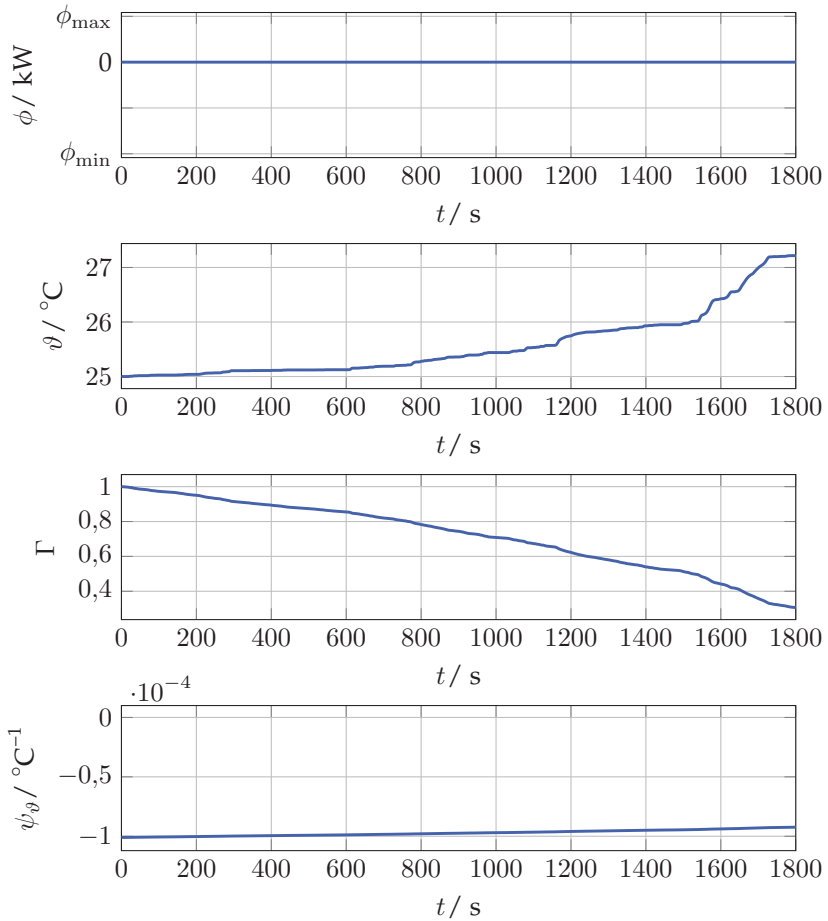


Abbildung 5.12 Ergebnis der Simulation mit bekanntem Fahrverlauf ohne Update des Kozustands, WLTP/C3-Fahrzyklus, $\vartheta_0 = 25\text{ }^\circ\text{C}$.

Mit $\omega_{\Pi} \geq 0$ ergibt sich das Ergebnis dargestellt in Abb. 5.13 und den Endkosten gezeigt in Abb. 5.14. Daraus geht hervor, dass aufgrund der Leistungsanforderung zu Beginn maximal geheizt wird. Der Einfluss der Leistungsanforderung bewirkt eine starke Abhängigkeit der resultierenden Strategie vom initialen Kozustand. Im konkreten Fall führt der zu

niedrige Kozustand dazu, dass das Heizen zu früh eingestellt wird. Zudem wird die Ladeleistung im weiteren Verlauf unnötig stark begrenzt, so dass sich wegen $\Gamma_e < 0$ hohe Kosten ergeben. Wird der initiale Kozustand aufwendig mittels des Simulationsmodells bestimmt, wie für den zweiten Fall dargestellt, so lässt sich zeigen, dass ein initialer Kozustand mit deutlich geringeren Kosten existiert. Im realen Einsatz ist dieses Vorgehen allerdings nicht möglich. Da sich der initiale Kozustand für eine reine Steuerung nicht robust bestimmen lässt, ist im realen Fahrbetrieb eine Regelung erforderlich, die den Kozustand insbesondere nach Erreichen der Leistungsanforderung neu schätzt. Mit der Regelung ergibt sich die dritte gezeigte Strategie. Zunächst wird maximal geheizt, bis die Leistungsanforderung erfüllt ist. Ab der erreichten Temperatur kann ohne starke Alterung rekuperiert werden, daher wird nicht weiter geheizt und die Ladeleistung nicht begrenzt. Für die Referenzstrategie mit optimaler Umschalttemperatur ϑ^- ergibt sich ein ähnliches Ergebnis mit etwas höheren Kosten.

Bleibt die Leistungsanforderung mit $\omega_{\Pi} = 0$ unberücksichtigt bzw. wird diese bereits bei der Anfangstemperatur erfüllt, so ergibt sich das Ergebnis in Abb. 5.15 mit den Endkosten in Abb. 5.16. Unter diesen Bedingungen ist, wie schon in Abschnitt 4.2.1.4 erläutert wurde, nur eine Begrenzung der Ladeleistung erforderlich, um die Alterung auf das Lebensdauerbudget zu begrenzen. Zu Zeitpunkten mit begrenzter Ladeleistung wird gleichzeitig ein Teil der rekuperierten Bremsleistung direkt für das Heizen genutzt, da damit im weiteren Fahrverlauf mehr Energie rekuperiert werden kann. Durch die Regelung mit regelmäßigem Update des Kozustands kann eine Verbesserung erzielt werden. Die zugehörige Referenzstrategie mit optimaler Umschalttemperatur ϑ^- bringt im Vergleich dazu einen deutlich höheren Energieumsatz mit sich, da deutlich mehr geheizt werden muss und zudem die rekuperierte Energie geringer ist. Unter der Annahme, dass mit $\omega_{\Pi} = 0$ kein Heizen erforderlich ist, ist zusätzlich die einfache Strategie gezeigt, für die nicht geheizt und die komplette Bremsleistung mechanisch umgesetzt wird. Es ergibt sich eine Verringerung der Kosten gegenüber der Referenzstrategie; die entwickelte Regelung mit Update der Kozustandsschätzung weist für die vier Fälle aber die geringsten Kosten auf.

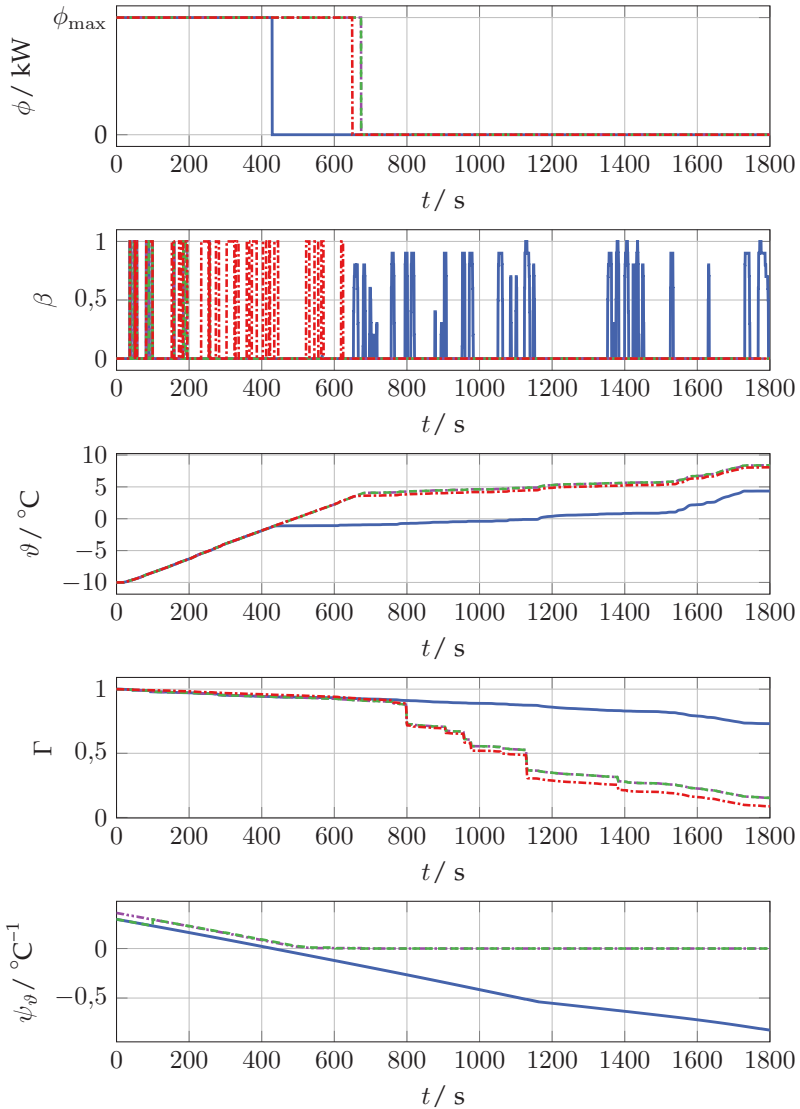


Abbildung 5.13 Ergebnis der Simulation mit bekanntem Fahrverlauf ohne Update des Kozustands, WLTP/C3-Fahrzyklus bei $\vartheta_0 = -10^\circ\text{C}$, —: Steuerung, - - - : Steuerung mit optimiertem Anfangskozustand, - - - : Regelung mit Update der Kozustandsschätzung, - - - : Referenzstrategie.

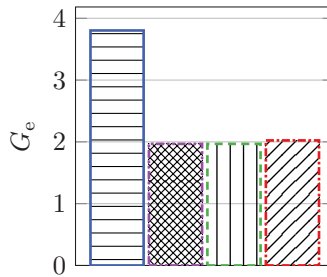


Abbildung 5.14 Vergleich der Endkosten für die Ergebnisse aus Abb. 5.13.

5.3.9.4 Regelung mit geschätztem Fahrverlauf

Im Fahrzeug steht durch das Navigationssystem im Allgemeinen kein exakter Fahrverlauf zur Verfügung, sondern nur eine Schätzung der mittleren Leistung sowie deren Dynamik für bestimmte Zeitabschnitte abhängig von z. B. Ort (Stadt, Autobahn), Geschwindigkeitsbegrenzungen, Höhenprofil. Aus Historiendaten kann ein Rückschluss auf den Fahrertyp und damit die Dynamik der Leistung gewonnen werden. Damit steht nur ein geschätzter Fahrzyklus mit reduzierter Fahrverlaufsinformation für die Schätzung des Kozustands zur Verfügung. Die Schätzung des Kozustands wird vom prädictierten Fahrverlauf bestimmt. Weicht dieser deutlich vom tatsächlichen Fahrverlauf ab, so kann die Alterung bis zum Fahrtende nicht korrekt prädictiert werden. Es wird beispielhaft der Fall betrachtet, dass der prädictierte Fahrzyklus eine geringere mittlere Fahrleistung und eine kürzere Fahrtdauer aufweist, als tatsächlich gefahren wird. Für den daran anschließenden Fahrabschnitt wird der exakte Fahrzyklus als bekannt angenommen. Das Ergebnis der Simulation ist in Abb. 5.17 gezeigt. Daraus geht hervor, dass ohne Regelung der Alterungszustand am Ende weit unter der Anforderung $\Gamma_e \geq 0$ liegt und damit hohe Kosten resultieren. Mit Regelung wird der Alterungsverlauf zunächst unterschätzt und somit nicht ausreichend gekühlt. Ab $t = 1400$ s steht die genaue Vorhersage der Fahrleistung zur Verfügung; dadurch wird erkannt, dass die Alterung zu stark ist, und es wird bestmöglich bis zum Fahrtende gekühlt.

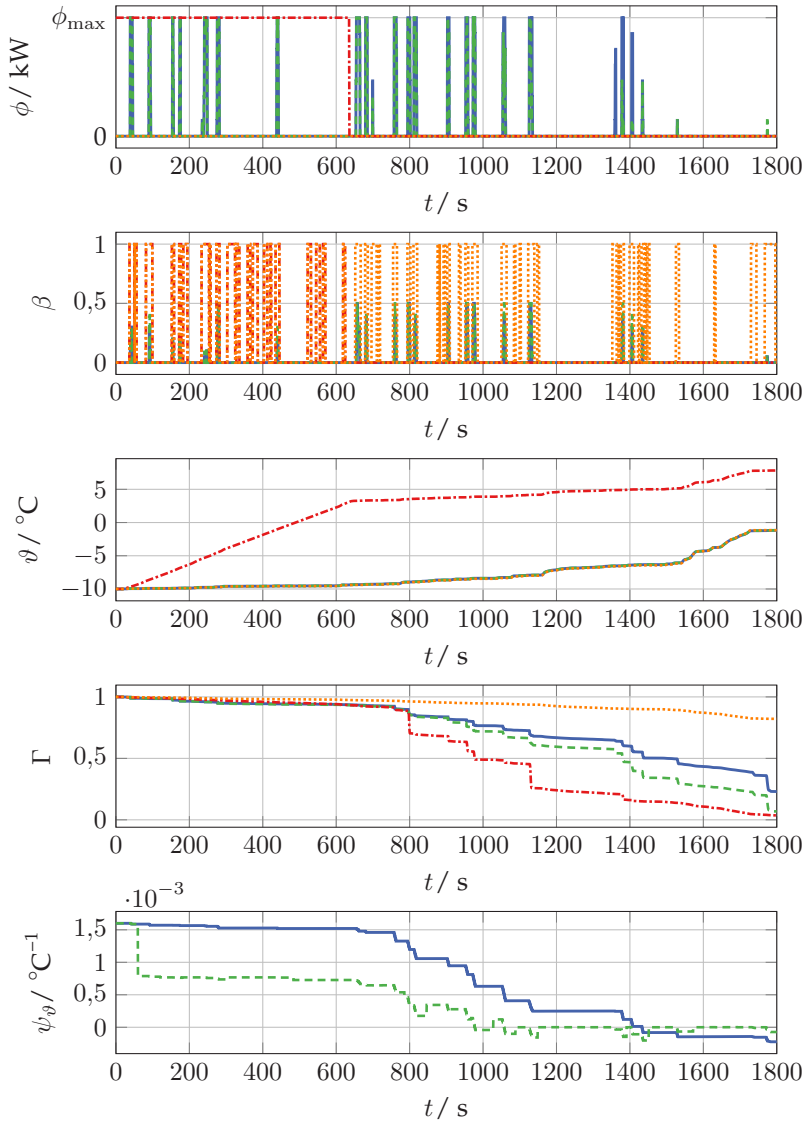


Abbildung 5.15 Ergebnis der Simulation mit bekanntem Fahrverlauf für den WLTP/C3-Fahrzyklus bei $\vartheta_0 = -10^{\circ}C$, — : Steuerung, - - : Regelung mit Update der Kozustands-schätzung, ··· : Referenzstrategie mit Heizen, ··· : Referenzstrategie ohne Heizen.

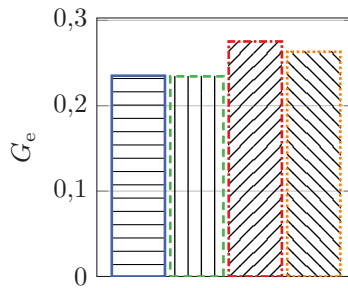


Abbildung 5.16 Vergleich der Endkosten für die Ergebnisse aus Abb. 5.15.

Damit berücksichtigt die Strategie während der Fahrt auch Abweichung im Fahrverlauf und Updates der Route mit den an die Methode gestellten Anforderungen, kann dabei aber nur so gut sein wie die Informationen zum prädizierten Fahrverlauf. Für eine weiterführende Bewertung des Einflusses der Qualität der Routeninformation und der Fahrzyklusschätzung für die Implementierung sei für das methodische Vorgehen und mögliche Schlussfolgerungen z. B. auf [29, 111, 128, 148] verwiesen.

5.3.10 Schlussfolgerung

Aus den vorangegangenen Ergebnissen wird ersichtlich, dass die entwickelte Methode für einen bekannten Fahrverlauf das Regelungsziel, die Lebensdaueranforderung mit minimiertem Energieumsatz einzuhalten, erreicht. Durch ein Update des Kozustands basierend auf dem aktuellen Zustand wird die Steuerungsstrategie zu einer Regelstrategie erweitert, so dass auch auf veränderliche Fahr- und Zustandsverläufe reagiert wird.

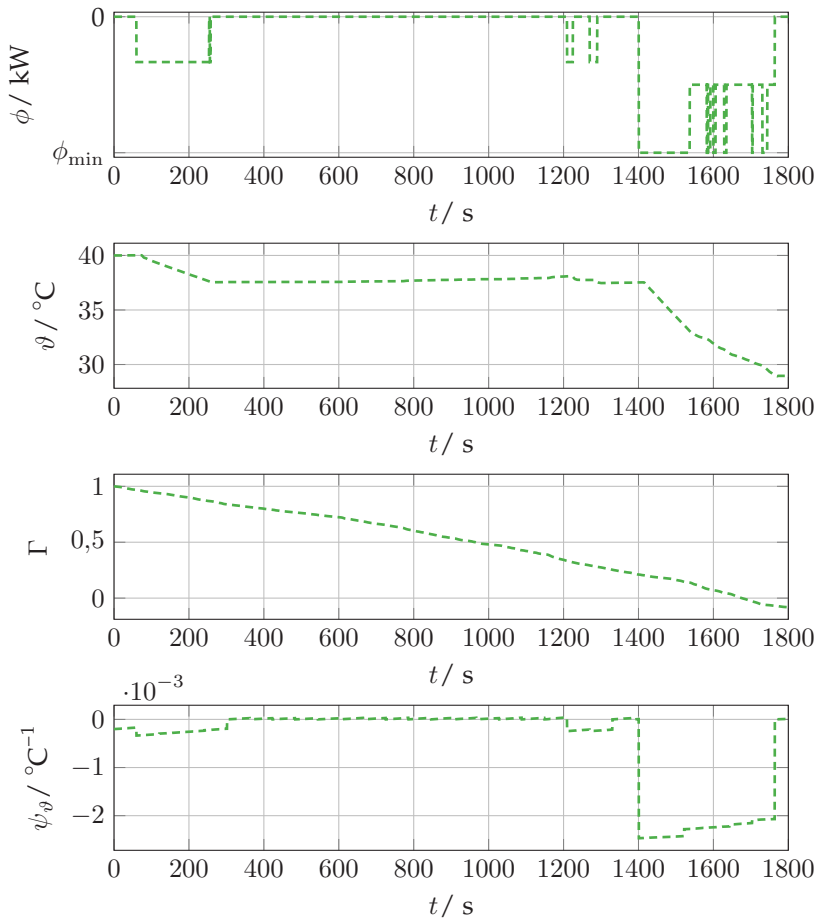


Abbildung 5.17 Simulationsergebnis für den WLTP/C3-Fahrzyklus und mit prädictiertem Fahrverlauf mit geringer mittlerer Fahrleistung und Fahrdauer, $\vartheta_0 = 40^{\circ}\text{C}$, --- : Regelung mit Update der Kozustandsschätzung.

Der Vergleich mit der Referenzstrategie mit optimaler Umschalttemperatur zeigt, dass die Methode für alle betrachteten Fälle zu den geringsten Kosten führt. Damit wird die Reichweite des Fahrzeugs erhöht und die Anforderung an die Lebensdauer besser eingehalten. Der Rechenaufwand und die Optimalität der Lösung werden maßgeblich durch die Anzahl an möglichen Kozustandswerten bestimmt. Hier kann eine fahrzeugspezifische Heuristik entwickelt werden, um die Menge an relevanten Anfangswerten zu reduzieren, so dass der Rechenaufwand minimiert wird. Es lässt sich insgesamt schlussfolgern, dass die entwickelte Methode entsprechend den in Abschnitt 3.1 formulierten Anforderungen wie in Abschnitt 5.3.8 beschrieben im Fahrzeug eingesetzt werden kann.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein modellbasiertes Energiemanagement für batterieelektrische Fahrzeuge unter Berücksichtigung von Nebenverbrauchern, der Batterielebensdauer und der Bremsenergieerückgewinnung entwickelt. Dazu wurden das Fahrzeugsystem und die Anforderung an das Energiemanagement hinsichtlich möglicher Freiheitsgrade für eine Optimierung analysiert. Durch Einführung einer Steuergröße für die Rekuperationsleistung wird die Ladeleistung und deren Einfluss auf Batteriealterung und Batterietemperatur berücksichtigt. Es konnte gezeigt werden, dass das Thermomanagement des Fahrzeugs und der Traktionsbatterie den wichtigsten Freiheitsgrad für eine Optimierung darstellt. Die wesentlichen Anforderungen für die Strategie bei normalem Fahrbetrieb waren dabei durch die Fahrleistung und die Batteriealterung gegeben. Mit den Ergebnissen der Systemanalyse wurden ein mathematisches Optimierungsproblem formuliert und geeignete Optimierungsmethoden ausgewählt. Die Problemstellung wurde in zwei Schritten untersucht.

Im ersten Schritt wurde eine Optimierung im Entwicklungsprozess (Offline-Optimierung) bei bekanntem Fahrverlauf durchgeführt. Der Rechenaufwand des vollständigen Problems wurde durch eine Entkopplung in ein fahrverlaufsabhängiges Problem und das Problem der Komponentensteuerung deutlich reduziert. Die Dynamische Programmierung diente für beide Teilprobleme als Optimierungsmethode im Entwicklungsprozess, um das globale Optimum unter Berücksichtigung von Zustandsgrenzen zu bestimmen. Es wurde aufgezeigt, welche qualitativen Schlussfolgerungen für jedes der Teilprobleme getroffen werden können.

Im zweiten Schritt wurde die Optimierung im Fahrbetrieb (Online-Optimierung), also das Energiemanagement im Fahrbetrieb, untersucht. Es wurden zwei Ansätze aufgezeigt, um ein Regelgesetz zu bestimmen. Der erste Ansatz basiert auf der Stochastischen Dynamischen Programmierung. Diese Methode legt für den Fahrverlauf anstatt eines bekannten Fahrverlaufs eine Wahrscheinlichkeitsverteilung zugrunde. Das Ergebnis ist ein Regelgesetz in Form einer Wertetabelle, die jedem Zustandsvektor einen Steuervektor zuordnet und sich somit einfach in ein Steuergerät implementieren lässt. Dieser Ansatz ist besonders dann vorteilhaft, wenn Informationen zum Fahrverlauf nur als stochastisches Modell vorliegen. Für die Bestimmung der Wahrscheinlichkeitsverteilung ist dabei eine große Menge an Messdaten erforderlich, und für die Optimierung muss ein Rechner mit großem Arbeitsspeicher verfügbar sein.

Der zweite Ansatz basiert auf dem Maximumprinzip von Pontrjagin. Die notwendigen Bedingungen des Maximumprinzips führen auf ein differenzial-algebraisches Gleichungssystem. Dieses konnte durch vereinfachende Annahmen gelöst und damit die Rechenzeit verkürzt werden. Eine Gegenüberstellung zu den Ergebnissen der Offline-Optimierung hat gezeigt, dass die getroffenen Vereinfachungen nur zu geringen Abweichungen gegenüber dem globalen Optimum führen. Die Anwendung im Fahrzeug reduziert sich auf die Schätzung der Anfangskozustände und die Berechnung elementarer Gleichungen. Ein wesentlicher Vorteil dieses Ansatzes ist die Möglichkeit, verfügbare Informationen, wie z. B. Routeninformationen, mit geringem Rechenaufwand in die Schätzung der Anfangskozustände einfließen zu lassen. Das entwickelte Energiemanagement wurde abschließend anhand eines detaillierten Simulationsmodells bewertet.

Der Fokus dieser Arbeit lag auf der Methodik und daraus resultierenden qualitativen Schlussfolgerungen. Der nächste Schritt sollte daher sein, die Methode mit den Parametern eines aktuellen Fahrzeugs auf einem Steuergerät zu implementieren und im realen Einsatz zu testen. Darüber hinaus gilt, dass die optimale Regelstrategie vom zukünftigen Fahrverlauf abhängt, der im Allgemeinen nicht exakt bekannt ist. Mit den heutzutage verfügbaren Informationen des Navigationssystems kann der Fahrverlauf

geschätzt werden und in die Optimierung einfließen. Hier kann basierend auf existierenden Algorithmen zur Fahrverlaufsschätzung ein verbesserter Algorithmus zur Schätzung der Anfangskozustände entwickelt werden.

Anhang

A Simulationsparameter

Tabelle A.1 Simulationsparameter für Abb. 4.2 — .

Fahrzyklus	SFTP-US06
Zustände	ϑ, ξ
Auflösung Zustände	$\vartheta_{\min} = -5,0\text{ }^{\circ}\text{C}; \vartheta_{\max} = 15,0\text{ }^{\circ}\text{C}; N\{\vartheta\} = 201^1$ $\xi_{\min} = 0,5; \xi_{\max} = 0,8; N\{\xi\} = 71$
Steuergrößen	ϕ
Auflösung Steuergrößen	$\phi_{\min} = 0\text{ W}$ $\phi_{\max} = 3000\text{ W}$ $N\{\phi\} = 4$
Anfangswerte	$\vartheta_0 = 0,0\text{ }^{\circ}\text{C}, \xi_0 = 0,8$
Weitere Parameter	$\omega_{\alpha} = 10$ $\omega_{\Gamma} = 5$ $\omega_{\kappa} = 5,4253 \cdot 10^{-6}$ $t_{\text{precond}} = 0\text{ s}$

Tabelle A.2 Simulationsparameter für Abb. 4.2 --- .

Fahrzyklus	SFTP-US06
Zustände	ϑ, ξ
Auflösung Zustände	$\vartheta_{\min} = -5,0\text{ }^{\circ}\text{C}; \vartheta_{\max} = 15,0\text{ }^{\circ}\text{C}; N\{\vartheta\} = 201$ $\xi_{\min} = 0,5; \xi_{\max} = 0,8; N\{\xi\} = 71$
Steuergrößen	ϕ
Auflösung Steuergrößen	$\phi = \begin{cases} 3000\text{ W} & t < 0\text{ s} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$
Anfangswerte	$\vartheta_0 = 0,0\text{ }^{\circ}\text{C}, \xi_0 = 0,8$
Weitere Parameter	$\omega_{\alpha} = 10$ $\omega_{\Gamma} = 5$ $\omega_{\kappa} = 5,4253 \cdot 10^{-6}$ $t_{\text{precond}} = 0\text{ s}$

¹ Die Funktion $N\{x\}$ gibt die Anzahl an verwendeten Werten der Größe x zwischen dem Minimal- und dem Maximalwert an.

Tabelle A.3 Simulationsparameter für Abb. 4.3 — .

Fahrzyklus	SFTP-US06
Zustände	ϑ, ξ
Auflösung Zustände	$\vartheta_{\min} = -16,0\text{ }^{\circ}\text{C}; \vartheta_{\max} = 15,0\text{ }^{\circ}\text{C}; N\{\vartheta\} = 311$ $\xi_{\min} = 0,5; \xi_{\max} = 0,8; N\{\xi\} = 71$
Steuergrößen	ϕ
Auflösung Steuergrößen	$\phi_{\min} = 0\text{ W}$ $\phi_{\max} = 3000\text{ W}$ $N\{\phi\} = 4$
Anfangswerte	$\vartheta_0 = -11,0\text{ }^{\circ}\text{C}, \xi_0 = 0,8$
Weitere Parameter	$\omega_{\alpha} = 10$ $\omega_{\Gamma} = 5$ $\omega_{\kappa} = 5,4253 \cdot 10^{-6}$ $t_{\text{precond}} = 0\text{ s}$

Tabelle A.4 Simulationsparameter für Abb. 4.3 - - - .

Fahrzyklus	SFTP-US06
Zustände	ϑ, ξ
Auflösung Zustände	$\vartheta_{\min} = -16,0\text{ }^{\circ}\text{C}; \vartheta_{\max} = 15,0\text{ }^{\circ}\text{C}; N\{\vartheta\} = 311$ $\xi_{\min} = 0,5; \xi_{\max} = 0,8; N\{\xi\} = 71$
Steuergrößen	ϕ
Auflösung Steuergrößen	$\phi = \begin{cases} 3000 & t < 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$
Anfangswerte	$\vartheta_0 = -11,0\text{ }^{\circ}\text{C}, \xi_0 = 0,8$
Weitere Parameter	$\omega_{\alpha} = 10$ $\omega_{\Gamma} = 5$ $\omega_{\kappa} = 5,4253 \cdot 10^{-6}$ $t_{\text{precond}} = 0\text{ s}$

Tabelle A.5 Simulationsparameter für Abb. 4.4 — .

Fahrzyklus	NYCC
Zustände	ϑ, ξ
Auflösung Zustände	$\vartheta_{\min} = -17,0\text{ }^{\circ}\text{C}; \vartheta_{\max} = 20,0\text{ }^{\circ}\text{C}; N\{\vartheta\} = 371$ $\xi_{\min} = 0,5; \xi_{\max} = 0,8; N\{\xi\} = 36$
Steuergrößen	ϕ, β
Auflösung Steuergrößen	$\phi_{\min} = -6000\text{ W}$ $\phi_{\max} = 3000\text{ W}$ $N\{\phi\} = 15$ $\beta_{\min} = 0,00$ $\beta_{\max} = 1,00$ $N\{\beta\} = 29$
Anfangswerte	$\vartheta_0 = -12,0\text{ }^{\circ}\text{C}, \xi_0 = 0,8$
Weitere Parameter	$\omega_{\alpha} = 10$ $\omega_{\Gamma} = 5$ $\omega_{\kappa} = 5,4253 \cdot 10^{-6}$ $t_{\text{precond}} = 0\text{ s}$

Tabelle A.6 Simulationsparameter für Abb. 4.4 ---.

Fahrzyklus	NYCC
Zustände	ϑ, ξ
Auflösung Zustände	$\vartheta_{\min} = -17,0^{\circ}\text{C}; \vartheta_{\max} = 20,0^{\circ}\text{C}; N\{\vartheta\} = 371$ $\xi_{\min} = 0,5; \xi_{\max} = 0,8; N\{\xi\} = 36$
Steuergrößen	ϕ, β
Auflösung Steuergrößen	$\phi_{\min} = -6000 \text{ W}$ $\phi_{\max} = 3000 \text{ W}$ $N\{\phi\} = 15$ $\beta_{\min} = 0,00$ $\beta_{\max} = 1,00$ $N\{\beta\} = 29$
Anfangswerte	$\vartheta_0 = -12,0^{\circ}\text{C}, \xi_0 = 0,8$
Weitere Parameter	$\omega_{\alpha} = 10$ $\omega_{\Gamma} = 5$ $\omega_{\kappa} = 5,4253 \cdot 10^{-6}$ $t_{\text{precond}} = 0 \text{ s}$

Tabelle A.7 Simulationsparameter für Abb. 4.5 —.

Fahrzyklus	WLTP/C3
Zustände	ϑ, ξ
Auflösung Zustände	$\vartheta_{\min} = -15,0^{\circ}\text{C}; \vartheta_{\max} = 20,0^{\circ}\text{C}; N\{\vartheta\} = 1751$ $\xi_{\min} = 0,4; \xi_{\max} = 0,8; N\{\xi\} = 91$
Steuergrößen	ϕ
Auflösung Steuergrößen	$\phi_{\min} = 0 \text{ W}$ $\phi_{\max} = 3000 \text{ W}$ $N\{\phi\} = 4$
Anfangswerte	$\vartheta_0 = -10,0^{\circ}\text{C}, \xi_0 = 0,8$
Weitere Parameter	$\omega_{\alpha} = 10$ $\omega_{\Gamma} = 5$ $\omega_{\kappa} = 5,4253 \cdot 10^{-6}$ $t_{\text{precond}} = 0 \text{ s}$

Tabelle A.8 Simulationsparameter für Abb. 4.5 ---.

Fahrzyklus	WLTP/C3
Zustände	ϑ, ξ
Auflösung Zustände	$\vartheta_{\min} = -15,0^{\circ}\text{C}; \vartheta_{\max} = 20,0^{\circ}\text{C}; N\{\vartheta\} = 1751$ $\xi_{\min} = 0,4; \xi_{\max} = 0,8; N\{\xi\} = 91$
Steuergrößen	ϕ
Auflösung Steuergrößen	$\phi_{\min} = 0 \text{ W}$ $\phi_{\max} = 3000 \text{ W}$ $N\{\phi\} = 4$
Anfangswerte	$\vartheta_0 = -10,0^{\circ}\text{C}, \xi_0 = 0,8$
Weitere Parameter	$\omega_{\alpha} = 10$ $\omega_{\Gamma} = 5$ $\omega_{\kappa} = 5,4253 \cdot 10^{-6}$ $t_{\text{precond}} = 60 \text{ s}$

Tabelle A.9 Simulationsparameter für Abb. 4.6 — .

Fahrzyklus	SFTP-US06
Zustände	ϑ, ξ
Auflösung Zustände	$\vartheta_{\min} = -10,0\text{ }^{\circ}\text{C}; \vartheta_{\max} = 20,0\text{ }^{\circ}\text{C}; N\{\vartheta\} = 301$ $\xi_{\min} = 0,0; \xi_{\max} = 0,3; N\{\xi\} = 21$
Steuergrößen	ϕ
Auflösung Steuergrößen	$\phi_{\min} = 0\text{ W}$ $\phi_{\max} = 3000\text{ W}$ $N\{\phi\} = 2$
Anfangswerte	$\vartheta_0 = -5,0\text{ }^{\circ}\text{C}, \xi_0 = 0,3$
Weitere Parameter	$\omega_{\alpha} = 10$ $\omega_{\Gamma} = 5$ $\omega_{\kappa} = 5,4253 \cdot 10^{-6}$ $t_{\text{precond}} = 0\text{ s}$

Tabelle A.10 Simulationsparameter für Abb. 4.6 --- .

Fahrzyklus	SFTP-US06
Zustände	ϑ, ξ
Auflösung Zustände	$\vartheta_{\min} = -10,0\text{ }^{\circ}\text{C}; \vartheta_{\max} = 20,0\text{ }^{\circ}\text{C}; N\{\vartheta\} = 301$ $\xi_{\min} = 0,1; \xi_{\max} = 0,4; N\{\xi\} = 18$
Steuergrößen	ϕ
Auflösung Steuergrößen	$\phi_{\min} = 0\text{ W}$ $\phi_{\max} = 3000\text{ W}$ $N\{\phi\} = 2$
Anfangswerte	$\vartheta_0 = -5,0\text{ }^{\circ}\text{C}, \xi_0 = 0,4$
Weitere Parameter	$\omega_{\alpha} = 10$ $\omega_{\Gamma} = 5$ $\omega_{\kappa} = 5,4253 \cdot 10^{-6}$ $t_{\text{precond}} = 0\text{ s}$

Tabelle A.11 Simulationsparameter für Abb. 4.7 — .

Fahrzyklus	WLTP/C3
Zustände	ϑ, ξ
Auflösung Zustände	$\vartheta_{\min} = 17,0\text{ }^{\circ}\text{C}; \vartheta_{\max} = 25,0\text{ }^{\circ}\text{C}; N\{\vartheta\} = 17$ $\xi_{\min} = 0,9; \xi_{\max} = 1,0; N\{\xi\} = 49$
Steuergrößen	ϕ, β
Auflösung Steuergrößen	$\phi_{\min} = -6000\text{ W}$ $\phi_{\max} = 3000\text{ W}$ $N\{\phi\} = 6$ $\beta_{\min} = 0,00$ $\beta_{\max} = 1,00$ $N\{\beta\} = 201$
Anfangswerte	$\vartheta_0 = 20,0\text{ }^{\circ}\text{C}, \xi_0 = 1,0$
Weitere Parameter	$\omega_{\alpha} = 10$ $\omega_{\Gamma} = 5$ $\omega_{\kappa} = 5,4253 \cdot 10^{-6}$ $t_{\text{precond}} = 0\text{ s}$

Tabelle A.12 Simulationsparameter für Abb. 4.8 — .

Fahrzyklus	WLTP/C3
Zustände	ϑ, Γ
Auflösung Zustände	$\vartheta_{\min} = 15,0^{\circ}\text{C}; \vartheta_{\max} = 45,0^{\circ}\text{C}; N\{\vartheta\} = 301$ $\Gamma_{\min} = -0,2; \Gamma_{\max} = 1,1; N\{\Gamma\} = 29$
Steuergrößen	ϕ
Auflösung Steuergrößen	$\phi_{\min} = -6000 \text{ W}$ $\phi_{\max} = 3000 \text{ W}$ $N\{\phi\} = 8$
Anfangswerte	$\vartheta_0 = 40,0^{\circ}\text{C}, \Gamma_0 = 1,0$
Weitere Parameter	$\omega_{\alpha} = 10$ $\omega_{\Gamma} = 5$ $\omega_{\kappa} = 5,4253 \cdot 10^{-6}$ $t_{\text{precond}} = 0 \text{ s}$

Tabelle A.13 Simulationsparameter für Abb. 4.8 --- .

Fahrzyklus	SFTP-US06
Zustände	ϑ, Γ
Auflösung Zustände	$\vartheta_{\min} = 15,0^{\circ}\text{C}; \vartheta_{\max} = 45,0^{\circ}\text{C}; N\{\vartheta\} = 301$ $\Gamma_{\min} = -0,6; \Gamma_{\max} = 1,1; N\{\Gamma\} = 37$
Steuergrößen	ϕ
Auflösung Steuergrößen	$\phi_{\min} = -6000 \text{ W}$ $\phi_{\max} = 3000 \text{ W}$ $N\{\phi\} = 8$
Anfangswerte	$\vartheta_0 = 40,0^{\circ}\text{C}, \Gamma_0 = 1,0$
Weitere Parameter	$\omega_{\alpha} = 10$ $\omega_{\Gamma} = 5$ $\omega_{\kappa} = 5,4253 \cdot 10^{-6}$ $t_{\text{precond}} = 0 \text{ s}$

Tabelle A.14 Simulationsparameter für Abb. 4.9 — .

Fahrzyklus	WLTP/C3
Zustände	ϑ, Γ
Auflösung Zustände	$\vartheta_{\min} = -15,0^{\circ}\text{C}; \vartheta_{\max} = 15,0^{\circ}\text{C}; N\{\vartheta\} = 301$ $\Gamma_{\min} = -0,3; \Gamma_{\max} = 1,1; N\{\Gamma\} = 73$
Steuergrößen	ϕ, β
Auflösung Steuergrößen	$\phi_{\min} = 0 \text{ W}$ $\phi_{\max} = 3000 \text{ W}$ $N\{\phi\} = 4$ $\beta_{\min} = 0,00$ $\beta_{\max} = 1,00$ $N\{\beta\} = 12$
Anfangswerte	$\vartheta_0 = -10,0^{\circ}\text{C}, \Gamma_0 = 1,0$
Weitere Parameter	$\omega_{\alpha} = 10$ $\omega_{\Gamma} = 5$ $\omega_{\kappa} = 5,4253 \cdot 10^{-6}$ $t_{\text{precond}} = 0 \text{ s}$

Tabelle A.15 Simulationsparameter für Abb. 4.10 — .

Fahrzyklus	WLTP/C3
Zustände	ϑ, Γ
Auflösung Zustände	$\vartheta_{\min} = 15,0 \text{ }^{\circ}\text{C}; \vartheta_{\max} = 40,0 \text{ }^{\circ}\text{C}; N\{\vartheta\} = 26$ $\Gamma_{\min} = -0,3; \Gamma_{\max} = 1,1; N\{\Gamma\} = 141$
Steuergrößen	ϕ, ϕ_{cab}
Auflösung Steuergrößen	$\phi_{\min} = -6000 \text{ W}$ $\phi_{\max} = 0 \text{ W}$ $N\{\phi\} = 4$ $\phi_{\text{cab},\min} = -6000 \text{ W}$ $\phi_{\text{cab},\max} = 0 \text{ W}$ $N\{\phi_{\text{cab}}\} = 4$
Anfangswerte	$\vartheta_0 = 35,0 \text{ }^{\circ}\text{C}, \Gamma_0 = 1,0$
Weitere Parameter	$\omega_{\alpha} = 10$ $\omega_{\Gamma} = 5$ $\omega_{\kappa} = 5,4253 \cdot 10^{-6}$ $t_{\text{precond}} = 0 \text{ s}$

Tabelle A.16 Simulationsparameter für Abb. 4.10 - - - .

Fahrzyklus	WLTP/C3
Zustände	ϑ, Γ
Auflösung Zustände	$\vartheta_{\min} = 15,0 \text{ }^{\circ}\text{C}; \vartheta_{\max} = 45,0 \text{ }^{\circ}\text{C}; N\{\vartheta\} = 31$ $\Gamma_{\min} = -0,3; \Gamma_{\max} = 1,1; N\{\Gamma\} = 141$
Steuergrößen	ϕ, ϕ_{cab}
Auflösung Steuergrößen	$\phi_{\min} = -6000 \text{ W}$ $\phi_{\max} = 0 \text{ W}$ $N\{\phi\} = 4$ $\phi_{\text{cab},\min} = -6000 \text{ W}$ $\phi_{\text{cab},\max} = 0 \text{ W}$ $N\{\phi_{\text{cab}}\} = 4$
Anfangswerte	$\vartheta_0 = 40,0 \text{ }^{\circ}\text{C}, \Gamma_0 = 1,0$
Weitere Parameter	$\omega_{\alpha} = 10$ $\omega_{\Gamma} = 5$ $\omega_{\kappa} = 5,4253 \cdot 10^{-6}$ $t_{\text{precond}} = 0 \text{ s}$

Tabelle A.17 Simulationsparameter für Abb. 5.4 —.

Fahrzyklus	WLTP/C3
Zustände	$\vartheta, \Gamma, \psi_{\vartheta}, \psi_{\Gamma}$
Auflösung Zustände	$\vartheta_{\min} = 10,0^{\circ}\text{C}; \vartheta_{\max} = 45,0^{\circ}\text{C}; N\{\vartheta\} = 1751$ $\Gamma_{\min} = -0,2; \Gamma_{\max} = 1,1; N\{\Gamma\} = 1601$ $\psi_{\vartheta, \min} = 0 \text{ K}^{-1}; \psi_{\vartheta, \max} = 0,001 \text{ K}^{-1}$ $\psi_{\Gamma, \min} = 0; \psi_{\Gamma, \max} = 0,02$
Steuergrößen	ϕ
Auflösung Steuergrößen	$\phi \in [-6000 - 2000 - 18000]$
Anfangswerte	$\vartheta_0 = 40,0^{\circ}\text{C}, \Gamma_0 = 1,0$ $\psi_{\vartheta, 0} = -0,000452 \text{ K}^{-1}, \psi_{\Gamma, 0} = 0,017638$
Weitere Parameter	$\omega_{\alpha} = 10$ $\omega_{\Gamma} = 5$ $\omega_{\kappa} = 5,4253 \cdot 10^{-6}$ $t_{\text{precond}} = 0 \text{ s}$

Tabelle A.18 Simulationsparameter für Abb. 5.4 -...-.

Fahrzyklus	WLTP/C3
Zustände	ϑ, Γ
Auflösung Zustände	$\vartheta_{\min} = 15,0^{\circ}\text{C}; \vartheta_{\max} = 45,0^{\circ}\text{C}; N\{\vartheta\} = 301$ $\Gamma_{\min} = -0,2; \Gamma_{\max} = 1,1; N\{\Gamma\} = 29$
Steuergrößen	ϕ
Auflösung Steuergrößen	$\phi_{\min} = -6000 \text{ W}$ $\phi_{\max} = 3000 \text{ W}$ $N\{\phi\} = 8$
Anfangswerte	$\vartheta_0 = 40,0^{\circ}\text{C}, \Gamma_0 = 1,0$
Weitere Parameter	$\omega_{\alpha} = 10$ $\omega_{\Gamma} = 5$ $\omega_{\kappa} = 5,4253 \cdot 10^{-6}$ $t_{\text{precond}} = 0 \text{ s}$

Tabelle A.19 Simulationsparameter für Abb. 5.5 —.

Fahrzyklus	WLTP/C3
Zustände	$\vartheta, \Gamma, \psi_{\vartheta}, \psi_{\Gamma}$
Auflösung Zustände	$\vartheta_{\min} = -15,0^{\circ}\text{C}; \vartheta_{\max} = 10,0^{\circ}\text{C}; N\{\vartheta\} = 861$ $\Gamma_{\min} = -0,2; \Gamma_{\max} = 1,1; N\{\Gamma\} = 1601$ $\psi_{\vartheta, \min} = 0 \text{ K}^{-1}; \psi_{\vartheta, \max} = 0,5 \text{ K}^{-1}$ $\psi_{\Gamma, \min} = 0; \psi_{\Gamma, \max} = 0,001$
Steuergrößen	ϕ, β
Auflösung Steuergrößen	$\phi_{\min} = 0 \text{ W}$ $\phi_{\max} = 3000 \text{ W}$ $N\{\phi\} = 2$ $\beta_{\min} = 0,00$ $\beta_{\max} = 1,00$ $N\{\beta\} = 12$
Anfangswerte	$\vartheta_0 = -10,0^{\circ}\text{C}, \Gamma_0 = 1,0$ $\psi_{\vartheta, 0} = 0,294955 \text{ K}^{-1}, \psi_{\Gamma, 0} = 0,000344$
Weitere Parameter	$\omega_{\alpha} = 10$ $\omega_{\Gamma} = 5$ $\omega_{\kappa} = 5,4253 \cdot 10^{-6}$ $t_{\text{precond}} = 0 \text{ s}$

Tabelle A.20 Simulationsparameter für Abb. 5.5 - - - -.

Fahrzyklus	WLTP/C3
Zustände	ϑ, Γ
Auflösung Zustände	$\vartheta_{\min} = -15,0^{\circ}\text{C}; \vartheta_{\max} = 15,0^{\circ}\text{C}; N\{\vartheta\} = 301$ $\Gamma_{\min} = -0,3; \Gamma_{\max} = 1,1; N\{\Gamma\} = 73$
Steuergrößen	ϕ, β
Auflösung Steuergrößen	$\phi_{\min} = 0 \text{ W}$ $\phi_{\max} = 3000 \text{ W}$ $N\{\phi\} = 4$ $\beta_{\min} = 0,00$ $\beta_{\max} = 1,00$ $N\{\beta\} = 12$
Anfangswerte	$\vartheta_0 = -10,0^{\circ}\text{C}, \Gamma_0 = 1,0$
Weitere Parameter	$\omega_{\alpha} = 10$ $\omega_{\Gamma} = 5$ $\omega_{\kappa} = 5,4253 \cdot 10^{-6}$ $t_{\text{precond}} = 0 \text{ s}$

Tabelle A.21 Simulationsparameter für Abb. 5.6 — .

Fahrzyklus	WLTP/C3
Zustände	$\vartheta, \Gamma, \psi_{\vartheta}, \psi_{\Gamma}$
Auflösung Zustände	$\vartheta_{\min} = -15,0^{\circ}\text{C}; \vartheta_{\max} = 10,0^{\circ}\text{C}; N\{\vartheta\} = 861$ $\Gamma_{\min} = -0,2; \Gamma_{\max} = 1,1; N\{\Gamma\} = 1601$ $\psi_{\vartheta, \min} = 0 \text{ K}^{-1}; \psi_{\vartheta, \max} = 0,01 \text{ K}^{-1}$ $\psi_{\Gamma, \min} = 0; \psi_{\Gamma, \max} = 0,01$
Steuergrößen	ϕ, β
Auflösung Steuergrößen	$\phi_{\min} = 0 \text{ W}$ $\phi_{\max} = 3000 \text{ W}$ $N\{\phi\} = 8$ $\beta_{\min} = 0,00$ $\beta_{\max} = 0,50$ $N\{\beta\} = 7$
Anfangswerte	$\vartheta_0 = -10,0^{\circ}\text{C}, \Gamma_0 = 1,0$ $\psi_{\vartheta, 0} = 0,001600 \text{ K}^{-1}, \psi_{\Gamma, 0} = 0,002200$
Weitere Parameter	$\omega_{\alpha} = 10$ $\omega_{\Gamma} = 5$ $\omega_{\kappa} = 5,4253 \cdot 10^{-6}$ $t_{\text{precond}} = 0 \text{ s}$

Tabelle A.22 Simulationsparameter für Abb. 5.6 - - - - .

Fahrzyklus	WLTP/C3
Zustände	ϑ, Γ
Auflösung Zustände	$\vartheta_{\min} = -15,0^{\circ}\text{C}; \vartheta_{\max} = 15,0^{\circ}\text{C}; N\{\vartheta\} = 301$ $\Gamma_{\min} = -0,3; \Gamma_{\max} = 1,1; N\{\Gamma\} = 73$
Steuergrößen	ϕ, β
Auflösung Steuergrößen	$\phi_{\min} = 0 \text{ W}$ $\phi_{\max} = 3000 \text{ W}$ $N\{\phi\} = 4$ $\beta_{\min} = 0,00$ $\beta_{\max} = 1,00$ $N\{\beta\} = 12$
Anfangswerte	$\vartheta_0 = -10,0^{\circ}\text{C}, \Gamma_0 = 1,0$
Weitere Parameter	$\omega_{\alpha} = 10$ $\omega_{\Gamma} = 5$ $\omega_{\kappa} = 5,4253 \cdot 10^{-6}$ $t_{\text{precond}} = 0 \text{ s}$

Tabelle A.23 Simulationsparameter für Abb. 5.10 — .

Fahrzyklus	WLTP/C3
Zustände	$\vartheta, \Gamma, \psi_{\vartheta}, \psi_{\Gamma}$
Auflösung Zustände	$\vartheta_{\min} = 15,0^{\circ}\text{C}; \vartheta_{\max} = 45,0^{\circ}\text{C}; N\{\vartheta\} = 601$ $\Gamma_{\min} = -0,3; \Gamma_{\max} = 1,1; N\{\Gamma\} = 1401$ $\psi_{\vartheta, \min} = 0 \text{ K}^{-1}; \psi_{\vartheta, \max} = 0,01 \text{ K}^{-1}$ $\psi_{\Gamma, \min} = 0; \psi_{\Gamma, \max} = 0,03$
Steuergrößen	ϕ
Auflösung Steuergrößen	$\phi_{\min} = -6000 \text{ W}$ $\phi_{\max} = 0 \text{ W}$ $N\{\phi\} = 7$
Anfangswerte	$\vartheta_0 = 40,0^{\circ}\text{C}, \Gamma_0 = 1,0$ $\psi_{\vartheta, 0} = -0,000452 \text{ K}^{-1}, \psi_{\Gamma, 0} = 0,017638$
Weitere Parameter	$\omega_{\alpha} = 10$ $\omega_{\Gamma} = 5$ $\omega_{\kappa} = 5,4253 \cdot 10^{-6}$ $t_{\text{precond}} = 0 \text{ s}$

Tabelle A.24 Simulationsparameter für Abb. 5.10 - - - .

Fahrzyklus	WLTP/C3
Zustände	$\vartheta, \Gamma, \psi_{\vartheta}, \psi_{\Gamma}$
Auflösung Zustände	$\vartheta_{\min} = 15,0^{\circ}\text{C}; \vartheta_{\max} = 45,0^{\circ}\text{C}; N\{\vartheta\} = 601$ $\Gamma_{\min} = -0,3; \Gamma_{\max} = 1,1; N\{\Gamma\} = 1401$ $\psi_{\vartheta, \min} = 0 \text{ K}^{-1}; \psi_{\vartheta, \max} = 0,01 \text{ K}^{-1}$ $\psi_{\Gamma, \min} = 0; \psi_{\Gamma, \max} = 0,03$
Steuergrößen	ϕ
Auflösung Steuergrößen	$\phi_{\min} = -6000 \text{ W}$ $\phi_{\max} = 0 \text{ W}$ $N\{\phi\} = 7$
Anfangswerte	$\vartheta_0 = 40,0^{\circ}\text{C}, \Gamma_0 = 1,0$ $\psi_{\vartheta, 0} = -0,000452 \text{ K}^{-1}, \psi_{\Gamma, 0} = 0,017638$
Weitere Parameter	$\omega_{\alpha} = 10$ $\omega_{\Gamma} = 5$ $\omega_{\kappa} = 5,4253 \cdot 10^{-6}$ $t_{\text{precond}} = 0 \text{ s}$

Tabelle A.25 Simulationsparameter für Abb. 5.10 ----- .

Fahrzyklus	WLTP/C3
Zustände	$\vartheta, \Gamma, \psi_{\vartheta}, \psi_{\Gamma}$
Auflösung Zustände	$\vartheta_{\min} = 15,0^{\circ}\text{C}; \vartheta_{\max} = 30,0^{\circ}\text{C}; N\{\vartheta\} = 301$ $\Gamma_{\min} = -0,3; \Gamma_{\max} = 1,1; N\{\Gamma\} = 1401$ $\psi_{\vartheta, \min} = 0 \text{ K}^{-1}; \psi_{\vartheta, \max} = 0,01 \text{ K}^{-1}$ $\psi_{\Gamma, \min} = 0; \psi_{\Gamma, \max} = 0,03$
Steuergrößen	ϕ
Auflösung Steuergrößen	$\phi_{\min} = -6000 \text{ W}$ $\phi_{\max} = 0 \text{ W}$ $N\{\phi\} = 4$
Anfangswerte	$\vartheta_0 = 25,0^{\circ}\text{C}, \Gamma_0 = 1,0$ $\psi_{\vartheta, 0} = -0,000101 \text{ K}^{-1}, \psi_{\Gamma, 0} = 0,000303$
Weitere Parameter	$\omega_{\alpha} = 10$ $\omega_{\Gamma} = 5$ $\omega_{\kappa} = 5,4253 \cdot 10^{-6}$ $t_{\text{precond}} = 0 \text{ s}$

Tabelle A.26 Simulationsparameter für Abb. 5.10

Fahrzyklus	WLTP/C3
Zustände	$\vartheta, \Gamma, \psi_{\vartheta}, \psi_{\Gamma}$
Auflösung Zustände	$\vartheta_{\min} = 15,0^{\circ}\text{C}; \vartheta_{\max} = 30,0^{\circ}\text{C}; N\{\vartheta\} = 301$ $\Gamma_{\min} = -0,3; \Gamma_{\max} = 1,1; N\{\Gamma\} = 1401$ $\psi_{\vartheta, \min} = 0 \text{ K}^{-1}; \psi_{\vartheta, \max} = 0,01 \text{ K}^{-1}$ $\psi_{\Gamma, \min} = 0; \psi_{\Gamma, \max} = 0,03$
Steuergrößen	ϕ
Auflösung Steuergrößen	$\phi_{\min} = -6000 \text{ W}$ $\phi_{\max} = 0 \text{ W}$ $N\{\phi\} = 4$
Anfangswerte	$\vartheta_0 = 25,0^{\circ}\text{C}, \Gamma_0 = 1,0$ $\psi_{\vartheta, 0} = -0,000101 \text{ K}^{-1}, \psi_{\Gamma, 0} = 0,000303$
Weitere Parameter	$\omega_{\alpha} = 10$ $\omega_{\Gamma} = 5$ $\omega_{\kappa} = 5,4253 \cdot 10^{-6}$ $t_{\text{precond}} = 0 \text{ s}$

Tabelle A.27 Simulationsparameter für Abb. 5.12 —.

Fahrzyklus	WLTP/C3
Zustände	$\vartheta, \Gamma, \psi_{\vartheta}, \psi_{\Gamma}$
Auflösung Zustände	$\vartheta_{\min} = 15,0^{\circ}\text{C}; \vartheta_{\max} = 30,0^{\circ}\text{C}; N\{\vartheta\} = 301$ $\Gamma_{\min} = -0,3; \Gamma_{\max} = 1,1; N\{\Gamma\} = 1401$ $\psi_{\vartheta, \min} = 0 \text{ K}^{-1}; \psi_{\vartheta, \max} = 0,01 \text{ K}^{-1}$ $\psi_{\Gamma, \min} = 0; \psi_{\Gamma, \max} = 0,03$
Steuergrößen	ϕ
Auflösung Steuergrößen	$\phi_{\min} = -6000 \text{ W}$ $\phi_{\max} = 0 \text{ W}$ $N\{\phi\} = 4$
Anfangswerte	$\vartheta_0 = 25,0^{\circ}\text{C}, \Gamma_0 = 1,0$ $\psi_{\vartheta, 0} = -0,000101 \text{ K}^{-1}, \psi_{\Gamma, 0} = 0,000303$
Weitere Parameter	$\omega_{\alpha} = 10$ $\omega_{\Gamma} = 5$ $\omega_{\kappa} = 5,4253 \cdot 10^{-6}$ $t_{\text{precond}} = 0 \text{ s}$

Tabelle A.28 Simulationsparameter für Abb. 5.13 —.

Fahrzyklus	WLTP/C3
Zustände	$\vartheta, \xi, \Gamma, \psi_{\vartheta}, \psi_{\Gamma}$
Auflösung Zustände	$\vartheta_{\min} = -15,0^{\circ}\text{C}; \vartheta_{\max} = 15,0^{\circ}\text{C}; N\{\vartheta\} = 601$ $\xi_{\min} = 0,5; \xi_{\max} = 0,8; N\{\xi\} = 36$ $\Gamma_{\min} = -0,3; \Gamma_{\max} = 1,1; N\{\Gamma\} = 1401$ $\psi_{\vartheta, \min} = 0 \text{ K}^{-1}; \psi_{\vartheta, \max} = 0,35 \text{ K}^{-1}$ $\psi_{\Gamma, \min} = 0; \psi_{\Gamma, \max} = 0,01$
Steuergrößen	ϕ, β
Auflösung Steuergrößen	$\phi_{\min} = 0 \text{ W}$ $\phi_{\max} = 3000 \text{ W}$ $N\{\phi\} = 7$ $\beta_{\min} = 0,00$ $\beta_{\max} = 1,00$ $N\{\beta\} = 15$
Anfangswerte	$\vartheta_0 = -10,0^{\circ}\text{C}, \xi_0 = 0,8, \Gamma_0 = 1,0$ $\psi_{\vartheta, 0} = 0,294800 \text{ K}^{-1}, \psi_{\Gamma, 0} = 0,000559$
Weitere Parameter	$\omega_{\alpha} = 10$ $\omega_{\Gamma} = 5$ $\omega_{\kappa} = 5,4253 \cdot 10^{-6}$ $t_{\text{precond}} = 0 \text{ s}$

Tabelle A.29 Simulationsparameter für Abb. 5.13 .

Fahrzyklus	WLTP/C3
Zustände	$\vartheta, \xi, \Gamma, \psi_{\vartheta}, \psi_{\Gamma}$
Auflösung Zustände	$\vartheta_{\min} = -15,0^{\circ}\text{C}; \vartheta_{\max} = 15,0^{\circ}\text{C}; N\{\vartheta\} = 601$ $\xi_{\min} = 0,5; \xi_{\max} = 0,8; N\{\xi\} = 36$ $\Gamma_{\min} = -0,3; \Gamma_{\max} = 1,1; N\{\Gamma\} = 1401$ $\psi_{\vartheta, \min} = 0 \text{ K}^{-1}; \psi_{\vartheta, \max} = 0,35 \text{ K}^{-1}$ $\psi_{\Gamma, \min} = 0; \psi_{\Gamma, \max} = 0,01$
Steuergrößen	ϕ, β
Auflösung Steuergrößen	$\phi_{\min} = 0 \text{ W}$ $\phi_{\max} = 3000 \text{ W}$ $N\{\phi\} = 7$ $\beta_{\min} = 0,00$ $\beta_{\max} = 1,00$ $N\{\beta\} = 15$
Anfangswerte	$\vartheta_0 = -10,0^{\circ}\text{C}, \xi_0 = 0,8, \Gamma_0 = 1,0$ $\psi_{\vartheta, 0} = 0,358625 \text{ K}^{-1}, \psi_{\Gamma, 0} = 0,000582$
Weitere Parameter	$\omega_{\alpha} = 10$ $\omega_{\Gamma} = 5$ $\omega_{\kappa} = 5,4253 \cdot 10^{-6}$ $t_{\text{precond}} = 0 \text{ s}$

Tabelle A.30 Simulationsparameter für Abb. 5.13 .

Fahrzyklus	WLTP/C3
Zustände	$\vartheta, \xi, \Gamma, \psi_{\vartheta}, \psi_{\Gamma}$
Auflösung Zustände	$\vartheta_{\min} = -15,0^{\circ}\text{C}; \vartheta_{\max} = 15,0^{\circ}\text{C}; N\{\vartheta\} = 601$ $\xi_{\min} = 0,5; \xi_{\max} = 0,8; N\{\xi\} = 36$ $\Gamma_{\min} = -0,3; \Gamma_{\max} = 1,1; N\{\Gamma\} = 1401$ $\psi_{\vartheta, \min} = 0 \text{ K}^{-1}; \psi_{\vartheta, \max} = 0,35 \text{ K}^{-1}$ $\psi_{\Gamma, \min} = 0; \psi_{\Gamma, \max} = 0,01$
Steuergrößen	ϕ, β
Auflösung Steuergrößen	$\phi_{\min} = 0 \text{ W}$ $\phi_{\max} = 3000 \text{ W}$ $N\{\phi\} = 7$ $\beta_{\min} = 0,00$ $\beta_{\max} = 1,00$ $N\{\beta\} = 15$
Anfangswerte	$\vartheta_0 = -10,0^{\circ}\text{C}, \xi_0 = 0,8, \Gamma_0 = 1,0$ $\psi_{\vartheta, 0} = 0,294800 \text{ K}^{-1}, \psi_{\Gamma, 0} = 0,000559$
Weitere Parameter	$\omega_{\alpha} = 10$ $\omega_{\Gamma} = 5$ $\omega_{\kappa} = 5,4253 \cdot 10^{-6}$ $t_{\text{precond}} = 0 \text{ s}$

Tabelle A.31 Simulationsparameter für Abb. 5.13 -----.

Fahrzyklus	WLTP/C3
Zustände	$\vartheta, \xi, \Gamma, \psi_{\vartheta}, \psi_{\Gamma}$
Auflösung Zustände	$\vartheta_{\min} = -15,0^{\circ}\text{C}; \vartheta_{\max} = 15,0^{\circ}\text{C}; N\{\vartheta\} = 601$ $\xi_{\min} = 0,5; \xi_{\max} = 0,8; N\{\xi\} = 36$ $\Gamma_{\min} = -0,3; \Gamma_{\max} = 1,1; N\{\Gamma\} = 1401$ $\psi_{\vartheta, \min} = 0 \text{ K}^{-1}; \psi_{\vartheta, \max} = 0,35 \text{ K}^{-1}$ $\psi_{\Gamma, \min} = 0; \psi_{\Gamma, \max} = 0,01$
Steuergrößen	ϕ, β
Auflösung Steuergrößen	$\phi = \begin{cases} 3000 \text{ W} & t < 649 \text{ s} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$ $\beta_{\min} = 0,00$ $\beta_{\max} = 1,00$ $N\{\beta\} = 15$
Anfangswerte	$\vartheta_0 = -10,0^{\circ}\text{C}, \xi_0 = 0,8, \Gamma_0 = 1,0$ $\psi_{\vartheta, 0} = 0,294800 \text{ K}^{-1}, \psi_{\Gamma, 0} = 0,000559$
Weitere Parameter	$\omega_{\alpha} = 10$ $\omega_{\Gamma} = 5$ $\omega_{\kappa} = 5,4253 \cdot 10^{-6}$ $t_{\text{precond}} = 0 \text{ s}$

Tabelle A.32 Simulationsparameter für Abb. 5.13 —.

Fahrzyklus	WLTP/C3
Zustände	$\vartheta, \Gamma, \psi_{\vartheta}, \psi_{\Gamma}$
Auflösung Zustände	$\vartheta_{\min} = -15,0^{\circ}\text{C}; \vartheta_{\max} = 15,0^{\circ}\text{C}; N\{\vartheta\} = 601$ $\Gamma_{\min} = -0,3; \Gamma_{\max} = 1,1; N\{\Gamma\} = 1401$ $\psi_{\vartheta, \min} = 0 \text{ K}^{-1}; \psi_{\vartheta, \max} = 0,01 \text{ K}^{-1}$ $\psi_{\Gamma, \min} = 0; \psi_{\Gamma, \max} = 0,01$
Steuergrößen	ϕ, β
Auflösung Steuergrößen	$\phi_{\min} = 0 \text{ W}$ $\phi_{\max} = 3000 \text{ W}$ $N\{\phi\} = 8$ $\beta_{\min} = 0,00$ $\beta_{\max} = 0,50$ $N\{\beta\} = 7$
Anfangswerte	$\vartheta_0 = -10,0^{\circ}\text{C}, \Gamma_0 = 1,0$ $\psi_{\vartheta, 0} = 0,001600 \text{ K}^{-1}, \psi_{\Gamma, 0} = 0,002200$
Weitere Parameter	$\omega_{\alpha} = 10$ $\omega_{\Gamma} = 5$ $\omega_{\kappa} = 5,4253 \cdot 10^{-6}$ $t_{\text{precond}} = 0 \text{ s}$

Tabelle A.33 Simulationsparameter für Abb. 5.13 ---.

Fahrzyklus	WLTP/C3
Zustände	$\vartheta, \Gamma, \psi_{\vartheta}, \psi_{\Gamma}$
Auflösung Zustände	$\vartheta_{\min} = -15,0^{\circ}\text{C}; \vartheta_{\max} = 15,0^{\circ}\text{C}; N\{\vartheta\} = 601$ $\Gamma_{\min} = -0,3; \Gamma_{\max} = 1,1; N\{\Gamma\} = 1401$ $\psi_{\vartheta, \min} = 0 \text{ K}^{-1}; \psi_{\vartheta, \max} = 0,01 \text{ K}^{-1}$ $\psi_{\Gamma, \min} = 0; \psi_{\Gamma, \max} = 0,01$
Steuergrößen	ϕ, β
Auflösung Steuergrößen	$\phi_{\min} = 0 \text{ W}$ $\phi_{\max} = 3000 \text{ W}$ $N\{\phi\} = 8$ $\beta_{\min} = 0,00$ $\beta_{\max} = 0,50$ $N\{\beta\} = 7$
Anfangswerte	$\vartheta_0 = -10,0^{\circ}\text{C}, \Gamma_0 = 1,0$ $\psi_{\vartheta, 0} = 0,001600 \text{ K}^{-1}, \psi_{\Gamma, 0} = 0,002200$
Weitere Parameter	$\omega_{\alpha} = 10$ $\omega_{\Gamma} = 5$ $\omega_{\kappa} = 5,4253 \cdot 10^{-6}$ $t_{\text{precond}} = 0 \text{ s}$

Tabelle A.34 Simulationsparameter für Abb. 5.13 ----.

Fahrzyklus	WLTP/C3
Zustände	$\vartheta, \Gamma, \psi_{\vartheta}, \psi_{\Gamma}$
Auflösung Zustände	$\vartheta_{\min} = -15,0^{\circ}\text{C}; \vartheta_{\max} = 15,0^{\circ}\text{C}; N\{\vartheta\} = 601$ $\Gamma_{\min} = -0,3; \Gamma_{\max} = 1,1; N\{\Gamma\} = 1401$ $\psi_{\vartheta, \min} = 0 \text{ K}^{-1}; \psi_{\vartheta, \max} = 0,01 \text{ K}^{-1}$ $\psi_{\Gamma, \min} = 0; \psi_{\Gamma, \max} = 0,01$
Steuergrößen	ϕ, β
Auflösung Steuergrößen	$\phi = \begin{cases} 3000 \text{ W} & t < 635 \text{ s} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$ $\beta_{\min} = 0,00$ $\beta_{\max} = 0,50$ $N\{\beta\} = 7$
Anfangswerte	$\vartheta_0 = -10,0^{\circ}\text{C}, \Gamma_0 = 1,0$ $\psi_{\vartheta, 0} = 0,001600 \text{ K}^{-1}, \psi_{\Gamma, 0} = 0,002200$
Weitere Parameter	$\omega_{\alpha} = 10$ $\omega_{\Gamma} = 5$ $\omega_{\kappa} = 5,4253 \cdot 10^{-6}$ $t_{\text{precond}} = 0 \text{ s}$

Tabelle A.35 Simulationsparameter für Abb. 5.13

Fahrzyklus	WLTP/C3
Zustände	$\vartheta, \Gamma, \psi_{\vartheta}, \psi_{\Gamma}$
Auflösung Zustände	$\vartheta_{\min} = -15,0^{\circ}\text{C}; \vartheta_{\max} = 15,0^{\circ}\text{C}; N\{\vartheta\} = 601$ $\Gamma_{\min} = -0,3; \Gamma_{\max} = 1,1; N\{\Gamma\} = 1401$ $\psi_{\vartheta, \min} = 0 \text{ K}^{-1}; \psi_{\vartheta, \max} = 0,01 \text{ K}^{-1}$ $\psi_{\Gamma, \min} = 0; \psi_{\Gamma, \max} = 0,01$
Steuergrößen	ϕ, β
Auflösung Steuergrößen	$\phi = \begin{cases} 3000 \text{ W} & t < 0 \text{ s} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$ $\beta_{\min} = 0,00$ $\beta_{\max} = 0,50$ $N\{\beta\} = 7$
Anfangswerte	$\vartheta_0 = -10,0^{\circ}\text{C}, \Gamma_0 = 1,0$ $\psi_{\vartheta, 0} = 0,001600 \text{ K}^{-1}, \psi_{\Gamma, 0} = 0,002200$
Weitere Parameter	$\omega_{\alpha} = 10$ $\omega_{\Gamma} = 5$ $\omega_{\kappa} = 5,4253 \cdot 10^{-6}$ $t_{\text{precond}} = 0 \text{ s}$

Tabelle A.36 Simulationsparameter für Abb. 5.17 --- .

Fahrzyklus	WLTP/C3
Zustände	$\vartheta, \Gamma, \psi_{\vartheta}, \psi_{\Gamma}$
Auflösung Zustände	$\vartheta_{\min} = 15,0^{\circ}\text{C}; \vartheta_{\max} = 45,0^{\circ}\text{C}; N\{\vartheta\} = 601$ $\Gamma_{\min} = -0,3; \Gamma_{\max} = 1,1; N\{\Gamma\} = 1401$ $\psi_{\vartheta, \min} = 0 \text{ K}^{-1}; \psi_{\vartheta, \max} = 0,01 \text{ K}^{-1}$ $\psi_{\Gamma, \min} = 0; \psi_{\Gamma, \max} = 0,03$
Steuergrößen	ϕ
Auflösung Steuergrößen	$\phi_{\min} = -6000 \text{ W}$ $\phi_{\max} = 0 \text{ W}$ $N\{\phi\} = 7$
Anfangswerte	$\vartheta_0 = 40,0^{\circ}\text{C}, \Gamma_0 = 1,0$ $\psi_{\vartheta, 0} = -0,000226 \text{ K}^{-1}, \psi_{\Gamma, 0} = 0,017638$
Weitere Parameter	$\omega_{\alpha} = 10$ $\omega_{\Gamma} = 5$ $\omega_{\kappa} = 5,4253 \cdot 10^{-6}$ $t_{\text{precond}} = 0 \text{ s}$

Literaturverzeichnis

- [1] **Abraham, K. M.** *Prospects and Limits of Energy Storage in Batteries*. In: *The Journal of Physical Chemistry Letters* 6 (2015), S. 830 – 844.
- [2] **Ambühl, Daniel.** *Energy Management Strategies For Hybrid Electric Vehicles*. Dissertation. ETH Zürich, 2009.
- [3] **Andrea, Davide.** *Battery Management Systems for Large Lithium Ion Battery Packs*. Artech House, 2010.
- [4] **Arbeitsgruppe 1 der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE).** *Nationale Plattform Elektromobilität – Zwischenbericht der Arbeitsgruppe 1 – Antriebs-technologie und Fahrzeugintegration*. Zwischenbericht. Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2010.
- [5] **Auer, Markus und Krug, Sina.** *Gesamtfahrzeugsimulation eines batterieelektrischen Fahrzeugs*. Abschlussbericht. 2012.
- [6] **Back, Michael.** *Prädiktive Antriebsregelung zum energieoptimalen Betrieb von Hybridfahrzeugen*. Bd. 2. Schriften des Instituts für Regelungs- und Steuerungssysteme, Universität Karlsruhe (TH). Universitätsverlag Karlsruhe, 2006.
- [7] **Baehr, Hans Dieter und Kabelac, Stephan.** *Thermodynamik – Grundlagen und technische Anwendungen*. 14. Aufl. Springer-Verlag, 2009.
- [8] **Bandhauer, Todd M., Garimella, Srinivas und Fuller, Thomas F.** *A Critical Review of Thermal Issues in Lithium-Ion Batteries*. In: *Journal of The Electrochemical Society* 158.3 (2011), R1 – R25.
- [9] **Barlow, T. J., Latham, S., McCrae, I. S. und Boulter, P. G.** *A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions*. Wokingham, Berkshire, United Kingdom: IHS, 2009.

- [10] **Barnitt, Robb A., Brooker, Aaron D., Ramroth, Laurie, Rugh, John und Smith, Kandler A.** *Analysis of Off-Board Powered Thermal Preconditioning in Electric Drive Vehicles*. In: *25th World Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium*. Shenzhen, China, 2010.
- [11] **Barré, Anthony, Deguilhem, Benjamin, Grolleau, Sébastien, Gérard, Mathias, Suard, Frédéric und Riu, Delphine.** *A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications*. In: *Journal of Power Sources* 241.0 (2013), S. 680–689.
- [12] **Baumgart, Rico.** *Reduzierung des Kraftstoffverbrauches durch Optimierung von Pkw-Klimaanlagen*. Verlag Wissenschaftliche Scripten, 2010.
- [13] **Baumhöfer, Thorsten, Brühl, Manuel, Rothgang, Susanne und Sauer, Dirk Uwe.** *Production caused variation in capacity aging trend and correlation to initial cell performance*. In: *Journal of Power Sources* 247 (2014), S. 332–338.
- [14] **Bellman, R. E.** *Dynamic Programming*. Princeton University Press, 1957.
- [15] **Bertsekas, D. P.** *Dynamic Programming & Optimal Control*. 3. Aufl. Bd. 1. Athena Scientific, 1995.
- [16] **Boie, Christian, Freitag, Gunter, Steinmann, Berthold und Vogt, Guenther.** *Antriebsstrang eines Elektrofahrzeugs*. DE102009054743A1. Deutsches Patent. 2009.
- [17] **Bouvy, Claude, Jeck, Peter, Gissing, Jörg, Lichius, Thomas, Baltzer, Sidney und Eckstein, Lutz.** *Wärmemanagement des Kraftfahrzeug VIII*. In: Hrsg. von **Steinberg, Peter**. Expert Verlag, 2012. Kap. Die Batterie als thermischer Speicher: Auswirkungen auf die Innenraumklimatisierung, die thermische Architektur und die Betriebsstrategie von Elektrofahrzeugen, S. 72–93.
- [18] **Braess, Hans-Hermann und Seiffert, Ulrich**, Hrsg. *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. 6. Aufl. Springer Vieweg, 2011.
- [19] **Brauner, G., Geringer, B. und Schrödl, M.** *Forschungsbedarf für das Elektrofahrzeug der Zukunft*. In: *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* 129.3 (2012), S. 110–117.
- [20] **Breuer, Gregor, Pichler, Gerald, Steinwender, Gerald und Ackerl, Martin.** *Batterieklimatechnik und Energiemanagement von hybriden Nutzfahrzeugen*. In: *Deutsche Kälte-Klima-Tagung*. Hrsg. von **Deutscher Kälte und Klimatechnischer Verein (DKV)**. Bd. 3. Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein (DKV). Magdeburg: Curran Associates, Inc., 2010, S. 1425–1457.

-
- [21] **Broussely, M., Biensan, Ph., Bonhomme, F., Blanchard, Ph., Herreyre, S., Nechev, K. und Staniewicz, R.J.** *Main aging mechanisms in Li ion batteries.* In: *Journal of Power Sources* 146.1-2 (2005), S. 90 – 96.
- [22] **BRUSA Elektronik AG**, Hrsg. *BSC6 – Bidirectional Auxiliary Converter.* 29.2013.
- [23] **Büchner, Stefan.** *Energiemanagement-Strategien für elektrische Energiebordnetze in Kraftfahrzeugen.* Cuvillier Verlag, 2008.
- [24] **Buford, Keith, Williams, Jonathan und Simonini, Matthew.** *Determining Most Energy Efficient Cooling Control Strategy of a Rechargeable Energy Storage System.* In: *SAE 2011 World Congress.* SAE Paper 2011-01-0893. Detroit, MI, USA, 2011.
- [25] **Chan, C. C. und Chau, K. T.** *Modern Electric Vehicle Technology.* Oxford University Press, 2001.
- [26] **Chasse, A. und Sciarretta, A.** *Supervisory control of hybrid powertrains: An experimental benchmark of offline optimization and online energy management.* In: *Control Engineering Practice* 19.11 (2011), S. 1253 – 1265.
- [27] **Christiansen, Bahne.** *Theorie und Anwendung optimaler Multiprozesse mit Zustandsbeschränkungen.* Dissertation. Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 2010.
- [28] **Cordoba-Arenas, Andrea, Onori, Simona und Rizzoni, Giorgio.** *A control-oriented lithium-ion battery pack model for plug-in hybrid electric vehicle cycle-life studies and system design with consideration of health management.* In: *Journal of Power Sources* 279 (2015), S. 791 – 808.
- [29] **Cummings, Thomas, Bradley, Thomas H und Asher, Zachary D.** *The Effect of Trip Preview Prediction Signal Quality on Hybrid Vehicle Fuel Economy.* In: *IFAC-PapersOnLine* 48.15 (2015), S. 271 – 276.
- [30] **Dage, Gary A., Kelm, Brian R. und Klapp, Andrew J.** *Climate control system for electric vehicle.* US 5275012. United States Patent. 1994.
- [31] **Dauvergne, Jean.** *Heating and cooling apparatus for an electric vehicle.* US 5280852. United States Patent. 1994.
- [32] **Delaille, Arnaud.** *Calendar ageing of Li-ion batteries: results from ageing tests and understanding from autopsies.* In: *Mat4Bat Summer School.* 2015.
- [33] *DIN 1946-3 – Raumluftechnik – Teil 3: Klimatisierung von Personenkraftwagen und Lastkraftwagen.* 2006.

- [34] **Ebbesen, Søren Bruhn.** *Optimal sizing and control of hybrid electric vehicles.* Dissertation. ETH Zürich, 2012.
- [35] **Ecker, Madeleine, Gerschler, Jochen B., Vogel, Jan, Käbitz, Stefan, Hust, Friedrich, Dechent, Philipp und Sauer, Dirk Uwe.** *Development of a lifetime prediction model for lithium-ion batteries based on extended accelerated aging test data.* In: *Journal of Power Sources* 215.0 (2012), S. 248 – 257.
- [36] **Ehsani, Mehrdad, Gao, Yimin und Emadi, Ali.** *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles.* 2. Aufl. Power Electronics and Applications Series. CRC Press, 2005.
- [37] **Elbert, P., Ebbesen, S. und Guzzella, L.** *Implementation of Dynamic Programming for n-Dimensional Optimal Control Problems With Final State Constraints.* In: *Control Systems Technology, IEEE Transactions on* 21.3 (2013), S. 924 – 931.
- [38] **Ennemoser, Andreas, Schreier, Heimo und Petutschnig, Heinz.** *Optimierte Betriebsstrategie für Nebenaggregate im LKW.* In: *MTZ - Motortechnische Zeitschrift* 03/2012 (2012), S. 220 – 224.
- [39] **ETH Zürich – Institut für Dynamische Systeme und Regelungstechnik.** *The QSS-toolbox 2.0.1.* 19.2013. URL: http://www.idsc.ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/mavt/dynamic-systems-n-control/idsc-dam/Research_Onder/Downloads/qss.zip.
- [40] **Finken, T., Felden, M. und Hameyer, K.** *Comparison and design of different electrical machine types regarding their applicability in hybrid electrical vehicles.* In: *Electrical Machines, 2008. ICEM 2008. 18th International Conference on.* 2008, S. 1 – 5.
- [41] **Föllinger, Otto.** *Optimierung dynamischer Systeme.* R. Oldenbourg Verlag München, 1985.
- [42] **Gao, Yimin, Chen, Liping und Ehsani, Mehrdad.** *Investigation of the Effectiveness of Regenerative Braking for EV and HEV.* Technical Paper. SAE, 1999.
- [43] **Gao, Yimin, Chu, Liang und Ehsani, M.** *Design and Control Principles of Hybrid Braking System for EV, HEV and FCV.* In: *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007. VPPC 2007. IEEE.* 2007, S. 384 – 391.
- [44] **Goßlau, Dirk.** *Vorausschauende Kühlsystemregelung zur Verringerung des Kraftstoffverbrauches.* Shaker Verlag, 2009.

-
- [45] **Graichen, Knut.** *Methoden der Optimierung und optimalen Steuerung.* Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik, Fakultät für Ingenieurwissenschaften und Informatik, Universität Ulm, 2012.
- [46] **Grolleau, Sebastien.** *Cycling Aging of Lithium-ion Batteries.* In: *Mat4Bat Summer School.* 2015.
- [47] **Großmann, Holger.** *Aerodynamik des Automobils.* In: Hrsg. von **Hucho, W. H.** 5. Vieweg+Teubner Verlag, 2005. Kap. Heizung, Lüftung, Klimatisierung von Pkw, S. 755 – 807.
- [48] **Großmann, Holger.** *Pkw-Klimatisierung: Physikalische Grundlagen und technische Umsetzung.* 1. Aufl. Springer-Verlag, 2010.
- [49] **Grote, Karl-Heinrich.** *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau.* Hrsg. von **Feldhusen, Jörg.** 23. Aufl. Springer-Verlag, 2011.
- [50] **Guzzella, Lino und Sciarretta, Antonio.** *Vehicle Propulsion Systems. Introduction to Modeling and Optimization.* 3. Aufl. Springer-Verlag, 2013.
- [51] **Hamut, H. S., Dincer, I. und Naterer, G. F.** *Performance assessment of thermal management systems for electric and hybrid electric vehicles.* In: *International Journal of Energy Research* 37.1 (2013), S. 1 – 12.
- [52] **Hamut, H. S., Dincer, I. und Naterer, G.F.** *Exergy analysis of a TMS (thermal management system) for range-extended EVs (electric vehicles).* In: *Energy* 46 (2012), S. 117 – 125.
- [53] **Hamut, H. S., Dincer, I. und Naterer, G.F.** *Analysis and optimization of hybrid electric vehicle thermal management systems.* In: *Journal of Power Sources* 247.0 (2014), S. 643 – 654.
- [54] **Haupt, C., Bucherl, D., Engstle, A., Herzog, H.-G. und Wachtmeister, G.** *Energy Management in Hybrid Vehicles Considering Thermal Interactions.* In: *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007. VPPC 2007. IEEE.* 2007, S. 36 – 41.
- [55] **Heckenberger, Thomas.** *Thermal Management For Hybrid Vehicles.* Technical Press Day 2009. Behr GmbH & Co. KG, 2009.
- [56] **Herb, Frieder.** *Alterungsmechanismen in Lithium-Ionen-Batterien und PEM-Brennstoffzellen und deren Einfluss auf die Eigenschaften von daraus bestehenden Hybrid-Systemen.* Dissertation. Universität Ulm, 2010.
- [57] **Hermann, Weston Arthur, Kohn, Scott Ira, Kelty, Kurt Russel, Mehta, Vineet Haresh und Straubel, Jeffry Brian.** *Battery pack temperature optimization control system.* US 20100212338. United States Patent. 2010.

- [58] **Jiménez-Espadafor, Francisco José, Guerrero, Daniel Palomo, Trujillo, Elisa Carvajal, García, Miguel Torres und Wideberg, Johan.** *Fully optimized energy management for propulsion, thermal cooling and auxiliaries of a serial hybrid electric vehicle.* In: *Applied Thermal Engineering* 91 (2015), S. 694–705.
- [59] **Johannesson, Lars, Asbogard, Mattias und Egardt, Bo.** *Assessing the Potential of Predictive Control for Hybrid Vehicle Powertrains Using Stochastic Dynamic Programming.* In: *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on* 8.1 (2007), S. 71–83.
- [60] **Johnston, Vincent George, Baglino, Andrew David, Kohn, Scott Ira, Mehta, Vineet Haresh, Gadda, Christopher David, O'donnell, Curt Raymond und De Bruijn, Wulfer Adrijan.** *Thermal management system with dual mode coolant loops.* US 0296855A1. United States Patent. 2011.
- [61] **Jörg, A.** *Optimale Auslegung und Betriebsführung von Hybridfahrzeugen.* Dissertation. Technische Universität München, 2009.
- [62] **Jossen, Andreas und Weydanz, Wolfgang.** *Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen.* 1. Aufl. Ubooks-Verl., 2006.
- [63] **Jung, Matthias, Kemle, Andreas, Strauss, Thomas und Wawzyniak, Markus.** *Innenraumheizung von Hybrid- und Elektrofahrzeugen.* In: *ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift* 05-2011 (2011), S. 396–401.
- [64] **Käbitz, Stefan, Gerschler, Jochen Bernhard, Ecker, Madeleine, Yurdagel, Yusuf, Emmermacher, Brita, André, Dave, Mitsch, Tim und Sauer, Dirk Uwe.** *Cycle and calendar life study of a graphite | $LiNi_{1/3}Mn_{1/3}Co_{1/3}O_2$ Li-ion high energy system. Part A: Full cell characterization.* In: *Journal of Power Sources* 239 (2013), S. 572–583.
- [65] **Kambly, Kiran R und Bradley, Thomas H.** *Estimating the HVAC energy consumption of plug-in electric vehicles.* In: *Journal of Power Sources* 259 (2014), S. 117–124.
- [66] **Kampker, Achim, Vallée, Dirk und Schnettler, Armin,** Hrsg. *Elektromobilität – Grundlagen einer Zukunftstechnologie.* Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013.
- [67] **Keil, Peter und Jossen, Andreas.** *Aging of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles: Impact of Regenerative Braking.* In: *EVS28 International Electric Vehicle Symposium and Exhibition.* KINTEX, Korea, 6.–3. Mai 2015.
- [68] **Kelly, Stephen J.** *Rechargeable battery system having intelligent temperature control.* US 5795664A. United States Patent. 1998.

-
- [69] **Kelty, Kurt Russel, Kohn, Scott Ira, Hermann, Weston Arthur und Kishiyama, Clay Hajime.** *Temperature control system for a battery pack.* EP000002226887A1. Europäisches Patent. 2010.
- [70] **Kennedy, James und Eberhart, Russell.** *Particle swarm optimization.* In: *Neural Networks, 1995. Proceedings., IEEE International Conference on.* Bd. 4. IEEE. 1995, S. 1942 – 1948.
- [71] **Kim, Namwook, Cha, Sukwon und Peng, Huei.** *Optimal Control of Hybrid Electric Vehicles Based on Pontryagin's Minimum Principle.* In: *Control Systems Technology, IEEE Transactions on* 19.5 (2011), S. 1279 – 1287.
- [72] **Kizilel, R., Sabbah, R., Selman, J.R. und Al-Hallaj, S.** *An alternative cooling system to enhance the safety of Li-ion battery packs.* In: *Journal of Power Sources* 194.2 (2009), S. 1105 – 1112.
- [73] **Klassen, Vitalij, Leder, Markus und Hossfeld, Jens.** *Klimatisierung im Elektrofahrzeug.* In: *ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift* 02-2011 (2011), S. 118 – 123.
- [74] **Kolmanovsky, I., Siverguina, I. und Lygoe, B.** *Optimization of powertrain operating policy for feasibility assessment and calibration: stochastic dynamic programming approach.* In: *American Control Conference, Proceedings of the.* Bd. 2. 2002, S. 1425 – 1430.
- [75] **Konz, Martin, Lemke, Nicholas, Försterling, Sven und Eghtessad, Marjam.** *Spezifische Anforderungen an das Heiz-Klimasystem elektromotorisch angetriebener Fahrzeuge.* Hrsg. von **Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V.** 2011.
- [76] **Koot, M., Kessels, J.T.B.A., Jager, B. de, Heemels, W.P.M.H., Bosch, P.P.J. van den und Steinbuch, M.** *Energy management strategies for vehicular electric power systems.* In: *Vehicular Technology, IEEE Transactions on* 54.3 (2005), S. 771 – 782.
- [77] **Korthauer, Reiner,** Hrsg. *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien.* Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013.
- [78] **Kutter, S., Bäker, B. und Langhammer, S.** *eVehicleLib - Eine Modelica-Bibliothek zur Simulation von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben.* In: 20. *Symposium Simulationstechnik, ASIM 2009.* 23.-25. September. Cottbus, 2009.

- [79] **Lamm, Arnold, Warthmann, Wolfgang, Soczka-Guth, Thomas, Kaufmann, Rainer, Spier, Bernd, Friebe, Peter, Stuif, Heiko und Mohrdieck, Christian.** *Lithium-Ionen-Batterie - Erster Serieneinsatz im S 400 Hybrid.* In: *ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift* 08-2009 (2009), S. 490 – 504.
- [80] **Laubach, Sven.** *Optimierung des Energiemanagements in Elektrofahrzeugen mittels Stochastischer Dynamischer Programmierung.* Diplomarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2012.
- [81] **Lawrence, Christopher P.** *Improving Fuel Economy Via Management of Auxiliary Loads in Fuel-Cell Electric Vehicles.* Masterthesis. University of Waterloo, 2007.
- [82] **Lee, Changwon, Kwon, Jungho, Lee, Youngrok und Park, Jaehyun.** *Energieeffiziente Antriebstechnologien: Hybridisierung – Downsizing – Software und IT.* In: Hrsg. von **Siebenpfeiffer, Wolfgang.** Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2013. Kap. Optimierte Klimaanlage für erhöhte Reichweite von Elektrofahrzeugen, S. 54 – 59.
- [83] **Lescot, J., Sciarretta, A., Chamailard, Y. und Charlet, A.** *On the integration of optimal energy management and thermal management of hybrid electric vehicles.* In: *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2010 IEEE.* 2010, S. 1 – 6.
- [84] **Liebel, Manfred.** *Anordnung von Bremswiderständen.* EP 0 994 490 A2. Europäisches Patent. 2000.
- [85] **Lin, Chan-Chiao, Peng, Huei und Grizzle, J.W.** *A stochastic control strategy for hybrid electric vehicles.* In: *American Control Conference. Proceedings of the.* Bd. 5. 2004, S. 4710 – 4715.
- [86] **Lin, Chan-Chiao, Peng, Huei, Grizzle, J.W. und Kang, Jun-Mo.** *Power management strategy for a parallel hybrid electric truck.* In: *Control Systems Technology, IEEE Transactions on* 11.6 (2003), S. 839 – 849.
- [87] **Lunanova, Marco.** *Optimierung von Nebenaggregaten: Maßnahmen zur Senkung der CO₂-Emission von Kraftfahrzeugen.* Vieweg+Teubner Verlag, 2009.
- [88] **Marek, Rudi und Nitsche, Klaus.** *Praxis der Wärmeübertragung.* Hanser Fachbuchverlag, 2010.
- [89] **Martel, François, Dubé, Yves, Kelouwani, Souso, Jaguemont, Joris und Agbossou, Kodjo.** *Long-term assessment of economic plug-in hybrid electric vehicle battery lifetime degradation management through near optimal fuel cell load sharing.* In: *Journal of Power Sources* 318 (2016), S. 270 – 282.

-
- [90] **Masih-Tehrani, Masoud, Ha'iri-Yazdi, Mohammad-Reza, Esfahanian, Vahid und Safaei, Ali.** *Optimum sizing and optimum energy management of a hybrid energy storage system for lithium battery life improvement.* In: *Journal of Power Sources* 244 (2013), S. 2–10.
- [91] **Mitschke, Manfred und Wallentowitz, Henning.** *Dynamik der Kraftfahrzeuge.* Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014.
- [92] **Moura, S. J., Stein, J. L. und Fathy, H. K.** *Battery-Health Conscious Power Management in Plug-In Hybrid Electric Vehicles via Electrochemical Modeling and Stochastic Control.* In: *Control Systems Technology, IEEE Transactions on* 21.3 (2013), S. 679–694.
- [93] **Müller, Eric André.** *Optimal control of thermal systems.* Dissertation. ETH Zürich, 2006.
- [94] **Murty, Balarama Vempaty.** *High voltage bus and auxiliary heater control system for an electric or hybrid vehicle.* US 6040561. United States Patent. 2000.
- [95] **Nemesh, M. D., Martinchick, Matthew J., Singh, Kulwinder und Ibri, Wisam.** *Vehicle HVAC and RESS thermal management.* US 7975757 B2. United States Patent. 2011.
- [96] **Nemhauser, Georg L.** *Einführung in die Praxis der dynamischen Programmierung.* R. Oldenbourg Verlag, 1969.
- [97] **Neubauer, Jeremy und Wood, Eric.** *Thru-life impacts of driver aggression, climate, cabin thermal management, and battery thermal management on battery electric vehicle utility.* In: *Journal of Power Sources* 259 (2014), S. 262–275.
- [98] **Neumeister, Dirk, Wiebelt, Achim und Heckenberger, Thomas.** *Systemeinbindung einer Lithium-Ionen-Batterie in Hybrid- und Elektroautos.* In: *ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift* 04-2010 (2010), S. 250–255.
- [99] **Noorden, Richard Van.** *The rechargeable revolution: A better battery.* In: *Nature* 507 (2014), S. 26–28.
- [100] **Nüesch, Tobias, Cerofolini, Alberto, Mancini, Giorgio, Cavina, Nicolò, Onder, Christopher und Guzzella, Lino.** *Equivalent Consumption Minimization Strategy for the Control of Real Driving NOx Emissions of a Diesel Hybrid Electric Vehicle.* In: *Energies* 7.5 (2014), S. 3148–3178.
- [101] **Opila, Daniel F.** *Uncertain Route, Destination, and Traffic Predictions in Energy Management for Hybrid, Plug-in, and Fuel-Cell Vehicles.* In: (2016), S. 1685–1692.

- [102] **Padovani, Thomas Miro, Debert, Maxime, Colin, Guillaume und Chamailard, Yann.** *Optimal energy management strategy including battery health through thermal management for hybrid vehicles.* In: *Advances in Automotive Control (AAC 2013)*. 2013, S. 384–389.
- [103] **Papageorgiou, M., Leibold, M. und Buss, M.** *Optimierung*. Springer-Verlag, 2012.
- [104] **Pesaran, A, Vlahinos, A und Stuart, T.** *Cooling and preheating of batteries in hybrid electric vehicles.* In: *Proceedings of the 6th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference, Hawaii Island*. 2003.
- [105] **Pesaran, Ahmad.** *Battery Thermal Management in EVs and HEVs: Issues and Solutions.* In: *Proceedings of Advanced Automotive Battery Conference, Las Vegas*. 2001.
- [106] **Pham, T.H., Rosea, B. und Wilkins, S.** *Battery Peak Power Shaving Strategy to Prolong Battery Life for Electric Buses.* In: *8th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control (AAC)*. Bd. 49. 11. Norrköping, Sweden, 2016, S. 77–83.
- [107] **Pischinger, Stefan, Genender, Peter, Klopstein, Stefan und Hemkemeyer, David.** *Aufgaben beim Thermomanagement von Hybrid- und Elektrofahrzeugen.* In: *ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift* 116.4 (2014), S. 54–59.
- [108] **Plötz, Patrick, Gnann, Till, Kühn, André und Wietschel, Martin.** *Markthochlaufszzenarien für Elektrofahrzeuge.* Techn. Ber. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, 2013.
- [109] **Pontrjagin, L. S.** *Mathematische Theorie optimaler Prozesse.* Bd. 2. Übersetzung aus dem Russischen. R. Oldenbourg, 1967.
- [110] **Rao, Zhonghao und Wang, Shuangfeng.** *A review of power battery thermal energy management.* In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15.9 (2011), S. 4554–4571.
- [111] **Rezaei, Amir und Burl, Jeffrey B.** *Effects of Time Horizon on Model Predictive Control for Hybrid Electric Vehicles.* In: *4th IFAC Workshop on Engine and Powertrain Control, Simulation and Modeling E-COSM 2015*. Columbus, Ohio, USA, 2015, S. 252–256.
- [112] **Robert Bosch GmbH, Hrsg.** *Bosch Autoelektrik und Autoelektronik: Bordnetze, Sensoren und elektronische Systeme.* 6. Aufl. Vieweg+Teubner Verlag, 2011.

-
- [113] **Rodatz, P., Paganelli, G., Sciarretta, A. und Guzzella, L.** *Optimal power management of an experimental fuel cell/supercapacitor-powered hybrid vehicle.* In: *Control Engineering Practice* 13.1 (2005), S. 41–53.
- [114] **Romaus, C., Gathmann, K. und Böcker, J.** *Optimal energy management for a hybrid energy storage system for electric vehicles based on Stochastic Dynamic Programming.* In: *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2010 IEEE. 2010, S. 1–6.
- [115] **Roscher, Michael A., Leidholdt, Wolfgang und Trepte, Jens.** *High efficiency energy management in BEV applications.* In: *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 37.1 (2012), S. 126–130.
- [116] **Sakhdari, B und Azad, NL.** *An Optimal Energy Management System for Battery Electric Vehicles.* In: *IFAC-PapersOnLine* 48.15 (2015), S. 86–92.
- [117] **Saxena, Samveg, Floch, Caroline Le, MacDonald, Jason und Moura, Scott.** *Quantifying EV battery end-of-life through analysis of travel needs with vehicle powertrain models.* In: *Journal of Power Sources* 282 (2015), S. 265–276.
- [118] **Schäuffele, Jörg und Zurawka, Thomas,** Hrsg. *Automotive Software Engineering.* 5. Vieweg+Teubner Verlag, 2013.
- [119] **Schmalstieg, Johannes, Käbitz, Stefan, Ecker, Madeleine und Sauer, Dirk Uwe.** *A holistic aging model for $\text{Li}(\text{NiMnCo})\text{O}_2$ based 18650 lithium-ion batteries.* In: *Journal of Power Sources* 257 (2014), S. 325–334.
- [120] **Schmid, Karl-Heinz.** *Wärmemanagement von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen.* Cuvillier Verlag, 2009.
- [121] **Schmidt, J. P.** *Verfahren zur Charakterisierung und Modellierung von Lithium-Ionen Zellen:* Schriften des Instituts für Werkstoffe der Elektrotechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2013.
- [122] **Schmidt, M.** *Nebenaggregate-Management III - Vorhaben Nr. 702.* Abschlussbericht. Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e. V., 2000.
- [123] **Schneider, Gerhard und Mikolcic, Hratin.** *Einführung in die Methode der dynamischen Programmierung.* R. Oldenbourg, 1972.
- [124] **Schouten, N. J., Salman, M. A. und Kheir, N. A.** *Fuzzy logic control for parallel hybrid vehicles.* In: *Control Systems Technology, IEEE Transactions on* 10.3 (2002), S. 460–468.

- [125] **Serrao, Lorenzo, Onori, Simona, Sciarretta, Antonio, Guezennec, Yann und Rizzoni, Giorgio.** *Optimal energy management of hybrid electric vehicles including battery aging.* In: *American Control Conference (ACC)*. 2011, S. 2125–2130.
- [126] **Seto, T. und Sekino, H.** *Electric Vehicle*. EP0640503. Europäisches Patent. 1998.
- [127] **Shams-Zahraei, Mojtaba, Kouzani, Abbas Z., Kutter, Steffen und Bäker, Bernard.** *Integrated thermal and energy management of plug-in hybrid electric vehicles.* In: *Journal of Power Sources* 216.0 (2012), S. 237–248.
- [128] **Shen, Daliang, Bensch, Valerie und Müller, Steffen.** *Model Predictive Energy Management for a Range Extender Hybrid Vehicle using Map Information.* In: *IFAC-PapersOnLine* 48.15 (2015), S. 263–270.
- [129] **Shi, Yuhui und Eberhart, R.** *A modified particle swarm optimizer.* In: *Evolutionary Computation Proceedings, 1998. IEEE World Congress on Computational Intelligence., The 1998 IEEE International Conference on*. 1998, S. 69–73.
- [130] **Stockar, S., Marano, V., Canova, M., Rizzoni, G. und Guzzella, L.** *Energy-Optimal Control of Plug-in Hybrid Electric Vehicles for Real-World Driving Cycles.* In: *Vehicular Technology, IEEE Transactions on* 60.7 (2011), S. 2949–2962.
- [131] **Stripf, Matthias, Wehowski, Manuel, Schmid, Caroline und Wiebelt, Achim.** *Thermomanagement von Hochleistungs-Li-Ionen-Batterien.* In: *ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift* 01/2012.01 (2012), S. 52–56.
- [132] **Suchaneck, Andre, Probst, Tobias und Puente León, Fernando.** *Determining an energy-optimal thermal management strategy for electric driven vehicles.* In: *Energy Efficient Vehicles*. Expert Verlag, 2012.
- [133] **Suchaneck, Andre, Zhang, Bo und Puente León, Fernando.** *Regenerative braking in electric vehicles with all-wheel drive.* In: *International Journal of Electric and Hybrid Vehicles* 3.4 (2011), S. 330–352.
- [134] **Suck, Gerrit und Spengler, Carsten.** *Lösungen für das Wärmemanagement von Batteriefahrzeugen.* In: *ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift* 116.7-8 (2014), S. 12–19.
- [135] **Sundström, O.** *Optimal control and design of hybrid-electric vehicles.* Dissertation. ETH Zürich, 2009.

-
- [136] **Sundström, O. und Guzzella, L.** *A Generic Dynamic Programming Matlab Function*. In: *Proceedings of the 18th IEEE International Conference on Control Applications, Saint Petersburg, Russia*. 2009, S. 1625 – 1630.
- [137] **Suri, Girish und Onori, Simona.** *A control-oriented cycle-life model for hybrid electric vehicle lithium-ion batteries*. In: *Energy* 96 (2016), S. 644 – 653.
- [138] **Sychta, Leszek.** *System for optimising pump station control*. In: *World Pumps* 2004.449 (2004), S. 45 – 48.
- [139] **Tang, L., Rizzoni, G. und Cordoba-Arenas, A.** *Battery Life Extending Charging Strategy for Plug-in Hybrid Electric Vehicles and Battery Electric Vehicles**. In: *8th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control (AAC)*. Norrköping, Sweden, 2016, S. 70 – 76.
- [140] **Thielmann, A, Isenmann, R und Wietschel, M.** *Technologie-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030*. Techn. Ber. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, 2012.
- [141] **Tippmann, Simon, Walper, Daniel, Balboa, Luis, Spier, Bernd und Bessler, Wolfgang G.** *Low-temperature charging of lithium-ion cells part I: Electrochemical modeling and experimental investigation of degradation behavior*. In: *Journal of Power Sources* 252.0 (2014), S. 305 – 316.
- [142] **Tschöke, Helmut**, Hrsg. *Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs*. ATZ/MTZ-Fachbuch. Vieweg+Teubner Verlag, 2014.
- [143] **UNECE – GRPE – WLTP.** *Proposal for amendments to global technical regulation No. 15 on Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure (WLTP)*. 3.2015.
- [144] **Vatanparvar, Korosh und Al Faruque, Mohammad Abdullah.** *Battery Lifetime-aware Automotive Climate Control for Electric Vehicles*. In: *Proceedings of the 52nd Annual Design Automation Conference*. DAC '15. San Francisco, California: ACM, 2015, 37:1 – 37:6.
- [145] **VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC)**, Hrsg. *VDI-Wärmeatlas*. 10. Aufl. Springer-Verlag, 2006.
- [146] **Vetter, J., Novak, P., Wagner, M. R., Veit, C., Moller, K. C., Besenhard, J. O., Winter, M., Wohlfahrt-Mehrens, M., Vogler, C. und Hammouche, A.** *Ageing mechanisms in lithium-ion batteries*. In: *Journal of Power Sources* 147.1-2 (2005), S. 269 – 281.
- [147] **Vinot, E. und Trigui, R.** *Optimal energy management of HEVs with hybrid storage system*. In: *Energy Conversion and Management* 76.0 (2013), S. 437 – 452.

- [148] **Wahba, Mohamed und Brennan, Sean.** *MPC-Based Energy Management of a Parallel Hybrid Electric Vehicle Using Terrain Information.* In: *ASME 2015 Dynamic Systems and Control Conference.* American Society of Mechanical Engineers. 2015, V001T10A005 – V001T10A005.
- [149] **Wahl, Hans-Georg, Bauer, Kai-Lukas, Gauterin, Frank und Holzapfel, Marc.** *A real-time capable enhanced dynamic programming approach for predictive optimal cruise control in hybrid electric vehicles.* In: *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2013 16th International IEEE Conference on.* 2013, S. 1662 – 1667.
- [150] **Waldmann, Thomas, Wilka, Marcel, Kasper, Michael, Fleischhammer, Meike und Wohlfahrt-Mehrens, Margret.** *Temperature dependent ageing mechanisms in Lithium-ion batteries – A Post-Mortem study.* In: *Journal of Power Sources* 262 (2014), S. 129 – 135.
- [151] **Wallentowitz, Henning, Freialdenhoven, Arndt und Olschewski, Ingo.** *Strategien zur Elektrifizierung des Antriebstranges – Technologien, Märkte und Implikationen.* 2. Auflage. ATZ/MTZ-Fachbuch. Vieweg+Teubner Verlag, 2011.
- [152] **Wang, Zhancheng, Huang, Bufu, Xu, Yangsheng und Li, Weimin.** *Optimization of Series Hybrid Electric Vehicle Operational Parameters By Simulated Annealing Algorithm.* In: *Control and Automation, 2007. ICCA 2007. IEEE International Conference on.* 2007, S. 1536 – 1541.
- [153] **Wiebelt, Achim, Isermeyer, Tobias, Siebrecht, Thomas und Heckenberger, Thomas.** *Thermomanagement von Lithium-Ionen-Batterien.* In: *ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift* 2009-08 (2009), S. 500 – 504.
- [154] **Wilde, Andreas.** *Eine modulare Funktionsarchitektur für adaptives und vorausschauendes Energiemanagement in Hybridfahrzeugen.* Dissertation. Technische Universität München, 2010.
- [155] **Xiaoxia, Sun, Yichun, Wang, Lingke, Meng, Facheng, Wang und Longyun, Xiang.** *Research on braking resistor of hybrid electric armored vehicle.* In: *Information Networking and Automation (ICINA), 2010 International Conference on.* Bd. 2. 2010, S. 206 – 210.
- [156] **Zeyen, Michael Günther und Wiebelt, Achim.** *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien.* In: Hrsg. von **Korthauer, Reiner.** Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. Kap. Thermisches Management der Batterie, S. 165 – 176.

- [157] **Zhou, Peng.** *Electric Vehicle Thermal Management System*. WO/2008/127527. WIPO Patent. 2008.
- [158] **Zhou, Wei, Schäper, Christoph, Ecker, Madeleine, Fischer, Tim, Bohmann, Carl, Hörth, Leonard und Sauer, Dirk Uwe.** *Wärmemanagement des Kraftfahrzeug VIII*. In: Hrsg. von **Steinberg, Peter**. Expert Verlag, 2012. Kap. Thermisches und Lebensdauerbatteriemodell für die Konzeptuntersuchung eines Lithium-Ionen Batteriesystems als Wärmespeicher im Elektrofahrzeug, S. 284–302.

Eigene Veröffentlichungen

Bauer, Sebastian, Suchaneck, Andre und Puente León, Fernando. *Thermal and energy battery management optimization in electric vehicles using Pontryagin's maximum principle*. In: *Journal of Power Sources* 246 (2013), S. 808–818.

Suchaneck, Andre, Probst, Tobias und Puente León, Fernando. *Determining an energy-optimal thermal management strategy for electric driven vehicles*. In: *Energy Efficient Vehicles*. Expert Verlag, 2012.

Suchaneck, Andre und Puente León, Fernando. *Potential eines energieoptimalen Batterie-Thermomanagements im Elektrofahrzeug*. In: *AUTOREG 2011*. Baden-Baden, 2011.

Suchaneck, Andre, Puente León, Fernando und Jost, Andreas. *Reports on industrial information technology*. Vol. 12. In: Hrsg. von **Puente León, Fernando**. Bd. 12. Reports on industrial information technology. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2010. Kap. Highly efficient load distribution of parallel DC-DC converters, S. 193–202.

Suchaneck, Andre, Zhang, Bo und Puente León, Fernando. *Regenerative braking in electric vehicles with all-wheel drive*. In: *International Journal of Electric and Hybrid Vehicles* 3.4 (2011), S. 330–352.

Betreute studentische Arbeiten

Bauer, Sebastian. *Optimierung des Energiemanagements in Elektrofahrzeugen mittels des Maximumprinzips von Pontryagin*. Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2012.

- Eiler, Torsten.** *Implementierung eines Doppelschichtkondensatormodells für simulative Untersuchungen.* Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2010.
- Fintescu, Nicolas.** *Optimierung des Energiemanagements in Elektrofahrzeugen.* Diplomarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2012.
- Hofmann, Michael.** *Untersuchung des Optimierungspotentials von Elektrofahrzeugen durch Steuerung von Nebenverbrauchern.* Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2010.
- Laubach, Sven.** *Optimierung des Energiemanagements in Elektrofahrzeugen mittels Stochastischer Dynamischer Programmierung.* Diplomarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2012.
- Maier, Stefan.** *Analyse der Energieeffizienzsteigerung durch Steuerung der Motorspannung in Elektrofahrzeugen.* Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2010.
- Merkel, Thomas.** *Modellierung und Regelung eines in Elektrofahrzeugen eingesetzten DC/DC-Wandlers.* Studienarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2010.
- Nusser, Andreas.** *Aufbau und Validierung eines Gesamtfahrzeugmodells eines Elektrofahrzeugs.* Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2010.
- Nusser, Andreas.** *Methode zur optimalen Leistungsregelung in Brennstoffzellenfahrzeugen.* Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2012.
- Probst, Tobias.** *Methode zum energieoptimalen Thermomanagement im Elektrofahrzeug bei gegebener Fahrsituation.* Diplomarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2012.
- Rupp, Verena.** *Energieoptimale Regelung parallelgeschalteter DC-DC-Wandler.* Studienarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2010.
- Seiter, Julia.** *Energieoptimale Steuerung der Zwischenkreisspannung mehrmotoriger Antriebskonfigurationen.* Studienarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2010.
- Stellet, Jan.** *Entwicklung einer Methode zur Antriebsschlupfregelung für Elektrofahrzeuge.* Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2012.
- Wegner, Christian.** *Methode zur wirkungsgradoptimalen Rekuperation in Elektrofahrzeugen.* Studienarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2010.
- Zhang, Bo.** *Modellierung, Regelung und Analyse des regenerativen Bremsvorgangs elektrisch angetriebener Fahrzeuge.* Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2011.

Forschungsberichte aus der Industriellen Informationstechnik (ISSN 2190-6629)

**Institut für Industrielle Informationstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)**

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Fernando Puente León, Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Dostert

- Band 1 Pérez Grassi, Ana
**Variable illumination and invariant features for detecting
and classifying varnish defects.** (2010)
ISBN 978-3-86644-537-6
- Band 2 Christ, Konrad
**Kalibrierung von Magnet-Injektoren für Benzin-
Direkteinspritzsysteme mittels Körperschall.** (2011)
ISBN 978-3-86644-718-9
- Band 3 Sandmair, Andreas
**Konzepte zur Trennung von Sprachsignalen
in unterbestimmten Szenarien.** (2011)
ISBN 978-3-86644-744-8
- Band 4 Bauer, Michael
**Vergleich von Mehrträger-Übertragungsverfahren und
Entwurfskriterien für neuartige Powerline-Kommunikations-
systeme zur Realisierung von Smart Grids.** (2012)
ISBN 978-3-86644-779-0
- Band 5 Kruse, Marco
**Mehrobjekt-Zustandsschätzung mit verteilten Sensorträgern
am Beispiel der Umfeldwahrnehmung im Straßenverkehr.** (2013)
ISBN 978-3-86644-982-4
- Band 6 Dudeck, Sven
**Kamerabasierte In-situ-Überwachung gepulster
Laserschweißprozesse.** (2013)
ISBN 978-3-7315-0019-3
- Band 7 Liu, Wenqing
**Emulation of Narrowband Powerline Data Transmission
Channels and Evaluation of PLC Systems.** (2013)
ISBN 978-3-7315-0071-1

- Band 8 Otto, Carola
Fusion of Data from Heterogeneous Sensors with Distributed Fields of View and Situation Evaluation for Advanced Driver Assistance Systems. (2013)
ISBN 978-3-7315-0073-5
- Band 9 Wang, Limeng
Image Analysis and Evaluation of Cylinder Bore Surfaces in Micrographs. (2014)
ISBN 978-3-7315-0239-5
- Band 10 Michelsburg, Matthias
Materialklassifikation in optischen Inspektionssystemen mithilfe hyperspektraler Daten. (2014)
ISBN 978-3-7315-0273-9
- Band 11 Pallauf, Johannes
Objektsensitive Verfolgung und Klassifikation von Fußgängern mit verteilten Multi-Sensor-Trägern. (2016)
ISBN 978-3-7315-0529-7
- Band 12 Sigle, Martin
Robuste Schmalband-Powerline-Kommunikation für Niederspannungsverteilernetze. (2016)
ISBN 978-3-7315-0539-6
- Band 13 Opalko, Oliver
Powerline-Kommunikation für Batteriemanagement-Systeme in Elektro- und Hybridfahrzeugen. (2017)
ISBN 978-3-7315-0647-8
- Band 14 Han, Bin
Characterization and Emulation of Low-Voltage Power Line Channels for Narrowband and Broadband Communication. (2017)
ISBN 978-3-7315-0654-6
- Band 15 Alonso, Damián Ezequiel
Wireless Data Transmission for the Battery Management System of Electric and Hybrid Vehicles. (2017)
ISBN 978-3-7315-0670-6

- Band 16 Hernández Mesa, Pilar
 **Design and analysis of a content-based image
 retrieval system.** (2017)
 ISBN 978-3-7315-0692-8
- Band 17 Suchaneck, André
 **Energiemanagement-Strategien für
 batterieelektrische Fahrzeuge.** (2018)
 ISBN 978-3-7315-0773-4

ISSN 2190-6629
ISBN 978-3-7315-0773-4

Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISBN 978-3-7315-0773-4



9 783731 507734 >