

Hannes Hopp

Thermomanagement von Hochleistungsfahrzeug- Traktionsbatterien anhand gekoppelter Simulationsmodelle



Springer Vieweg

Wissenschaftliche Reihe

Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart

Herausgegeben von

M. Bargende, Stuttgart, Deutschland

H.-C. Reuss, Stuttgart, Deutschland

J. Wiedemann, Stuttgart, Deutschland

Das Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK) an der Universität Stuttgart erforscht, entwickelt, appliziert und erprobt, in enger Zusammenarbeit mit der Industrie, Elemente bzw. Technologien aus dem Bereich moderner Fahrzeugkonzepte. Das Institut gliedert sich in die drei Bereiche Kraftfahrwesen, Fahrzeugantriebe und Kraftfahrzeug-Mechatronik. Aufgabe dieser Bereiche ist die Ausarbeitung des Themengebietes im Prüfstandsbetrieb, in Theorie und Simulation.

Schwerpunkte des Kraftfahrwesens sind hierbei die Aerodynamik, Akustik (NVH), Fahrdynamik und Fahrermodellierung, Leichtbau, Sicherheit, Kraftübertragung sowie Energie und Thermomanagement – auch in Verbindung mit hybriden und batterieelektrischen Fahrzeugkonzepten.

Der Bereich Fahrzeugantriebe widmet sich den Themen Brennverfahrensentwicklung einschließlich Regelungs- und Steuerungskonzeptionen bei zugleich minimierten Emissionen, komplexe Abgasnachbehandlung, Aufladesysteme und -strategien, Hybridsysteme und Betriebsstrategien sowie mechanisch-akustischen Fragestellungen.

Themen der Kraftfahrzeug-Mechatronik sind die Antriebsstrangregelung/Hybride, Elektromobilität, Bordnetz und Energiemanagement, Funktions- und Softwareentwicklung sowie Test und Diagnose.

Die Erfüllung dieser Aufgaben wird prüfstandsseitig neben vielem anderen unterstützt durch 19 Motorenprüfstände, zwei Rollenprüfstände, einen 1:1-Fahrtsimulator, einen Antriebsstrangprüfstand, einen Thermowindkanal sowie einen 1:1-Aeroakustikwindkanal.

Die wissenschaftliche Reihe „Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart“ präsentiert über die am Institut entstandenen Promotionen die hervorragenden Arbeitsergebnisse der Forschungstätigkeiten am IVK.

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende
Lehrstuhl Fahrzeugantriebe,
Institut für Verbrennungsmotoren und
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann
Lehrstuhl Kraftfahrwesen,
Institut für Verbrennungsmotoren und
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss
Lehrstuhl Kraftfahrzeugmechatronik,
Institut für Verbrennungsmotoren und
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Hannes Hopp

Thermomanagement von Hochleistungsfahrzeug- Traktionsbatterien anhand gekoppelter Simulationsmodelle

Hannes Hopp
Stuttgart, Deutschland

Zugl.: Dissertation Universität Stuttgart, 2015

D93

Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart
ISBN 978-3-658-14246-9 ISBN 978-3-658-14247-6 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-658-14247-6

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg
© Springer Fachmedien Wiesbaden 2016
Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.
Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.
Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind.
Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature
Die eingetragene Gesellschaft ist Springer Fachmedien Wiesbaden

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als akademischer Mitarbeiter am Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS). Als Grundlage diente ein Industrie-Kooperationsprojekt mit der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG im Entwicklungsbereich in Weissach.

Ganz besonders möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann für die Übernahme des Erstberichts und für die allzeit anregenden und motivierenden Diskussionen danken. Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weigand möchte ich für den Mitbericht der vorliegenden Arbeit danken. Den Herren Dr.-Ing. Timo Kuthada und Dipl.-Ing. Nils Widdecke danke ich herzlichst für die produktiven Diskussionen und die sehr gute Zusammenarbeit während meiner Zeit am FKFS.

Als Projektpartner möchte ich der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, repräsentiert durch die Entwicklungsabteilung „Aerodynamik und Thermomanagement“, deren Abteilungsleiter, Herrn Dipl.-Ing. Michael Pfadenhauer, und meinen Betreuern Herrn Dr.-Ing. Timo Lemke und Herrn Dr.-Ing. Ralf Häßler, für die sehr angenehme und offene Zusammenarbeit danken.

Außerdem gilt mein Dank allen Kollegen des FKFS und der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, die mich während dieser Arbeit unterstützt haben und jederzeit für interessante Diskussionen zur Verfügung standen. Ein besonderer Dank gilt dem Bacheloranden Christof Schlör sowie dem Diplomanden Armin Stangl für die wertvolle Unterstützung.

Abschließend möchte ich meiner Frau, Charlotte Hopp-Boothroyd, für ihre verständnisvolle und beständige Unterstützung während der Ausarbeitung dieser Arbeit herzlichst danken.

Hannes Hopp

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichenverzeichnis.....	IX
Abkürzungsverzeichnis.....	XIII
Kurzfassung	XV
Abstract	XIX
1 Einleitung und Zielsetzung	1
2 Stand der Technik und Grundlagen von Lithium-Ionen-Batterien	3
2.1 Antriebskonzepte und Batteriesysteme	3
2.2 Lithium-Ionen-Batterietechnologie.....	7
2.3 Simulation von Batteriesystemen.....	12
2.4 Thermomanagement elektrifizierter Antriebsstränge	16
2.5 Fahrzyklen und Lastanforderungen.....	20
3 Simulationsmodelle – Aufbau und Funktion	23
3.1 Fluidkreisläufe.....	24
3.1.1 Hydraulisches Kühlmittelkreislaufmodell.....	24
3.1.2 R134a Kältemittelkreislaufmodell	27
3.2 Batteriemanagementsystem.....	33
3.3 Batteriemodell	34
3.3.1 Thermisches Batteriemodell.....	34
3.3.2 Elektrisches Batteriemodell.....	38
3.4 Gekoppelter Simulationsverbund.....	43
3.5 Zusammenfassung und Bewertung	47
4 Experimentelle Untersuchungen und Validierung.....	49
4.1 Validierung des Kühlkreislaufmodells.....	49
4.2 Validierung des Kältekreislaufmodells	50
4.3 Thermoelektrische Untersuchungen an Einzelzellen	56
4.3.1 Versuchsaufbau	57
4.3.2 Abstimmung des thermoelektrischen pseudo-2D-Simulationsmodells	59
4.3.3 Validierung des thermoelektrischen pseudo-2D-Simulationsmodells	63
4.4 Thermoelektrische Untersuchungen an einem Batteriemodul	71

4.4.1	Versuchsaufbau und Messprogramm	72
4.4.2	Thermisches Verhalten des Batteriemoduls bei Abkühlung	74
4.4.3	Thermoelektrisches Verhalten bei elektrischer Last	76
4.5	Validierung im Gesamtfahrzeugverbund	85
4.6	Zusammenfassung und Bewertung	93
5	Ergebnisse.....	95
5.1	Thermisches Systemverhalten unter Reichweitenaspekten	95
5.1.1	Fahrzyklen und thermisches Systemverhalten	95
5.1.2	Thermische Reichweiteeinflüsse in der „Stuttgart-Runde“	100
5.1.3	Reichweitenuntersuchungen für die „End-of-Life“ Betrachtung.....	105
5.1.4	Zusammenfassung und Bewertung	107
5.2	Thermisches Systemverhalten im Rennstreckenbetrieb.....	108
5.2.1	Vergleich verschiedener Streckenprofile und Betriebsarten	109
5.2.2	Einfluss von Start- / Umgebungstemperatur auf die Batterietemperatur ...	112
5.2.3	Einfluss der thermischen Kontaktierung des Batteriesystems	116
5.2.4	Vergleich unterschiedlicher Regelungsstrategien	117
5.2.5	Thermische Interaktion mit dem Motorkühlsystem	119
5.2.6	Zusammenfassung und Bewertung	121
6	Schlussfolgerungen und Ausblick	123
	Literaturverzeichnis	125

Formelzeichenverzeichnis

<i>A</i>	Fläche	<i>m</i> ²
<i>C</i>	Elektrische Kapazität	<i>F</i>
<i>c</i>	spezifische elektrische Ladungsmenge	
<i>c</i>	spezifische Wärmekapazität eines Feststoffs	<i>J/kg/K</i>
<i>c_p</i>	spezifische isobare Wärmekapazität	<i>J/kg/K</i>
<i>D</i>	Bezugslänge	<i>m</i>
<i>d</i>	Durchmesser	<i>m</i>
<i>DOD</i>	Entladezustand (<i>engl. Depth of Discharge</i>)	
<i>E</i>	Energiemenge	<i>J</i>
<i>ETD</i>	Eintrittstemperaturdifferenz	<i>K</i>
<i>f</i>	Drehfrequenz	<i>1/s</i>
<i>F</i>	Faraday-Konstante	<i>C/mol</i>
<i>g</i>	Erdbeschleunigung	<i>m/s</i> ²
<i>G</i>	<i>Gibbs</i> ‘sche freie Energie	<i>J</i>
<i>H</i>	Enthalpie	<i>J</i>
<i>H</i>	Enthalpiestrom	<i>W</i>
<i>h</i>	Spezifische Enthalpie	<i>J/kg</i>
<i>I</i>	Elektrischer Strom	<i>A</i>
<i>j</i>	Massenstromdichte	<i>kg/m</i> ² /s
<i>k</i>	Wärmedurchgangskoeffizient	<i>W/m</i> ² /K
<i>l</i>	Länge	<i>m</i>
<i>m</i>	Masse	<i>kg</i>
<i>ṁ</i>	Massenstrom	<i>kg/s</i>
<i>n</i>	Anzahl	
<i>n</i>	Drehzahl	<i>1/s</i>
<i>Nu</i>	<i>Nusselt</i> -Zahl	
<i>OCV</i>	Ruhespannung (<i>engl. Open Circuit Voltage</i>)	<i>V</i>
<i>P</i>	Leistung	<i>W</i>
<i>p</i>	statischer Druck	<i>Pa</i>
<i>Pr</i>	<i>Prandtl</i> -Zahl	
<i>Q</i>	Ladungsmenge	<i>As</i>
<i>Q</i>	Wärmemenge	<i>J</i>
<i>Q̄</i>	Wärmestrom	<i>W</i>
<i>r</i>	spezifischer elektrischer Widerstand	
<i>R</i>	elektrischer Widerstand	<i>V/A</i>
<i>R_{th}</i>	thermischer Kontaktwiderstand	<i>K/W</i>
<i>R</i> ²	Residuum	
<i>Re</i>	<i>Reynolds</i> -Zahl	
<i>s</i>	Strecke	<i>m</i>

<i>S</i>	Entropie	J/K
<i>Š</i>	Entropiestrom	W/K
<i>SOC</i>	Ladezustand	
<i>T</i>	Absolute Temperatur	K
<i>t</i>	Zeit	s
<i>U</i>	elektrische Spannung	V
<i>v</i>	Geschwindigkeit	m/s
<i>V</i>	Volumen	m ³
<i>W</i>	Arbeit	J
<i>x</i>	Abweichung	
<i>z</i>	Höhe	m
α	Wärmeübergangszahl	W/m ² /K
\mathfrak{R}	universelle Gaskonstante	J/mol/K
β	Stellgröße	
χ	relative Größe	
δ	relative Differenz	
ΔG	Differenz der freien Enthalpie	J
ΔH	Enthalpiedifferenz	J
ΔS	Entropiedifferenz	J/K
ΔT	Temperaturdifferenz	K
Δt	Zeitdifferenz	s
ε_k	Leistungsziffer	
Φ	Betriebscharakteristik eines Kreuzstrom-Wärmeübertragers	
γ	Skalierungsgröße der <i>Nusselt</i> -Zahl im Umschlagsbereich	
η	dynamische Viskosität	kg/m/s
η	Wirkungsgrad	
ϑ	Temperatur	°C
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/m/K
μ	Energieverhältnis	
π	Druckverhältnis	
ρ	Dichte	kg/m ³
σ	Standardabweichung	
σ	<i>Stefan-Boltzmann</i> -Konstante	W/m ² /K ⁴
τ	Zeitkonstante	s
Ω	Drehzahlverhältnis	
ξ	<i>Reynolds</i> -Zahl abhängiger Faktor der turbulenten <i>Nusselt</i> -Zahl	
ζ	dimensionsloser strömungsmechanischer Widerstandswert	

Index¹

1	.....	Zustand 1
2	.....	Zustand 2
a	.....	Beschleunigung
A, aus	.....	Austritt aus einer Komponente
Bat	.....	Batterie
BMS	.....	Batteriemanagementsystem
BOL	.....	Beginning-of-Life
COP	.....	Leistungsziffer (<i>engl.</i> Coefficient of Performance)
D0	.....	0. Komponente des Ersatzspannungsmodells
D1	.....	1. Komponente des Ersatzspannungsmodells
dT	.....	Temperaturdifferenz
E, ein	.....	Eintritt in eine Komponente
e	.....	effektiv
el	.....	elektrisch
Ende	.....	Endwert
EOL	.....	End-of-Life
ETD	.....	Eintrittstemperaturdifferenz
Exp	.....	experimentelle Größe
Fuß	.....	Auswertung am Fuß
Grenze	.....	Grenzwert
h	.....	Hub
Hyd	.....	hydraulisch
i	.....	Index
I	.....	Strom
ic	.....	isentrop
irrev	.....	irreversibel
IWT	.....	Innerer Wärmeübertrager
KM	.....	Kältemittel
KMK	.....	Kältemittelkompressor
KMPWT	.....	Kältemittel-Plattenwärmeübertrager
KMPWT-R	.....	Kältemittel-Plattenwärmeübertrager kältemittelseitig
KMV	.....	Kältemittelverdampfer
KW	.....	Kühlmittel
L	.....	laminare Größe
LW	.....	Luftwiderstand
m	.....	Mittelwert
max	.....	Maximalwert
mec	.....	mechanisch
min	.....	Minimalwert
n	.....	Drehzahl des Kompressors
NEFZ	.....	Neuer europäischer Fahrzyklus

¹

Kombinationen der genannten Indizes werden durch Kommata getrennt.

nom	.....	Nominalwert
NTK	.....	Niedertemperatur-Kühler
Oben	.....	obere Position der Auswertung
PTC	.....	Zuheizer
R	.....	Rollwiderstand
rechts	.....	rechte Seitenfläche
Ref	.....	Referenzwert
rev	.....	reversibel
RMS	.....	Effektivwert
S	.....	Schlupfverlust
s	.....	Strecke
Seite	.....	seitliche Auswertung
Sim	.....	Simulationsgröße
Soll	.....	Sollwert
St	.....	Steigungsanteil
Start, 0	.....	Startwert
T	.....	Temperatur
T	.....	Turbulente Größe
TMM	.....	Thermomanagement
U	.....	Spannung
Umg	.....	Umgebung
Unten	.....	untere Position der Auswertung
V	.....	volumetrisch
Verl	.....	Verlust
VT	.....	Triebstrangverlust
x	.....	x-Koordinate
y	.....	y-Koordinate
z	.....	z-Koordinate
Zelle	.....	auf Einzelzelle bezogen

Abkürzungsverzeichnis

BMS	.....	Batteriemanagementsystem
BOL	.....	Beginning-of-Life
CADC	.....	Common Artemis Driving Cycle
CFD	.....	Computational Fluid Dynamics
EOL	.....	End-of-Life
FTP	.....	Federal Test Procedure
HEV	.....	Hybrid Electric Vehicle
HVAC	.....	Heating, Ventilation and Air Conditioning
IWT	.....	Innerer Wärmeübertrager
KMPWT	.....	Kältemittel-Plattenwärmeübertrager
NEFZ	.....	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NiCr-Ni	.....	Nickel-Chrom/Nickel
NiMH	.....	Nickel-Metall-Hydrid
NT	.....	Niedertemperatur
NTC	.....	Negative Temperature Coefficient Thermistor
OEM	.....	Erstausrüster (<i>engl.</i> Original Equipment Manufacturer)
PHEV	.....	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
PWM	.....	Pulsweitenmodulation
RCR	.....	Resistance-Capacity-Resistance
SL	.....	Siedelinie
TL	.....	Taulinie
WLTP	.....	Worldwide Harmonized Light Duty Test Procedure

Kurzfassung

Um die gestiegenen Vorgaben hinsichtlich des CO₂ Ausstoßes von Personenkraftwagen zu erfüllen, wird die Elektrifizierung des Antriebsstrangs immer weiter vorangetrieben. Plug-in-Hybride stellen eine Kombination aus elektrischem Antrieb und konventionellem Verbrennungsmotor zur rein-elektrischen Traktion für kurze Strecken und hybriden Traktion für höhere Reichweiten dar. Für Sportwagen ist die zusätzliche elektrische Leistung durch die Elektromotoren eine Möglichkeit, die Leistungsfähigkeit auf der Rennstrecke und gleichzeitig die Effizienz weiter zu steigern. Lithium-Ionen-Batterien sind die Kernkomponente des elektrischen Antriebsstrangs und daher einer der Hauptbereiche aktueller Entwicklungsumfänge. Die Leistungs- und Energiedichte dieser Batterietechnologie ist bisherigen Nickel-Metall-Hydrid Batterien überlegen, jedoch stellt sie erhöhte Anforderungen an die thermischen Betriebsbedingungen.

Nachfolgend wird die Notwendigkeit zur Kühlung von Lithium-Ionen-Batterien im Fahrzeug erläutert und eine simulative Methode zur Prognose von Batterietemperaturen und der Wechselwirkung mit dem Kühlsystem im Fahrzeugverbund vorgestellt. Im Fahrzeug kann die Temperierung von Batteriesystemen über Luft, Kühlmittel und Kältemittel erfolgen. Die Ziele des Thermomanagement-Systems sind u. a. die Einhaltung der thermischen Grenzbedingungen und eine effiziente Regelung der beteiligten Systeme durch gezieltes Steuern der aktiven Komponenten im Kühlsystem. Das Batteriesystem kommuniziert zum einen mit dem Antriebsstrang, zum anderen besteht über das Batteriemanagementsystem eine bidirektionale Verbindung mit dem angebundenen Kühlsystem und dem Kältemittelkreislauf. Die Abbildung dieser Wechselwirkungen stellt ein weiteres Ziel dieser Arbeit dar. Dafür wird auf die Methode des gekoppelten Simulationsverbunds zurückgegriffen.

Im Rahmen der Arbeit wird die Kombination eines Kältemittelkreislaufs mit einem Kühlmittelkreislauf zur Temperierung des Batteriesystems eingesetzt. Die thermodynamischen Eigenschaften und Wechselwirkungen zwischen den Kreisläufen werden in 1D-Simulationswerkzeugen abgebildet und kommunizieren mit dem Simulationsverbund über eine neutrale Softwareinstanz zur Synchronisierung und zum Austausch der benötigten Eingangs- und Ausgangsdaten. Die Simulationsgüte der beiden Modelle wird in stationären Betriebspunkten untersucht und mit vorhandenen Messdaten abgeglichen. Die Überleitung der stationären in transiente Modelle erfolgt über geschwindigkeitsabhängige Luftdurchsatz-Kennlinien und die Modellierung der Kompressordrehzahl-Regelung im Kältemittelkreislauf sowie der Pumpen-Regelung im Kühlmittelkreislauf.

Im Simulationsverbund stellt das Batteriemodell die zentrale Größe dar. Aufbauend auf bestehenden Modellierungsansätzen wird die Abwärmecharakteristik der Batterie aus Einzellimmessungen untersucht und in ein modulares Simulationsmodell überführt. Ein Klemmspannungsmodell der Batterie ermöglicht die Bilanzierung der Verluste anhand des

Ruhepotenzials der Einzelzellen. Die Parameter des Ersatzmodells werden anhand eines numerischen Optimierungsverfahrens durch Lösung des vorherrschenden linearen Differenzialgleichungssystems identifiziert. Irreversible und reversible (durch endo- und exotherme Reaktionen hervorgerufene) Effekte der Wärmefreisetzung müssen betrachtet werden, um besonders bei niedrigen elektrischen Lasten die zeitlichen Verläufe der Temperatur nachvollziehen zu können. Die Effizienz und Leistungsfähigkeit der Batterie stehen in direkter Wechselwirkung mit der Temperatur. Bei höheren Temperaturen steigt die Effizienz, wobei Alterungseffekte und Sicherheitsaspekte den Temperaturbereich nach oben begrenzen, bei niedrigeren Temperaturen sinkt die Effizienz und das Laden der Batterie ist erschwert. Neben der absoluten Temperatur der Zellen und der Batterie handelt es sich bei der Temperaturhomogenität um eine weitere relevante Eingangsgröße für das Batteriemanagementsystem. Die Temperaturspreizung innerhalb einer Batterie kann zu einer ungleichförmigen Alterung zwischen den Zellen führen.

Ausgehend von einem synthetischen Lastprofil, dem Profil einer Stadtfahrt und zwei Rennstreckenprofilen wird die Validierung des elektro-thermischen Batteriemodells auf Zellbasis, Modulbasis und im Fahrzeug durchgeführt. Die Ergebnisse lassen bei der Einzelzelle auf eine gute Übereinstimmung der simulierten elektrischen und thermischen Größen gegenüber den gemessenen Daten schließen. Im Modulversuch zeigen sich die korrekte Abbildung der Temperaturspreizung zwischen den Zellen und die korrekte Wiedergabe der maximalen Batterietemperaturen. Am Batteriemodul kann zusätzlich zu den elektrischen und thermischen Größen der Zellen der abgegebene Wärmestrom in das Kühlmittel bilanziert werden. Dieser liefert ein weiteres wichtiges Indiz für die Simulationsgüte. Im Fahrzeugversuch ist der dynamisch betriebene Kühl- und Kältemittelkreislauf eine wesentliche Randbedingung, deren Einfluss ebenfalls untersucht wird und eine gute Übereinstimmung von Simulation und Messdaten liefert.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass bereits durch eine Kombination aus einem Klemmspannungsmodell und einem pseudo-zweidimensionalen thermischen Mehrmassenmodell detaillierte Aussagen über die genannten Wechselwirkungen getroffen werden können. Zur Bestimmung der elektrischen Parameter sind hochdynamische Untersuchungen über einen großen Ladezustands- und Temperaturbereich notwendig, die den Aufwand dieser Methode hinsichtlich Kosten und Zeitbedarf erhöhen. Zukünftig könnten physikochemische simulative Untersuchungen unter Kenntnis des inneren Aufbaus und der verwendeten Materialien der Einzelzelle diesen Prozess beschleunigen. Bei der thermischen Modellierung bietet sich der vermehrte Einsatz dreidimensionaler numerischer Methoden an, um abstrahierte thermische Modelle der Batterie zu erzeugen und somit im Simulationsverbund beschleunigt Aussagen treffen zu können. Dieses Vorgehen bietet sich besonders bei Kühlungskonfigurationen mit mehreren Wärmeübertragungspfaden an. Weiterführend kann eine Kombination aus dreidimensional thermisch und elektrisch diskretisiertem Modell noch detaillierter Effekte wie ungleichmäßige Ladungs- und StromdichteVerteilung auf dem Elektrodenstapel auflösen und entgegenwirkende thermische Maßnahmen bewerten.

Der Simulationsverbund wird im weiteren Verlauf zur Prognose der thermoelektrischen Wechselwirkungen der Batterie in verbrauchsrelevanten Fahrzyklen verwendet. Bei diesen Betrachtungen stehen die rein-elektrisch erzielbare Reichweite und die dabei auftretende Erwärmung der Batterie im Vordergrund. Die Batterietemperatur zeigt sich bei Umgebungstemperaturen unterhalb der Zieltemperatur der Batterie als unkritisch, wobei bei hohen Start- und Umgebungstemperaturen die Konditionierung der Batterie einen negativen Einfluss auf die Reichweite hat. Die Klimatisierung des Innenraums benötigt bei hohen Umgebungstemperaturen einen großen Anteil der verfügbaren elektrischen Kapazität und wird über eine Vorgabe aus Literaturwerten abgebildet. Die Batterietemperatur wird durch den zusätzlichen Leistungsbedarf jedoch nur geringfügig beeinflusst, da höhere Batterieströme einem schneller sinkenden Ladezustand entgegenwirken und in manchen Zyklen sogar der Temperaturanstieg reduziert wird.

Eine Variation der Umgebungs-, Start- und Solltemperatur zeigt deren Einfluss auf die elektrisch erzielbare Reichweite und die mittlere Batterietemperatur. Die Vorkonditionierung der Batterie im Ladebetrieb kann sich positiv auf die elektrisch erzielbare Reichweite auswirken. Gleichzeitig kann das Temperaturkollektiv der Batterie deutlich homogener ausfallen, wodurch die Alterung positiv beeinflusst wird. Die Solltemperatur der Batterie ist als Optimum aus Effizienz und Alterung zu verstehen und dabei abhängig vom gewählten Batterietyp und dem Einsatzzweck. Eine Reduktion der Solltemperatur erhöht die thermische Last und beeinflusst die elektrisch erzielbare Reichweite nachteilig, besonders die Kombination aus erhöhter Starttemperatur und niedrigerer Solltemperatur senkt die elektrisch erzielbare Reichweite.

Eine weitere Einsatzmöglichkeit des gekoppelten Simulationsverbunds besteht in der raschen Bewertung von Kühlungskonzepten. Am Beispiel eines im Konzept integrierten Niedertemperaturkühlers zeigen sich der Betriebsbereich in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur und die dabei erzielten Vorteile gegenüber der reinen Nutzung des Kältemittelkreislaufs. Ein Reichweitenvorteil des Niedertemperaturkühlers ist nur in einem kleinen Temperaturbereich gegeben, da bei sinkenden Umgebungstemperaturen der Wirkungsgrad des Kältemittelkreislaufs ansteigt und die Verlustleistung der Batterie in diesen Zyklen sehr gering ausfällt.

Die Alterung der Batterie macht sich durch eine Verminderung der Kapazität und eine Erhöhung des Innenwiderstands bemerkbar. Dieser Zustand kann jedoch nicht detailliert quantifiziert werden, so dass weitere Annahmen getroffen werden müssen, um die Alterungseinflüsse auf die Batterie zu beschreiben. Am Beispiel einer Stadtfahrt werden die Einflüsse einer gealterten Batterie auf die elektrisch erzielbare Reichweite und die auftretenden Verluste untersucht. Bei hohen Umgebungstemperaturen zeigt sich ein zunehmend negativer Einfluss des erhöhten Innenwiderstands auf die Reichweite, wobei die Kapazitätsänderung linear mit der Reichweitenreduktion korreliert. Die Batterietemperatur ist bei dem betrachteten Lastprofil jedoch stets als unkritisch zu bewerten.

Der Rennstreckenbetrieb stellt einen wichtigen Auslegungsfall für das Kühlsystem eines Sportwagens dar. Besonders bei einem Batteriesystem zeigt sich durch den quadratischen