

Christoph Reiter

Thermische Vorauslegung
hochbelasteter Batteriesysteme
für Elektrofahrzeuge in der
Konzeptphase

Technische Universität München

Fakultät für Maschinenwesen

Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik

**Thermische Vorauslegung hochbelasteter
Batteriesysteme für Elektrofahrzeuge
in der Konzeptphase**

Christoph Reiter, M. Sc.

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der
Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Wolfgang Polifke, Ph. D.

Prüfer der Dissertation: 1. Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp
2. Prof. Dr.-Ing. Andreas Jossen

Die Dissertation wurde am 23. Juni 2020 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 30. September 2020 angenommen.

Berichte aus der Fahrzeugtechnik

Christoph Reiter

Thermische Vorauslegung hochbelasteter Batteriesysteme für Elektrofahrzeuge in der Konzeptphase

Shaker Verlag
Düren 2021

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2021

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7838-1

ISSN 0945-0742

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird ein Vorgehen zur thermischen Vorauslegung von Lithium-Ionen Batteriesystemen für Elektrofahrzeuge unter Berücksichtigung aller, in der Konzeptphase relevanten Anforderungen, Einflussgrößen und Rückkopplungen vorgeschlagen. Der Auslegungsprozess umfasst die Auswahl, geometrische Anordnung und elektrische Verschaltung geeigneter Batteriezellen zu einem in Module unterteilten Batteriepack sowie den Entwurf des Thermomanagementkonzepts auf Batterie- und Fahrzeugebene. Die Absicherung der Konzepte erfolgt mittels gekoppelter elektrischer und thermischer Simulation ihres Verhaltens im späteren Fahrzeugeinsatz.

Abstract

In this work, a procedure for the thermal pre-dimensioning of lithium-ion battery systems for electric vehicles is proposed, considering all requirements, influencing factors and interactions relevant in the concept phase. The design process includes the selection, geometrical arrangement, and electrical connection of suitable battery cells to form a battery pack divided into modules as well as the design of the thermal management concept at battery and vehicle level. The concepts are validated by means of a coupled electrical and thermal simulation of their behavior in subsequent vehicle use.

Für meine Eltern.

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik an der Technischen Universität München unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp. Die Finanzierung der Arbeit erfolgte durch das bayerische Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie im Rahmen des Forschungsprojektes *EEBatt – Interdisziplinäre Energiespeicherforschung*, die Bayerische Forschungsförderung im Rahmen des Projektes *NEmo – Nutzerorientierte Elektromobilität* und eine durch den Freistaat Bayern finanzierte Landesstelle.

An erster Stelle bedanke mich bei Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp für die Betreuung, das entgegengebrachte Vertrauen und die Freiheiten, die ich bei der Bearbeitung des Themas genießen durfte und den wertvollen fachlichen, konzeptionellen und persönlichen Rat, auf den ich mich jederzeit verlassen konnte. Prof. Dr.-Ing. Andreas Jossen danke ich für das Interesse an meinem Forschungsthema und die Bereitschaft zur Übernahme des Zweitgutachtens. Weiterhin bedanke ich mich bei Prof. Wolfgang Polifke, Ph. D. für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Meinen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl, allen voran denen meiner Forschungsgruppe *Elektrische Antriebssysteme*, danke ich für die tolle Zusammenarbeit und Atmosphäre, aber vor allem für die schöne, humorvolle und kollegiale Zeit, an die ich mich immer mit Freude zurückerinnern werde. Ein besonderer Dank gilt meinen Kollegen Dr. Jörn Adermann, Dr. Michael Baumann und Nikolaos Wassiliadis, deren Expertise und gemeinsamen Diskussionen mir sehr geholfen haben, meine Arbeit in die richtige Richtung zu lenken. Ein mindestens genauso großer Dank gilt den Studentinnen und Studenten, deren Begeisterung, Kreativität und hoher persönlicher Einsatz in unzähligen Studienarbeiten entscheidend zu den Ergebnissen dieser Arbeit beigetragen haben. Weiterhin danke ich den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Sekretariats, der Buchhaltung und der Werkstätten des Lehrstuhls.

Ich danke meinen Korrekturleserinnen und -lesern Nikolaos Wassiliadis, Fabian Ebert, Leo Wildfeuer, Britta Isermann sowie Martin und Britta Reiter für ihre wertvolle Anregungen und ihre Unterstützung darin, die Arbeit inhaltlich und sprachlich auf das vorliegende Niveau zu bringen.

Meiner Partnerin Britta Isermann danke ich für ihren Rückhalt, die Motivation, ihre Geduld mit mir, ihre Hilfe bei der wichtigen wiederkehrenden Entscheidung, die Diss auch mal Diss sein zu lassen, dass sie mich in guten wie in schlechten Zeiten erträgt und mir stets zur Seite steht.

Mein größter Dank gilt meinen Eltern, die mich mein ganzes Leben bedingungslos unterstützt und stets an mich geglaubt haben, und immer für mich da sind. Ich danke euch von ganzem Herzen!

München, im Juni 2020

Christoph Reiter

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	III
Formelzeichen	V
1 Einleitung	1
1.1 Aktuelle Herausforderungen der Elektromobilität	1
1.2 Aufbau der Arbeit	3
2 Batteriesysteme in Elektrofahrzeugen	5
2.1 Grundlagen der Lithium-Ionen Technologie	5
2.2 Typen und Formate von Lithium-Ionen-Batterien	7
2.3 Anforderungen und Leistungsprofile	8
2.4 Einflüsse von Umwelt, Fahrer und Fahrzeug	9
2.5 Betriebsgrößen und deren Überwachung	10
2.6 Ableitung zulässiger Betriebsfenster	12
3 Ableitung der Themenstellung	15
3.1 Einordnung in den Entwicklungsprozess elektrischer Antriebsstränge	15
3.2 Bewertung bestehender Auslegungsansätze	15
3.3 Ziele und Vorgehen der Arbeit	17
4 Elektrische Auslegung von Batteriesystemen	19
4.1 Verschaltung von Lithium-Ionen-Zellen	19
4.2 Modellierung des elektrischen Systemverhaltens	21
4.3 Validierung des elektrischen Systemmodells	23
4.4 Zellauswahl und elektrische Verschaltung	24
5 Thermische Auslegung von Batteriesystemen	27
5.1 Grundlagen des Thermomanagements	27
5.2 Anforderungen an das Thermomanagement von Batteriesystemen	29
5.3 Modellierung des thermischen Systemverhaltens	31
5.4 Validierung des thermischen Systemmodells	34
5.5 Bewertung der Zellbelastung	36
5.6 Auswahl des thermischen Batteriekonzepts	38

6	Integration in das Thermomanagement des Gesamtfahrzeugs	41
6.1	Thermomanagement von Elektrofahrzeugen	41
6.2	Bestimmung der thermischen Eigenschaften elektrischer Antriebsstränge	43
6.3	Modellierung des Fahrzeugthermomanagements	45
6.4	Validierung des Fahrzeugthermomanagements	47
6.5	Einflüsse unterschiedlicher Systemarchitekturen	49
6.6	Auswahl des Fahrzeugthermomanagements	52
7	Ergebnisse des Auslegungsprozesses	55
7.1	Definition der Anforderungen	55
7.2	Definition der Rahmenbedingungen	57
7.3	Ergebnisse der Packageauslegung	59
7.4	Ergebnisse der elektrischen Auslegung	61
7.5	Ergebnisse der thermischen Auslegung	63
7.6	Ergebnisse der Integration in das Gesamtfahrzeug	67
7.7	Wechselwirkungen zwischen den Systemebenen	73
7.8	Diskussion der Ergebnisse	74
8	Diskussion des Auslegungsprozesses	79
8.1	Benötigte Parameter und Informationen	79
8.2	Vereinfachungen, Limitationen und Entwicklungspotentiale der Modelle	81
8.3	Ablauf der Systemauslegung	85
8.4	Bewertung der Auslegungsempfehlungen	88
9	Zusammenfassung und Ausblick	89
9.1	Problemstellung der Arbeit	89
9.2	Auslegungsprozess	90
9.3	Absicherung des Auslegungsprozesses	91
9.4	Abgeleitete Auslegungsempfehlungen	91
9.5	Vorgehen für die Auslegung von Thermomanagementsystemen	93
9.6	Nutzung und Weiterentwicklung des Auslegungsprozesses	94
	Abbildungsverzeichnis	i
	Tabellenverzeichnis	v
	Literaturverzeichnis	vii
	Vorveröffentlichungsliste	xxi
	Betreute Studienarbeiten	xxv
	Anhang	xxvii

Abkürzungsverzeichnis

AC	Wechselstrom (<i>engl. alternating current</i>)
ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobil-Club
BEV	Batterieelektrifahrzeug (<i>engl. battery electric vehicle</i>)
BMS	Batteriemanagementsystem
BTMS	Batteriethermomagementsystem
CADC	Artemis-Fahrzyklus (<i>engl. Common Artemis Driving Cycle</i>)
CCCV	Konstantstrom, Konstantspannung (<i>engl. constant current, constant voltage</i>)
CFD	numerische Strömungsmechanik (<i>engl. computational fluid dynamics</i>)
CO ₂	Kohlendioxid
CV	Konstantspannung (<i>engl. constant voltage</i>)
DC	Gleichstrom (<i>engl. direct current</i>)
DST	Dynamischer Stromzyklus für Zelltests (<i>engl. Dynamic Stress Test</i>)
ECM	elektrisches Ersatzschaltkreismodell (<i>engl. equivalent circuit model</i>)
EM	elektrische Maschine
EOL	Ende der Lebensdauer (<i>engl. end of life</i>)
FV	finites Volumen
FVM	Finite-Volumen-Methode
HEV	Hybridelektrifahrzeug (<i>engl. hybrid electric vehicle</i>)
HT	Hochtemperatur
HVAC	Klimatisierungssystem (<i>engl. heating, ventilation, and air conditioning</i>)
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
KK	Kühlkreislauf
LA	Lastkollektivanalyse
LE	Leistungselektronik
LIB	Lithium-Ionen-Zelle (<i>engl. lithium-ion battery</i>)
MEG	Monoethylenglycol
NT	Niedertemperatur
OCV	Ruhspeisung (<i>engl. open-circuit voltage</i>)
OEM	Automobilhersteller (<i>engl. original equipment manufacturer</i>)

PCM	Phasenwechselmaterial (<i>engl. phase-change-material</i>)
PEP	Produktentstehungsprozess
PHEV	Plug-in-Hybridelektrofahrzeug (<i>engl. plug-in hybrid electric vehicle</i>)
Pkw	Personenkraftwagen
PTC	Widerstandsheizler (<i>engl. positive temperature coefficient heater</i>)
SEI	Passivierungsschicht (<i>engl. solid electrolyte interphase</i>)
SOC	Ladungszustand (<i>engl. state of charge</i>)
SOH	Alterungszustand (<i>engl. state of health</i>)
SOP	verfügbare Leistung (<i>engl. state of power</i>)
TMS	Thermomanagementsystem
VTMS	Fahrzeugthermomanagementsystem (<i>engl. vehicle thermal management system</i>)
VW	Volkswagen
WLTC	WLTP-Fahrzyklus (<i>engl. Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Cycle</i>)
WLTP	Verfahren zur Messung von Kraftstoffverbrauch und Schadstoffemissionen von Pkw (<i>engl. Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure</i>)
WS	Wärmesenke

Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
A	m^2	Teil-, bzw. gesamte Oberfläche eines Körpers
A_{Zelle}	m^2	(Für den Wärmeaustausch mit der Umgebung relevante) Oberfläche einer Zelle
$A_{\text{Zelle, BTMS, } j}$	m^2	Oberfläche einer Zelle, die mit dem Kühlkanal j eines BTMS im thermischen Kontakt steht
α	$\frac{W}{m^2 K}$	Wärmeübergangskoeffizient
α_{ges}	$\frac{W}{m^2 K}$	Zusammengefasster Wärmeübergangskoeffizient
a_{max}	$\frac{m}{s^2}$	Maximale Beschleunigung eines Fahrzeugs
α_{mod}	$\frac{W}{m^2 K}$	Wärmeübergangskoeffizient zwischen den einzelnen Modulen innerhalb eines Batteriesystems
α_x	$\frac{W}{m^2 K}$	Wärmeübergangskoeffizient zwischen den LIB innerhalb eines Batteriesystems in x-Richtung
α_y	$\frac{W}{m^2 K}$	Wärmeübergangskoeffizient zwischen den LIB innerhalb eines Batteriesystems in y-Richtung
α_z	$\frac{W}{m^2 K}$	Wärmeübergangskoeffizient zwischen den LIB innerhalb eines Batteriesystems in z-Richtung
$\alpha_{\text{Zelle, } \infty}$	$\frac{W}{m^2 K}$	Wärmeübergangskoeffizient zwischen einer Zelle und ihrer Umgebung
$\alpha_{\text{Zelle, BTMS, } j}$	$\frac{W}{m^2 K}$	Wärmeübergangskoeffizient zwischen einer Zelle und dem Kühlkanal j eines BTMS
α_{∞}	$\frac{W}{m^2 K}$	Wärmeübergangskoeffizient zwischen einem Batteriesystem und der Umgebung (ohne Berücksichtigung von BTMS und VTMS)
Bi	–	Biot-Zahl
$\beta_{\text{Hysterese}}$	$\frac{1}{C}$	Hysteresekoeffizient einer LIB
c	$\frac{J}{kg K}$	Spezifische Wärmekapazität eines Körpers
C_A	Ah	Nutzbare Kapazität einer LIB
C_n	F	Kapazität des n -ten RC-Gliedes eines ECM
C_N	Ah	Nennkapazität einer LIB
c_p	$\frac{J}{kg K}$	Spezifische Wärmekapazität eines Fluids
C_{Zelle}	$\frac{J}{kg K}$	Spezifische Wärmekapazität einer LIB

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
$d_{\text{KK, Wand}}$	m	Wandstärke eines BTMS Kühlkanals
d_{KK}	m	Breite eines Kühlkanals
e	–	Anzahl von Ebenen, in denen Zellen parallel verschaltet werden
ϵ	–	Emissionsgrad (Wärmestrahlung)
$I_{\text{Balancing}}$	A	Balancingstrom
$I_{\text{Bal, Limit}}$	A	Maximaler Zellstrom bei dem Balancing aktiviert werden darf
I_{Zelle}	A	Strombelastung einer LIB
$I_{\text{Zelle, ext}}$	A	Durch externe Strombelastung hervorgerufener Anteil von I_{Zelle}
$I_{\text{Zelle, int}}$	A	Durch interne Ausgleichsströme innerhalb einer Parallelschaltung hervorgerufener Anteil von I_{Zelle}
k	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$	Wärmedurchgangskoeffizient
l	m	Strecke bzw. Entfernung
$l_{\text{KK, ratio}}$	–	Anteil der Länge eines Kühlkanals an einer Referenzlänge bzw. -höhe
λ	$\frac{\text{W}}{\text{mK}}$	Wärmeleitfähigkeit
$\lambda_{\perp, \text{Zelle}}$	$\frac{\text{W}}{\text{mK}}$	Wärmeleitfähigkeit einer Zelle senkrecht zu den Elektrodenschichten
$\lambda_{\text{KK, Wand}}$	$\frac{\text{W}}{\text{mK}}$	Wärmeleitfähigkeit der Wand eines BTMS Kühlkanals
m	kg	Masse
\dot{m}	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$	Massestrom
m_{Zelle}	kg	Masse einer Zelle
ν	$\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	Kinematische Viskosität
p	–	Anzahl parallel verschalteter Zellen
pe	–	Anzahl parallel verschalteter Zellen in einer Ebene
p_{ref}	Pa	Referenzdruck
P_{el}	W	Elektrische Leistung
P_{mech}	W	Mechanische Leistung
\dot{q}	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	Wärmestromdichte
\dot{Q}	W	Wärmestrom
$\dot{Q}_{\text{Zelle, irr}}$	W	Wärmestrom durch irreversible Wärmegeneration einer LIB
$\dot{Q}_{\text{Zelle, rev}}$	W	Wärmestrom durch reversible Wärmegeneration einer LIB
$\dot{Q}_{\text{Zelle, VL}}$	W	Gesamte thermische Verlustleistung einer Zelle
\dot{Q}_{λ}	W	Von Temperaturunterschieden hervorgerufener Wärmestrom zwischen zwei Zellen

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
\dot{Q}_∞	W	Wärmestrom zwischen einem Körper und seiner Umgebung
R_{Ableiter}	Ω	Elektrischer Widerstand der Stromableiter innerhalb eines Batteriesystems
R_{Bal}	Ω	Balancing Widerstand für jedes serielle Element innerhalb eines Batteriesystems
R_{gesamt}	Ω	Aus den einzelnen Anteilen zusammengefasster elektrischer Gesamtwiderstand
R_i	Ω	Ohm'scher Innenwiderstand einer LIB
R_{Kontakt}	Ω	Kontakterungs- bzw. Übergangswiderstand bei der elektrischen Anbindung einer LIB
R_n	Ω	Elektrischer Widerstand des n-ten RC-Gliedes eines ECM
R_λ	$\frac{\text{K}}{\text{W}}$	Wärmeleitwiderstand
ρ	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Dichte
s	–	Anzahl seriell verschalteter Zellen
S	m	Spaltbreite des Kühlkanals eines BTMS
σ	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$	Stefan-Boltzmann-Konstante (im Kontext der Wärmestrahlung)
σ	–	Standardabweichung (im Kontext statistischer Betrachtungen)
Δt	s	Zeitschritt zwischen zwei Iterationen einer zeitdiskreten Berechnung bzw. Simulation
T	K / °C	Temperatur
ΔT	K / °C	Unterschied zwischen zwei Referenztemperaturen
$T_{\text{BTMS},j}$	K / °C	Temperatur des Kühlmittels innerhalb des Kühlkanals j eines BTMS
T_{Fluid}	K / °C	Temperatur des Kühlfluids (BTMS oder VTMS)
T_{FV}	K / °C	Temperatur eines FV
T_{Zelle}	K / °C	Temperatur einer Zelle
T_∞	K / °C	Umgebungstemperatur eines Körpers
ΔU_{Bal}	V	Spannungsdifferenz zwischen LIB innerhalb eines Batteriepacks ab der Balancing aktiviert wird
$U_{\text{Bal, Limit}}$	V	Untere Grenze der Zellspannung für das Balancing innerhalb eines Batteriesystems
U_{Diff}	V	Durch Diffusionseffekte hervorgerufener Anteil der elektrischen Spannung einer LIB
$U_{\text{Hysterese}}$	V	Durch Hystereseeffekte hervorgerufener Anteil der elektrischen Spannung einer LIB
U_{LD}	V	Durch Ladungsdurchtritt und Doppelschichtkapazität hervorgerufener Anteil der elektrischen Spannung einer LIB

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
U_{OCV}	V	Ruhspannung einer LIB
$U_{\text{Potential}}$	V	Elektrisches Potenzial einer LIB ohne Berücksichtigung eines Stromflusses
U_{RCn}	V	Spannung des n-ten RC-Gliedes eines ECM
U_{SEI}	V	Durch die SEI hervorgerufener Anteil der elektrischen Spannung einer LIB
U_{Zelle}	V	Aus den einzelnen Anteilen zusammengefasste Gesamtspannung einer LIB
$\Delta U_{\text{Zelle}, \Omega}$	V	Durch Stromfluss hervorgerufene Spannungsänderung einer LIB
U_{Ω}	V	Ohm'scher Anteil der elektrischen Spannung einer LIB
$\frac{\partial U_{OCV}}{\partial T_{\text{Zelle}}}$	$\frac{mV}{K}$	Entropiekoeffizient
UA	$\frac{W}{K}$	Empirisch bestimmte Ersatzgröße zusammengefasst aus Wärmeübergangs-/durchgangskoeffizient und Oberfläche der wärmeübertragenden Fläche
\dot{V}	$\frac{m^3}{s}$	Volumenstrom
w	$\frac{m}{s}$	Strömungsgeschwindigkeit eines Fluids
ζ	–	Faktor für die Skalierung von ECM Parametern auf andere Zellgrößen