

AutoUni – Schriftenreihe

AutoUni 

Michael Dobmann

# Kostenoptimale Auslegung von thermischen Eigenschaften in Elektrofahrzeugen

---

# **AutoUni – Schriftenreihe**

Band 131

**Reihe herausgegeben von/Edited by**  
Volkswagen Aktiengesellschaft  
AutoUni

Die Volkswagen AutoUni bietet Wissenschaftlern und Promovierenden des Volkswagen Konzerns die Möglichkeit, ihre Forschungsergebnisse in Form von Monographien und Dissertationen im Rahmen der „AutoUni Schriftenreihe“ kostenfrei zu veröffentlichen. Die AutoUni ist eine international tätige wissenschaftliche Einrichtung des Konzerns, die durch Forschung und Lehre aktuelles mobilitätsbezogenes Wissen auf Hochschulniveau erzeugt und vermittelt.

Die neun Institute der AutoUni decken das Fachwissen der unterschiedlichen Geschäftsbereiche ab, welches für den Erfolg des Volkswagen Konzerns unabdingbar ist. Im Fokus steht dabei die Schaffung und Verankerung von neuem Wissen und die Förderung des Wissensaustausches. Zusätzlich zu der fachlichen Weiterbildung und Vertiefung von Kompetenzen der Konzernangehörigen fördert und unterstützt die AutoUni als Partner die Doktorandinnen und Doktoranden von Volkswagen auf ihrem Weg zu einer erfolgreichen Promotion durch vielfältige Angebote – die Veröffentlichung der Dissertationen ist eines davon. Über die Veröffentlichung in der AutoUni Schriftenreihe werden die Resultate nicht nur für alle Konzernangehörigen, sondern auch für die Öffentlichkeit zugänglich.

The Volkswagen AutoUni offers scientists and PhD students of the Volkswagen Group the opportunity to publish their scientific results as monographs or doctor's theses within the "AutoUni Schriftenreihe" free of cost. The AutoUni is an international scientific educational institution of the Volkswagen Group Academy, which produces and disseminates current mobility-related knowledge through its research and tailor-made further education courses. The AutoUni's nine institutes cover the expertise of the different business units, which is indispensable for the success of the Volkswagen Group. The focus lies on the creation, anchorage and transfer of new knowledge.

In addition to the professional expert training and the development of specialized skills and knowledge of the Volkswagen Group members, the AutoUni supports and accompanies the PhD students on their way to successful graduation through a variety of offerings. The publication of the doctor's theses is one of such offers. The publication within the AutoUni Schriftenreihe makes the results accessible to all Volkswagen Group members as well as to the public.

**Reihe herausgegeben von/Edited by**

Volkswagen Aktiengesellschaft

AutoUni

Brieffach 1231

D-38436 Wolfsburg

<http://www.autouni.de>

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/15136>

---

Michael Dobmann

# Kostenoptimale Auslegung von thermischen Eigenschaften in Elektrofahrzeugen

 Springer

Michael Dobmann  
AutoUni  
Wolfsburg, Deutschland

zugl.: Darmstadt, Technische Universität Darmstadt, D17, Dissertation

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse der im Rahmen der AutoUni – Schriftenreihe veröffentlichten Doktorarbeiten sind allein die der Doktorandinnen und Doktoranden.

AutoUni – Schriftenreihe  
ISBN 978-3-658-23848-3                      ISBN 978-3-658-23849-0 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-23849-0>

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

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2018

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. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

# Vorwort

Computersimulationen und softwarebasierte Methoden revolutionieren gerade die Automobilindustrie. Simuliert wird schon lange, man denke dabei an die Crashesimulation oder Strömungsberechnung, aber was bisher vor allem zur Auslegung von Struktur und Form diente, greift gerade auf die Funktionalität über. Computersimulationen haben massive Auswirkungen auf den Entwicklungsaufwand (Zeit-, Ressourcen und Wissensbedarf) und neue Technologien, wie zukünftige Assistenzsysteme und das automatisierte Fahren sind ohne Computersimulationen schlicht nicht realisierbar. Gleichzeitig versprechen virtuelle Optimierungsmethoden auf Gesamtfahrzeugebene für bestehende Technologien bisher ungeahnte Potenziale. Dies macht die Simulation in der Automobilindustrie zu einem unheimlich spannenden Themengebiet.

Für mich war deshalb von Anfang an klar, dass ich nicht nur ein Bestandteil der Simulationswelt sein wollte, sondern diese direkt bei einem Fahrzeughersteller aktiv mitgestalten und wissenschaftlich vertiefen will. Dies habe ich mit meiner Dissertation an der TU Darmstadt und mit Volkswagen umgesetzt und meine Erkenntnisse in diesem Buch gesammelt. Zudem macht mir die Simulation riesige Freude und das Gefühl, wenn ein Gesamtfahrzeug das erste Mal fehlerfrei simuliert, ist einfach unbeschreiblich.

Diese Arbeit soll eine Hilfestellung für alle jene darstellen, welche eine thermische Gesamtfahrzeugsimulation aufbauen, oder thermische Fahrzeugeigenschaften kostenoptimal auslegen wollen. Weiter soll diese Arbeit einen Vorgeschmack auf all jene wunderbaren Methoden und Potenziale geben, die mit einer durchgängigen virtuellen Entwicklung möglich werden.

An dieser Stelle möchte ich mich bei meinen Unterstützern und Förderern herzlich bedanken. Ganz besonderen Dank gebührt Prof. Dr.techn. Christian Beidl für die Übernahme der Betreuung meiner Arbeit und die Unterstützung beim Formen meines Themas. Die hilfreichen Denkanstöße und der fruchtbare Gedankenaustausch haben diese Arbeit erst ermöglicht. Auch möchte ich Prof. Dr.-Ing. Tobias Melz für die Mitberichterstattung und die wertvollen Gespräche danken.

Einen besonderen Anteil an dieser Arbeit verdanke ich den zahlreichen und aufschlussreichen Diskussionen mit Prof. Dr.-Ing. Jens Hadler, welche mich von der Notwendigkeit der Kostenbetrachtung überzeugt und die Arbeit maßgeblich mitgestaltet haben.

Für die unzähligen Gespräche sowie die fachliche und akademische Unterstützung möchte ich mich bei meinen lieben Volkswagen Kollegen Holger, Martin, Andreas, Thies, Sinan, Malte, Florian und Tim bedanken.

Den herzlichsten Dank aber, möchte ich meiner Frau aussprechen.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Digitale Revolution und Disruption der Mobilität	1
1.2	Kostenoptimale Auslegung von Elektrofahrzeugen notwendig	1
1.3	Virtuelle Methoden als Schlüssel	2
<b>2</b>	<b>Optimierungsmethoden in der Fahrzeugentwicklung (Stand der Technik)</b>	<b>3</b>
2.1	Einleitung	3
2.2	Komponentengrobdimensionierung und Topologieoptimierung	3
2.3	Komponentenoptimierung und Feindimensionierung	6
2.4	Folgerung und Ausblick	7
<b>3</b>	<b>Lösungsansatz</b>	<b>9</b>
3.1	Ziel und Vorgehen	9
3.2	Modellreduktion durch Linearisierung	11
3.3	Optimierung	14
<b>4</b>	<b>Gesamtfahrzeugsimulation</b>	<b>19</b>
4.1	Gekoppelte Simulation und Co-Simulation	19
4.2	Numerische Stabilität der Co-Simulation	22
4.3	Verbesserung der numerischen Stabilität	24
<b>5</b>	<b>Aufbau und thermische Belastung eines batterieelektrischen Fahrzeugs</b>	<b>31</b>
5.1	Gesamtfahrzeug	31
5.2	Elektrische Maschine	32
5.3	Leistungselektronik	36
5.4	Traktionsbatterie	38
5.5	Kühlsystem und Wärmeschutzregelung	41
<b>6</b>	<b>Der Weg zur Co-Simulation</b>	<b>45</b>
6.1	Vom Einzelmodell zur Co-Simulation	45
6.2	Thermische Modellierung	47
6.3	Plausibilisierung	53
<b>7</b>	<b>Messung und Validierung</b>	<b>61</b>
7.1	Messung am Gesamtfahrzeug	61
7.2	Validierung des Gesamtsystems	67
7.3	Messunsicherheiten	75

<b>8 Umsetzung des Lösungsansatzes</b> . . . . .	<b>83</b>
8.1 Vorbereitung / Preprocessing . . . . .	83
8.2 Berechnung . . . . .	91
8.3 Resultateaufbereitung / Postprocessing . . . . .	94
<b>9 Ergebnisse</b> . . . . .	<b>101</b>
9.1 Randbedingungen und Grundsätze . . . . .	101
9.2 Kostenoptimale Auslegung mit festen Temperaturgrenzen . . . . .	102
9.3 Kostenoptimale Auslegung mit variablen Temperaturgrenzen . . . . .	103
9.4 Berechnung virtueller Kosten von Anforderungen . . . . .	104
9.5 Berechnung virtueller Kosten für Parameter . . . . .	105
9.6 Sensitivitätsanalyse und Stabilitätsbereiche . . . . .	106
9.7 Betrachtung von Preis-, Kosten- und Stückzahlprognosen . . . . .	110
<b>10 Diskussion der Resultate</b> . . . . .	<b>113</b>
10.1 Metaanalyse und thermische Design Guidelines . . . . .	113
10.2 Übertragbarkeit auf andere Fahrzeug- und Antriebskonzepte . . . . .	114
10.3 Einschränkungen und Potenzial der Resultate . . . . .	115
10.4 Ausblick und zukünftige Arbeiten . . . . .	116
<b>11 Zusammenfassung</b> . . . . .	<b>117</b>
<b>Literaturverzeichnis</b> . . . . .	<b>119</b>
<b>Anhang A: Kostenbetrachtung</b> . . . . .	<b>129</b>
A.1 Stand der Forschung . . . . .	129
A.2 Methode der Kostenanalyse . . . . .	130
A.3 Analyse relativer Kosten aus der Literatur . . . . .	135
<b>Anhang B: Änderungskosten und Wärmetransport</b> . . . . .	<b>143</b>
B.1 Bezug von Kosten auf Eigenschaftsänderungen . . . . .	143
B.2 Änderungskosten der thermischen Masse . . . . .	143
B.3 Änderungskosten des Wärmeübergangs . . . . .	144
B.4 Änderungskosten der Maximaltemperatur . . . . .	147
B.5 Physikalische Beschreibung des Wärmetransports . . . . .	150
<b>Anhang D: Matlab-Code</b> . . . . .	<b>153</b>
C.1 Einlesen der Mess- und Simulationsdaten . . . . .	153
C.2 Bilden der Matrix A und B . . . . .	157
C.3 Berechnung . . . . .	167
C.4 Postprocessing . . . . .	174



# Abbildungsverzeichnis

3.1	Linearisierungsarten nach (26). . . . .	12
4.1	Überblick der Arten der Simulation nach (40, 29). . . . .	20
4.2	Makroschrittweite. . . . .	22
4.3	Mirkoschrittweite. . . . .	23
4.4	Verbessertes Signal durch Einbringung eines Tiefpassfilters. . . . .	26
4.5	De- und Encoderkombination. . . . .	27
4.6	Ablauf der Modellkopplung. . . . .	28
4.7	Abgleich der Makroschrittweiten. . . . .	28
5.1	Schnittbild mit Wärmestrom durch IGBT Modul, eigene Darst. nach (105). . . . .	36
6.1	Schichtaufbau einer prismatischen Batteriezelle und Wärmeflüße. . . . .	49
6.2	Thermisches Modell der e-Maschine mit Schnittstellen. . . . .	51
6.3	Thermische Modellierung eines LE Bauteils. J=Junction (Sperrschicht), C=Case (Gehäuse), H=Heatsink (Wärmetauscher), A=Ambient (Umgebung). . . . .	52
6.4	Treppenbild Kühlkreislauf zum Zeitpunkt $t = 1560s$ (Datenbasis Abb. 6.5 ). . . . .	56
6.5	Zeitliche Darstellung der Kühlmitteltemperaturen bei Hochlastfahrt. . . . .	56
6.6	Energiediagramm auf der Beschleunigungsseite inkl. Konstantfahrt ( $\ddot{x} \geq 0$ ). . . . .	57
6.7	Energiediagramm auf der Verzögerungsseite. Skalierung wie Abb. 6.6. . . . .	57
7.1	Motorraum des Versuchsträgers mit Temperaturmesstechnik (Prototyp A). . . . .	62
7.2	Datenlogging der Temperaturdaten (grüne Kabel rechts) sowie der CAN Busse (runde Stecker links) mittels Ipetronik Modulen im Unterboden des Kofferraumes neben der HV-Batterie (Prototyp B). . . . .	63
7.3	Umsetzung der Temperaturmessstellen in Prototyp A. . . . .	64
7.4	Temperatur- und Volumenstrommessstellen im Kühlkreislauf (Prototyp A und B). . . . .	65
7.5	Mögliche Aufteilung der Messdaten für die einzelnen Modellentwicklungsschritte. . . . .	67
7.6	Leistung der E-Maschine an zwei Seiten freigeschnitten. . . . .	69
7.7	Wärmestrom von der Leistungselektronik in das Kühlmedium. . . . .	71
7.8	Wärmestrom von der E-Maschine in das Kühlmedium mit falschem Initialwert. . . . .	72
7.9	Vorlauf- und Nachlauftemperaturen im Kühlkreislauf. . . . .	73
7.10	Wärmestrom vom Hauptwasserkühler in das Kühlmedium. . . . .	74
7.11	Einfluss der Messunsicherheit der Thermoelemente von $\pm 1.5^\circ C$ auf den Wärmestrom der E-Maschine ins Kühlwasser. . . . .	77
7.12	Messaufbau zur Bestimmung der Temperatur der Thermoelemente. Bild bearbeitet: Poster im Hintergrund unkenntlich gemacht. . . . .	78

---

7.13	Kühlwassertemperatur und Abweichung der Thermoelemente gegenüber der PT1000 Elemente. Thermoelemente auf gleicher Höhe angeordnet. . . .	78
7.14	Kühlwassertemperatur und Abweichung der Thermoelemente gegenüber der PT1000 Elemente. Thermoelemente auf unterschiedlichen Höhen angeordnet. . . . .	79
7.15	Auswertung der Abweichung in Abhängigkeit der Temperatur. . . . .	80
7.16	Veränderte Genauigkeit durch Neubestimmung der Messungenauigkeit der Thermoelemente auf $\pm 0.15^\circ\text{C}$ . . . . .	81
8.1	Darstellung der Temperatur im Command Window. . . . .	95
8.2	Darstellung der Parameter und Variablen im Command Window. . . . .	95
8.3	Dreidimensionale Darstellung des Kostenvorteils nach (27). . . . .	97
8.4	Zweidimensionale Darstellung der Stabilitätsbereiche nach (27). . . . .	97
8.5	Fusion der Einzelbereiche zu einem globalen Stabilitätsbereich. . . . .	98
8.6	Vorgehen zur Berechnung der Differenzenmatrizen der Einzelbereiche. . . .	99
9.1	Bereiche mit identischen Lösungen. . . . .	107
9.2	Wärmeflüsse in der Leistungselektronik der optimalen Kombination in Bereich A bis D. . . . .	108
9.3	Kostenprognosen in der Darstellung der Stabilitätsbereiche. . . . .	111
A.1	Auswertung von Säulen- und Balkendiagrammen. . . . .	133
A.2	Auswertung Kuchen- und Kreisdiagramme. . . . .	134
B.1	Temperaturbeständigkeit von Permanentmagneten in Abhängigkeit des Dysprosiumgehaltes mit Magnetgrad-Suffixen. Eigene Darstellung nach (19). 148	

# Tabellenverzeichnis

5.1	Ausgewählte Verlustkomponenten von e-Maschinen (PESM) (99, 55, 93, 92, 59).	34
5.2	Ausgewählte Verlustkomponenten von Leistungsmodulen (120, 116, 22, 72).	37
5.3	Ausgewählte Verlustkomponenten der Traktionsbatterie (97, 2, 50, 76).	40
6.1	Analogie thermischer und elektrischer Größen nach (43).	48
7.1	Durchgeführte Messungen.	66
8.1	Standardisierte Eingangsdaten aus Messung und Simulation (Auszug).	86
9.1	Auszug aus dem Resultat der Optimierung mit festen Temperaturgrenzen.	102
9.2	Auszug aus dem Resultat der Optimierung mit variablen Temperaturgrenzen.	104
9.3	Virtuelle Kosten für einzelne Fahrstrecken.	105
9.4	Virtuelle Kosten für Parameter.	106
9.5	Gesamtkostenersparnis der Stabilitätsbereiche.	111
A.1	Halbleiterelemente aus unterschiedlichen Kategorien.	130
A.2	Unterschiedliche Bezugsgrößen der Kostenanteile (alle Werte aus (68)).	131
A.3	Kostenbestandteile Elektromotor. St = Staunton et. al., Cu = Cuenca et. al., Go = Goodrich et. al., Lu = Luck et. al., Ca = Campbell et. al.	136
A.4	Kostenbestandteile gesinterter Permanentmagnete für automotiv Elektromotoren.	137
A.5	Kostenbestandteile einer automotiven permanent-erregten Synchronmaschine.	137
A.6	Kostenbestandteile Leistungselektronik. Cu = Cuenca et. al., Li = Liang et. al., Lu = Luck et. al., Ha = Hallerau et. al.	138
A.7	Kostenbestandteile Lithium-Ionen Akkumulator. Cu = Cuenca et. al., Be = Bernhart et. al., Lu = Luck et. al., Pi = Pillot et. al., Ir = Irena, Cl = Cluzel et. al.	140
A.8	Verwendete Kostenbestandteile Lithium-Ionen Akkumulator.	141
B.1	Virtuelle Kosten für die Änderung der thermischen Massen.	144
B.2	Kosten des Wärmewiderstandes von Kupferrohren in Kühlflüssigkeit eines Halbleitermoduls nach (31).	145
B.3	Änderungskosten konvektiver Wärmeübergänge an das Kühlwasser.	145
B.4	Kosten von Universalgehäusen.	146
B.5	Änderungskosten konvektiver Wärmeübergänge an die Luft.	146
B.6	Eigenschaften der Wärmeleitpaste nach (81). Angabe Wärmewiderstand $R_{th}$ in $\text{mm}^2\text{K/W}$ bei $75^\circ\text{C}$ .	147
B.7	Änderungskosten von IGBT Elementen bei einer Bestellmenge von 4800 Stück (79).	149

# Abkürzungen

<i>CAN</i>	Controller Area Network (ein Bussystem)
<i>Co-Simulation</i>	Art der Modellkopplung (siehe Kap. 4.1)
<i>DOE</i>	Design of Experiments (Versuchsplanungsmethode)
<i>EM</i>	Elektrische Maschine
<i>E-Maschine</i>	Elektrische Maschine
<i>EV</i>	Electric Vehicle (Elektrofahrzeug)
<i>FCEV</i>	Fuel Cell Electric Vehicle (Brennstoffzellenfahrzeug)
<i>GE</i>	Geldeinheit (auch plural, wobei 1 GE=1\$ siehe Kap. A.3.1)
<i>GUI</i>	Graphical User Interface (Benutzeroberfläche)
<i>HEV</i>	Hybrid Electric Vehicle (Hybridfahrzeug)
<i>HV</i>	Hochvolt
<i>HWK</i>	Hauptwasserkühler
<i>IGBT</i>	Insulated-gate bipolar transistor (Transistor der Leistungselektronik)
<i>LE</i>	Leistungselektronik
<i>LG</i>	Ladegerät
<i>OEM</i>	Original Equipment Manufacturer (Fahrzeughersteller)
<i>PhEV</i>	Plug-in Hybrid Fahrzeug
<i>TE</i>	Temperatureinheit (auch plural, wobei 100 TE= $T_{ref}$ )



# 1 Einleitung

## 1.1 Digitale Revolution und Disruption der Mobilität

Der automobilen Welt steht der größte Wandel in Ihrer mehr als 100 jährigen Geschichte bevor. Waren in der Vergangenheit die meisten Innovationen im Bereich der Fahrzeugentwicklung, -produktion und -vertrieb zu finden, so werden sich in Zukunft die Geschäftsmodelle und angebotenen Dienstleistungen und Produkte der heutigen Automobilproduzenten grundlegend verändern (33). Gleichzeitig stellen sich neue Mitbewerber wie Uber, Google und Apple auf, um die neuen Felder des automatisierten Fahrens, des vernetzten Fahrzeugs und der Mobilitätsdienstleistungen mitzugestalten und zu verändern.

Der technologische Fortschritt der Fahrzeuge in den letzten zwanzig Jahren ist enorm. Hoch-effiziente Turbomotoren mit kleinem Hubraum, Stahl- und Aluminium-Leichtbau, Common-Rail Einspritzung, Abgasnachbehandlung und intelligente Regelalgorithmen haben zu einer deutlichen Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und der Emissionen beigetragen. Gleichzeitig konnte der Komfort, die Sicherheit und der erlebte Fahrspaß gesteigert werden.

In den nächsten Jahren werden die gesetzlichen Anforderungen der CO<sub>2</sub> Grenzwerte in der EU, USA, China und Japan nochmals deutlich ansteigen (90, 32). Der VDA (115) sowie das IKA (32) gehen davon aus, dass das Erreichen des Ziels von 95gCO<sub>2</sub>/km in Europa bis 2020 eine teilweise oder vollständige Elektrifizierung des Antriebsstrangs erfordert. Verschiedene Prognosen (33, 86) gehen weiter davon aus, dass neben der Elektrifizierung auch alternative Antriebstechnologien (u.a. PhEV, EV, FCEV) bis 2020 an Gewicht gewinnen.

Neben neuen Formen der Mobilität und Mobilitätsdienstleistungen wird aufgrund der steigenden Anforderungen und Möglichkeiten eine nie dagewesene Vielfalt an Antriebs-technologien und -topologien entstehen. Durch die große Zahl an grundlegenden Veränderungen des Stands der Technik fehlt es sowohl an Erfahrungswerten als auch an Experten. Bestehende Methoden und Vorgehen reichen für die termingerechte Entwicklung zukünftiger Elektrofahrzeuge nicht mehr aus. Die Steigerung der Vielfalt und der Komplexität der neuen Mobilitätslösungen sowie die Innovationsgeschwindigkeit der technologischen Lösungen erfordern die Digitalisierung des Maschinenbaus und eine beispiellose fachgebietsübergreifende Zusammenarbeit vom Entwurf bis zur Produktion.

## 1.2 Kostenoptimale Auslegung von Elektrofahrzeugen notwendig

Elektrofahrzeuge der ersten Generation (ca. 2010 – 2017) hatten die Demonstration der technischen Machbarkeit im Fokus. Dabei wurden vorhandene Technologien aus anderen Industriezweigen zweckentfremdet, wie beispielsweise beim Tesla ModelS, welches Standard Notebook Batteriezellen vom Typ 18650 einsetzt (104).

Bei Elektrofahrzeugen der zweiten Generation werden diese Elemente durch speziell auf den Einsatzzweck abgestimmte Bauteile ersetzt und die kostenoptimale Auslegung des Gesamtfahrzeuges rückt aufgrund steigender Stückzahlen in den Fokus. Bereits sichtbar ist diese Entwicklung beispielsweise bei der Integralbauweise von Getriebe und E-Maschine in Hybridfahrzeugen.

Bei Elektrofahrzeugen stellt insbesondere die gesamtheitliche Optimierung der thermischen Eigenschaften aufgrund von starken thermischen Wechselwirkungen der Bauteile untereinander und der Rückwirkung über den gemeinsam genutzten Kühlkreislauf (Änderungen an einem Bauteil beeinflussen auch die Bauteile im Vor- und Nachlauf des geänderten Bauteils) eine große Herausforderung dar. Anders als bei konventionellen Fahrzeugen gehören die thermischen Eigenschaften bei Elektrofahrzeugen zu den wichtigsten Einflussfaktoren und bestimmen sowohl die Dauer- als auch die Maximalleistung. Gleichzeitig verspricht der bisherige Fokus auf die technische Machbarkeit und die weitgehend getrennte Entwicklung von Einzelkomponenten ungenutzte Optimierungspotenziale bezüglich Kosten und thermischen Eigenschaften.

### **1.3 Virtuelle Methoden als Schlüssel**

Virtuelle Methoden versprechen eine hohe Skalierbarkeit durch stark abnehmende Grenzkosten und eine Vermeidung von kosten- und zeitintensiven Iterationsschleifen durch Frontloading und Reduktion von realen Prototypen. Zudem erzeugen die virtuelle Methoden objektiv nachvollziehbare und reproduzierbare Resultate und bieten die Möglichkeit bisher unvorstellbare Mengen an Variablen gleichzeitig gegeneinander abwägen. Mit der steigenden Verfügbarkeit von Simulationsmodellen aufgrund der Digitalisierung des Maschinenbaus steigt die Einsetzbarkeit von virtuellen Methoden.

Offen bleibt die Frage, wie die thermischen Eigenschaften in Elektrofahrzeugen zukünftig kostenoptimal ausgelegt werden können und welche Simulations- und Optimierungsmethoden dafür zum Einsatz kommen. Darauf aufbauend erfordern die neuen Methoden Veränderungen der bisherigen Standards und Abläufe und bieten im Gegenzug neue Möglichkeiten zur Optimierung der thermischen Eigenschaften und Erschließung von Kostenpotenzialen.



## 2 Optimierungsmethoden in der Fahrzeugentwicklung (Stand der Technik)

### 2.1 Einleitung

Die Bedeutung von numerischen Methoden zur Auslegung und Optimierung in der Fahrzeugentwicklung nimmt stetig zu. Der Bereich der Elektrotraktion stellt dabei keine Ausnahme dar, sondern erfordert aufgrund grundlegender technischer Änderungen gegenüber konventionellen Fahrzeugen, Werkzeuge zur gezielten Beschleunigung der Fahrzeugentwicklung. Gerade aufgrund der fehlenden Erfahrungswerte ist der Bereich der Elektrotraktion für Wissenschaftler und Ingenieure besonders interessant. Die erreichbaren Verbesserungspotenziale sind um ein Vielfaches höher als bei den konventionellen Fahrzeugen, welche bereits einen sehr hohen Reifegrad aufweisen.

Im Bereich der Elektrotraktion sind Optimierungsmethoden weit verbreitet, beispielsweise zur Betriebsstrategieoptimierung oder Torque Vectoring. Diese Ansätze beinhalten interessante Methoden, sind aber für die Komponentenauslegung nur bedingt einsetzbar. Einen guten Überblick über die aktuell verwendeten Optimierungsmethoden zur Auslegung von Elektrofahrzeugen bieten die Dissertationen von Moses (78), Münning (80) oder Wiedemann (119).

Die Optimierungsmethoden zur Komponentenauslegung, lassen sich grob in zwei Kategorien einteilen: die abstrakte Grobdimensionierung und die detaillierte Feindimensionierung. Beide werden im Folgenden kurz vorgestellt.

### 2.2 Komponentengrobdimensionierung und Topologieoptimierung

Eghtessad (30) stellt ein multikriterielles Optimierungsverfahren vor, welches sowohl zur Topologieoptimierung als auch zur Grobdimensionierung der Antriebskomponenten E-Maschine, Batterie und Getriebe verwendet werden kann. Interessanterweise werden die Fahrzeuganforderungen in Abhängigkeit der Fahrzeugklasse, des Kundenverhaltens und der Fahrumgebung aus der 3F Methode (65) abgeleitet. Der zu optimierende Parameterraum besteht aus einer Vielzahl von diskreten Eigenschaften und Komponenten-Auslegungsgrößen z. B. max. Drehmoment der E-Maschine in 25 Nm Schritten (50, 75, 100). Die eigentliche Optimierung funktioniert durch die Simulation von mittels einem Quasi-Monte-Carlo Verfahren festgelegten Versuchspunkten. Aufgrund der Vielzahl an Versuchspunkten ist eine hohe Simulationsgeschwindigkeit des Fahrzeugmodells erforderlich. Dies wird erreicht, indem ein komplexes, physikalisches Simulink-Modell durch ein vereinfachtes und von der Fahrzeugkonfiguration abhängendes mathematisches Modell abgebildet wird. Als Grundlage für das mathematische Modell dienen künstliche neuronale Netze. Die Resultate der Simulation werden als Punktwolken im Raum der relevanten Eigenschaften dargestellt,

wodurch Pareto-Fronten ersichtlich werden. Die optimale Lösung wird anhand der relativen Gewichtung einzelner Eigenschaften aus den Pareto-Fronten berechnet.

Wiedemann (119) schafft die Möglichkeit einer automatischen und eigenschaftsorientierten Konzeptauslegung von Elektrofahrzeugen und betrachtet sowohl die technische Auslegung als auch die Kundensicht. Neben dem Grobkonzept des Fahrzeuges (Antriebstopologie, Sitzplätze) wird durch die Methode die Grobeigenschaften der Module (Batterie, E-Maschine) und die Grudparameter (Leergewicht, Radstand) festgelegt. Die Zielwerte der Eigenschaften werden mittels der Quality Function Deployment Methode und der Systematik des House of Quality aus den Kundenanforderungen und dem Wettbewerb abgeleitet. Das nicht Erreichen der Zielwerte wird dabei durch eine nichtlineare Funktion sanktioniert während das Überfüllen der Ziele einen Bonus zur Folge hat. Die Zielfunktion der Optimierung wird aus der Summe aller Boni und Mali berechnet und durch die Methodik des Fuzzy Decision Making geglättet. Anstelle der kompletten Analyse des Lösungsraums mit der klassischen Versuchsplanung, werden algorithmusbasierte Optimierer eingesetzt. Dazu wird anstelle der DOE Methodik auf deterministische Verfahren wie dem Pattern Search Algorithmus und stochastische Verfahren und genetische Algorithmen (EOKET) zurückgegriffen. Zur Darstellung der Resultate werden zum einen die Pareto-Fronten und zum anderen die Eigenschaftsspinnen bzw. dessen Erfüllungsgrad angezeigt. Dies ermöglicht einen raschen Überblick über die Güte des gefundenen Optimums.

Ried (95) analysiert den Lösungsraum eines PHEV aus Energieinhalt der Batterie und der Leistung der elektrischen Maschine bezüglich Wirtschaftlichkeit und Bauraumkonzept. Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung basiert dabei auf den Anschaffungs- und Verbrauchskosten sowie Abschreibungen (mehr als die total cost of ownership) des Fahrzeuges. In einem ersten Schritt wird die aus Kundensicht wirtschaftlich optimale Komponentengrobdimensionierung durch die Simulation von parametrischen Modellen in Matlab gefunden. Dabei sind die zwei Parameter Gesamtkosten (direkt aus dem Kostenmodell) und Verbrauch (aus der Simulation) sowie ein Äquivalenzwert (welchen Kosten entspricht der Verbrauch) für das analytische Auffinden des Optimums relevant. Neben der Wirtschaftlichkeit wird die geometrische Integration eines entsprechend dimensionierten HV-Speichers in das Fahrzeug analysiert und die Verteilung der Zellen auf Tunnel und Tankbereich berechnet. Das Bauraumkonzept sieht dabei keine Optimierung vor, sondern berechnet die erreichbaren Energiemengen für Tank und Tunnel und generiert drei Grenzwerte (nur Tank, nur Tunnel, Tank und Tunnel) zur Bestimmung des Zelleinbaus

Krenek (62) stellt eine Methode zur Optimierung des Thermomanagements und der Effizienz des elektrischen Antriebsstranges eines HEV unter Berücksichtigung des Aufheizverhaltens des Fahrzeuginnenraums vor. Die Methode baut auf einem komplett in GT aufgebauten numerischen Fahrzeugmodell auf und beinhaltet ein detailliertes thermodynamisches Modell der Verbrennungskraftmaschine. Die Verbrauchsoptimierung basiert auf populationsbasierten Methaheuristiken (genetische Algorithmen). Da aber die Simulationsgeschwindigkeit des Modells nur ungefähr Echtzeit entspricht, werden Ersatzmodelle auf Basis neuronaler Netze (bzw. bagging ensembles aus 24 neuronalen Netzen) zur Simulation verwendet. Die erste Optimierung besteht aus einer Partikelschwarmoptimierung mit einem Schwarm mit 20 Konfigurationen, die mit den bagging ensembles evaluiert werden. In einer zweiten



Phase werden die besten Konfigurationen mit dem hochgenauen Simulationsmodell simuliert und die berechneten Lösungen mit der Methode der Active Covariance Matrix Adaption genetisch verbessert. Aufgrund der hohen Rechenzeiten wird zur Darstellung der Lösungsräume ein qualitativer Ansatz mittels Self Organising Maps (SOM) angewendet. Dabei handelt es sich um ein Verfahren, das einen hochdimensionalen Raum nichtlinear auf einen zweidimensionalen Raum projiziert. Dies ermöglicht den Durchsuchungsgrad der Parameter optisch zu quantifizieren und erlaubt Rückschlüsse auf die Korrelation von Parameter und Zielfunktion

Palm (88) nutzt den interdisziplinären Ansatz des Systems Engineering zur ganzheitlichen und domänenübergreifenden Optimierung von Fahrzeugarchitekturen. Mittels DoE (Design of Experiments) wird der Variantenraum eingeschränkt sowie alle zu untersuchenden Varianten bestimmt und in CarMaker durch die Integration von FMI-Modellen simuliert. Neben den Simulationsmodellen existieren algebraischen Modelle für die Zielindikatoren, welche automatisch in Abhängigkeit der Designvariablen gebildet werden. Die Optimierung der algebraischen Modelle funktioniert auf einem auf NSGA-II (21) basierenden Algorithmus (evolutionäre Methode) zur mehrdimensionalen Optimierung unter Nebenbedingungen. Die Resultate der Optimierung werden als Punktwolken mit Pareto-Fronten dargestellt.

Kuchenbuch (64) führt eine eigenschaftsorientierte Gesamtfahrzeug-Packageoptimierung mit Fokus auf die Batterie durch. Dabei wird ein mehrstufiger Prozess genutzt, bei dem zuerst eine Vielzahl von Fahrzeugvarianten betrachtet und die Fahrzeugtopologie optimiert wird. In einem zweiten Schritt wird die beste Topologie optimal dimensioniert (Gestaltoptimierung). Zur Optimierung wird ein kommerzieller NSEA+ Algorithmus (abgewandelte Version von NSGA-II (21)) sowie ein durch den Autor implementierter, Excel-basierter NSGA-II Algorithmus verwendet. Zur schnellen Eigenschaftsberechnung und insbesondere zur Verbrauchssimulation mit kurzen Laufzeiten wird auf die Substitution detaillierter Simulationsmodelle zurückgegriffen. Allerdings nicht durch neuronale Netze wie bei der Dissertation von Moses (77), da die gewünschte Genauigkeit ohne ausreichende Trainingsdaten nicht gegeben ist, sondern durch eine aus der analytischen Modellierung abgeleiteten, empirischen Berechnungsformel. Zur Darstellung der Resultate werden, wie bei evolutionären multikriteriellen Algorithmen üblich, die Pareto-Fronten der gewichteten Nutzenfunktionen in Grafiken angezeigt.

Fuchs (39) stellt eine Methode zur Bewertung der sekundären Gewichtseinsparung und Effizienzveränderung bei einer Anpassung von Konzeptparametern vor. Zur Effizienzberechnung des Fahrzeuges werden beispielsweise Momente und Leistung der E-Maschine in Abhängigkeit des Gewichtes berechnet und die Kennfelder dementsprechend skaliert und die Komponenten gemeinsam in einem Längsdynamikmodell simuliert. Die Gewichtsabhängigkeit der Auslegungsparameter ist sowohl empirisch (lineare Regression) als auch physikalisch modelliert. Zur Optimierung werden die drei Elemente Gewichts-, Beschleunigungs- und Verbrauchsberechnung iterativ wiederholt bis das Fahrzeuggewicht zu einem Wert konvergiert.

Zudem sind eine Vielzahl von weiteren Methoden zur Optimierung in der frühen Konzeptphase bekannt. Zwei davon seien an dieser Stelle kurz erwähnt. Braess (13) hat bereits

sehr früh im Jahr 1985 eine Methode zur evolutionären (d. h. nicht revolutionären) Weiterentwicklung bestehender Fahrzeuggrobkonzepte vorgestellt. Frantzeskakis (35) nutzte 1994 neben grafischen Optimierungsmethoden die Methode von Hooke und Jeeves (91) zur multiobjektiven Optimierung durch Minimierung einer gewichteten Pseudofunktion.

### 2.3 Komponentenoptimierung und Feindimensionierung

Bittner (10) hat ein Verfahren zur Auslegung einer permanenterrigten Synchronmaschine mit mehreren gegenläufigen Zielgrößen weiterentwickelt und eingesetzt. Zur Simulation der Synchronmaschine mit vergrabenen Permanentmagneten werden hochgenaue, aber langsame numerische Feldberechnungen durchgeführt. Durch Kombination einer multikriteriellen Partikelschwarmoptimierung mit einem Kringing Modell entsteht eine neue KG-MPSO genannte Methode. Dabei werden Lösungskandidaten durch Interpolation von bekannten Nachbarlösungen evaluiert und mittels Spawning neue Punkte zur exakten Berechnung ausgewählt. Die beschriebene Methode zeigt in den Beispielen deutlich reduzierte Gesamtzeiten gegenüber der klassischen Partikelschwarmoptimierung.

Ndao (82) untersuchte die optimale Auslegung von Wärmeübertragern für elektronische Bauteile. Die Optimierung von Wärmeübertragern beinhaltet eine Vielzahl von Einzelparametern wie Durchmesser, Länge oder Material der Kühlrippen/-finnen sowie eine Vielzahl von Designparametern wie die maximal übertragbare Leistung oder der Druckverlust. Zur schnellen, mathematischen Modellierung werden Ähnlichkeitsbeziehungen (Nusselt Zahlen) verwendet. Zur Optimierung der Wärmeübertrager wird die Matlab Funktion gamultiobj (genetischer Algorithmus) verwendet und Pareto-Fronten der einzelnen Wärmeübertragungstopologien miteinander verglichen.

Maranzana (74) stellt mit der „thermal quadrupole method“ eine analytische und exakte Methode zur Optimierung der Kühlung von elektronischen Bauteilen vor. Ziel der Methode ist die Bestimmung der optimalen geometrischen Abmessungen des Wärmespreizers. Zur Anwendung der Methode werden Fourier-Cosinus Transformierte der Temperatur- und Flusssichtgleichungen erstellt und die Maximaltemperatur sowie die normierte Wärmespreizerdicke analytisch berechnet.

Rössle (96) zeigt die Optimierung der thermischen Aspekte eines Steuergerätes anhand einer thermischen Simulation. Die Berechnung der Lastfälle mit einem genauen thermischen FEM (finite Element Methode) Modell in der Software Ansys ist sehr zeitaufwändig. Aus diesem Grund wird ein Ersatzmodell mit der Faltungsmethode (Superposition von linearen Differentialgleichungen und thermischen Impedanzen im Zeitbereich) erstellt. Das schnelle Faltungsmodell wird in einer nicht weiter spezifizierten Methode zur Optimierung der Bauteile unter Berücksichtigung der Maximaltemperaturen der Halbleiterelemente eingesetzt.

Graf (44) analysierte die Architektur von Steuergeräten um bestehende Elemente durch Halbleiterschalter zu ersetzen und Leitungsführungen zu optimieren. Dabei wurden Lastprofile der Verbraucher und Randbedingungen wie die Umgebungstemperatur (d. h. Mo-

torraumtemperatur) verwendet. Aufgrund der hohen Komplexität und der vielschichtigen Kostenstruktur (sowohl beim Zulieferer, als auch beim OEM) wurde ein iterativer Ansatz verfolgt. Dabei hat der Steuergerätelieferant die Architektur des Steuergerätes optimiert (Methode nicht spezifiziert) und der OEM im Anschluss die Kosteneinsparungen aus dem Steuergerät mit den daraus resultierenden Mehr- oder Minderkosten im Fahrzeug verglichen. Eine gemeinsame Optimierung mittels einer übergreifenden mathematischen Methode hat nicht stattgefunden.

Blank (11) stellt in seiner Arbeit die Kostenoptimierung von Elektronikkomponenten und Elektronikarchitektur vor. Kern der Optimierung ist die Nutzung von Synergien durch die Optimierung von Komponenten aus verschiedenen Bereichen (Kabelbaum, ECU und Sicherungsboxen) welche bisher aufgrund unterschiedlicher Hersteller isoliert betrachtet werden. Blank zeigt dabei auch die Grenzen der Kosteneinsparung durch Topologieoptimierung von Steuergeräten auf. Gleichzeitig wird jedoch das Potenzial der Optimierung von Kabelquerschnitten und –materialien erläutert und auf über 25\$ pro europäischen und 10 – 15\$ pro US-Amerikanischen Fahrzeug beziffert. Die Optimierungsmethode wird nicht näher spezifiziert, lediglich die vage Formulierung „based on MS Excel or home-made implementations“ (11) wird vom Autoren genannt.

## 2.4 Folgerung und Ausblick

Alle der beschriebenen Veröffentlichungen beinhalten die Herausforderung, ausreichend schnell rechnende Simulationen für die Optimierung bereitzustellen. Um dieses Ziel zu erreichen werden oftmals mathematische Ersatzmodelle aus den physikalischen Modellen abgeleitet wie bei wie bei Eghtessad (30), Kremek (62), Rössle (96), Palm (88), Kuchenbuch (64) und Ndao (82) ersichtlich. Die mathematischen Modelle erlauben jedoch nur bedingt Parameteränderungen und erschweren den Einblick in die physikalischen Zusammenhänge der Größen innerhalb des Modells.

Die vorgestellten Optimierungsmethoden lassen sich, wie bereits von Moses (78) beschrieben, in die Kategorien ein- und mutlikriterielle Methoden einteilen. Dabei fällt auf, dass die multikriteriellen Methoden, welche als Resultate Pareto-Fronten ausbilden, vor allem in der Komponentengrobdimensionierung zum Einsatz kommen. Speziell für Geometrie- und Packageoptimierungen werden stochastische Methoden (genetische bzw. evolutionäre Algorithmen) in multikriterieller Ausprägung eingesetzt. In der Komponentenfeindimensionierung werden im Gegensatz dazu vermehrt, aber nicht ausschließlich, einkriterielle Methoden eingesetzt.

Die vorgestellten Veröffentlichungen sind sich einig, dass bei der Existenz diskreter Werte im Variablenraum, der Lösungsraum im Vorfeld der Optimierung mittels einer Versuchsplangungsmethode eingegrenzt werden soll.

In der Fahrzeugentwicklung werden während der Konzeptphase mittels Komponentengrobdimensionierung die Randbedingungen (Topologie, Bauraum, Leistung, Lastprofile, Vorlauftemperatur) festgelegt und anschließend mit der Konstruktionsphase und der Komponen-