Optimierter Hochvoltbatterieentwurf hinsichtlich mechanischer, thermischer und elektrischer Randbedingungen unter Berücksichtigung der Produktionskosten

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften,
Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik
der
Universität Duisburg-Essen
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften
Dr.-Ing.
genehmigte Dissertation

von

Felix Frank
aus
Euskirchen

Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Dieter Schramm
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Birke

Tag der mündlichen Prüfung: 29.05.2019

DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

Offen im Denken

ub universitäts bibliothek

Diese Dissertation wird über DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt und liegt auch als Print-Version vor.

DOI: 10.17185/duepublico/70278
URN: urn:nbn:de:hbz:464-20190718-145317-7

Alle Rechte vorbehalten.

Kurzfassung

Die Elektrifizierung von Fahrzeugen ist ein wichtiger Baustein für die Senkung steigender Treibhausgasemissionen. Neben der Reduzierung des CO_2-Ausstoßes bei konventionellen Fahrzeugen durch die Hybridisierung, besteht durch die Elektrifizierung die Möglichkeit der vollständigen Eliminierung des Treibhausgasausstoßes von Elektrofahrzeugen im Betrieb. Einen der wichtigsten Bestandteile für die Elektrifizierung von Fahrzeugen stellt der verwendete Energiespeicher dar. In den meisten Fällen kommt hierfür eine Batterie zum Einsatz. Die Batterie stellt die Energie für die Fortbewegung zur Verfügung. Dabei besitzt sie allerdings ein hohes Gewicht, benötigt viel Platz im Fahrzeug und ist zudem sehr teuer. Aus diesem Grund kommt der Auslegung der Batterie eine sehr wichtige Rolle bei der erfolgreichen Umstellung des Verkehrssektors auf Elektromobilität zu. An die Batterie werden dabei vielfältige Anforderungen gestellt, welche sich teilweise widersprechen (sie soll günstig sein, aber viel Energieinhalt und eine lange Lebensdauer besitzen). Um diese fahrzeugspezifischen Anforderungen zu erfüllen, stehen bei der Batterieauslegung Stellhebel aus technischen und wirtschaftlichen Bereichen zur Verfügung. Batterien in Elektrofahrzeugen sind dadurch grundsätzlich Spezialanfertigungen, für jedes Fahrzeug.
Im ingenieurwissenschaftlichen Bereich werden für Problemstellungen mit vielfältigen Lösungsmöglichkeiten und Wirkzusammenhängen erfolgreich Modelle eingesetzt, die physikalische Zusammenhänge abbilden und es so zulassen, den bestehenden Lösungsraum ausgiebig zu analysieren. Zusätzlich ermöglicht der Einsatz von Modellen die Betrachtung von Auswirkungen bei sich ändernden Bedingungen: Was passiert, wenn für die Batterie andere Batteriezellen eingesetzt werden, oder sich die Nutzungsbedingungen des Fahrzeugs ändern? Wird die Batterie billiger? Wird sie kleiner? Sind größere Reichweiten möglich? An dieser Stelle setzt die vorliegende Forschungsarbeit an. Hierfür wird zunächst eine geeignete Vorgehensweise ermittelt, um eine modellbasierte Batterieauslegung vorzunehmen. Dafür wird festgestellt welche Zusammenhänge des Batterieentwurfs durch Modelle abgebildet werden müssen. Elektrisches und thermisches Verhalten bilden die Leistungsfähigkeit der Batterie ab. Die mechanische Integration bestimmt ihre Gestalt und die Entwicklung und Herstellung der Batterie definiert den Batteriepreis. Für alle diese Bereiche werden geeignete Modelle vorgestellt oder entwickelt und in einem Gesamtsystem zusammengebracht. Damit können Anforderungen an die Batterie vorgegeben und der Batterieentwurf durch die Modelle und Algorithmen automatisch vorgenommen werden. Mit Hilfe einer zusätzlichen Optimierung wird der vielfältige Lösungsraum hin zu den sinnvollsten Lösungen abgetastet. Die Fähigkeit, Fragen wie die oben genannten mit Hilfe der entwickelten Optimierungsumgebung zu beantworten, wird durch drei beispielhafte Batterieauslegungen mit unterschiedlichen Randbedingungen demonstriert. Zu diesem Zweck werden Elektrofahrzeuge auf Basis des BMW i3, des Tesla Model S und des VW e-Golf untersucht. Zuletzt werden mögliche Erweiterungen der Modelle, sowie deren Potential diskutiert.

Abstract

One of the most important factors in reducing greenhouse gas emissions is the electrification of vehicles. Besides lowering CO_2-emissions of conventional combustion vehicles by adding an electrical powertrain, the complete electrification aims at eliminating greenhouse gas emissions in the transport sector, while those vehicles are in use. The realization of the energy storage in the electrified vehicle is an important part of the electrification process. Normally, batteries are used as energy storage. On the one hand, the battery provides the energy for propulsion. On the other hand, it is one of the heaviest, most space consuming and expensive parts in the vehicle. This is why the battery design plays an important role in changing the transport sector towards electrification. The battery is subject to a huge amount of requirements, which are sometimes contradictory (it supposed to be inexpensive, but provide a lot of energy and have a long lifetime). To fulfill all kinds of requirements there are a lot of technical and economical points of application. Therefore, batteries are always a tailored component for a specific vehicle.
Problems with many possible solutions in an engineering scope are often successfully solved by using models, which represent physical correlations and thus enable a comprehensive analysis of the solution space. Additionally, the usage of models enable the consideration of impacts by changing boundary conditions: what happens to the battery if the battery cells are replaced? Will it be cheaper? Will it be smaller? Is a greater electrical range possible? This is where the on hand doctoral thesis steps in. After ascertaining an appropriate method to enable the use of a model-based battery design procedure, the determination of the essential correlations to be modeled takes place. Electrical and thermal behavior determine the performance of the battery. The integration into a battery pack defines the shape, while the development and manufacturing sets the battery price. For all of this areas suitable models are introduced or developed and aggregated into a combined system. Thereby a set of requirements can be prescribed and the models and specific algorithms do the battery design procedure automatically. Additionally an optimization technique enables analyzing the solution space towards the most appropriate battery designs. Three exemplary use cases show the capability of answering questions like the above-mentioned ones under different boundary conditions. Therefore vehicles based on the BMW i3, the Tesla Model S and the VW e-Golf are used. Moreover, it is ascertained, that there is a big potential for further development of the single models to enable answering questions that are even more specific.

Danksagung

Zu Beginn möchte ich Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Schramm für die Übernahme der Betreuung, das wertvolle Feedback und den Austausch zu meiner Arbeit danken. Ich freue mich sehr darüber, dadurch die Möglichkeit erhalten zu haben die Forschungsarbeit sehr produktnah durchführen zu können. Hierfür möchte ich mich ebenfalls bei der Robert Bosch Battery Systems GmbH bedanken, welche mir tiefe Einblicke in die Produktentwicklung von Hochvoltbatterien ermöglicht und mir dabei die notwendigen Freiheiten bei der wissenschaftlichen Bearbeitung, unabhängig von der eigenen Entwicklungstätigkeit, zugestanden hat. Nicht zuletzt dadurch ist es möglich ein Kostenmodell zu veröffentlichen, welches eine realistische Preiseinschätzung für die Herstellung von Hochvoltbatterien zulässt.

Bei Prof. Dr.-Ing. Birke möchte ich mich, neben der Übernahme des Korreferats, dafür bedanken, mir bereits in einem frühen Forschungsstadium wichtige Anregungen bei der Fokussierung der Themen gegeben zu haben.

Ein ganz besonderer Dank gebührt Dr.-Ing. Jörg Wilhelm und Dr. rer. nat. Moritz Kurka für die fachliche Betreuung, die wertvollen Anregungen, Gespräche, Diskussionen und die Unterstützung bei der Robert Bosch Battery Systems GmbH.

Auch bei den Mitarbeitern des Lehrstuhls für Mechatronik, insbesondere Martin Koppers, Patrick Driesch, Sarah Tewiele und Mira Schüller möchte ich mich für die Unterstützung bedanken.

Weiterer Dank gilt Johann Mantel, Hang Pan, Dominik Schäfer und Maximilian Gradel, welche einen wertvollen Beitrag in Form ihrer Abschlussarbeiten und Praktika dazu geleistet haben, dass aus der Arbeit die nun vorliegende umfassende Optimierungsumgebung wurde.

Mein herzlichster Dank gilt zudem meiner Frau Anna, ohne die die vorliegende Arbeit nie entstanden wäre und unserem Sohn Noah, der uns seit Beginn der Forschungsarbeit begleitet und die größte Lebensfreude bereitet.

Für Anna, Noah, das Spätzchen, Schloff den Superdrachen, die Natur und die Menschheitsfamilie.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung und Motivation 1

1.1 Zielsetzung 3

1.2 Gliederung der Arbeit 4

2 Grundlagen und Stand der Technik 5

2.1 Elektro- und Hybridfahrzeuge 5

2.2 Batterien für Elektro- und Hybridfahrzeuge 7

2.2.1 Grundlagen zu Li-Ionen Zellen 7

2.2.2 Grundlagen zur Batterieintegration 13

2.3 Auslegung von Batterien für Elektro- und Hybridfahrzeuge 17

2.4 Modelle von Batterien 18

2.4.1 Elektrische Modelle 19

2.4.2 Thermische Modelle 20

2.4.3 Kostenmodelle 20

2.4.4 Mechanische Modelle 21

2.5 Optimierung 22

2.5.1 Der evolutionäre Algorithmus in optiSLang 25

2.5.2 Geometrische Optimierung 26

3 Methodik und Konzept für die modellbasierte Batterieauslegung 31

3.1 Methodik für die Entwicklung einer modellbasierten Batterieauslegung 31

3.1.1 Der Vorgehenszyklus nach Ehrlenspiel, Kiewert et al. und Ehrlenspiel und Meerkamm 32

3.1.2 Entwicklungsmethodik nach VDI 2206 33

3.1.3 Softwarespezifische Prozesse nach ISO/IEC 12207 35

3.1.4 Entwicklungsmethodik nach Seidel 36

3.1.5 Entwurfsmethoden in Kuchenbuch 39

3.1.6 Entwicklung einer kombinierten Methode 40

3.2 Haupteinflussfaktoren und Funktionsübersicht von Hochvoltbatterien 42

3.2.1 Aufstellen einer Funktionsstruktur 43
3.2.2 Erstellung einer Programmstruktur, Vergleich mit bestehenden Lösungen und Systemabgrenzung 47

4 Modellbasierte Optimierung von Batteriesystemen 53
4.1 Verwendete Teilmodelle für die Konzeptumsetzung 53
4.1.1 Elektrisches und thermisches Zell- und Batteriepackmodell 53
4.1.2 Batteriekostenmodell 62
4.1.3 Mechanisches Modell der Hochvoltbatterie 80
4.2 Struktur der Gesamtoptimierung 83
4.3 Batterieanforderungen, Fahrzyklen und Fahrzeugklassen 84
4.3.1 Batterieanforderungen und Voreinstellungen für die Batterieauslegung 84
4.3.2 Fahrzyklen als Nutzungsszenario 87
4.3.3 Fahrzeugklassen 90
4.4 Ermittlung einer voroptimierten Konfiguration 91
4.4.1 Elektrische Voroptimierung 91
4.4.2 Mechanische Voroptimierung 102
4.5 Systemsynthese zu einer gesamtheitlichen Optimierungsumgebung 112
4.5.1 Ermittlung einer angemessenen Anzahl von Solver-Aufrufen im Optimierungsalgorithmus 113
4.5.2 Bewertung der Unterergebnisse und Auswahl eines globalen Optimums 117
4.5.3 Sensitivitätsanalyse der Gesamtsystemoptimierung 121
4.6 Optimierung verschiedener Batteriepacks 125
4.6.1 Einfluss verschiedener Fahrzyklen auf die Optimierung 126
4.6.2 Optimierung mit unterschiedlichen Batteriezellen und Spannungslagen 136
4.6.3 Variierung der Zellkapazität bei gleichbleibendem Zellformat 142
4.7 Diskussion der Ergebnisse 149

5 Zusammenfassung und Ausblick 151

6 Anhang 159
6.1 Zur Methodik und dem Konzept der Programmstruktur 159
6.2 Zum elektrischen und thermischen Zell- und Batteriemodell 162
6.2.1 Vergleichsdiagramme für die Modellverifizierung 162
6.3 Zum Kostenmodell 163
6.4 Zur Rahmendimensionierung 165

6.5 Parameterdatensätze für die Gesamtsystemoptimierung 166
6.6 Zu den Fahrzyklen 169
6.7 Zur Ermittlung des Energieinhalts 170
6.8 Zum Packalgorithmus 171
6.9 Detailergebnisse EA10000 und EA400/EA200 172
6.10 Zur optimalen Batteriekonfiguration für den BMW i3 176
6.11 Zur optimalen Batteriekonfiguration für das sportliche Oberklassefahrzeug ... 178
6.12 Zu den elektrischen Zellparametern 179

7 Literaturverzeichnis 180

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
18650	Zylindrisches Zellformat
21700	Zylindrisches Zellformat
BCU	Battery Control Unit – Batteriesteuergerät
(B)EV	(Battery) Electric Vehicle – Elektrofahrzeug
BEV1	Prismatisches Zellformat
BEV2	Prismatisches Zellformat
BDU	Battery Disconnect Unit – Schützbox, Sicherheitsbaugruppe
BMS	Battery Management System – Batteriesoftware
BoL	Begin of Life
CAD	Computer Aided Design
CADC 130/150	Common Artemis Driving Cycle – Fahrzyklen
CFD	Computational Fluid Dynamics
CLP	Container Loading Problem
CSC	Cell Supervision Circuit – Modulüberwachungselektronik
DC/DC	Direct Current to Direct Current – Konverter
EA	Evolutionärer Algorithmus – Optimierungsalgorithmus
ECM	Electrical Circuit Model – (elektrisches) Ersatzschaltbildmodell
E-Funktion	Evaluierungsfunktion des Packalgorithmus
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
EoL	End of Life
HEV	Hybrid Electric Vehicle – Hybridfahrzeug; auch prismatisches Zellformat
KPI	Key Performance Indicator – Schlüsselparameter
LCO	Lithium Kobalt-Oxid – Kathodenmaterial
LFP	Lithium Eisenphosphat – Kathodenmaterial
LMO	Lithium Mangan-Oxid – Kathodenmaterial
LNO	Lithium Nickel-Oxid – Kathodenmaterial
LTO	Lithium Titanat – Anodenmaterial
mHEV	mild Hybrid Electric Vehicle – Mildhybrid
MSE	Mean Square Error – Mittlerer Fehler
NEDC	New European Driving Cycle – NEFZ (Neuer Europäischer Fahrzyklus)
OCV	Open Circuit Voltage – Leerlaufspannung
PA	Packalgorithmus
P/E	Leistungs- zu Energieverhältnis – üblicherweise eine Zellgröße
PHEV	Plug-In Hybrid Electric Vehicle
PHEV1	Prismatisches Zellformat
PHEV2	Prismatisches Zellformat

Abkürzung	Bedeutung
PREMIUM (BEV)	Plug-In-, Range-Extender- und Elektrofahrzeuge unter realen Mobilitätsumständen: Infrastruktur, Umweltbedingungen und Marktakzeptanz – Forschungsprojektbezeichung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Hier eine Bezeichnung für einen dort enthaltenen Fahrzyklus für Elektrofahrzeuge.
QFD	Quality Function Deployment
RC-Glied	Elektronische Baugruppe bestehend aus einer Parallelschaltung von Widerstand (R) und Kondensator (C)
RMSE	Root Mean Square Error – Mittlerer quadratischer Fehler
sHEV	strong Hybrid Electric Vehicle – Vollhybrid
SKP	Single Knapsack Problem
SLOPP	Single Large Object Placement Problem
SoC	State of Charge – Ladezustand
SoC_{Max}	Obergrenze des SoC-Swing
SoC_{Min}	Untergrenze des SoC-Swing
SoC-Swing	Nutzbares Ladezustandsfenster
SoH	State of Health – Alterungszustand der Batteriezelle
SoHC	State of Health Capacitive – Kapazitätsabnahme aufgrund der Alterung einer Batteriezelle
SoHR	State of Health Resistive - Innenwiderstandszunahme aufgrund der Alterung einer Batteriezelle
WLTC	Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle – Fahrzyklus

Symbolverzeichnis

Formelzeichen	Physikalische Basiseinheit	Bedeutung
A_{Front}	[m²]	Fahrzeugfrontfläche
A_h	[m²]	Aktive Fläche für den Wärmeaustausch des Punktes h im thermischen Zellmodell
$A_{Modulverbinder}$	[m²]	Aktive Querschnittsfläche eines Modulverbinders
A_{Plate}	[m²]	Aktive Kühlfläche der Kühlplatte
A_{xy}	[m²]	Bauteilgrundfläche
A_{xz}	[m²]	Bauteilseitenfläche
A_{yz}	[m²]	Bauteilfrontfläche
$A_{Zellverbinder}$	[m²]	Aktive Querschnittsfläche eines Zellverbinders
b_{Modul}	[m]	Breite eines Moduls
b_{Zelle}	[m]	Breite einer Zelle
C_f	[F]	Kapazitiver Anteil der Ladungstransport- und Diffusionsprozesse im ECM
C_{Nom}	[Ah]	Nominelle Kapazität – Bemessungskapazität
$C_{Nom,Sim}$	[Ah]	Über die Simulation bestimmte Bemessungskapazität
$c_{p,in}$	[J/kg K]	Spezifische Wärmekapazität des Kühlmittels am Eingang der Kühlplatte
$c_{p,out}$	[J/kg K]	Spezifische Wärmekapazität des Kühlmittels am Ausgang der Kühlplatte
$c_{p,z}$	[J/kg K]	Spezifische Wärmekapazität des Punktes z im thermischen Zellmodell
c_w	-	Aerodynamischer Beiwert für die Ermittlung des Luftwiderstandes eines Fahrzeugs
$C_{Zelle,nom}$	[Ah]	Nominelle Kapazität der Batteriezelle
$\Delta T_{Plate \rightarrow Fl}$	[K]	Temperaturdifferenz zwischen Kühlplattenoberseite und Kühlmittel
$\Delta T_{z,h}$	[K]	Temperaturdifferenz zwischen den Punkten z und h im thermischen Zellmodell
Δx, Δy, Δz	[m]	Abstand eines Objekts zur Bauraumseitenfläche
Dim	-	Dimensionierungsfaktor der Hauptevaluierungsfunktion
E_{1C}	[Wh]	Nomineller Energieinhalt bei einer Simulation mit einer 1C-Entladerate
E_{Anf}	[Wh]	Geforderter nutzbarer Energieinhalt
E_{Nom}	[Wh]	Nomineller Energieinhalt – Bemessungsenergieinhalt

Formelzeichen	Physikalische Basiseinheit	Bedeutung
$E_{Nom,Sim}$	[Wh]	Nomineller Energieinhalt auf Basis in der Simulation bestimmter Bemessungswerte
$E_{Nutz,Standard}$	[Wh]	Nutzbarer Energieinhalt, berechnet über die Bemessungswerte und einen SoC-Swingfaktor
E_{Sim}	[Wh]	Kumulierter Energieverbrauch in der Simulation
$E_{Swing,1C}$	[Wh]	Nutzbarer Energieinhalt auf dem gewählten SoC-Swing auf Basis der 1C-Entladesimulation
$f(x)$	-	Zielfunktion einer Optimierung
$Flag_{xPlatzierung}$	-	Einstellparameter für das Block Building des Packalgorithmus
$Flag_{yPlatzierung}$	-	
$Flag_{zPlatzierung}$	-	
G	-	Zulässigkeitsbereich für die Optimierung
g_i mit $i = 1, \dots, p$	-	Ungleichungsrandbedingung
H	[$]	Tatsächliche Herstellkosten
H_{Eval}	[mm³]	Hauptevaluierungsfunktion des Packalgorithmus
H_i	[$]	Ideale Herstellkosten
h_j mit $j = 1, \dots, m$	-	Gleichungsrandbedingung
I_{Dauer}	[A]	Dauerstrom
I_{DisCh}	[A]	Innenwiderstands-, SoC- und zeitabhängiger maximaler Zellentladestrom
i_{Zelle}	[A]	Momentaner Zellstrom
k_2	-	Korrekturfaktor der DIN 43670 und 43671
K_i	[$]	Günstigster Batteriepreis
k_{Mat}	[$/t]	Materialkosten
$K_{Kühlplatten}$	[$]	Kühlplattenkosten/-preis
K_{kWh}	[$/kWh]	Energetischer Batteriepreis
K_{Lern}	[$]	Kosten nach Verrechnung der Lernrate
K_{Modell}	[$]	Kosten aus dem Kostenmodell vor Verrechnung der Lernrate
$K_{Modulverbinder}$	[$]	Modulverbinderkosten/-preis
K_{Rahmen}	[$]	Rahmenkosten/-preis
K_{tot}	[$]	Batteriepreis total pro Batteriepack
$K_{Zellverbinder}$	[$]	Zellverbinderkosten/-preis
K_{Zelle}	[$]	Zellkosten/-preis pro Zelle
L	[%]	Lernrate
$L_{Modulverbinder}$	[m]	Effektive Länge eines Modulverbinders
$L_{Zellverbinder}$	[m]	Effektive Länge eines Zellverbinders
m_{Fl}	[kg]	Masse des Kühlmediums in der Kühlplatte
m_{Fzg}	[kg]	Fahrzeugmasse
m_{Rahmen}	[kg]	Masse des Batterierahmens
μ_1, μ_2	-, [s/m]	Rollwiderstandsbeiwerte für die Ermittlung des Rollwiderstandes eines Fahrzeugs
m_z	[kg]	Masse eines Punktes z im thermischen Zellmodell
n_0	-	Referenzproduktionsmenge
n_{Bat}	-	Ausbringungsmenge an Batterien pro Jahr

Formelzeichen	Physikalische Basiseinheit	Bedeutung
$n_{Bauteil}$	-	Bezeichner für ein Bauteil
n_{KPI}	-	Anzahl von KPIs
n_{Mod}	-	Anzahl von Modulen
n_P	-	Anzahl paralleler Zellen im Batteriepack
n_S	-	Anzahl serieller Zellen im Batteriepack
n_{Zellen}	-	Anzahl Zellen im Batteriepack
P_{Anf}	[W]	Minimale geforderte elektrische Batterieleistung
P_{el}	[W]	Elektrische Leistung
p_{KPI}	-	Punktzahl eines KPI bei der technischen Bewertung
P_{Max}	[W]	Elektrische Maximalleistung der Batterie
p_{Max}	-	Maximale Punktzahl bei der technischen Bewertung
r_{dyn}	[m]	Dynamischer Radradius
R_{ECM}	[Ω]	Widerstand des ECM
ρ_{Fl}	[kg/m³]	Dichte des Kühlmittels
ρ_{Mat}	[kg/m³]	Materialdichte
R	[Ω]	Gesamtinnenwiderstand einer Batteriezelle
R_S	[Ω]	Serieller Innenwiderstand des ECM
R_f	[Ω]	Ohm'scher Anteil der Ladungstransport- und Diffusionsprozesse im ECM
s_1	-	Technische Wertigkeit
s_2	-	Wirtschaftliche Wertigkeit
S	[m]	Simulierte Reichweite
SoC_{Init}	[%]	Initialisierungsladezustand
SoC_{Max}	[%]	Obergrenze des nutzbaren SoC-Bereichs
SoC_{Min}	[%]	Untergrenze des nutzbaren SoC-Bereichs
SoC_{Swing}	[%]	Nutzbares Ladezustandsfenster
t	[s]	Zeit
t_{Start}, t_{Ende}	[s]	Start- und Endzeitpunkt eines Simulationszyklus
T_{in}	[K]	Kühlmitteltemperatur am Kühlplatteneinlass
T_{out}	[K]	Kühlmitteltemperatur am Kühlplattenausgang
T_z	[K]	Temperatur des Punktes *z* im thermischen Zellmodell
T_{Zelle}	[°C]	Mittlere Zelltemperatur
$T_{Zelle,Max}$	[°C]	Maximale mittlere Zelltemperatur
$T_{Zellverbinder}$	[°C]	Temperatur des Zellverbinders
U_{ECM}	[V]	Überspannung des ECM
U_{Max}	[V]	Maximale Zellspannung
U_{Min}	[V]	Minimale Zellspannung
U_{Nom}	[V]	Nominelle Spannung – Bemessungsspannung
$U_{Nom,Sim}$	[V]	Über die Simulation ermittelte Bemessungsspannung
U_{OCV}	[V]	Leerlaufspannung
Ur	[%]	Umsatzrendite des Herstellers
$U_{Schluss}$	[V]	Schlussspannung der 1C Entladesimulation
U_{Zelle}	[V]	Zellspannung

Formelzeichen	Physikalische Basiseinheit	Bedeutung
u_{Zelle}	[V]	Momentane Zellspannung
$\dot{Q}_{Ohm,a}$ mit $a = s, f$	[W]	Joule‘sche Wärmeabgabe im ECM
Var	-	Anzahl von Variationen
V_{Bat}	[m³]	Batterievolumen
$V_{Bauteil}$	[m³]	Bauteilvolumen
V_{Fl}	[m³]	Volumen des Kühlmittels in der Kühlplatte
$\dot{v}_{Fl}$	[l/h]	Kühlmitteldurchflussrate
$V_{Kühlplatten}$	[m³]	Gesamtvolumen der Kühlplatten
$v_{Max,el}$	[m/s]	Elektrische Maximalgeschwindigkeit
V_{Tot}	[m³]	Verbleibendes Totvolumen im Bauraum
$V_{Übrig}$	[m³]	Volumen der nichtplatzierten Objekte
V_{Umschl}	[m³]	Volumen der Umschließenden aller aktuell platzierten Objekte
W	[W/K]	Wärmeaustauschkoeffizient
w	[Wh/l]	Volumetrische Energiedichte
$W_{Plate \rightarrow Fl}$	[W/K]	Wärmeaustauschkoeffizient zwischen Kühlplatte und Kühlmittel
$x \in X$	-	Definitionsbereich einer Optimierung als Element der Menge X
XsYp	-	Zellkonfiguration mit X Zellen in Serie und Y Zellen in Parallel verschaltet
X_msY_mp	-	Modulkonfiguration mit X_m Zellen in Serie und Y_m Zellen in Parallel verschaltet
$Z_{Herstellung}$	-	Zuschlagsfaktor für die Herstellung eines Bauteils
$Z_{Komplexität}$	-	Zuschlagsfaktor für die Komplexität der Kühlplattenentwicklung und Fertigung

1 Einleitung und Motivation

Die Tatsache der globalen Klimaerwärmung kann nicht bestritten werden. Bereits seit den letzten Dekaden fördern der weltweit immer weiter ansteigende CO_2 Ausstoß und die Emission weiterer Treibhausgase die Klimaerwärmung. Für Deutschland zeigt Abbildung 1.1 die jährlichen Durchschnittstemperaturen von 1881 – 2017. Der allgemeine Temperaturanstieg lässt sich hier bereits seit den 1990er Jahren erkennen. Die Folgen für das Klima, die Natur und die Lebewesen auf der Erde sind nicht abschätzbar. Ein Anstieg des Meeresspiegels, die verstärkte Ausdehnung von Wüsten, der Verlust von Ackerland, knapp werdendes Trinkwasser und verstärkt auftretende Wetterextreme sind nur die naheliegenden globalen Auswirkungen (siehe IPCC, 2014).

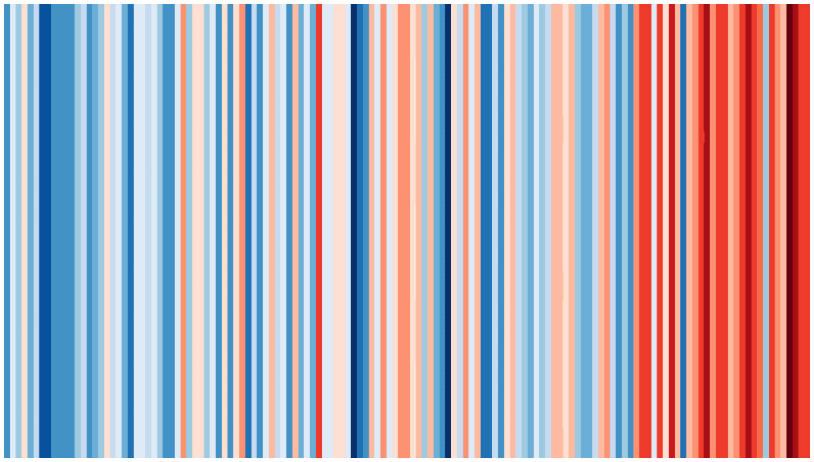


Abbildung 1.1: Jährliche Durchschnittstemperaturen in Deutschland. Jeder Streifen symbolisiert ein Jahr von links nach rechts (1881-2017), farblich sortiert von 6,6 °C (blau) bis 10,3 °C (rot) von (Hawkins, 2018).

Ein großer Anteil der Treibhausgase wird im Verkehrssektor produziert[1]. In Ballungsgebieten sind die Emissionen von Verbrennungsfahrzeugen besonders spürbar. Deshalb besteht seit Jahren die Forderung nach Alternativen zum konventionellen Auto. Zusätzlich werden diese Forderungen durch die Debatte zur Dieselabgasreinigung unterstützt. Aus diesem Grund kommen seit den letzten ca. fünf Jahren vermehrt elektrifizierte Fahrzeuge, also Hybrid-, Brennstoffzellen- und Elektrofahrzeuge, auf den Markt. Diese Fahrzeuge können sich (streckenweise) elektrisch fortbewegen, stoßen also lokal keine Abgase aus. Mit Hilfe der Bremsenergierückgewinnung (Rekuperation) lässt sich der Energieverbrauch der Fahrzeuge zusätzlich senken. Für Hybridfahrzeuge bedeutet das ferner weniger Emissionen und einen geringeren Kraftstoffverbrauch. Der Tendenz nach ist die Einführung elektrifizierter Fahrzeuge also ein Schritt in die richtige Richtung. Trotz der positiven Auswirkungen, die ein

[1] In der EU lag der Anteil des (Straßen-)Transportsektors bei den CO_2-Emissionen 2016 bei 25 % (European Environment Agency und European Topic Centre for Air Pollution and Climate Change Mitigation, 2018, S. 65f.).

Umstieg auf elektrifizierte Fahrzeuge mit sich bringen würde, sind vor allem Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeuge dennoch eine Randerscheinung auf deutschen Straßen. Die Erklärungen hierfür sind vielfältig. Zum einen fehlt eine geeignete Ladeinfrastruktur. Das gilt besonders für Brennstoffzellenfahrzeuge. Zum anderen sind die Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeuge deutlich teurer, als Verbrennerfahrzeuge derselben Fahrzeugklasse. Aktuelle Elektrofahrzeuge können, ohne Ladestopp, nur relativ kurze Strecken ($\ll$200 km) zurücklegen (siehe Schramm und Koppers, 2014, S. 14). Ausnahmen mit höherer Reichweite existieren zwar, sind aber noch einmal preisintensiver.

Was also macht elektrifizierte Fahrzeuge so teuer? Im Vergleich zu einem Verbrennerfahrzeug besitzt ein Elektrofahrzeug deutlich weniger bewegte Teile. Das bedeutet eine geringere Komplexität in der Fahrzeugauslegung und auch bei der Fertigung. Verglichen mit dem Verbrennungsmotor ist ein Elektromotor einfach aufgebaut[2]. Die Ansteuerung (der Inverter und dessen Software) wirkt dagegen bereits komplexer: Einzelne Spulen im Elektromotor müssen sinusförmig in mehreren Phasen bestromt werden, um den Rotor des Motors zu bewegen. Die Anforderungen an die enthaltenen Halbleiterbrücken sind vielfältig. Dennoch stellt der Inverter keinen großen Kostenfaktor bezogen auf die gesamten Antriebsstrangkosten dar. Die mit Abstand teuerste Komponente im Antriebsstrang (80 % der Kosten (Fink und Fetzer, 2014)), aber auch im gesamten Elektrofahrzeug, ist die Batterie[3].

Die Batterie besitzt ein großes Volumen, ist schwer und für jedes Fahrzeug eine Spezialentwicklung. Die Auslegung erfolgt unter Mitwirkung unterschiedlichster technischer Domänen, wie der Elektrotechnik, der Thermodynamik und des Maschinenbaus. Ferner darf die Einbeziehung ökonomischer Betrachtungen bereits im Entwurf nicht versäumt werden, da die Batterie sonst kein akzeptables Kostenniveau erreicht. Das hat direkte Auswirkungen auf den Fahrzeugpreis und damit den Verkaufserfolg des Fahrzeugs. Eine nähere Betrachtung dieses zentralen Bestandteils der Elektrifizierung ist daher angebracht, sogar notwendig. Welche Wirkzusammenhänge bestehen unter den einzelnen technischen Bereichen? Welche Anforderungen haben den größten Einfluss auf die resultierende Gestalt der Batterie? Ist es sinnvoll, kleinformatige, günstigere Batteriezellen zu nutzen, oder sind großformatige teurere Zellen eher zielführend?

Eine ganzheitliche, modellbasierte Batterieoptimierung bietet das große Potential, die teuerste Komponente im elektrischen Antriebsstrang bereits im Entwurfsstadium kosteneffizient und anwendungsorientiert zu entwickeln. Damit wird ein wichtiger Beitrag zur Durchsetzung einer klimafreundlichen Mobilität geleistet. Voraussetzung hierfür sind allerdings zusätzlich die soziale, nachhaltige und ökologische Gewinnung der notwendigen Rohstoffe und ein effizientes Batterierecycling, wenn die Batterien nicht mehr weiter verwendet werden können. Ferner können obige Fragestellungen systematisch angegangen werden, um Synergiepotentiale bei der Batteriefertigung zu ermitteln.

Eines ist klar: Jedes Fahrzeug und jeder Fahrzeughersteller stellt unterschiedliche Anforderungen an die Fahreigenschaften. Dadurch werden die Antriebsbatterien immer Spezialentwicklungen bleiben. Dennoch folgt der Entwicklungsprozess für eine Batterie einer gleichbleibenden Logik. Während sich die Anforderungen (als Eingangsgrößen) und auch die resultierenden Batterieentwürfe (als Ausgangsgrößen) unterscheiden, bleibt der Prozess da-

[2] Die Entwicklung und Fertigung eines Elektromotors ist dessen ungeachtet nicht zu unterschätzen.

[3] Bei Brennstoffzellenfahrzeugen kommen noch die Brennstoffzellenstacks hinzu, dafür ist die notwendige Batterie kleiner.

zwischen gleich. Es bietet sich also an, die Zusammenhänge zwischen Ein- und Ausgangsgrößen aufzuschlüsseln. Dies erfolgt in dieser Arbeit mit Hilfe einer eigens konzipierten Entwicklungsmethodik und durch den Einsatz von (Simulations-) Modellen. Die Modelle werden in eine Optimierungsumgebung eingebettet, die zuletzt für die Beantwortung der obigen Fragen eingesetzt wird. Die eine Batteriezelle, oder gar Batterie, welche für alle Fahrzeuge die Anforderungen am besten erfüllt, wird es dennoch nicht geben. Eine Änderung an der Gewichtung der Optimierungsziele, und die Auswahl fällt auf einen anderen Batterieentwurf. Auch das wird im Hauptteil gezeigt werden.

1.1 Zielsetzung

In der vorliegenden Arbeit soll eine Methodik konzipiert werden, welche die Entwicklung einer robusten Optimierungsumgebung für die Batterieauslegung ermöglicht. Die Ergebnisse der Optimierungsumgebung müssen also verlässlich und deduktionsfähig sein. Zusätzlich steht die Entwicklung ebendieser Umgebung im Fokus der Arbeit. Eine Optimierung ist dann sinnvoll, wenn verschiedene Möglichkeiten einer Lösungsfindung bestehen (siehe Dittes, 2015, S. 2). Dies ist bei der Batterieauslegung der Fall, bei der es unterschiedlichste Möglichkeiten der Einflussnahme auf den Batterieentwurf gibt. Beispiele hierfür sind die Auswahl der Batteriezelle, deren elektrische Konfiguration, die Gestaltung und Anordnung der Batteriemodule und die Einstellung eines geeigneten Betriebsbereiches.
Die Optimierungsumgebung soll in der Lage sein, die wichtigsten Einflussfaktoren bei der Batterieauslegung zu berücksichtigen. Dafür müssen diese Faktoren ermittelt und eine geeignete Möglichkeit der (modellhaften) Beschreibung des Einflusses dieser Faktoren gefunden werden. Des Weiteren bedarf es einer Kopplung der Einflussfaktoren untereinander, um die Wirkzusammenhänge zwischen den Größen abzubilden. Zuletzt muss die Optimierungsumgebung den Einfluss sich ändernder Anforderungen an die Hochvoltbatterie darstellen können. Abbildung 1.2 veranschaulicht die notwendigen Schritte der Zielsetzung.

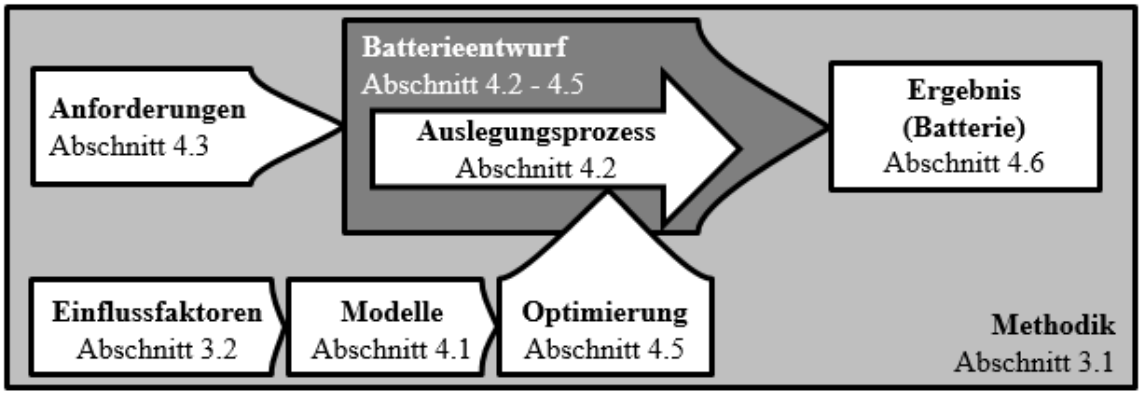


Abbildung 1.2: Zielsetzung für den Batterieentwurfsprozess mit Zuordnung zu den Abschnitten im Hauptteil.

Um eine von einem Algorithmus gesteuerte Optimierung zu ermöglichen, sollte die Auslegung der Batterie mit allen beteiligten Domänen automatisiert erfolgen. Dies erfordert die Implementierung geeigneter Heuristiken und Parametermodelle, welche Anforderungen an das Darstellungsdetail und die Rechengeschwindigkeit auf einem Computer stellen. Hier gilt

es geeignete Modelle auszuwählen oder gegebenenfalls zu entwickeln, welche den Anforderungen für den Batterieentwurf genügen.

1.2 Gliederung der Arbeit

Die Gliederung der Arbeit folgt den Anforderungen der Zielsetzung. In Kapitel 2 werden die notwendigen Grundlagen für das Verständnis der Details einer Hochvoltbatterie behandelt. Ferner werden die wichtigsten Kriterien und Randbedingungen für die Auslegung einer solchen Batterie beschrieben. Dem folgt die Beschreibung unterschiedlicher Modelle für die technischen Bereiche und für die Ermittlung der Kosten einer Fahrzeugbatterie. Zuletzt führt das Kapitel in die Optimierung ein, wobei ein eigener Abschnitt die automatische Platzierung von Objekten in einem Bauraum in Form einer Optimierung behandelt (geometrische Optimierung).

Das Konzept für die Ausarbeitung einer Optimierungsumgebung wird in Kapitel 3 entwickelt. Zusätzlich zu der Konzeptentwicklung widmet sich das Kapitel dem tieferen Verständnis der Funktionen bei der Auslegung einer Hochvoltbatterie. Des Weiteren erfolgt hier die Erstellung einer Programmstruktur, sowie der Vergleich mit bestehenden Lösungen und die Abgrenzung beziehungsweise die Einordnung des eigenen Konzepts in die Landschaft bestehender Lösungen.

In Kapitel 4 wird die entwickelte Optimierungsumgebung beschrieben. Hierfür werden zuerst die verwendeten Modelle für die einzelnen Bereiche der Batterieauslegung und –simulation vorgestellt. Dem folgt die Verknüpfung aller Modelle zu einer Gesamtoptimierung. Ein eigenes Unterkapitel (Abschnitt 4.3) widmet sich den Batterieanforderungen und den verwendeten Fahrzyklen und Fahrzeugklassen. Es folgt die detailliertere Ausgestaltung der Optimierungsumgebung durch die Beschreibung der elektrischen und mechanischen Voroptimierungen, welche innerhalb einer Gesamtoptimierung mehrfach durchgeführt werden. Das so entstandene Gesamtsystem wird einer Sensitivitätsanalyse (Abschnitt 4.5.3) unterzogen, welche bereits einige Wirkzusammenhänge der Batterieauslegung herausstellt. Nach der erfolgreichen Systemsynthese werden in Abschnitt 4.6 einzelne Entwurfsoptimierungen durchgeführt, welche unterschiedlichen Thesen nachgehen. Hier kommen verschiedene Fahrzeuge, sowie Batteriezellen und Anforderungen an die Batterie zum Einsatz.

In Abbildung 1.2 findet sich ein Überblick über die Kernbereiche des Hauptteils der Arbeit (Kapitel 3 & 4) und die Zuordnung der Bereiche zu den Unterkapiteln.

Das letzte Kapitel (Kapitel 5) fasst die Kernaussagen der Arbeit zusammen, zeigt die Interpretationsgrenzen auf und gibt einen Ausblick auf mögliche Weiterentwicklungspotentiale für die Batterieoptimierung.

2 Grundlagen und Stand der Technik

In diesem Kapitel werden die Grundlagen für den Entwurf von Hochvoltbatterien für Fahrzeuge behandelt. Hierfür wird zunächst eine Einführung in Elektro- und Hybridfahrzeuge gegeben (Abschnitt 2.1). Es werden die wesentlichen Unterschiede zu einem verbrennungsmotorischen Fahrzeug, die Bestandteile des elektrischen Antriebsstrangs und die verschiedenen Hybridisierungsgrade beschrieben. In Abschnitt 2.2 werden dann die wichtigsten Grundlagen zu Antriebsbatterien behandelt. Hierbei erfolgt zunächst eine Einführung in Lithium-Ionen Batteriezellen, welche die Basis für die meisten aktuellen Hybrid- und Elektrofahrzeugbatterien darstellen (vgl. Frieske et al., 2015, S. 381). Dem folgt die Beschreibung der Integration der Zellen und aller weiteren notwendigen Komponenten zu einem Batteriepack. Auch die Zusammenfassung der wichtigsten Funktionen der Batteriesoftware erfolgt in diesem Abschnitt. Der daran anschließende Abschnitt 2.3 geht auf den Ablauf und die Randbedingungen beim Batterieentwurf ein. Es wird damit geschlossen, dass eine modellbasierte Lösung für den Batterieentwurf unter den vielfältigen technischen und wirtschaftlichen Einflüssen zielführend ist. Daher folgt in Abschnitt 2.4 die Einführung in Modelle der unterschiedlichen beteiligten Domänen (elektrisch, thermisch, mechanisch und ökonomisch). Der letzte Abschnitt (2.5) befasst sich mit der Vorstellung der mathematischen Optimierung. Es wird beschrieben, wie die Optimierung mit Zielkonflikten bei einer Mehrzieloptimierung umgeht und was dies für die Auslegung von Batterien bedeutet. Ferner wird die Optimierungsstrategie beschrieben, welche in der vorliegenden Arbeit zum Einsatz kommt (Abschnitt 2.5.1). Der geometrischen Optimierung zur Anordnung von Objekten in einem gegebenen Bauraum widmet sich Abschnitt 2.5.2. Dort werden bereits bestehende Ansätze skizziert und die Anwendung für die Batterieintegration näher beleuchtet.

2.1 Elektro- und Hybridfahrzeuge

Elektro- und Hybridfahrzeuge zeichnen sich, im Gegensatz zu verbrennungsmotorischen Fahrzeugen, durch die Anwesenheit eines elektrischen Antriebsstrangs aus. Bei den Hybridfahrzeugen (HEV) bleibt der verbrennungsmotorische Antriebsstrang zusätzlich erhalten, während dieser bei den (batterie-)elektrischen Fahrzeugen ((B)EV) vollständig entfällt. Hybridfahrzeuge ermöglichen die Senkung des Kraftstoffverbrauchs bis hin zur lokal emissionsfreien Fortbewegung. Elektrofahrzeuge bewegen sich grundsätzlich emissionsfrei und ohne das Geräusch des Verbrennungsmotors[4]. Die wesentlichen Komponenten des elektrischen

[4] Eine Ausnahme bilden Elektrofahrzeuge mit Range Extender, welche einen kleinen Verbrennungsmotor zur Ladung der vorhandenen Traktionsbatterie besitzen. Der Range Extender wird eingeschaltet, wenn sich die Batterie einem niedrigen Ladezustand nähert.

Antriebsstrangs sind der Elektromotor, der Inverter, die (Traktions-)Batterie und gegebenenfalls ein *Onboard-Charger*, welcher das Laden der Gleichspannungsbatterie an einer Wechselstromquelle ermöglicht. Der Elektromotor wandelt elektrische Energie in mechanische Energie und somit in den Antrieb des Fahrzeugs um. Hierbei kann der Elektromotor, neben dem motorischen Betrieb, als Generator eingesetzt werden. In diesem Zustand wird Bewegungsenergie des Fahrzeugs in elektrische Energie umgewandelt. Die Traktionsbatterie nimmt die elektrische Energie auf, beziehungsweise stellt diese Energie in Form von Gleichstrom und –spannung zur Verfügung, welche vom Inverter in einen mehrphasigen Wechselstrom für den Antrieb des Elektromotors umgewandelt wird.
Ferner werden Elektro- und Hybridfahrzeuge entsprechend ihrer elektrisch verfügbaren Leistung und der Fähigkeit rein elektrisch zu fahren unterteilt (Elektrifizierungs- oder Hybridisierungsgrad). Dem kleinsten Hybridisierungsgrad entspricht der Mikrohybrid, dem folgen der Mildhybrid (mHEV), der Vollhybrid (sHEV – strong Hybrid), der Plug-In-Hybrid (PHEV) und das Elektrofahrzeug (Reif, 2010, S. 8 und Karle, 2017, S. 32). Signifikante elektrische Reichweiten über 20 km sind erst mit einem PHEV möglich. Des Weiteren sind ab diesem Hybridisierungsgrad die Batterie, Inverter und Elektromotor im Allgemeinen als Hochvoltkomponenten umgesetzt.
Je nach Antriebsstrangkonfiguration existieren mehrere Elektromotoren und Inverter, üblicherweise jedoch nur eine Traktionsbatterie. Pro eingesetztem Elektromotor wird ein Inverter benötigt, um den entsprechenden Elektromotor zu regeln. Bei der Traktionsbatterie handelt es sich um die schwerste und teuerste Komponente des elektrischen Antriebsstrangs (vgl. Korthauer, 2013, S. 414 und Fink und Fetzer, 2014, S. 3). Der Energieinhalt, die verfügbare elektrische Leistung, das Volumen und der Preis der Batterie steigen mit dem Elektrifizierungsgrad. Des Weiteren ist die Traktionsbatterie als Hochvolt-Komponente ausgeführt[5]. Zusätzlich zu dem Hochvolttraktionsnetz existiert in allen Fahrzeugen ein 12 V Bordnetz, welches aus einer 12 V Batterie gespeist wird. Angeschlossen an dieses Bordnetz sind beinahe alle Nebenverbraucher und deren Steuergeräte. Heizvorrichtungen und/oder Klimakompressoren sind meist, aufgrund ihres hohen Leistungsbedarfs, an das Traktionsnetz angeschlossen. In Hybridfahrzeugen im Leistungsbereich unter den PHEV angesiedelt, existieren zusätzlich 48 V Batterien, deren Einsatz vor allem der Verbesserung des CO_2-Haushalts und der Bremsenergierückgewinnung (Rekuperation) dienen (siehe Fink und Rees, 2015, S. 12). Zwischen Hochvolt- und Niedervoltbatterien/-bordnetz besteht zusätzlich eine Verbindung über DC/DC-Wandler, welche die Aufladung der Batterien der Niedervoltseite durch die Traktionsbatterie ermöglichen.

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf den Entwurf beziehungsweise die Auslegung der Batterien im Hochvoltbereich für PHEV und EV.

[5] Die Bedeutung des Ausdrucks „Hochvolt“ ist hier in Bezug auf die Definition der ISO 6469-3 zu verstehen, welche eine Gleichspannung über 60 V als Hochspannung bezeichnet.

2.2 Batterien für Elektro- und Hybridfahrzeuge

In diesem Abschnitt werden Lithium-Ionen Batterien für Elektrofahrzeuge beschrieben. Der Fokus liegt hierbei auf Hochvoltbatterien. In Abschnitt 2.2.1 erfolgt die Vorstellung der Batteriezellen, welche die Grundlage für einen Batteriepack bilden. Dort werden das elektrochemische Funktionsprinzip und die Unterschiede zwischen verschiedenen Zelltypen beschrieben. Unterschiede ergeben sich aus den verwendeten Zellchemiematerialien, der Zellbauform und dem elektrischen Verhalten der Zellen.

Dem schließen sich in Abschnitt 2.2.2 die Grundlagen zur Integration von Batteriezellen zu einem Batteriepack an. Den Zellen werden zusätzliche Komponenten und Funktionen hinzugefügt. In diesem Zusammenhang wird ein Überblick über die wichtigsten Funktionen der Batteriesoftware gegeben.

2.2.1 Grundlagen zu Li-Ionen Zellen

Die Basis für alle Batteriesysteme stellen die Batteriezellen dar, aus welchen durch elektrische Verschaltung und Integration in ein Gehäuse ein Batteriepack wird (siehe Abschnitt 2.2.2). Im Allgemeinen werden Batteriezellen in Primär- und Sekundärzellen unterteilt. Bei ersteren handelt es sich um nicht wiederaufladbare, bei letzteren um wiederaufladbare Zellen (siehe Korthauer, 2013; Jossen und Weydanz, 2006; Park, 2012). Die wiederaufladbaren Sekundärzellen stehen in dieser Arbeit im Fokus.

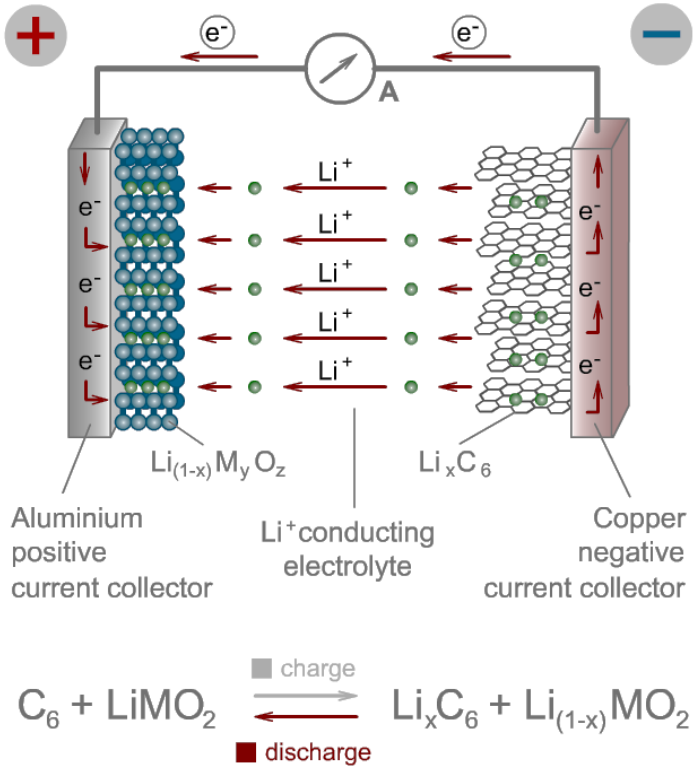


Abbildung 2.1: Funktionsprinzip einer Li-Ionen Batteriezelle. Der Separator ist hier nicht abgebildet. (Darstellung der Robert Bosch Battery Systems GmbH)

Das grundlegende Prinzip der Energiespeicherung und –abgabe dieser elektrochemischen Batteriezellen stellt die Ein-/Auslagerung von Ionen, kombiniert mit deren Transport innerhalb der Batteriezellen dar, während außerhalb der Zellen ein elektrischer Strom fließt. Um diese Eigenschaften zu erreichen, werden sogenannte Aktivmaterialien mit unterschiedlichem elektrischen Potential galvanisch voneinander getrennt in einen Elektrolyten (ermöglicht den Ionen Transport) in eine Batteriezelle eingebracht. Abbildung 2.1 stellt das Prinzip der Entladung einer Li-Ionen Batteriezelle dar. Zwischen den Aktivmaterialien stellt sich eine elektrische Spannung ein, deren Potentialausgleich durch die galvanische Trennung (Separator) verhindert wird. Die Verbindung beider Aktivmaterialien mit einem Stromleiter außerhalb der Batteriezelle führt zu einem zeitlich verlaufenden Potentialausgleich, bei dem Elektronen über den Stromleiter von einem Aktivmaterial zum anderen fließen. Das elektronenspendende Aktivmaterial (im Entladefall) wird als negative Elektrode oder Anode bezeichnet. Das elektronenaufnehmende Aktivmaterial als positive Elektrode oder Kathode. Die chemische Zusammensetzung der Aktivmaterialien verändert sich im Laufe der Entladung. Bei Li-Ionen Zellen lösen sich aus der Anode (üblicherweise lithiiertes Graphit (C_6)) positiv geladene Li-Ionen, welche durch den Elektrolyten und den Separator zur Kathode wandern. Dieser Vorgang gibt den Li-Ionen Batterien seinen Namen und ist bei diesen Zelltypen besonders effizient, da die Struktur der Aktivmaterialien lediglich für eine Einlagerung von Li genutzt wird (Interkalation). Auf Seite des Kathodenmaterials steht hierfür nicht das gesamte Li zur Verfügung, während auf Seiten der Graphitanode nahezu die gesamten Li-Ionen entfernt werden können, ohne die strukturelle Integrität des Graphits zu zerstören (siehe Korthauer, 2013, S. 21ff). In einer Batteriezelle befinden sich mehrere Schichten bestehend aus Kathode, Separator, Anode und den Ableitern. Zusätzlich zu den Aktivmaterialien, dem Elektrolyten und dem Separator, befinden sich Ableiter und Leitruße in der Batteriezelle. Letztere dienen der elektrischen Anbindung der Aktivmaterialien an Erstere. Dabei unterscheiden sich die Materialien der Ableiter an Kathode (Aluminium) und Anode (Kupfer). Im Entladevorgang wird der Batteriezelle Energie entzogen. Dementsprechend muss für die umgekehrte chemische Reaktion innerhalb der Batteriezelle Energie eingebracht werden.

Aktivmaterialien von Li-Ionen Batteriezellen

In Li-Ionen Zellen kommen verschiedene Aktivmaterialien zum Einsatz. Die Verwendung der verschiedenen Aktivmaterialien ergibt sich aus ihrem elektrischen Potential gegenüber Lithium (siehe Abbildung 2.2). Auf Seite der Anode wird neben Graphit Lithiumtitanat ($Li_4Ti_5O_{12}$, LTO) eingesetzt. Mit der Verwendung von LTO sinkt allerdings das Spannungsniveau der Zellen.

Tabelle 2.1: Aktivmaterialien von Li-Ionen Batterien

Kurzbezeichnung	Langbezeichnung	Chemische Bezeichnung
LCO	Lithium Kobalt-Oxid	$LiCoO_2$ - C_6
LNO	Lithium Nickel-Oxid	$LiNiO_2$ - C_6
LMO	Lithium Mangan-Oxid	$LiMnO_2$ - C_6
NMC	Lithium NickelManganKobalt-Oxid	$Li(Ni_xMn_yCo_z)O_2$ - C_6
NCA	Lithium NickelKobaltAluminium-Oxid	$Li(Ni_xCo_yAl_z)O_2$ - C_6
LFP	Lithium Eisenphosphat	$LiFePO_4$ - C_6

Auf Seiten der Kathodenmaterialien existieren deutlich mehr Alternativen (siehe Abbildung 2.2 und Tabelle 2.1). Die in Tabelle 2.1 aufgeführten Kurzbezeichnungen implizieren meist die Verwendung einer Graphitanode, solange nicht anders angegeben. Bei der Verwendung eines Kathodenmaterials stehen vor allem die Leistungsfähigkeit, die Sicherheit und die Kosten im Mittelpunkt der Auswahl (Sauer, 2017). Im Allgemeinen wird versucht den Kobaltanteil im Aktivmaterial zu senken, da Kobalt einen wesentlichen Einfluss auf die Zellkosten besitzt (Barnett et al., 2013, S. 7; Patry et al., 2015). Des Weiteren muss der eingesetzte Elektrolyt im verwendeten Spannungsfenster stabil bleiben, was die Verwendung von „5 V Technologien“ (Abbildung 2.2, oben links) erschwert.

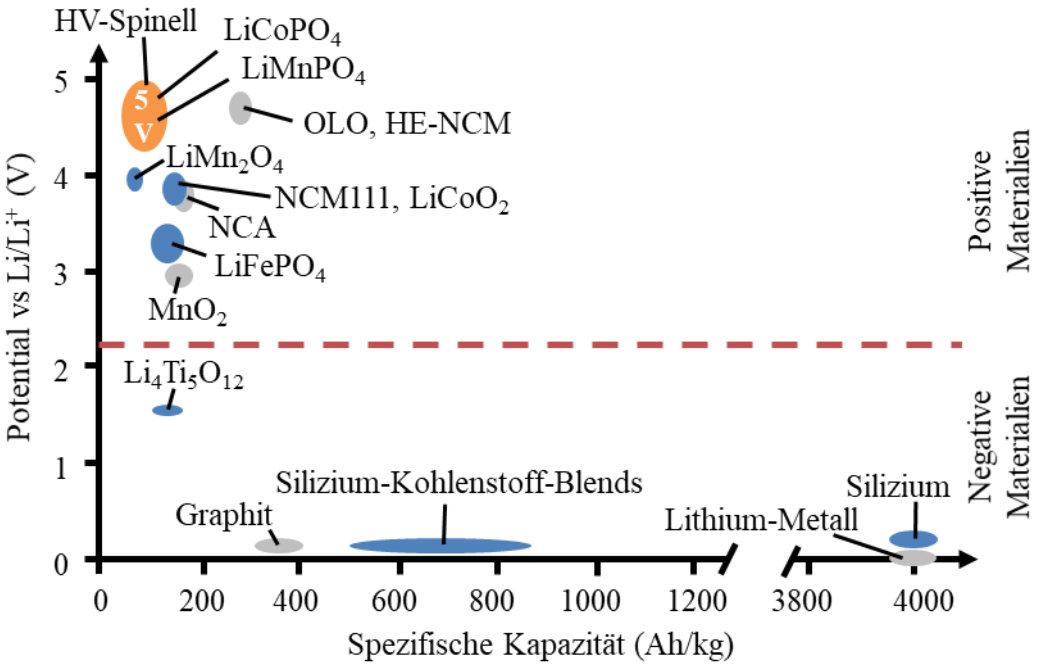


Abbildung 2.2: Spannungsreihe unterschiedlicher Kathoden- und Anodenmaterialien nach (Korthauer, 2013, S. 110).

Der nutzbare Zellspannungsbereich zwischen vollständiger Ladung und Entladung von Li-Ionen Batteriezellen liegt zwischen 2,5 und 4,2 V (Sauer, 2017; Korthauer, 2013). Unterhalb der Unterspannungsgrenze besteht die Gefahr des Lithium-Platings, bei welchem sich metallisches Lithium ablagert. Dieses Lithium kann nadelförmige Dendriten bilden, welche durch den Separator hindurchwachsen und zu einem Kurzschluss der Zellen führen können (vgl. Sauer, 2017; Korthauer, 2013). Die Überladung oberhalb von 4,2 V führt auf Dauer zur Zersetzung der Anode und des Elektrolyten unter Bildung von Gasen. Diese Reaktion verläuft unter Abgabe von Energie und einer damit verbundenen Erwärmung der Zelle. Überschreitet die Temperatur hierbei einen von Elektrolyt und Aktivmaterial bestimmten Grenzwert wird dieser Prozess unaufhaltsam beschleunigt, was zu einem thermischen Durchgehen („Thermal Runaway“) führt, bei dem die Zelle explosionsartig abbrennt. Ein thermisches Durchgehen kann auch durch Überhitzung oder einen Kurzschluss der Zelle ausgelöst werden. Mit Hilfe der Überwachungssoftware (BMS – Battery Management System) werden die aufgeführten Ursachen für das thermische Durchgehen verhindert. Hierfür werden alle Zellspannungen überwacht und über Temperatursensoren und das thermische System der Batterie eine Überhitzung verhindert. Das BMS regelt die Zelltemperaturen auf Werte zwischen ca. 10 – 50 °C (vgl. Rezvanizaniani et al., 2014, S. 113 und Ecker et al., 2012, S. 250),

optimal ist ein Betriebsbereich zwischen 18 und 25 °C (Karle, 2017, S. 80). In den Bereichen unter 10 °C ist die Nutzung der Zellen eingeschränkt. Zelltemperaturen unter 0 °C führen bei einer Ladung mit zu hohen Strömen zu Lithium-Plating. Daher müssen die Batteriezellen für die volle Einsatzbereitschaft gegebenenfalls erwärmt werden.

Im Betrieb wird nicht der gesamte Zellspannungsbereich genutzt. Zum einen wird ein Sicherheitsabstand eingehalten, welche der Abtastrate und Auflösung der Zellelektronik angepasst ist. Zum anderen wird der Betriebsbereich weiter verkleinert, um eine längere Lebensdauer zu ermöglichen. Wie weit der Betriebsbereich eingeschränkt wird hängt von der tatsächlichen Batterieauslegung ab. Die Einschränkung des Betriebsbereichs innerhalb der Sicherheitsabstände wird mit dem SoC-Swing beschrieben. Der SoC-Swing in Elektro- und Hybridfahrzeugen liegt in Größenordnungen zwischen 70 und 95 % (vgl. Perner und Vetter, 2015, S. 174; Pauly, 2016; Könekamp, 2015). In (Frank et al., 2017) wurde bereits deutlich gemacht, dass der SoC-Swing eine zentrale Größe bei der Auslegung von Batterien darstellt[6].

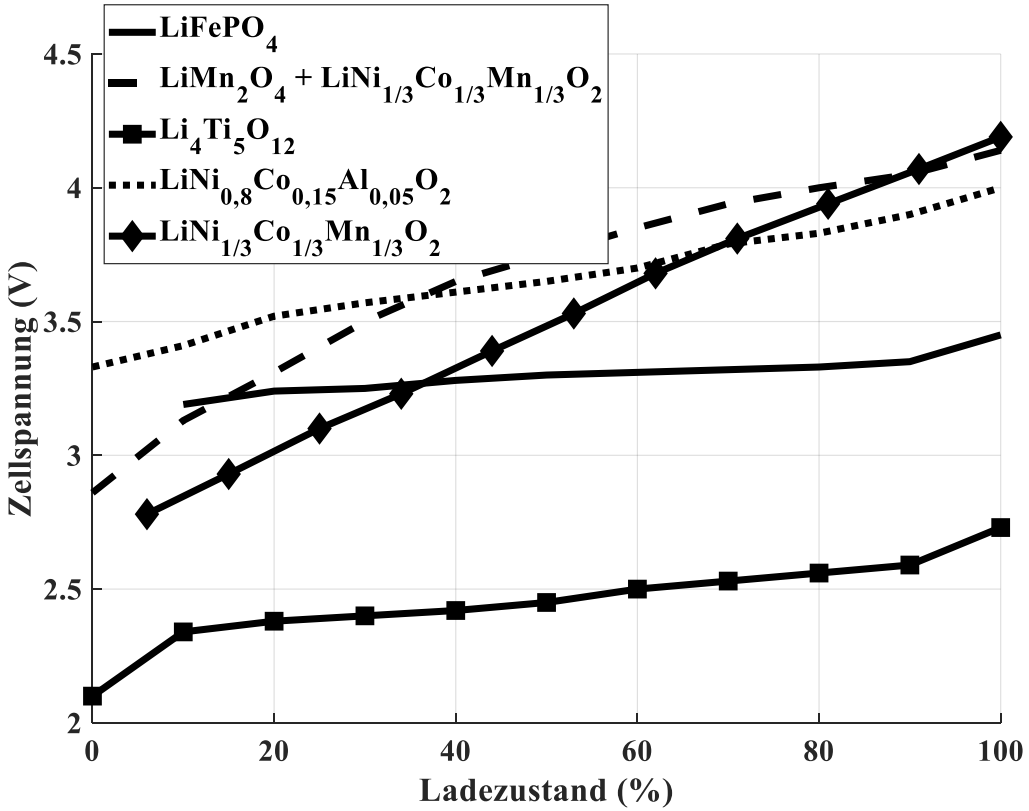


Abbildung 2.3: Ruhespannungskennlinien von Li-Ionen Zellen mit unterschiedlichen Aktivmaterialien nach (Birke und Schiemann, 2013, S. 210).

Elektrische Eigenschaften von Batteriezellen

Je nach eingesetztem Aktivmaterial unterscheidet sich das elektrische Verhalten der Zellen während des Lade- und Entladevorgangs. Die Basis hierfür ist die Betrachtung des unbelasteten Zustands in Abhängigkeit des Ladezustands (*SoC – State of Charge*), die sogenannte Leerlaufspannung (*OCV – Open Circuit Voltage*). In Abbildung 2.3 sind verschiedene OCVs

[6] Ausführlich wird diese Thematik in Abschnitt 4.4.1 behandelt.

aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass sich die Spannungsverläufe zwischen entladenem und voll geladenem Zustand deutlich, je nach verwendetem Aktivmaterial, unterscheiden. Diese unterschiedlichen Eigenschaften werden bei der Zustandserkennung in der Batteriesoftware genutzt. Wie viel elektrische Ladung im vollgeladenen Zustand in der Batteriezelle gespeichert werden kann wird mit der Kapazität beschrieben. Diese wird in Ah angegeben. Um die Kapazität einer Zelle zu ermitteln, wird der Strom bei einer vollständigen Entladung gemessen, bis die Zellspannung die untere Zellspannungsgrenze erreicht. Der Strom wird über die Entladedauer integriert und gibt somit die Zellkapazität wieder. Je nach angelegter Stromstärke unterscheidet sich die nutzbare Kapazität.

Derjenige Strom, den die Batteriezelle für eine Stunde zwischen Voll- und Entladung bereitstellen kann, wird als 1 C-Rate bezeichnet. Alle weiteren Ströme können so proportional zu dieser C-Rate angegeben werden. Eine 2 C-Rate entlädt die Batteriezelle entsprechend innerhalb einer halben Stunde. Die erlaubten C-Raten in Lade- und Entladerichtung werden vom Zellhersteller vorgegeben und sollen dadurch einen sicheren Gebrauch der Zellen gewährleisten.
Aus dem Zellspannungsverlauf bei einer 1 C Entladerate ergeben sich zusätzlich die Bemessungswerte für Kapazität und Spannung der Zelle (Als Mittelwert des Zellspannungsverlaufs). Diese werden auch als Nominalwerte bezeichnet. Die Nominalspannung bei Li-Ionen Zellen liegt üblicherweise im Bereich von 3,6 und 3,7 V. Mit Hilfe der nominellen Zellspannung und Kapazität wird der nominelle Energieinhalt als Produkt der beiden Größen angegeben:

$$E_{Nom} = U_{Nom} C_{Nom}. \qquad \textbf{2.1}$$

Die weiteren charakteristischen Größen wie P/E-Verhältnis und Energiedichten beziehen sich immer auf den nominellen Energieinhalt. Bei dem P/E-Verhältnis wird die maximale Entladeleistung einer Zelle durch E_{Nom} geteilt und damit ein Vergleichswert zur Klassifizierung von unterschiedlichen Zellen eingeführt[7]. Mit P/E-Verhältnissen über 10 werden Hochleistungszellen beschrieben, darunter handelt es sich um Hochenergiezellen (siehe Korthauer, 2013, S. 388). In (Schoewel und Hockgeiger, 2014) wird die folgende Klassifizierung von Zellen entsprechend dem Elektrifizierungsgrad der Fahrzeuge getroffen:

- P/E < 7: EV,
- 7 < P/E < 15: PHEV,
- 15 < P/E ≤ 50: HEV.

Bei den Energiedichten erreichen Li-Ionen Batteriezellen Werte zwischen 110 und 225 Wh/kg gravimetrisch beziehungsweise 180 – 600 Wh/l volumetrisch (Korthauer, 2013; Park, 2012; Birke und Schiemann, 2013; Rothgang et al., 2015; Liu, 2013; Fink und Fetzer, 2014; Horiba, 2014; Kampker, 2014).

Die elektrischen, aber auch thermischen, Eigenschaften der Batteriezellen werden im Wesentlichen durch die Auslegung und die Fertigung beeinflusst. Neben der Struktur und der Zusammensetzung aller beteiligten Materialien werden die physikalischen Eigenschaften durch die Schichtdicken des Aktivmaterials bestimmt. Um eine größere Energiemenge in einem gegebenen Volumen unterzubringen, werden die Schichtdicken erhöht. Wird eine

[7] Das P/E-Verhältnis beachtet zusätzlich den Innenwiederstand der Zelle bei dem angelegten Maximalstrom und wird bei 25 °C und 50 % SoC ermittelt.

größere Leistung und damit eine größere Stromabgabe aus der Zelle verlangt, werden die Schichten des Aktivmaterials dünner gestaltet. Dementsprechend sind Batteriezellen mit großem P/E-Verhältnis intern anders aufgebaut, als Zellen desselben Formats mit geringerem P/E-Verhältnis.

Bezüglich des Zellformats haben sich drei unterschiedliche Bauformen im Automobilbereich etabliert (siehe Abbildung 2.4). Von jedem der drei aufgeführten Zellformate existieren verschiedene Größen. In der Vornorm DIN SPEC 91252 sind einige Maße für die verschiedenen Zellformate festgelegt. Bei den zylindrischen Zellen werden vor allem das 18650 und das 21700 Format eingesetzt (Anderman, 2017; Wallentowitz und Freialdenhoven, 2011; Korthauer, 2013). Die prismatischen Zellen werden in HEV, PHEV1, PHEV2, BEV1 und BEV2 Zellen unterteilt. Dabei steigt das Volumen mit der angegebenen Reihenfolge. Bei den Pouch-Zellen haben sich keine bestimmten Bezeichnungen durchgesetzt. Alle beschriebenen Formate werden in bestehenden elektrifizierten Fahrzeugen eingesetzt (siehe Anderman, 2017, S. 14). Dementsprechend kann keine Aussage darüber getroffen werden, welches der Zellformate sich für die Verwendung in Fahrzeugbatterien am besten eignet, ohne weitere Randbedingungen der Produktion, des Fahrzeugs, etc. zu kennen (Korthauer, 2013, S. 231ff, ebd. S. 406f; Karle, 2017, S. 82; Pesaran et al., 2009; Saw et al., 2014). Neben der äußeren Erscheinungsform der Zellen, unterscheiden sich die Zelltypen zusätzlich durch die Einbringung der Aktivmaterialschichten. Bei zylindrischen und prismatischen Zellen werden die Aktivmaterialien zusammen mit dem Separator und den Ableitern in Endlosbahnen aufgewickelt und abgeschnitten. In Pouch-Zellen werden die Materialien üblicherweise gestapelt (Stacking). Eine gute Übersicht über die Fertigung von Batteriezellen und die verschiedenen Herstellungsprozesse bietet (Chair of Production Engineering of E-Mobility Components - RWTH Aachen und VDMA - Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau, 2015).

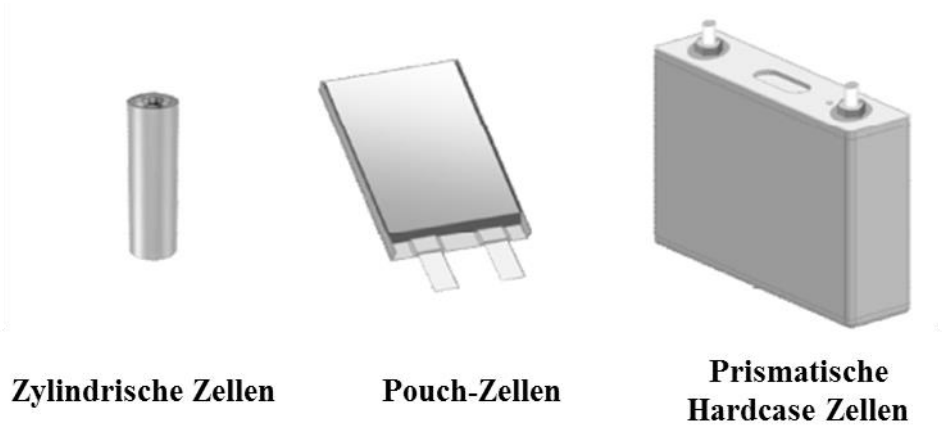
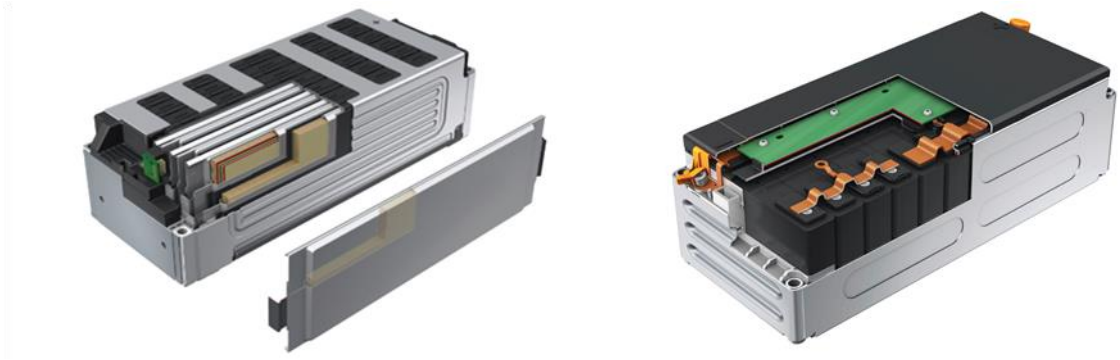


Abbildung 2.4: Gehäuseformen von Batteriezellen aus (Wipfler, 2015).

Die Auslegung einer Batteriezelle ist ein sehr aufwändiger Prozess und unterliegt grundsätzlich dem Zielkonflikt zwischen elektrischer Performance, Kosten, Lebensdauer, Qualität und Sicherheit. Arbeiten hierzu, inklusive Optimierungen von Schichtdicken oder Kosten finden sich in (Nelson et al., 2012; Xue, 2014; Petri, 2015; Nelson et al., 2015).

2.2.2 Grundlagen zur Batterieintegration

Die Kombination von einzelnen Batteriezellen zu einem Batteriepack und seine Unterbringung im Fahrzeug werden hier als Batterieintegration bezeichnet. Die Traktionsbatterie des Fahrzeugs besitzt vor allem die Aufgabe genügend Leistung für den Antrieb bereitzustellen, aber auch eine ausreichend große Energiemenge. Der nutzbare Energieinhalt beschreibt die zur Verfügung stehende Energiemenge und definiert zusammen mit dem elektrischen Verbrauch des Fahrzeugs (PHEV oder EV) die mögliche Reichweite. Während die Energiemenge des Batteriepacks über die Zellkapazität und die Menge aller enthaltenen Zellen definiert wird, kann die geforderte Antriebsleistung durch die Spannungslage (durch Reihenschaltung) und den verfügbaren Strom (erlaubte C-Rate und durch Parallelschaltung) eingestellt werden. Die Notation der sich ergebenden Batteriekonfiguration erfolgt über die Anzahl X serieller Zellen, gekennzeichnet mit dem Zusatz „s“ und die Anzahl von Y Parallelverschaltungen, gekennzeichnet mit dem Zusatz „p“ (XsYp). Grenzen werden vor allem durch den vorhandenen Bauraum, das maximale Gewicht, die Kosten und die elektrischen Begrenzungen der angrenzenden Komponenten, vor allem den Leistungsbauteilen im Inverter, gesetzt. Die Zellen werden in Gruppen (Modulen) in dem Batteriepack verbaut. Dabei können in einem Batteriepack unterschiedliche Modulgrößen zum Einsatz kommen. Bestandteile der Module sind neben den Zellen zusätzlich Temperatursensoren, Zellverbinder, Zellspannungsabgriffe und mechanische Versteifungskomponenten. Die Temperatur- und Zellspannungsabgriffe eines Moduls werden in einer Modulelektronik (CSC – Cell Supervision Circuit) aggregiert und von dort aus dem zentralen Batteriesteuergerät gesendet. Des Weiteren können sich Verschraubungspunkte und Entgasungskanäle an den Modulen befinden. Auf der Seite der Zellverbinder kommt zusätzlich ein Berührschutz in Form eines Deckels zum Einsatz. Beispiele für den Aufbau von Modulen mit Pouch- oder mit prismatischen Zellen befinden sich in Abbildung 2.5. Dort sind beispielhaft ein Modul, bestehend aus Pouchzellen (Abbildung 2.5 (a)) und ein Modul mit prismatischen Zellen (Abbildung 2.5 (b)) dargestellt.



(a) (b)

Abbildung 2.5: Verschiedene Batteriemodule bestehend aus Pouchzellen (a) und prismatischen Zellen (b) (Bilder von Audi (Audi MediaCenter, 2015)).

Die Batteriemodule werden im Folgeprozess in einen Batterierahmen integriert und mit Hilfe von Modulverbindern elektrisch verschaltet. Zusammen mit den Modulen befinden sich eine Baugruppe für die elektrische Anbindung, mit Sensoren und mit Sicherungen (BDU – Battery Disconnect Unit), ein Steuergerät (BCU – Battery Control Unit) und wahlweise ein thermisches System in der Traktionsbatterie. Auch ein DC/DC-Wandler oder ein Onboard-Charger kann in die Batterie integriert werden. Der Rahmen besitzt die Aufgabe, die Zellen vor äußeren Einflüssen zu schützen. Ebenfalls muss der Insassenschutz bei der Integration

in das Fahrzeug betrachtet werden. Neben der Integration der Module in einen einzelnen Batteriepack besteht die Möglichkeit, einen verteilten Batteriepack im Fahrzeug unterzubringen. Die elektrische Verbindung stellt in diesem Zusammenhang eine Herausforderung dar.
Ein beispielhafter Batterieaufbau ist in Abbildung 2.6 zu sehen. Es handelt sich hierbei um den Batteriepack des Porsche Cayenne S E-Hybrid (PHEV). Unten rechts befinden sich BCU und BDU, welche in diesem Fall außerhalb des Batterierahmens angebracht sind. Innerhalb des Rahmens sind einzelne prismatische Zellen zu erkennen, welche zusammen ein Modul ergeben. Im Vordergrund ist ein Kühlmittelverteiler (schwarz) zu erkennen, welcher das Kühlmittel in die Kühlplatten unter den Batteriemodulen leitet. Die Module sind in zwei Lagen übereinander untergebracht.

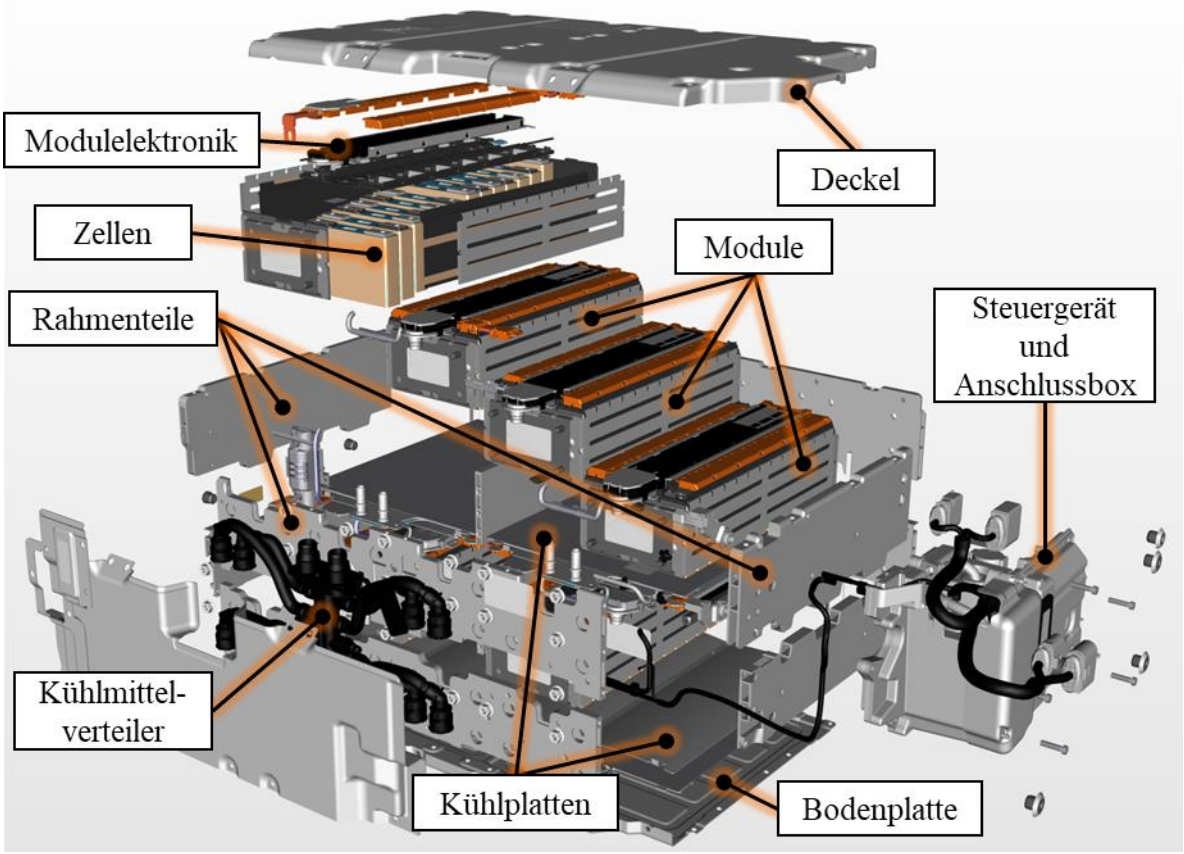


Abbildung 2.6: Aufbau der Batterie des Porsche Cayenne S E-Hybrid PHEV. (Darstellung der Robert Bosch Battery Systems GmbH)

Der zur Unterbringung einer Traktionsbatterie verfügbare Bauraum innerhalb des Fahrzeugs, ist maßgeblich von dem Fahrzeugkonzept abhängig (siehe Ried, 2014; Kuchenbuch, 2012; Fuchs et al., 2013). Hierbei spielt das Fahrzeuglayout mit Sitzposition der Insassen, Fahrzeugklasse und der Lage der Achsen eine wichtige Rolle. Zusätzlich bestimmt der Elektrifizierungsgrad des Fahrzeugs die verfügbaren Bauräume. Bei Hybridfahrzeugen bleibt der gesamte verbrennungsmotorische Antriebsstrang im Fahrzeug erhalten. Die Möglichkeiten eine Traktionsbatterie, aber auch Inverter und Elektromotor unterzubringen sind begrenzt. Die in Abbildung 2.6 dargestellte Batterie ist in der Ersatzradmulde des Fahrzeugs untergebracht. Weitere Möglichkeiten bestehen in einer Unterbringung unter der Fahrzeugrückbank oder im Kofferraum. In reinen Elektrofahrzeugen existiert grundsätzlich mehr Platz für die Unterbringung der Traktionsbatterie. Allerdings ist dort die Batterie der einzige Energiespeicher, weshalb für eine große Reichweite gleichzeitig ein umso größerer Bauraum benötigt

wird. Je nach Fahrzeugklasse und Fahrzeugtyp existieren unterschiedliche Einbauorte und –formen für die Hochvoltbatterie. Grundsätzlich kann die Batterie überall im Fahrzeug untergebracht werden. Die Anforderungen an die Batteriesicherheit schränken diesen Bereich jedoch ein oder stellen spezielle Anforderungen im Fall eines Unfalls. Derzeit gilt, dass die Batteriemodule in einem Unfall nicht vom Batterierahmen berührt werden dürfen (vgl. Marie, 2016). Fuchs et al. (Fuchs et al., 2013) nehmen die mögliche Bauraumunterteilung gemäß Abbildung 2.7 vor. Auch Kuchenbuch (Kuchenbuch et al., 2011; Kuchenbuch, 2012) und Ried (Ried, 2014) nehmen derartige Unterteilungen vor, welche sich insgesamt mit der Einteilung von Fuchs et al. decken.

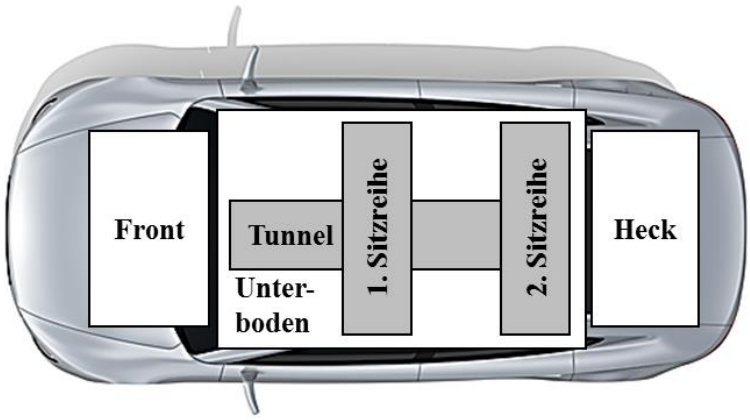


Abbildung 2.7: Bauräume für Batterien für die Elektrifizierung gemäß (Fuchs et al., 2013, S. 125).

In Purpose Design Elektrofahrzeugen[8] wird im Normalfall der Unterbodenbereich für die Integration der Batterie vorgesehen (siehe die Batterie des BMW i3 in Abbildung 4.47, Seite 127). Zusätzlicher Platz kann unter den Vorder- und Rücksitzen bereitgestellt werden, was aber die Batterieform segmentiert. Bei Fahrzeugen nach dem Conversion Design[9] kann der Platz für eine Batterie nur an Orten entstehen, an denen Verbrennerkomponenten wegfallen. Davon betroffen sind die Front, der Tunnelbereich und der Einbauort des Kraftstofftanks, welcher sich üblicherweise unter/hinter der Rücksitzbank befindet (siehe die Batterie des VW e-Golf in Abbildung 4.35, Seite 107). Der Frontbereich wird aufgrund der Unfallschutzanforderungen für die Hochvoltbatterie nicht bevorzugt. Weiterer Platz, welcher vor allem für die Integration einer PHEV-Batterie genutzt wird, besteht in der Ersatzradmulde im Kofferraum oder dem Kofferraum selbst. Bei PHEVs bleibt der verbrennungsmotorische Antriebsstrang im Fahrzeug enthalten, was das mögliche Gesamtvolumen der Batterie stark einschränkt.

Funktionen des Battery Management Systems (BMS)

Das BMS überwacht die Traktionsbatterie permanent und hat die Aufgabe einen sicheren Betrieb der Batterie zu gewährleisten. Detaillierte Informationen zum BMS, den notwendi-

[8] Fahrzeuge, welche als Elektrofahrzeug konzipiert wurden (siehe Wallentowitz und Freialdenhoven, 2011, S. 140-142).
[9] Fahrzeuge, welche als Verbrennerfahrzeug konzipiert, aber in ein Elektrofahrzeug oder ein Hybridfahrzeug umgewandelt werden (siehe Wallentowitz und Freialdenhoven, 2011, S. 140-142).

gen Komponenten und umfassende Funktionsübersichten befinden sich in (Cois, 2016; Andrea, 2010; Lelie et al., 2018). Die Hauptfunktionen des BMS lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Zustandsbestimmung (State Detection),
- Überwachung der Pack- und Zellströme, sowie –spannungen und – temperaturen[10],
- Leistungsprognose,
- Durchführung des Ein- und Abschaltprozesses.

Die Zustandsbestimmung dient der Ermittlung des aktuellen Lade- sowie Alterungszustands. Hierfür werden zum einen Messungen der Ruhespannung, als auch die Integration des fließenden Stroms zur Kapazitätsbestimmung vorgenommen. Mit Hilfe der gemessenen Kapazität können Rückschlüsse auf den Alterungszustand gezogen werden. Hierfür wird zusätzlich der Innenwiderstand der Zellen beobachtet. Mit fortschreitender Alterung nimmt der Innenwiderstand zu, während die Kapazität sinkt. Nach 20 – 30 % Verlust von Kapazität ist üblicherweise das Lebensende (End of Life – EoL) der Batterie im Automobilbereich erreicht (Karle, 2017, S. 80). Die Notwendigkeit für die Überwachung von Strömen, Spannungen und Temperaturen ergibt sich aus der oben aufgeführten Sicherheitsbetrachtung der Batteriezellen. Ferner kann nicht vermieden werden, dass es Unterschiede bei der tatsächlichen Kapazität unter den Zellen gibt. Das führt dazu, dass die Zellen unterschiedlich weit ge- und entladen werden. Die jeweils schlechteste Zelle bestimmt hier die gesamte Packperformance. Wird beispielsweise die Batterie entladen, kann dies nur solange geschehen, bis die erste Zelle an ihre Unterspannungsgrenze gelangt. Ein weiteres Entladen würde zu einer Tiefenentladung dieser Zelle führen, weshalb die Entladung insgesamt abgebrochen werden muss, auch wenn die anderen Zellen noch verbleibende Energie besitzen. Bei einem Ladevorgang gilt dasselbe Prinzip. Befindet sich also im Zellverbund eine Zelle mit deutlich geringerer Kapazität, als die anderen Zellen, ist diese Zelle schneller „voll“ beziehungsweise „leer“. Ebenso verhält es sich, wenn eine Zelle gleicher Kapazität einen höheren oder niedrigeren Ladezustand aufweist. Das BMS führt deshalb bei Bedarf einen Ladezustandsausgleich (Balancing) unter den Zellen durch. Hierfür wird entweder überschüssige Energie durch Hinzuschalten von Heizwiderständen in Wärme umgewandelt, oder die Ladung von einer Zelle mit höherem Ladezustand in die anderen Zellen verteilt. Letztere Methode erfordert eine aufwändige Verschaltung unter den Zellen.

Die ermittelten Zustände werden permanent dem Fahrzeug beziehungsweise dem Inverter mitgeteilt. Ebenso die aktuellen Grenzen für den Strom und eine Prognose für die verfügbare Leistung innerhalb eines definierten Zeitfensters. Dadurch, dass innerhalb der Batterie lediglich die Schütze (Trennschalter) betätigt werden können, um die Verbindung zum restlichen elektrischen Antriebsstrang zu beeinflussen, ist es Aufgabe des Inverters, den Strom aus oder in die Batterie zu regeln. Die Schütze werden nur in sicherheitskritischen Fällen selbsttätig durch das BMS betätigt oder während des Ein- und Abschaltprozesses. Beim Ein- oder Zuschalten der Traktionsbatterie im elektrischen Antriebsstrang, werden zu Beginn die Spannungslagen von Inverterelektronik und Batterie angeglichen, um schädigende Stromflüsse zu vermeiden. Hierfür existiert innerhalb der BDU ein Schaltkreis mit einem weiteren

[10] Teilweise auch die Regelung der Temperaturen, abhängig vom verbauten thermischen System.

Schütz und einem Widerstand, welcher die angelegte Spannung im sogenannten „Zwischenkreis[11]“ auf ein Niveau anhebt, ab welchem die Zuschaltung der vollständigen Hochspannung möglich ist. Dieser Vorgang wird als Vorladung bezeichnet, da hierbei der Zwischenkreiskondensator im Inverter vorgeladen wird. Der Zwischenkreiskondensator hat die Aufgabe, hochfrequente Spannungsschwankungen zu filtern, die durch die Schaltvorgänge der Leistungselektronik im Inverter verursacht werden. Die Elektronischen Komponenten des Inverters stellen unter anderem aus den oben aufgeführten Gründen elektrische Anforderungen an die Batterie.

2.3 Auslegung von Batterien für Elektro- und Hybridfahrzeuge

Mit der Auslegung der Traktionsbatterie wird der Vorgang bezeichnet, welcher auf Basis von Anforderungen und technischen Randbedingungen eine elektrische Batteriekonfiguration der Form XsYp, ein thermisches Systemkonzept und das mechanische Integrationskonzept zum Ergebnis hat. Um die elektrische Batteriekonfiguration vorzunehmen, muss eine Batteriezelle ausgewählt werden. Die Batteriezelle bietet dann die Basis für eine thermische und mechanische Auslegung. Neben den technischen Gesichtspunkten müssen ebenfalls Anforderungen an die Kosten für die Produktion der Traktionsbatterie berücksichtigt werden[12]. Die Abhängigkeit von der Kenntnis der genauen Anforderungen führt dazu, dass es sich bei allen Auslegungen von Traktionsbatterien für PHEV und EV um Spezialauslegungen für das betrachtete Fahrzeug handelt (vgl. Linse und Kuhn, 2015, S. 254). In der Literatur findet man aus diesem Grund vor allem Beschreibungen von Batterien für ein bestimmtes (Forschungs-) Projekt (Li und Mazzola, 2013; Vergossen, 2016; General Motors Co., 2016; Könekamp, 2015; Kulkarni et al., 2015) oder Betrachtungen auf abstrakterer Ebene (beispielsweise auf Basis von Energiedichten und verfügbaren Volumina (Ried, 2014)). Ferner existieren Arbeiten zu einzelnen Systemen oder Bereichen der Batterieauslegung. Dies können die Betrachtung des thermischen Systems der Batterie (Zhou, 2016) oder des Zelldesigns (Xue, 2014; Nelson et al., 2012) sein. Oft wird eine bestimmte elektrische Batteriekonfiguration vorausgesetzt (Fathabadi, 2014; Li und Mazzola, 2013; Ried, 2014; Fuchs et al., 2013). Es existieren aber auch Arbeiten mit allgemeinerem Fokus (Nelson et al., 2012; Becker, 2017a; Cordoba-Arenas et al., 2015; Ju et al., 2013; Rothgang et al., 2012). Zur tatsächlichen Auslegung von Hochvoltbatteriepacks existieren wenige wissenschaftliche Quellen (vgl. Linse und Kuhn, 2015, S. 264f). Eine allgemeine Beschreibung für die notwendigen Schritte bei der Auslegung einer Hochvoltbatterie geben Rothgang et al. (Rothgang et al., 2012). Dort wird angegeben, dass zu den ersten Schritten die Ermittlung der Batteriegröße, die Auswahl eines Zelltyps und deren Zellchemie gehören. Des Weiteren müssen Umgebungs- und Anwendungsbedingungen festgelegt sein. Bei der thermischen Auslegung ist das Ziel eine homogene Temperaturverteilung im Batteriepack. Ferner sind

[11] Als Zwischenkreis wird die elektrische Anbindung zwischen Batterieschützen und dem Zwischenkreiskondensator, welcher sich zwischen den Leistungsschaltern für die Transformation von Gleich- in mehrphasigen Wechselstrom im Inverter befindet, bezeichnet.

[12] Die detaillierte Zusammenstellung von elektrischen, thermischen und mechanischen Anforderungen und den hier betrachteten zusätzlichen Größen und Randbedingungen befindet sich in Kapitel 4.3.

passive Elemente wie die Battery Disconnect Unit, das Gehäuse und weitere Sicherheitseinrichtungen zu beachten. Die Batterieauslegung besteht grundsätzlich aus der mechanischen, elektrischen und thermischen Auslegung.
Die elektrische Auslegung wird von Leistungs- und Energieanforderungen unter Randbedingungen von Strom- und Spannungsgrenzen bestimmt. Die thermischen Eigenschaften der Batteriezellen, das Modul- und das mechanische Packdesign bestimmen die Auslegung des thermischen Systems. Die mechanische Auslegung hängt von der Anzahl und Form der Batteriezellen, sowie dem verfügbaren Bauraum und der Position der Batterie im Fahrzeug ab.
Alle Bereiche werden zusätzlich durch die Einsatz- und Umgebungsbedingungen rund um das Fahrzeug beziehungsweise das Fahrzeugkonzept beeinflusst (vgl. Linse und Kuhn, 2015, S. 258). Der Einsatz eines Fahrzeugs in heißen oder kalten Klimazonen bringt thermische Anforderungen an die Batterie mit sich. Ferner sind Sicherheits- und Qualitätsanforderungen bei der Batterieauslegung zu beachten (vgl. Eichner, 2014, S. 9). Die Kosten des Batteriesystems spielen zusätzlich bei der Auslegung der Batterie eine gewichtige Rolle. Aus diesem Grund existieren Arbeiten zu der Ermittlung von Produktionskosten oder Preisen von Batteriezellen (Nelson et al., 2012; Petri, 2015; Mock, 2010; Nelson et al., 2015), aber auch von Batteriesystemen (Propfe, 2015; Nelson et al., 2012; Becker, 2017a) unter Berücksichtigung der einzelnen Produktionsschritte bei der Herstellung von Fahrzeugbatterien.
In (Frank et al., 2017) wurde bereits dargelegt, welche Herausforderungen bei der konventionellen (iterativen) Auslegung von Hochvoltbatterien für Hybrid- und Elektrofahrzeuge bestehen. Des Weiteren wurde dort herausgestellt, warum ein modellbasierter Ansatz großes Potential für einen effektiven Auslegungsprozess besitzt.
Grundsätzlich wird im Entwurfsstadium verstärkt auf die Verwendung von computergestützten Modellen gesetzt (siehe Eigner et al., 2014, S. 5ff). Hier gehen Auslegung und Simulation einzelner Bestandteile von Batterien Hand in Hand. Im folgenden Abschnitt werden existierende Modelle der einzelnen technischen Domänen der Batterie aber auch Kostenmodelle vorgestellt.

2.4 Modelle von Batterien

Modelle von Batterien existieren für verschiedene Bereiche von Traktionsbatterien in unterschiedlichen Detaillierungsstufen. Während es sich bei einigen Modellen um Simulationsmodelle handelt, welche das zeitliche Verhalten des betrachteten Systems unter äußeren und inneren Einflüssen wiedergeben, stellen andere Modelle zeitlich unabhängige Zusammenhänge dar. Beispiele für letztere Modelle sind Kostenmodelle, welche der Berechnung von Kosten bei der Veränderung von Komponenten, Prozessen oder der Kostenstruktur eines Unternehmens dienen. Ebenso existieren mechanische Modelle, welche zeitlich unabhängige Zusammenhänge abbilden. Bei diesen Modellen wird die geometrische Zusammensetzung von Batterien oder deren Bestandteile betrachtet. Ein mechanisches Modell, welches die Verformung eines mechanischen Bauteils unter Einwirkung einer äußeren Kraft wiedergibt ist wiederum ein zeitbasiertes Simulationsmodell. Unabhängig von der Zeitabhängigkeit wird hier als Modell bezeichnet, was eine vereinfachte Abbildung von Einflüssen auf die Auslegung von Traktionsbatterien darstellt.

Ferner werden Modelle nach ihrem Detailgrad unterteilt. Hierbei wird eine Terminologie der Systemtheorie aus (Ljung, 2009) verwendet, welche Modelle in *Black Box*, *Grey Box* und *White Box* unterteilt. Hierbei steigen die abgebildeten Details von Black zu White Box Modellen. In Black Box Modellen werden phänomenologische Zusammenhänge mathematisch angenähert. Diese Art von Modellen bildet auf Basis von Ein- und Ausgangsdaten das Verhalten eines Systems mathematisch ab. In White Box Modellen werden die zugrundeliegenden physikalischen Zusammenhänge modelliert und von dort aus auf höherer Ebene auf das Systemverhalten geschlossen. Zwischen Black und White Box sind vielfältige Abstufungen möglich, welche die grundlegenden physikalischen Zusammenhänge vereinfachen, dabei aber nach Möglichkeit deduktionsfähig sind. Als deduktionsfähig werden Modelle bezeichnet, die Schlüsse aus, und Interpretationen von Ergebnissen ermöglichen (vgl. Kallrath, 2013, S. 8). Die Modellparameter behalten hier eine physikalische Bedeutung, beschleunigen die Simulation aber deutlich, verglichen mit White Box Simulationen. Die Auswahl von Modellen zu einem Simulationszweck besitzt daher den Zielkonflikt zwischen Genauigkeit und Rechengeschwindigkeit. Hinzu kommen die Fragestellungen, welche mit Hilfe der Modelle beantwortet werden sollen. Diese bedingen den notwendigen Detaillierungsgrad. Zusätzlich ist ausschlaggebend, welche Daten für die Parametrierung von Modellen zur Verfügung stehen. Die Parametrierung wird mit steigendem Detaillierungsgrad aufwändiger.

Wie bereits für das elektrische und das thermische Verhalten in (Frank et al., 2016a) dargelegt, werden in der vorliegenden Arbeit Grey Box Modelle verwendet, die einen geeigneten Kompromiss zwischen Rechengeschwindigkeit, Aussagekraft und Verfügbarkeit von Daten darstellen. Dies gilt ebenso für das verwendete mechanische und das Kostenmodell. Aus diesem Grund werden in den folgenden Unterabschnitten vor allem existierende Grey Box Modellierungen betrachtet.

2.4.1 Elektrische Modelle

Für die Betrachtung des elektrischen Verhaltens in Simulationen oder zu Diagnosezwecken kommen vor allem elektrische Ersatzschaltbilder zum Einsatz (ECM – Electrical Circuit Model) (Zhang et al., 2014; Schmidt, 2013). Hier werden elektrische Widerstände, Induktivitäten und Kondensatoren mit Spannungsquellen verschaltet, um das Spannungsverhalten von Batteriezellen/-packs nachzustellen. Eine oft eingesetzte Form stellen die ECM 1. oder 2. Grades dar. Dabei werden parallel geschaltete Paare von Widerstand und Kondensator (RC-Glieder) in Reihe mit einem einzelnen Widerstand verbunden. Jedes RC-Glied erhöht hierbei den Grad des ECM. Je mehr RC-Glieder hinzugefügt werden, umso größere Zeitkonstanten können mit dem Modell abgebildet werden. Allerdings steigt der Aufwand für die Parameteridentifikation der elektrischen Komponenten ebenfalls deutlich. Ersatzschaltbildmodelle zeichnen sich im Allgemeinen durch eine hohe Rechengeschwindigkeit bei hoher Modellgüte aus. Nähere Informationen hierzu wurden bereits in (Frank et al., 2016a) aufgeführt. Neben den ECM 1. oder 2. Grades kommen verschiedenste Abwandlungen dieser Form zum Einsatz. Es existieren ebenfalls empirische Modelle, welche Teile eines ECM verwenden und mit Hilfe von empirisch ermittelten Parametern die zeitliche Dynamik abbilden (vgl. Zhang et al., 2014). Eine andere Methode besteht darin die Elektroden getrennt voneinander zu betrachten. Sabatier et al. erzeugen hierfür ein fraktionales Modell (Sabatier et al., 2014; Sabatier et al., 2015). Umfassende Reviews zu elektrischen Batteriemodellen,

insbesondere ECM befinden sich in (Zhang et al., 2014; Mousavi G. und Nikdel, 2014; Schmidt, 2013).

2.4.2 Thermische Modelle

Bei der Betrachtung thermischer Batteriemodelle ist es sinnvoll, die thermische Modellierung der Batteriezellen von der Modellierung des thermischen Systems im Batteriepack zu trennen. Auch in diesem Bereich der Modellierung kommen Ersatzschaltbilder zum Einsatz. In diesem Fall werden spezifische Punkte eines zu modellierenden Objekts über Wärmewiderstände miteinander verbunden. Die Beschreibung des Wärmeaustauschs zwischen den Punkten und die Menge der vorhandenen Punkte machen hierbei einen großen Teil des Detaillierungsgrades aus. Die Wärmeentwicklung geht von den Batteriezellen im Rahmen der elektrischen Nutzung aus, weshalb thermische Zellmodelle eng mit elektrischen Modellen gekoppelt sind. Den wichtigsten Wärmebeitrag liefert die, aus dem Zellinnenwidertand resultierende, Joule‘sche Wärmeabgabe (vgl. Bandhauer et al., 2011, S. R7 und Severino et al., 2014, S. 290).

Im Rahmen von thermischen Betrachtungen auf Batteriepack- oder Modulebene kommen häufig CFD (Computational Fluid Dynamics) Simulationen zum Einsatz, welche eher den White Box Modellen zuzuordnen sind. In (Frank et al., 2016a) wurden bereits zahlreiche Beispiele für den Einsatz verschiedener thermischer Modellierungsarten aufgeführt. Ergänzend hierzu sei auf die Dissertation von Zhou (Zhou, 2016) verwiesen, welcher verschiedene Systeme für die Batteriekühlung und Heizung, sowie eine Betrachtung der Fahrzeugintegration des thermischen Systems durchführt. Im Allgemeinen ist das thermische Modell eng an die zu untersuchende Fragestellung gekoppelt. In diesem Rahmen finden sich beispielhaft neben Zhou ebenfalls Arbeiten, welche sich mit der Auslegung des thermischen Systems (Chen et al., 2016; Tong et al., 2015), spezieller Komponenten, vor allem Kühlplatten (Jarrett und Kim, 2014; Krüger et al., 2014; Smith et al., 2014) oder der Anordnung der Zellen oder Module im Batteriepack für eine optimale Kühlung (Fathabadi, 2014; Severino et al., 2014; Wang et al., 2014) auseinandersetzen.

2.4.3 Kostenmodelle

Kostenmodelle können grundsätzlich in Top-Down oder Bottom-Up Modelle untergliedert werden (vgl. Cluzel und Douglas, 2012, S. 42). Bei Bottom-Up Modellen werden die Kosten der einzelnen Bestandteile des betrachteten Systems ermittelt. Diese ergeben dann zusammen die Gesamtkosten. Im Gegensatz dazu werden bei Top-Down Modellen Gesamtkosten oder allgemeine Kostendaten (z. B.: in $/kWh) verwendet und die Kosten für die einzelnen Bestandteile über Faktoren heruntergebrochen. Im Sinne der Modellklassifizierung können reine Bottom-Up Modelle als White Box Modelle und reine Top-Down Modelle als Black Box Modelle bezeichnet werden. Beide Modellarten existieren im Bereich der Batteriemodelle. In (Ried, 2014) werden allgemeine Kostendaten verwendet, um Unterschiede zwischen verschiedenen Batteriekonfigurationen zu ermitteln. Hierbei bildet der Energieinhalt, ermittelt auf Basis des Batterievolumens, die Berechnungsgrundlage. Bottom-Up Batteriepackkostenmodelle werden in (Propfe, 2015; Becker, 2017a; Nelson et al., 2012; Nelson et al., 2015) verwendet. Das von Nelson et al. in (Nelson et al., 2012; Nelson et al., 2015)

vorgestellte und öffentlich verfügbare BatPaC stellt in vielen Fällen die Grundlage für Batteriekostenmodelle dar oder wird zum Vergleich mit anderen entwickelten Kostenmodellen herangezogen (Petri et al., 2015; Petri, 2015; Becker, 2017a; Propfe, 2015; Ried, 2014; Patry et al., 2015). Der Grund für die häufige Verwendung von BatPaC in der Literatur liegt vor allem an der Tatsache, dass Kostendaten der produzierenden Unternehmen nicht offengelegt werden. Zudem ist das Berechnungswerkzeug sehr gut dokumentiert, gepflegt (bis 2015) und außerordentlich detailreich. Ferner wurde es laut eigener Aussage Reviews mit Experten unterzogen und dementsprechend weiterentwickelt (Nelson et al., 2012, S. XX). In BatPaC wird ein Batteriepreis von der Zusammensetzung der Zellchemie, dem Zelldesign bis zur Produktion von Batteriepacks in einer virtuellen Fabrik auf Basis einer Produktion von > 20 000 Einheiten pro Jahr berechnet.
Mit Fokus auf die Zellfertigung wurden von Patry et al. in (Patry et al., 2015), Mock in (Mock, 2010) und Petri in (Petri, 2015) weitere Zellkostenmodelle auf Basis der verwendeten Rohstoffe in den Zellen entwickelt. Petri et al. weisen in diesem Zusammenhang darauf hin, dass BatPaC eine große Menge an Eingangsparametern benötigt, um eine dedizierte Kostenberechnung der Zellen durchzuführen (siehe Petri et al., 2015).

In (Propfe, 2015) wurde das in (Mock, 2010) entwickelte Kostenmodell für Batteriezellen von Propfe weiterentwickelt und um ein Produktionskostenmodell des Batteriepacks ergänzt. Ebenso wie in BatPaC ist ein sehr hoher Aufwand für die Ermittlung und die individuelle Anpassung der Modellparameter notwendig. Zusätzlich zu der Produktionskostenermittlung wurde in (Propfe, 2015) ein Lernkurvenansatz für den Einfluss verschiedener Stückzahlen eingeführt[13]. Becker (Becker, 2017a) verwendet BatPaC als Grundlage für die Ermittlung von Zellkosten und ergänzt sein Batteriepackkostenmodell um ein Umweltmodell, welches die Ökobilanz bei der Batterieproduktion berücksichtigt (Becker, 2017a, S. 70ff).

Da die Bottom-Up Kostenmodelle sehr viele Informationen über die Materialzusammensetzung und diverse Produktionsrandbedingungen (Anschaffungskosten, Abschreibungen, Lohnkosten, etc.) benötigen, erfordert die Verwendung der Modelle einen sehr hohen Parametrierungsaufwand. Andererseits geben Top-Down Modelle die Unterschiede bei der Batterieauslegung, welche sich aus verschiedenen Modulgrößen, Packvolumina, Einbauorten, Zelltypen, etc. ergeben nicht wieder. Daher wird in Abschnitt 4.1.2 ein hybrides Kostenmodell als Mischform zwischen Bottom-Up und Top-Down Modell, im Sinne eines Grey-Box Modells, vorgestellt.

2.4.4 Mechanische Modelle

Unter mechanischen Modellen wird hier die modellbasierte Integration oder Gestaltung der Batteriekomponenten verstanden. Gemäß der systemtheoretischen Modellklassifizierung können CAD (Computer Aided Design) Modelle, welche der detaillierten Konstruktion und späteren Ableitung von Fertigungszeichnungen dienen, als White-Box Modelle verstanden werden. Black-Box Modelle für Batterien sind in diesem Zusammenhang Modelle, die entweder auf Basis von energetischen Werten (kWh/l) ein Volumen der Batterie berechnen,

[13] Mit Hilfe von Lernraten werden Skalierungs- und Prozessverbesserungseffekte abgebildet, welche sich in einem günstigeren Preis der Modelldaten bei Erhöhung der Stückzahl niederschlagen. Mehr dazu in Kapitel 4.1.2.

oder die auf derselben Basis ein vorhandenes Volumen mit einer Batterie „füllen“. Ein Beispiel für ein solches mechanisches Batteriemodell findet sich in der Dissertation von Ried (Ried, 2014). Dort lag der Fokus auf der Gestalt des verfügbaren Bauraums in virtuellen Konzeptfahrzeugen, in den eine Batterie integriert werden sollte. Einen Schritt weiter in Richtung eines Grey-Box Modells geht Kuchenbuch (Kuchenbuch, 2012; Kuchenbuch et al., 2011), welcher auf Basis des verfügbaren Bauraums bei der Fahrzeugkonzeptionierung Einzelzellen und Leerraum platziert. Hierbei wird aus verfügbaren freien Einzelbauräumen ein zusammenhängender Batteriebauraum erstellt und mit den Batteriezellen bestückt (Kuchenbuch, 2012, S. 87). Ein ähnliches Konzept findet sich in (Fuchs et al., 2013). Modul-, Rahmenbetrachtungen oder die Verwendung eines thermischen Systems in der Batterie werden hier nicht durchgeführt. Es bleibt ausschließlich bei der Platzierung der Batteriezellen.
Die im Rahmen von thermischen Betrachtungen verwendeten CFD Batteriemodelle sind ebenfalls auf eine mechanische Anordnung der Batteriekomponenten für die Simulation angewiesen. Hierbei wird üblicherweise manuell ein bestimmter Batteriepack abgebildet. Teilfunktionen können automatisiert werden, um beispielsweise eine gleichmäßige Anordnung von vielen Batteriezellen zu ermöglichen (siehe Eckardt, 2015; Witzenhausen, 2015). Des Weiteren werden für thermische Analysen Parameter verändert, um Abstände zwischen Zellen oder Maße des Gehäuses zu beeinflussen (Sun et al., 2012; Saw et al., 2014). Dennoch handelt es sich bei diesen Modellen um Einzelfallbetrachtungen.
Die beschriebenen mechanischen Modelle für die Platzierung der Batterie in einem verfügbaren Bauraum beschreiben meist nicht alle Randbedingungen, welche für die Auslegung der Traktionsbatterie notwendig sind. Beispielsweise wird kein Modul- oder Rahmendesign vorgenommen. Das in Abschnitt 4.1.3 und 4.4.2 vorgestellte mechanische Grey-Box Modell nimmt eine Modulkonfiguration vor und integriert die Module in einen Batterierahmen.

2.5 Optimierung

Als Optimierung werden die Suche und das Auffinden eines optimalen Punktes, eines Zustandes, einer Problemlösung oder einer Entscheidung, innerhalb eines definierten Kontextes verstanden (vgl. Papageorgiou et al., 2012; Burkard und Zimmermann, 2012). Der Kontext ermöglicht die Auffindung, erlaubt aber zusätzlich die Interpretation und die Bewertung des Optimums. Weniger abstrakt gleicht die Optimierung einer Navigation. Ebenso wie die Navigation, ist die Optimierung erfolgreich, wenn ein zu Beginn definiertes Ziel erreicht wurde. Hierbei stellt das Ziel den optimalen Punkt dar, während die Umgebung, das Reisemittel, das Wetter und viele weitere Randbedingungen den Kontext darstellen. Wenn das Ziel nicht exakt erreicht werden kann, gilt es ihm möglichst nahe zu kommen, ohne dabei strikt einzuhaltende Nebenbedingungen zu verletzen.
Dittes fasst die Voraussetzungen und Randbedingungen für eine allgemeine Optimierung zusammen. Demnach steht vor einer wissenschaftlichen Optimierung die Definition eines Systems, dessen Randbedingungen und eine Festlegung des Optimierungsziels. Eine Optimierung ist dann möglich, wenn es verschiedene Möglichkeiten für eine Lösung gibt. Lösungen müssen daher einer Bewertung unterzogen werden. Auf dem Weg zu einer optimalen Lösung ist es notwendig Entscheidungen zu treffen. (siehe Dittes, 2015, S. 2)

Der Beschreibung des Kontextes kommt damit eine entscheidende Rolle zu (vgl. Kallrath, 2013, S. 2). Hierbei kommt es zu einer Modellierung der Problemstellung, was das Systemverständnis erhöht und dazu führt, dass ein Werkzeug zur Unterstützung von Entscheidungen verfügbar wird. Ferner ermöglicht ein vorhandenes Modell experimentelle Untersuchungen (siehe Kallrath, 2013, S. 36). Optimierungsalgorithmen ermöglichen damit komplexe Entscheidungsfindungen, welche die menschlichen Fähigkeiten der Entscheidungsfindung übertreffen. Sie können sogar Lösungen hervorbringen, welche außerhalb des Lösungsraums menschlicher Experten liegen (siehe Papageorgiou et al., 2012, S. 2).
Das Feld der Optimierung und der Optimierungsalgorithmen ist derart groß, dass hier nur die notwendigen Informationen für das Verständnis der modellbasierten Optimierung wiedergegeben werden. Im ingenieurwissenschaftlichen Umfeld werden Optimierungsalgorithmen bereits seit vielen Jahren eingesetzt. In vielen Fällen wird eine Optimierung genutzt, um Kosten, Gewicht, mechanische Spannungen oder Materialverbrauch zu minimieren. Beispiele finden sich in (Kallrath, 2013; Jungnickel, 2014, Dittes, 2015, 2015; Eghtessad, 2014; Papageorgiou et al., 2012; Schumacher, 2013; Kuchenbuch, 2012).
Im mathematischen Sinne handelt es sich bei einer Optimierung folgerichtig um ein Minimierungs- oder Maximierungsproblem[14]. Voraussetzung für die Optimierung ist daher eine Zielfunktion oder eine Zielgröße, welche minimiert werden soll. Gepaart mit einem Satz von Nebenbedingungen erhält man die Optimierungsvorschrift. Jungnickel gibt die allgemeine nichtlineare Optimierungsvorschrift wie folgt an[15] (siehe Jungnickel, 2014, S. 10f):

$$\begin{aligned} &\min f(x) \\ &\textit{unter den Nebenbedingungen}: \\ &\quad g_i(x) \leq 0 \quad \text{für } i = 1, \dots, p\ , \\ &\quad h_j(x) = 0 \quad \text{für } j = 1, \dots, m, \\ &x \in X\ \subseteq \mathbb{R}^n. \end{aligned} \tag{2.2}$$

Mit f wird die Zielfunktion beschrieben. Die Nebenbedingungen g_i und h_j sind die Ungleichungs-, respektive Gleichungsrandbedingungen. Die Menge X als Teil oder Gesamtheit des $\mathbb{R}^n$stellt den Definitionsbereich für x dar[16]. Der Zulässigkeitsbereich G für die Optimierung ergibt sich zu:

$$G := \left\{x \in X : g_i(x) \leq 0, h_j(x) = 0\right\}\ mit\ i = 1, \dots, p; j = 1, \dots, m. \tag{2.3}$$

Jedes $x \in G$ ist eine zulässige Lösung des Optimierungsproblems. Dasjenige x, welches zu einem minimalen Funktionswert von f führt, stellt das Optimum dar. Es können hierbei mehrere Lösungen für ein Minimum existieren. Zusätzlich besteht die Möglichkeit relativer und absoluter Minima. Im Rahmen einer Optimierung spricht man von einem lokalen oder globalen Optimum. In der oben aufgeführten Optimierungsvorschrift wird deutlich, dass es

[14] Wobei das eine Problem durch einen Vorzeichenwechsel in das andere Problem gewandelt werden kann, weshalb im Folgenden nur noch eine Minimierung betrachtet wird.
[15] Die nichtlineare Optimierungsvorschrift enthält hierbei die lineare Optimierung (siehe Jungnickel, 2014, S. 10).
[16] Da es sich bei den Lösungen x für die vorliegende Arbeit um Batterieentwürfe handelt, werden diese vor allem als Konfigurationen oder Designs bezeichnet.

sich nur um eine Zielfunktion handelt. Bei der Verfolgung mehrerer Ziele (Mehrzieloptimierung) existieren entsprechend mehrere Zielfunktionen, welche unter Umständen miteinander unvereinbar sein können. Dies führt zu Zielkonflikten. Die weitere Minimierung eines Zielfunktionswerts zieht eine Erhöhung eines anderen Zielfunktionswerts nach sich. Die sich dadurch ergebende mehrdimensionale Grenzfläche wird als Paretofront bezeichnet. Lösungen auf der Paretofront sind paretooptimal. Das bedeutet, dass sie einen Kompromiss zwischen der Minimierung aller Ziele darstellen. Paretooptimale Lösungen, welche einen Minimalwert für ein einzelnes Optimierungsziel besitzen werden hier als Extremdesigns bezeichnet. Diese sind nur an den Rändern der Paretofront zu finden. Eine qualitative Darstellung einer Paretofront mit zwei Zielfunktionen und beispielhaften Extremdesigns ist in Abbildung 2.8 zu finden.

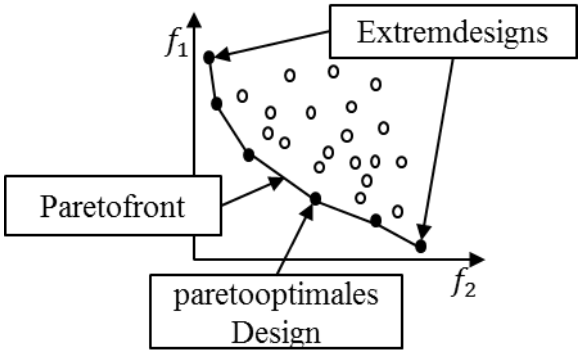


Abbildung 2.8: Zielkonflikt zweier Zielfunktionen f_1 und f_2.

Auch bei einem Zielkonflikt kann die Notwendigkeit bestehen, eine einzelne Lösung für die weitere Betrachtung auszuwählen. Die Kriterien für eine solche Auswahl sind im Einzelfall dem Kontext der Optimierung anzupassen. Eine so ausgewählte Lösung wird hier als Best Design bezeichnet. Diese Begrifflichkeit wird eingeführt, um eine Abgrenzung zu einem tatsächlichen Optimum hervorzuheben. Grundsätzlich kann die Optimierung den Entscheidungskriterien für die Auswahl eines Best Designs, insofern diese quantifizierbar sind, angepasst werden. Diese Anpassung würde zu einer zielgerichteten Optimierung führen und kann vorhandene Zielkonflikte auflösen. Allerdings ermöglicht die Existenz einer gut ausgestalteten Paretofront die Betrachtung gleichwertiger potentieller Lösungen. Vor allem im Konzept- oder Entwurfsstadium eines Produktes kann es zielführend sein, Zielkonflikte beizubehalten. Hierdurch werden indirekt modellierte Wirkzusammenhänge verdeutlicht und es besteht die Möglichkeit aus einer Menge von Lösungen auszuwählen, während eine zielgerichtete Optimierung keine Aussage zu weiteren Zusammenhängen treffen kann.

Die Methoden und Algorithmen, um von einer Optimierungsvorschrift der Form 2.2 zu einem Optimum zu gelangen sind vielfältig. Daher werden die Optimierungsmethoden nach unterschiedlichen Kriterien klassifiziert. Die Unterteilung erfolgt nach den Zahlenmengen (kontinuierlich, diskret, gemischt-ganzzahlig), der Art des gesuchten Minimums (lokal oder global), der Art der Lösungssuche (deterministisch oder stochastisch) und nach der Beschaffenheit der Ziel- und Nebenfunktionen (gradientenbasiert/-frei, linear, nichtlinear) (vgl. Kallrath, 2013; Mi et al., 2014; Amaran et al., 2014; Papageorgiou et al., 2012; Jungnickel, 2014). Je nach Klassifizierung des Optimierungsproblems in die oben genannten Bereiche, existieren Optimierungsalgorithmen, welche für die Optimierungsaufgabe besser oder schlechter geeignet sind. Die Auswahl eines geeigneten Optimierungsalgorithmus für die

Durchführung einer globalen, gemischt-ganzzahligen Optimierung für die vorliegende Forschungsarbeit wurde bereits in (Frank et al., 2016a) mit Bezug auf das thermische und elektrische Simulationsmodell vorgenommen. Dort wurde ein stochastischer evolutionärer Algorithmus (EA) als zielführend ermittelt. An dieser Auswahl ändert die Hinzunahme der zeitlich unabhängigen Modelle für die mechanische Integration und die Batteriekosten nichts. Im folgenden Abschnitt wird der verwendete Algorithmus innerhalb der kommerziell erhältlichen Software optiSLang beschrieben.

2.5.1 Der evolutionäre Algorithmus in optiSLang

Die Basis von evolutionären Algorithmen bildet das Vorbild der natürlichen Auslese in der Evolutionstheorie. Hierfür werden generationsweise Populationen, in Form von Konfigurationen (oder Designs), erzeugt. Bei der Ermittlung von optimalen Konfigurationen spielen die Bewertung von aktuellen Zuständen, sowie die Anpassung und die Mutation der Population eine zentrale Rolle. Durch Anwendung dieser drei Prinzipien werden in einem Kreislauf neue Generationen erzeugt, wobei die Designs, welche für die Erzeugung einer neuen Generation verwendet werden, per Selektion ausgewählt werden. Diese selektierte Elterngeneration wird angepasst und folgend wahrscheinlichkeitsbasiert mutiert.
Um aus einer Elterngeneration eine Folgegeneration zu erzeugen, kommt zuerst die Anpassung zum Einsatz. In dem evolutionären Algorithmus wird die Anpassung dadurch erreicht, dass aus den Merkmalen zweier Eltern, zwei Nachkommen erzeugt werden. Wie die Merkmale der Eltern an die Nachkommen weitervererbt werden, hängt von der ausgewählten Anpassungsmethode ab. In dieser Arbeit werden zwei Methoden (Multipoint und Simulated Binary) gleichzeitig verwendet, welche jeweils zwei Nachkommen der Eltern erzeugen. Jeweils ein Nachkomme jeder Methode wird zufallsbasiert für die neue Population ausgewählt. Die Multipoint Methode tauscht für die Nachkommen eine definierte Anzahl von Merkmalen untereinander aus. Bei der Simulated Binary Methode wird eine definierte Anzahl (hier Eins) von Merkmalen des Nachkommens verändert. Dabei wird jedoch nicht getauscht, sondern der Wert in der näheren Umgebung der Eltern verändert. Wie groß diese Umgebung ist, kann individuell festgelegt werden.
Im nachfolgenden Schritt können die Nachkommen zufallsbasiert mutiert werden. Dies bedeutet, dass mit einer Wahrscheinlichkeit von 17 % (Mutationsrate[17]) ein Merkmal eines Individuums der neuen Population verändert werden kann. Zusätzlich wird über eine Standardabweichung festgelegt, wie stark das Merkmal verändert werden kann. Die hier verwendete Mutationsmethode passt die Standardabweichung im Laufe des Optimierungsdurchlaufs linear über die maximale Anzahl von Generationen an und verkleinert die Standardabweichung von 0,1 auf 0,05. Dementsprechend fallen Mutationen in den ersten Generationen stärker aus, als gegen Ende des evolutionären Algorithmus.

Für die Selektion wird eine Rangliste aller Designs angelegt, deren beste Einträge ausgewählt werden. Die Rangliste wird auf Basis von Fitnesswerten der Population angelegt. Hier kommt die pareto-dominanzbasierte Fitnessbewertung zum Einsatz. Dieses Vorgehen und die Anpassungs- und Mutationsmethode wird im Detail in (Blum und Riedel, 2004) und weiterentwickelt in (Schneider et al., 2010) beschrieben. Die Fitness eines Designs hängt

[17] Für die Mutationsrate wird ein Wert von 1/n empfohlen. Wobei n die Anzahl von Eingangsparametern ist.

davon ab, ob und wie viele andere Designs existieren, welche in einem oder mehreren Optimierungszielen einen besseren Wert erzielt haben, als das betrachtete Design[18]. Ein nicht dominiertes Design hat in mindestens einem Optimierungsziel einen Bestwert erhalten. Die nicht dominierten Designs werden in einem Archiv abgelegt, welches in jedem Generationsdurchlauf aktualisiert wird. Am Ende des Optimierungsdurchlaufs befindet sich in diesem Archiv das Set paretooptimaler Designs.

Ein Erreichen des tatsächlichen Optimums kann ein evolutionärer Algorithmus nicht garantieren. Grundsätzlich ist die Wahrscheinlichkeit die tatsächliche Paretofront zu finden höher, je mehr Iterationen und Designs von dem Optimierer berechnet wurden (siehe Blum und Riedel, 2004). Es muss daher ein Kompromiss zwischen Rechendauer und Ergebnisqualität gefunden werden. Dies geschieht in Abschnitt 4.5.1 durch den Vergleich zweier Optimierungen mit denselben Zielen aber unterschiedlicher Menge an Solver-Aufrufen des Optimierungsalgorithmus.

2.5.2 Geometrische Optimierung

Unter der geometrischen Optimierung wird die automatisierte, effiziente, räumliche Anordnung von Objekten verstanden. Hierbei unterscheidet sich diese Art der mechanischen Optimierung von der Gestaltoptimierung (siehe Schumacher, 2013), welche die Bauform eines Objekts unter äußeren Einflüssen optimiert. Im Allgemeinen können geometrische Optimierungen mit den oben beschriebenen Optimierungsmethoden durchgeführt werden (Metaheuristiken). Voraussetzung ist, dass die geometrischen Platzierungsbedingungen geeignet beschrieben werden. Aufgrund der unstetigen Zusammenhänge bieten sich hier stochastische Algorithmen für ganzzahlige Zahlenmengen an. Die Nebenbedingungen können verwendet werden, um Kollisionen unter den beteiligten Objekten auszuschließen. Die mögliche Vielzahl von Nebenbedingungen erhöht die Problemkomplexität der geometrischen Optimierung deutlich. Ein Beispiel hierfür sind Randbedingungen, welche Rückwirkungen auf die nachfolgend zu platzierenden Objekte beschreiben[19]. Bortfeldt und Wäscher weisen darauf hin, dass es sich bei den mehrdimensionalen Packproblemen um „NP-schwere[20] […] kombinatorische Optimierungsprobleme“ (Bortfeldt und Wäscher, 2013, S. 11, übersetzt aus dem Englischen) handelt. Aus diesem Grund haben sich eigens für die Objektplatzierung entwickelte Algorithmen etabliert, welche den Eigenheiten der Problemstellung Rechnung tragen. Diese Optimierungsprobleme werden als Zuschnitt- oder Packprobleme (Cutting and Packing Problems) (siehe Wäscher et al., 2007) bezeichnet. Ein zu diesen Problemstellungen gehöriger Algorithmus wird daher Packalgorithmus genannt. Ähnlich der Klassifizierung der Optimierungsprobleme nach Zahlenmengen etc. können Packprobleme klassifiziert werden. Maßgeblich sind hier die Einteilungen nach Wäscher, Haußner und Schumann (Wäscher et al., 2007). Alle Zuschnitt- und Packprobleme weisen demnach eine gemeinsame Struktur auf. Große und kleine Objekte sind vorhanden und die kleinen Objekte müssen in den großen Objekten platziert werden. Aus diesem Grund werden die großen Objekte als

[18] Existieren nur ungültige Designs, wird ebenso verfahren. Sobald gültige Designs vorhanden sind, sind diese gegenüber ungültigen Designs dominant.
[19] Auf Objekt A darf nur ein Objekt B platziert werden, wenn es Bedingung C genügt.
[20] NP-schwere Probleme können (bisher) mit keinem deterministischen Algorithmus in polynomialer Laufzeit gelöst werden (vgl. Kallrath, 2013, S. 304). Der Begriff stammt aus der Komplexitätstheorie.

Input und die kleinen Objekte als Output bezeichnet. Weder die kleinen Objekte untereinander, noch die Grenzen der großen und kleinen Objekte dürfen sich überschneiden. Es müssen entweder alle Objekte verwendet werden, oder nicht. Des Weiteren wird eine objektive Gütefunktion optimiert, um den Erfolg der Anordnung zu bewerten. Während der Lösung eines Packproblems müssen zudem gleichzeitig fünf weitere Unterprobleme gelöst werden, welche Wäscher, Haußner und Schumann als (Zitat sinngemäß aus dem Englischen):

- „*Auswahlproblem bezogen auf die großen Objekte,*
- *Auswahlproblem bezogen auf die kleinen Objekte,*
- *Gruppierungsproblem bezogen auf die ausgewählten kleinen Objekte,*
- *Aufteilungsproblem der gruppierten kleinen Objekte auf die großen Objekte,*
- *Anordnungsproblem bezüglich der kleinen Objekte in den großen Objekten unter Berücksichtigung der geometrischen Randbedingungen*" (Wäscher et al., 2007, S. 1110f)

bezeichnen. Ein Schnitt- oder Packproblem muss hierbei nicht alle der erwähnten Probleme enthalten.
Um ein vorhandenes Packproblem einzuordnen, wird zu Beginn die Dimension festgestellt (1-3 Dimensionen). Dem folgt die Unterscheidung zwischen *Output Maximierung* und *Input Minimierung*. Bei einer Output Maximierung werden in einem Satz von großen Objekten kleine Objekte angeordnet, wobei alle großen Objekte verwendet werden müssen und es tendenziell zu viele kleine Objekte gibt. Jedem der großen Objekte wird eine bestmögliche Kombination von kleinen Objekten zugeordnet, um die Anzahl verpackter kleiner Objekte (oder deren Wert) zu maximieren. Es besteht daher ein Auswahlproblem bezüglich der kleinen Objekte (s.o.). Im Gegensatz zur Output Maximierung, gibt es bei der Input Minimierung genug große Objekte. Das Ziel ist, möglichst wenige der großen Objekte zu verwenden. In Bezug auf die vorliegenden kleinen Objekte wird unterschieden, ob die Objekte identische Form und Maße haben (homogene Objekte), sich die Objekte relativ zu ihrer Anzahl in wenige Untergruppen einteilen lassen (schwach heterogene Objekte), oder ob es viele verschiedene Formen und Maße der kleinen Objekte gibt (stark heterogene Objekte). Bei der Betrachtung der großen Objekte wird unterschieden, ob ein einzelnes oder mehrere große Objekte existieren. Gibt es nur ein großes Objekt, wird zusätzlich nach der Anzahl variabler Seitenlängen unterschieden. Existieren mehrere große Objekte, wird dieselbe Unterscheidung wie für die Auswahl kleiner Objekte getroffen. Zuletzt wird nach der geometrischen Form der kleinen Objekte unterteilt. Hierbei wird nach regulären Formen (Rechteck, Dreieck, Kreisform, Quader, Zylinder, Kugel, etc.) und irregulären Formen unterschieden.

Characteristics of the large objects / Assortment of the small items		Identical	Weakly heterogeneous	Strongly heterogeneous
All dimensions fixed	One large object	Identical Item Packing Problem **IIPP**	Single Large Object Placement Problem **SLOPP**	Single Knapsack Problem **SKP**
	Identical		Multiple Identical Large Object Placement Problem **MILOPP**	Multiple Identical Knapsack Problem **MIKP**
	Heterogeneous		Multiple Heterogeneous Large Object Placement Problem **MHLOPP**	Multiple Heterogeneous Knapsack Problem **MHKP**

Abbildung 2.9: Output Maximierungsproblemtypen klassifiziert nach Wäscher, Haußner und Schumann, entnommen aus (Wäscher et al., 2007, S. 1119).

Bei der Platzierung von Batteriekomponenten in einen vorhandenen Bauraum handelt es sich um ein Output Maximierungsproblem. Die dazugehörige Typisierung findet sich in Abbildung 2.9 wieder. Die Klassifizierung des Batterieintegrationsproblems lautet demnach: 3D-rectangular SLOPP (Single Large Object Placement Problem) oder SKP (Single Knapsack Problem), je nach Modulbauweise. Bortfeldt und Wäscher weisen darauf hin, dass sich für dreidimensionale Packprobleme[21] vor allem Heuristiken und Metaheuristiken bei der Lösung von Packproblemen eignen (Bortfeldt und Wäscher, 2013, S. 11).

Nachdem eine Problemklassifizierung durchgeführt werden konnte, werden im nächsten Schritt bestehende Lösungsansätze für SLOPP vorgestellt. Dabei liegt der Fokus auf Lösungen für dreidimensionale Problemstellungen, welche im Allgemeinen tatsächlich die Container Beladung behandeln.
Die Lösungsmethoden werden nach exakten und nicht exakten Methoden unterschieden. Bei Ersteren wird jedes kleine Objekt für sich platziert, während Letztere Blocks von vorkonfigurierten Objekten (oder Boxen) platzieren (vgl. Bortfeldt und Wäscher, 2013) (*Block Building*). Zuletzt können Metaheuristiken, also allgemeine Optimierungsverfahren, eingesetzt werden, um die SLOPP zu lösen.
Aufgrund der Problemkomplexität und der hohen Laufzeit existieren wenige exakte Verfahren (vgl. Bortfeldt und Wäscher, 2013; Zhao et al., 2016). Ein Beispiel eines exakten Verfahrens für eine Fahrzeugbatterie findet sich in (Albers et al., 2015). Hier wird jedes zu platzierende Objekt, beginnend von der linken unteren Ecke des Bauraums, in alle drei Raum-

[21] In der Literatur hat sich für dreidimensionale Packprobleme, bei welchen ein großes Objekt mit kleineren Objekten befüllt wird die Bezeichnung *Container Loading Problem* (CLP) etabliert, da die meisten der Packalgorithmen aus diesem Themengebiet stammen.

richtungen verschoben und jede gültige Position gespeichert. Im Anschluss werden sämtliche Kombinationen von gültigen Positionen aller Objekte zusammen ausgewertet und jede kollisionsfreie Variante abgespeichert. Es folgt eine Bewertung dieser gültigen Batteriekonfiguration und somit die beste Konfiguration ermittelt. Ein Durchlauf der Optimierung ist entsprechend rechenzeitaufwändig (Albers et al., 2015, S. 7). Bei den nicht exakten Methoden werden Platzierungsheuristiken eingesetzt, um das Block Building zu ermöglichen. Die Art und Weise, einen vordefinierten Block zu erstellen, unterscheidet sich unter den Lösungsmethoden stark und hängt von den betrachteten Randbedingungen oder Platzierungslimitierungen ab. Beispielsweise kann ein Stabilitätskriterium für die Platzierung einer Box auf einer anderen eingeführt werden, welches verhindert, dass größere Objekte auf Kleineren platziert werden (siehe Zhao et al., 2016, S. 294). Umfassende Reviews zu den verschiedenen Heuristiken, den speziellen Charakteristika und den betrachteten Randbedingungen finden sich in (Bortfeldt und Wäscher, 2013 und Zhao et al., 2016).

Eine erfolgreiche Methode, welche einen großen Spielraum bei der Gestaltung der Randbedingungen lässt und gleichzeitig reproduzierbare Ergebnisse erzeugt, ist die Baumsuche (vgl. Fanslau und Bortfeldt, 2010, S. 4). Im Bereich der SLOPP kommen Baumsuchalgorithmen häufig zum Einsatz (siehe Zhao et al., 2016, S. 304). Bei einer Baumsuche wird der Bauraum schrittweise mit Schichten von Objekten gefüllt. Dadurch, dass die Schichten sehr unterschiedlich zusammengesetzt werden können und möglichst viele dieser Möglichkeiten (Äste) ausprobiert werden sollen, wächst der Baum mit jeder Platzierung einer Schicht in die Breite. Bei einer vollständigen Baumsuche werden tatsächlich alle möglichen Kombinationen von Schichten berechnet und bewertet. Dies entspricht einem exakten Verfahren. Die Heuristiken für die Erstellung der Objektschichten bringen aber üblicherweise bereits Randbedingungen mit sich, welche bestimmte Kombinationen von Objekten miteinander unterbinden. Dadurch wird die Baumsuche zielgerichteter. Pisinger (Pisinger, 2002) teilt die verschiedenen Ansätze der Schichtung in vier Kategorien ein:

1. Wall Building
   Der Bauraum wird durch quaderförmige Wände aus kleinen Objekten entlang einer Seite des Bauraums aufgefüllt.
2. Stack Building
   Anstatt Wände aus kleinen Objekten, werden nun Säulen von Objekten platziert, welche möglichst platzsparend auf der Bodenfläche angeordnet werden.
3. Guillotine Cutting
   Der Bauraum wird durch Guillotineschnitte[22] fortlaufend zerlegt. Die Schnittgröße entspricht einer Abmessung eines kleinen Objekts. Jeder Ast entsteht somit für ein noch vorhandenes, zu platzierendes Objekt.
4. Cuboid Arrangement
   Es werden Blocks aus überwiegend identischen kleinen Objekten erzeugt, welche regelmäßig angeordnet sind. Hierbei wird versucht den aktuell zu füllenden Teilraum möglichst effizient zu füllen.

[22] Bei einem Guillotineschnitt wird der Bauraum durch einen geraden Schnitt geteilt. Der Schnitt kann längs oder quer verlaufen. Im nächsten Schritt wird erneut ein solcher Schnitt vorgenommen usw. Umgekehrt heißt eine Anordnung, welche durch Guillotineschnitte aufgelöst werden kann, ohne dass ein Schnitt ein Objekt zerteilt „guillotinierbar".

In der Zusammenstellung der Schichten, der Bewertung und der Auswahl der nächsten passenden Schicht besteht die Möglichkeit eigene Kriterien für die Objektplatzierung anzubringen. Die Heuristiken für die Schichtung und die bekannte Auswahlfunktion für eine geeignete Platzierung führen zu reproduzierbaren Ergebnissen. Unter gleichen Startbedingungen kommt eine Baumsuche damit immer zum selben Ergebnis. Für die Batterieauslegung kann eine geeignete Schichtung für die Module vorgenommen werden. In Abschnitt 4.4.2 wird ein Baumsuchalgorithmus für den Batterieentwurf vorgestellt, welcher in der späteren Optimierung zum Einsatz kommt.

3 Methodik und Konzept für die modellbasierte Batterieauslegung

Das vorliegende Kapitel dient der Entwicklung einer geeigneten Methodik, um eine modellbasierte Auslegung von Hochvoltbatterien für Fahrzeuge vorzunehmen. Ziel ist es, auf Basis dieser Methodik ein Softwarewerkzeug zu entwickeln, welches in der Lage ist, automatisiert einen Batterieentwurf vorzunehmen, welcher einen Satz von gegebenen Anforderungen und Randbedingungen erfüllt. Zusätzlich sollen dabei alle ausschlaggebenden Einflussgrößen berücksichtigt werden. Die Grundlage für die Methodik bilden hierbei bewährte Vorgehensweisen und Techniken aus dem Produktentwurf und der Konzeptentwicklung. Dadurch wird gewährleistet, dass die Struktur der Methodik dem Stand der Technik entspricht und so eine solide Entwicklungsgrundlage für eine modellbasierte Batterieauslegung entsteht.

Zu Beginn werden etablierte Herangehensweisen vorgestellt, welche neben der Problemlösung ebenfalls der Konzeptionierung und der Produktentwicklung dienen (Abschnitt 3.1.1 bis 3.1.3). Dem folgen die Darstellungen zweier weiterer Methoden zur Produktplanung und zur Entwurfsmethodik, welche bereits auf umfangreichen Analysen zur Konzeptentwicklung basieren (Abschnitt 3.1.4 und 3.1.5). Auf dieser Grundlage wird eine angepasste Methodik vorgestellt (Abschnitt 3.1.6). Diese ist in die Bereiche „Konzeptionierung“ und „Modellierung“ unterteilt. Der Teil der Konzeptionierung befindet sich in diesem Kapitel (Abschnitt 3.2), während die Modellierung im folgenden Hauptteil der Arbeit (Kapitel 4) beschrieben wird.

Im Bereich der Konzeptionierung werden zunächst die wichtigsten Einflussfaktoren analysiert und damit eine allgemeine Funktionsstruktur für die Auslegung einer Hochvoltbatterie aufgestellt (Abschnitt 3.2.1). Dem folgt die Erstellung einer ersten Programmstruktur, ein Vergleich mit bestehenden Lösungen und die Festlegung der Grenzen des betrachteten Systems (Abschnitt 3.2.2).

3.1 Methodik für die Entwicklung einer modellbasierten Batterieauslegung

In der Konzeptentwicklung für ein Produkt oder für eine Problemlösung, stehen im Allgemeinen verschiedene Methoden zur Verfügung. Diese können von einer selbsterdachten Methode über Produktentwurfsmethoden bis hin zu internationalen Richtlinien und Normen reichen. Der Vorgehenszyklus aus Ehrlenspiel, Kiewert et al. (Ehrlenspiel et al., 2014) und Ehrlenspiel und Meerkamm (Ehrlenspiel und Meerkamm, 2013) bildet die Grundlage für die hier zu entwickelnde Methodik und wird daher zu Beginn vorgestellt.

3.1.1 Der Vorgehenszyklus nach Ehrlenspiel, Kiewert et al. und Ehrlenspiel und Meerkamm

Der Vorgehenszyklus gliedert sich in drei Bereiche: Aufgabenklärung, Lösungssuche und Lösungsauswahl (Ehrlenspiel et al., 2014; Ehrlenspiel und Meerkamm, 2013), welche im Folgenden beschrieben werden. Die Anwendung des Vorgehenszyklus liegt in der Lösung eines allgemeinen Problems. Grundsätzlich können die in diesem Zyklus beschriebenen Bereiche zwar sequentiell abgearbeitet werden, es kann jedoch sinnvoll sein, bei neuen Erkenntnissen einen vorherigen Schritt anzupassen.

Aufgabenklärung

Die Aufgabenklärung untergliedert sich in drei Bereiche und stellt die Basis für das weitere Vorgehen dar:

- Analysieren der Aufgabe
    - Ziele des Auftraggebers,
    - Randbedingungen,
    - Vor-/Nachteile bestehender Lösungen,
    - Definition von Zielen,
    - Anforderungen an die Lösung.
- Strukturieren der Aufgabe
    - Einteilen in Teilprobleme (abgegrenzt und überschaubar)
- Formulieren der Aufgabe
    - Ergebnis der Aufgabenklärung,
    - Anforderungsliste,
    - Planung des Vorgehens.

Lösungssuche

Die Lösungssuche dient der Schaffung eines Lösungsraums.

- Lösungssuche
    - Intuitive Suche,
    - Kreativitätstechnik,
    - Systematische Methoden,
    - Suche vorhandener Lösungen.
- Systematisieren der Lösungen

Lösungsauswahl

Die Lösungsauswahl erfolgt durch die folgende Vorgehensweise:

- Lösungen analysieren (Eigenschaften der Teil- und der Gesamtlösung),
- Bewerten der Lösungen,
- Festlegen der endgültigen Lösung.

Im Schritt der Lösungsauswahl wird die Lösungsvielfalt eingeschränkt, während in den beiden vorherigen Schritten die Vielfalt an Lösungen vergrößert wird (siehe Ehrlenspiel und Meerkamm, 2013, S. 92).
In (Ehrlenspiel und Meerkamm, 2013) befindet sich eine Gegenüberstellung von unterschiedlichen Problemlösungsmethoden. Das Ergebnis dieser Gegenüberstellung ist, dass sich die Problemlösungsmethoden in den meisten Bereichen ähneln. Unterschiede treten nur

in der Beschreibung und der Gewichtung der Unterpunkte auf (vgl. Ehrlenspiel und Meerkamm, 2013, S. 101–102). Um eine Vorgehensweise für die vorliegende Dissertation zu entwickeln, werden die oben aufgeführten Grundlagen durch die Beschreibung von bekannten Prozessen (VDI 2206 (V-Modell) und der Automobilstandard ASPICE) und Weiterentwicklungen durch Kuchenbuch (Kuchenbuch, 2012) und Seidel (Seidel, 2005) ergänzt.

3.1.2 Entwicklungsmethodik nach VDI 2206

Die Richtlinie VDI 2206 beschreibt die systematische Entwicklung mechatronischer Produkte mit Hilfe drei verschiedener Methoden. Dem Mikro-, dem Makrozyklus und dem modellbasierten Systementwurf. Die drei Methoden werden im Folgenden kurz beschrieben.

Mikrozyklus

Der Mikrozyklus dient der Problemlösung im Detail und besteht aus den Schritten:

1. Situationsanalyse
    - Zielformulierung (mit Bewertungskriterien).
2. Synthese und Analyse
    - Alternative Lösungsvarianten.
3. Evaluation
    - Varianten auf Anforderungen testen (Berechnung/Simulation/Versuch…),
    - Ergebnis: Vorschläge und Empfehlungen.
4. Entscheidung
5. Planung des weiteren Vorgehens

Dem folgt der erneute Start des Mikrozyklus. Vorher wird die vergangene Vorgehensweise analysiert und möglicherweise auf Verbesserungen überprüft.

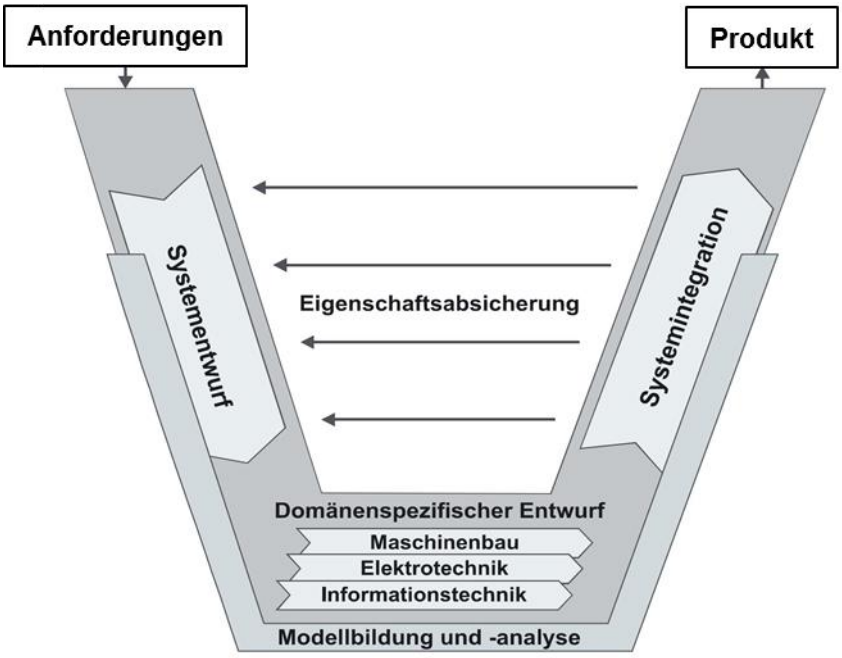


Abbildung 3.1: V-Modell oder Makrozyklus in der VDI Richtlinie 2206 (Richtlinie VDI 2206, S. 29).

Makrozyklus

Der Makrozyklus ist allgemein als V-Modell bekannt (siehe Abbildung 3.1). Er beschreibt das grundsätzliche Vorgehen bei der Entwicklung mechatronischer Systeme und gliedert sich in die folgenden Schritte, welche nach Beenden eines Zyklus erneut mit höherem Detaillierungsgrad durchschritten werden können:

1. Anforderungen[23]
2. Systementwurf
    - Aufbau einer Funktionsstruktur,
    - Zerlegung des zu betrachtenden Systems in Haupt- und Teilfunktionen,
    - Zuordnung von Wirkprinzipien für die Teilfunktionen,
    - Erstellung einer Wirkstruktur,
    - Erstellung einer Baustruktur,
    - Zwischenüberprüfung der Gesamtfunktion im Verbund aller Teilfunktionen,
    - Untersuchung auf Störanfälligkeit, Gewicht, Lebensdauer, Crashfestigkeit, Schwingungsfestigkeit,
    - Ergebnis: Lösungskonzept.
3. Entwurf der einzelnen Teilfunktionsumsetzungen (Domänenspezifischer Entwurf)
4. Systemintegration
    - Zusammenfügen der ausdetaillierten Teilfunktionen
5. Verifikation und Validierung = Eigenschaftsabsicherung
6. Lauffähiges Labormuster oder Funktionsmuster

Modellbasierter Systementwurf

Der modellbasierte Systementwurf wird unter anderem dann verwendet, wenn es um Prinzipbetrachtungen oder die Analyse und Optimierung bereits bestehender Systeme geht. Er bezieht dabei vor allem die Modellbildung und –analyse mit ein. Daher unterscheiden sich die Beschreibungen und Phasen des modellbasierten Systementwurfs von denen des Mikro- und Makrozyklus (siehe Abbildung 3.2).
Entsprechend dem Ziel der modellbasierten Optimierung von Hochvoltbatterien wird vor allem die Vorgehensweise des modellbasierten Systementwurfs für das Vorgehen eine wichtige Rolle spielen.

[23] Die Anforderungen bestehen entweder bereits, oder müssen ermittelt und festgehalten werden.

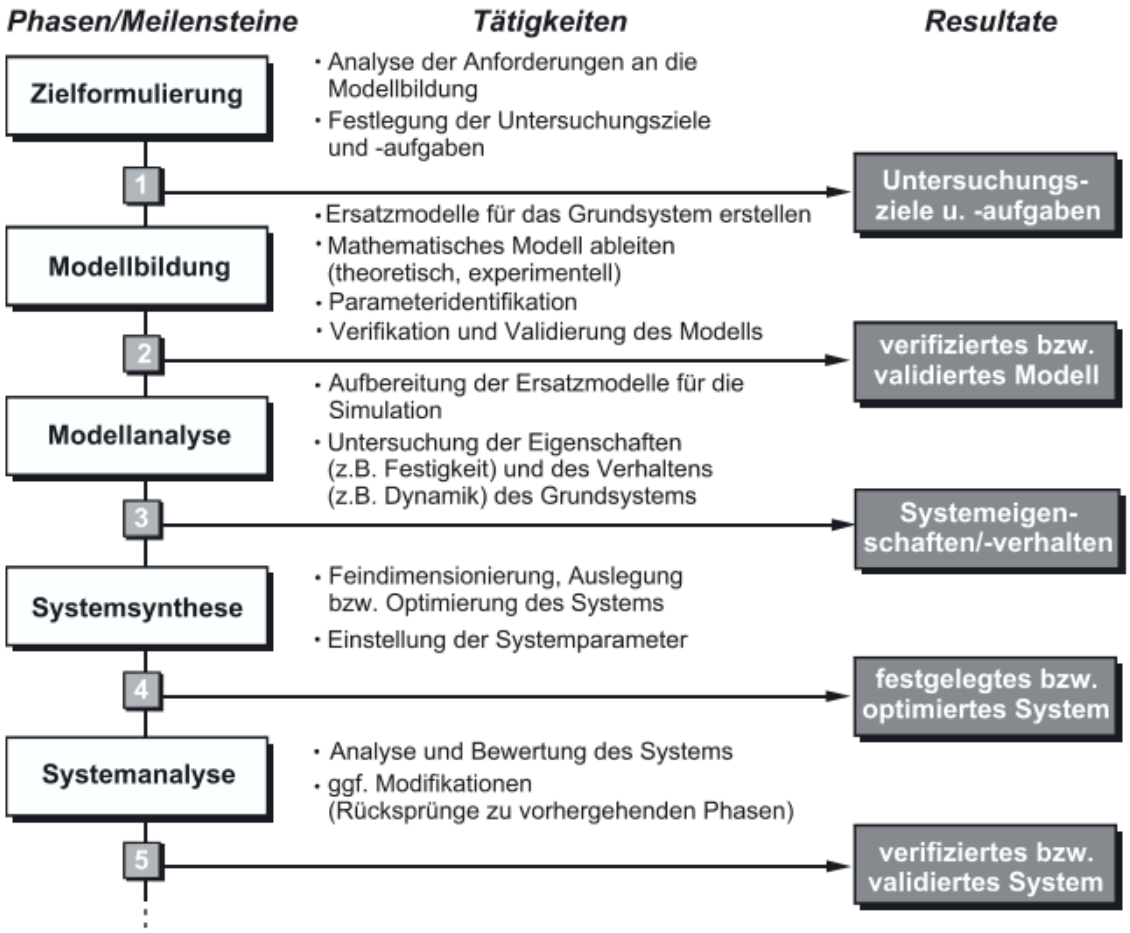


Abbildung 3.2: Modellbasierter Systementwurf in der VDI Richtlinie 2206 (Richtlinie VDI 2206, S. 48).

3.1.3 Softwarespezifische Prozesse nach ISO/IEC 12207

Die ISO 12207 (Norm ISO/IEC 12207) dient als Prozessrichtlinie für softwarespezifische Prozesse und zeigt keine detaillierten Methoden, um Anforderungen zu erfüllen. Sie bezieht sich auf Lebenszyklusprozesse und Aufgaben im Rahmen von Softwareanwendungen und –dienstleistungen, sowohl für Auftraggeber, als auch Zulieferer und alle weiteren Beteiligten an der Softwareentwicklung. Der Standard findet Anwendung in Situationen mit zwei beteiligten Parteien (Norm ISO/IEC 12207) und ist zudem Bestandteil des 2005 im Bereich der Automobilindustrie eingeführten Standards Automotive SPICE(R)[24]. Der Anteil der Norm, welcher sich auf Softwareprozesse bezieht, wird in Abbildung 3.3 dargestellt. Für die vorliegende Dissertation wesentlich ist vor allem der erste Teil der softwarespezifischen Prozesse, der Software Implementierungsprozess. Die Ergebnisse des Softwareimplementierungsprozesses sind eine definierte Implementierungsstrategie, technische Implementierungsbeschränkungen, die Erstellung eines Softwareitems und die Fertigstellung des Softwareitems mit Speicherung und Bereitstellung. Der Implementierung untergeordnet sind

[24]ASPICE wurde von der Norm DIN ISO/IEC 15504 abgeleitet und vom Arbeitskreis 13 verwendet und überwacht. Der Arbeitskreis 13 besteht aus der BMW Group, der BOSCH Group, Continental Automotive Systems, der Daimler AG, der Ford Werke GmbH, der KNORR-BREMSE Group, der Volkswagen AG und der ZF Friedrichshafen AG (Hettler). Der Standard hat zum Ziel die Entwicklungsprozesse, in Bezug auf Software, in der Automobilindustrie zu verbessern und zu vereinheitlichen.

eine Anforderungsanalyse, ein Architekturdesign, das detaillierte Design, die Konstruktion und Integration der Software und die Softwarequalifizierung und deren Test. (vgl. Norm ISO/IEC 12207, S. 57–58)
Die Ergebnisse der Anforderungsanalyse sind unter anderem die Anforderungsdefinition und eine Priorisierung für die Implementierung der Software. Für die Anforderungsdefinition werden funktionale Anforderungen und Schnittstellen bestimmt, sowie eine Definition der Daten und eine Anwenderdokumentation vorgenommen (vgl. Norm ISO/IEC 12207, S. 59–60). Teile aus den Software Supportprozessen wie die Verifikation und die Validierung sind ebenfalls bei einer modellbasierten Methode relevant.

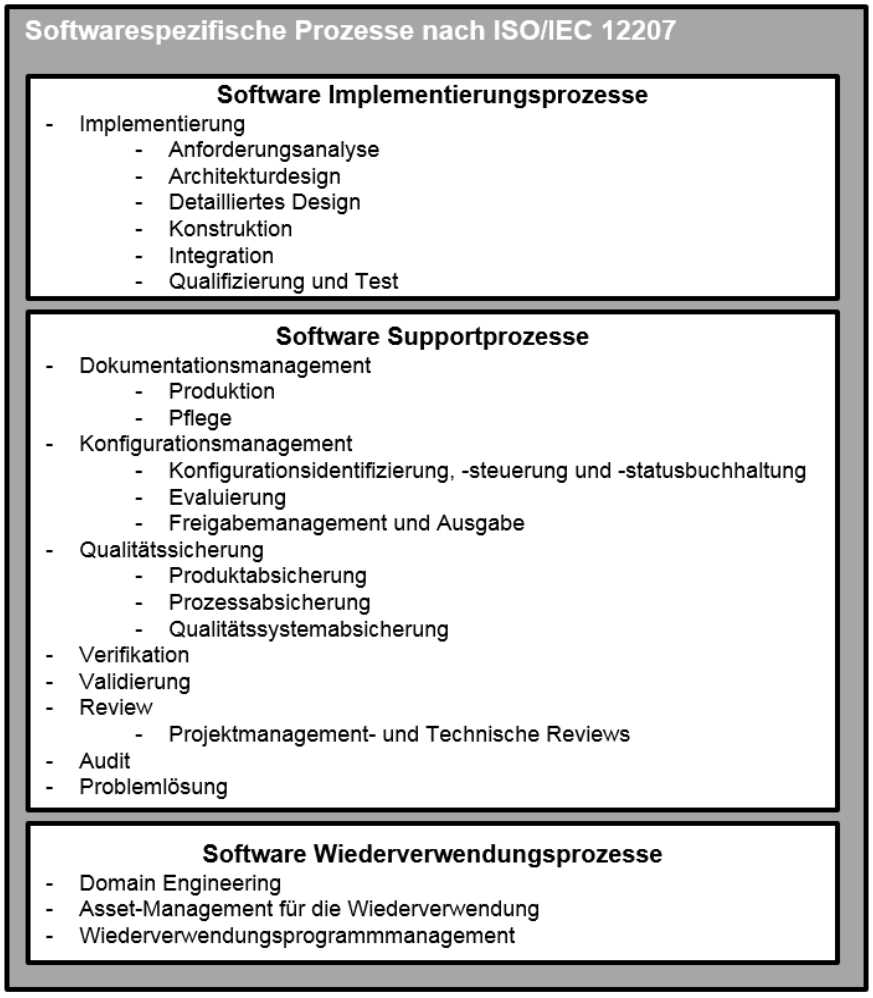


Abbildung 3.3: Softwarespezifische Prozesse nach der Norm ISO/IEC 12207 (eigene Darstellung).

3.1.4 Entwicklungsmethodik nach Seidel

In seiner Dissertation untersucht Seidel verschiedene Produktplanungsmethoden allgemeiner Art. Dabei teilt er die Produktplanungsmethoden in drei Klassen ein. Diese sind die *phasenorientierten Ablaufpläne*, die *gate-orientierten Ablaufpläne* und die *Quality Function Deployment-basierten Ansätze*. (vgl. Seidel, 2005, S. 19)

Phasenorientierte Ablaufpläne

Phasenorientierte Ablaufpläne sind laut Seidel die Methoden, bei welchen eine Entwicklung zunehmend in Phasen konkretisiert wird. Dabei wird von dem Qualitativen zum Quantitativen konkretisiert. Zu beachten ist allerdings, dass dort keine Entscheidungsunterstützung vorgenommen wird. Die phasenorientierten Ablaufpläne sind gegebenenfalls an die Umstände eines Vorhabens anzupassen. Seidel stellt fest, dass die phasenorientierten Ablaufpläne meist Radikalinnovationen unterstützen und teilweise den nachhaltigen Unternehmenserfolg gefährden (vgl. Seidel, 2005, S. 20). Im Bereich der phasenorientierten Ablaufpläne stellt Seidel einen Innovationsprozess nach Pleschak und Sabisch vor (siehe Pleschak und Sabisch, 1996).
Der vorgestellte Prozess beginnt durch die Problemerkenntnis, welche markt- und technologiegetrieben angestoßen wird. Dabei spielt die strategische Orientierung der Firma eine zusätzliche Rolle in dem ersten Schritt des Innovationsprozesses, der Ideengewinnung, -bewertung und -auswahl. Dem folgt eine Projektplanung mit Wirtschaftlichkeitsrechnung woraufhin die Forschung und Entwicklung der Firma ausgerichtet wird. Der Forschungstätigkeit folgt im gewünschten Fall eine Erfindung, die über eine Fertigungsplanung in ein marktfähiges Produkt transferiert wird. Seidel kritisiert an diesem Konzept den geringen Detaillierungsgrad, die geringe Unterstützung bei der Ideenfindung, Probleme bei der Entwicklung radikaler Innovationen und die nicht erfolgende Informationsaufbereitung, um andere Prozesse zu unterstützen. (vgl. Seidel, 2005, S. 21–22)

Gate-orientierte Ablaufpläne

Neben den Methoden, die sich an Phasen in der Produktplanung, oder -entwicklung orientieren, existieren Methoden, welche Meilensteine oder auch Gates einbeziehen. Seidel stellt einen Stage-Gate-Ansatz von Cooper, einen Quality-Gate-Ansatz von Scharer (siehe Scharer, 2002) und industrielle Normen für das Qualitätsmanagement vor. Exemplarisch wird hier der Stage-Gate-Ansatz von Cooper beschrieben (siehe Cooper, 2002). Dieser Ansatz beginnt mit der Produktidee, die das erste Gate, die Vorauswahl passieren muss. Dem folgen Voranalysen, welche den Markt, den Stand der Technik und die Kosten abschätzen. Das zweite Gate ist die Freigabe zu Detailanalysen, auf welche das dritte Gate der Projektentscheidung folgt. Anschließend an die Projektentscheidung findet die Produktentwicklung statt. Nach der Entwicklung befindet sich das Gate der Produktfreigabe. Der Produktfreigabe folgt, nach Tests und der Validierung das fünfte Gate, die Marktbereitschaft. Mit der Marktbereitschaft ist das Produkt bereit für die Produktion und die Markteinführung. Abschließend wird das letzte Gate, die Projektanalyse, passiert und ein Review durchgeführt. Generell stellen die gate-orientierten Ansätze laut Seidel ein Mittel für das Prozessmanagement dar, welche den Fokus auf die Meilensteine legt und weniger auf die beinhalteten Tätigkeiten. (vgl. Seidel, 2005, S. 46–48)

Quality Function Deployment

Seidel behandelt das Quality Function Deployment (QFD) zusätzlich zu den phasenorientierten und den gate-orientierten Ansätzen. Zentral bei dieser Methode sind die Kundenwünsche, die den Anstoß und die Richtschnur für den Entwicklungsprozess darstellen. Seidel

stellt Schwierigkeiten bei dieser Methode durch eine frühzeitige Fokussierung auf die Produktmerkmale fest. Des Weiteren soll QFD für die Beseitigung von Entscheidungsunsicherheiten verwendet werden, was laut Seidel jedoch den Innovationserfolg gefährden kann. (vgl. Seidel, 2005, S. 46–48)

Planungsmethodik nach Seidel

Seidel entwickelt eine Methodik für die Produktplanung, mit welcher er die Erstellung von Produktkonzepten unterstützen möchte. Dabei konzentriert er sich auf eine Minimaldefinition des zu entwickelnden Produkts, eine Ausnutzung von Synergiepotentialen, die Nutzung einer Produktvision in Form einer unscharfen Formulierung des Gesamtziels, die Bewertung von technischen und wirtschaftlichen Risiken, die Berücksichtigung der Unternehmensziele und die Möglichkeit der Absicherung oder bewussten Inkaufnahme von Risiken (Seidel bezeichnet dies als Fall-Back- und Step-Ahead-Strategien) (vgl. Seidel, 2005).

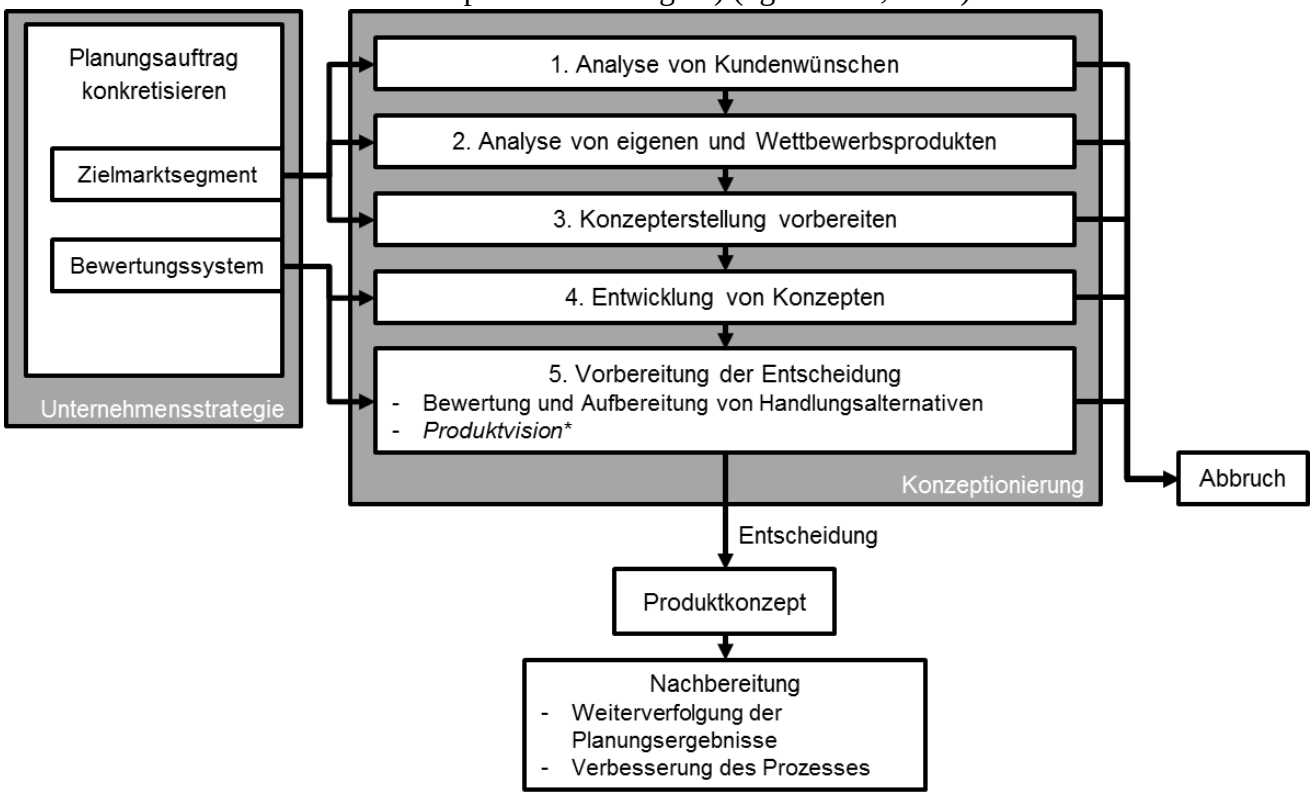


Abbildung 3.4: Entwicklungsmethodik nach Seidel. *von Seidel eingeführte Methoden (Seidel, 2005).

Die Planungsmethodik nach Seidel beginnt mit dem Planungsauftrag, welcher durch ein Bewertungssystem und ein Zielmarktsegment konkretisiert wird (siehe Abbildung 3.4). Dem folgen die Analyse von Kundenwünschen und die Analyse von bereits bestehenden eigenen oder Wettbewerbsprodukten. Als dritter Schritt wird die Konzepterstellung vorbereitet und anschließend werden im vierten Schritt Produktkonzepte entwickelt. Der nächste Schritt in der Planungsmethodik ist die Bewertung und Aufbereitung von Handlungsalternativen, die der Vorbereitung einer Entscheidung dienen. Die Entscheidung wird nachfolgend gefällt und führt zu einem Produktkonzept. Zuletzt wird eine Nachbereitung durchgeführt, welche die Planungsergebnisse weiterverfolgt und der Verbesserung des zuvor durchgeführten Prozesses dient.

Der Produktplanungsprozess kann zu jedem Zeitpunkt abgebrochen werden[25]. In Schritt 1 kann abgebrochen werden, falls die Kundenwünsche nicht mit dem Planungsauftrag konform sind. Wird festgestellt, dass die Unternehmensstrategie, oder die Produktstrategie nicht zu der Innovationsrichtung passen, wird der Prozess in Schritt 3 abgebrochen. In Schritt 4 und 5 wird abgebrochen, wenn kein Konzept gefunden werden kann, welches die Anforderungen an Innovationsgrad und Risiko erfüllt. (vgl. Seidel, 2005, S. 53–55)

3.1.5 Entwurfsmethoden in Kuchenbuch

Kuchenbuch fasst in seiner Dissertation ebenfalls viele gängige Entwurfsmethoden zusammen und gibt die Gemeinsamkeiten wieder (Kuchenbuch, 2012). Kuchenbuch zufolge, „*lässt sich der folgende, generalisierte Ablauf zusammenfassen:*

1. *Information*
    - *Informations- und Wissenssammlung*
    - *Abgleich mit Vorgänger- und Wettbewerbskonstruktionen*
    - *Einsatz von Checklisten/Hauptmerkmalslisten*
2. *Anforderungs- und Zielfindung*
    - *Lösungsneutrale Identifikation von Zweck und Problemkern*
    - *Anforderungsliste*
3. *Abstraktion*
    - *Verfremdung zur Lösung von Denkblockaden*
    - *Aufbau von Funktionsstrukturen*
4. *Strukturierung*
    - *Untergliederung in Teilprobleme und Funktionen*
    - *"Vom Gesamtsystem ins Detail"*
5. *Lösungserzeugung*
    - *Nutzung katalogisierten Wissens*
    - *Definition veränderbarer Parameter und ihrer Wertebereiche*
    - *Variation/Synthese/Morphologie*
6. *Bewertung und Auswahl*
    - *Bestimmung von Eigenschaften*
    - *Abgleich mit Anforderungen*
    - *Bewertungsschemata*
    - *Identifikation von Schwachstellen und Optima*“ (Kuchenbuch, 2012, S. 21)

Kuchenbuch stellt des Weiteren fest, dass allgemeine Entwurfsmethoden Zielkonflikte besitzen können. Das Spannungsfeld, in welchem sich die Entwurfsmethoden befinden, wird durch Variantenvielfalt, Allgemeingültigkeit, Anwendungsbezug und Schnelligkeit aufgespannt. Dabei müssen in dem Spannungsfeld Kompromisse für den resultierenden Entwurf gefunden werden. Beispielsweise bedeutet eine hohe Rechengeschwindigkeit Einschränkungen in der Variantenvielfalt oder Detailgenauigkeit (Kuchenbuch nennt dies Lösungsqualität) des Entwurfs (vgl. Kuchenbuch, 2012, S. 22–23). In Anlehnung an den Zielkonflikt von Kuchenbuch ist die folgende Abbildung zu verstehen. Dort sind drei der Grundziele zu sehen: Allgemeingültigkeit, Variantenvielfalt und Anwendungsbezug. Das vierte Grundziel, die Schnelligkeit, ist hier eine beschreibende Größe.

[25] Seidel nimmt den Schritt des Vergleichs mit eigenen und Wettbewerberprodukten an dieser Stelle aus, er wird hier aber ebenfalls für die Möglichkeit eines Abbruchs vorgesehen.

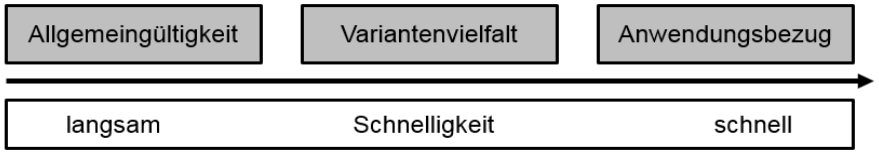


Abbildung 3.5: Spannungsfeld der allgemeinen Entwurfsmethodik in Anlehnung an Kuchenbuch (Kuchenbuch, 2012).

3.1.6 Entwicklung einer kombinierten Methode

Anhand der beschriebenen Grundlagen wird eine neue Methode entwickelt (Abbildung 3.6). Diese besitzt den Fokus, die Anforderungen und Ziele der Forschungsaufgabe zu ermitteln und festzuhalten, sowie Lösungen für daraus entstehende Aufgaben zu finden. Daher wird sich die Konzepterstellung darauf konzentrieren eine Methodik für die Erstellung eines Softwaretools für die Batterieauslegung zu ermöglichen und sich im Spannungsfeld nach Kuchenbuch (Abbildung 3.5) auf Seiten des Anwendungsbezugs befinden. Die Methodik wird in zwei Hauptbestandteile gegliedert, die Konzeptionierung und die Modellierung. Eingeordnet in das V-Modell der VDI Richtlinie 2206 befindet sich die Konzeptionierung auf der linken Seite und die Modellierung in dem unteren und rechten Bereich des V.
Der Schritt der Lösungssuche und des Vergleichs mit eigenen oder Wettbewerberprodukten ist an dieser Stelle bewusst hinter dem Schritt der Lösungserzeugung angesiedelt, um eine intuitive und kreative Lösungssuche zu unterstützen. Nach dem Vergleich mit bestehenden Produkten kann bei Erkenntnisgewinn ein zusätzlicher Durchlauf der Lösungserzeugung erfolgen oder die Funktionsstruktur überarbeitet werden.

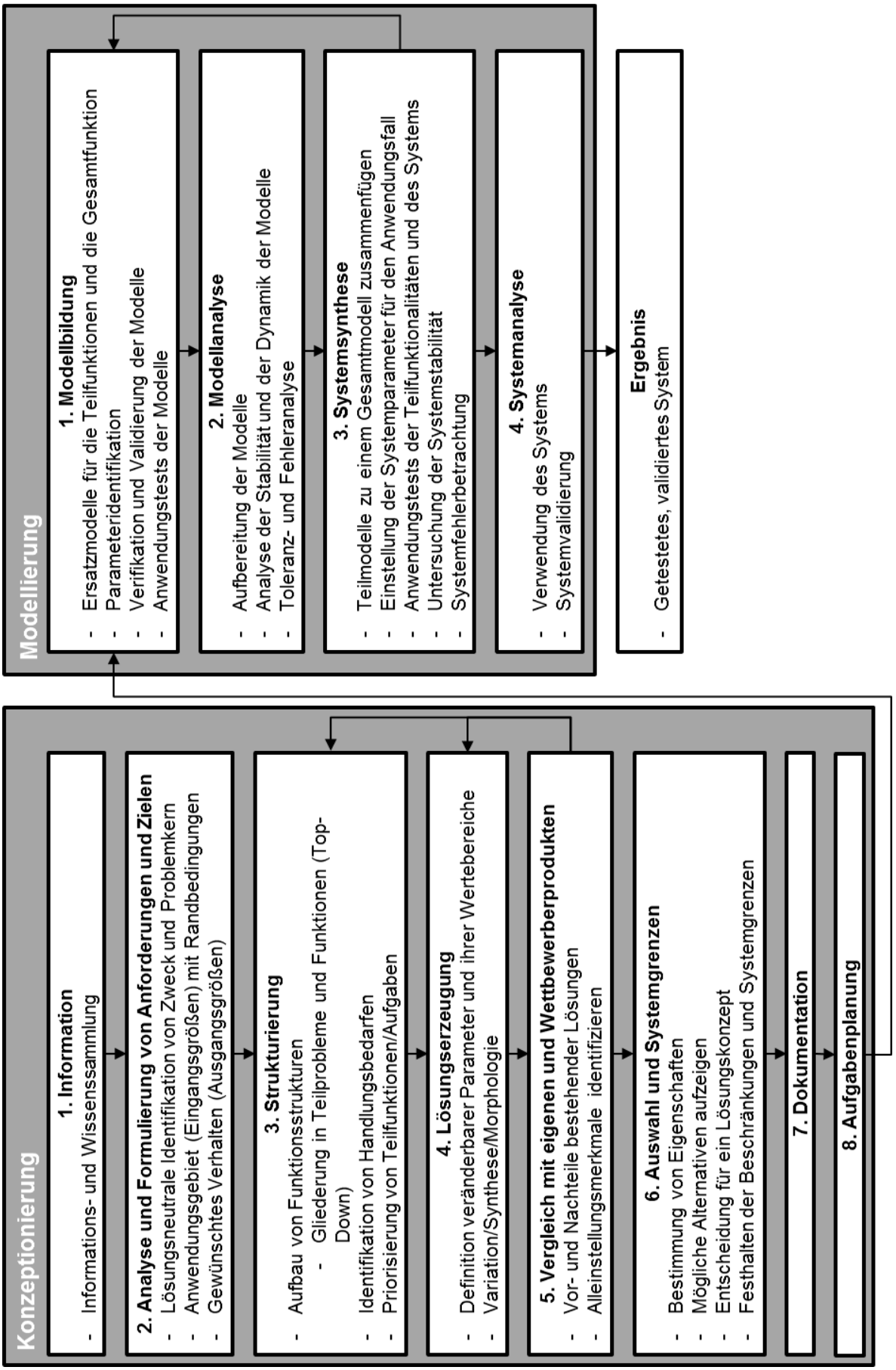


Abbildung 3.6: Entwurfsmethodik für die Optimierung des Entwurfs von Hochvolt-Fahrzeugbatterien.

Der Vorgehenszyklus aus (Ehrlenspiel et al., 2014) und (Ehrlenspiel und Meerkamm, 2013), sowie der Mikrozyklus aus (Richtlinie VDI 2206) findet sich in der vorgestellten Methodik im Bereich der Konzeptionierung wieder. Das V-Modell kann in Teilen ebenfalls in der oben entwickelten Methodik wiedergefunden werden. Allerdings ist der Makrozyklus für die Entwicklung von mechatronischen Produkten vorgesehen und daher nicht direkt auf die hier untersuchte Aufgabe zu übertragen. Der modellbasierte Systementwurf aus (Richtlinie VDI 2206) befindet sich im Bereich der Modellbildung, wobei der Schritt der Zielformulierung auf den Bereich der Konzeptionierung entfällt. Die in ASPICE aufgeführten Software Implementierungsprozesse aus der Norm ISO/IEC 12207 können ebenfalls in der vorgestellten Methodik wiedergefunden werden. Große Teile der Support- und Wiederverwendungsprozesse sind nicht Bestandteil der vorliegenden Arbeit und sind daher auch in der obigen Methodik nicht abgebildet. Aus der Planungsmethodik von Seidel wurde vor allem der zweite Schritt integriert, welcher sich in Schritt 5 der hier verwendeten Methodik wiederfindet. Auch die weiteren Bestandteile von Seidels Planungsmethodik aus dem Bereich der Konzeptionierung finden sich wieder. Der Bereich der Unternehmensstrategie wurde hier nicht eingebracht. Der generalisierte Ablauf aus Kuchenbuch (Kuchenbuch, 2012) wurde zu einem großen Teil übernommen, da dieser die bewährten Schritte unterschiedlicher Methoden wiedergibt. Der Schritt der Abstraktion wurde hier in den Schritt der Strukturierung integriert, da dieser Teil des Aufbaus von Funktionsstrukturen sein sollte.

Die Anwendung der in Abbildung 3.6 dargestellten Methodik erfolgt in den folgenden Abschnitten. Wobei Schritt 1 und 2 der Konzeptionierung (Information, Analyse und Anforderungen) bereits zu großen Teilen in den einführenden Kapiteln vorgenommen wurden. Die weiteren Schritte der Konzeptionierung werden im vorliegenden Abschnitt weiterbehandelt. Dabei ist zu beachten, dass sich die Dokumentation und die Aufgabenplanung als ein Festhalten der Ergebnisse der vorherigen Schritte (Dokumentation) und der weiteren Vorgehensweise (Aufgabenplanung) verstehen. Die Dokumentation erfolgt damit durch das vorliegende Schriftstück in den jeweiligen Kapiteln. Den Bereich der Modellbildung behandelt Kapitel 4.

3.2 Haupteinflussfaktoren und Funktionsübersicht von Hochvoltbatterien

Die Analyse der wichtigsten Einflussfaktoren auf den Entwurf und die Funktion von Hochvoltbatterien wurde bereits in (Frank et al., 2016b) vorgenommen. Dort wurden als Haupteinflussfaktoren das elektrische und thermische Verhalten, die mechanischen Randbedingungen und die Kosten ausgemacht. Diese Faktoren interagieren miteinander und beeinflussen sich so gegenseitig, was den Batterieentwurf zu einer komplexen Aufgabe macht. Auf dieser Grundlage müssen alle Bestandteile der Batterie ausgelegt werden. Im Rahmen der Strukturierung (Schritt 3 der Konzeptionierung) wird im Folgenden eine Funktionsstruktur beschrieben, welche die Gesamtheit der Batterieauslegung mit allen wesentlichen Einflussgrößen, sowie dem Schwerpunkt auf einer modellbasierten Auslegung berücksichtigt. Anhand dieser Funktionsstruktur wird eine Priorisierung der Teilfunktionen vorgenommen, bevor der Schritt der Lösungserzeugung erfolgt (Schritt 4 der Konzeptionierung). In diesem Schritt wird die spätere Programmstruktur entworfen. Dem folgt ein Vergleich mit anderen

Arbeiten zur modellbasierten Batterieauslegung (Schritt 5 der Konzeptionierung) bevor die Bewertung und Auswahl des weiterzuverfolgenden Konzepts vorgenommen und die Systemgrenzen festgelegt werden (Schritt 6 der Konzeptionierung).

3.2.1 Aufstellen einer Funktionsstruktur

Die Aufstellung einer Funktionsstruktur für den Batterieentwurf dient der Darstellung aller Einflüsse, denen eine Hochvoltbatterie beim Entwurf ausgesetzt ist. Dabei liegt der Fokus auf der Verwendung von Computermodellen. Zusätzlich soll diese Struktur helfen, die wichtigsten Funktionen zu ermitteln, die beim Entwurf der Batterie nicht vernachlässigt werden dürfen. Des Weiteren werden Funktionen mit weniger Priorität versehen, die für den Erstentwurf weniger zweckdienlich sind. Der Vorteil einer solchen Struktur ist die übersichtliche Darstellung aller Entwurfsbereiche, die Veranschaulichung der Wechselwirkungen und eine sehr gute Kontrollierbarkeit. Ferner dient die ausgearbeitete Funktionsstruktur als Richtlinie und Anhaltspunkt für die notwendigen Bereiche, welche in Form von Modellen abgebildet werden müssen. Die Art der Modelle steht an dieser Stelle noch nicht fest und ist im Allgemeinen veränderbar. Dies erlaubt eine Modularisierung bei der Batterieauslegung. Für die hier durchzuführende Optimierung werden spezifische Modelle ausgewählt, die in Abschnitt 4.1 beschrieben werden. Die spätere Programmstruktur spiegelt ebenfalls die Funktionsstruktur wieder.
Die ermittelte Funktionsstruktur (Abbildung 3.7) orientiert sich an den vier Haupteinflussfaktoren, welche über drei Hauptfunktionen repräsentiert werden. Aufgrund der engen Verbindung von elektrischem und thermischem Verhalten, sind diese beiden Faktoren zusammengefasst. Die aufgeführten Funktionen stellen hierbei bereits allgemeine übergeordnete Tätigkeiten dar. Zusätzlich zu den Auslegungsfunktionen, sind spezifische, unabhängige Anforderungsbereiche und der Bedarf für strukturierte Daten in Form einer Datenbank abgebildet. Die Anforderungen für die Teilbereiche sind von den vier Haupteinflussfaktoren getrennt und funktionsbezogen. Dadurch wird deutlich, dass die Anforderungen auf alle Einflussfaktoren wirken können. Des Weiteren wird herausgestellt, welche Funktionen für eine Optimierung verwendet werden können und an welcher Stelle die globale Optimierung durchgeführt werden wird. Für die Optimierung ist eine jeweilige Bewertung in Bezug auf die Optimierungsziele notwendig. Zusätzlich zu der Funktionsbeschreibung sind die Rückwirkungen unter den Funktionen dargestellt. Mit Hilfe fett dargestellter Pfeile sind Zyklen abgebildet, die auf den jeweiligen Ebenen der Hauptfunktionen einen Optimierungszyklus darstellen. Dieser nimmt auf Basis der entsprechend markierten Optimierungszielfunktionen Unteroptimierungen vor. Die Verbindungen mit niedriger Priorität wurden durch gestrichelte Linien markiert und werden in den folgenden Abschnitten näher erläutert. Auf der rechten Seite befindet sich eine Datenbank, die Informationen über die verschiedenen Bauteile enthält. Auch Modellparameter können in dieser Datenbank hinterlegt sein.
Die vier Funktionen, welche für eine Optimierung herangezogen werden können sind die Dimensionierung des Kühlkonzepts, die Zell- bzw. Modulverschaltung, die automatische Anordnung der Bauteile, sowie die Kostenberechnung. Die jeweiligen Optimierungsziele unterscheiden sich je nach Funktion. Ein übliches Ziel für die Kühlkonzeptdimensionierung ist, dieses möglichst „klein“ auszulegen. Der Ausdruck „klein“ kann sich hierbei auf die geometrische Form, die notwendige Leistung, die Performance oder die Kosten beziehen. Welches Ziel vorgegeben wird hängt auch vom verwendeten Simulationsmodell und den

dort verfügbaren Parametern ab. Ein mögliches Ziel bei der Zell- oder Modulverschaltung kann sein, eine möglichst kleine Zellanzahl zu verwenden, Module einer bestimmten Größe zu bevorzugen oder Parallelverschaltungen zu minimieren. Bei der Bauteilanordnung besteht die Möglichkeit das Volumen des gesamten Batteriepacks oder die jeweiligen Außenmaße zu minimieren. Ziel kann aber auch sein, eine gleichmäßige Aufteilung der Module, unabhängig von ihrer Größe, zu erreichen. Bezogen auf die Gesamtkosten liegt nahe, den Preis als solches zu minimieren. Es kann aber auch der energetische Preis (€/kWh) minimiert werden.

Die Funktionen in gestrichelten Kreisen werden in der vorliegenden Arbeit nicht betrachtet, um die Einflussparameter und die Modellannahmen für den Konzeptbeweis so gering wie möglich zu halten. Auf der Ebene der mechanischen Auslegung sind die Funktionen innerhalb des inneren Zyklus vernachlässigbar, da es sich hierbei um Detailauslegungen handelt, welche ebenfalls nach der erfolgten Optimierung durchgeführt werden können. Ferner benötigen Aussagen zu diesen Bereichen deutlich detailliertere Modelle, was die Berechnungsdauer der Optimierung massiv verlängern würde.

Die Alterung der Batterie wird nicht betrachtet, da die Modellannahmen in diesem Fall einen zu großen Einfluss auf die Ergebnisse haben. Dies ist ebenfalls ein Grund dafür, in dieser Arbeit Begin of Life (BoL) Auslegungen mit neuwertigen Batteriezellen vorzunehmen. Die Betrachtung der Betriebsfestigkeit erfordert detaillierte Modelle für sämtliche Bestandteile der Batterie. Hierzu gehört beispielsweise die Kontaktmodellierung in Abhängigkeit der Fertigungsschritte. Diese brächte neben dem enormen Modellierungsaufwand viele zusätzliche Annahmen mit sich, die nur einen geringen Einfluss auf die Batteriekonfiguration selbst haben. Dennoch ist die Betriebsfestigkeit ein zentraler Bestandteil der Batterieauslegung im Automobilbereich und darf daher in der Funktionsstruktur nicht fehlen. Die letzte vernachlässigte Funktion ist die des Zellentwurfs. Hier bestünde die Möglichkeit innerhalb des inneren Zyklus bei der elektrischen und thermischen Auslegung die Zellcharakteristika auf Basis der Simulationen und der Anforderungen von einem Algorithmus anpassen zu lassen, bis die Bewertung der Performance optimal ist. Die Menge von Annahmen, die hierfür notwendig wäre ist sehr groß und hätte zudem einen großen Einfluss auf die weitere Batterieauslegung. Zudem bestehen in diesem Bereich bereits eine größere Anzahl von Forschungsarbeiten (beispielsweise Xue, 2014; Nelson et al., 2012) Im Sinne des Konzeptbeweises ist daher der Zellentwurf nicht Bestandteil dieser Dissertation. Zusätzlich führt das dazu, dass im Kostenmodell die Zellkosten nicht auf Basis der Zellbestandteile berechnet werden, sondern jeder Zelle ein Festpreis zugeordnet wird.

Die oben entwickelte Methodik sieht für den dritten Schritt, zusätzlich zu der Funktionsbetrachtung und der Priorisierung, die Definition des Handlungsbedarfs vor. Der Handlungsbedarf besteht hier bei der Auswahl, der Erstellung und der geeigneten Verknüpfung der Modelle für die Hauptfunktionen und die Einbettung der Modelle in die Optimierung. Eine Herausforderung besteht darin, die Schnittstellen der verschiedenen Modelle untereinander zu definieren und festzulegen, in welcher Reihenfolge die Modelle berechnet werden, um damit eine effiziente und aussagekräftige Optimierung durchführen zu können. Die detaillierte Beschreibung der Optimierungsstruktur und der Schnittstellen findet im folgenden Kapitel statt.

Eine Struktur, welche ebenfalls für die Batterieentwicklung entwickelt wurde, stellen Arora, Shen und Kapoor vor (Arora et al., 2015). Das dort entwickelte Parameterdiagramm (siehe Abbildung 6.1 im Anhang) ist in Eingangsgrößen und Ausgangsgrößen aufgeteilt. Wobei die Eingangsgrößen Störgrößen (wie inhomogene Zellcharakteristika oder unterschiedliche

Fahrzyklen) und Steuergrößen darstellen. Mit Hilfe der Steuergrößen kann das Batteriedesign wesentlich vom Entwerfenden beeinflusst werden. Ausgangsgrößen sind Wärmeverluste, ungewünschte Nebeneffekte und gewünschte Funktionen und Eigenschaften des Batteriesystems. Letztere können ebenfalls als Zielgrößen bei der Batterieauslegung betrachtet werden. Die ungewünschten Nebeneffekte sind durch ein geeignetes Design zu vermeiden. Insgesamt bietet das Parameter Diagramm eine kompakte Übersicht, ist aber für die Entwicklung eines modellgestützten Auslegungswerkzeugs nicht geeignet, da es keine Wechselwirkungen aufzeigt. Dennoch können die wichtigsten Faktoren in der hier entwickelten Funktionsstruktur wiedergefunden werden. Des Weiteren werden die Störgrößen im ersten Schritt hier nicht betrachtet.

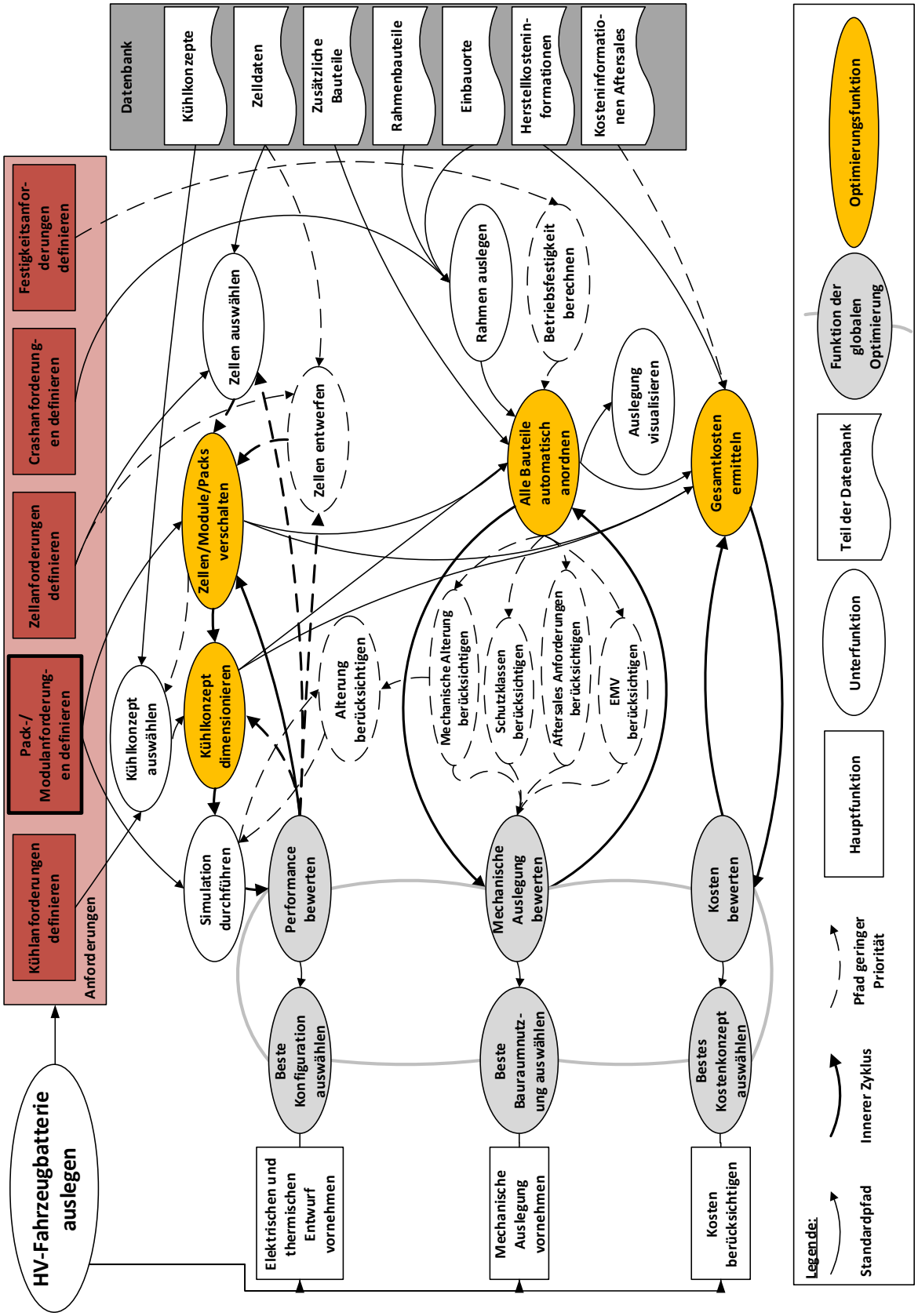


Abbildung 3.7: Funktionsstruktur für die Auslegung einer HV-Fahrzeugbatterie inklusive spezieller Anforderungen, Datenbank, Optimierungszielen und globalem Optimierungszyklus.

3.2.2 Erstellung einer Programmstruktur, Vergleich mit bestehenden Lösungen und Systemabgrenzung

Im Rahmen der Lösungserzeugung (Schritt 4 der Methodik) wird eine Programmstruktur für die Bearbeitung der Optimierungsaufgabe ermittelt. Dafür werden zunächst die Parameter und deren Wertebereiche festgelegt. Dem folgt die Variation und sowohl die Möglichkeit der Zusammenführung von Teilbereichen und Funktionen (Synthese), als auch die Auswahl verschiedener Ansätze zur Funktionserfüllung (Morphologie). Eine vollständige Übersicht über die veränderbaren Parameter und deren Ausprägungen in Bezug auf die in Abbildung 3.7 dargestellten Funktionen befindet sich im Anhang (Tabelle 6.1). Die spezifischen Parameter und deren Wertebereiche sind in großen Teilen von der Art der Modelle abhängig. Die explizite Definition der Wertebereiche wird daher erst nach der Auswahl und der Modellbeschreibung vorgenommen. Eine Variation der Modellarten ist eine Möglichkeit der Morphologie. Eine Form der Synthese wurde bereits durch die Zusammenführung der elektrischen und thermischen Auslegung vorgenommen. Zusätzlich können viele Parameter in den jeweiligen Modellen zusammengefasst werden.

Tabelle 3.1: Zuordnung der Funktionen zu Modellen, Berechnungen und strukturierten Daten. Modellbereiche sind fett markiert und eingerahmt.

Zellen/Module/Packs	**Kühlkonzept auswählen**	**Kühlkonzept dimensionieren**
Berechnung	**Thermisches Modell**	Berechnung
Optimierung		Eingangsdaten
		Optimierung
		Kostenmodell

Zellen auswählen	**Rahmen auslegen**	**Bauteile automatisch anordnen**
Eingangsdaten	**Rahmendimensionierung**	**Packalgorithmus**
	Kostenmodell	Eingangsdaten
		Berechnung

Gesamtkosten ermitteln	**Simulation durchführen**
Kostenmodell	**Elektrisches Zellmodell**
	Thermisches Modell

Die mithilfe der Methodik erzeugte Lösung und die jeweiligen Zusammenfassungen von Parametern und Bereichen ist detailliert in

Tabelle ***6.2*** im Anhang zu finden. Dort wurde die Parameterübersicht Programmfunktionen und Modellen zugeordnet. Drei Hauptbereiche, sind auszumachen: Berechnungen/Optimierungsparameter, Modelle und strukturierte Daten (als Eingangsdaten deklariert). Die so

strukturierte Lösung und die Zuordnung zu den Funktionen der Funktionsstruktur (Abbildung 3.7) ist in Tabelle 3.1 dargestellt.

Vergleich und Bewertung

Mit Hilfe der erzeugten Lösung für die Umsetzung der Funktionen zur Batterieauslegung, kann ein Vergleich mit anderen bestehenden Lösungen vorgenommen werden (Schritt 5 der Methodik). Zentral für den Vergleich ist die Anwendung zur Batterieauslegung. Nach Möglichkeit soll ebenfalls eine Form der Batterieoptimierung vorgenommen werden. Für den Vergleich werden Arbeiten von Kuchenbuch (Kuchenbuch, 2012; Kuchenbuch et al., 2011), Ried (Ried, 2014; Ried et al., 2012; Ried et al., 2013), Becker (Becker, 2017b, 2017a), dem Argonne National Laboratory (BatPaC Nelson et al., 2012; Nelson et al., 2015), Severino et al. (Severino et al., 2014), Xue et al. (Xue et al., 2014; Xue, 2014), Ostadi und Kazerani (Ostadi und Kazerani, 2014), Sakti et al. (Sakti et al., 2015), Saw, Ye und Tay (Saw et al., 2014), Zhou (Zhou, 2016) und der RWTH Aachen und dSpace (Toolbox Speichersysteme Witzenhausen, 2015; Eckardt, 2015) herangezogen. Berücksichtigt wurden nur Arbeiten, welche dem modellbasierten Entwurf im frühen Entwicklungsstadium von Fahrzeugbatterien dienen. Zusätzlich müssen mindestens zwei der Haupteinflussfaktoren betrachtet werden, davon wenigstens einer in erhöhtem Detail[26]. Des Weiteren dienen die vier Haupteinflussfaktoren als Basis für den Vergleich. Das Ergebnis der Betrachtung ist in Abbildung 3.8 graphisch dargestellt. Besonderheiten von bestimmten Arbeiten werden im Folgenden näher beschrieben.

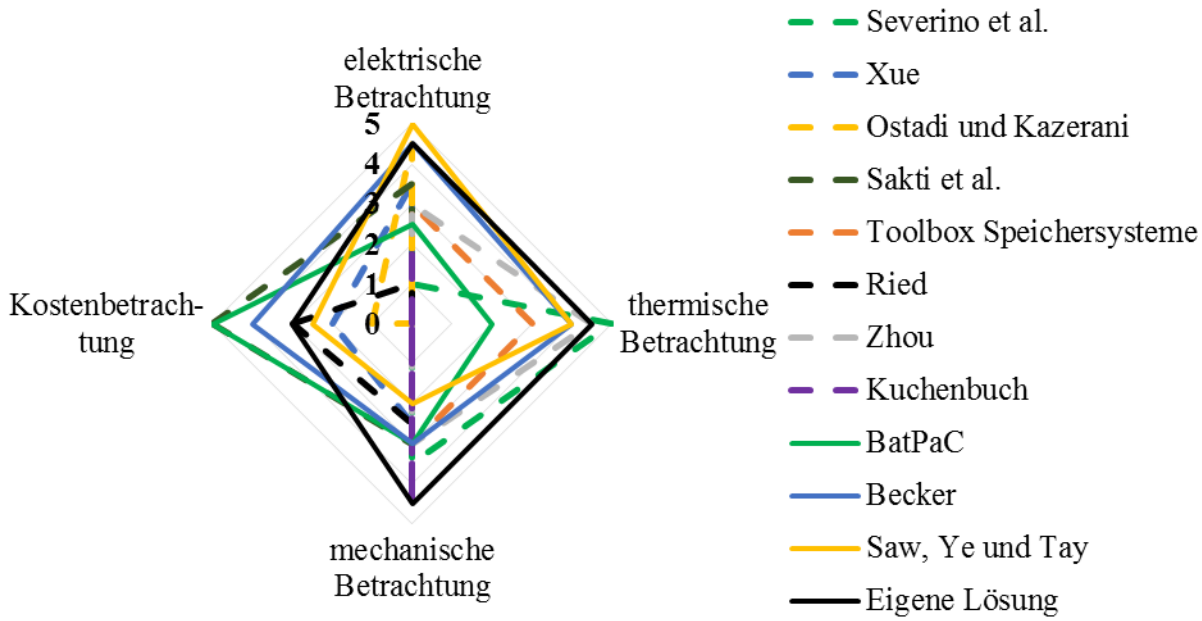


Abbildung 3.8: Bewertung verschiedener Arbeiten zu Methoden oder Tools zur modellbasierten Batterieauslegung. Aufgetragen ist der Detaillierungsgrad, die Durchführung einer Optimierung im entsprechenden Bereich gibt einen halben Zusatzpunkt. Gestrichelt sind die Arbeiten markiert, welche mindestens einen Haupteinflussfaktor nicht betrachten.

[26] Erhöhtes Detail entspricht einer Punktzahl größer 3 bei der Eigenschaftsbewertung.

Die Bewertung der Arbeiten erfolgt mit einem Punktesystem zwischen 0 und 5 Punkten. 0 Punkte bedeuten, dass der Bereich nicht betrachtet wird. 5 Punkte können dann erreicht werden, wenn ein detailliertes (White Box) Modell verwendet wird. Bei der mechanischen Betrachtung entspricht dies beispielsweise einem CAD-Modell mit ausgestalteten Bauteilen. Ferner wurden 0,5 Zusatzpunkte für die Durchführung einer Optimierung im jeweiligen Bereich vergeben.
Bezogen auf die Kostenmodellierung, kann die Höchstpunktzahl nur erreicht werden, wenn sowohl ein detailliertes Produktionskostenmodell für den Batteriepack, als auch für die Batteriezellen vorhanden ist. Ein detailliertes Produktionskostenmodell mit festen Zellkosten erhält 4 Punkte, ein Produktionskostenmodell, welches Zuschläge für die Berechnung verwendet erhält 3 Punkte. Existiert zusätzlich ein Zellkostenmodell, wird ein Zusatzpunkt vergeben.

Es ist gut zu erkennen, dass viele Arbeiten einen thematischen Schwerpunkt besitzen. Beispielsweise ist anhand der Bewertung von BatPaC (Nelson et al., 2012; Nelson et al., 2015) der Fokus auf der Kostenbetrachtung festzustellen. Zusätzlich betrachten viele Arbeiten einzelne Einflussgrößen nicht. Die Bewertung dieser Arbeiten wurde durch gestrichelte Linien markiert. Ziel für eine ganzheitliche Betrachtung beim Batterieentwurf ist eine hohe Bewertung (≥ 3) in allen Bereichen. Eine weitere Herausforderung stellt die einfache Umsetzung der jeweiligen Modelle dar, um schnell auf Parameteränderungen zu reagieren und eine computergestützte, globale Optimierung zu ermöglichen. Es ist daher nicht sinnvoll an allen Stellen hochgenaue White Box Modelle zu verwenden.
Kuchenbuch (Kuchenbuch, 2012; Kuchenbuch et al., 2011) nimmt in seiner Arbeit lediglich die mechanische Integration der Batteriezellen und eine grobe elektrische Betrachtung vor. Dabei nutzt er einen Algorithmus, der die Batteriezellen automatisch in verschiedenen Modulgrößen in den zur Verfügung stehenden Bauraum eines Konzeptfahrzeugs platziert. Die Arbeit beschäftigt sich allerdings vor allem mit der Erstellung von Gesamtfahrzeugkonzepten, bei denen die Batterie nur ein Teil des gesamten Elektrofahrzeugs darstellt. Dies ist auch der Grund, warum Kuchenbuch keine thermische Betrachtung und keine Kostenberechnung für die Batterie durchführt.
Sakti et al. (Sakti et al., 2015) und das BatPaC Tool (Nelson et al., 2012; Nelson et al., 2015) erreichen in der Kostenbewertung die volle Punktzahl. Sakti et al. nutzen dabei ein modifiziertes Kostenmodell auf Basis von BatPaC. Das mechanische Modell ist in beiden Arbeiten ebenfalls dasselbe. Dabei wurde ein spezifisches Zell- und Packdesign festgelegt und die äußeren Abmessungen des resultierenden Batteriepacks durch Aufschläge und eine festgelegte Zellkonfiguration berechnet. Die Zellabmessungen entstehen durch die Schichtdicken von Aktivmaterial, Separator, Ableiter und das Zellgehäuse. Während im BatPaC Tool ebenfalls eine überschlägige thermische Betrachtung durchgeführt wird, geschieht dies bei Sakti et al.nicht. Ebenso, wie Sakti et al., berücksichtigt Ried (Ried et al., 2013; Ried et al., 2012; Ried, 2014) die Batteriekosten, die mechanische Integration und auch vereinfacht die elektrische Auslegung der Fahrzeugbatterie. Allerdings liegt der Fokus, wie auch bei Kuchenbuch, auf der Auslegung des Gesamtfahrzeuges. Hierbei geht es vor allem um die Konzeptionierung von PHEV Fahrzeugen. Für die Batterie wird der verfügbare Bauraum betrachtet und dann über dessen Volumen der mögliche Energieinhalt bestimmt. Das Batteriekostenmodell nutzt Festpreise für die Zellen mit einer Zuschlagskalkulation für die Produktion des Batteriepacks und erreicht daher 3 Punkte in der Bewertung.

In Severino et al. (Severino et al., 2014), Zhou (Zhou, 2016) und der Toolbox Speichersysteme (Witzenhausen, 2015; Eckardt, 2015) wird dagegen keine Kostenbetrachtung durchgeführt, dafür aber eine detaillierte thermische Betrachtung vorgenommen. Der Fokus der drei Arbeiten liegt auf einer genaueren Betrachtung eines bestimmten Batteriedesigns und ist damit im Prozess eher der frühen Entwicklungsphase nachgeordnet. Zhou untersucht mit Hilfe von Simulationsmodellen die Auslegung des thermischen Systems. Dabei kommt eine Vielzahl unterschiedlicher thermischer Systeme zum Einsatz.
Saw, Ye und Tay (Saw et al., 2014) führen ebenfalls eine ausführliche thermische, aber auch elektrische Simulation durch. Dafür verwenden sie ein White Box-Modell für die Batteriezelle (elektrochemisches Zellmodell) und eine aktive Luftkühlung als thermisches System. Die Batteriezellen sind Rundzellen. Die Betrachtung der Integration erfolgt eher theoretisch und für die simulierten Fälle manuell. Für die Kostenermittlung werden Zuschläge für das Zellhandling, die Zellhalterung und die Verbinder verwendet. Dadurch, dass in dieser Kostenbetrachtung diverse Bestandteile der Produktion und des Batteriepacks vernachlässigt werden, ist die Bewertung etwas schlechter, als bei einem Kostenmodell mit Betrachtung der gesamten Batterieproduktionsbestandteile. Optimierungen werden bei Saw, Ye und Tay in keinem Bereich durchgeführt.
Ostadi und Kazerani (Ostadi und Kazerani, 2014) und Becker (Becker, 2017b, 2017a) führen die automatische elektrische Auslegung mit Hilfe einer Optimierung auf Basis von Grey Box Modellen durch und erreichen daher dort eine hohe Bewertung. Ostadi und Kazerani berücksichtigen allerdings weder die mechanische Integration, noch wird eine thermische Betrachtung beschrieben. Die Kosten für die verschiedenen Auslegungen werden lediglich über die Zellkosten berechnet. Diesbezüglich ist Becker genauer, er verwendet ein Zellkostenmodell und Zuschlagsfaktoren für die Ermittlung der Batteriepackpreise, welche zusätzlich das Hauptoptimierungsziel darstellen. Die Informationen über die Zuschlagsfaktoren rühren von Analysen bestehender Batteriepacks her. Eine Betrachtung der tatsächlichen Integration findet bei Becker nicht statt, es wird das notwendige Volumen für die Unterbringung der Batteriekomponenten berechnet. Für die thermische Modellierung der Batterien wird ebenfalls ein Grey Box Ansatz gewählt. Die Zellen geben eine Wärmeverlustleistung ab, welche über die Außenflächen an die umgebenden Komponenten geleitet wird. Die Komponenten werden als homogene Massen betrachtet. Es ist möglich verschiedene Kühlmethoden einzusetzen. Die Peripheriekomponenten des thermischen Systems (Wärmetauscher, Kompressor, Lüfter) sind hierbei über Wirkungsgrade abgebildet und nicht thermisch modelliert. (siehe Becker, 2017a, S. 67ff)
Keine der oben aufgeführten Vergleichsarbeiten decken die vier Einflussfaktoren hinreichend genau ab. Nur Saw, Ye und Tay, das BatPaC Tool und Becker betrachten tatsächlich alle Einflussfaktoren. Erstere führen keine Optimierung durch, nutzen ein sehr detailliertes elektrisches Modell, aber nur ein grobes Kostenmodell und lediglich eine manuelle Betrachtung der mechanischen Integration. Das BatPaC Tool führt ebenfalls keine Optimierung[27] durch und betrachtet die mechanischen, elektrischen und thermischen Anforderungen nicht genau genug. Becker nimmt eine umfassende Betrachtung vor, bezieht sich hierbei jedoch auf Batteriepacks aus Kombination von Hochvolt- und Leistungszellen und die mechanische Betrachtung wird nur durch eine Volumenangabe angeführt.

[27] Nur Batteriezellparameter werden optimiert.

Das Ziel der eigenen Lösung ist ebenfalls in Abbildung 3.8 dargestellt. Die elektrische, thermische und mechanische Betrachtung können bewertet werden, da für die Optimierung Grey Box Modelle zum Einsatz kommen sollen (siehe auch Frank et al., 2016a). Zusätzlich wird eine individuelle Optimierung durchgeführt werden (+ 0,5 Punkte). Als Kostenmodell soll wenigstens eine Bewertung mit 3 erreicht werden, was bedeutet, dass ein Produktionskostenmodell für den Batteriepack benötigt wird.

Auswahl und Systemgrenzen

Die grobe Struktur der ausgewählten Lösung befindet sich in Abbildung 3.9. Dort sind die zusammengefassten Bereiche aus Tabelle 3.1 in drei Stufen abgebildet. Die drei Stufen zeigen einen etwaigen Ablauf des zu entwerfenden Programms. Im ersten Schritt erfolgt die Konfiguration des Optimierungsdurchlaufs durch Nutzereingaben, um den konkreten Anwendungsfall festzulegen. Dem folgen Vorberechnungen und eine Rahmendimensionierung, wobei letztere auch offline erfolgen kann. Im dritten Schritt werden die vier Modelle verwendet, wobei sich der Ablauf an der Funktionsstruktur in Abbildung 3.7 orientieren soll. In diesem Schritt finden weiterhin Berechnungen statt und zusätzlich die lokalen Optimierungen, sowie die globale Optimierung.

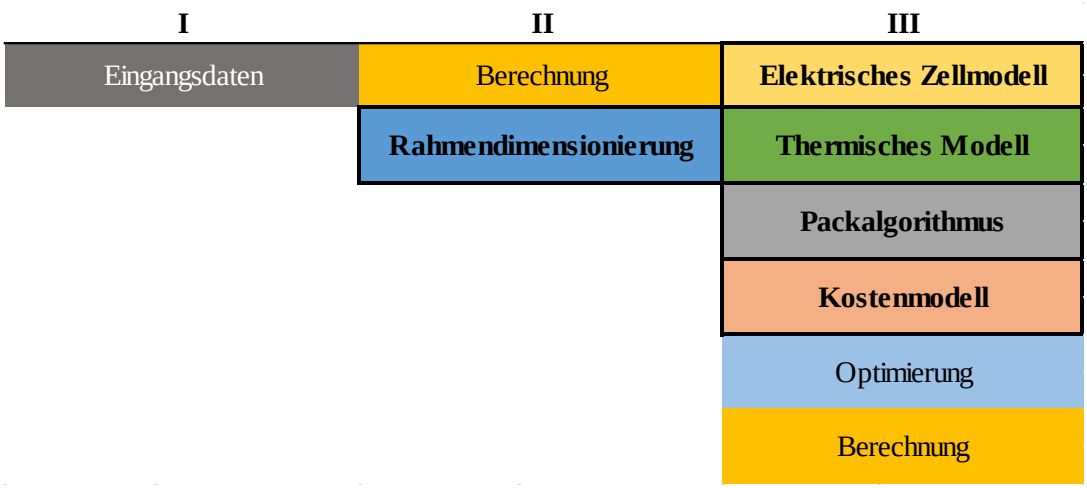


Abbildung 3.9: Abgeleitetes Lösungskonzept in drei Stufen. I: Eingangsdaten (Konfiguration), II: Vorberechnungen und Dimensionierungen und III: Simulation mit Berechnungen und Optimierungen.

Aus dem abgebildeten Lösungskonzept wird bereits deutlich, dass eine Modularisierung vorgenommen werden kann. Jedes der Modelle kann grundsätzlich durch ein anders wirkendes Modell, unter Veränderung der Modellgüte und der Rechendauer, ausgetauscht werden. Die Einführung einer Modelldatenbank würde sich hier anbieten, um Optimierungen unterschiedlicher Aussagegüte und Schnelligkeit durchzuführen. Es ist zu erkennen, welche Variantenvielfalt mit dem vorgestellten Konzept möglich ist. Die Aussagegüte der Optimierung hängt mit der Modellgenauigkeit der verwendeten Modelle zusammen. Modelle mit ähnlicher Modellgüte machen sicherlich am meisten Sinn, da die Aussagefähigkeit bezogen auf das Gesamtsystem qualitativ stark eingeschränkt wird, wenn sich bereits ein einzelnes Modell erheblich gröber gestaltet, als die anderen. Die Verwendung einer sehr groben Bauraumbetrachtung (Volumen des Bauraums verglichen mit dem Volumen der verwendeten Zellen plus Zuschlag) ist beispielsweise bei einer explizit betrachteten Menge von Zellen, einem

ausgewählten thermischen System und einem Produktionskostenmodell für die Batterie wenig zielführend, um herauszufinden, ob die gefundene Batteriekonfiguration für einen Batteriehersteller in Frage kommt.
Die geeignete Auswahl des elektrischen und thermischen Zellmodells wurde bereits in (Frank et al., 2016a) vorgenommen. Für das elektrische Zellmodell wird ein ECM verwendet. Als thermisches Modell für die Zelle und für das Kühlsystem kommt ein Wärmeaustauschkoeffizientenmodell zum Einsatz. Bei beiden Modellen handelt es sich um Grey Box Modelle (siehe Frank et al., 2016a; Schmidt, 2013), welche sich durch eine kurze Rechenzeit unter Beibehaltung der physikalischen Bedeutung der Parameter auszeichnen.
Aus den möglichen mechanischen Modellen in Kombination mit der geometrischen Optimierung (siehe Abschnitt 2.4.4 und 2.5.2) wird ein Ansatz der Baumsuche ausgewählt. Diese Art Algorithmus eignet sich gut für die Anpassung an ein spezifisches Problem (hier die Batterieauslegung) und zeichnet sich durch einen geringen Berechnungsaufwand aus (siehe Abschnitt 2.5.2). Das so erzeugte Modell kann ebenfalls als Grey Box Modell bezeichnet werden. Der für die vorliegende Arbeit entwickelte Packalgorithmus wird in Abschnitt 4.4.2 ausführlich beschrieben.
Verschiedene Kostenmodelle wurden ebenfalls bereits in Abschnitt 2.4.3 vorgestellt. Entsprechend dem Fokus auf die frühe Entwicklungsphase ist eine überschlägige Kostenberechnung auf Basis von Zuschlagsfaktoren (wie in Richtlinie VDI 2225 Blatt 1 beschrieben) zielführend. Eine derartige Berechnung bietet den Vorteil allgemeingültige Daten zu verwenden, bietet aber dennoch die Möglichkeit die Parameter an einen bestimmten Anwendungsfall oder an spezifische, interne Gegebenheiten anzupassen. Das auf dieser Basis entwickelte Kostenmodell wird in Abschnitt 4.1.2 detailliert beschrieben.
Das betrachtete System ist ausschließlich die Hochvoltbatterie für ein elektrifiziertes Fahrzeug. Die Anforderungen müssen entsprechend gestaltet sein, beispielsweise ist für die Batterie der geforderte Strom (über ein Strom- oder Leistungsprofil) von Bedeutung, nicht jedoch die Beschleunigungszeit des entsprechenden Fahrzeugs. Dennoch werden einige Anforderungen von der Fahrzeugebene abgeleitet. Der Lastzyklus der Batterie kann aus einem Geschwindigkeitsprofil eines Fahrzeugs abgeleitet werden, der Bauraum für die Batterie ist abhängig vom Fahrzeugkonzept[28] und die thermischen Umgebungsbedingungen sind ebenfalls vom Fahrzeugkonzept abhängig. Den Eingang in eine Optimierung stellen somit die Anforderungen an die Batterie auf Basis der vier Haupteinflussfaktoren dar. Diese werden aus Fahrzeuggegebenheiten abgeleitet und von dem/der Batteriedesigner/in ausgestaltet, beispielsweise durch die Auswahl einer konkreten Batteriezelle oder einer maximalen Zelltemperatur. Eine ausführliche Betrachtung der Anforderungen und der Konfigurationsparameter wird in Abschnitt 4.3 durchgeführt. Des Weiteren erlaubt der Detaillierungsgrad der Modelle keine Betrachtung von Betriebsfestigkeit, EMV (Elektromagnetische Verträglichkeit), Dichtigkeit oder Alterung der Zellchemie.

[28] Wenn auch der Batteriehersteller diese Maße nicht beeinflussen kann und sie daher als gegeben angesehen werden können.

4 Modellbasierte Optimierung von Batteriesystemen

Nachdem im vorangegangenen Kapitel die Konzeptionierung für den modellbasierten optimalen Batterieentwurf vorgestellt wurde, wird nun der Bereich der Modellierung (siehe Abbildung 3.6, Seite 41) umgesetzt. Die Abschnitte 4.1 bis 4.4 behandeln hierbei die Bereiche der Modellbildung und der Modellanalyse, wobei Abschnitt 4.2 bereits einen Teil der Systemsynthese vorwegnimmt, um die Modellschnittstellen und die Ein- und Ausgangsgrößen der Gesamtoptimierung zu definieren. Die eigentliche Systemsynthese erfolgt in Abschnitt 4.5, gefolgt von der Systemanalyse in Form von drei unterschiedlichen Untersuchungen in Abschnitt 4.6. In Abschnitt 4.7 werden die Ergebnisse des Kapitels und vor allem der behandelten Untersuchungen zusammengefasst.

4.1 Verwendete Teilmodelle für die Konzeptumsetzung

Für jeden der vier Haupteinflussfaktoren existieren ein Modell oder eine Berechnungsmethode. Dadurch, dass das elektrische und das thermische Modell eng miteinander verknüpft sind, werden diese beiden Modelle in einem gemeinsamen Abschnitt vorgestellt. Dem folgen die Vorstellung des Batteriekosten- und zuletzt die Beschreibung des mechanischen Batteriepackmodells. Der letzte Unterabschnitt widmet sich der Validierung beziehungsweise der Plausibilisierung der verschiedenen Modelle.

4.1.1 Elektrisches und thermisches Zell- und Batteriepackmodell

Das elektrische und das thermische Zell-, sowie Kühlsystemmodell sind die zentralen Modelle für die Simulation der Batterie. Das elektrische Zellmodell ist durch ein Ersatzschaltbildmodell (ECM 1. Ordnung) umgesetzt (Abbildung 4.1), das thermische Modell als Wärmeaustauschkoeffizientenmodell[29] (siehe auch Liu et al., 2014b). In (Frank et al., 2016a) wurde bereits ausführlich erläutert, warum diese Modelle für die Optimierung zum Einsatz kommen und welches die Einflussparameter für die Optimierung sind. Die wichtigsten Gründe für die Modellauswahl waren die schnelle Berechnungsgeschwindigkeit, bei sehr guter Genauigkeit und physikalischer Bedeutung der Modellparameter (siehe auch Einhorn et al., 2013). Dies lässt eine physikalische Interpretation der Ergebnisse und der ermittelten Modellgrößen zu.

[29] Wärmeaustausch wird hier als Synonym für die Wärmeübertragung verwendet, bei welcher Wärmeenergie von einem Ort zu einem anderen Ort transportiert wird. Die Wärmeaustauschkoeffizienten W bezeichnen hier Materialkonstanten, mit deren Hilfe ein Wärmestrom bei bestehender Temperaturdifferenz errechnet werden kann.

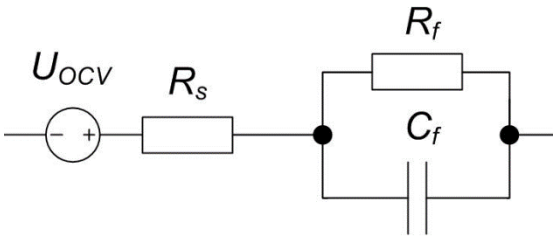


Abbildung 4.1: Elektrisches Ersatzschaltbild 1. Ordnung für eine Batteriezelle.

Das ECM ermittelt die resultierende Überspannung auf Grundlage des anliegenden Stroms. Dabei geht es von einem Ruhespannungszustand U_{OCV} aus, welcher abhängig vom derzeitigen Ladezustand der Batteriezelle ist:

$$U_{Zelle} = U_{OCV} + U_{ECM}. \tag{4.1}$$

Dementsprechend muss für die Modellierung des elektrischen Verhaltens ein Kennfeld bekannt sein, welches die Ruhespannung einem Ladezustand zuordnet. Das Ruhespannungsverhalten ist stark von der verwendeten Zellchemie abhängig (siehe Abbildung 2.3, Seite 10). Ferner muss die entnommene, oder geladene, Ladungsmenge ermittelt werden, um die zeitliche Ladezustandsveränderung abzubilden. Hierfür kommt ein einfacher Stromzähler zum Einsatz. Dieser integriert, ausgehend von einem Startzustand (SoC_{Init}) den fließenden Strom mit jedem Simulationszeitschritt auf und gibt damit die Kapazitätsänderung wieder. Mit Hilfe der Gesamtkapazität der Zelle $\left(C_{Zelle,nom}\right)$ kann so der aktuelle Ladezustand in Prozent ermittelt werden:

$$SoC = SoC_{Init} + \frac{\int i_{Zelle}\, dt}{C_{Zelle,nom}} * 100\ \%. \tag{4.2}$$

Der Spannungsabfall am ECM (U_{ECM}) wird aus dem Eingangsstrom und dem Gesamtwiderstand des ECM über das ohmsche Gesetz berechnet. Das zeitliche elektrische Verhalten der Zelle ergibt sich infolgedessen durch die Änderung des Eingangsstroms, des Gesamtwiderstands, der Temperatur und des Ladezustands. Die Abhängigkeiten von Temperatur und Ladezustand werden über Kennfelder für R_S, R_f und C_f im ECM abgebildet. Der zeitabhängige Gesamtwiderstand in Form einer Sprungantwort auf einen Stromimpuls ergibt sich damit zu:

$$R_{ECM} = R_S + R_f \left(1 - e^{-\frac{1}{\tau}t}\right). \tag{4.3}$$

Die Größe τ wird als Zeitkonstante bezeichnet und aus den Größen des RC-Glieds gemäß Gleichung 4.4 berechnet. Der zweite Summand wird bei der Ergänzung weiterer RC-Glieder mit den entsprechenden Werten vervielfältigt.

$$\tau = R_f C_f. \tag{4.4}$$

Der Widerstand R_s des ECM bildet den ohmschen Widerstand der Batteriezelle ab. Mit Hilfe des RC-Glieds werden vor allem die Diffusionsprozesse im Aktivmaterial, sowie im Elekt-

rolyten abgebildet. Durch die Ergänzung eines weiteren RC-Gliedes kann zusätzlich der Ladungstransport in der Schicht zwischen Elektrolyt und Elektrode abgebildet werden (vgl. Birkl und Howey; Keil und Jossen, 2012). Im Vergleich mit dem ECM 1. Ordnung erreicht die Ergänzung eines zweiten RC-Gliedes keine maßgeblichen Genauigkeitsvorteile (Einhorn et al., 2013). Im negativen Temperaturbereich hat das ECM 1. Ordnung eine schlechte Aussagefähigkeit (vgl. auch Birkl und Howey), weshalb in der vorliegenden Arbeit der Betriebsbereich der Temperatur für die Batterieauslegung bei ausschließlich positiven Temperaturen liegt. Im höherfrequenten (> 10 Hz) Bereich kann das elektrische Zellmodell ebenfalls keine genauen Aussagen treffen (vgl. Keil und Jossen, 2012; Birkl und Howey). Bis auf die Bereiche des Lastwechsels stellen Geschwindigkeitsprofile von Fahrzeugen keine hochfrequenten Zyklen dar, weshalb auch hier die Genauigkeit des ECM mit einem RC-Glied sehr gute Ergebnisse liefert (siehe auch Einhorn et al., 2013). Die Verifizierung des hier verwendeten ECM mit Fahrzeugmessungen wird im anschließenden Abschnitt durchgeführt.
Für die Abbildung eines kompletten Batteriepacks wird das Batteriezellmodell entsprechend der Verschaltung skaliert.

Neben dem elektrischen Verhalten, charakterisiert durch die Spannungsantwort auf einen Stromeingang, wird im ECM die entstehende Abwärme jeder Zelle ermittelt. Die Wärme wird hierbei über die Joule'sche Wärmeabgabe (ohmsche Verluste) an den beteiligten Widerständen im ECM berechnet:

$$\dot{Q}_{Ohm,a} = R_a * I_a^2\,, \qquad a = s, f. \tag{4.5}$$

Die so berechnete Wärmeabgabe wird im thermischen Zellmodell über die Wärmeaustauschkoeffizienten an die benachbarten Bereiche der Zelle weitergeleitet. Das thermische Zellmodell besteht aus fünf Punkten (z), welche über die Wärmeaustauschkoeffizienten $\left([\mathrm{W}] = \frac{W}{K}\right)$ miteinander verbunden sind (Abbildung 4.2). Für die zeitliche Temperaturänderung der Betrachtungspunkte gilt die folgende Gleichgewichtsgleichung:

$$m_z c_{p,z} \frac{dT_z}{dt} = \dot{Q}_{Ohm,z} + \sum W_{z\to h} \Delta T_{z,h}. \tag{4.6}$$

Mit m_z ist die Masse des betrachteten Punkts bezeichnet. $c_{p,z}$ ist dessen spezifische Wärmekapazität. Der Index h steht für den benachbarten Punkt, welcher sich in einem Wärmeaustausch mit dem Punkt z befindet. Bei den Wärmeaustauschkoeffizienten handelt es sich zum einen um einen Wärmeleitwert[30] und zum anderen um ein Produkt von Wärmeübergangskoeffizienten α mit einer aktiven Fläche A_h für den Wärmeaustausch. Dabei werden die Koeffizienten über die Zeit als konstant angenommen. Mit ΔT wird die Temperaturdifferenz zwischen den jeweiligen Punkten ausgedrückt[31].

Um die Wärmeaustauschkoeffizienten zu erhalten, sind Daten aus Zellvermessungen und White-Box Simulationen notwendig. Da die Entwicklung des thermischen Zellmodells kein Bestandteil der vorliegenden Dissertation war, wird hier nicht näher auf die detaillierte Ermittlung der Parameter eingegangen. Dennoch wird das thermische Zellmodell im weiteren

[30] Als Kehrwert des Wärmewiderstands.
[31] Eine Beschreibung für den Wärmeaustausch ausgehend von Punkt 1 (Abbildung 4.2) befindet sich im Anhang unter 6.2.

Verlauf dieses Abschnitts in die Modellvalidierung einbezogen, um seine Gültigkeit nachzuweisen.

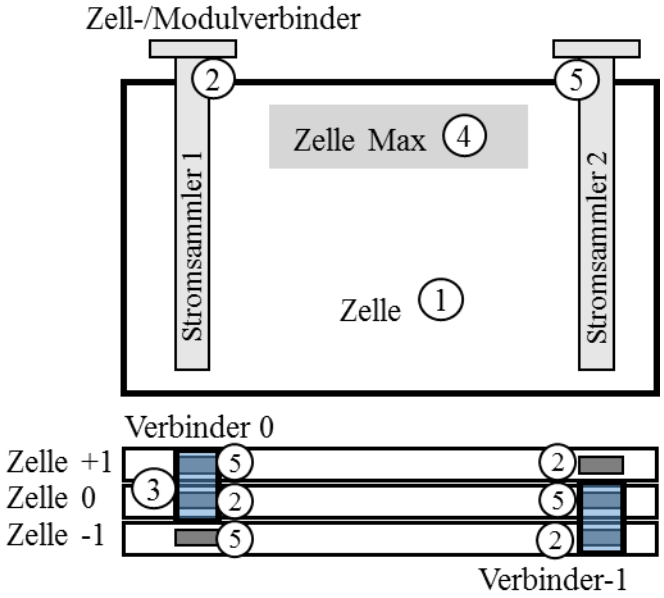


Abbildung 4.2: Thermisches Zellmodell mit 5 charakteristischen Bereichen des Wärmeaustauschs.

Modell des thermischen Kühlsystems

Bei dem Kühlsystem handelt es sich um eine aktive Flüssigkühlung mit Hilfe eines Kühlmittels. Als Kühlmittel kommt ein Wasser-Glykol Gemisch zum Einsatz. Modellbasierte Untersuchungen zur Auslegung von verschiedenen thermischen Systemen für Hochvolt-Fahrzeugbatterien hat Zhou in seiner Dissertation durchgeführt (Zhou, 2016). In der vorliegenden Arbeit sind der Wärmetauscher, der Verdampfer und die Kühlmittelpumpe nicht Teil des Systems (siehe dazu ebenfalls Zhou, 2016). In (Smith et al., 2014) wird die Auslegung der Kühlplatte mit einem ähnlichen Modell als eigene Mehrzieloptimierung durchgeführt. Im Gegensatz zu (Smith et al., 2014), wird hier die Einlasstemperatur als konstant (Umgebungstemperatur) angenommen und auf die Ortsauflösung entlang der Zellen verzichtet. Des Weiteren wird angenommen, dass die Kühlmitteldurchflussrate ($\dot{v}_{Fl}$) durch die externe Pumpe in einem Bereich zwischen 0 und 700 l/h eingestellt werden kann[32].
Wichtig für die Dimensionierung des Kühlsystems ist die Wärmeabgabe an die Kühlplatte unter den Zellen. Hierfür wird das bestehende thermische Zellmodell an ein weiteres Wärmeaustauschkoeffizientenmodell gekoppelt. Die Wärmeübertragung wird anhand eines einzelnen Batteriemoduls berechnet. Die Summe der Wärme aller Zellen in einem Modul, welche über den Zellboden abgegeben wird, dient als Eingang in das Kühlplattenmodell. In der Kühlplatte befindet sich das Kühlmittel (siehe Abbildung 4.3). Entsprechend Gleichung 4.6 wird die Temperaturänderung der Kühlplatte über die Kühlplattenfläche, das Gewicht der Platte, die spezifische Wärmekapazität der Platte und den flächenabhängigen Wärmeaus-

[32] Da die Kühlmittelpumpe kein Teil des Batteriemodells ist, wird hier nicht zwischen verschiedenen Leistungs- und Preisklassen der Pumpe unterschieden, sondern davon ausgegangen, dass die Kühlmitteldurchflussrate entsprechend der vorhandenen Notwendigkeit Selbiger immer zur Verfügung gestellt werden kann.

tauschkoeffizienten berechnet. Dabei steht die Platte zusätzlich in Verbindung mit der Umgebung und dem Kühlmittel (siehe Abbildung 4.3). Die Temperaturänderung des Kühlmittels wird ebenfalls über eine Gleichgewichtsgleichung ermittelt. In diesem Fall wird die Gleichung um den Massenfluss des Kühlmittels ergänzt und die zeitliche Veränderung der spezifischen Wärmekapazität des Kühlmittels berücksichtigt:

$$\rho_{Fl} V_{Fl} \left(c_{p,out} \frac{dT_{out}}{dt} + T_{out} \frac{dc_{p,out}}{dt} \right) = \frac{dm_{Fl}}{dt} \left(c_{p,in} T_{in} - c_{p,out} T_{out} \right) + W_{Plate \rightarrow Fl} \Delta T_{Plate \rightarrow Fl}. \quad \textbf{4.7}$$

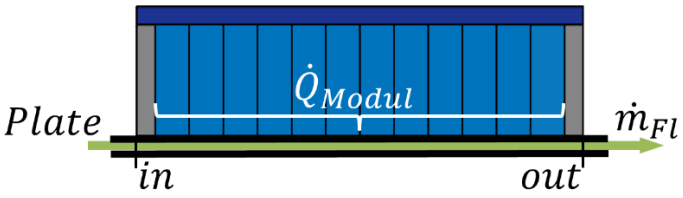


Abbildung 4.3: Prinzip des Kühlsystemmodells.

Der Index Fl steht für das Fluid. Die spezifische Wärmekapazität c_p des Kühlmittels verändert sich mit der Temperatur desselben. Es wird daher zwischen der spezifischen Wärmekapazität bei Eingangstemperatur und bei Ausgangstemperatur unterschieden. Die Kühlmitteldurchflussrate $\dot{v}_{Fl}$ wird über die Kühlmitteldichte ρ_{Fl} im Vorhinein in einen Massenfluss umgerechnet, welcher in Gleichung 4.7 als $\frac{dm_{Fl}}{dt}$ gekennzeichnet ist. Die Kühlplattenfläche A_{Plate} wird auf Basis der Zellanzahl über die Zellbodenflächen berechnet und ist in dem Wärmeaustauschkoeffizienten $W_{Plate \rightarrow Fl}$ enthalten. Um später von einem validierten Kühlplattenmodell auf ein neu dimensioniertes zu schließen, wird die Kühlplattendicke als unveränderlich angenommen (5 mm). Des Weiteren bleibt das Verhältnis zwischen Fluidvolumen in der Kühlplatte zu Kühlplattenfläche gleich, wodurch in einem neu dimensionierten Kühlsystem das notwendige Fluidvolumen berechnet werden kann. Das Fluidvolumen wird in Gleichung 4.7 für die Ermittlung der Kühlmittelaustrittstemperatur an einem Modul benötigt.

Als Temperaturangabe in der späteren Optimierung wird die mittlere Zelltemperatur aller Zellen (ermittelt aus dem jeweiligen Punkt 1 (siehe Abbildung 4.2)) in einem Modul verwendet. Diese Temperaturangabe gibt also nicht die maximale Temperatur in einer Zelle an. Grund hierfür ist, dass das Kühlplattenmodell ebenfalls nur die mittlere Wärmeabgabe eines Moduls als Eingang besitzt. Es existiert damit keine lokale Auflösung der Temperaturverteilung in der Kühlplatte. Eine Aussage zu einer expliziten Maximaltemperatur einer Einzelzelle ist daher nicht zu treffen und wäre irreführend. Ferner ist die Temperaturverteilung im Modul stark von der inneren Geometrie der Kühlkanäle in der Kühlplatte und damit von der Strömungsart des Kühlmittels abhängig, welche ebenfalls nicht in dem Kühlplattenmodell berücksichtigt wird.

Modellvalidierung des elektrischen und thermischen Modells

Für die Verifizierung der elektrischen und thermischen Modelle, werden Fahrzeugmessungen mit einem Serienmodell des Porsche Cayenne S E-Hybrid vorgenommen. Die Plausibilisierung des Kostenmodells und der späteren mechanischen Voroptimierung wird an dem Batteriepack desselben Fahrzeuges durchgeführt.

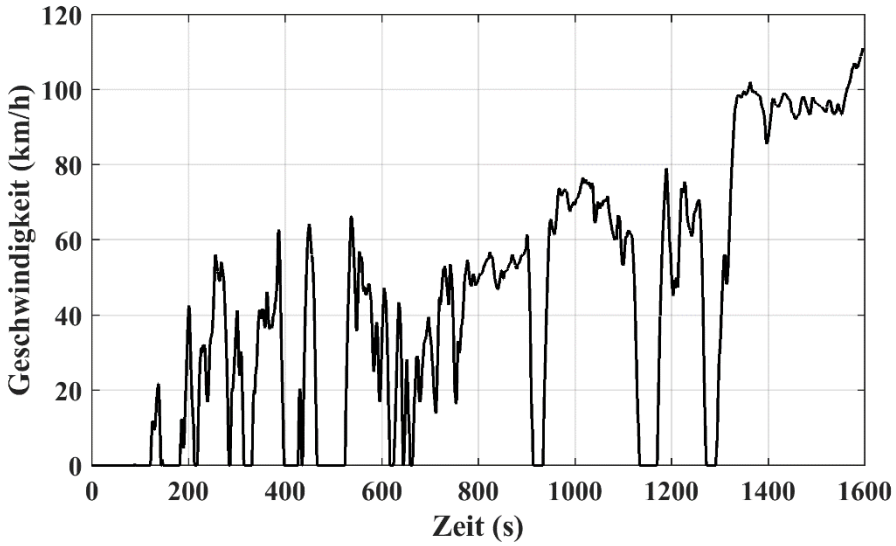


Abbildung 4.4: Geschwindigkeitsprofil des Messzyklus mit deaktiviertem Kühlsystem.

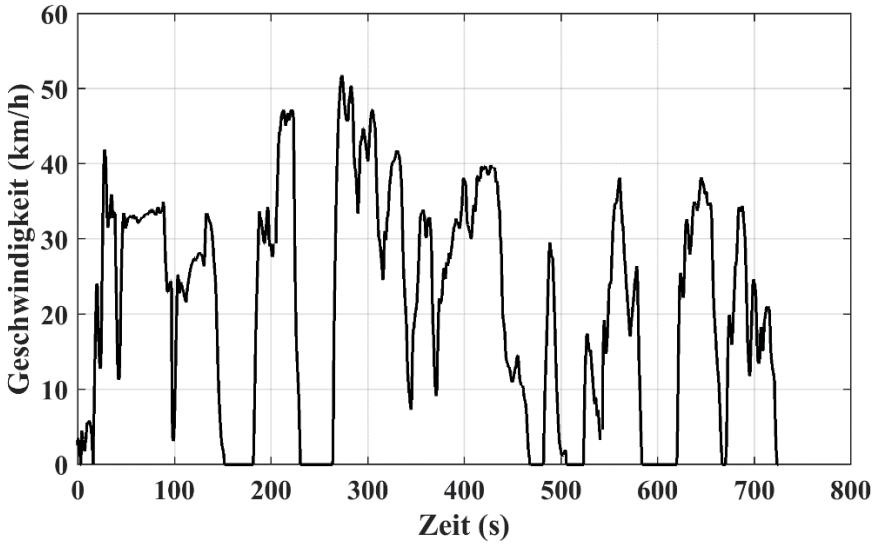


Abbildung 4.5: Geschwindigkeitsprofil des Messzyklus mit aktiviertem Kühlsystem.

Die beiden Messungen unterscheiden sich im Wesentlichen in der Aktivierung des Kühlsystems. Auf beiden Zyklen wird das elektrische Verhalten überprüft. Um das thermische Zellmodell zu überprüfen, wird der Fahrzyklus mit deaktiviertem Kühlsystem verwendet. Dadurch kann das thermische Verhalten der Zellen direkt, ohne Rückwirkungen aus dem Kühlsystemmodell verifiziert werden. Das Modell des Kühlsystems wird darauffolgend anhand des Messzyklus mit aktiviertem Kühlsystem verifiziert. In Abbildung 4.4 und Abbildung 4.5 sind die Geschwindigkeitsverläufe der beiden Messungen dargestellt. Dort ist zu erkennen, dass es sich bei beiden Zyklen um anwendungsnahe Szenarien für den elektrischen

Betrieb des Fahrzeugs handelt, welches eine maximale elektrische Höchstgeschwindigkeit von 125 km/h erreicht (vgl. Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, 2017). Als Eingang in das Simulationsmodell dient der gemessene Batteriestrom.

Die wichtigsten Größen für die Simulation der beiden Zyklen sind in der Tabelle 4.1 zu finden. Der SoHC (State-of-Health Capacitive) beschreibt die kapazitive Alterung der Batteriezellen zum Zeitpunkt der Messungen. Die Starttemperaturen und –SoCs im Modell mussten hierfür den realen Bedingungen angepasst werden.

Tabelle 4.1: Konfiguration der Simulationsmodelle für die elektrische und thermische Verifizierung

	Zyklus ohne Kühlung	**Zyklus mit Kühlung**
Elektrische Batteriekonfiguration	104s1p	
Starttemperatur Pack	32,38 °C	32,26 °C
Starttemperatur Einlass Fluid	32,49 °C	27,33 °C
Starttemperatur Auslass Fluid	32.19 °C	28,49 °C
SoHC	91 %	97 %
$\dot{v}_{Fl}$	0 l/h	734 l/h
SoC_{Max}	91 %	51 %
SoC_{Min}	18 %	26 %

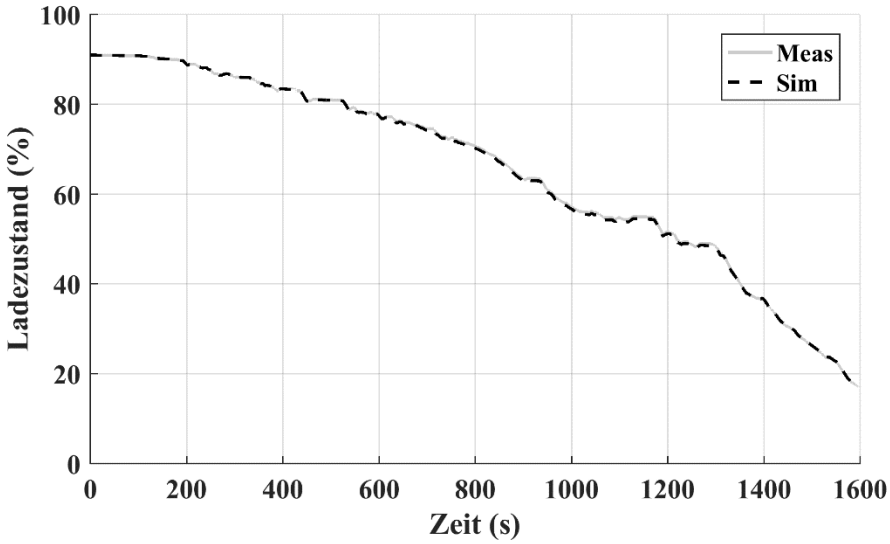


Abbildung 4.6: Vergleich der SoC-Verläufe zwischen Messung (grau) und Simulation (schwarz, gestrichelt) auf dem Zyklus mit deaktiviertem Kühlsystem.

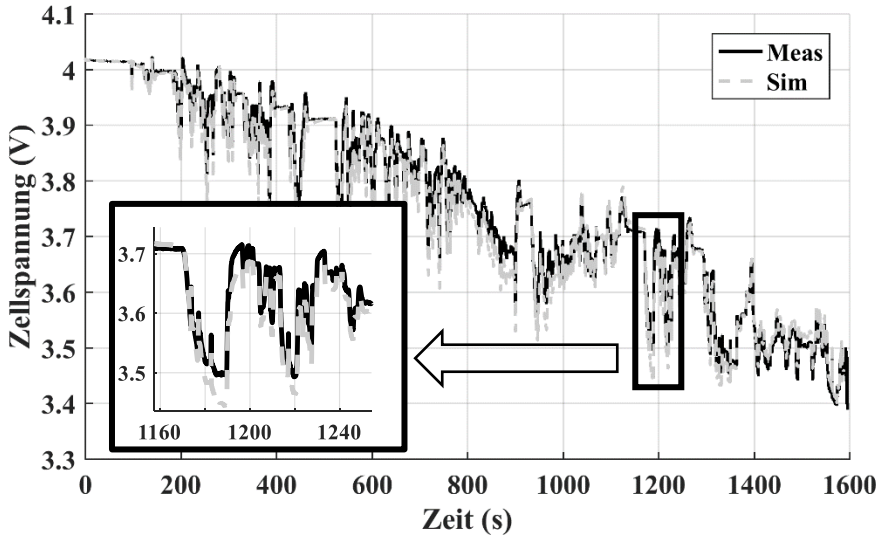


Abbildung 4.7: Vergleich der Zellspannungsverläufe zwischen Messung (grau) und Simulation (schwarz, gestrichelt) auf dem Zyklus mit deaktiviertem Kühlsystem.

Datenvergleich Zyklus ohne Kühlung

Die wichtigsten Vergleichsgrößen für die Verifizierung des elektrischen Verhaltens sind der SoC und die Zellspannung. Diese beiden Größen sind in Abbildung 4.6 und Abbildung 4.7 über der Simulationszeit aufgetragen. Der SoC dient der Ermittlung des aktuellen OCV-Werts, die Parameter des ECMs ergänzen die Überspannung, welche aufgrund des Eingangsstroms entsteht. Der SoC-Verlauf der Simulation entspricht sehr genau dem SoC-Verlauf der Messung. Der mittlere quadratische Fehler (MSE – Mean Square Error) beträgt für den SoC 0,0927. Das entspricht einem RMSE (Root Mean Square Error) von 0,304 % (siehe Tabelle 4.2). Der Vergleich der Zellspannung (Abbildung 4.7) ergibt einen MSE Wert von 4,73e-4 beziehungsweise 0,0217 V (RMSE). In derselben Abbildung ist zusätzlich zu erkennen, dass die größten Fehler im Bereich der Lastwechsel, also der höheren Frequenzen auftreten.

Um das thermische Modell der Batteriezellen zu verifizieren, wurde das Temperatursignal der Temperatursensoren im Batteriepack mit dem Temperaturverlauf in der Simulation in Abbildung 4.8 dargestellt. Die Temperaturmessstellen im Batteriepack befinden sich an zwei Stellen je Modul auf zwei Zellverbindern. Da das thermische Zellmodell ebenfalls die Zellverbinder abbildet, können die Temperaturen miteinander verglichen werden. Zusätzlich wurde für die simulierte Temperatur ein einfaches Sensormodell (PT_1) hinterlegt, welches das physikalische Verhalten der realen Temperatursensoren wiedergibt. Es ist zu erkennen, dass die simulierte Zellverbindertemperatur mit fortschreitender Simulationsdauer von der gemessenen Temperatur abweicht. Dieses Verhalten ist auf die Modellierungsungenauigkeiten zurückzuführen, welche die Temperaturabweichung über die Zykluslaufzeit erhöht. Zudem bleiben die mittleren Fehlerwerte in einem guten Bereich (MSE: 0,48; RMSE: 0,69 K). Die absolute Abweichung am Ende des Zyklus beträgt 1,88 K. Dieses Verhalten muss bei der späteren Interpretation der Ergebnisse bezüglich des Temperaturverhaltens eines Batteriepacks berücksichtigt werden, führt im schlimmsten Fall jedoch lediglich dazu, dass eher ein Kühlsystem verwendet wird, obwohl keines verwendet werden müsste. Der umgekehrte

Fall, bei dem kein Kühlsystem in einem gefundenen Design vorgesehen wird, obwohl eines benötigt würde, hätte einen eher negativen Einfluss auf die Aussagekraft des Modells.

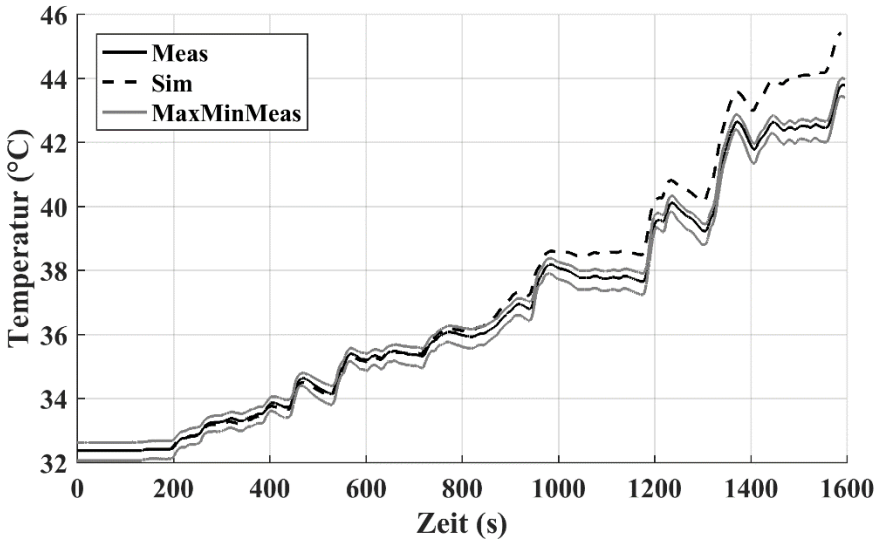


Abbildung 4.8: Vergleich der Zellverbindertemperaturen zwischen Messung (schwarz[33]) und Simulation (schwarz, gestrichelt) auf dem Zyklus mit deaktiviertem Kühlsystem. Mit helleren Linien sind die maximale und minimale Zellverbindertemperatur im Batteriepack abgebildet.

Datenvergleich Zyklus mit Kühlung

Auf dem Messzyklus mit aktivierter Kühlung erreicht das elektrische Verhalten des ECM eine Güte von 0,0053 (MSE) beziehungsweise 0,0727 % (RMSE) für den SoC und 6,46e-5 (MSE) beziehungsweise 0,008 V (RMSE) für die Zellspannung[34]. Die mittleren Fehler sind damit kleiner, als auf dem Zyklus ohne Kühlung, welcher allerdings eine höhere elektrische Leistung und ein größeres Ladezustandsfenster verwendet. Des Weiteren ist der mittlere Fehler des thermischen Gesamtsystems kleiner als zuvor, bei der isolierten Betrachtung des thermischen Zellmodells (siehe Tabelle 4.2). In Abbildung 4.9 ist eine sehr gute Übereinstimmung zwischen modellierter und gemessener Zellverbindertemperatur zu erkennen. Im Bereich der Abkühlung zeigt der simulierte Zellverbinder eine stärkere Abkühlkurve, als der Mittelwert aus den gemessenen Zellverbindertemperaturen. Insgesamt bleibt die modellierte Temperatur bei aktiviertem Kühlsystem jedoch im Bereich der maximalen und minimalen Zellverbindertemperatur.
Wird ein Kühlsystem verwendet, so muss die oben genannte Berücksichtigung des zunehmenden Fehlers im thermischen Zellmodell daher nicht vorgenommen werden. Zudem wird für alle weiteren Betrachtungen die mittlere Zelltemperatur verwendet, welche eine tatsächliche Größe der Batteriezellen darstellt, und nicht die Temperatur der Zellverbinder.

[33] Dargestellt ist die mittlere Temperatur, ermittelt aus allen Temperaturmessstellen im Batteriepack.
[34] Die vergleichenden Abbildungen hierzu befinden sich im Anhang (Kapitel 6.2.1).

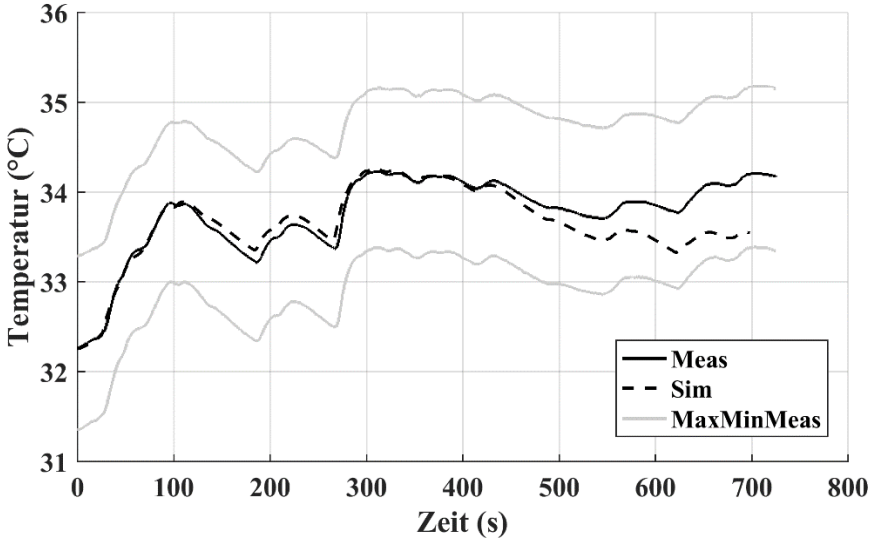


Abbildung 4.9: Vergleich der Zellverbindertemperaturverläufe zwischen Messung[35] (schwarz) und Simulation (schwarz, gestrichelt). Zusätzlich sind die maximale und minimale Zellverbindertemperatur in der Messung in hellen Linien aufgetragen.

Tabelle 4.2: Mittlere Fehler für die Verifizierungsgrößen SoC, Temperatur und Zellspannung auf beiden Zyklen

	Zyklus ohne Kühlung	**Zyklus mit Kühlung**
	Mean Square Error (MSE)	
SoC	0.0927	0.0053
$T_{Zellverbinder}$	0.4778	0.0525
U_{Zelle}	4.7296e-04	6.4584e-05
	Root Mean Square Error (RMSE)	
SoC	0.3045 %	0.0727 %
$T_{Zellverbinder}$	0.6912 K	0.2292 K
U_{Zelle}	0.0217 V	0.0080 V

4.1.2 Batteriekostenmodell

In diesem Abschnitt wird das für die Optimierung verwendete Kostenmodell beschrieben. Es handelt sich um ein hybrides Modell. Ein hybrides Modell nutzt Bestandteile einer Bottom-Up und einer Top-Down Berechnung. Bei einer Bottom-Up Berechnung werden die Gesamtkosten aus ermittelten Einzelteilkosten bestimmt. Die Top-Down Berechnung nutzt bekannte oder geschätzte Gesamtkosten und bricht diese mit Hilfe von prozentualen Angaben für die Zusammensetzung der Kosten auf die Einzelteile herunter (vgl. Cluzel und Douglas, 2012, S. 42).

Der (Verkaufs-)Preis für eine Hochvoltbatterie setzt sich aus den Kosten für Einkauf und Herstellung der Bauteile (Zellen, Verbindungselemente, BCU, BDU, CSCs, Batterierahmen, thermisches System und sonstige Bestandteile), die zusätzlich anfallenden Gemeinkosten

[35] Dargestellt ist die mittlere Temperatur, aus allen gemessenen Zellverbindertemperaturen im Batteriepack.

(Produktions- und Entwicklungskosten), sowie eine Umsatzrendite als Gewinnaufschlag zusammen. Im vorliegenden Modell werden alle Bauteile als Zukaufteile betrachtet, deren Kosten, aus Sicht des Batterieherstellers, auf verschiedene Methoden bestimmt werden (Bottom-Up). Die jeweilige Methode wird in den folgenden Abschnitten beschrieben. Die Kosten für sonstige Bestandteile (Kabel, Kühlmittelschläuche, Schrauben, etc.) und die Produktions- und Entwicklungskosten auf Seiten des Batterieherstellers, werden anteilig bestimmt (Top-Down).
Die Eingangsparameter des Modells sind das Produktionsjahr, die produzierte Stückzahl und eine Lernrate[36]. Das betrachtete Produktionsjahr dient der Inflationsbereinigung der Teilepreise und der Festlegung des Wechselkurses zwischen $ und €. Dadurch kann ein Batteriepreis für ein bestimmtes Jahr berechnet werden. Eine Prognose ist mit Hilfe des Produktionsjahrs nicht möglich. Ein Prognosecharakter kann durch die Stückzahlveränderung eingebracht werden. Da die Berechnung der Einzelteilkosten stückzahlunabhängig geschieht, muss für die Ermittlung des Stückzahleinflusses eine Einordnung der Ergebnisse vorgenommen werden, um eine Basisproduktionsstückzahl zu ermitteln. Dies geschieht am Ende des Abschnitts, nachdem das Kostenmodell plausibilisiert wurde.
Zuletzt werden anhand einer Sensitivitätsanalyse das Verhalten des Kostenmodells und der Einfluss der internen Parameter auf die Ergebnisse untersucht. Für alle hier durchgeführten Kostenberechnungen wird das Jahr 2016 als Bezugsjahr verwendet.

Kosten der Batteriezellen

Die Kosten für den Einkauf einer Batteriezelle werden aus veröffentlichten Quellen zu Zellpreisen in $/kWh ermittelt. Die verwendeten Daten können Abbildung 4.10 entnommen werden. Je nach Quelle sind geschätzte (tatsächliche[37]) Kosten/Preise aufgeführt, beinhalten die Daten Kostenprognosen oder sind die Daten Kostenmodellen entnommen[38]. Die Preise variieren dementsprechend stark. Mit Hilfe der nominellen Kapazität und der nominellen Zellspannung wird ein Einkaufspreis für eine Batteriezelle zu dem betrachteten Jahr ermittelt. Dafür wird die abgebildete Trendlinie verwendet und gegebenenfalls eine Auf- oder Abrundung durchgeführt. Die Quellen, welche explizit angegeben haben, dass es sich um die Kosten von PHEV Zellen handelt lassen keine Aufstellung einer Trendlinie zu.
Mit einem Dreieck sind die Datenpunkte der Quelle markiert, welche für die spätere Beispielberechnung verwendet werden. Diese Quelle wurde ausgewählt, da es hier Angaben zu Zell- und zu Packpreisen gibt.

[36] Mit einer Lernrate wird die Senkung der Herstellkosten über eine steigende Stückzahl beschrieben. Eine detaillierte Beschreibung der Lernrate folgt in Kapitel 4.1.2.3.
[37] Auch wenn absolute Kosten angegeben wurden, kann es sich nur um geschätzte Kosten handeln, da die tatsächlichen Kosten von den Herstellern nicht angegeben werden.
[38] Bei Quellen älter als 2015 wurden dort getätigte Prognosen von den Kostenangaben ausgespart.

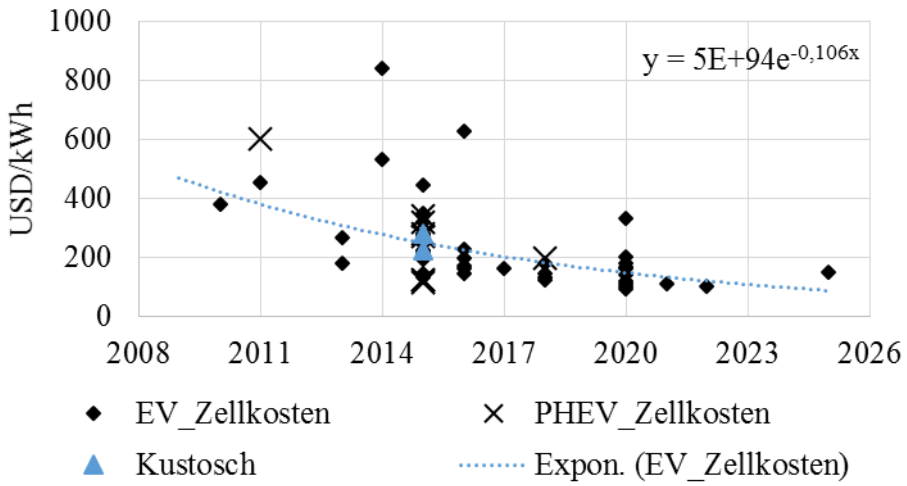


Abbildung 4.10: Batteriezellpreise unterschiedlicher Quellen in $/kWh (BioAge Group, 2014b; Chatterley, 2015; Choi, 2016; Cluzel und Douglas, 2012; Cole, 2015; Hackmann und Stanek, 2016; Kustosch, 2016; Ostadi und Kazerani, 2014; Thielmann et al., 2015; Waheed, 2016; Patry et al., 2015; Petri et al., 2015; BINE Informationsdienst, 2017; Pillot, 2017; Anderman, 2016).

Kosten des Batterierahmens

Die Kosten des Batterierahmens werden durch das verwendete Material, dessen Menge und die Produktions- und Entwicklungskosten beim Hersteller des Rahmens definiert.
Die Gestalt des Crashrahmens für die Batterie hängt von der Einbauposition und der Fahrzeugklasse ab. Hierfür existieren beispielhafte Auslegungen, welche auf Basis der geltenden Normen für die Crashanforderungen und weitere Kriterien ermittelt wurden[39]. Die genaue Gestalt und Größe des Rahmens wird durch die mechanische Voroptimierung bestimmt, welche in 4.4.2 detailliert beschrieben wird.
Die Berechnung der Rahmenkosten erfolgt über eine Zuschlagskalkulation. Das Materialgewicht (m_{Rahmen}) des Rahmens wird mit den spezifischen Materialkosten $\left([k_{mat}] = \frac{\$}{t}\right)$ und einem Faktor[40] für die Produktion- und Entwicklung bei einem Zulieferer multipliziert. Zusammen mit der Umsatzrendite (Ur) des Herstellers ergeben sich so die Kosten für den Einkauf des Rahmens:

$$K_{Rahmen} = m_{Rahmen}\, k_{Mat}\, Z_{Herstellung} Ur. \qquad \textbf{4.8}$$

Kosten des Kühlsystems

Die Variabilität der Kosten für das Kühlsystem folgt im Wesentlichen der Größe und der Art der verwendeten Kühlplatten. Da sich diese Größe direkt aus der Anzahl der verwendeten Zellen ergibt, ist dies ein unveränderlicher Parameter, wenn die Kostenberechnung durchgeführt wird. Die Kühlplattendicke wird für alle Kühlplatten als konstant und über die verschiedenen Kühlsysteme als gleich angesehen. Für die Ermittlung der Kühlsystemkosten

[39] Siehe Beschreibung des mechanischen Modells in Abschnitt 4.1.3 und (Frank und Pan, 2017).
[40] Die Bestimmung und die Zuordnung der Zuschlagsfaktoren wird im folgenden Unterkapitel 4.1.2.1 beschrieben.

wird erneut eine Zuschlagskalkulation durchgeführt. Diese berücksichtigt das Gesamtvolumen der Kühlplatten, sowie deren Material und einen Zuschlag für den Einkauf des Systems bei einem Zulieferer. Des Weiteren wird das Volumen des enthaltenen Kühlmittels subtrahiert, um den Materialbedarf zu ermitteln:

$$K_{Kühlplatten} = \left(V_{Kühlplatten} - V_{Fl}\right) \rho_{Mat}\, k_{Mat}\, Z_{Herstellung} Z_{Komplexität} Ur. \qquad \textbf{4.9}$$

Mit $Z_{Komplexität}$ wird zusätzlich ein Zuschlagsfaktor für die Entwicklung und Fertigung der Kühlplatte eingeführt, da es sich um keine einfache Metallkonstruktion handelt und daher der ermittelte Zuschlagsfaktor für Produktion- und Entwicklung der Komplexität der Kühlplattenentwicklung und –herstellung nicht gerecht werden kann. Der Komplexitätsfaktor wird nach dem Batterietyp (für EV (1 oder 2) oder PHEV (3-5)) und nach dem erwarteten Aufwand für Fertigung und Entwicklung der Kühlplatte (Anzahl der Kühlplatten, Leistungsdurchsatz, Einbauort, Anforderungen bezüglich des Druckverlusts zwischen Fluidein-/-ausgang und die thermischen Anforderungen) gewählt. Die kleinsten Werte werden für wenig komplexe Formen der Kühlvorrichtung (einfache Kühlkanäle) verwendet oder wenn keine näheren Informationen zu der vorgesehenen Kühlplatte vorliegen. Die höheren Werte werden gewählt, wenn die thermischen Anforderungen höher sind und/oder der Einbauort (besonders bei PHEV) zusätzliche Herausforderungen an die Batteriekühlung stellt[41].

Kosten von Battery Control Unit (BCU) und Battery Disconnect Unit (BDU)

Die Kosten der BCU und der BDU werden als Festkosten angesetzt. Als Prämisse dient die Annahme, dass es nur eine BCU und eine BDU pro Batteriepack gibt und die Spannungslage der Batterie keinen Einfluss auf die Kosten der beiden Bauteile besitzt[42]. Als Basis für die Abschätzung der Kosten dienen die Werte aus dem BatPaC Tool (siehe Nelson et al., 2012, S. 60).

Tabelle 4.3: Kosten für eine BDU und eine BCU entnommen aus (Nelson et al., 2012, S. 60)

Bauteil	Kosten
Battery Control Unit	$ 100
Battery Disconnect Unit	$ 200

Kosten der Cell Supervision Circuit

Die Modulplatine für die Überwachung der Zellspannungen, sowie der Modultemperatur (CSC) wird ebenfalls mit Festkosten versehen. Prämisse für diese Vereinfachung ist, dass eine CSC der Modulgröße angepasst und der Entwicklungsaufwand für die Anpassung der

[41] In den späteren Anwendungsfällen in Kapitel 4.6 wird ein Komplexitätsfaktor von 1 verwendet.

[42] Dies ist technisch nicht der Fall. Vor allem die Kosten der Baugruppe, welche die BDU Funktionalität übernimmt sind abhängig von der Spannungslage und dem zu übertragenden Strom. Die Preise unterliegen jedoch derart starker Unsicherheit, dass die Annahme eines Festpreises gerechtfertigt ist, um vergleichbare Ergebnisse zu erzeugen. Generell ist auch die BCU abhängig von der angelegten Spannung, da bei höherer Spannung größere Luft- und Kriechstrecken der Elektronik berücksichtigt werden müssen. Hier gilt, dass eine BCU für eine hohe Spannung ebenfalls in der Lage ist die Regelung einer Batterie mit niedrigerer Spannung zu übernehmen.

Anzahl zu überwachender Zellen gleichgroß ist. Bei einer Standardisierung auf eine bestimmte Modulgröße können die Kosten gegebenenfalls verringert werden. Für den Fall, dass eine Standard-CSC existiert, für welche keine Neuentwicklung stattfindet kann der Stückpreis ebenfalls gesenkt werden.

Tabelle 4.4: Kosten einer CSC entsprechend (Nelson et al., 2012, S. 60), für ein einzelnes Modul

Bauteil	Kosten
Cell Supervision Circuit	$ 20

In der Betrachtung der Gesamtkosten werden BDU, BCU und CSCs unter dem Stichwort „BMS“ (Battery Management System) zusammengefasst.

Kosten der Verbindungselemente

Als Verbindungselemente werden die Zell- und die Modulverbinder bezeichnet. Diese stellen eine elektrische Verbindung unter den Zellen beziehungsweise den Modulen her. Für die Verbindungselemente kommen Aluminium oder Kupfer zum Einsatz. Bei einer großen Batterie ist der entsprechende Materialbedarf der Zell- und Modulverbinder nicht zu vernachlässigen. Deshalb werden die Verbindungselemente in das Kostenmodell integriert.

Kosten der Zellverbinder

Die Kostenermittlung für die Zellverbinder erfolgt über die Materialkosten, die Maße und einen Zuschlagsfaktor für die Fertigung bei einem Zulieferer (Gleichung 4.12). Ein zentraler Bestandteil der Berechnung der Kosten für einen Zellverbinder ist eine Annahme über dessen Gesamtlänge. Hierfür werden zum einen die Zellmaße[43] und zum anderen ein Faktor für den Längenaufschlag durch den Kompensationsbereich eines Zellverbinders verwendet (siehe Abbildung 4.11).

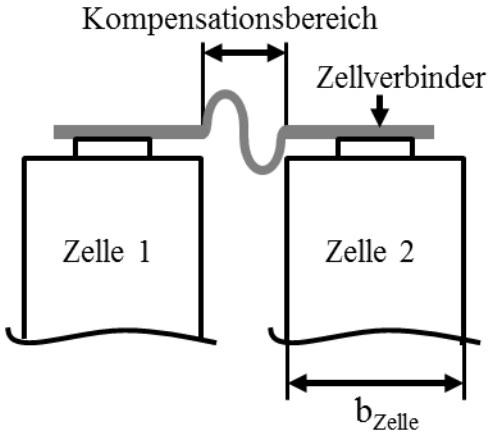


Abbildung 4.11: Zeichnung eines typischen Zellverbinders für eine Hochvoltbatterie im Fahrzeug (vgl. Werz, 2012; Diez et al., 2014).

Es wird angenommen, dass der Kompensationsbereich ein Drittel der Länge des Zellverbinders ausmacht. Die Anschlusspunkte an den Zellen sind etwas länger, als die halbe Breite

[43] Als Grundlage dienen prismatische Zellen.

einer Zelle. Damit kann die Länge eines Zellverbinders überschlägig wie folgt berechnet werden:

$$L_{Zellverbinder} = 2\, b_{Zelle}. \qquad \textbf{4.10}$$

Die Querschnittsfläche des Zellverbinders ergibt sich aus dem Dauerstrom, den der Verbinder übertragen muss. Für die Ermittlung des Dauerstroms (Gleichung 4.11) wird auf die maximale elektrische Geschwindigkeit des betreffenden Fahrzeugs zurückgegriffen und die notwendige elektrische Leistung über die Zugkraftgleichung der Längsdynamik für eine konstante Geschwindigkeit bestimmt. Hierbei müssen die Leistungsverluste auf dem Weg von der Batterie bis zum Moment am Rad berücksichtigt werden. Die elektrische Leistung wird von der Hochvoltbatterie bereitgestellt, daher wird der elektrische Leistungsbedarf durch den maximalen Energieinhalt der Batterie geteilt und so der maximale Dauerstrom bestimmt. Der Querschnitt des Zellverbinders wird anschließend aus der DIN 43670 für Stromschienen aus Aluminium beziehungsweise der DIN 43671 für Stromschienen aus Kupfer bestimmt. Dafür werden eine Temperatur der umgebenden Luft und eine maximale Stromschienentemperatur benötigt. Diese werden zu 20 °C (Lufttemperatur) und 50 °C Stromschienentemperatur festgelegt. Dies ergibt einen Korrekturfaktor von k_2 = 1. Weitere Korrekturfaktoren müssen nicht berücksichtigt werden.

$$I_{Dauer} = \frac{P_{el}}{E_{Nom}}\, C_{Zelle,nom}\, n_{Parallel}\, k_2. \qquad \textbf{4.11}$$

Mit E_{Nom} wird der nominelle Energieinhalt des Batteriepacks bezeichnet. Für die Kapazität einer einzelnen Zelle wird die Variable $C_{Zelle,nom}$ verwendet. Die Anzahl parallel verschalteter Zellen wird über $n_{Parallel}$ beschrieben. Da auf Zellebene parallel geschaltet wird, müssen die Zellverbinder den gesamten Packstrom tragen können. Für die Berechnung der Kosten eines Zellverbinders ergibt sich die folgende Gleichung:

$$K_{Zellverbinder} = A_{Zellverbinder}\, L_{Zellverbinder}\, \rho_{\mathrm{Mat}}\, k_{Mat}\, Z_{Zulieferer} Ur. \qquad \textbf{4.12}$$

Kosten der Modulverbinder

Die Berechnung der Kosten für einen Modulverbinder erfolgt ähnlich der Berechnung der Kosten für einen Zellverbinder. Ein Unterschied besteht in der Feststellung der Länge eines Modulverbinders. Basierend auf einer gleichmäßigen Verteilung der Module auf einer einzelnen Ebene im Batteriepack und der Annahme, dass die Module von der Mitte der Enden des Moduls mit dem benachbarten Modul in Reihe verbunden werden, kann die Länge eines einzelnen Modulverbinders über die Breite eines Moduls überschlagen werden (siehe Abbildung 4.12). Durch die Schätzung über die Modulbreite wird keine Änderung an der Materialberechnung des Modulverbinders vorgenommen, wenn die Batterie über mehrere Ebenen aufgeteilt ist, was mindestens einen Modulverbinder verlängern würde. Des Weiteren können kürzere Modulverbinder eingesetzt werden, wenn man den Abgriff am Modul an die Modulverteilung anpasst. Dieser Vorgang geht über das reine Entwurfsstadium hinaus und wird deshalb hier nicht betrachtet.

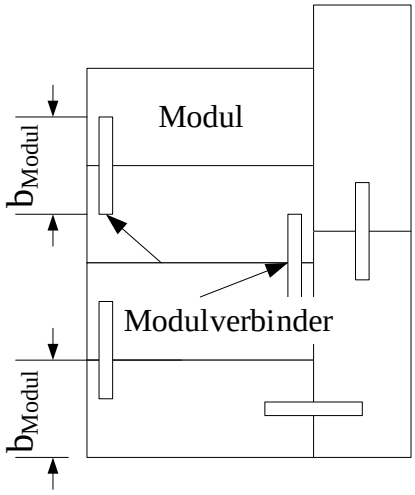


Abbildung 4.12: Modulverbindungsschematik.

Die Querschnittsfläche des Modulverbinders wird, wie die Querschnittsfläche des Zellverbinders, über den Dauerstrom des Batteriepacks ermittelt. Für die Berechnung der Modulverbinderkosten ergibt sich somit:

$$L_{Modulverbinder} = b_{Modul}, \qquad \textbf{4.13}$$

$$K_{Modulverbinder} = A_{Modulverbinder}\, L_{Modulverbinder}\, \rho_{Mat}\, k_{Mat}\, Z_{Zulieferer} Ur. \qquad \textbf{4.14}$$

Sonstige Bestandteile der Batterie

Unter der Angabe "Sonstige Bestandteile“ werden alle zusätzlichen Bauteile wie Kabel, Sensoren, Schrauben, Schläuche, Modulendplatten, Stecker, etc. zusammengefasst. Der Anteil der sonstigen Bestandteile an den Kosten unterliegt starken Schwankungen. Betrachtet wird der Anteil an den Teilekosten. Über das BatPaC Tool (Nelson et al., 2012) erhält man einen mittleren Faktor von 7-11 %. Bei einem repräsentativen Beispiel der Kostenbestandteile des TIAX Kostenmodells (Barnett et al., 2013) sind zwischen 10 und 14 % angegeben[44]. In (Cluzel und Douglas, 2012) lassen sich 14 % der Kosten den sonstigen Bestandteilen zuordnen[45]. Für die Beispielberechnung wird ein Faktor von 14 % verwendet. Der Anteil der sonstigen Bestandteile ist tendenziell größer für PHEV Batterien und kleiner für EV Batterien.

4.1.2.1 Ermittlung der Zuschlagsfaktoren und Materialpreise

Für die Ermittlung der Kosten einzelner Bauteile, insbesondere des Rahmens, der Verbindungselemente und der Kühlplatten, werden die Preise aus den Materialkosten und einem Zuschlagsfaktor für die Fertigung bei einem Zulieferer bestimmt.
Zunächst startet das Kostenmodell mit den Kosten der Rohstoffe. Für die Batteriebauteile kommen Aluminium, Stahl und Kupfer zum Einsatz. Die Preise für diese Materialien sind

[44] Welche Bestandteile enthalten sind, ist nicht eindeutig definiert. Vermutlich handelt es sich um sämtliche Peripherie.
[45] Betrachtet wird ein PHEV Batteriepack mit 22 kWh. Es sind Verbinder, Kühlsystem und Schnittstellen inkludiert.

größtenteils gut dokumentiert und die Veränderung über die Jahre ist nachvollziehbar. Für das Kostenmodell werden die Materialpreise aus Preisdaten der vergangenen Jahre über Trendlinien ermittelt[46]. Die Rohstoffpreise für das hier verwendete Bezugsjahr 2016 sind in Tabelle 4.5 angegeben.

Tabelle 4.5: Verwendete Rohstoffpreise von Aluminium, Stahl und Kupfer in 2016

Rohstoff	Preis
Aluminium	\$2066 /t
Stahl	\$220 /t
Kupfer	\$6498 /t

Um alle Kosten und Preise im Jahr 2016 zu betrachten, werden Werte aus anderen Jahren inflationsbereinigt auf 2016 übertragen. Preise in Euro (EUR) werden ebenfalls, unter Verwendung von Erzeugerindizes des statistischen Bundesamts (Abbildung 4.13), auf das Jahr 2016 umgerechnet und mit dem mittleren Wechselkurs in Dollar umgewandelt[47]. Für Kostendaten in USD wird mit Hilfe der US amerikanischen Erzeugerindizes (Abbildung 4.14) ebenso verfahren. Die Erzeugerindizes bilden die Inflation bzw. Deflation bezogen auf ein Basisjahr (hier 2010) ab. Sie unterscheiden sich von den Verbraucherindizes, welche die Inflation oder Deflation aus Sicht der Verbraucher darstellt. Dieser Unterschied wird in Abbildung 4.14 deutlich. Dort sind die Verbraucher- und die Erzeugerindizes in den USA aufgetragen. Während für Deutschland die Erzeugerindizes für unterschiedliche Branchen zur Verfügung stehen (Abbildung 4.13), konnten für die USA lediglich allgemeine Indizes ermittelt werden (Abbildung 4.14).

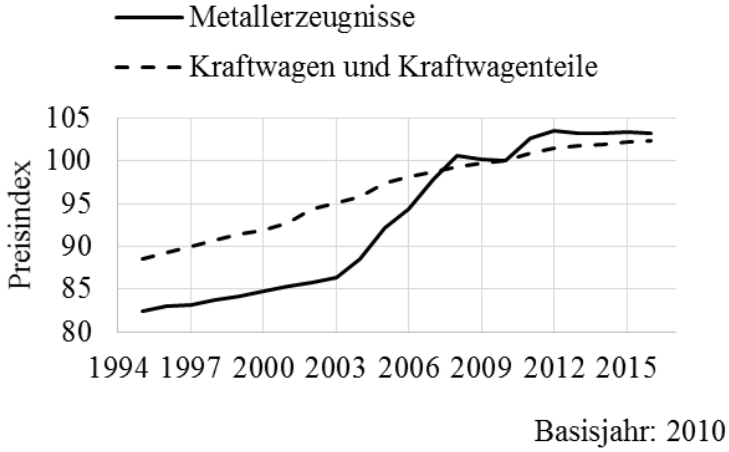


Abbildung 4.13: Preisindizes des produzierenden Gewerbes für Metallerzeugnisse, Kraftwagen und Kraftwagenteile in Deutschland (Statistisches Bundesamt, 2017).

[46] Bilder hierzu befinden sich im Anhang unter 6.3.
[47] Der mittlere Wechselkurs von EUR in USD 2016 betrug 1,11. Vollständige Angaben befinden sich in Abbildung 62 im Anhang.

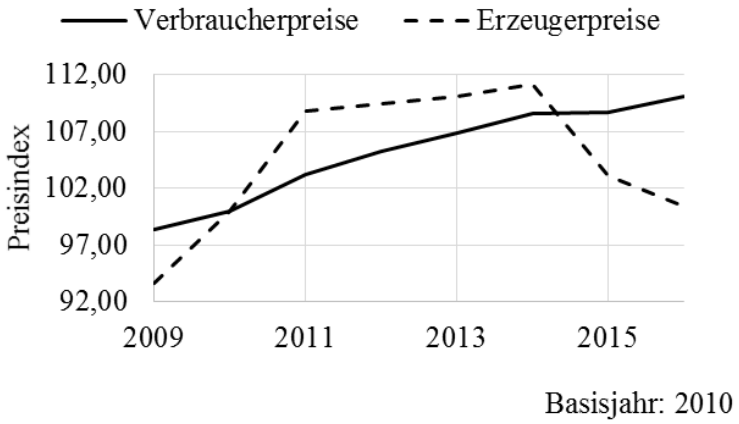


Abbildung 4.14: Preisindizes des produzierenden Gewerbes für Verbraucher und für Erzeuger in den USA (International Monetary Fund, 2017).

Die Zuschlagsfaktoren werden aus der Unternehmenskostenstruktur ermittelt. Dies entspricht einer bewährten Methode der Kostenschätzung im frühen Entwurfsstadium (siehe Richtlinie VDI 2225 Blatt 1). Erwartungsgemäß unterliegt dieser Zuschlagsfaktor starken Schwankungen, abhängig von der Marktsituation, der Größe des Unternehmens (gemessen an der Anzahl der Mitarbeiter) und Preisverhandlungen mit Vertragspartnern. Für jedes Bauteil, welches bei einem anderen Zulieferer beschafft wird, wird ein individueller Zuschlagsfaktor verwendet, welcher die Herstellbranche und den Produktionsweg für das betrachtete Bauteil berücksichtigt. Da die Zuschlagsfaktoren die Wertschöpfung innerhalb eines Unternehmens abbilden, welche auf die eingekauften Materialien und Zukaufteile aufgeschlagen werden, können diese auch als Produktions- und Entwicklungskosten der jeweiligen Firma betrachtet werden. Die Faktoren werden aus Angaben des statistischen Bundesamtes (Statistisches Bundesamt, 2016) ermittelt.

Von der Rohstoffaufbereitung bis zur Herstellung von Produkten, wie den Zellverbindern, durchlaufen die Rohstoffe verschiedene Firmen. Das Statistische Bundesamt bezeichnet die Bereitstellung der Rohstoffe als „Erzeugung und erste Bearbeitung“ (siehe Statistisches Bundesamt, 2016). Für die Herstellung der Zell- und Modulverbinder werden die Rohstoffe in Firmen aus dem Bereich „Gießerei“, „Herstellung von Schmiede-, Press-, Zieh-, und Stanzteilen, gewalzten Ringen und pulvermetallurgischen Erzeugnissen“ und „Herstellung von Metallkonstruktionen“ produziert. Von deren Bruttoproduktionswertverteilung entsprechen die Rohstoffe einem Umsatzanteil von zwischen 37 bis 63 %, je nach Firmengröße. Der Preis für ein hergestelltes Erzeugnis unterscheidet sich von den reinen Materialkosten um die internen Kosten für Personal, Dienstleistungen, Steuern, Mieten, Abschreibungen und Fremdkapitalzinsen. Zusätzlich soll ein Gewinn erzielt werden. Als Umsatzrendite[48] wird für alle Firmen ein Aufschlag von 5 % auf die Investitionen/Selbstkosten aufgeschlagen. Die Zuschlagsfaktoren zur Ermittlung der Selbstkosten auf Basis der Material- beziehungsweise Rohstoffkosten sind in Tabelle 4.6 für die in Frage kommenden produzierenden Firmenklassen aufgeführt.

[48] Gewinnanteil bezogen auf den Gesamtumsatz nach Steuern.

Tabelle 4.6: Zuschlagsfaktoren nach Firmenklasse und Anwendung auf Batteriebauteile ermittelt aus (Statistisches Bundesamt, 2016)

Batteriebauteil	Firmenklasse	Material	Zuschlagsfaktor
Rahmen, Zell- und Modulverbinder, Kühlplatte	Herstellung von Metallkonstruktionen,	Aluminium, Stahl	2,681 (2,463-2,907)
Zell- und Modulverbinder	Leichtmetallgießerei Buntmetallgießerei	Aluminium Kupfer	2,571 1,592
Zell- und Modulverbinder	Herstellung von Schmiede-, Press-, Zieh- und Stanzteilen, gewalzten Ringen und pulvermetallurgischen Erzeugnissen	Aluminium, Kupfer	2,315 (2,299-2,695)
Gesamtbatterie	Herstellung von Teilen und Zubehör für Kraftwagen		1,715 (1,355-1,923)

Für die Gesamtbatterie wird die Kostenstruktur einer Firma zur „Herstellung von Teilen und Zubehör für Kraftwagen“ (siehe Statistisches Bundesamt, 2016) verwendet. Dort ergibt sich ein Zuschlagsfaktor von 1,715. Dieser Zuschlagsfaktor wird auf die Zukaufteile der herstellenden Firma für die Hochvoltbatterie zuzüglich des Gewinns aufgeschlagen, um die Herstellkosten zu ermitteln. Er stellt damit die Produktions- und Entwicklungskosten des Batterieherstellers dar. Schließlich wird mit einer Umsatzrendite von 5 % der Batteriepreis berechnet.

4.1.2.2 Plausibilisierung des Kostenmodells

Anhand der PHEV Batterie des bereits verwendeten Porsche Cayenne S E-Hybrid, wird eine Beispielberechnung durchgeführt, um die ermittelten Größen zu plausibilisieren. Die einzelnen Parametrierungen werden im Folgenden näher beschrieben. Das Basisjahr für die Kostenbetrachtung ist das Jahr 2016.

Als Batterierahmenbasis kommt ein Modell aus (Frank und Pan, 2017) mit den Abmaßen 780x500x270 mm zum Einsatz[49]. Diese ist im Heck des Fahrzeugs in der Ersatzradmulde untergebracht. Hier gelten strikte Crashbedingungen (vgl. Frank und Pan, 2017). Der Rahmen des Modells ist aus Aluminiumvollmaterial und wiegt 47 kg[50]. Der verwendete Zuschlagsfaktor entspricht dem Faktor für „Metallkonstruktionen“.

Für die Ermittlung der aktiven Kühlfläche der Kühlplatte wird die Grundfläche der eingesetzten PHEV2 Zellen verwendet. Der Batteriepack besteht aus 104 dieser Zellen mit 28 Ah Kapazität (Fink und Rees, 2015). Insgesamt wiegt die Kühlplatte 3,9 kg. Als Zuschlagsfaktor

[49] Alle Daten zu den Batterierahmen befinden sich im Anhang in Tabelle 6.3 und Tabelle 6.5.
[50] Das Gewicht wird verkleinert, wenn nicht der gesamte Platz benötigt wird.

kommt erneut der Faktor für „Metallkonstruktionen“ zum Einsatz. Der Komplexitätsfaktor wurde für die Beispielberechnung auf 5 festgelegt.
Um die Zellkosten festzulegen, wird eine Angabe von Kustosch (Kustosch, 2016) verwendet (siehe Abbildung 4.10, Dreiecke). Dort ist ein Bereich zwischen 200 und 250 €/kWh als Zellpreis 2015 angegeben. Für die 28 Ah Zelle ergibt sich ein Preis von 20,6-25,7 € (2016) pro Zelle. Für die Berechnung wird der kleinere Wert verwendet.
Der Querschnitt für die Zell- und Modulverbinder wird für das Fahrzeug aus einer elektrischer Höchstgeschwindigkeit von 125 km/h (Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, 2017, S. 32) bestimmt. Die notwendige elektrische Leistung von 43,96 kW wird von dem Batteriepack mit 10,8 kWh Energieinhalt bereitgestellt (Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, 2017 S. 32). Der Dauerstrom wird damit zu 114 A berechnet. Für den Querschnitt der Zell- und Modulverbinder ergeben sich Flächen von 30 mm² (Modulverbinder aus Kupfer) und 45 mm² (Zellverbinder aus Aluminium).

Für das Battery-Management-System (BMS) kommen die oben genannten Werte zum Einsatz. Die sonstigen Bestandteile werden durch einen Anteil von 14 % ausgedrückt. Die Produktionskosten werden über den Zuschlagsfaktor „Herstellung von Teilen und Zubehör für Kraftwagen“ von 1,715 berechnet. Die Ergebnisse des Kostenmodells sind in Tabelle 4.7 zusammengefasst.

Tabelle 4.7: Ermittelte Teilekosten über das Kostenmodell für die Batterie des Porsche Cayenne S E-Hybrid

Bauteil/Baugruppe	**Anzahl**	**Merkmalsausprägung**	**Ermittelte Kosten (2016$)**
Zellverbinder	96	Querschnitt: 45 mm² Länge: 26,5 mm Aluminium Gesamtgewicht: 0,62 kg	$21,40
Modulverbinder	7	Querschnitt: 30 mm² Länge: 148 mm Kupfer Gesamtgewicht: 0,28 kg	$18,65
BMS	1	BDU, BCU und CSCs	$461,70
Batterierahmen	1	Aluminium (37,7 kg)	$219,4
Zelle	104	28 Ah PHEV2 (83 kg)	$2.374,90
Kühlplatte	4	Aluminium (4 kg)	$112,16
		Teilekosten ohne sonstige Bestandteile	$3.208,21
		Sonstige Bestandteile	$449,15
		Teilekosten mit sonstigen Bestandteilen	$3.657,36
		Produktions- und Entwicklungskosten	$2.615,01
		Herstellkosten	$6.272,37
		Umsatzrendite	$313,62
		Batteriepreis	$6.585,99

Der ermittelte Batteriepreis entspricht $601 /kWh. Die Plausibilisierung des Packpreises erfolgt erneut über eine Angabe von Kustosch (Kustosch, 2016) zum Preis von $443 - 554 /kWh (2015). Damit weicht der Preis um 8,5 % von der Obergrenze ab. Für ein Kostenschätzungsmodell im frühen Entwurfsstadium ist ein Wert von +/- 20 % als gut anzusehen (Richtlinie VDI 2225 Blatt 1). Bei der Kostenangabe von Kustosch handelt es sich um Preise von Elektrofahrzeugbatterien, welche auf kWh-Basis geringer sind, als entsprechende PHEV-Batteriepreise. In Abbildung 4.15 sind Packpreise und –kosten für EV und PHEV aus diversen Quellen zusammengefasst. Die Daten sind zu dem Wechselkurs des Veröffentlichungsdatums aufgetragen.

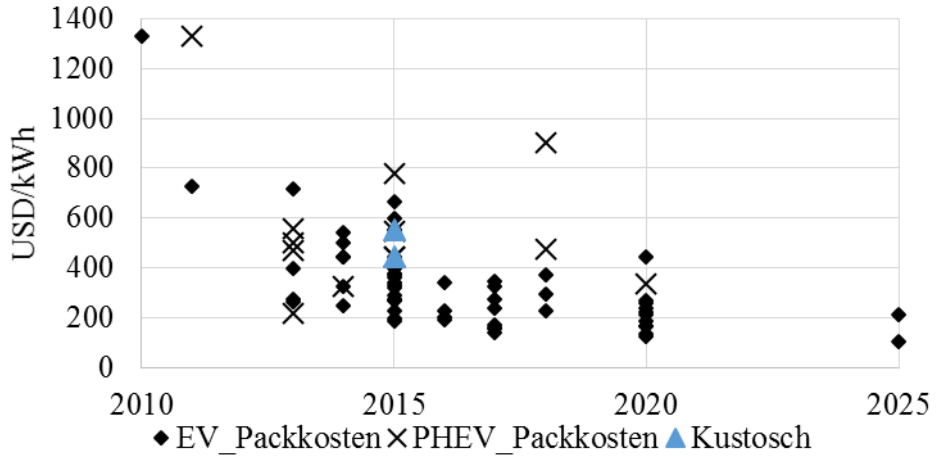


Abbildung 4.15: Tatsächliche und prognostizierte Packkosten für EV und PHEV Batteriepacks in USD/kWh, ermittelt aus unterschiedlichen Quellen (Barnett et al., 2013; BioAge Group, 2014b; Bloomberg New Energy Finance, 2016; Cluzel und Douglas, 2012; Cois, 2016; Katsimpouras, 2016; Kustosch, 2016; McKinsey & Company, 2017; Nykvist und Nilsson, 2015; Sakti et al., 2015; Sakti et al., 2016; Stoppel, 2015; Sunbeam GmbH, 2015; Thielmann et al., 2015; Howell, 2014; Kampker, 2014; MIT Technology Review, 2011; WirtschaftsWoche, 2015; Winterhagen, 2016; Rueter, 2017; Pillot, 2017; Kochhan et al., 2014).

Die PHEV Daten in Abbildung 4.15 zeigen einen großen Streuungsbereich für die Kosten auf kWh-Basis. Der ermittelte Preis passt gut mit diesen Angaben zusammen. Die Ergebnisse des Kostenmodells sind damit als plausibel anzusehen. Für die weiteren Preisangaben werden die Daten auf signifikante Stellen gerundet, was für den Batteriepreis der Bereich 10^2 ist.

Für eine nähere Betrachtung der Kostenzusammensetzung im Kostenmodell sind die verschiedenen Bestandteile in Abbildung 4.16 prozentual aufgetragen. Den größten Bestandteil an dem Batteriepreis haben die Zellen und die Produktions- und Entwicklungskosten mit 36, respektive 40 % Anteil am Batteriepreis. Dem folgen BMS und sonstige Bestandteile mit 7 % und der Batterierahmen mit 4 %. Passt man den Zuschlagsfaktor für „Herstellung von Teilen und Zubehör für Kraftwagen“ auf den kleinsten Wert aus (Statistisches Bundesamt, 2016) von 1,355 an (siehe Tabelle 4.6). Erreicht man bereits einen Batteriepreis von $490 /kWh und der Anteil der Produktions- und Entwicklungskosten sinkt auf 25 %. Dem zufolge besteht das größte Kostensenkungspotential bei den Zellen und der Kostenstruktur des Unternehmens. Bereits eine 10-prozentige Verbesserung der Kostenstruktur im Unternehmen ermöglicht einen um 10 % geringeren Batteriepreis. Dementsprechend sensibel ist das Kostenmodell auf Änderungen dieser Kosten.

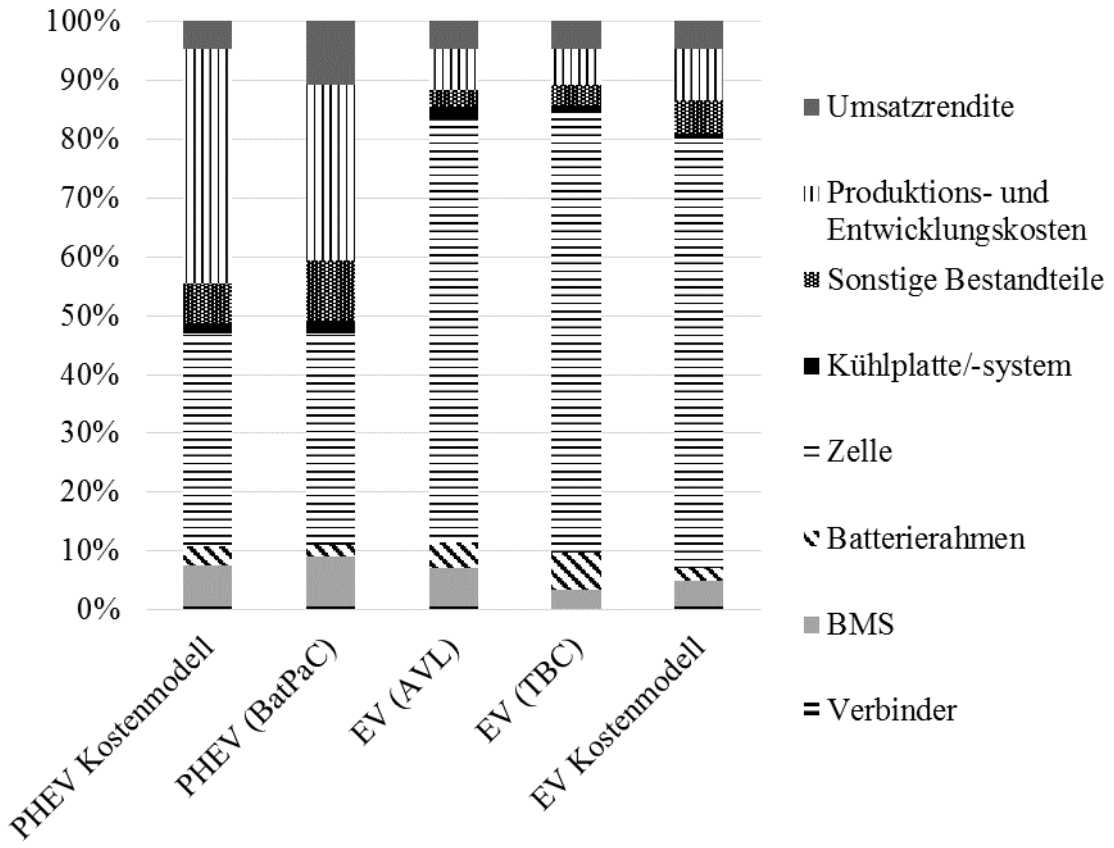


Abbildung 4.16: Zusammensetzung des Batteriepreises aus dem PHEV Kostenmodell und einer vergleichbaren Konfiguration in BatPaC. Zusätzlich ist die Kostenzusammensetzung für EV von AVL und Anderman (Könekamp, 2015; Anderman, 2014) zusammen mit der Zusammensetzung der Kosten aus dem EV Kostenmodell abgebildet.

Die Zusammensetzung der Kosten wird zusätzlich einer vergleichbaren Konfiguration in BatPaC gegenübergestellt[51] (Abbildung 4.16). Dort ist zu erkennen, dass die Zusammensetzung größtenteils ähnlich ist. Die sonstigen Bestandteile, sowie die Umsatzrendite nehmen einen größeren Anteil als im vorgestellten Kostenmodell ein. Die Produktions- und Entwicklungskosten und der Batterierahmen sind allerdings deutlich kleiner. Der dafür bereits oben aufgeführte, verantwortliche Zuschlagsfaktor ist stark von der Kostenstruktur des Unternehmens abhängig. Besonders die Automatisierung, verbunden mit einer Stückzahlerhöhung wird die Produktions- und Entwicklungskosten deutlich senken. Zusätzlich ist der Anteil sonstiger Bestandteile im Vergleich zu den eingekauften Zellen geringer.
Für eine EV-Batterie wird daher die Kostenzusammensetzung im Kostenmodell angepasst. In Abbildung 4.16 sind zusätzlich zu der PHEV Batteriekostenstruktur zwei Quellen für die Zusammensetzung der Batteriekosten für EV aufgetragen. In beiden Fällen wurde die Batterie eines Tesla Model S analysiert. Könekamp von AVL List betrachtete eine Batterie des Tesla mit 85 kWh (Könekamp, 2015). Anderman von Total Battery Consulting (TBC) betrachtete eine 70 kWh Batterie (Anderman, 2014). Mit Hilfe des vorgestellten Kostenmodells wurden die Kosten eines vergleichbaren Batteriepacks mit 80 kWh berechnet. Um der

[51] Die unter Kühlplatte aufgeführte Angabe bezieht sich in BatPaC auf das gesamte Kühlsystem, welches im Kostenmodell aus der Kühlplatte und einem Teil der sonstigen Bestandteile besteht. Des Weiteren wird angenommen, dass die Batteriezellen nicht selbst produziert, sondern zugekauft werden.

veränderten Kostenstruktur gerecht zu werden wurden hierfür der Anteil sonstiger Bestandteile auf 7 % und der Zuschlagsfaktor für die Produktions- und Entwicklungskosten auf 1,1 gesenkt. Bei dem Vergleich ist zu beachten, dass vor allem die BMS Kosten der AVL Quelle nicht exakt auf die BDU, die BCU und die CSC aufgetrennt werden konnten. Deshalb sind dort ebenfalls Kosten aller elektrischen Verbindungen enthalten, welche im Kostenmodell den sonstigen Bestandteilen zugeordnet werden. Des Weiteren sind in den Produktions- und Entwicklungskosten derselben Quelle keine Entwicklungskosten enthalten, sondern nur Fertigungskosten (Assembly). Zusätzlich besitzt der Tesla als Kühlvorrichtung keine Kühlplatten, sondern Kühlschläuche. Auch in der TBC Quelle konnten nicht alle sonstigen Bestandteile exakt von BMS und Kühlsystem, sowie dem Batterierahmen getrennt werden. Dennoch zeigen die Strukturen insgesamt einen sehr ähnlichen Aufbau. Der Anteil der Zellkosten liegt zwischen 72 und 75 %. Durch die Anpassung der Modellgrößen wurde ein indirekter Stückzahleffekt in das Kostenmodell eingebracht. Dieser wird im folgenden Abschnitt näher untersucht.

4.1.2.3 Stückzahleffekt

Die Stückzahl aus Sicht des Batterieherstellers hat zum einen Einfluss auf die Zukaufteile, da diese für den Zulieferer bei größerer abgerufener Menge günstiger in der Herstellung werden. Zum anderen werden auch die eigenen Kosten pro produzierter Batterie günstiger, da die Fixkosten für die Entwicklung und die Produktion gleich bleiben. Dieser Effekt senkt den Anteil der Produktions- und Entwicklungskosten an den Stückkosten (Fixkostendegression). Im Gegensatz dazu sinken bei den Zukaufteilen eher die tatsächlichen Kosten, aber weniger der Anteil derer an den Stückkosten. Der Faktor für die Umsatzrendite bleibt ebenfalls gleich. Dementsprechend hat eine Stückzahlveränderung im vorliegenden Modell den größten Einfluss auf den Faktor für die Produktions- und Entwicklungskosten. Des Weiteren werden bei größeren Stückzahlen optimierte Prozesse, Standardisierung und Automatisierung Einzug in die Batteriefertigung erhalten. Wie groß dieser Einfluss ist hat Propfe (Propfe, 2015) in seinem Batteriekostenmodell untersucht. Dabei besteht dieses Kostenmodell aus einer detaillierten Zusammenstellung von Produktions- und Anschaffungskosten von der Zellherstellung bis zur Batteriepackfertigung. Um Lernraten bezüglich der Stückzahlerhöhung zu bestimmen, wurden drei unterschiedliche Stückzahlszenarien betrachtet[52]. Hierfür wurde mit einer beispielhaften Batteriekonfiguration, bestehend aus 288 Zellen in 9 Modulen, gearbeitet. In jedem Modul befinden sich 32 Zellen. Bei den Zellen handelt es sich um 34 Ah NMC Zellen. Für die Berechnungen liegt das Jahr 2012 zugrunde. Bei der beispielhaften Auslegung diente der Chevrolet Volt aus dem Modelljahr 2012 als Basis. Dieser besitzt ein sehr einfaches aktives Flüssigkühlsystem (vgl. General Motors Co. 09.12.2011, 2016). Der Komplexitätsfaktor wird demnach auf 1 gesetzt. Um die aktive Kühlfläche zu ermitteln, werden die seitlichen Maße der Zellen verwendet, da diese im Chevrolet Volt die gekühlte Seite darstellen. Die Batterie befindet sich im Tunnel und im hinteren Fahrzeugbereich. Für das Stahlgewicht werden daher die Gewichte der ermittelten Auslegung von Tunnel- und Hinterwagenbatterie addiert. Es ergibt sich ein Gesamtgewicht von 72 kg. Über die Zellkostendaten wird für 2012 ein Zellkostenpreis von $55 angenommen.

[52] 1.000, 10.000 und 100.000 Stk./Jahr, wobei bei letzteren beiden ein hoher Automatisierungsgrad vorliegt, während im ersten Fall davon ausgegangen wird, dass die Fertigung überwiegend manuell verläuft.

Mit Hilfe der genannten Randbedingungen ergibt sich ein Batteriepreis von 695 €/kWh. Propfe ermittelt einen Preis von 635 €/kWh für das Szenario mit der kleinsten Stückzahl (1000 Batteriepacks/Jahr). Dies entspricht einer Fertigung mit hohem manuellem Arbeitsanteil. Bei einem über 70-prozentigen Aufschlag für die Produktions- und Entwicklungskosten ist dies ein plausibler Wert. Um einen zufälligen Zusammenhang zu vermeiden, werden zwei weitere Konfigurationen mit Zellen kleinerer und größerer Kapazität berechnet und verglichen. Die Ergebnisse dieses Vergleichs sind in Abbildung 4.17 zu sehen. Dort ist die entsprechende Parametrierung des Kostenmodells durch „Kostenmodell PHEV“ gekennzeichnet[53].
Ebenfalls abgebildet sind die Ergebnisse des Kostenmodells mit der Parametrierung für EV Batterien. Hierfür wurde, entsprechend den Vorgaben des vorherigen Abschnitts, der Anteil der sonstigen Bestandteile und der der Produktions- und Entwicklungskosten angepasst.

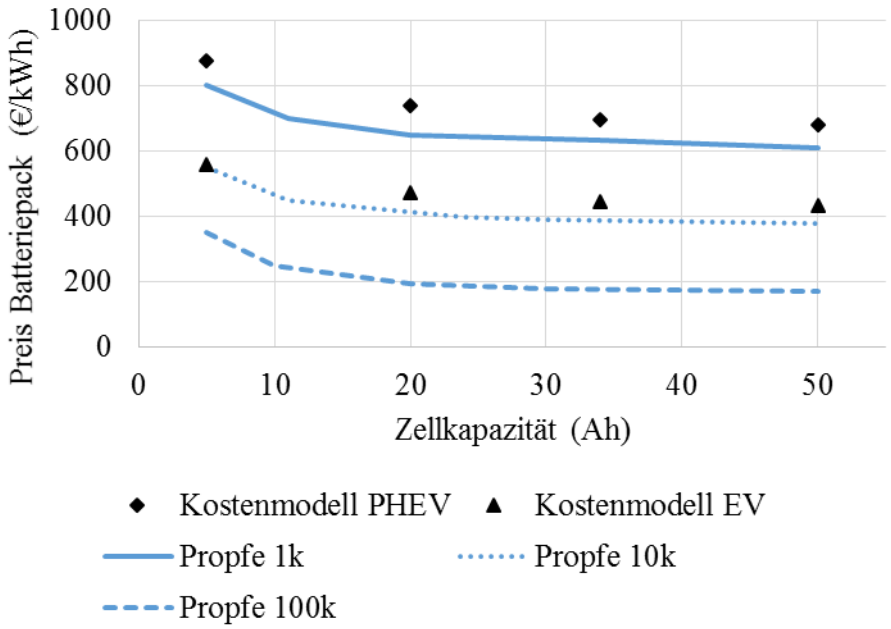


Abbildung 4.17: Vergleich der ermittelten Packkosten des vorgestellten Kostenmodells mit PHEV und EV Parametrierung mit dem Modell von Propfe (Propfe, 2015).

Die Ergebnisse des hier vorgestellten PHEV Kostenmodells liegen gleichbleibend ca. 10 % über den ermittelten Kosten von Propfe[54] für eine Fertigung von 1000 Batterien pro Jahr. Der Vergleich untermauert die Einordnung der Ergebnisse zu einer Fertigung mit hohem manuellem Arbeitsanteil. Entsprechend sieht der Vergleich für das Kostenmodell mit EV Parametern aus. Hier passen die Batteriepreise sehr gut zu der Kurve von Propfe für eine Stückzahl von 10 000 Batterien im Jahr.

Des Weiteren kann auf dieser Basis der Lernkurvenansatz von Propfe (Gleichung 4.15) auf das vorliegende Modell übertragen werden. Die Lernrate selbst soll lediglich der Betrachtung eines angenommenen Stückzahleffektes dienen und wird daher als Eingabeparameter für das Kostenmodell verwendet. Dafür wird die Referenzproduktionsmenge auf 1000 Bat-

[53] Die Begründung hierfür ist im vorangegangenen Kapitel nachzulesen. Die Kostenzusammensetzung wurde hier mit der Produktion von PHEV Batterien in Verbindung gebracht.
[54] Verwendete Zellpreise: 5 Ah: $10, 20 Ah: $35, 50 Ah: $80

teriepacks pro Jahr für PHEV Batterien und 10 000 Batteriepacks für EV Batterien, entsprechend dem Kostenmodell von Propfe, festgelegt. Da diverse Parameter einer Batteriekonfiguration einen Einfluss auf die Lernrate haben (siehe. Propfe, 2015, S. 84-86), kann lediglich ein Wertebereich für die Lernrate vorgegeben werden. Dieser Wertebereich liegt auf Basis der Angaben von Propfe zwischen 80 und 90 %.

$$K_{Lern}(n_{Bat}) = K_{Modell} L^{\log_2\left(\frac{n_{Bat}}{n_0}\right)} \qquad \textbf{4.15}$$

Mit K_{Lern} werden die Kosten nach Verrechnung des Stückzahleffekts über die Lernrate L und eine Basisproduktionsmenge n_0 bezeichnet. Die Kosten, welche zunächst im Kostenmodell berechnet wurden, sind mit K_{Modell} beschrieben. n_{Bat} stellt die zu betrachtende Ausbringungsmenge pro Jahr dar.

Für die folgende Abbildung wurde eine Lernrate von 85 % verwendet. Dargestellt sind die Batteriepreise über die jährlich gefertigte und verkaufte Stückzahl. Als Grundlage dient die Batteriekonfiguration für den Porsche Cayenne S E-Hybrid aus der Beispielrechnung (Abschnitt 4.1.2.2). Neben der Senkung des Preises pro kWh ist deutlich zu erkennen, dass sich die Preise einer Untergrenze annähern, welche bei ca. $200 /kWh liegt.

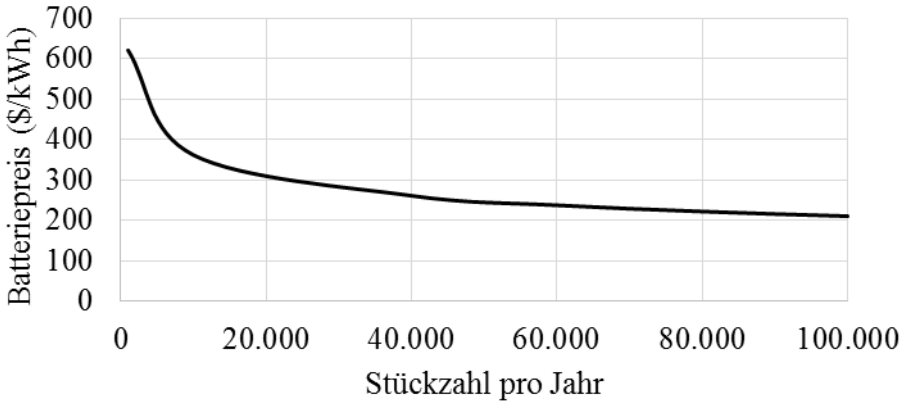


Abbildung 4.18: Stückzahleffekt für die PHEV Batterie mit einer Lernrate von 85 %.

Der Preisbereich zwischen $200 und $600 /kWh umschließt den Bereich von Kustosch, der oben bereits angegeben wurde ($443 - 554 /kWh (2015)). Für einen weiteren Vergleich wird eine Angabe von McKinsey (McKinsey & Company, 2017) von $227 /kWh (2016) herangezogen. In (Nykvist und Nilsson, 2015) ist für 2015 eine Spanne von $400-$600 /kWh angegeben[55]. Insgesamt decken sich die ermittelten Kosten mit den recherchierten Angaben und können damit als plausibel angesehen werden.

4.1.2.4 Sensitivität des Kostenmodells

Bleibt die Batteriekonfiguration gleich und es werden nur die Zuschlagsfaktoren im Kostenmodell innerhalb ihrer Grenzen variiert, besitzen der Zuschlagsfaktor für die Produktions-

[55] Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung handelte es sich um prognostizierte Kosten.

und Entwicklungskosten (Abbildung 4.19 (a)) und der Zuschlagsfaktor für sonstige Bestandteile den größten Einfluss auf den Batteriepreis (Abbildung 4.19 (b)). Der Einfluss des Letzteren ist jedoch deutlich geringer.

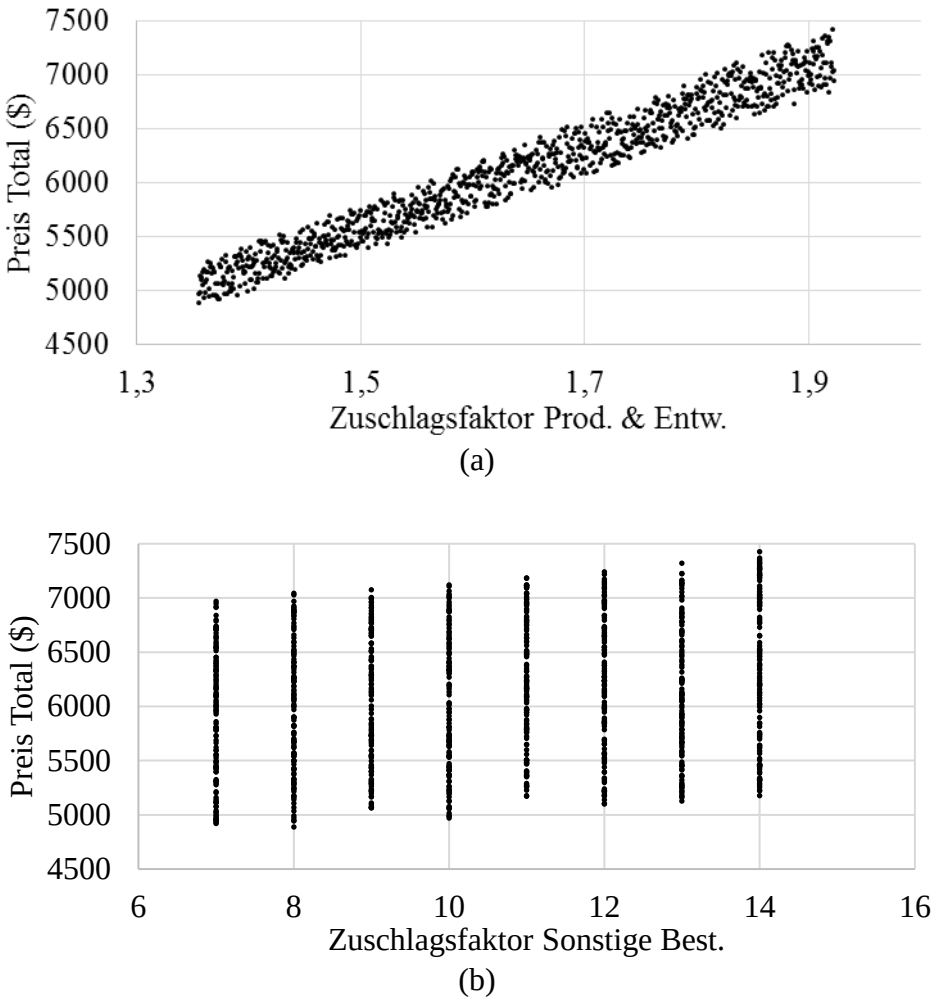
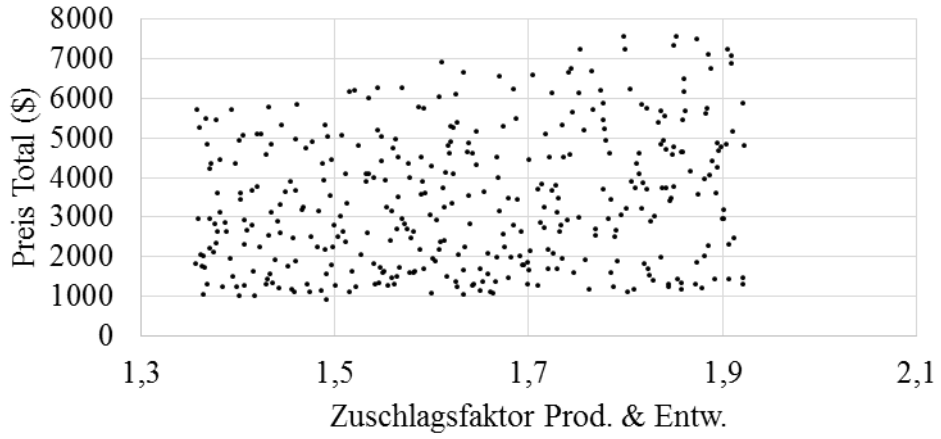


Abbildung 4.19: Abhängigkeit des Batteriepreises von dem Zuschlagsfaktor für Produktion und Entwicklung (a) und dem Zuschlagsfaktor für sonstige Bestandteile (b), bei identischer Konfiguration des Batteriepacks mit gleichbleibender Anzahl von Zellen.

Bei zusätzlicher Variation der Zellanzahl und damit der Modulgrößen, bleibt der Einfluss des Zuschlagsfaktors für Produktion und Entwicklung weiterhin zu erkennen (Abbildung 4.20 (b)). Allerdings zeigt sich der deutlich stärkere Einfluss der Zellanzahl auf den Batteriepreis (Abbildung 4.20 (a)). Dennoch ist zu erkennen, dass mit steigender Zellanzahl die Streuung der Kosten stark zunimmt. Das ist vor allem auf den größer werdenden Einfluss der Modulkosten zurückzuführen, welche maßgeblich von der Anzahl der Module (und damit der CSC Kosten pro Modul) und deren Größe abhängen. Zusätzlich besitzen die Module einen indirekten Einfluss auf die Herstellkosten des Batterierahmens, da diese Kosten von dessen Gewicht und damit von dessen Größe abhängen (Abbildung 4.20 (c)).

(a)



(b)

(c)

Abbildung 4.20: Veränderung des Batteriepreises und Einfluss des Zuschlagsfaktors für Produktion und Entwicklung bei Variation der Zellanzahl, sowie die Abhängigkeit des Rahmenpreises auf die Zellanzahl.

4.1.3 Mechanisches Modell der Hochvoltbatterie

Als mechanisches Modell werden die Gestaltung der Batteriebauteile und deren Integration in den verfügbaren Bauraum verstanden. Im frühen Entwurfsstadium ist die wichtigste Anforderung die Frage, ob die notwendige Anzahl von Batteriezellen zusammen mit den zusätzlichen Bauteilen in den Bauraum im Fahrzeug passt. Es reicht dabei nicht aus, das Volumen des Bauraums mit dem Gesamtvolumen aller Zellen zu vergleichen.
Der mechanische Aufbau einer Hochvoltbatterie sieht die Integration von Zellmodulen vor. Dabei besteht das Ziel die Modulgröße, also die Anzahl der Zellen pro Batteriemodul, bei allen Modulen gleich groß zu halten, um die Fertigung effizient gestalten zu können. Bei unterschiedlichen Modulgrößen muss berücksichtigt werden, dass pro Modulgröße eine weitere Modulfertigungslinie in der Batteriefertigung vorgesehen werden muss. Dies geht einher mit dem Bedarf an zusätzlichen Bauteilvarianten, wie dem Moduldeckel. Im vorliegenden Modell wird immer eine einzelne Modulgröße verwendet. Die Ermittlung der tatsächlichen Zellanzahl im Modul und deren elektrische Verschaltung innerhalb des Moduls werden von einem Algorithmus vorgenommen. Hierfür werden zunächst alle ganzzahligen Vielfachen der seriellen und parallelen Verschaltungen festgestellt. Dadurch, dass die maximale und minimale Anzahl der seriellen und parallelen Zellen pro Modul eingeschränkt sein kann, werden nur jeweils passende Konfigurationen weiter betrachtet. Dem folgt die Aufstellung aller möglichen Modulkonfigurationen, bestehend aus seriellen und parallelen Zellen im Modul in der Form X_msY_mp. Die Anzahl seriell verbundener Zellen in einem Modul wird durch X_m beschrieben, die Anzahl paralleler Verschaltungen durch Y_m. Mit Hilfe der Beschränkung auf eine minimale und maximale Anzahl von Zellen in einem Modul insgesamt, werden die Konfigurationen erneut gefiltert. Für die ermittelten Modulkonfigurationen wird zusätzlich die Anzahl der Module berechnet. Wenn keine passende Modulkonfiguration innerhalb der beschriebenen Grenzen gefunden werden konnte, werden Module, bestehend aus einzelnen Zellen, weiterbetrachtet.

Der prinzipielle Aufbau eines Moduls im mechanischen Modell ist in Abbildung 4.21 dargestellt. Der Zellstapel wird von Modulendplatten abgeschlossen, welche die Aufgabe besitzen, die Zellen mit einem definierten Anpressdruck zusammenzupressen. Der Druck dient dem Hemmen der Zellausdehnung mit zunehmender Alterung der Batteriezellen und soll dadurch die Alterung positiv in Bezug auf die Lebensdauer beeinflussen. Unter dem Modul befindet sich die Kühlplatte. Die Kühlplatte besitzt keine spezielle Anschlussseite, da davon ausgegangen wird, dass die Kühlplatten von mehreren nebeneinanderliegenden Modulen zu einer Kühlplatte zusammengefasst werden. Auf der Oberseite der Zellen wird ein Moduldeckel hinzugefügt in welchem sich die Zellverbinder, die Temperatursensoren, die Spannungsabgriffe und die Modulelektronik (CSC) befinden. Anbindungspunkte, um die Module im Rahmen zu befestigen, befinden sich üblicherweise in den Modulendplatten.
Im späteren Packalgorithmus werden die Module als Quader positioniert und für die visuelle Darstellung ebenfalls als Quader dargestellt. Zylindrische Zellen oder Zellmodule werden hier nicht betrachtet.

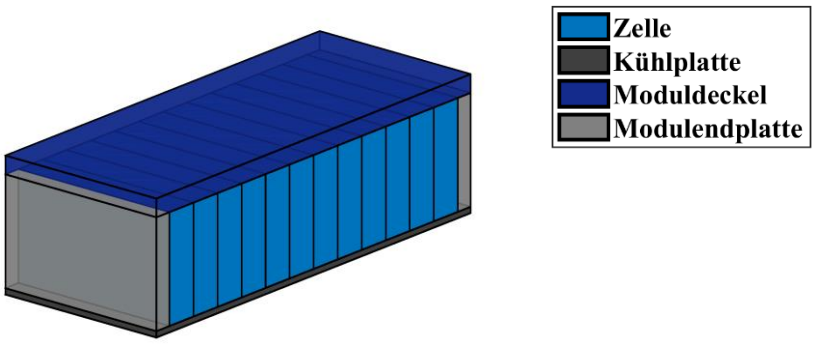


Abbildung 4.21: Modulschema im mechanischen Modell mit einer Kühlplatte unter, Modulendplatten an den Stirnseiten, einem Moduldeckel auf und prismatischen Batteriezellen in dem Modul.

Zusätzlich zu den Modulen werden im mechanischen Modell unabhängig voneinander eine BCU und eine BDU platziert. Die Maße der beiden Bauteile sind fest. Bei einer detaillierten Batterieauslegung stehen die Maße der BDU zur Disposition, da die tatsächliche Form einer BDU von den darin enthaltenen Bauteilen (Schütze, Stromsensoren, Sicherungen, Leiterschienen und Steckeranschlüsse) bestimmt wird. Die Form kann daher den gegebenen Bedingungen und dem vorhandenen Platz, sowie den Vorgaben für die Anschlussposition gestaltet werden. Derartige Informationen liegen in den vorliegenden Anwendungsfällen nicht vor, weshalb feste Maße für die BDU verwendet werden. Gegebenenfalls kann eine Detailanalyse für die Maße der BDU durchgeführt werden, wenn eine Batteriekonfiguration nicht in den vorhandenen Bauraum passt.

Alle Bauteile können in den Raumrichtungen in 90° Schritten rotiert werden. Es besteht auch die Möglichkeit bestimmte Ausrichtungen von einzelnen Bauteilen zu sperren. Die Modulrotationen werden von den möglichen Zellrotationen vorgegeben. Im Normalfall sind alle Rotationen zulässig. Ferner werden die Bauteile ebenenweise platziert, um in der Produktion die Fertigung von Untereinheiten (Sub-Units) zu ermöglichen und um die Komplexität der Fertigung nicht zu erhöhen. Kabelbäume und Schlauchleitungen werden nicht berücksichtigt. Volumetrische Aussagen sind vor diesem Hintergrund zu verstehen.

Die Auswahl und die Dimensionierung der Batterierahmen für die vorliegende Arbeit wurde bereits in (Frank und Pan, 2017) vorgenommen. Zum Einsatz kommen ein PHEV Batterierahmen für die Ersatzradmulde und zwei Unterbodenbatterien für Purpose Design Elektrofahrzeuge verschiedener Fahrzeugklassen (Kompakt- und Oberklasse)[56]. Die Rahmen bestehen aus einem Außenrahmen und einer jeweils festen Anzahl von Querstreben für die Stabilität (Abbildung 4.22). Zusätzlich werden eine Bodenplatte und ein Batteriedeckel mit einer Materialstärke von 1 mm berücksichtigt. Bei dem Material der Rahmen kommen Aluminium und Stahl zum Einsatz. Es wird vereinfachend Vollmaterial angenommen. Die Rahmen wurden derart ausgelegt, dass sie die standardisierten Unfallanforderungen an Heck- und Seitenaufprall bei minimaler Dicke erfüllen[57]. Dabei existiert eine definierte Lücke zwischen Rahmen und Modulen, welche bei der Intrusion eines Pfahls beim Aufprall nicht geschlossen werden darf. Der Rahmen darf also die Module bei einem Unfall nicht berühren

[56] Die Daten zu den beschriebenen und weiteren Rahmen befinden sich zusätzlich zu (Frank und Pan, 2017) im Anhang in Tabelle 6.3, Tabelle 6.4 und Tabelle 6.5.
[57] Die hier geltenden Standards sind die FMVSS 571.305 (Technische Regel (TR) FMVSS 571.305 * Standard No. 305), UNECE R 100 (Technische Regel (TR) UNECE 100 * UNECE 100/REV 2) und SAE J 2464 (Norm SAE J 2464). Mehr Informationen hierzu in (Frank und Pan, 2017).

(s.o.). Für die spätere Integration der Batteriebauteile mit einem Packalgorithmus werden die Querstreben aus dem Inneren herausgenommen und deren Dicke auf die Stirn- und Heckseite des Batterierahmens addiert. Dadurch wird der Platz für die Querstreben weiterhin berücksichtigt, die optimale Batterieintegration in den Rahmen aber nicht behindert.

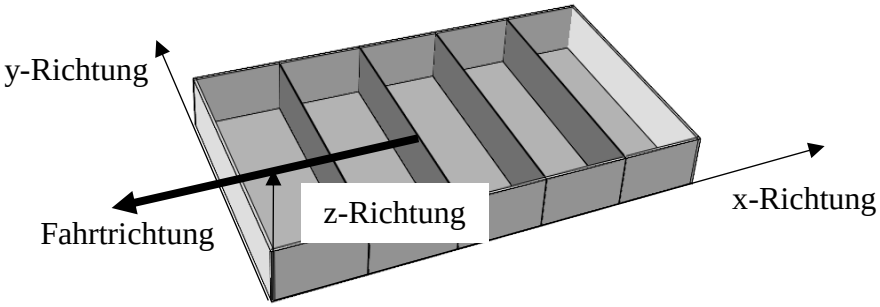


Abbildung 4.22: Batterierahmenmodell der Unterbodenbatterie für das Kompaktfahrzeug, ohne Darstellung der Deckelplatte (Frank und Pan, 2017, S. 6). Der dicke Pfeil markiert die Fahrzeuglängsrichtung. Zusätzlich ist das Bezugskoordinatensystem für das mechanische Modell eingezeichnet.

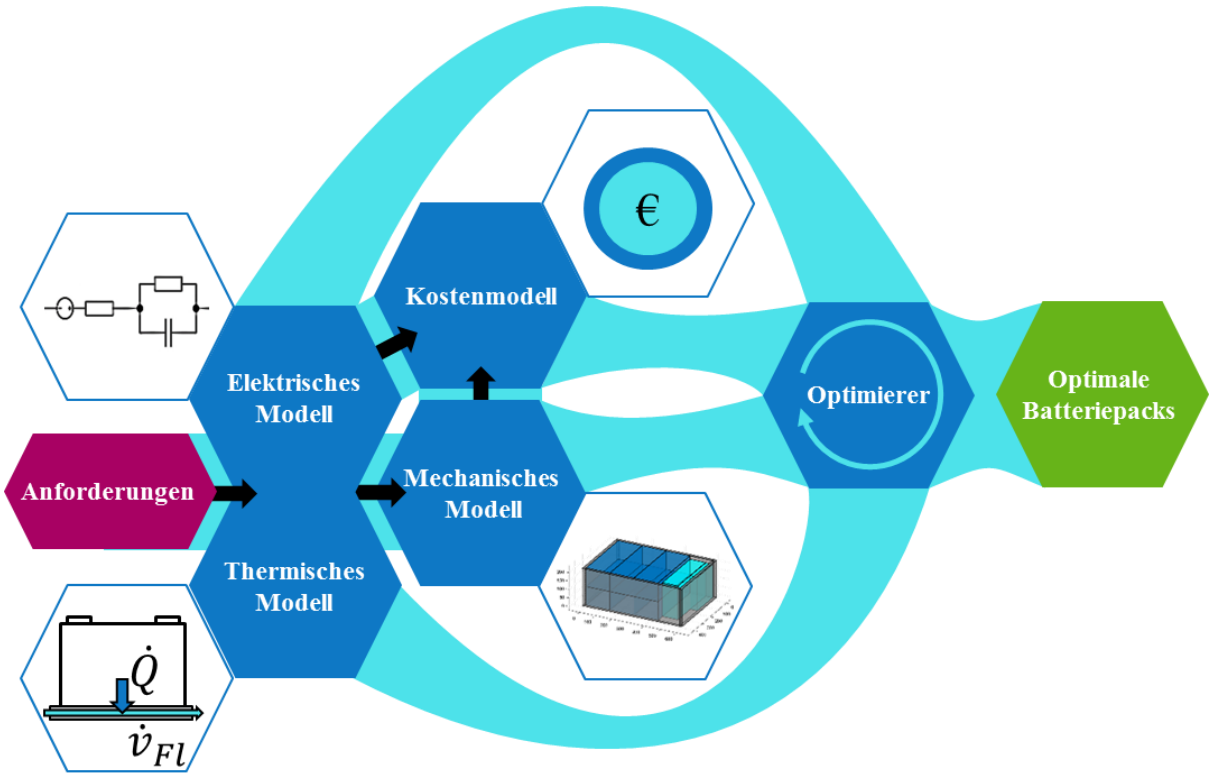


Abbildung 4.23: Gesamtstruktur der globalen Optimierung mit den vier Teilmodellen.

4.2 Struktur der Gesamtoptimierung

Die beschriebenen Modelle für das elektrische und thermische Verhalten, die mechanische Integration und die Kostenermittlung müssen, für die Umsetzung des Konzepts aus Abschnitt 3.1.6, miteinander kombiniert werden. Das thermische und das elektrische Modell sind bereits über die Joule'schen Verluste der Zellen und die Interaktion von Kühlflüssigkeit mit der Kühlplatte miteinander verbunden. Eine mechanische Betrachtung kann erst erfolgen, sobald festgelegt ist, wie viele Zellen einer Konfiguration in den Bauraum integriert werden sollen. Ferner ist das Kostenmodell darauf angewiesen die Modul-, Kühlplatten- und Rahmengrößen zu kennen, um deren Kosten zu ermitteln. Daher muss die Kostenberechnung nach der Durchführung der elektrischen, thermischen und mechanischen Auslegung angesiedelt werden. Eine globale Optimierung wird über die Ergebnisse aller Teilmodelle angesetzt. Abbildung 4.23 stellt die Optimierungsstruktur schematisch dar.

Wie in Abbildung 4.23 zu erkennen ist, existieren Schnittstellen zwischen den unterschiedlichen Teilmodellen und ebenfalls zwischen den Teilmodellen und dem globalen Optimierer. Entsprechend der oben beschriebenen Reihenfolge werden die Anforderungen zuerst an das elektrische und thermische Modell übergeben, um eine elektrische/thermische Konfiguration festzulegen. Die Anforderungen werden im Einzelnen in Abschnitt 4.3 vorgestellt. Elektrisches und thermisches Modell übergeben, neben der elektrischen Konfiguration (XsYp), die Dimensionierung des Kühlsystems an das mechanische Modell und die Kostenermittlung. An den Optimierer werden zusätzlich die mittlere Zelltemperatur, der SoC-Swing mit den SoC_{Min} und SoC_{Max} Werten, die maximal mögliche elektrische Entladeleistung auf dem eingestellten SoC-Swing, die genutzte Energiemenge bei der Simulation und die zurückgelegte Strecke aus der Simulation, sofern vorhanden[58], übergeben.
Das mechanische Modell ermittelt aus der elektrischen Konfiguration passende Modulgrößen (siehe Abschnitt 4.1.3), sowie die resultierende Rahmengröße und gibt diese an das Kostenmodell weiter. Neben diesen beiden Größen werden die Informationen über eine erfolgreiche Platzierung der Bauteile in den Bauraum[59] und das resultierende Volumen des Batteriepacks mit angepasstem Rahmen dem Optimierer übergeben.
Aus der Kostenberechnung werden der absolute Batteriepreis und der energetische Batteriepreis bezogen auf den nominellen Energieinhalt an den Optimierer übergeben.
Der Optimierer hat die Möglichkeit auf einige Parameter der verwendeten Modelle zuzugreifen, um eine Optimierung durchzuführen. Der Satz veränderlicher Parameter für die globale Optimierung ist in der folgenden Tabelle dargestellt. Grundsätzlich können alle Parameter der Modelle für eine Optimierung genutzt werden. Der ausgewählte Satz von Optimierungsvariablen wird für die später folgenden Anwendungsfälle verwendet.

[58] Wenn für die Auslegung der Batterie kein Geschwindigkeitszyklus eines Fahrzeugs zugrunde liegt, sondern ein Stromzyklus oder Leistungszyklus, existiert keine zurückgelegte Strecke. In den hier vorgestellten Anwendungsfällen liegt immer ein Geschwindigkeitszyklus zugrunde.
[59] Falls nicht alle Bauteile in den Bauraum passen, wird diese Information an den Optimierer in Form einer Boolean Variable gegeben.

Tabelle 4.8: Optimierungsvariablen für die Durchführung der globalen Optimierung

Optimierungsvariablen	Beispielhafte Wertebereiche	Beschreibung
SoC_{Min} SoC_{Max}	1-30 % 70-100 %	SoC Grenzen, ergeben zusammen den SoC-Swing
$\dot{v}_{Fl}$	0-400 l/h	Kühlmitteldurchflussrate in der Kühlplatte
$Flag_{xPlatzierung}$ $Flag_{yPlatzierung}$ $Flag_{zPlatzierung}$	Boolean Boolean Boolean	Einstellparameter für das Block Building im Packalgorithmus[60]
E_{Anf}	80-100 kWh	Geforderter nutzbarer Energieinhalt

Die Auslegung der Batterie beginnt, wie in Abbildung 4.23 zu erkennen, mit den Anforderungen an die Batterie. Auf diese geht der nächste Abschnitt ein.

4.3 Batterieanforderungen, Fahrzyklen und Fahrzeugklassen

Für die Auslegung einer Batterie muss bekannt sein, wie und wo diese eingesetzt werden soll. Dementsprechend werden Anforderungen an die Batterie formuliert. Die Anforderungen decken alle Bereiche der Haupteinflussfaktoren ab und werden durch zusätzliche Voreinstellungen ergänzt. Die allgemeinen Anforderungen und die Voreinstellungen werden im vorliegenden Abschnitt näher erläutert. Genaue Anforderungen hängen grundsätzlich vom jeweiligen Anwendungsfall ab (siehe auch Ketterer et al., 2009). Die angegebenen Größen dienen daher der Orientierung oder als Basiswerte, falls keine näheren Informationen zu dem entsprechenden Parameter vorliegen. Die meisten Anforderungen an einen Batteriepack werden von dem dazugehörigen Fahrzeug festgelegt (Linse und Kuhn, 2015, S. 258; Ogrzewalla, 2012). Daher wird auf die Anwendungszyklen und die verschiedenen Fahrzeugklassen gesondert in eigenen Unterabschnitten eingegangen.

4.3.1 Batterieanforderungen und Voreinstellungen für die Batterieauslegung

Um die Auslegung der Hochvoltbatterie für ein elektrifiziertes Fahrzeug vorzunehmen, muss der/die Auslegende zum einen Anforderungen berücksichtigen, die vom Auftraggeber (dem Fahrzeughersteller) gestellt werden. Zum anderen unterliegt das Batteriedesign zusätzlichen Randbedingungen, welche sich aus ökonomischen oder technischen Betrachtungen ergeben. Die Anforderungen und Einstellmöglichkeiten werden nach den Haupteinflussfaktoren und den Modellen sortiert[61]. Für die elektrische Auslegung sind die wichtigsten Anforderungen in Tabelle 4.9 zusammengefasst. Auf Basis der Packspannungsanforderungen wird die minimale und maximale Anzahl serieller Zellen ermittelt. Die geforderte elektrische Leistung und der gewünschte nutzbare Energieinhalt haben ebenfalls Einfluss auf die serielle, aber

[60] Eine nähere Beschreibung des Block Building und der Funktion der Flag-Parameter befindet sich in der Beschreibung der mechanischen Voroptimierung in Kapitel 4.4.2.

[61] Die Auflistung geht einher mit den veränderlichen Parametern der Gesamtoptimierung. Eine vollständige Übersicht aller Parameter und deren Wertebereiche befindet sich im Anhang unter 6.5.

auch auf die parallele Verschaltung der Batteriezellen. Um die geforderte Leistung bereitzustellen, wird hier grundsätzlich von einer Pulsdauer von mindestens 10 s ausgegangen. Der SoC und die Temperatur für die Leistungserreichung sind nicht festgelegt. Der entsprechende SoC muss sich aber auf dem eingestellten SoC-Swing befinden. Die Anforderung an den SoC-Swing selbst rührt von Alterungsbetrachtungen her. Der SoC-Swing liegt für verschiedene Elektrifizierungsgrade in unterschiedlichen Bereichen (siehe Perner und Vetter, 2015). Neben der Steigerung des Innenwiderstands aufgrund der Alterung, geht über die Lebensdauer ein Kapazitätsverlust einher. Es können daher ebenfalls die elektrischen Anforderungen als EoL Anforderungen gestellt werden. Bezogen auf die Restkapazität der Batterie, liegen die EoL Anforderungen, je nach Fahrzeughersteller, zwischen 70 und 80 % (Jeckel, 2016; Brünglinghaus, 2015). Die Innenwiderstandssteigerung unterliegt starken Annahmen. Da keine Alterung berücksichtigt wird, werden auch keine Anforderungen bezüglich EoL gestellt.

Tabelle 4.9: Elektrische Anforderungen für die Batterieauslegung (Auszug)

Anforderung		Einheit	Wertebereich	Basiswerte
Packspannung	Max	V	>0	ISO/PAS 19295 oder Werknorm MBN LV 123
	Min	V	>0	
Packleistung	Geforderte Leistung	kW	>0	-
Energieinhalt	BoL Energieinhalt	kWh	>0	-
	SoC-Swing	%	[40-100]	> 70 %

Die wichtigste thermische Anforderung ist die Vermeidung einer Grenzwertüberschreitung der Zelltemperatur hin zu sicherheitskritischen Temperaturen. Dies gilt insbesondere für Li-Ionen Batteriezellen. Die Wohlfühltemperatur für Li-Ionen Batteriezellen liegt im Bereich zwischen 15 bis 50 °C (vgl. Rezvanizaniani et al., 2014; Ecker und Sauer, 2013). Die Temperatur sollte unbedingt unter 60 °C bleiben (vgl. Ecker et al., 2012). Zusätzlich sollte die Temperaturverteilung zwischen den Zellen eines Batteriepacks möglichst homogen sein, um stark unterschiedliche Alterung der Zellen zu vermeiden. Severino et al. sprechen von einer maximalen Temperaturdifferenz von 5 K (Severino et al., 2014). Jeckel stellt fest, dass die kalendarische Alterung zwischen 25 und 50 °C um 2/3 zunimmt (Jeckel, 2016). Als thermische Anforderung wird im Folgenden ein Grenzwert von 50 °C für die mittlere Zelltemperatur verwendet. Eine homogene Temperaturverteilung kann auf Basis des verwendeten Kühlsystemmodells nicht überprüft werden und geht daher nicht in die Anforderungen ein[62].

Tabelle 4.10: Mechanische Einstellparameter für die Batterieauslegung (Auszug)

Parameter		Einheit	Wertebereich	Basiswerte
Modulbeschränkungen	Maximale serielle Anzahl	-	>0	Inf
	Minimale Anzahl Zellen	-	>0	5
	Maximale Anzahl Zellen	-	>0	20
	Höhe des Moduldeckels	mm	≥0	15
	Dicke der Modulendplatten	mm	>0	15

[62] Siehe Beschreibung des thermischen Modells in Kapitel 4.1.1.

Die hier aufgeführten mechanischen Einstellparameter in Tabelle 4.10 beziehen sich vor allem auf die Modulgestaltung. Die maximale Anzahl serieller Zellen wird für gewöhnlich eingeführt, um eine Modulspannung von > 60 V D.C. zu vermeiden. Dadurch bleibt die Modulspannung unter der Hochvolt-Klassifizierung gemäß ISO 6469-3 und es ist kein speziell geschultes Personal für die Montage notwendig, was sich günstig auf die Kosten in einer manuellen Montage auswirkt (vgl. Linse und Kuhn, 2015). Dennoch wird die 60 V Grenze für die Auslegung von EV-Batterien hier nicht herangezogen, da die Personalqualifikation nicht ausschlaggebend für die Entscheidung für eine Modulgröße sein soll. Die maximale Anzahl von 20 Zellen insgesamt in einem Modul hat mechanische Gründe. Beispielsweise muss der Anpressdruck über alle Zellen eines Moduls weitergegeben werden, was bei sehr großen Modulen zu einer Herausforderung wird. Zusätzlich wird so indirekt eine Gewichtsbegrenzung für die Module eingeführt. Die Zellen des größten verwendeten Formats wiegen etwa 2 kg, was bei 20 Zellen zu einem Modulgewicht von ca. 40 kg führt und damit in der Fertigung noch gut gehandhabt werden kann. Die weiteren mechanischen Anforderungen an Crashsicherheit und Einbauort werden durch den Batterierahmen abgedeckt, dessen Auswahl vom Fahrzeug abhängt und deshalb gesondert in Abschnitt 4.3.3 über die Fahrzeugklassen behandelt wird.

Tabelle 4.11: Parameter für die Kostenermittlung (Auszug). Die Basiswerte beziehen sich auf die PHEV Konfiguration. In Klammern sind die Einstellungen für die EV Konfiguration aufgeführt.

Parameter		Einheit	Wertebereich	Basiswerte
Betrachtungsjahr			[2009-2016]	2016
Stückzahl n		-	>0	1000
Lernrate L		-	[0,8-0,9]	0,85
Zuschlag KFZTeile $Z_{Herstellung}$		-	[1,1-1,923]	1,715 (1,1)
Sonstige Bestandteile		%	[5-20]	14 (7)
Umsatzrendite Ur		%	[0-20]	5
Verbindermaterial	Zellverbinder	-	Aluminium, Kupfer	Aluminium
	Modulverbinder	-	Aluminium, Kupfer	Kupfer
Referenzproduktionsmenge n_0		-	1000	1000 (10 000)

Bezüglich der Kosten bestehen keine direkten Anforderungen. Grundsätzlich soll der Batteriepack möglichst günstig sein. Was günstig ist, hängt vom betrachteten Fahrzeug und dessen Reichweite und Anwendungsfall ab. Teilweise werden bestimmte energetische Preise (€/kWh) für den Batteriepack als Zielwerte angegeben (vgl. BioAge Group, 2014b). Die günstigste Batterie ist aber nicht zwangsläufig diejenige Batterie, mit dem niedrigsten Wert für die energetischen Kosten (siehe Abschnitte 4.5.1 und 4.5.3).
An dieser Stelle werden die wichtigsten Parameter für die Vorkonfiguration des Kostenmodells aufgeführt (Tabelle 4.11). Für das bestehende Kostenmodell können Wechselkurs- und Inflationsbereinigungen zwischen 2009 und 2016 durchgeführt werden. Für Prognosen sind die Rohstoffkostenmodellierung und die Wechselkurse nicht geeignet. Hierfür wären zusätz-

liche Annahmen oder Anpassungen der Kostendaten notwendig. Neben den zwei verschiedenen Fahrzeugkonfigurationen (PHEV und EV) sind die wesentlichen Voreinstellungen durch die Auswahl der Stückzahl, die Lernrate und die Umsatzrendite vorzunehmen.

4.3.2 Fahrzyklen als Nutzungsszenario

Für die vorliegende Arbeit werden die Belastungszyklen für die Hochvoltbatterien aus Geschwindigkeitszyklen ermittelt. Dabei stellen die Fahrzyklen die spezifischen Anwendungsfälle für die Fahrzeuge dar. Es ist von zentraler Wichtigkeit den spezifischen Anwendungsfall für die Auslegung der Batterie zu kennen (siehe auch Rothgang et al., 2015). Die Fahrzyklen werden zu diesem Zweck mit einem Fahrzeug der entsprechenden Fahrzeugklasse und einer gleichbleibenden Batteriekonfiguration in einem Simulationswerkzeug durchfahren und der Strombedarf zusammen mit der Batteriespannung aufgenommen. Dabei wird darauf geachtet, dass keine BMS Eingriffe stattfinden und das Fahrzeug den Zyklus tatsächlich bei der vorgeschriebenen Geschwindigkeit durchfahren hat. Des Weiteren startet das Fahrzeug mit einem SoC von 50 % und einer Temperatur von 25 °C. Die Umgebungstemperatur ist ebenfalls auf 25 °C eingestellt. Ferner ist ein permanenter Nebenverbrauch in Höhe von 400 W auf der Niederspannungsseite eingestellt. Aus dem aufgenommenen Batteriestromsignal und dem Verlauf der Batterieklemmenspannung wird die abgegebene elektrische Leistung berechnet. Die Leistungskurve dient als Eingangssignal für die Auslegung der Hochvoltbatterie. Durch die Umrechnung in eine elektrische Leistung wird der Einfluss der vorkonfigurierten Batterie in der Simulation wieder aus den Daten entfernt. Auftretende Verluste in Getriebe, elektrischem Motor und Leistungselektronik, sowie der Einfluss des Fahrzeugs sind auf diese Weise bereits in das Signal integriert.

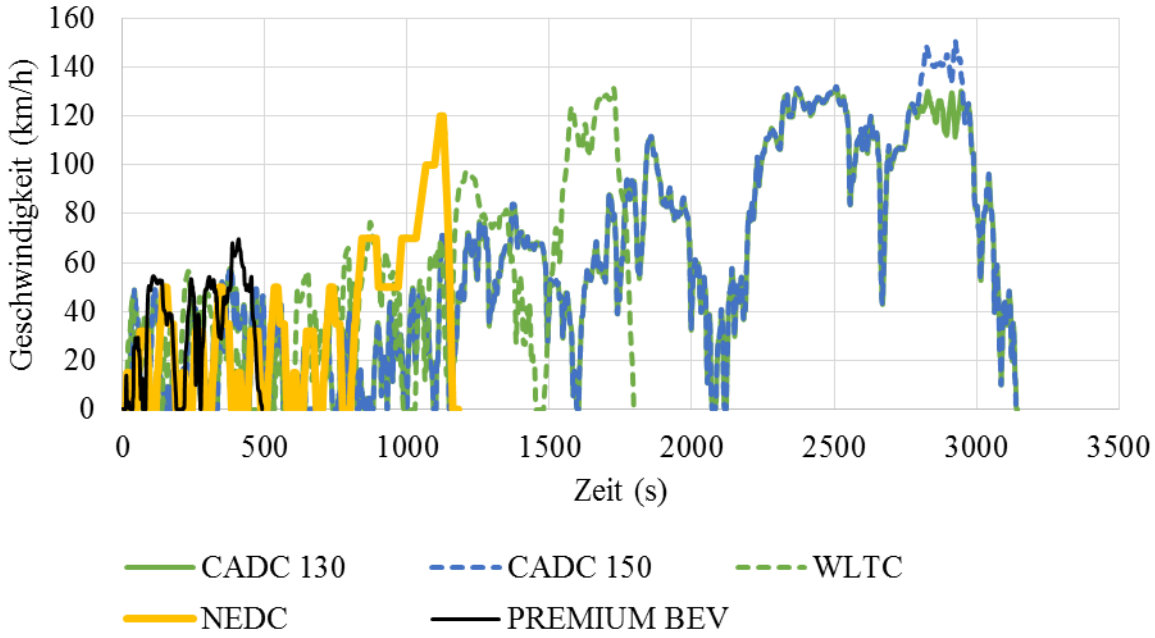


Abbildung 4.24: Die verwendeten Geschwindigkeitszyklen für die Batterieauslegung.

Zum Einsatz kommen vier verschiedene standardisierte Fahrzyklen und ein weiterer für eine Anwendung als Kurzstreckenfahrzeug. Der bekannteste Standardtest für die Ermittlung von Verbrauch und Reichweite in Europa ist der *Neue Europäische Fahrzyklus* (NEFZ, englisch:

NEDC) (vgl. Karle, 2017, S. 124 ff.). Für Reichweitenvergleiche zwischen Herstellerangaben und Simulationen muss dieser synthetische Zyklus herangezogen werden. Der NEFZ wird von der WLTP (Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure) abgelöst, deren Bestandteil ein Fahrzyklus ist (WLTC) (Global technical regulation No. 15 UN-ECE/Trans/180/Add.15). Neben der längeren Zyklusdauer erreicht der WLTC höhere Geschwindigkeiten und stellt zusätzlich ein realistisches Fahrprofil nach. Zwei weitere Anwendungsfälle stellen der CADC 130 (Common Artemis Driving Cycle) und der CADC 150 dar (André, 2004). Wie auch NEDC und WLTC bestehen die CADCs aus einem städtischen, einem ländlichen und einem Autobahnanteil. Dabei unterscheiden sich CADC 130 und CADC 150 lediglich um die Höchstgeschwindigkeit im Autobahnbereich (siehe Abbildung 4.24). Ferner handelt es sich bei den CADCs um Real-drive Emission (RDE) Zyklen (vgl. André et al., 2006). Auch wenn es bei der Anwendung für ein Elektrofahrzeug nicht um die Emissionen gehen kann, bilden diese Zyklen über die Geschwindigkeit einen großen Anteil der Belastungssituationen für einen PKW ab, weshalb sie als Anwendungsprofil gut geeignet sind. Während die genannten vier Zyklen alle einen Autobahnanteil besitzen und damit auf einen allgemeinen Gebrauch des Fahrzeugs zielen, enthält der fünfte Zyklus (PREMIUM BEV) keinen Anteil mit hoher Geschwindigkeit. Er repräsentiert vielmehr die tatsächliche (Flotten-)Nutzung von aktuellen Elektrofahrzeugen mit einer Reichweite deutlich unter 200 km und stammt aus dem Forschungsprojekt PREMIUM (VDI/VDE Innovation + Technik GmbH, 2016; Schramm et al., 2017). In dem Projekt wurden elektrische Flottenfahrzeuge mit Datenloggern ausgestattet und die übliche Nutzung der Fahrzeuge analysiert[63]. Aus den gemessenen Daten wurde der abgebildete Fahrzyklus als repräsentativ für ein Elektrofahrzeug zusammengestellt. Er beinhaltet einen Stadt- und einen kurzen Überlandanteil mit einer maximalen Geschwindigkeit von 70 km/h (Schramm et al., 2017, S. 314).
In Tabelle 4.12 sind einige charakteristische Größen der fünf Fahrzyklen zusammengefasst. Die mittlere Geschwindigkeit steigt von NEDC, über den WLTC bis zu den CADCs. Ebenso die maximalen Geschwindigkeiten, die Lade- und die Entladeleistungen. Der PREMIUM Zyklus besitzt beinahe dieselbe Durchschnittsgeschwindigkeit wie der NEDC und die maximale Geschwindigkeit ist deutlich geringer. Die Leistungswerte für Ladung und Entladung sind allerdings deutlich über denen des NEDC, was den Zyklus, trotz des Fehlens eines Autobahnanteils, anspruchsvoll macht. Die eigentliche Zyklusdauer hat für die Batterieauslegung keinen Einfluss, da die Zyklen solange wiederholt werden, bis die Batterie von ihrem SoC_{Max} Wert den SoC_{Min} Wert erreicht.

Tabelle 4.12: Charakteristische Größen der verschiedenen Fahrzyklen für ein Fahrzeug der Kompaktklasse

	NEDC	**WLTC**	**CADC 130**	**CADC 150**	**PREMIUM BEV**
mittlere Geschwindigkeit (km/h)	33,6	46,5	58,2	59,1	34,0
maximale Geschwindigkeit (km/h)	120,0	131,3	131,8	150,4	69,7
mittlere Ladeleistung (kW)	6,7	6,3	8,4	8,4	7,4
mittlere Entladeleistung (kW)	5,9	10,2	14,3	15,0	9,5
maximale Ladeleistung (kW)	23,6	26,3	80,1	80,1	47,6
maximale Entladeleistung (kW)	40,4	49,0	65,4	65,4	69,3
Dauer (min)	19,7	30,1	52,5	52,5	8,2
Strecke (km)	11,0	23,3	50,9	51,7	4,6

[63] Eingesetzt waren 71 Fahrzeuge, welche über 33 000 Fahrten absolvierten (Schramm et al., 2017).

Neben den Unterschieden bezogen auf die Höchst- und Durchschnittsgeschwindigkeiten, sowie die mittleren und maximalen Lade-/Entladeleistungen stellen die tatsächliche Leistungsverteilung und die Aufenthaltsdauer in den Leistungsbereichen für die Beanspruchung der Hochvoltbatterie die zentralen Anforderungen. Deshalb wurden 17 Leistungsbereiche in 5 kW Schritten festgelegt (siehe Abbildung 4.25). Die äußeren Grenzen für die Leistungsbereiche stellen 35 kW Entlade- und Ladeleistung dar[64]. Alles über diesen Werten ist in den höchsten Leistungsbereichen enthalten. Im Bereich des Stillstands wurde ein kleineres Leistungsintervall gewählt, da bekannt ist, dass im Stillstand lediglich die Nebenverbraucher eingeschaltet sind und daher der Bereich zwischen 1 kW Lade- und Entladeleistung isoliert werden kann[65].

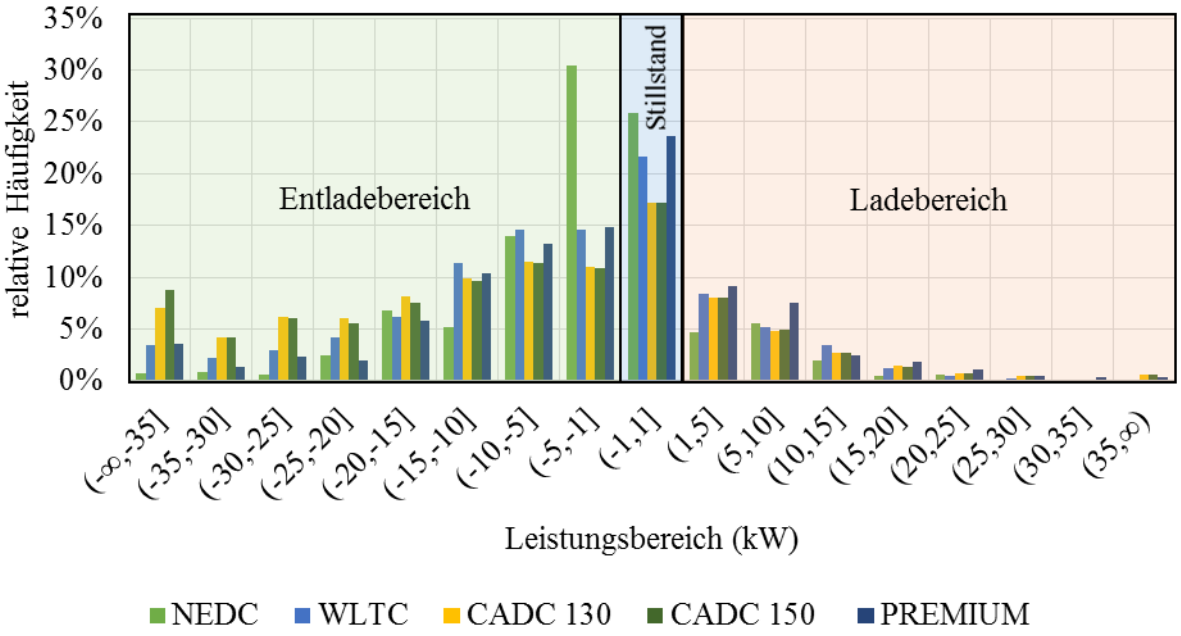


Abbildung 4.25: Relative Häufigkeit verschiedener Leistungsbereiche auf den unterschiedlichen Zyklen für ein Fahrzeug der Kompaktklasse.

Abbildung 4.25 stellt die relative Häufigkeit der Fahrzyklusleistungswerte in den jeweiligen Bereichen für ein Kompaktfahrzeug dar[66]. Die relative Häufigkeit ist auf die Menge von Einträgen normiert. Zusätzlich können die Häufigkeitswerte mit Hilfe der bekannten Zyklusschrittweite in eine Aufenthaltsdauer in den Leistungsbereichen umgewandelt werden. Es ist deutlich zu erkennen, dass der NEDC die geringsten Leistungsanforderungen stellt, da er sich in über der Hälfte des Zyklus im Stillstand und im Bereich geringer Entladeleistung (zwischen 1 und < 5 kW) aufhält. Zusammen mit dem nächst höheren Entladebereich bis < 10 kW sind bereits 70 % des Zyklus abgedeckt. Entladeleistungen über 35 kW treten nur für ca. 9 s im NEDC auf. 13 % der Zyklusdauer befinden sich im Rekuperationsbereich. Davon sind 12 % im Bereich unter 15 kW.

[64] Positive Leistungswerte entsprechen einer Batterieladung, negative Werte einer Entladung.
[65] Neben dem tatsächlichen Stillstand werden in diesem Bereich zusätzlich Schleichgeschwindigkeiten bis 5 km/h abgedeckt.
[66] Die allgemeinen Aussagen zu den Unterschieden zwischen den verschiedenen Zyklen werden sich bei Betrachtung einer anderen Fahrzeugklasse nicht ändern. Die Leistungsbereiche und die relativen Häufigkeiten werden sich quantitativ verschieben, aber das gilt für alle Zyklen.

Im Vergleich zu dem NEDC sind die Entladeleistungsbereiche des WLTC gleichmäßiger auf einen Bereich bis zu 20 kW verteilt (ca. 70 % des Zyklus‘). Der Stillstands- beziehungsweise Schleichfahrtsanteil ist auch in diesem Zyklus relativ hoch (22 % oder ca. 400 s). Ferner sind die Leistungsbereiche über 20 kW der Entladung gleichmäßig verteilt und erreichen insgesamt 13 % der gesamten Zyklusdauer. Auf Rekuperationsseite befindet sich der WLTC ebenfalls länger als der NEDC (19 %) und in einem höheren Leistungsbereich.
Die CADCs besitzen den geringsten Stilltands- und Schleichfahrtsanteil. Des Weiteren halten sie sich in allen Entladebereichen mit einem Anteil von über 4 % auf (das sind über 120 s). Vor allem im Bereich über 35 kW Entladeleistung stechen die beiden Zyklen hervor. Der CADC 150 erreicht hier 9 % der Zyklusdauer (oder 275 s). Tabelle 4.12 ist eine maximale Entladeleistung von 65 kW zu entnehmen. Der Rekuperationsbereich ist dem des WLTC ähnlich. Allerdings treten hier maximale Ladeleistungen bis zu 80 kW auf. Der WLTC überschreitet 27 kW Entladeleistung nicht.

Obwohl der PREMIUM Zyklus die zweitlängste relative Standzeit besitzt, weist er dennoch Charakteristika auf, die einzigartig sind. Im Entladebereich gleicht er stark dem Verhalten auf dem WLTC. Die mittlere Entladeleistung ist zwar etwas geringer als auf dem WLTC, die maximale Entladeleistung aber höher als bei allen anderen Zyklen (69 kW). Im Rekuperationsbereich besitzt der PREMIUM Zyklus mit Abstand die längste Aufenthaltsdauer (23 %). Dort übersteigt er sogar die relativen Anteile der CADCs. Die aufgeführten Fahrzyklen zeigen unterschiedliche Charakteristika bezogen auf die Lade- und Entladeleistungen, sowie Stillstandszeiten. Dadurch sind die Zyklen geeignet, um verschiedene Nutzungszenarien der Hochvoltbatterie abzubilden.

4.3.3 Fahrzeugklassen

Wie bereits erwähnt, werden viele Anforderungen an die Hochvoltbatterie von dem Zielfahrzeug abgeleitet. Neben den Unterschieden in der notwendigen Leistung auf demselben Fahrzyklus[67], werden ebenfalls der Bauraum, sowie die geforderten Reichweiten von der Fahrzeugklasse beeinflusst. Entsprechend der Fahrzeugklasse, sowie dem Elektrifizierungsgrad des betrachteten Fahrzeugs werden Vorkonfigurationen für die Optimierung vorgenommen. Explizit werden für PHEV und EV unterschiedliche Basiskonfigurationen für die Kühlplatte und die BDU-Form ausgewählt. Von der Fahrzeugklasse abhängig sind der Basisbatterierahmen und die Fahrzeugparameter für die Ermittlung eines notwendigen Dauerstroms, bei der jeweiligen elektrischen Höchstgeschwindigkeit.
In der vorliegenden Arbeit werden vier unterschiedliche Fahrzeugklassen betrachtet, deren wichtigsten Parameter in Tabelle 4.13 aufgeführt sind[68]. Während der Porsche Cayenne den Verifizierungs- und Plausibilisierungsfällen dient, werden die weiteren drei Fahrzeuge in den späteren Anwendungsfällen für die Beantwortung verschiedener Fragestellungen dienen.

[67] Ein Vergleich für den NEDC in den Leistungsbereichen aus Abbildung 4.25 befindet sich im Anhang in Abbildung 6.8.
[68] Bei der Ermittlung der Leistungszyklen wurden die elektrischen Höchstgeschwindigkeiten missachtet.

Tabelle 4.13: Die wichtigsten Simulationsfahrzeugparameter der betrachteten Fahrzeuge

Fahrzeugklasse	Kompakt	Kompakt	Oberklasse	Großer SUV
Beispielfahrzeug	BMW i3	VW e-Golf	Tesla Model S	Porsche Cayenne
m_{Fzg} **(kg)**	1240	1960	2680	3100
c_w **(-)**	0,29	0,31	0,29	0,36
A_{Front} **(m²)**	2,57	2,23	2,33	2,79
μ_1 **(-)**	0,008	0,008	0,0085	0,011
μ_2 **(s/m)**	0,0001	0,0001	0,0001	0,00001
r_{dyn} **(m)**	0,284	0,307	0,342	0,331
$v_{Max,el}$ **(km/h)**	150	140	210	125
Batteriebauraum	Unterboden	Kardantunnel, Sitzreihen, Tank	Unterboden	Hinterwagen

4.4 Ermittlung einer voroptimierten Konfiguration

Vor der Durchführung einer globalen Optimierung werden, mit Hilfe des elektrischen und des mechanischen Modells, jeweils Voroptimierungen durchgeführt. Die elektrische Voroptimierung dient der Ermittlung einer eindeutigen elektrischen Konfiguration, passend zu dem eingestellten SoC-Swing. Die mechanische Voroptimierung findet für die entsprechende elektrische Konfiguration die passende Modulgröße und eine volumeneffiziente Platzierung der Batteriebauteile im Bauraum des Fahrzeugs. Erst nach der Durchführung der Voroptimierungen, greift die globale Optimierung auf diese Konfigurationen zurück. Die Voroptimierungen sind bereits in Abschnitt 3.2.1 in der Funktionsstruktur (Abbildung 3.7, Seite 46) zu erkennen. In Abschnitt 4.4.1 wird die elektrische Voroptimierung vorgestellt. Hierbei wird auf die zentrale Rolle der SoC-Swinglage eingegangen und das entstehende Verhalten der elektrischen Voroptimierung bei Veränderung des SoC-Swings aufgezeigt. In Abschnitt 4.4.2 wird der Packalgorithmus (PA) für die Platzierung der Bauteile der Batterie beschrieben. Dort erfolgen zudem eine Untersuchung der wichtigsten Einflussgrößen innerhalb des PA und eine Plausibilisierung der Ergebnisse.

4.4.1 Elektrische Voroptimierung

Auf Basis eines ausgewählten SoC-Swings soll eine Batteriekonfiguration, bestehend aus seriellen und parallelen Batteriezellen, ermittelt werden. Zentral für die Auswahl der Zellverschaltung sind die Leistungs- und die Energieanforderung für den Batteriepack. Eingeschränkt werden die möglichen Konfigurationen durch die Packspannungsober- und –untergrenze, die verfügbaren oder geforderten Packströme und die Auslegung zu *Begin of Life* oder *End of Life* (BoL/EoL) Bedingungen. Bei einer EoL Auslegung müssen die Anforderungen mit Zellen in gealtertem Zustand erfüllt werden. Hierfür können ein Kapazitätsverlust und eine Erhöhung des Innenwiderstands eingestellt werden.

Abbildung 4.26 zeigt das Ablaufdiagramm der elektrischen Auslegung, welche auch als Voroptimierung bezeichnet wird, da das Ziel des Ablaufs ist, eine minimale Anzahl von Zellen

für die Erfüllung der elektrischen Anforderungen zu ermitteln. Die verschiedenen Funktionen, um die passende Zellanzahl zu bestimmen werden im Folgenden erläutert.
Nachdem die wichtigsten Rahmenbedingungen in Form von Anforderungen und Randbedingungen vorgegeben wurden, werden zunächst die Ober- und Untergrenze für die Anzahl serieller Batteriezellen ermittelt. Dem folgt die Bestimmung eines quasi-nominellen Energieinhalts auf dem gewählten SoC-Swing. Hierfür wird eine Simulation durchgeführt, bei welcher eine einzelne Batteriezelle mit einer 1C-Rate zu 100 % entladen wird. Anschließend wird in einer ersten Schleife eine Zellkonfiguration ermittelt, die auf Basis der 1C-Simulation die Energieanforderung erfüllt. Mit dieser Konfiguration wird eine weitere Schleife (Schleife 2) gestartet. Innerhalb der zweiten Schleife wird eine Simulation auf einem vorher festgelegten Anwendungszyklus durchgeführt. Nachdem die Simulation abgeschlossen wurde, wird berechnet welche elektrische Energie auf dem Zyklus verbraucht wurde. Ist diese Energiemenge kleiner als die geforderte Energiemenge (E_{Anf}) oder als die geforderte elektrische Leistung (P_{Anf}), wird erneut die erste Schleife gestartet, ansonsten ist die Voroptimierung beendet und die zuletzt simulierte Batteriekonfiguration wird ausgegeben. Die nummerierten Funktionen aus Abbildung 4.26 werden nachfolgend näher beschrieben.

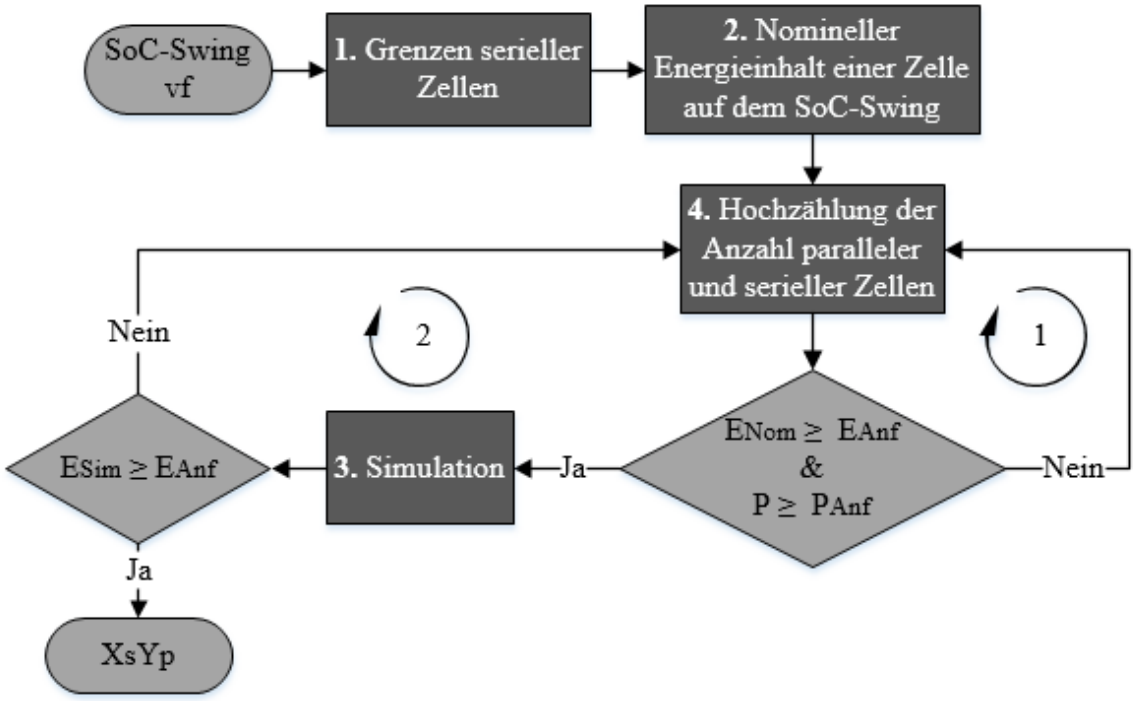


Abbildung 4.26: Ablaufdiagramm für die Ermittlung der Anzahl serieller und paralleler Zellen, auf Basis von Energie- und Leistungsanforderungen, sowie einem vorgegebenen SoC-Swing.

1. Ermittlung der minimal und maximal möglichen seriellen Zellen

Sowohl in Lade-, als auch in Entladerichtung werden die möglichen Überspannungen über den gesamten gültigen SoC- und Temperaturbereich, mit Hilfe der Kennfelder des ECM ermittelt. Für verschiedene Pulsdauern stehen hier Stromkennfelder zur Verfügung. Zusammen mit der OCV Kennlinie werden so die maximal möglichen Spannungen für jede der Strompulszeiten berechnet. Diese Maximalwerte werden miteinander verglichen und der größte Wert wird ausgewählt und ermittelt, welche der Strompulszeiten die ausschlagge-

bende war. Zusätzlich werden die zugehörige Temperatur und der SoC festgestellt. Der Berechnung der maximalen Zellspannungen folgt ein Vergleich mit den erlaubten Zellbetriebsspannungen. Werden die Zellbetriebsspannungen nicht überschritten, werden mit den Maximalspannungswerten die minimale und maximale Anzahl serieller Zellen bestimmt. Bei Überschreitung der Zellbetriebsspannung wird diese für die Auslegung verwendet und angenommen, dass das BMS in einem solchen Fall den Strom entsprechend begrenzt.

2. Ermittlung des nominellen Energieinhalts auf dem gewählten SoC-Swing

Mit Hilfe des 1C-Entladezyklus bei Auslegungstemperatur (Standard: 25 °C) wird eine Simulation durchgeführt. Die Zelle wird von einem SoC 100 % auf 0 % entladen und der Energieinhalt über Gleichung 4.16 berechnet:

$$E_{1C} = \int_{t_{start}}^{t_{ende}} i_{Zelle} * u_{Zelle}\, dt. \qquad \textbf{4.16}$$

Mit Hilfe des SoC-Verlaufs kann der Energiehub auf dem gewählten SoC-Swing zwischen SoC_{Max} und SoC_{Min} berechnet werden:

$$E_{Swing,1C} = |E_{1C}(SoC_{Max}) - E_{1C}(SoC_{Min})|. \qquad \textbf{4.17}$$

Die so ermittelte Energiemenge unterscheidet sich von dem Standardverfahren für die Feststellung der Energiemenge auf einem speziellen SoC-Swing. Daher wird im Folgenden auf die Unterschiede zwischen der Berechnung über die 1C-Simulation und das Standardverfahren eingegangen. Die Standardauslegung erfolgt mit Hilfe nomineller Kennwerte der Zelle:

$$E_{Nom} = C_{Nom} * U_{Nom}, \qquad \textbf{4.18}$$

$$E_{Nutz,Standard} = E_{Nom} * SoC_{Swing}. \qquad \textbf{4.19}$$

Die Ermittlung über die 1C-Simulation berücksichtigt die SoC-Swinglage im Zellbetriebsbereich. Hierbei fließen die sich verändernde OCV-Kennlinie und die SoC-Swinglage abhängigen Innenwiderstände mit ein. Für einen direkten Vergleich der zwei Methoden, werden zwei verschiedene SoC-Swings verwendet. Die sich daraus ergebenden Einzelfälle sind in Tabelle 4.14 festgehalten. Für die Untersuchung wird eine 28 Ah PHEV2 Zelle verwendet.

Tabelle 4.14: Einzelfälle für den Vergleich zwischen Standard- und SoC-lageabhängiger Auslegung

SoC_{Swing}	SoC-Swinglage SoC_{Min}	SoC-Swinglage SoC_{Max}
10 %	0	10
	10	20
	40	50
	80	90
	90	100
80 %	0	80
	10	90
	20	100

Nachdem eine Simulation mit einer 1C-Entladerate (28 A) durchgeführt wurde, ergeben sich die folgenden Diagramme für die Auswertung:

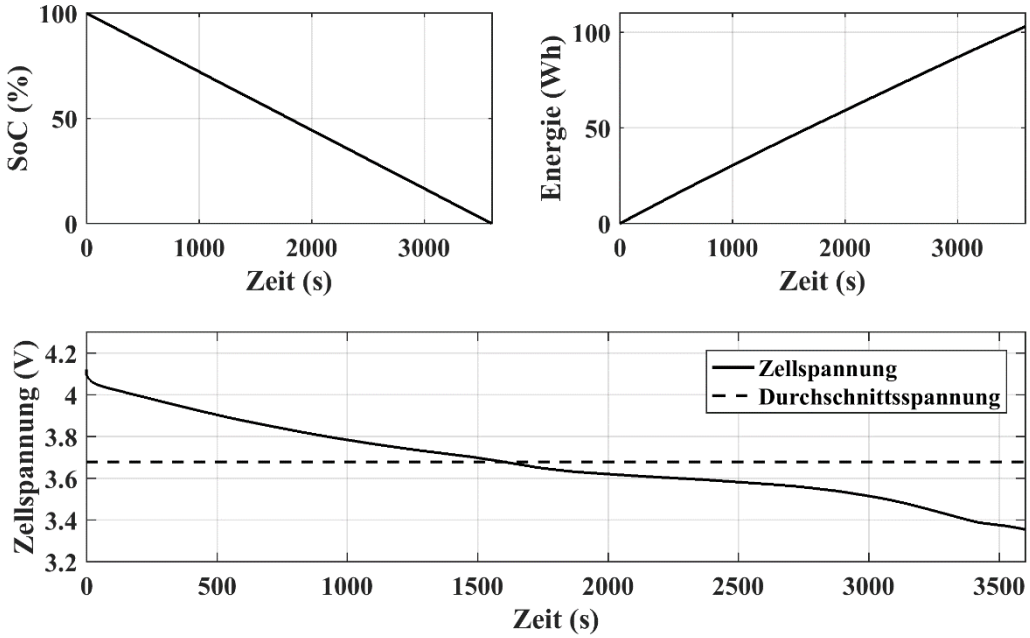


Abbildung 4.27: SoC-, Energie- und Spannungsverlauf bei einer Entladerate von 1C für eine 28 Ah Zelle.

Das rechte obere Diagramm in Abbildung 4.27 zeigt die kumulierte Energiemenge über den Entladezyklus. Dass die Energie nicht linear ansteigt, ist schwer zu erkennen. Deshalb ist zusätzlich der Zellspannungsverlauf dargestellt. Da die Entladerate über den gesamten Zyklus gleichbleibt, stellt der Zellspannungsverlauf die einzige auftretende Nichtlinearität dar (vgl. Gleichung 4.16).

Für die Standardermittlung einer spezifischen Energiemenge auf einem bestimmten SoC-Swing wird Gleichung 4.17 verwendet. Dem Datenblatt zufolge besitzt die Zelle die folgenden nominellen Größen:

$$C_{Nom} = 28{,}6\ Ah, \quad U_{Nom} = 3{,}67\ V. \qquad \textbf{4.20}$$

Um die Vergleichbarkeit zwischen Simulationsergebnis und Datenblatt zu gewährleisten, wird zunächst die Vorgehensweise bei der Bestimmung der nominellen Werte für das Datenblatt beschrieben. Für die Ermittlung der nominellen Kapazität wird eine spannungsgeregelte Entladung mit 28,6 A von U_{Max} (4,15 V) bis U_{Min} (3 V) durchgeführt. Dabei wird der Ladungsdurchsatz gemessen und so die nominelle Kapazität bestimmt. Aus dem Spannungsverlauf während der Entladung wird die Durchschnittsspannung berechnet und als U_{Nom} angegeben. Die Temperatur wird durch eine Klimakammer auf 25 °C gehalten. Als nominelle Energie (E_{Nom}) für eine volle Entladung ergeben sich 105,1 Wh (gemäß Gleichung 4.18).

Für den Vergleich wird ein Vollzyklus mit 28,6 A mit dem vorliegenden ECM simuliert. Die Beendigung des Zyklus erfolgt SoC gesteuert von SoC 100 % auf 0 %. Auch hier wird die Temperatur auf 25 °C gehalten. Aus der Simulation ergeben sich die folgenden Größen ($U_{Nom,Sim}$ siehe Abbildung 4.27, unten):

$$E_{Nom,Sim} = 105{,}3\ Wh,$$
$$U_{Nom,Sim} = 3{,}677\ V,$$
$$C_{Nom,Sim} = 28{,}6\ Ah,$$
$$U_{Schluss} = 3{,}35\ V. \qquad \textbf{4.21}$$

Die Simulation gibt ein sehr genaues Bild des wirklichen Zellverhaltens wieder, vergleicht man die simulierten Werte 4.21 mit den Werten des Zelldatenblatts. Allerdings unterscheidet sich die Schlussspannung in 4.21 von der spannungsgesteuerten Schlussspannung aus dem Zelldatenblatt um 0,35 V. Der Unterschied ergibt sich aus der SoC-abhängigen Strombegrenzung. Ab einem SoC von 0 ist der maximale Entladestrom ebenfalls 0, deshalb kann die dort erreichte Spannung nicht unterschritten werden. In der Strombegrenzung besteht auch ein weiterer Unterschied zwischen Simulation und realem Test. Im Test bleibt der Strom bis zur Schlussspannung konstant. In der Simulation wird der Entladestrom bei sehr kleinen SoC-Werten begrenzt.

Der Vergleich zwischen Standardberechnung (Gleichung 4.19), sowohl aus dem Zelldatenblatt ($E_{Nutz,Standard}$), als auch aus der 1C-Simulation ($E_{Nutz,Sim}$)[69] und der SoC-Swinglage abhängigen Berechnung über Gleichung 4.17 ($E_{Swing,1C}$) ist in Tabelle 4.15 dargestellt.

Tabelle 4.15: Ergebnisse der verschiedenen Berechnungsmethoden für die Ermittlung eines nominellen Energieinhalts auf einem bestimmten SoC-Swing

SoC_{Swing}	$E_{Nutz,Standard}$	$E_{Nutz,Sim}$	SoC-Swinglage SoC_{Min}	SoC-Swinglage SoC_{Max}	$E_{Swing,1C}$
10 %	10,51 Wh	10,53 Wh	0	10	9,72 Wh
			10	20	10,02 Wh
			40	50	10,37 Wh
			80	90	11,15 Wh
			90	100	11,46 Wh
80 %	84,09 Wh	84,24 Wh	0	80	82,73 Wh
			10	90	84,16 Wh
			20	100	85,6 Wh

Die Ergebnisse in Tabelle 4.15 zeigen, dass der Energieinhalt einer Zelle maßgeblich von der Lage des SoC-Fensters abhängt. Berechnet man die Energiemenge über den Standardansatz entspricht dies, für die vorliegende Zelle, einer mittigen Lage des SoC-Fensters. Der direkte Vergleich der Werte über die Standardberechnung ergibt einen Unterschied zwischen Datenblattwerten und der Simulation von 0,019 % beziehungsweise von 0,155 % und liegt damit weit unter 1 %. Die Lage des SoC-Swings im Bereich kleinerer Ladezustände ergibt weniger Energieinhalt als über die Standardgleichung berechnet, während eine Swinglage in hohen SoC-Bereichen einen größeren Energieinhalt ergibt. Die Abweichung liegt in den berechneten Beispielen bei bis zu 1,51 Wh. Dieser Wert gilt für eine einzelne Zelle. Legt man einen nutzbaren Energieinhalt von 90 kWh für ein Elektrofahrzeug und einen SoC-Swing von 80 % zugrunde, entspricht das 1071 Zellen bei der Auslegung über das Standardverfahren und das Zelldatenblatt. Nutzt man das SoC-lageabhängige Verfahren sind 1088, 1070

[69] Hierfür wird in Gleichung 4.19 E_{Nom} durch $E_{Nom,Sim}$ ersetzt.

oder 1052 Zellen erforderlich. Für den letzteren Fall mit einem SoC-Swing zwischen 20 % und 100 % entspricht das einer Differenz von 19 Zellen. Bei einem Zellpreis von ca. 21 € (siehe 4.1.2.2) sind das beinahe 400 € weniger Kosten für die Zellen. Damit wird hier bereits die Rolle der SoC-Swinglage deutlich. Noch deutlicher wird diese Rolle, bei Ermittlung des nutzbaren Energieinhalts mit Hilfe des Nutzungszyklus in der Simulation.

3. Simulation einer gültigen Konfiguration

Nachdem im Vorangehenden eine Konfiguration ermittelt wurde, welche im Normalfall wenigstens die Energieanforderung auf nomineller (1C-) Basis erfüllt, wird nun eine Simulation auf dem gewählten Fahrzyklus durchgeführt. Dafür werden die Zellen zu Modulen zusammengefasst[70]. Bei der Simulation wird die konfigurierte Batterie von ihrem SoC_{Max} bis zu ihrem SoC_{Min} entladen. Über die entladene Strommenge wird der Energieinhalt der Batterie berechnet:

$$E_{Sim} = \int u_{Zelle}\, i_{Zelle}\, dt \;\; n_S\, n_P. \qquad \textbf{4.22}$$

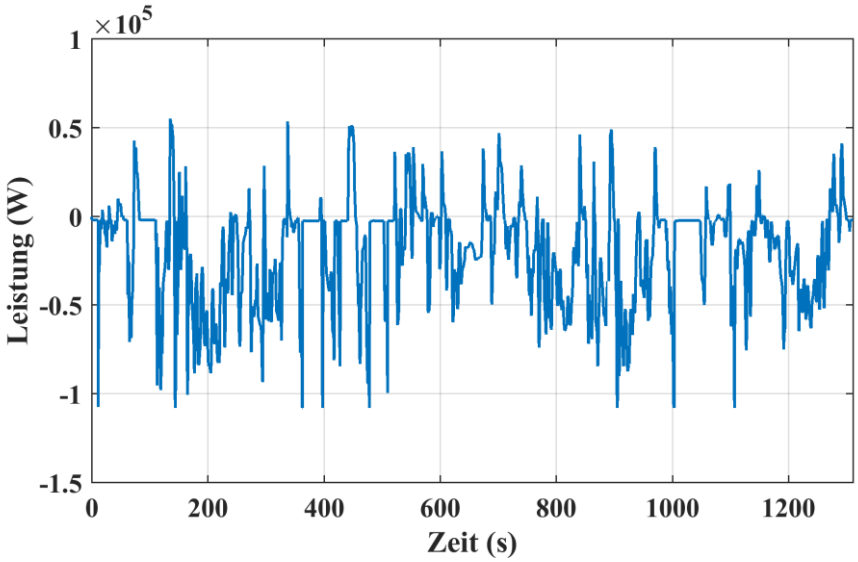
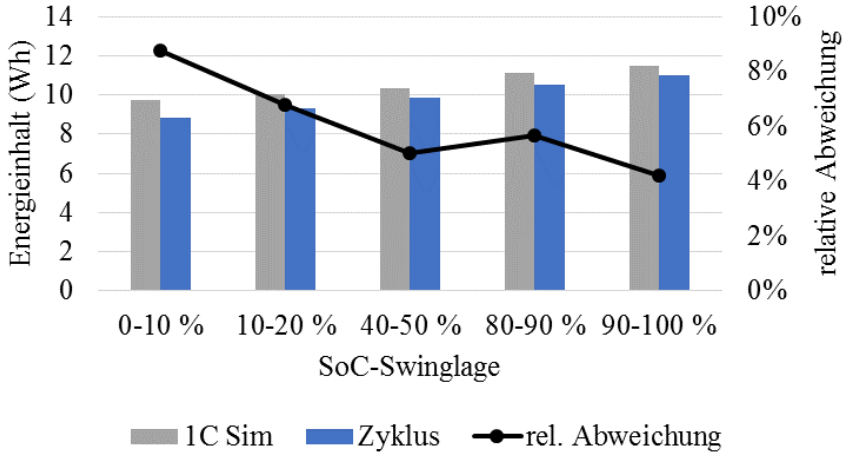


Abbildung 4.28: Stuttgart Zyklus als Leistungsprofil.

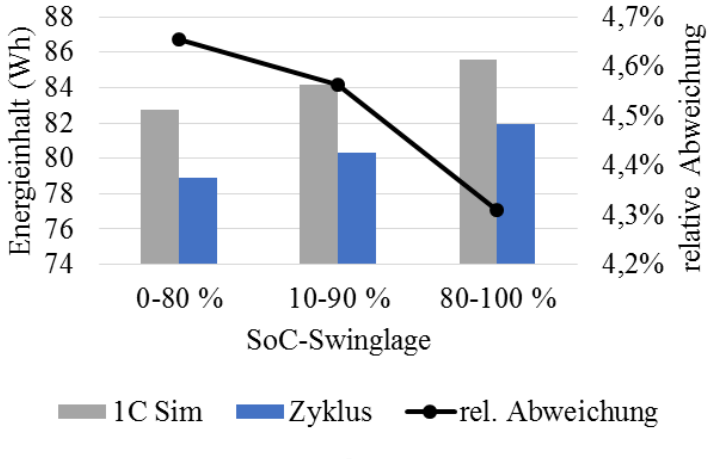
Hier ist der Energieinhalt stark von dem gewählten Zyklus und dem Fahrzeug abhängig. Ein wenig dynamischer Zyklus mit durchschnittlichen C-Raten nahe 1C wird zu ähnlichen Ergebnissen führen, wie die oben angeführte 1C Simulation. Im Gegensatz dazu, treten auf einem dynamischen Fahrzyklus deutlich unterschiedliche C-Raten auf, welche im realen Fall Einfluss auf die Kapazität und das Spannungsverhalten haben.
In dem vorliegenden Zellmodell wird die stromabhängige Kapazität vernachlässigt. Die auftretenden Überspannungen bei hohen Strömen führen jedoch zu einem anderen Spannungsverhalten der Zellen. Das führt zu einem anderen, von der 1C Entladesimulation abweichenden, Energieinhalt. Für den folgenden Vergleich wird der stark dynamische Stuttgart Zyklus (Abbildung 4.28) simuliert, welcher mit einer Fahrzeugparametrierung entsprechend dem Porsche Cayenne S E-Hybrid durchfahren, und gegebenenfalls so lange wiederholt wird, bis

[70] Hier wird für den Stuttgart Zyklus die Batteriekonfiguration auf 100s1p festgelegt.

der SoC_{Min} Wert erreicht ist[71]. Der mittlere Strom auf dem Stuttgart Zyklus liegt bei ca. 53,8 A in Entladerichtung (ca. 2C)[72].
Die in Abbildung 4.29 dargestellten Werte des Energieinhalts zeigen eine große Diskrepanz zu den nominell ermittelten Werten. Vergleicht man die Energiemengen der Zyklussimulation mit denen der nominellen Simulation (Tabelle 4.15), erkennt man eine maximale absolute Abweichung von beinahe 4 Wh auf dem hohen 80 % SoC-Swing. Auf dem 10 % SoC-Swing beläuft sich die maximale absolute Abweichung auf über 0,5 Wh. Dabei ist zu beachten, dass die relative Abweichung bei der Verlagerung zu einer SoC-Swinglage im oberen SoC-Bereich kleiner wird. Dies gilt auch für den 80 % Swing, dort ist der Effekt jedoch deutlich kleiner. Die relativen Abweichungen befinden sich dort um die 4 %.



(a)



(b)

Abbildung 4.29: Vergleich der Energiewerte aus der 1C Simulation, mit einer Simulation auf dem Stuttgart Zyklus für einen SoC-Swing von 10 % (a) und 80 % (b).

[71] Der Stuttgart Zyklus wurde mit einem Serienfahrzeug des Porsche Cayenne S E-Hybrid gemessen. Der Zyklus beginnt in Korntal-Münchingen und führt durch Stuttgart Zuffenhausen in Richtung Stuttgart Feuerbach. In Stuttgart Feuerbach wird eine Schleife durch die Feuerbacher Innenstadt gefahren. Von dort führt der Zyklus über die B27 nach Stuttgart hinein, von wo ein Rundkurs um die Stuttgarter Mitte, über Stuttgart Heslach und den Stuttgarter Hauptbahnhof zurück zur B27 in Richtung Stuttgart Feuerbach führt. Gestartet wurde mit voller Batterie im rein elektrischen Betrieb. Nachdem der SoC der Batterie einen unteren Schwellwert erreicht, springt der Verbrennungsmotor an und die Batterie wird in einem *Ladungserhaltungs*-Modus betrieben. Für die Simulation wird ausschließlich der rein elektrische Abschnitt des Stuttgart Zyklus verwendet (siehe Behr et al., 2016, S. 106f.).
[72] Überschlägige Mittelwertberechnung aus den Leistungsdaten des Zyklus, einer Zellnominalspannung von 3,67 V und 100 seriellen Zellen.

Angewendet auf das bereits oben verwendete Beispiel einer EV-Batterie mit 90 kWh nutzbarem Energieinhalt, auf einem SoC-Swing von 80 %, ergeben sich deutliche Unterschiede. Während aus der nominellen SoC-lageabhängigen Simulation 1088, 1070 oder 1052 Zellen berechnet wurden, kommt man nun auf dem Stuttgart Zyklus zu 1141, 1121 oder 1099 Zellen. Diese Werte liegen bis zu 53 Zellen auseinander.

Der Stuttgart Zyklus stellt eine sehr dynamische und anspruchsvolle Belastung der Hochvoltbatterie dar. Dennoch ist diese Beanspruchung nicht unrealistisch. Die Kapazitätsminderung durch diese Belastung ist enorm, auch ohne Betrachtung der stromabhängigen Kapazitätsänderung der Zellen. Würde man diese ebenfalls betrachten, erhielte man einen noch deutlicheren Unterschied, da die Kapazität mit Erhöhung der C-Rate abnimmt. Die Kapazitätsminderung ist auf die geringere Zellspannung, aufgrund der höheren Ströme im Stuttgart Zyklus zurückzuführen. Die Betrachtung des Stuttgart Zyklus zeigt, dass die vorgesehene Nutzung des Elektrofahrzeugs einen großen Einfluss auf den nutzbaren Energieinhalt hat, die bei der Auslegung der Hochvoltbatterie berücksichtigt werden muss.

Konnte die geforderte Energiemenge auf dem Zyklus nicht erreicht werden, wird die Hochzählfunktion nach der einmaligen Erhöhung der Zellanzahl erneut aufgerufen. Kann kein Ergebnis erzielt werden, läuft diese Schleife solange, bis die maximale Anzahl von Schleifendurchläufen erreicht oder die maximale Anzahl von Zellen erreicht wurde.

4. Hochzählung der Anzahl paralleler und serieller Zellen

Die Ermittlung der parallelen und seriellen Zellen erfolgt in den Schleifen 1 und 2 aus Abbildung 4.26. Zu Beginn wird eine Initialkonfiguration auf Basis des $E_{Swing,1C}$ (siehe Gleichung 4.17) vorgenommen. Hierfür wird die geforderte nutzbare Energiemenge E_{Anf} durch $E_{Swing,1C}$ geteilt und auf ganze Zahlen aufgerundet. Dem folgt die Bestimmung der maximal möglichen elektrischen Entladeleistung zu allen gegebenen Strompulszeiten, Temperaturen und SoCs, im Bereich des eingestellten SoC-Swings. Konnten sowohl E_{Anf}, als auch die Leistungsanforderung P_{Anf} erfüllt werden, wird eine Simulation auf dem Anwendungszyklus durchgeführt, um das Erreichen der Energieanforderung unter Nutzungsbedingungen zu überprüfen. Existiert eine zeitliche Anforderung für die Dauer des geforderten Leistungspulses, muss die Leistung mit entsprechender Dauer möglich sein. Die elektrische Konfiguration wird solange angepasst, bis E_{Anf} und P_{Anf} erfüllt werden. Ziel der Schleifen ist, die elektrischen Anforderungen mit einer minimalen Anzahl von Zellen auf dem eingestellten SoC-Swing zu erfüllen. Die ermittelte Konfiguration dient dem mechanischen Modell und der Kostenberechnung als Information. Zusätzlich werden die umgesetzte Energiemenge auf dem Zyklus (E_{Sim}) und die tatsächliche Maximalleistung (P_{Max}) mit der dazugehörigen Temperatur, dem SoC und der Pulsdauer ausgegeben. Die Heuristik für die Funktion *Hochzählen der Anzahl paralleler und serieller Zellen* lautet wie folgt:

- Startkonfiguration: *NrSerl = NrSerlMin, NrParl = NrParlMin*
- Erhöhung der Zellanzahl: Erhöhe die Anzahl serieller Zellen, wenn die Erhöhung zusammen mit der aktuellen Anzahl paralleler Zellen kleiner ist, als die Anzahl von Zellen, wenn man die seriellen Zellen nicht erhöht, dafür aber die parallelen Zellen. Sonst werden die seriellen Zellen beibehalten und die Anzahl paralleler Zellen um Eins erhöht. Kann die Anzahl paralleler Zellen nicht weiter vergrößert werden, wird in jedem Fall die Anzahl serieller Zellen erhöht.

- Ermittle den nominellen Energieinhalt: Der nominelle Energieinhalt auf dem eingestellten SoC-Swing wird in der aktuellen Konfiguration berechnet. Ist dieser kleiner als der geforderte Energieinhalt wird die Erhöhung der Zellanzahl erneut durchgeführt. Ansonsten wird diese Schleife abgebrochen und mit den Folgeberechnungen gestartet.
- Leistungsberechnungen: Für die gefundene Konfiguration wird die elektrische Leistung P_{Max} berechnet. Die Leistungsberechnung erfolgt über die folgende Gleichung:

$$P_{Max} = I_{DisCh}(U_{OCV} + R\, I_{DisCh})\, n_S\, n_P. \qquad \textbf{4.23}$$

  Die Größen I_{DisCh} und R sind temperatur-, SoC- und pulsdauerabhängig. Deshalb wird die Berechnung von P_{Max} über alle Widerstands- und Stromkennfelder der Batteriezelle hinweg durchgeführt und der Maximalwert mit dazugehöriger Temperatur, Pulsdauer und Start-SoC ausgegeben. Die Berechnung des Innenwiderstands R erfolgt über Gleichung 4.3. I_{DisCh} entspricht dem maximalen Entladestrom.
- Vergleich mit den Anforderungen: Die ermittelten Werte für den Energieinhalt und die Leistung werden mit den Anforderungen verglichen und Schleife 2 mit der Zyklussimulation gestartet.
- Beenden der Funktion: Die derzeitige Anzahl serieller und paralleler Zellen wird für die Ausgabe gespeichert, ebenso die Packenergie und die verschiedenen Leistungen. Die Funktion wird zudem beendet, wenn die Zellerhöhung ihre Grenzen erreicht hat. In einem solchen Fall kann es sein, dass eine Konfiguration ausgegeben wird, die weder das Energieziel, noch das Leistungsziel erreicht.

Verhalten der Zellkonfigurationsermittlung im Beispiel

Um das Verhalten der Voroptimierung verständlicher zu machen, wird in diesem Beispiel der SoC_{Max} variiert, während alle weiteren Parameter konstant bleiben. Zusätzlich sollen die Unterschiede dargestellt werden, welche sich aus der Einbeziehung der Leistung in die Voroptimierung ergeben. Der SoC_{Min} bleibt auf 10 % festgesetzt. Des Weiteren wird als Energieanforderung ein Energieinhalt von 7 kWh zu BoL Kriterien gewählt. Als Anwendungszyklus für die Simulation dient erneut der Stuttgart Zyklus (Abbildung 4.28). Die Modulgröße wird auf 13 festgesetzt, ohne dass die Gesamtanzahl von Zellen ein Vielfaches der Modulgröße sein muss. Das letzte Modul wird mit der verbleibenden Anzahl von Zellen aufgefüllt. Als Zelle kommt die 28 Ah PHEV2 Zelle zum Einsatz. Die maximale Packspannung beträgt 430 V. Die Packspannung darf 220 V nicht unterschreiten. Nun wird zu jedem SoC-Swing diejenige elektrische Konfiguration gesucht, welche die Energieanforderung erfüllt und dafür möglichst wenig Zellen benötigt. Zusätzlich wird der Batteriepack nur auf dem voreingestellten SoC-Swing betrieben. Eine kleine Differenz zwischen SoC_{Min} und SoC_{Max} führt daher dazu, dass für die Erfüllung der Energieanforderung mehr Parallelschaltungen benötigt werden.
In Abbildung 4.30 sind die ermittelten Konfigurationen über dem SoC_{Max} aufgetragen. Auf der Ordinate befindet sich die Anzahl serieller Zellen. Ferner sind die minimale und maximale Anzahl serieller Zellen und Energiehyperbeln eingetragen. Die Energiehyperbeln zeigen wann die geforderte Energie von 7 kWh mit fallender Anzahl paralleler Verschaltungen erreicht werden kann. Die äußerste rechte Hyperbel stellt die Grenzlinie dar, ab der keine Parallelschaltung notwendig ist, um die geforderte Energie zu erreichen. Beispielhaft sind

einige Konfigurationen aufgeführt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Voroptimierung so wenige Zellen wie möglich verwendet, solange dabei die Maximal- und Minimalgrenze der seriellen Zellen nicht überschritten werden. Durch den festen SoC_{Min} ändert sich die Spannungsuntergrenze nahezu nicht. Bis kurz unter 50 % SoC_{Max} könnten bis zu 104 Zellen in Serie verschaltet werden, ohne dabei die zulässige Packspannung zu überschreiten. Darüber hinaus sind nur noch 103 serielle Zellen möglich.

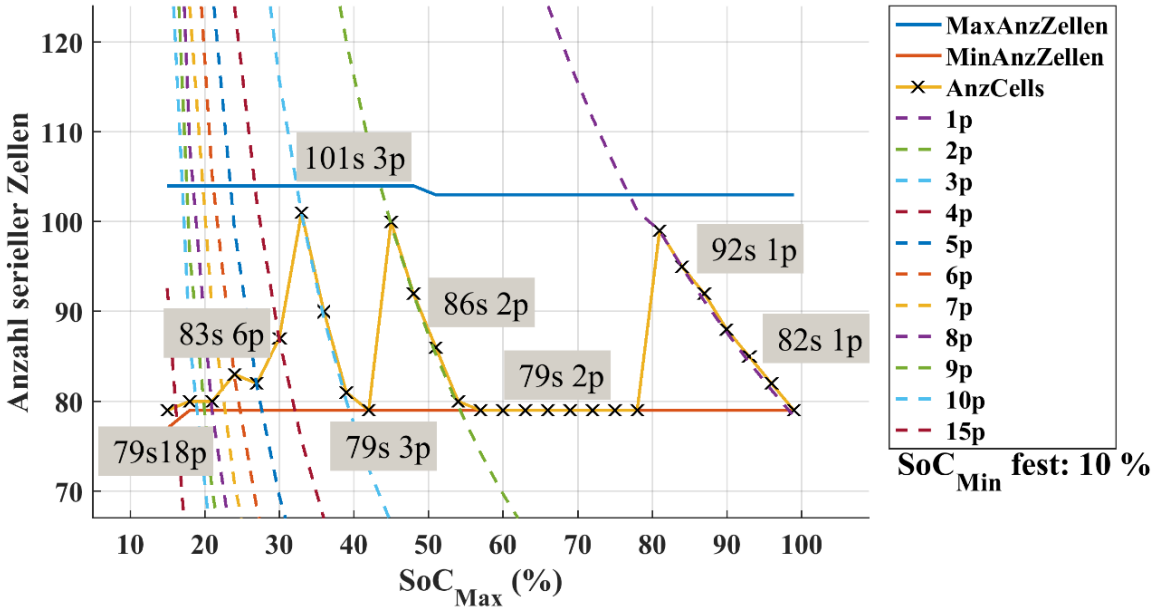


Abbildung 4.30: Variation des SoC_{Max} und berechnete Auslegungen bei ausschließlicher Beachtung der Energieanforderung.

Erweitert man die Ansicht aus Abbildung 4.30 um eine Dimension in Richtung der Anzahl paralleler Zellen ergibt sich Abbildung 4.31. Die maximale und minimale Anzahl serieller Zellen dort ist durch zwei Flächen gekennzeichnet. Mit *EnergieMap* ist die Grenzfläche abgebildet, welche überschritten werden muss, um die Energieanforderung zu erfüllen. Deshalb liegen die gekennzeichneten Konfigurationen hinter, oder exakt auf dieser Ebene. Eine Konfiguration auf der Grenzfläche erreicht die Energieanforderung mit einer minimalen Anzahl von Zellen. Es ist zu erkennen, dass bei kleinen SoC-Swings die Anzahl der parallel verschalteten Zellen schnell ansteigt. Auf einem 5 % SoC-Swing ist eine 79s18p Verschaltung notwendig, um das Energiekriterium zu erfüllen. Ab einem SoC-Swing von 89 % sind die Parallelverschaltungen obsolet und es reichen ausschließlich serielle Zellen für die Erreichung der 7 kWh auf dem Stuttgart Zyklus aus. Abbildung 4.31 zeigt zudem, dass die gefundenen Kombinationen möglichst nah an der Grenzfläche für die Energieanforderung liegen. Dadurch ist gezeigt, dass die Voroptimierung geeignet ist, um die geringste Anzahl von Zellen zu finden, welche die geforderte Energie erreicht.

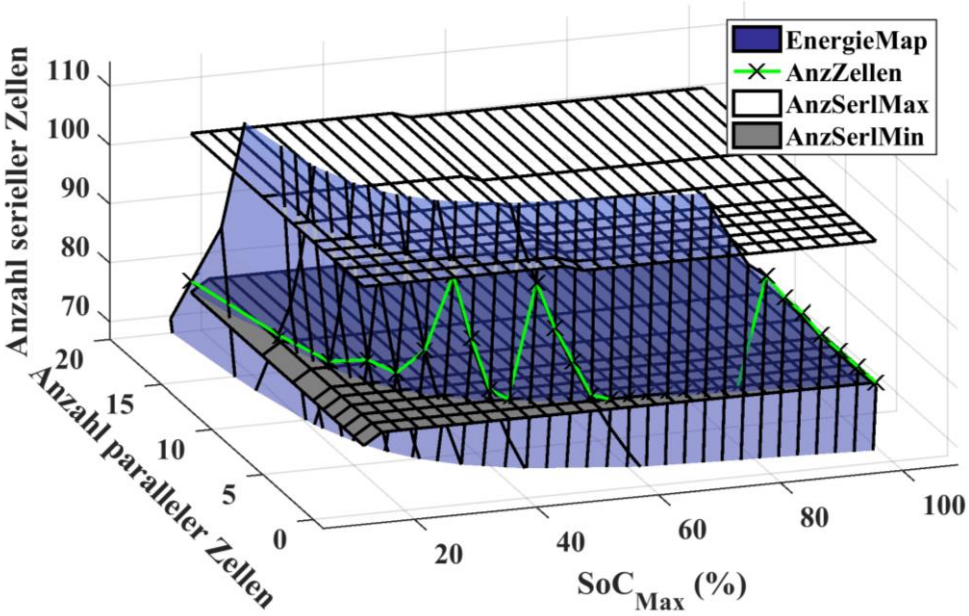


Abbildung 4.31: Konfigurationen serieller und paralleler Zellen in Abhängigkeit der Energieanforderung. SoC_{Min} ist fest bei 10 %.

In Abbildung 4.32 sind die zugehörigen Leistungswerte für die Konfigurationen aus Abbildung 4.30 und Abbildung 4.31 aufgeführt. Es ist zu erkennen, dass über einem SoC_{Max} von 80 % die Leistungsanforderung nicht mehr erreicht wird. Muss die Leistungsanforderung erfüllt werden, entfallen die 1p-Konfigurationen und der Algorithmus bleibt bei den 79s2p Verschaltungen.

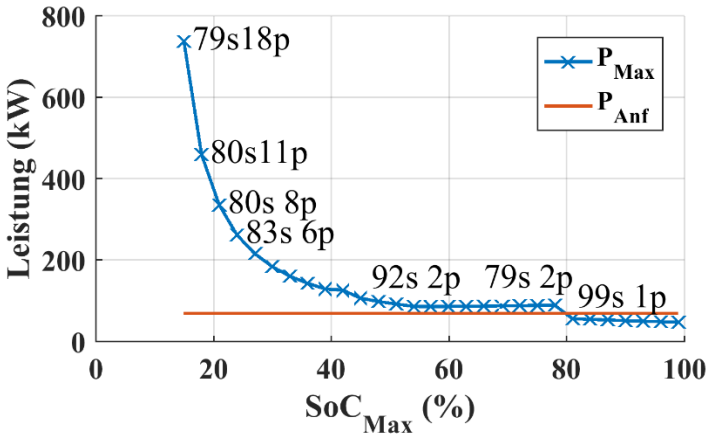


Abbildung 4.32: Leistungswerte bei Variation des SoC_{Max} und Leistungsanforderung.

Das vorangehende Beispiel hat das prinzipielle Verhalten des Voroptimierungsskripts aufgezeigt. Die Funktionalitäten eine Energieanforderung zu berücksichtigen und gegebenenfalls die Packleistung in die Auslegung einzubeziehen wurden gezeigt. Die Randbedingungen werden eingehalten und die Ergebnisse sind nachvollziehbar. Zu jedem SoC-Swing konnte eine Konfiguration gefunden werden, welche die Anforderungen an Energieinhalt und Packleistung erfüllt. Trotzdem sind Konfigurationen möglich, welche die Anforderungen nicht erfüllen. Dies ist dann der Fall, wenn die maximale Anzahl von Zellen erreicht

wurde oder die zweite Voroptimierungsschleife den Grenzwert für die Anzahl von Durchläufen überschreitet. Letzteres kann gegebenenfalls angepasst werden. In der späteren Anwendung des Algorithmus wird zusätzlich der SoC_{Min} Wert variiert werden.

4.4.2 Mechanische Voroptimierung

Die mechanische Voroptimierung wird über einen Packalgorithmus vorgenommen, der die Batteriebauteile des mechanischen Modells möglichst effizient in dem verfügbaren Bauraum platziert. Der Eingang in die mechanische Voroptimierung ist eine elektrische Konfiguration, zusammen mit der Basiskonfiguration des Batterierahmens, der BCU und der BDU. Ausgegeben wird eine mechanische Konfiguration mit einem angepassten Rahmen und der effizientesten Modulgröße.

Beschreibung des Packalgorithmus

Der Packalgorithmus (PA) besitzt als Grundfunktionalität die Anordnung quaderförmiger Objekte in einem zur Verfügung gestellten Bauraum. Gemäß der in Abschnitt 2.5.2 vorgestellten Klassifizierung von Packalgorithmen, wird der vorliegende PA als SLOPP eingeordnet. Grundsätzlich ist der Algorithmus auch in der Lage SKP (Single Knapsack Problem) zu behandeln, bei denen die kleinen Objekte stark heterogen sind. Allerdings ist die Durchlaufzeit länger, weil mehr Vergleichsoperationen durchgeführt werden müssen.

Der PA ist als Baumsuchverfahren umgesetzt. Bei der Baumsuche wird von einem Initialzustand ausgehend der Bauraum in verschiedenen Varianten nach und nach mit Bauteilen befüllt, bis alle Bauteile platziert sind oder kein Platz mehr für ein weiteres Bauteil vorhanden ist. Eine Literaturübersicht zu 3D Baumsuchverfahren befindet sich in (Liu et al., 2014a), eine umfangreiche Übersicht über verschiedene Platzierungsproblemlösungen bietet (Zhao et al., 2016). Baumsuchverfahren gehören zu den Heuristiken mit unvollständigen Problemraumbetrachtung. Sie zeichnen sich, im Vergleich zu vollständigen Betrachtungen, durch eine schnelle Lösungserzeugung aus. Trotz der unvollständigen Betrachtung des Lösungsraums werden gute Ergebnisse erzielt. Durch die verwendete Heuristik kann ein großer Einfluss auf die Lösungen genommen werden. Dies bezieht sich auf die Qualität der Lösung und auf die Rechendauer für den Durchlauf des Algorithmus, sowie die betrachteten Platzierungsrandbedingungen.

Ren, Tian und Sawaragi (Ren et al., 2011) stellen einen Baumsuchalgorithmus vor, welcher für den hiesigen PA adaptiert wird. Dieser besteht aus zwei Modulen. Das erste Modul ist eine Greedy Heuristik[73] (für das Block Building), das zweite Modul ein Baumsuchverfahren. Das Baumsuchverfahren ist der Greedy Heuristik übergeordnet. Das Block Building ordnet Blöcke gleicher Form und Größe in einen freien Raum in einem Container an. Um die beste Blockanordnung auszuwählen, werden fünf Evaluierungsfunktionen ausgewertet. Während der gesamten Optimierung werden Listen für die zu packenden Blöcke und die verbleibenden Räume mitgeführt. Die Greedy Heuristik ermittelt gültige Konfigurationen von Blöcken in dem derzeitigen freien Raum. Die gültigen Konfigurationen werden nach den fünf Evalu-

[73] Mit einer Greedy Heuristik werden Vorgehen beschrieben, welche zum Ziel haben so viele Objekte wie möglich in ein verfügbares Volumen zu platzieren.

ierungsfunktionen ausgewertet und so Äste für das Baumsuchverfahren erzeugt. Die erzeugten Lösungen werden einer Bewertungsfunktion unterzogen, die eine bestimmte Anzahl der besten Lösungen auswählt. Mit diesen Lösungen wird fortgefahren, bis keine Boxen mehr im Container platziert werden können. Der Algorithmus erzielt sehr gute Ergebnisse und ist sehr gut an spezielle Anforderungen anpassbar.
Einzelne Funktionsblöcke eines Packalgorithmus erfordern hohen Aufwand (Restraumsuche, Zusammenfassen von leeren Räumen, Blockanordnung, Block Building). Deshalb ist für diese internen Funktionen eine effiziente und zur Problemstellung passende Umsetzung wichtig. Für die Bestimmung des freien Raumes wird beispielsweise ein Maximalflächenansatz von Parreño et al. (Parreño et al., 2008) adaptiert. Dieser bietet den Vorteil, dass keine aufwändige Zusammenfassung von leeren Flächen vorgenommen werden muss. In Abbildung 4.33 ist beispielhaft das Prinzip der Maximalflächen aus (Parreño et al., 2008) dargestellt.

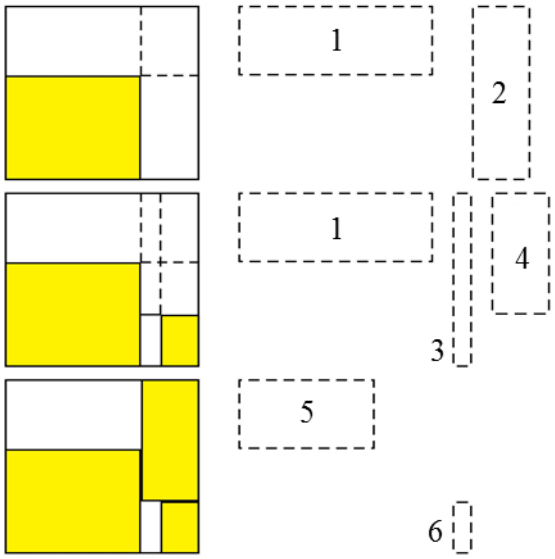


Abbildung 4.33: Maximalflächen in (Parreño et al., 2008, S. 422). Links sind schrittweise platzierte Objekte dargestellt, rechts die jeweiligen vorhandenen Maximalflächen.

Randbedingungen für die mechanische Auslegung von HV-Batterien mit einem PA

Abweichend von den CLP stellt die mechanische Auslegung einer HV-Batterie andere Randbedingungen an die Platzierung der Objekte. Eine wichtige Anforderung ist die Fertigbarkeit des Konzepts. Hierfür wird die ebenenweise horizontale Platzierung eingeführt. Dabei werden alle Batteriebauteile auf gleichen Ebenen angeordnet, um die Anfertigung von einzelnen Untereinheiten zu ermöglichen und die Komplexität der Montage gering zu halten. Zusätzlich werden nur 90 ° Rotationen der Bauteile zugelassen. Eine weitere Randbedingung besteht darin, dass sich bereits Bauteile, oder gesperrte Bereiche im Bauraum befinden können. Beispielsweise können Rahmenteile im Vorhinein in den Bauraum eingebracht werden, oder der Bauraum durch einen weiterhin bestehenden Kardanwellentunnel eingeschränkt werden. Auf diese Weise können ebenfalls Bauräume von Conversion Design Fahrzeugen modelliert werden.

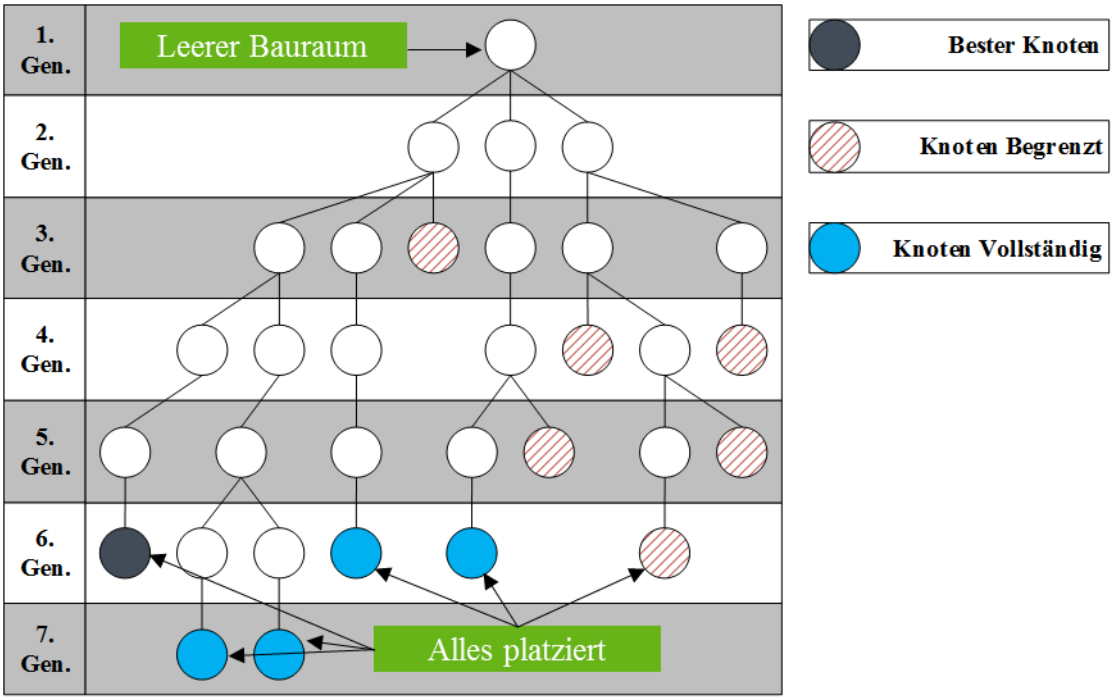


Abbildung 4.34: Beispielhafter Suchbaum des Packalgorithmus.

Erstellung des Suchbaums

Die Erstellung des Suchbaums geschieht dem Ablaufdiagramm in Abbildung 6.11 im Anhang folgend. Jeder Zustand des befüllten Bauraums wird als Knoten bezeichnet. Ausgehend von einem Zustand werden die nächsten Zustände als dessen Kindknoten bezeichnet. Entsprechend ist der vorherige Knoten ein Elternknoten. Abbildung 4.34 zeigt einen beispielhaften Suchbaum anhand dessen die weiteren Funktionalitäten des PA beschrieben werden. Nach der Initialisierung des verfügbaren Raums und der Aufstellung einer Liste zu platzierender Objekte, wird die erste Kindgeneration erzeugt. Hierfür wird jedes Objekt in jeder gültigen Orientierung in die untere linke Ecke des Bauraums gelegt und anhand von Evaluierungsfunktionen bewertet. Abhängig von der Anzahl und der Art der Evaluierungsfunktionen wird eine Anzahl von Kindknoten mit verschiedenen Bauteilen in der jeweiligen unteren linken Ecke erzeugt. Es können maximal so viele Kindknoten erzeugt werden, wie Evaluierungsfunktionen vorhanden sind[74,75]. Im nächsten Schritt werden die eben erzeugten Kindknoten zu Elternknoten der nächsten Generation und ausgehend von jedem Elternknoten dieser neuen Generation werden erneut Kindknoten erzeugt. Dies erfolgt solange, bis alle Bauteile in jedem Zweig des Suchbaums platziert wurden, oder kein Bauteil mehr Platz findet. In letzterem Fall wird der entsprechende Knoten als abgeschlossen aber unvollständig markiert. In Abbildung 4.34 existiert kein solcher Knoten. Die dort markierten Knoten stellen entweder vollständige Knoten oder inaktive Knoten aufgrund einer Begrenzung der maximalen Knoten pro Generation dar (Knoten Begrenzt). Die maximale Anzahl von Knoten

[74] Hierfür wird die sogenannte simultane Auswertung der E-Funktionen vorgenommen (siehe auch Ren et al., 2011), bei welcher die Gewinner für jede der E-Funktionen weiterverfolgt wird.
[75] Im Vergleich zur simultanen Auswertung, kann auch sequentiell ausgewertet werden. Hierbei gibt es nur einen Sieger im Vergleich untereinander. Die beste Bewertung in E-Funktion 1 gewinnt. Ist die Bewertung bei mindestens einem weiteren Objekt für diese E-Funktion gleich, wird die nächste E-Funktion betrachtet, usw. Bei Gleichstand in allen E-Funktionen wird das erstbetrachtete Objekt gewählt.

pro Generation ist ein Parameter, des PA und kann frei eingestellt werden. In diesem Beispiel wurden maximal 5 Knoten weiterverfolgt. Der Ausschluss der zu begrenzenden Knoten erfolgt über eine weitere Bewertungsfunktion: die Hauptevaluierungsfunktion.

Die Hauptevaluierungsfunktion

Die Hauptevaluierungsfunktion bewertet die derzeitige Anordnung der Bauteile im Bauraum bezüglich ihrer Packungsdichte und dem Gesamtvolumen. Um vollständige Konfigurationen in der Bewertung gegenüber unvollständigen Konfigurationen zu bevorzugen, werden die noch nicht platzierten Bauteile in die Bewertung einbezogen. Ziel der Bewertung ist ein möglichst kleiner Wert. Die Hauptevaluierungsfunktion besitzt die folgende Form:

$$\begin{aligned} H_{Eval} &= V_{Umschl} + V_{Tot} + V_{\ddot{U}brig} 10^{Dim} \\ &= 2V_{Umschl} - \sum \left(n_{Bauteil,platziert}\, V_{Bauteil,platziert}\right) \\ &\quad + \sum \left(n_{Bauteil,\ddot{u}brig}\, V_{Bauteil,\ddot{u}brig}\right)\, 10^{Dim}. \end{aligned} \qquad \textbf{4.24}$$

V_{Umschl} beschreibt das Volumen der Umschließenden um alle platzierten Objekte. Dafür werden die maximalen Ausdehnungen aller Bauteile in x-, y-, und z-Richtung ermittelt und diese multipliziert. Mit V_{tot} wird die Differenz zwischen umschließendem Volumen und dem Volumen der bereits platzierten Bauteile bezeichnet. Dim wird zusätzlich auf das Volumen der verbleibenden Bauteile multipliziert, um den unterschiedlichen Dimensionen der verschiedenen Terme Rechnung zu tragen und zu verhindern, dass vollständige Konfigurationen mit großer Umschließenden schlechter bewertet werden als unvollständige Konfigurationen mit kleiner Umschließenden und wenig verbleibenden Bauteilen. Um Dim zu erhalten wird die folgende Vorschrift verwendet:

$$Dim = \lfloor \log_{10}(V_{Umschl}) \rfloor. \qquad \textbf{4.25}$$

Mit den Klammern wird die Abrundung auf die nächste ganze Zahl beschrieben. Über die H_{Eval} Funktion wird bei Beendigung des PA zusätzlich die beste Anordnung der Bauteile ermittelt. Erhalten mehrere Konfigurationen dieselbe Bewertung, wird die erste betrachtete Konfiguration weiterverwendet. Gleiche Bewertungen treten auf, wenn die Anordnungen untereinander durch eine einfache Verschiebung einzelner Bauteile entlang einer Bauraumachse ineinander überführt werden können. Sie sind daher gleichwertig.

Platzierung identischer Bauteile (Block Building)

Für den Fall, dass identische Bauteile (bei der Batterie zum Beispiel die Zellen oder die Module) vorliegen, werden diese nach einer Heuristik zu Blöcken zusammengefügt und platziert. Entsprechend der Koordinatenkonvention (siehe Abbildung 4.22) befindet sich der Ursprung des Bezugskoordinatensystems in der linken unteren Ecke des Bauraums/Rahmens. Die positive x-Richtung zeigt entgegen der Fahrtrichtung. Die y-Koordinate stellt die Breite des Bauraums dar. Die z-Achse ist nach oben gerichtet. Die Block Building Heuristik vervielfältigt ein Bauteil zuerst in y-Richtung, dann die gesamte Reihe in z-Richtung und dann die entstandene Wand in x-Richtung. Hierbei wird nur dann eine weitere Vervielfältigung

vorgenommen, wenn genug identische Bauteile übrig sind, um eine vollständige Vervielfältigung durchzuführen. Die Reihenfolge des Block Buildings ist fest. Dennoch ist es möglich die Vervielfältigung in bestimmte Richtungen zu blockieren. Hierfür können entsprechende boolesche Variablen deaktiviert werden[76]. Werden alle Platzierungsvariablen deaktiviert werden identische Objekte wie Einzelobjekte behandelt. Bei gleichzeitiger Aktivierung mehrerer dieser Variablen bleibt die Reihenfolge im Zweifelsfall fest im Sinne der oben beschriebenen Heuristik. Dadurch, dass der Eingriff in die beschriebenen Platzierungsvariablen in Kombination mit den Evaluierungsfunktionen einen starken Einfluss auf das Ergebnis des PA besitzt, wird die De-/Aktivierung dem globalen Optimierungsalgorithmus überlassen (siehe Tabelle 4.8, S. 84).

Die Evaluierungsfunktionen

Die Evaluierungsfunktionen (E-Funktionen) bewerten die Bauteile nach deren Passgenauigkeit auf der derzeit größten verfügbaren Maximalfläche. Auf Basis einfacher, zur Verfügung stehender geometrischer Zusammenhänge, können 22 verschiedene Evaluierungsfunktionen ausgemacht werden. Diese stellen entweder das Volumen des platzierten Objektes, eine Seitenfläche oder einen Abstand zur Begrenzung der aktuell betrachteten Raumgrenze dar. Zusätzlich wird die Möglichkeit genutzt, den Abstand zu einer Raumbegrenzung zu minimieren oder zu maximieren. Die folgenden E-Funktionen und Nummerierungen werden festgelegt und sollen maximiert werden:

1. Bauteilvolumen $V_{Bauteil}$
2. Bauteilgrundfläche A_{xy}
3. Bauteilfrontfläche A_{yz}
4. Bauteilseitenfläche A_{xz}
5. X-seitiger Abstand[77] $-\Delta x$
6. Y-seitiger Abstand $-\Delta y$
7. Z-seitiger Abstand $-\Delta z$
8. Minimum eines der Seitenabstände $-\min(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$
9. Minimum eines der Seitenabstände $-\min(\Delta y, \Delta z)$
10. Minimum eines der Seitenabstände $-\min(\Delta x, \Delta y)$
11. Minimum eines der Seitenabstände $-\min(\Delta x, \Delta z)$
12. – 22. Entsprechen den Nummern 1.-11 mit umgekehrtem Vorzeichen bzw. einem Maximum der Seitenabstände

Ebenso wie in (Ren et al., 2011) sollen fünf E-Funktionen verwendet werden. Bei der Auswahl der jeweiligen 5er-Kombinationen der E-Funktionen ist deren Reihenfolge wichtig und jede Funktion darf nur einmal vorkommen. Damit ergibt sich die folgende Gleichung für die Ermittlung der Anzahl von Variationen:

$$Var = \frac{n!}{(n-k)!}. \qquad \textbf{4.26}$$

[76] $Flag_{xPlatzierung}$, $Flag_{yPlatzierung}$ und $Flag_{zPlatzierung}$.
[77] Über das „-“ Zeichen wird aus der eigentlichen Minimierung der Δ Beträge eine Maximierung.

k ist hierbei 5 und n entspricht der Anzahl von E-Funktionen, hier 22. Gemäß der Kombinatorik können über drei Millionen 5er-Variationen aus den 22 oben genannten E-Funktionen zusammengestellt werden. Es muss daher eine geeignete Auswahl von E-Funktionen ermittelt werden, welche in der Lage ist, zusammen mit der Baumsuchheuristik die besten Ergebnisse zu erzielen.

Für die Ermittlung eines geeigneten Satzes von E-Funktionen, wird zunächst ein VW e-Golf ähnlicher Batteriebauraum (vgl. Abbildung 4.35 und Abbildung 4.36) mit Zellen, BDU und BCU gefüllt. Hierbei wurden die Bauraumbegrenzungen über Quader verallgemeinert und deren Größe aus den Modulgrößen und deren Konfiguration abgeleitet. Um die Befüllung durch den vorliegenden Packalgorithmus zu ermöglichen, wurde der Bauraum zudem, im Vergleich zu der Originalbatterie, auf den Kopf gestellt[78].

Der ausgewählte Bauraum stellt den Packalgorithmus vor diverse Herausforderungen. Zum einen ist bereits bekannt, dass die Bauteile alle in den Bauraum passen, es jedoch nur wenige Möglichkeiten gibt, um alle Bauteile zu platzieren. Zum anderen existieren zwei Platzierungsebenen, welche eine geeignete Platzierung erschweren.

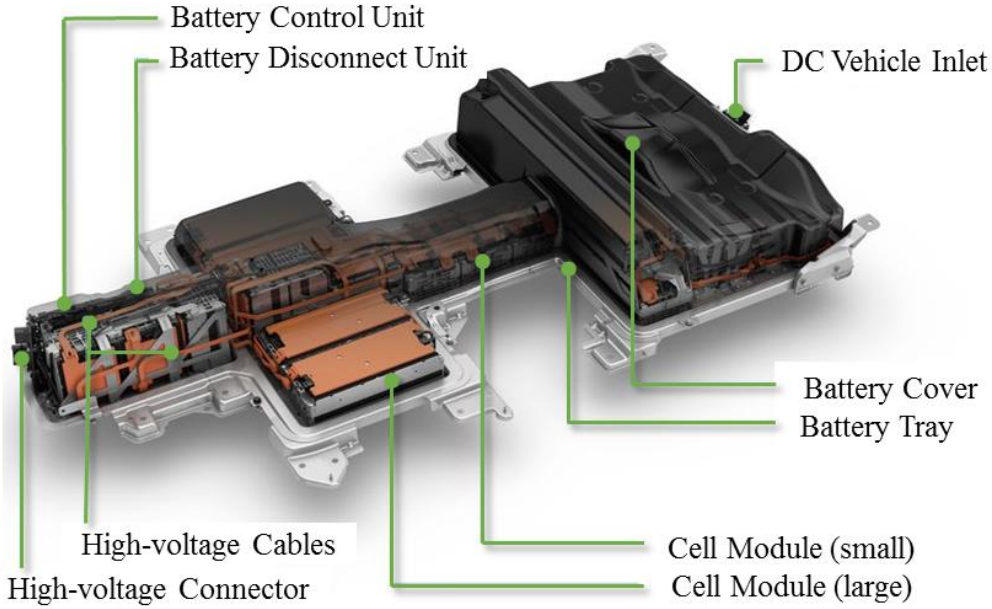


Abbildung 4.35: Der Batteriepack des VW e-Golf aus (BioAge Group, 2014a).

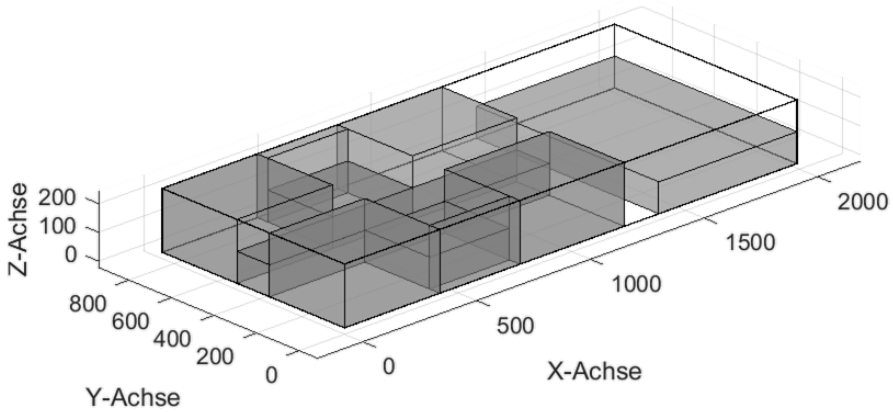


Abbildung 4.36: Bauraum für die Untersuchung der E-Funktionen (Werte in mm).

[78] Diese Vorgehensweise ist notwendig, da der Packalgorithmus keine Objekte oberhalb der Grundfläche, außer der Bauraumbegrenzung, erkennen kann.

Es werden vier unterschiedliche Baumsuchen mit ähnlichen Randbedingungen durchgeführt (Tabelle 4.16). Dabei werden unterschiedliche Modulgrößen betrachtet beziehungsweise alle Zellen einzeln platziert. Die Randbedingungen für die Platzierung sind die Folgenden:

- Zelle: PHEV2 Format [149 28 91] mm,
- BDU: [120 150 110] mm,
- BCU [70 150 100] mm,
- Zusätzliche Zellhöhe für Moduldeckel: 20 mm,
- Anzahl zu platzierender Zellen: 264,
- Maximale Suchbaumbreite: 1000.
- Alle Rotationen der Bauteile sind zulässig.
- Identische Boxen werden zuerst in y-Richtung vervielfältigt und dann in x-Richtung[79].

Tabelle 4.16: Unterschiedliche Fälle für die Baumsuche

Fall 1: 6er Module	Fall 2: 12er Module	Fall 3: Gemischte Module[80]	Fall 4: Nur Zellen
44 Module mit jeweils sechs Zellen	22 Module mit jeweils 12 Zellen	10 Module mit sechs Zellen, 17 Module mit 12 Zellen	264 Einzelzellen

Um sicherzustellen, dass es tatsächlich möglich ist alle Bauteile im Bauraum zu platzieren, wurde zu Beginn der Bauraum mit den Einzelzellen gefüllt (Abbildung 4.37). Des Weiteren wurde die Bewertung über die Hauptevaluierungsfunktion für dieses Ergebnis als Maß für optimale Eigenschaften der späteren Ergebnisse gewählt. Dadurch ist es möglich die jeweils gefundenen Konfigurationen untereinander zu vergleichen und festzustellen, ob einer der Fälle optimal gelöst werden konnte.

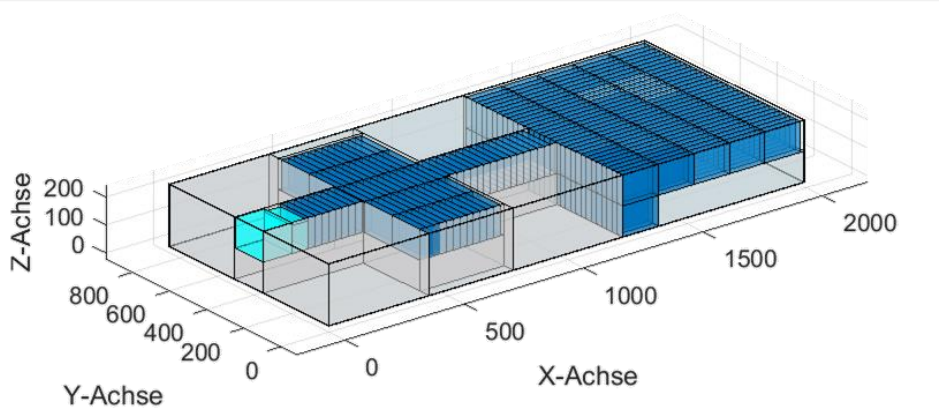


Abbildung 4.37: Vorab definierte Optimalkonfiguration für die Ermittlung geeigneter Evaluierungsfunktionen mit 264 Zellen (Werte in mm).

Angewendet auf die vier Anwendungsbeispiele für den e-Golf Bauraum übersteigt die Menge möglicher Kombinationen von E-Funktionen eine überprüfbare Anzahl. Mit Hilfe der bereits bekannten Eigenschaften des PA, kann die Anzahl der möglichen E-Funktionen

[79] Die z-Vervielfältigung wurde deaktiviert.
[80] Diese Konfiguration entspricht der Originalkonfiguration des VW e-Golf.

reduziert werden. Ausgeschlossen werden die Funktionen 12-15, welche ein minimales Volumen oder eine minimale Seitenfläche des platzierten Objekts präferieren. Diese werden entfernt, da dadurch kleine Objekte für die Erstplatzierung bevorzugt werden, was zusammen mit der PA-Randbedingung der Maximalhöhe und der Auswahl der größten Fläche bei der Platzermittlung zu einer starken Segmentierung und Aufteilung der zu platzierenden Objekte führt. Ebenfalls ausgeschlossen werden die E-Funktionen 3 und 4, welche eine große yz- und xz-Fläche bevorzugen. Diese werden aufgrund des Wunsches ausgeschlossen, lieber gezielt die Höhe, die Breite oder die Tiefe des Bauteils zu begünstigen. Funktion 2 wird aus dem Grund behalten, da sie eine große Grundfläche eines Objekts begünstigt und es eine Randbedingung aus dem PA ist, möglichst die Grundfläche aufzufüllen, um ein eher flaches, als hohes Batteriepack zu erhalten. Funktion 17 beschreibt einen möglichst großen Abstand zur y-Raumbegrenzung und wird aufgrund der Gefahr einen stark unsymmetrischen Batteriepack in Fahrzeuglängsrichtung zu erzeugen ausgeschlossen. Aus diesem Grund werden auch die Funktionen 19 bis 21 ausgeschlossen, welche ebenfalls die Funktion 17 enthalten. Zuletzt wird Funktion 22 ausgeschlossen, welche einen maximalen x- oder z-seitigen Abstand zur Raumbegrenzung begünstigt. Diese Funktion wird zugunsten der einzeln auswählbaren jeweiligen Abstände (Funktionen 16 und 18) nicht weiter berücksichtigt. Es bleiben folgende 11 E-Funktionen übrig: 1, 2, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 16 und 18. Die Anzahl möglicher 5er-Kombinationen gemäß Gleichung 4.26 ist somit 55 440. Zusammen mit den vier Fällen für die Baumsuche entspricht dies weit über 200 000 Durchläufen des Packalgorithmus. Auch diese Anzahl übersteigt die Menge auswertbarer Kombinationen, da damit gerechnet werden muss, dass ein Durchlauf des PA eine halbe Minute dauern kann. Dies entspräche einer Laufzeit von beinahe 70 Tagen.
Eine Auswahl von drei E-Funktionen und deren Variationen aus den 11 möglichen E-Funktionen entspricht einer Anzahl von 990 Durchläufen pro Fall. Bei einer Berechnungszeit von 30 s entspricht dies einer Dauer von weniger als 1 ½ Tagen für den Durchlauf der Variationen. Diese Menge an Auswertungen ist handhabbar und wird daher angewendet. Im Nachgang wird die Ergänzung um zwei weitere E-Funktionen in Betracht gezogen.
Das Ziel der Auswahl möglicher 3er-Kombinationen ist es, die Kombination(en) zu finden, welche in der Lage sind für jeden der vier oben gewählten Fälle ein bestmögliches Ergebnis zu erzielen. Dafür wird der Mittelwert der vier H_{Eval} Ergebnisse bestimmt.

Als Optimum, für den e-Golf Batteriepack, wurde bereits ein H_{Eval} Wert von 6,11E+08 festgestellt. Dieser Wert kann für die Fälle 1,3 und 4 erreicht werden. Im zweiten Fall (nur 12er Module) ist es grundsätzlich nicht möglich alle Bauteile im Bauraum zu platzieren. 17 Kombinationen von E-Funktionen waren in der Lage bestmögliche Ergebnisse für alle Fälle zu bestimmen. Die Auswertung der 17 Kombinationen von E-Funktionen zeigt, dass in jeder dieser Kombinationen die E-Funktionen 2 (Grundfläche) und 10 (Minimaler x- oder y-seitiger Abstand) eine Rolle spielten. Wurde als erste E-Funktion die Funktion 2 und als zweite E-Funktion die Funktion 10 gewählt, hatte die Auswahl der dritten E-Funktion keinen weiteren Einfluss auf die Auffindung der Optima. Grundsätzlich musste die E-Funktion 2 immer vor der E-Funktion 10 platziert sein, um die Optima zu finden. Die E-Funktionen 5, 6 und 16 traten lediglich in dem Fall auf, in welchem vorher bereits die Funktionen 2 und 10 auftraten und können daher als „ohne Einfluss“ bezeichnet werden.

Eine Anwendung der 17 ermittelten Kombinationen auf zwei allgemeinere Anwendungsfälle zeigte, dass diese Auswahl von E-Funktionen nicht allgemeingültig für das Auffinden der besten Konfigurationen ist. Bei den beiden zusätzlichen Anwendungsfällen handelt es

sich um eine PHEV Batterie und eine große EV Batterie im Unterboden des Fahrzeugs. In beiden Fällen wurden erneut verschiedene Modulgrößen und Einzelzellen betrachtet[81]. Daher wird die obige Untersuchung aller 990 Varianten zusätzlich für diese beiden Batteriekonfigurationen durchgeführt. Eine Analyse der auftretenden E-Funktionen bei den besten Platzierungsergebnissen ist in Abbildung 4.38 dargestellt.

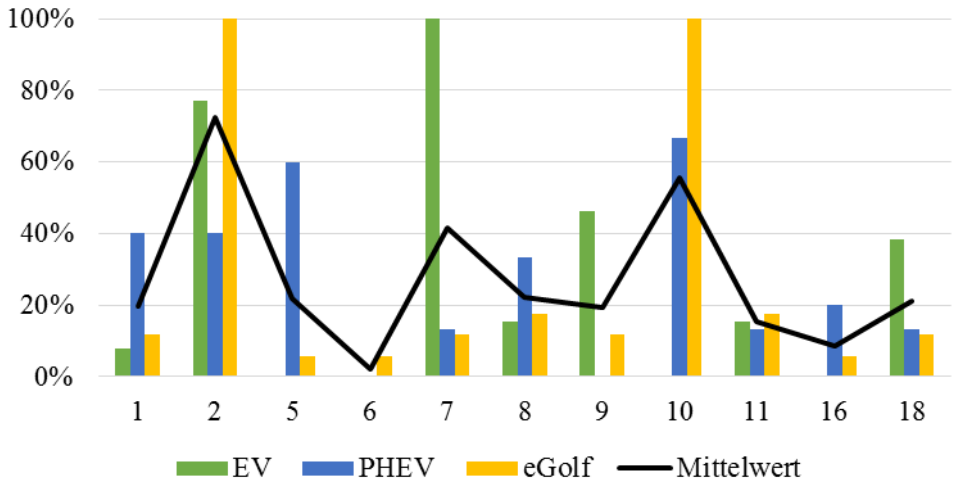


Abbildung 4.38: Auftreten der einzelnen E-Funktionen für die drei betrachteten Beispiele, bei Ergebnissen mit dem besten Mittelwert über die unterschiedlichen Anwendungsfälle.

Aus der Untersuchung geht hervor, dass es keine Konfiguration von E-Funktionen gibt, welche in der Lage wäre allgemein die besten Ergebnisse aus dem PA zu ermöglichen. Vor allem bei der PHEV Batterie sind verhältnismäßig viele Funktionen beteiligt und zusätzlich war dies die einzige Batterie, für die nicht gleichzeitig in allen Fällen das Optimum erreicht werden konnte. Deutlich zu erkennen ist, dass die Funktionen 6, 11 und 16 eine weniger gewichtige Rolle spielen. Dennoch existiert eine Kombination von E-Funktionen unter Beteiligung von Funktion 11, welche sehr gute Ergebnisse für einen EV Batteriepack erzielt. Mehr Gemeinsamkeiten können nicht herausgestellt werden. Eine Erweiterung auf 5 E-Funktionen konnte für den EV Batteriepack keine Verbesserung erzielen. Für den PHEV Batteriepack konnte eine kleine Verbesserung bei der Platzierung von großen Modulen erzielt werden.

Aus den vorangegangenen Untersuchungen können allgemeine Handlungsempfehlungen abgeleitet werden:

- Drei E-Funktionen reichen für das Auffinden der optimalen Konfiguration meist aus.
- Die E-Funktion 6 (kleinster y-seitiger Abstand) kann für die Batterieauslegung vernachlässigt werden.
- Die E-Funktion 16 (größter x-seitiger Abstand) spielt keine große Rolle. Optima bei den großen PHEV Modulen konnten auch ohne Beteiligung dieser Funktion ermittelt werden. Mit 5 E-Funktionen konnte sogar der Mittelwert über alle drei Fälle verbessert werden, solange Funktion 16 nicht beteiligt war.
- Die Reduzierung auf die acht verbleibenden E-Funktionen verringert die Anzahl möglicher 3er Kombinationen um 2/3.
- Bei einem kleinen Bauraum (PHEV) spielen andere E-Funktionen bei großen Modulen eine Rolle als bei kleinen Modulen und Einzelzellen.

[81] Die Modulgrößen für die weiteren Testfälle unterscheiden sich voneinander.

Ein Satz von E-Funktionen für die Ermittlung eines Optimums, ohne nähere Bauraumstudie, befindet sich in Tabelle 4.17. Für die Auswahl wurden die obigen Handlungsempfehlungen berücksichtigt und die Zusammenstellung auf Basis der Auftrittshäufigkeiten bei dem jeweiligen Anwendungsfall getroffen. Somit ist die Wahrscheinlichkeit hoch in einem abweichenden Anwendungsfall mit Hilfe dieser Kombinationen ein Optimum für die mechanische Konfiguration einer Batterie zu finden.

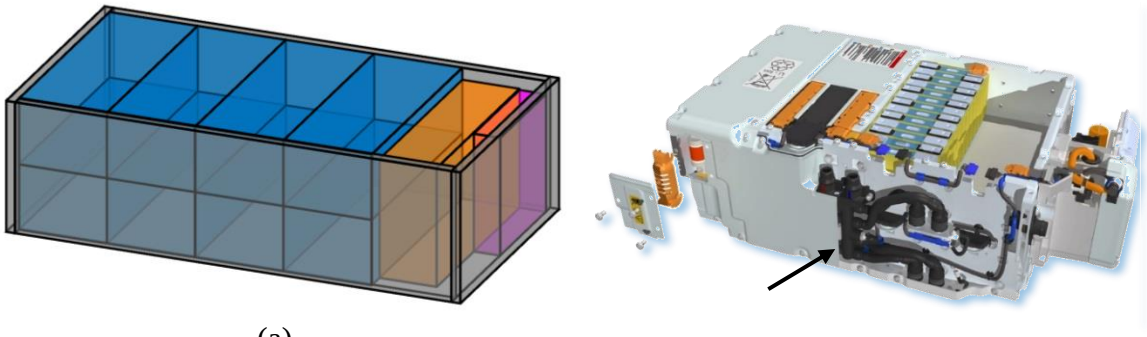
Tabelle 4.17: E-Funktionen zur Verwendung ohne Bauraumstudie

Anwendungsfall	1. E-Funktion	2. E-Funktion	3. E-Funktion	4. E-Funktion	5. E-Funktion
EV	9 8 11	7 5 2	18 2 5	-	-
e-Golf	2	10	8	-	-
PHEV kleine Module & Einzelzellen	8	5	1	-	-
PHEV große Module	7	1	18	2	11

Für die Verwendung in den späteren Anwendungsfällen werden alle sechs 3er-Kombinationen in der Voroptimierung eingesetzt und die beste Konfiguration aus allen Durchläufen ausgewählt. Für jede elektrische Konfiguration wird daher der PA sechs Mal aufgerufen.

Plausibilisierung der mechanischen Zusammensetzung

Als Anwendungsbeispiel für den Packalgorithmus wird erneut die Originalkonfiguration des Porsche Cayenne S E-Hybrid verwendet (104s1p, siehe Tabelle 4.1, S. 59). Hierbei soll gezeigt werden, welche Konfiguration der Batteriebauteile der Packalgorithmus als Best Design erachtet. Das Best Design wird mit der Anordnung der realen Batterie verglichen und die Unterschiede beschrieben.



(a) (b)

Abbildung 4.39: Gegenüberstellung des Ergebnisses aus dem Packalgorithmus mit 104 Zellen und 13er Modulen (a) und dem tatsächlichen Aufbau des Batteriepacks des Porsche Cayenne S E-Hybrid (b). Mit dem Pfeil ist der Kühlmittelverteiler markiert. (Darstellung der Robert Bosch Battery Systems GmbH)

Das Best Design des PA und ein Bild des Originalbatteriepacks sind in Abbildung 4.39 dargestellt. Die abgebildeten Module in Abbildung 4.39 (a) beinhalten die Kühlplatte unter den Zellen, die Modulendplatten, sowie die Moduldeckel mit Zellverbindern und Überwa-

chungselektronik. Zusätzlich abgebildet sind BDU und BCU. Der abgebildete Rahmen enthält sowohl die Rahmendicke aus Aluminium, als auch den Sicherheitsspalt zwischen Zellen und tatsächlichem Rahmen für ein großes SUV und einem Batteriepack im Hinterwagen (siehe Beschreibung des mechanischen Modells und (Frank und Pan, 2017)). Die Basismaße für den Rahmen betrugen 500 x 780 x 270 mm, der ermittelte Rahmen hat äußere Abmaße von 407 x 762 x 220,3 mm. Die Maße des Porsche Batteriepacks betragen 446 x 795 x 251 mm. Damit hat der Originalbatteriepack ein Volumen von 89 l gegenüber dem Volumen aus dem Modell von 68,3 l. Dabei ist zu beachten, dass das Modell aus dem PA keine Peripheriekomponenten, wie den Kühlmittelverteiler vorne im Bild in Abbildung 4.39 (b, Pfeilmarkierung), Verkabelung und Stecker berücksichtigt. Zusätzlich gelten alle Vereinfachungen des Modulmodells (siehe 4.1.3). Die tatsächliche Form der Originalbatterie ist zusätzlich der Ersatzradmulde angepasst und die oben angegebenen Maße sind die Maße der Umschließenden. Das Ergebnis des PA ist somit, unter Beachtung der oben angegebenen Randbedingungen, als plausibel anzusehen.

4.5 Systemsynthese zu einer gesamtheitlichen Optimierungsumgebung

Die Kombination der vorgestellten Modelle und der jeweiligen Voroptimierungen, ergibt ein Gesamtsystem gemäß der Optimierungsstruktur in Abbildung 4.23 (S. 82). Für die globale Optimierung kommt die in Abschnitt 2.5.1 beschriebene evolutionäre Optimierungsstrategie zum Einsatz. Die Evolutionsstrategie erzeugt umso bessere Ergebnisse, je mehr Konfigurationen erzeugt wurden. Wie viele Solver-Aufrufe also zugelassen werden. Mit der Anzahl der Solver-Aufrufe steigt ebenfalls die Rechendauer. Daher wird in 4.5.1 ein geeigneter Kompromiss für die Anzahl der Solver-Aufrufe in einem Optimierungsdurchlauf ermittelt. Zusätzlich wird in Abschnitt 4.5.2 eine Bewertungsmethode für die paretooptimalen Ergebnisse der Optimierungsstrategie vorgestellt, mit deren Hilfe ein Best Design ausgewählt werden kann. Zuletzt erfolgt eine Sensitivitätsanalyse des Gesamtsystems (Abschnitt 4.5.3).

Tabelle 4.18: Anforderungsparameter für die Optimierung auf Basis des Porsche Cayenne S E-Hybrid

Parameter	Wert	Verweis/Bemerkung
Obere Packspannungsgrenze	450 V	ISO/PAS 19295
Untere Packspannungsgrenze	200 V	Werknorm MBN LV 123
Geforderte elektrische Leistung	76 kW	Auf Basis von (Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, 2017) s.u.
Geforderter nutzbarer Energieinhalt (BoL)	7 kWh	Auf Basis von (Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, 2017) s.u.
Modulgröße	6-30	Selbst festgelegt
Stückzahl	1000/Jahr	Siehe Stückzahlbetrachtung im Kostenmodell (Abschnitt 4.1.2.3)

4.5.1 Ermittlung einer angemessenen Anzahl von Solver-Aufrufen im Optimierungsalgorithmus

Für die Ermittlung eines sinnvollen Kompromisses zwischen Rechenzeit und Ergebnisqualität wird eine Gesamtsystemoptimierung auf Basis der Anforderungen an den Porsche Cayenne S E-Hybrid durchgeführt. Die wichtigsten Anforderungen an die Hochvoltbatterie dieses PHEV sind in Tabelle 4.18 aufgeführt. Dort ist jeweils ein Verweis oder eine Bemerkung angegeben, welche die Festlegung der Anforderungen bedingt.

Aus der Reichweitenangabe von 38 km elektrisch und einem Verbrauch von 18,6 kWh/100 km (Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, 2017) ergibt sich ein nutzbarer Energieinhalt von 7 kWh. Die geforderte elektrische Leistung aus der Batterie wird aus der verfügbaren mechanischen Leistung des Elektromotors von 70 kW und Informationen zu Wirkungsgraden aus (Kasper und Schünemann, 2012) zu 76 kW als notwendige elektrische Leistung aus der Batterie umgerechnet[82].
Die Optimierung unter den gegebenen Parametern erfolgt durch die Einstellung von SoC_{Min}, SoC_{Max}, $\dot{v}_{Fl}$ und der Platzierungsparameter des Packalgorithmus. Die Optimierungsziele und die Randbedingungen sind die folgenden:

$$\min \begin{cases} \dot{v}_{Fl} \\ K_{tot} \\ K_{kWh} \\ V \\ n_{Zellen} \end{cases}$$

$$unter\ den\ Nebenbedingungen:$$

$$SoC_{Swing} \geq 80\ \%,$$

$$T_{Zelle,Max} \leq 45\ °C,$$

$$E_{Sim} \geq 7\ kWh,$$

$$P_{Max} \geq 76\ kW.$$

4.27

Als Benchmark für den evolutionären Algorithmus dient ein Durchlauf des EA10000, bei welchem mit 10 000 Solver-Aufrufen eine Optimierung durchgeführt wird. Bei dieser Menge berechneter Designs kann davon ausgegangen werden, dass die tatsächliche Paretofront sehr nah abgebildet wird. Die so ermittelten Best Designs werden mit einer Optimierung mit 400 Solver-Aufrufen (EA400) verglichen. Hierfür werden im Folgenden die Ergebnisse bezüglich der Optimierungsziele gegenübergestellt. Ziel des Vergleichs ist es, herauszufinden, ob die deutlich schnellere Optimierung mit 400 Solver-Aufrufen bereits gute Ergebnisse erzielt und wie stark die gefundenen Optima von der Optimierung mit 10 000 Solver-Aufrufen abweicht.

Ergebnisse des Vergleichs von EA10000 und EA400

Die Rechendauer für die beiden Optimierungen lag bei 10 h für den EA10000 und bei 1,6 h für den EA400. Des Weiteren hat ersterer 94 nicht dominierte Designs auf einer Paretofront gefunden. Bei dem EA 400 sind es 15 nicht dominierte Designs. Da keines der Best Designs

[82] Es wird ein Wirkungsgrad von 0,97 für die Leistungselektronik und von 0,95 für den Elektromotor aus (Kasper und Schünemann, 2012) verwendet.

eine Kühlung benötigt, werden die Ergebnisse nicht gegen die Kühlmitteldurchflussrate $\dot{v}_{Fl}$ abgebildet. Die restlichen Gegenüberstellungen der jeweiligen Best Designs sind in Abbildung 4.40 zu sehen[83].

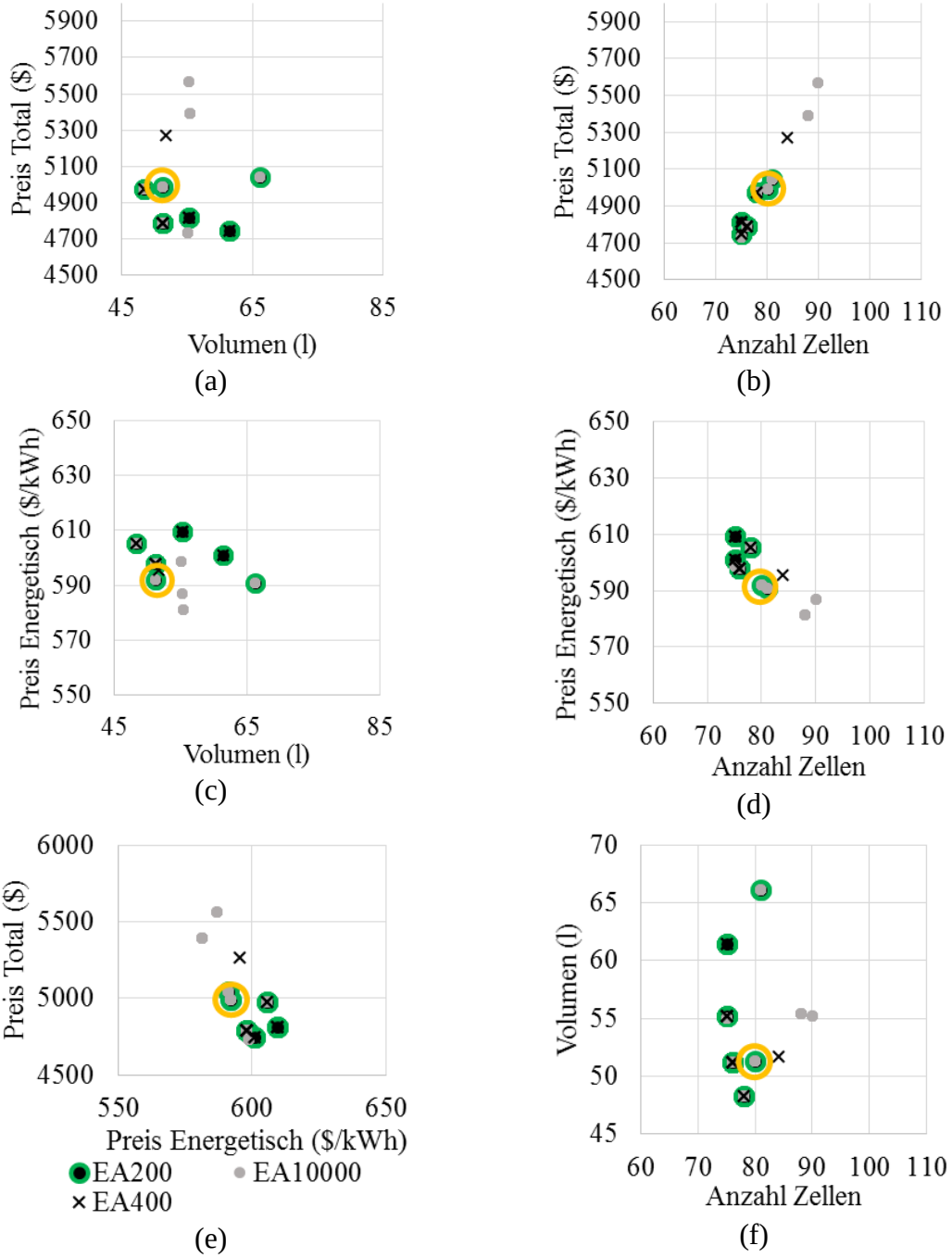


Abbildung 4.40: Gegenüberstellung aller Optimierungsziele, außer der Kühlmitteldurchflussrate. Kreise: EA10000, Kreuze: EA400, schwarze Kreise mit Rahmen: zusätzlicher EA200. Mit größeren hellen Kreisen ist das globale Best Designs nach Auswahl gemäß Abschnitt 4.5.2 markiert.

Bezogen auf den absoluten Batteriepreis (Abbildung 4.40, (a,b,e)) ist zu erkennen, dass beide Algorithmen die günstigste Batterievariante gefunden haben, volumetrisch unterscheiden sich diese jedoch (Abbildung 4.40 (a)). Zusätzlich waren beide Algorithmen in der Lage den kleinsten Batteriepack zu finden (Abbildung 4.40 (a,c,f)), ebenso die kleinste Anzahl von

[83] Die jeweiligen Detailergebnisse mit allen berechneten Designs befinden sich im Anhang 6.9.

Zellen (Abbildung 4.40 (b,d,f)). Lediglich bei der Betrachtung des besten energetischen Preises (Abbildung 4.40 (c-e)) konnte der EA10000 etwas bessere Konfigurationen finden als der EA400. Das mag daran liegen, dass die Minimierung dieses Preises mit der Verschlechterung sowohl der Ziele der Zellanzahl, als auch des absoluten Preises und des Batterievolumens einhergeht. Die Mutationsrate hat beim EA10000 einen größeren Einfluss auf die Designvielfalt. Bei der Feinjustierung des SoC-Swings, spielt die Mutation eine große Rolle, da bei der Kreuzung der Individuen die SoC-Parameter von der ursprünglichen Designverteilung abhängen, welche beim EA10000 ebenfalls deutlich größer ist, als beim EA400[84].

Die Gegenläufigkeit von absolutem Preis und energetischem Preis kann dadurch erklärt werden, dass bei einem Anstieg des nominellen Energieinhalts die absoluten Kosten weniger stark steigen. Das Verhältnis von absolutem Preis zu nominellem Energieinhalt[85] wird damit günstiger.

Insgesamt zeigt der Vergleich, dass die Ergebnisse des EA400 den Bereich der optimalen Ergebnisse aus dem EA10000 gut abbilden. Dabei benötigt der EA400 lediglich einen Bruchteil der Zeit des EA10000. Eine zusätzliche lokale Optimierung mit 200 Solver-Aufrufen, auf Basis der Best Designs aus dem EA400, soll klären, ob die Ergebnisse dadurch signifikant verbessert werden können.
Nach 20 min ist der zusätzliche EA200 beendet. Die neuen Best Designs sind ebenfalls in Abbildung 4.40 dargestellt. Bezüglich des energetischen Preises konnte eine weitere Verbesserung erzielt werden und es wurden einige zusätzliche Best Designs aus dem EA10000 gefunden. Bei Verwendung der Abfolge von EA400 (global) und EA200 (lokal) bleibt die Rechendauer 5-mal so klein, wie beim EA10000, während der Bereich der optimalen Designs bereits gut abgebildet wird. Daher wird für die folgenden Anwendungsfälle dieses Vorgehen verwendet und als EA600 bezeichnet.

Zusätzlich zu den in Abbildung 4.40 gezeigten Vergleichen, werden die Ergebnisse der mechanischen Optimierung der ermittelten Best Designs verglichen (Tabelle 4.19 und Tabelle 4.20). Zu diesem Zweck werden die Extremdesigns abgebildet. Als Extremdesign wird ein Design bezeichnet, welches in einem der Optimierungsziele einen Bestwert erreichen konnte. Wenn mehrere Konfigurationen in diesem Wert gleichauf sind, wird der Wert mit dem kleineren SoC-Swing gewählt. Sollte auch dieser gleich sein, wird ein Design gewählt, dessen SoC-Swing möglichst mittig liegt.
Einige dieser Designs erreichen Bestwerte in mehreren Zielen. Zusätzlich wurden die Extremdesigns betrachtet, welche den kleinsten SoC-Swing erreicht haben und welche am nächsten an die Temperaturbegrenzung gelangt sind. Durch diese Vorgehensweise können jeweils vier Designs für die beiden Algorithmen ermittelt werden[86]. Für den Vergleich zwischen EA10000 und EA600 werden die Extremdesigns in Quer- (Tabelle 4.19) und Längsmodule (Tabelle 4.20) unterteilt.
Abbildungen (a) und (b) in Tabelle 4.19 unterscheiden sich nur um die Anordnung von BDU und BCU. Der EA10000 konnte die Parameter des PA optimieren, um eine kompaktere Bauteilkonfiguration zu ermitteln. Des Weiteren ist der SoC-Swing für die Konfiguration aus dem EA600 3 % größer. Den kleinsten energetischen Preis (Tabelle 4.19 (c und d)) haben

[84] Der EA10000 startet mit 1000 Grunddesigns, welche gleichverteilt im Parameterraum erzeugt werden. Der EA400 startet dagegen mit 50 Grunddesigns.
[85] Der nominelle Energieinhalt wird mit einer 1C Entladerate bestimmt.
[86] Die Zuordnung von Designnummer und Extremdesign, sowie Detailparameter befinden sich im Anhang.

relativ unterschiedliche Konfigurationen erreicht. Der Grund hierfür wurde bereits oben beschrieben. Die Konfigurationen mit dem kleinsten SoC-Swing unterscheiden sich sowohl zwischen EA10000 und EA600, als auch in den Ergebnissen eines Algorithmus (Tabelle 4.19 (c) und Tabelle 4.20 (c, d)). Diese Unterschiede sind auf die verschiedenen SoC-Swinglagen zurückzuführen. Zusätzlich ist der kleinste SoC-Swing, welchen der EA10000 ermitteln konnte 80 %, während im EA600 der kleinste ermittelte SoC-Swing bei 82 % liegt. Die ermittelten Konfigurationen mit dem kleinsten Volumen (Tabelle 4.20 (a und b)) sind nahezu gleich. Lediglich der SoC-Swing des Designs aus dem EA600 ist erneut um 3 % größer.

Tabelle 4.19: Gegenüberstellung der Extremdesigns von EA10000 und EA600 mit Quermodulen

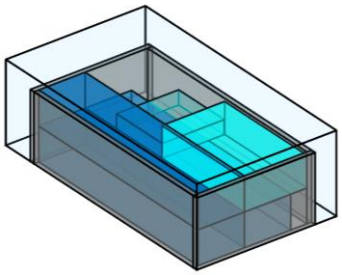
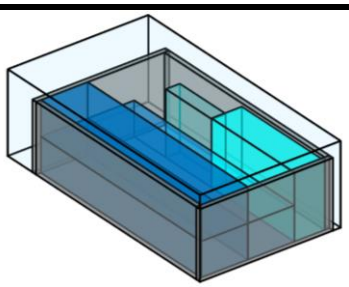
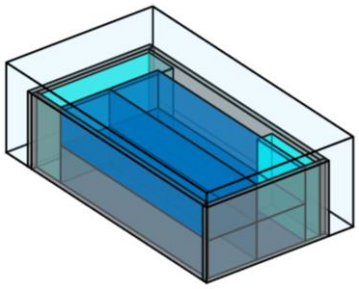
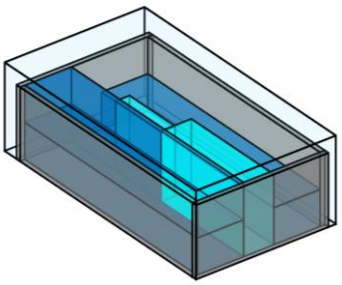
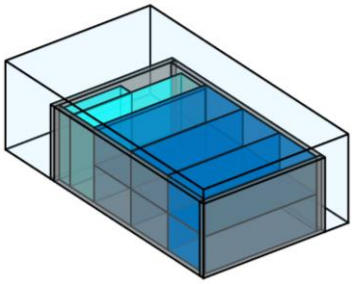
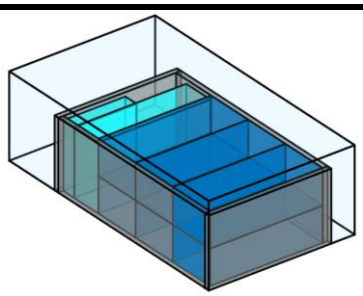
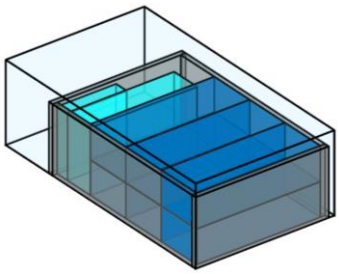
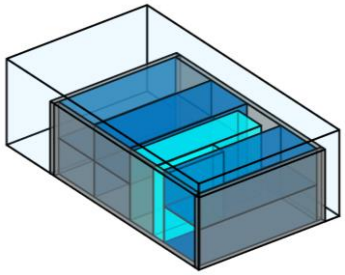
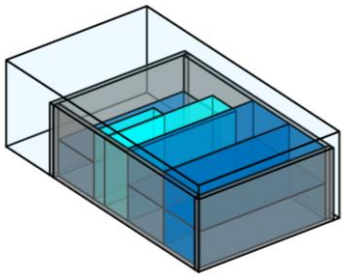
Extremdesigns EA10000	**Extremdesigns EA600**
Module quer	
 (a) #2160: kleinste Anzahl Zellen, geringster absoluter Preis, maximale Temperatur, 75 Zellen	 (b) #318: kleinste Anzahl Zellen, geringster absoluter Preis, maximale Temperatur, 75 Zellen
 (c) #1316: geringster energetischer Preis, kleinster SoC-Swing, 88 Zellen	 (d) #137 (EA200): geringster energetischer Preis, 81 Zellen

Tabelle 4.20: Gegenüberstellung der Extremdesigns von EA10000 und EA600 mit Längsmodulen

Extremdesigns EA10000	Extremdesigns EA600
Module längs	
 (a) #2240: kleinstes Volumen, 78 Zellen	 (b) #419: kleinstes Volumen, 78 Zellen
 (c) #1411: kleinster SoC-Swing, 90 Zellen	 (d) #376: kleinster SoC-Swing, 84 Zellen
	 (e) #371: kleinste Anzahl Zellen, maximale Temperatur, 75 Zellen

Der Vergleich von EA10000 und EA600 hat gezeigt, dass die Ergebnisqualität des EA600 bei der zusätzlichen Rechenzeitverkürzung sehr gut ist und die Ergebnisse sehr nah an den Ergebnissen des EA1000 liegen. Aus diesem Grund wird für die weiteren Betrachtungen der EA600 verwendet.

4.5.2 Bewertung der Unterergebnisse und Auswahl eines globalen Optimums

Die Variantenvielfalt bei den möglichen Optima verlangt nach einer Detailbetrachtung der Ergebnisse, um ein bestimmtes Design als beste Konfiguration auszuwählen. Die tatsächliche Auswahl ist stark von dem entsprechenden Projekt abhängig, in dem die Batterie eingesetzt werden soll. Schließlich ist die Auswahl eines konkreten Systems vom Betrachtungswinkel abhängig und wird in Kooperation von Fahrzeug- und Batteriehersteller gefunden. Um unterschiedliche Optimierungsergebnisse miteinander zu vergleichen, macht es für die

vorliegende Arbeit Sinn ein einzelnes Best Design nach einem einheitlichen Maßstab zu ermitteln. Als Bewertungsmaßstab wird die wirtschaftlich-technische Bewertung nach VDI 2225 (Richtlinie VDI 2225 Blatt 3) herangezogen. Bei dieser Methode werden technische Parameter in eine technische Wertigkeit und die Kosten eines Produkts in eine wirtschaftliche Wertigkeit überführt.
Für die Ermittlung der technischen Wertigkeit (s_1) werden die technischen Schlüsselparameter (Key Performance Indicators – KPIs) über ein Punktesystem von 0 (ungenügend) bis 4 (ideal (p_{Max})) bewertet. Der Mittelwert aller Bewertungen ergibt die technische Wertigkeit des Produktes[87]:

$$s_1 = \frac{\sum p_{KPI}}{p_{Max}\, n_{KPI}}. \qquad \textbf{4.28}$$

Mit p_{KPI} wird die Punktzahl des jeweiligen KPIs dargestellt. n_{KPI} beschreibt die Anzahl aller KPIs.
Bei der Ermittlung der wirtschaftlichen Wertigkeit (s_2) wird der Quotient aus idealen Herstellkosten (H_i) und den tatsächlichen Herstellkosten (H) gebildet.

$$s_2 = \frac{H_i}{H} \left(= \frac{K_i}{K_{tot}}\right). \qquad \textbf{4.29}$$

Als Idealwerte werden, sowohl bei den technischen KPIs, als auch bei der wirtschaftlichen Bewertung, die Bestwerte aus einer Optimierung verwendet. Durch diese Herangehensweise kann die wirtschaftliche Wertigkeit über die berechneten Preise (K_{tot}) berechnet werden (siehe Gleichung 4.29). Ziel der Bewertung ist es, in beiden Wertigkeiten nahe an eine 1 zu gelangen.
Um die Punktzahl eines KPI zu ermitteln, wird das folgende Rechenschema benutzt:

$$p_{KPI} = p_{Max}\, \frac{\left|\Delta P_{KPI,worst}\right|}{\left|\Delta P_{best,worst}\right|}. \qquad \textbf{4.30}$$

Der Index $worst$ steht für den schlechtesten Wert aller paretooptimalen Designs und $best$ für den Idealwert.
Als die wichtigsten KPIs werden meist eine hohe Energiedichte und geringe Kosten angeführt (vgl. Thielmann et al., 2015; Fink und Fetzer, 2014; Korthauer, 2013). Ferner sind ein kleines Volumen, eine hohe Lebensdauer[88] und eine gute Fertigbarkeit[89] wichtige KPIs (vgl. Arora et al., 2015). Zusätzlich werden nutzbarer Energieinhalt und Reichweite als positive Bewertungskriterien berücksichtigt. In beiden Fällen wird üblicherweise eine Mindestanforderung gestellt. Die Punktevergabe erfolgt linear von 0 bis 4, bis zu 10 % über dem Wert der Mindestanforderung. Darüber hinaus erhalten alle Designs die Höchstpunktzahl. Die Parameter der Optimierung, welche mit diesen KPIs in Verbindung gebracht und daher in die Bewertung einbezogen werden, sind in Tabelle 4.21 zusammengefasst. Weitere, hier nicht verwendete KPIs sind: Sicherheit, Ausfallrate (Qualität), Betriebsfestigkeit, Laufleistung,

[87] In diesem Fall einer Batteriekonfiguration.
[88] Auf die Lebensdauer haben im vorliegenden Fall nur ein kleiner SoC-Swing und eine geringe Temperatursteigerung einen Einfluss, daher werden die Bewertungen dieser beiden Parameter zu einem mittleren Wert zusammengefasst.
[89] Positiv auf die Fertigbarkeit wirken sich ein fehlendes Kühlsystem und eine geringe Menge von Modulen aus, weshalb die Kühlmitteldurchflussrate und die Modulanzahl in die Bewertung mit einbezogen werden. Die Bewertung der beiden Parameter wird in der Gesamtbewertung zu einem Mittelwert zusammengefasst.

End of Life Performance, Recycling und Ladeperformance (siehe Korthauer, 2013; Brünglinghaus, 2015; Eichner, 2014; Thielmann et al., 2015; Kustosch, 2016). Die meisten der nicht verwendeten KPIs können von den vorgestellten Modellen nicht abgebildet werden und werden daher nicht betrachtet. Die Ladeperformance könnte von den Modellen dargestellt werden, den zentralen Einfluss auf dieses KPI besitzen allerdings die Batteriezellen, welche in der vorliegenden Arbeit nicht verändert und angepasst werden. Vor allem bei der Schnellladung existieren unterschiedliche Lademethoden, deren Betrachtung den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde (Cois, 2016; Kustosch, 2016).

Tabelle 4.21: Verbindung zwischen Key Performance Indicators und Optimierungsparametern

Parameter	Key Performance Indicator
Nutzbarer Energieinhalt E_{Sim} (kWh) / Reichweite S (km)	Nutzbarer Energieinhalt / Reichweite
Batterievolumen V_{Bat} (l)	Volumen
Volumetrische Energiedichte w (Wh/l)	Energiedichte
Batteriepreis K_{tot} ($)	Kosten
SoC_{Swing} (%) Maximale Temperatur $T_{Zelle,Max}$ (°C)	Lebensdauer
Kühlmitteldurchflussrate $\dot{v}_{Fl}$ (l/h) Modulanzahl n_{Mod}	Fertigbarkeit

Da die Kühlmitteldurchflussrate für die Bewertung der Fertigbarkeit verwendet wird, kann die entsprechende Punktzahl nicht über Gleichung 4.30 ermittelt werden. Stattdessen wird die volle Punktzahl vergeben, wenn $\dot{v}_{FL} = 0$ und in allen anderen Fällen die Punktzahl 0. Dadurch, dass sich die technischen KPIs teilweise widersprechen, ist es nicht möglich sehr nah an die Bestbewertung mit 1 zu gelangen. Dieser Zielkonflikt ist bereits in der Optimierung deutlich geworden. Eine gleichmäßige Bewertung (Gerade in Abbildung 4.41) zwischen wirtschaftlicher und technischer Wertigkeit kann daher nicht erreicht werden. Das jeweilige Best Design wird aus der Summe von technischer und wirtschaftlicher Wertigkeit bestimmt (Gesamtbewertung).

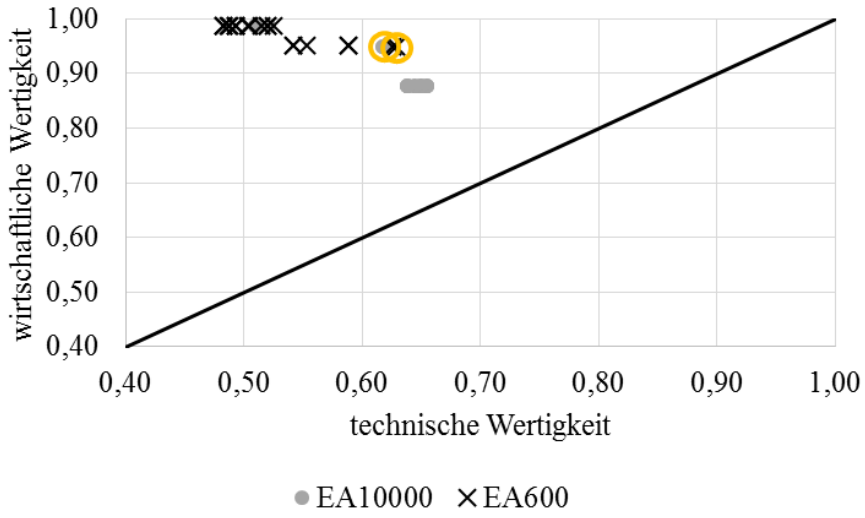


Abbildung 4.41: Wirtschaftliche und technische Wertigkeiten der ermittelten Best Designs aus EA10000 und EA600 des vorangegangenen Abschnitts.

Die Bewertung über die verschiedenen KPIs ist nicht rückwirkungsfrei. Das bedeutet, dass die KPIs sich gegenseitig beeinflussen und damit Kreuzkorrelationen entstehen. Beispielsweise bestehen Zielkonflikte zwischen einigen KPIs (z.B. Lebensdauer vs. Reichweite) und andere KPIs beeinflussen sich gegenseitig positiv (ein kleines Volumen wirkt sich positiv auf die volumetrische Energiedichte aus). Des Weiteren führt die Zusammenfassung der Größen SoC-Swing und Maximale Temperatur zu einer impliziten Gewichtung. Dadurch besitzen der SoC-Swing, die maximale Temperatur, die Kühlmitteldurchflussrate und die Modulzahl jeweils eine halbe Wertung verglichen mit den Parametern Preis, Reichweite/Nutzbarer Energieinhalt, Batterievolumen und volumetrische Energiedichte (in Tabelle 4.22 durch die Gewichtungsangaben dargestellt). Die Korrelation zwischen den Parametern, aus welchen sich die KPIs zusammensetzen ist in der Tabelle 4.22 dargestellt. Die Eintragungen in den Zellen der Tabelle beschreiben die Tendenz des Parameters einer Spalte, welche sich positiv auf den Parameter der Zeile auswirkt. Wenn diese Tendenz sich ebenfalls als positiv für den Parameter der Spalte selbst auswirkt, ist die Zelle farblich hinterlegt. Bei den Korrelationsbetrachtungen wird ebenfalls die Struktur der Gesamtoptimierung (Abschnitt 4.2) berücksichtigt, weshalb der Batteriepreis kein weiteres KPI beeinflusst, da der Preis erst nach der Dimensionierung der anderen Parameter berechnet wird.

Tabelle 4.22: Positive Korrelationseffekte der KPI Parameter. Indirekte Einflüsse sind durch eine Eintragung in runden Klammern gekennzeichnet.

Gewichtung		1				0,5			
		K_{tot}	E_{Sim}	V_{Bat}	w	$T_{Zelle;Max}$	SoC_{Swing}	$\dot{v}_{Fl}$	n_{Mod}
1	K_{tot}	-	(klein)	klein	-	(klein)	groß	0	klein
	E_{Sim}	-	-	-	-	klein	groß	(>0)	-
	V_{Bat}	-	(klein)	-	-	(klein)	groß	0	-
	w	-	(groß)	klein	-	(klein)	(klein)	0	-
0,5	$T_{Zelle,Max}$	-	klein	-	(klein)	-	klein	>0	-
	SoC_{Swing}	-	-	-	-	-	-	-	-
	$\dot{v}_{Fl}$	-	-	-	-	-	klein	-	-
	n_{Mod}	-	-	-	-	-	-	-	-

Aus der Korrelationsmatrix geht hervor, dass die Parameter mit halber Wertung tendenziell die Parameter mit ganzer Wertung positiv beeinflussen können. In den meisten Fällen wirkt sich ein positiver Einfluss ebenfalls positiv auf die Parameter selbst aus. Das gilt nicht für den SoC-Swing. Dieser wirkt sich positiv auf drei Parameter mit voller Wertung aus wenn er selbst groß ist und damit dem KPI Lebensdauer entgegenwirkt. Das Fehlen eines thermischen Systems wirkt sich zum einen auf die Fertigbarkeit positiv aus, wie auch auf den Preis, das Volumen und die volumetrische Energiedichte.
Bei den ausgewählten Best Designs ist der Einfluss der KPI Bewertung immer zu berücksichtigen. Ein Fokus auf andere KPIs oder eine andere Gewichtung können gegebenenfalls zu anderen Best Designs aus den Paretofronten führen. Daher werden die Optimierungen mit eigenen Zielen durchgeführt, die eine allgemeinere Betrachtung ermöglichen. Die Zielkonflikte, welche durch die Bewertungsmethode eine Gewichtung erfahren, bleiben damit in den Optimierungen erhalten und führen so zu einer ausgewogenen Paretofront.

Mit Hilfe der Bewertungsmethode über technische und wirtschaftliche Wertigkeit werden die Ergebnisse aus dem vorangegangenen Unterabschnitt eingeordnet und so das jeweilige Best Design ermittelt. In Abbildung 4.41 sind die Best Designs von EA10000 und EA600

mit einem Kreis markiert. Sie liegen sehr nahe beieinander. Die detaillierten Eigenschaften der beiden Best Designs sind in Tabelle 4.23 aufgeführt.

Tabelle 4.23: Best Designs auf Basis der Bewertungsmethode für den EA10000 und den kombinierten EA600

	EA10000	**EA600**
SoC_{Min} (%)	14	13
SoC_{Max} (%)	99	99
SoC_{Swing} (%)	85	86
$\dot{v}_{Fl}$ (l/h)	0	0
E_{Sim} (kWh)	7,02	7,08
Modulkonfiguration	20s1p	20s1p
n_{Mod}	4	4
Elektrische Konfiguration	80s1p	80s1p
P_{Max} (kW)	106	106
K_{tot} ($)	4989	4989
K_{kWh} ($/kWh)	592	592
V_{Bat} (l)	51	51
$T_{Zelle,Max}$ (°C)	41	41
w (Wh/l)	164	164
Designnummer	1466	42

Beide ausgewählten Best Designs unterscheiden sich bezüglich der unteren SoC-Grenze. Daraus ergeben sich marginale Unterschiede im SoC-Swing und dem nutzbaren Energieinhalt auf dem Simulationszyklus. Das äußere Erscheinungsbild, die Kosten und alle weiteren Größen sind gleich (siehe auch Abbildung 4.42). Die Optimierung über die sequentielle Anwendung der Algorithmen in Form des EA600 mit einer deutlich höheren Rechengeschwindigkeit wird damit erneut bestätigt und ist im Rahmen der Anwendung der Batterieentwurfsmethodik zielführend.

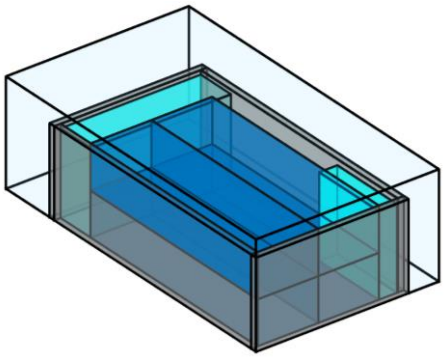
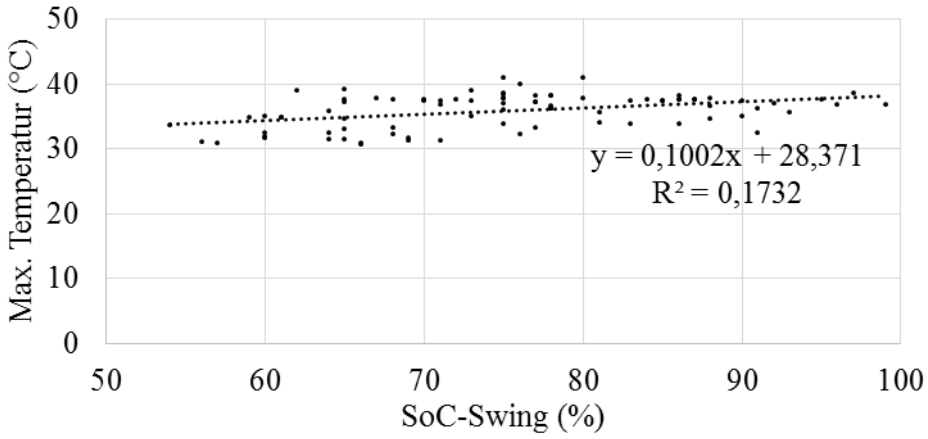


Abbildung 4.42: Mechanische Konfiguration des globalen Best Designs für den EA600 und den EA 10000 mit 80 Zellen in 20er Modulen.

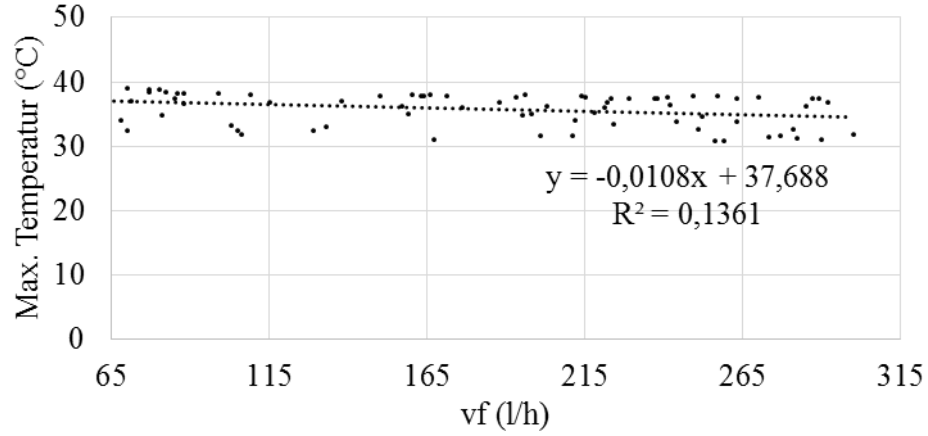
4.5.3 Sensitivitätsanalyse der Gesamtsystemoptimierung

Eine Sensitivitätsanalyse soll herausstellen, welche Eingangsparameter den größten Einfluss auf die Ausgangsparameter im Rahmen der Gesamtsystemoptimierung besitzen. Hierfür werden die Eingangsparameter (SoC_{Min}, SoC_{Max}, $\dot{v}_{Fl}$, die Platzierungsparameter des PA und der geforderte Energieinhalt) in ihren Grenzen gleichverteilt variiert und ihr Einfluss

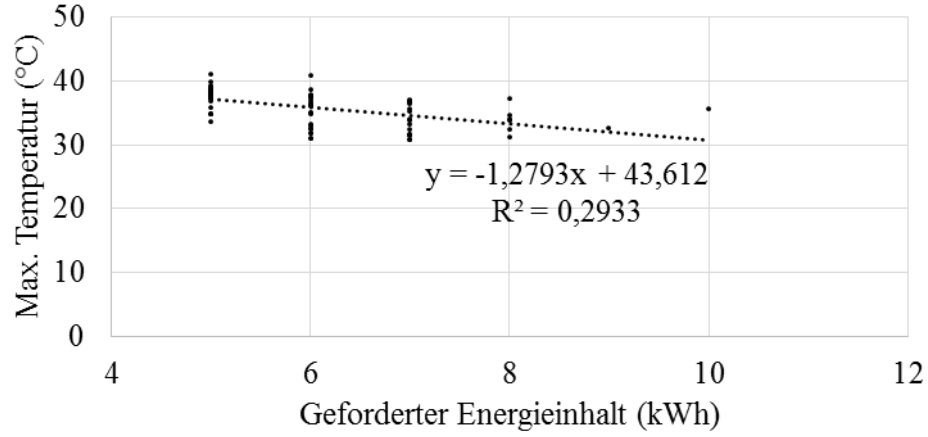
auf die mittlere Zelltemperatur, die Batteriekonfiguration, das Volumen und den Batteriepreis (total und energetisch) analysiert. Eine zusätzliche Sensitivitätsanalyse des Kostenmodells wurde bereits in Abschnitt 4.1.2.4 gesondert durchgeführt.



(a)



(b)



(c)

Abbildung 4.43: Einfluss der Eingangsgrößen SoC-Swing (a), Kühlmitteldurchflussrate (b) und geforderter Energieinhalt (c) auf die mittlere maximale Zelltemperatur.

Der Einfluss der Parameter SoC_{Min} und SoC_{Max} kann am besten über den davon zusammengesetzten SoC-Swing deutlich gemacht werden. Der Einfluss dessen Lage wird durch die

Streuung der Ergebnisse bei einem SoC-Swing offensichtlich. Daher wird anstatt der SoC_{Min} und SoC_{Max} Werte für die Sensitivitätsanalyse der SoC-Swing verwendet.
Den deutlichsten Einfluss besitzt der SoC-Swing auf die maximale mittlere Temperatur der Batteriezellen. Die in Abbildung 4.43 (a) eingezeichnete lineare Trendlinie gibt einen Temperaturanstieg von 1 K pro 10 % steigendem SoC-Swing an. Dieser Temperaturanstieg hängt mit dem Innenwiderstand der Batteriezellen zusammen, welcher in den SoC-Randbereichen ansteigt und entsprechend die produzierten Joule'schen Verluste erhöht. Zusätzlich ist der nutzbare Energieinhalt bei größerem SoC-Swing höher, was zu einer längeren Nutzungsdauer der Batterie auf dem verwendeten Zyklus führt. Die längere Nutzung steigert die Wärmeproduktion erneut, solange die Kühlmitteldurchflussrate nicht signifikant steigt, was in Abbildung 4.43 (b) zu erkennen ist. Dort ist der Trendlinie zu entnehmen, dass die Temperatur bei einer Steigerung der Kühlmitteldurchflussrate um 100 l/h durchschnittlich um 1 K sinkt.
Der geforderte nutzbare Energieinhalt besitzt einen weiteren indirekten Einfluss auf die Maximaltemperatur der Batteriezellen (Abbildung 4.43 (c)), da für die größere Energiemenge mehr Zellen benötigt werden, welche die Spannungslage der Batterie erhöhen und dadurch einen kleineren Strom für die Leistungserbringung ermöglichen. Der kleinere Strom führt zu geringeren Joule'schen Verlusten und damit zu weniger Batterieerwärmung[90]. Das Temperaturverhalten entspricht damit den Erwartungen. Allerdings lassen sich die quantitativen Aussagen nicht verallgemeinern, was durch die kleinen Bestimmtheitsmaße verdeutlicht wird.

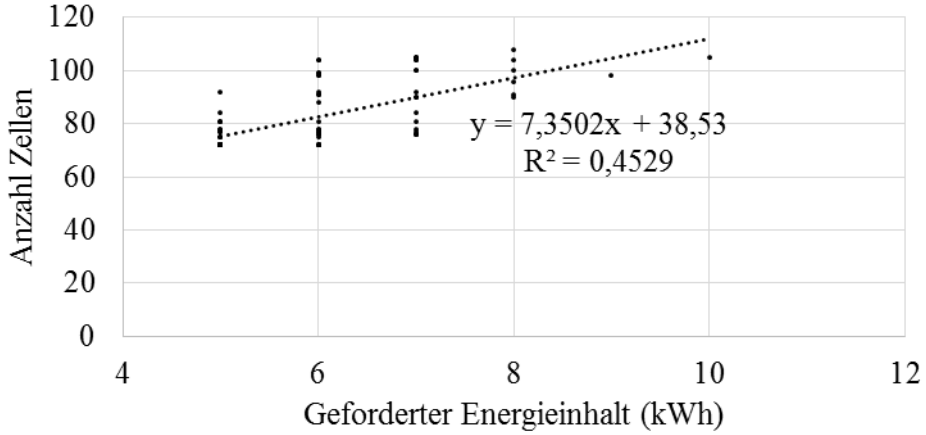


Abbildung 4.44: Abhängigkeit der Zellanzahl von der geforderten nutzbaren Energiemenge.

Aus der Entwicklung der elektrischen Voroptimierung ist bereits bekannt, dass die Anzahl notwendiger Zellen mit steigendem SoC-Swing abnimmt. Die Verringerung der Zellanzahl ist jedoch nur innerhalb der Spannungsgrenzen und unter Erfüllung des nutzbaren Energieinhalts möglich. Darüber hinaus überschreitet der vorhandene Energieinhalt den geforderten Energieinhalt (vgl. Abschnitt 4.4.1). Während die Kühlmitteldurchflussrate erwartungsgemäß keinen Einfluss auf die Anzahl von Zellen besitzt, entspricht ebenfalls der Erwartung, dass ein steigender Energiebedarf zu einer Erhöhung der Zellanzahl führt (Abbildung 4.44).

[90] Für die Sensitivitätsanalyse wurde die Anzahl paralleler Zellen nicht erhöht. Bei einer zusätzlichen Parallelverschaltung wird der notwendige Strom für die Leistungserbringung jedoch ebenfalls verringert, was erneut zu einer geringeren Erwärmung führt, auch trotz der geringeren Spannungslage.

Die Anzahl der Zellen steigt bei Erhöhung der Energieanforderung um 1 kWh durchschnittlich um sieben (28 Ah) Zellen. Allerdings liegt die SoC-Swing bedingte Streuung der notwendigen Anzahl von Zellen für die Erreichung von beispielsweise 7 kWh Energieinhalt bereits bei +/- 14 Zellen. Diese Randbedingung macht das kleine aufgeführte Bestimmtheitsmaß von 0,45 deutlich.

Das Volumen des Batteriepacks steigt erwartungsgemäß mit einer steigenden Anzahl von Zellen. Wie oben (Abbildung 4.44) bereits beschrieben, wird dies unter anderem durch eine steigende Energieanforderung hervorgerufen. Der Einfluss des SoC-Swings auf die Anzahl von Zellen wurde ebenfalls bereits herausgestellt. Daher ist in Abbildung 4.45 der Zusammenhang zwischen Zellanzahl und Batterievolumen dargestellt. Durchschnittlich erhöhen 10 zusätzliche Zellen das Volumen um 5 l. Die hier betrachteten PHEV2 Zellen besitzen ein Volumen von 0,36 l. Zehn dieser Zellen bedeuten daher ein Zusatzvolumen von 3,6 l. Der zusätzliche Volumenbedarf entsteht durch die passiven Bauteile (Moduldeckel und Kühlplatte). Davon abgesehen, besitzt die Modulgröße indirekt einen maßgeblichen Einfluss auf das Batterievolumen, da vor allem durch die Anordnung der Module das Totvolumen im Batteriepack festgelegt wird. Das hier aufgeführte Bestimmtheitsmaß lässt keine allgemeine quantitative Aussage für den Batteriepack zu. Des Weiteren kann den Platzierungsparametern des PA (x-, y-, z-Platzierung) kein eindeutiger Einfluss auf das Volumen zugeordnet werden. Das hängt damit zusammen, dass deren Wirksamkeit stark von den E-Funktionen und den Modulgrößen abhängt und im Algorithmus aus allen möglichen E-Funktionen, sowie den möglichen Modulgrößen nur das beste Ergebnis ausgegeben wird.

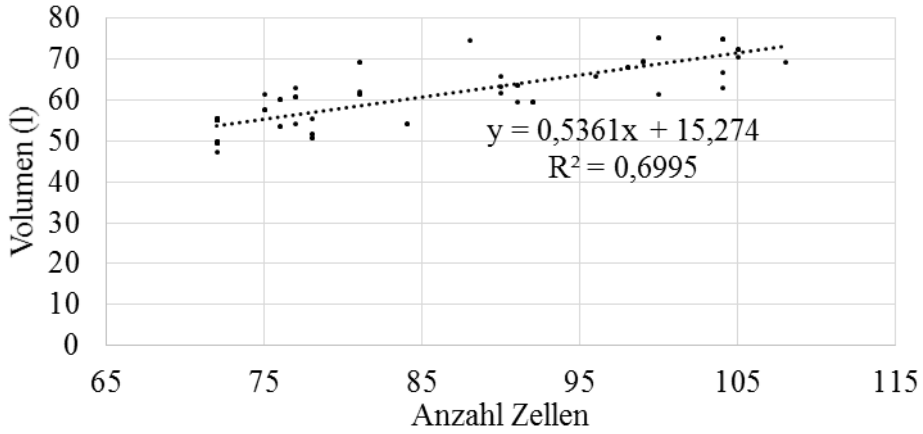
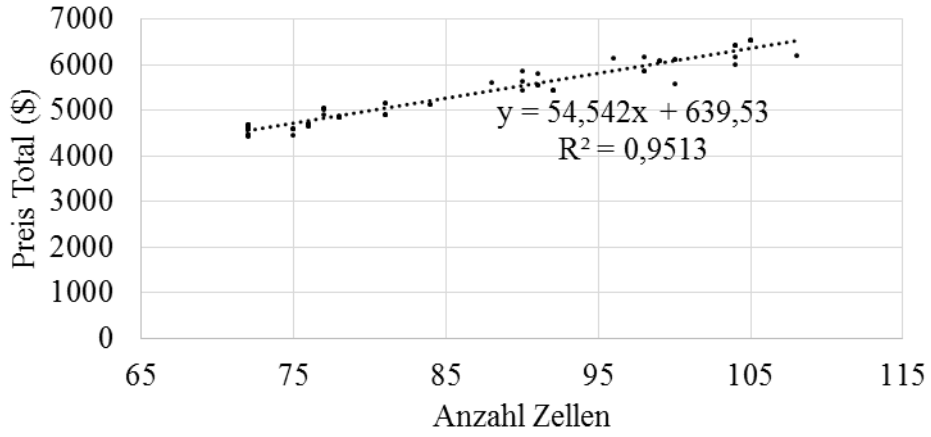
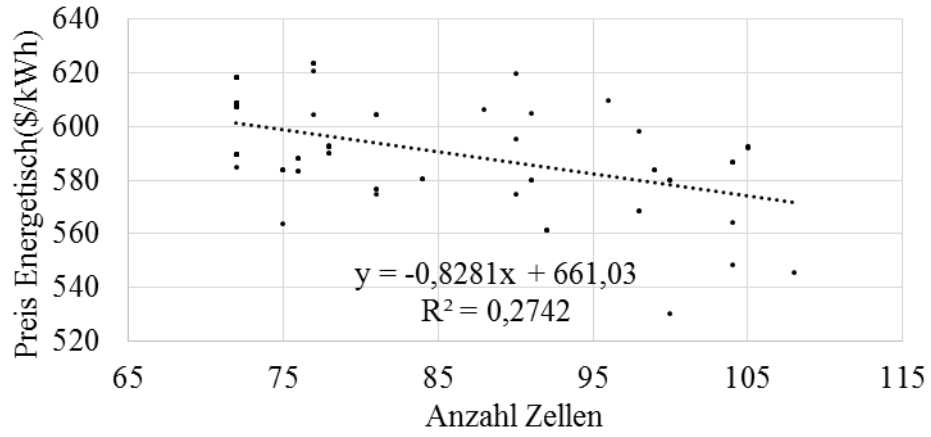


Abbildung 4.45: Zusammenhang zwischen Anzahl der Zellen und Batterievolumen.

Mit einem sehr hohen Bestimmtheitsmaß lässt sich der Zusammenhang zwischen Zellanzahl und Batteriepreis darstellen (Abbildung 4.46 (a)). Hier steigt der Batteriepreis durchschnittlich um $ 55 pro Batteriezelle. Dass diese Aussage jedoch stark von der tatsächlichen Menge der Zellen und von der Parametrierung des Kostenmodells abhängig ist, wurde bereits im Abschnitt über die Sensitivität des Kostenmodells (Abschnitt 4.1.2.4) verdeutlicht. Des Weiteren sinkt der energetische Batteriepreis mit steigender Anzahl der Zellen (Abbildung 4.46 (b)). Dieser Zusammenhang ist auf den zusätzlichen Energieüberschuss bei kleineren SoC-Swings zurückzuführen, welcher zu der Erhöhung der Zellanzahl und damit zu höheren absoluten Kosten führt. Jedoch ebenfalls zu einem geeigneteren Verhältnis zwischen nominellem Energieinhalt und absoluten Kosten und damit zu kleineren energetischen Preisen. Die Streuung der energetischen Preise wird durch die verschiedenen geforderten Energieinhalte und die unterschiedlichen SoC-Swinglagen bedingt.



(a)



(b)

Abbildung 4.46: Abhängigkeit des Batteriepreises von der Zellanzahl im Rahmen der Sensitivitätsanalyse.

Die Sensitivitätsanalyse hat gezeigt, dass allgemeine Tendenzen zwischen den Eingangs- und Ausgangsgrößen bestehen. Aussagen bezüglich einer tatsächlichen Batterieauslegung lassen sich auf diese Art jedoch nicht treffen. Des Weiteren kommt man so zu keiner expliziten Batteriekonfiguration für ein bestimmtes Projekt. Im folgenden Abschnitt werden daher ausführliche Anwendungsfälle auf Basis unterschiedlicher Fragestellungen mit dem Ziel der Ermittlung eines optimalen Batterieentwurfs betrachtet.

4.6 Optimierung verschiedener Batteriepacks

Im vorliegenden Abschnitt wird die Optimierungsumgebung für die Batterieauslegung auf verschiedene Anwendungsfälle angewendet. Die Ergebnisse für jeden Anwendungsfall werden analysiert und eingeordnet. Dieser Schritt entspricht der Systemanalyse der Methodik in Abschnitt 3.1.6. Es werden drei unterschiedliche Anwendungsfälle untersucht. Zu Beginn wird die Gesamtsystemoptimierung für die Batterieauslegung einer Hochvoltbatterie für ein EV der Kompaktklasse am Beispiel des BMW i3 durchgeführt. In diesem Anwendungsfall werden die Unterschiede in der Batterieauslegung beleuchtet, welche sich aus verschiedenen Nutzungsbedingungen des Fahrzeugs ergeben (Abschnitt 4.6.1, S.126ff).

Ein weiterer Unterabschnitt wird die Batterieauslegung für ein sportliches EV der Oberklasse mit großer Reichweite behandeln (Tesla Model S). Hier liegt eine größere Stückzahl zugrunde und die Auslegung wird in zwei verschiedenen Spannungsklassen der LV 123 (Werknorm MBN LV 123) (400 und 800 V-Klasse) durchgeführt. Zusätzlich kommen für die Auslegung drei verschiedene Zelltypen, unterschiedlicher Größe und Kapazität zum Einsatz (Abschnitt 4.6.2, S. 136ff).
Zuletzt wird die Batterieauslegung für ein weiteres Fahrzeug der Kompaktklasse durchgeführt. In diesem Fall handelt es sich um ein Fahrzeug nach dem Conversion Design (VW e-Golf). Ziel dieser letzten Untersuchung ist es eine geeignete Zellkapazität desselben Zellformats bei minimalen Kosten zu ermitteln (Abschnitt 4.6.3, S. 142ff).

4.6.1 Einfluss verschiedener Fahrzyklen auf die Optimierung

Die erste Gesamtsystemoptimierung nimmt die Batterieauslegung für ein Fahrzeug der Kompaktklasse, basierend auf dem BMW i3 ein. Ziel der Untersuchung ist, herauszustellen welchen Einfluss die Nutzungsbedingungen des Fahrzeugs auf die Auslegung der passenden Hochvoltbatterie besitzen. Die Fahrzeugdaten für die Zyklussimulation sind in Tabelle 4.13 in Abschnitt 4.3 aufgeführt. In demselben Abschnitt wurden bereits die Fahrzyklen charakterisiert, welche nun hier zum Einsatz kommen (NEDC, WLTC, CADC 130, CADC 150, PREMIUM).

Für die Untersuchung des Einflusses verschiedener Nutzungszyklen wird die folgende These aufgestellt, welche in den nächsten Unterabschnitten näher untersucht wird:

These 1: *Bei gleichen Anforderungen an die HV-Batterie, aber unterschiedlichen Nutzungsbedingungen, ergeben sich unterschiedliche optimale Batteriekonfigurationen.*

Bevor die These mit Hilfe der vorgestellten Optimierungsmethodik untersucht wird, werden zuerst die Originalbatterie des untersuchten Fahrzeugs vorgestellt und zu Vergleichszwecken eine überschlägige manuelle Auslegung auf Basis nomineller Zellkennwerte und der entsprechenden Anforderungen durchgeführt.

Die Originalbatterie des BMW i3

Der BMW i3 der ersten Generation[91], besitzt laut Hersteller eine Reichweite auf dem NEDC von 190 km. Um diese Reichweite zu erreichen, stehen 18,8 kWh nutzbarer Energieinhalt zur Verfügung. Den 125 kW des Elektromotors stehen 147 kW Maximalleistung der Batterie gegenüber. In der Batterie werden 60 Ah Zellen im BEV2[92] Format eingesetzt (vgl. Total Battery Consulting Inc., 2016). Insgesamt enthält der Batteriepack 96 Zellen in einer 96s1p Konfiguration. Die äußeren Abmessungen betragen 1585x890x175 mm (Koenig (A2Mac1.com), 2017). Unter Berücksichtigung der Aussparungen auf der Seite der BDU (Abbildung 4.47, links unten) stehen damit ungefähr 238 l Bauraumvolumen zur Verfügung.

[91] Alle hier aufgeführten Daten über den BMW i3 stammen, soweit nicht anders angegeben, aus den Quellen (Schoewel und Hockgeiger, 2014; BMW AG).
[92] Das BEV2 Format gemäß Vornorm DIN SPEC 91252. Die wichtigsten Zelldaten befinden sich in Tabelle 6.13 auf Seite 179.

Auf dieser Basis wird eine volumetrische Energiedichte von 92 Wh/l[93] erreicht. In Abbildung 4.47 ist der mechanische Aufbau der Originalbatterie zu sehen. Die Module bestehen jeweils aus 12s1p Zellen, welche in zwei 6er Reihen nebeneinander angeordnet sind. Des Weiteren besitzt der BMW i3 eine aktive Flüssigkeitskühlung, welche direkt mit dem Klimasystem des Fahrzeugs verbunden ist. Die Batterie besitzt eine Nominalspannung von 360 V. Es wird ein SoC-Swing von 85 % verwendet[94].

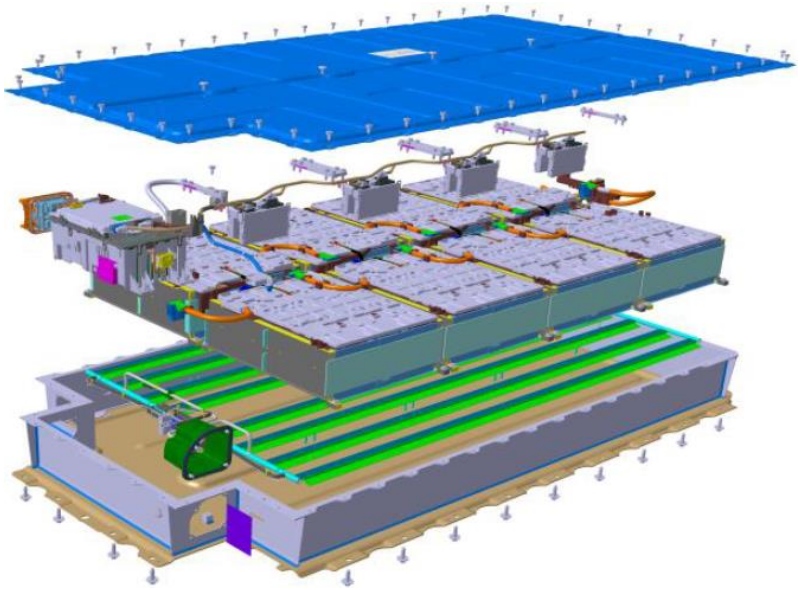


Abbildung 4.47: Die Batterie des BMW i3 der ersten Generation aus (Schoewel und Hockgeiger, 2014).

4.6.1.1 Optimierte Batterieauslegung für den BMW i3 auf Basis des nutzbaren Energieinhalts

Für die Durchführung der Batterieauslegung werden zunächst die Anforderungen von Seiten des Fahrzeugherstellers festgehalten. Dem folgt eine erste überschlägige Auslegung auf Basis der nominellen Kenngrößen der gewählten Batteriezelle (60 Ah BEV2, siehe Tabelle 6.13). Zuletzt wird die Auslegung über die vorgestellte Optimierungsmethodik vorgenommen. Die Ergebnisse werden untereinander und mit der Originalbatterie verglichen. Dabei wird überprüft, ob die oben angegebene These zutrifft.

[93] Basierend auf einem nominellen Energieinhalt von 22 kWh (Schoewel und Hockgeiger, 2014).
[94] Nach (Schoewel und Hockgeiger, 2014) ist der nominelle Energieinhalt 22 kWh. Zusammen mit der Angabe von 18,8 kWh nutzbarem Energieinhalt ergibt sich ein SoC-Swing von ca. 85 %.

Anforderungen:

- Nutzbarer Energieinhalt E_{Anf}: 18,8 kWh,
- Maximale Leistungsfähigkeit P_{Anf}: 147 kW,
- Verfügbarer Bauraum: 1585x890x175 mm[95],
- Spannungsgrenzen: 200 – 470 V,
- Fahrzeugklasse: Kompaktfahrzeug (BMW i3),
- Nutzungsbedingungen (verschieden): NEDC, WLTC, CADC 130/150, PREMIUM,
- Auftragsvolumen n_{Bat}: 20 000 Einheiten[96].

Randbedingungen des Batterieherstellers:

- Batteriezelle: 60 Ah BEV2, 173x45x125 mm, $50 (Basispreis),
- SoC-Swing: ≥ 80 %,
- Anzahl Zellen pro Modul: 5 – 20,
- Höhe des Moduldeckels mit integrierter CSC: 15 mm,
- Dicke der Modulendplatten jeweils: 15 mm.

Erste Abschätzung zur Batteriekonfiguration auf Basis nomineller Größen

Auf Basis der aufgeführten Anforderungen und Randbedingungen kann bereits eine erste Einschätzung zu der Batterieauslegung vorgenommen werden[97]. Die gegebenen Spannungsgrenzen ergeben einen Spielraum bei den seriellen Zellen von 80-113. Um den nutzbaren Energieinhalt zu erreichen, sind mindestens 84 Zellen notwendig (bei Ausnutzung des gesamten nominellen Energieinhalts). Die Betrachtung der geforderten elektrischen Leistung hebt die untere Grenze für die seriellen Zellen, ohne dass eine Parallelverschaltung notwendig wäre, auf 96 Zellen an. Ein geeigneter SoC-Swing lässt sich über eine Parametervariation zu 87 % bestimmen (siehe Abbildung 4.48).

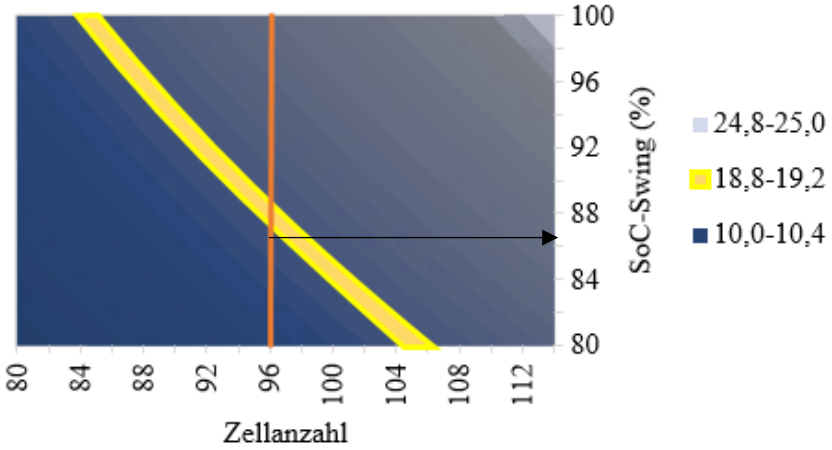


Abbildung 4.48: Auswahl eines geeigneten SoC-Swings auf Basis der nominellen Batteriezellgrößen.

Die ermittelte Batteriekonfiguration mit 96s1p besitzt somit einen nominellen Energieinhalt von 21,6 kWh. Für 2016 kann man einen Preis auf Packebene von $300 /kWh annehmen

[95] Der Basisrahmen hierzu wurde in (Frank und Pan, 2017) vorgestellt. Die Daten finden sich ebenfalls im Anhang in Tabelle 6.3 wieder.
[96] Gemessen an den Fahrzeugverkäufen in 2016 gemäß (Pontes, 2017).
[97] Alle im Folgenden ermittelten Größen finden sich zusammenfassend in Tabelle 4.24.

(siehe Abbildung 4.15, S. 73). Das führt zu einem überschlägigen Preis von $6500 pro Batteriepack. Bei der mechanischen Integration sind Module mit 6, 8, 12, und 16 Zellen möglich. Eine erste Betrachtung des verfügbaren Bauraums kann bereits in diesem Stadium durchgeführt werden. In Abbildung 4.49 ist zu sehen, dass genug Platz für die Zellen und zusätzlich die BDU, die BCU, sowie Befestigungen, Verkabelung etc. vorhanden ist. Eine bestgeeignete Modulgröße kann auf dieser Basis nicht festgelegt werden.

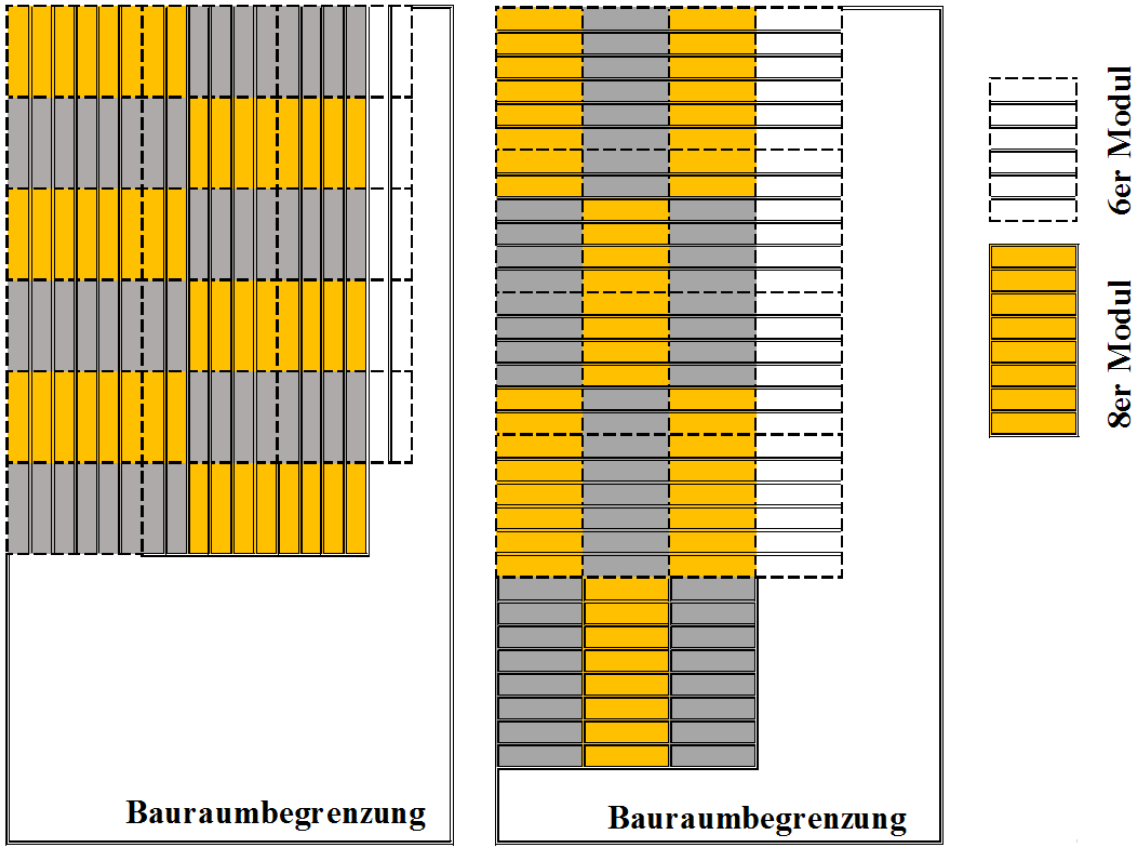


Abbildung 4.49: Einfache Betrachtung möglicher Modulgrößen und Anordnungsmöglichkeiten im Bauraum.

Eine Abschätzung bezüglich des resultierenden Gesamtvolumens kann auf Basis von Integrationsfaktoren durchgeführt werden. Diese beschreiben, um wie viel größer das Batteriepackvolumen in Bezug auf das Volumen der verwendeten Zellen ist. Als Basis dienen alle im Rahmen dieser Arbeit ermittelten paretooptimalen Batteriekonfigurationen. Für EV ergeben sich Integrationsfaktoren zwischen 1,45 und 2,31. Wie bereits in Abschnitt 4.4.2 festgestellt handelt es sich hier eher um untere Schranken für das Batterievolumen. Die Originalbatterie des BMW i3 besitzt einen Integrationsfaktor von ca. 2,6. Zusätzliche Integrationsfaktoren lassen sich ebenfalls aus (Sauer, 2017; General Motors Co. 09.12.2011; spinningmagnets [Nickname], 2017; Fahlbusch, 2014; Kustosch, 2016) ableiten. Dort liegen die Faktoren zwischen 1,36 und 3,55. Auf expliziten Batteriepacks beruhen hierbei die Angaben aus (Sauer, 2017; General Motors Co. 09.12.2011; spinningmagnets [Nickname], 2017), bei welchen die Integrationsfaktoren zwischen 1,9 und 3,55 liegen. Für das hier betrachtete Beispiel und auf Basis der Integrationsfaktoren aus den eigenen Untersuchungen, ergeben sich damit zwischen 154 und 183 l Batteriepackvolumen[98].

[98] 96 PHEV2 Zellen besitzen ein Volumen von 93,42 l.

Auslegung über die Optimierungsmethode

In diesem Abschnitt wird die Auslegung der Batterie mit Hilfe der vorgestellten Optimierungsmethode durchgeführt. Die Ziele des Optimierungsalgorithmus und die dazugehörigen Nebenbedingungen sind im Folgenden aufgeführt.

$$\min \begin{cases} \dot{v}_{Fl} \\ K_{tot} \\ K_{kWh} \\ V_{Bat} \\ n_{Zellen} \end{cases}$$

$$unter\ den\ Nebenbedingungen:$$

$$SoC_{Swing} \geq 80\ \%, \qquad \textbf{4.31}$$

$$T_{Zelle,Max} \leq 50\ °C,$$

$$E_{Sim} \geq 18{,}8\ kWh,$$

$$P_{Max} \geq 147\ kW.$$

Für jeden der Nutzungszyklen wird eine eigene Optimierung durchgeführt, aus deren paretooptimalen Batteriekonfigurationen die Best Designs mit Hilfe der Bewertungsmethode (Abschnitt 4.5.2) ausgewählt werden. Die Ergebnisse dieser Auswahl befinden sich in Tabelle 4.24[99]. Im Gegensatz zu der oben durchgeführten überschlägigen Auslegung des Batteriepacks wurden nun die Simulationsmodelle verwendet. Dadurch ist eine präzisere Abschätzung des elektrischen und thermischen Verhaltens, der mechanischen Integration und der Produktionskosten möglich.

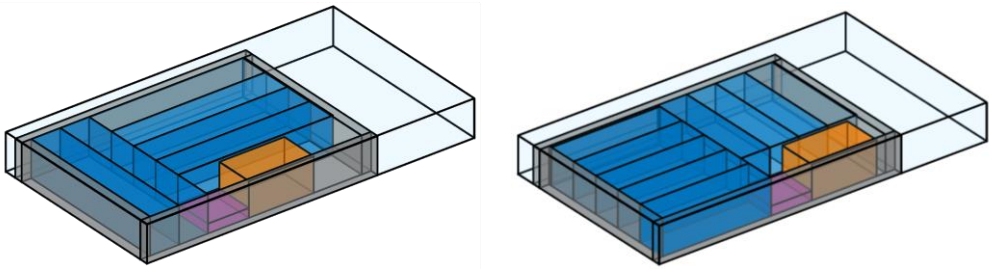
Die Optimierungsmethodik ermittelt für alle Nutzungsbedingungen dieselbe Zellkonfiguration, wie in der überschlägigen Auslegung, welche ebenfalls der Originalkonfiguration entspricht. Die einzige Ausnahme bildet die Batteriekonfiguration für den CADC 150 mit drei Zellen mehr (99s1p). Die SoC-Swings liegen ebenfalls in ähnlichen Bereichen (zwischen 84 und 87 %). Alle weiteren Eigenschaften sind für NEDC, WLTC, CADC 130 und PREMIUM Best Designs identisch. Sie werden daher im Folgenden als „Gleichdesigns“ bezeichnet. Die Gleichdesigns besitzen eine Modulkonfiguration von 16s1p, während für den CADC 150 eine 11s1p Konfiguration gewählt wurde und das Originaldesign eine 12s1p Modulkonfiguration besitzt. Wie bereits oben beschrieben, werden im Original die Zellen in den Modulen in zwei Reihen nebeneinander angeordnet, während der PA die Zellen hintereinander in den Modulen anordnet. Unter den betrachteten Randbedingungen benötigt keine Batteriekonfiguration aus der Optimierungsmethodik ein thermisches System. Des Weiteren sind die Volumina für diese Konfigurationen deutlich kleiner, als im Original. Die Preisdichten der Best Designs liegen bei ca. $270 /kWh und damit unter dem oben verwendeten mittleren Wert von $300 /kWh. Für die Originalbatterie sind keine Kostendaten bekannt. Während sich der nominelle Energieinhalt über alle Batteriekonfigurationen wenig unterscheidet, gibt es deutliche Unterschiede bei der volumetrischen Energiedichte. Bei den Gleichdesigns wird hier ein Wert von 133 Wh/l erreicht, im Original sind es 92 Wh/l. Die Batteriekonfiguration für den CADC 150 kann sogar eine volumetrische Energiedichte von 137 Wh/l erreichen. Der

[99] Die Parameterbereiche der Paretofronten und die daraus ausgewählten Best Designs befinden sich im Anhang in Abbildung 6.14 und Abbildung 6.15.

Grund hierfür liegt in einer effizienteren Anordnung der Module im Batteriepack mit wenig Totvolumen (siehe Abbildung 4.50).

Tabelle 4.24: Ergebnisse und Vergleich der Best Designs der Optimierung des Batteriepacks für den BMW i3 auf Basis des nutzbaren Energieinhalts

	Manuell	**NEDC**	**WLTC**	**CADC 130**	**CADC 150**	**PREMIUM**	**Original**
Packkonfiguration	96s1p	96s1p	96s1p	96s1p	99s1p	96s1p	96s1p
SoC-Swinglage (SoC_{Min}) (%)	87 (k. A.)	86 (13)	87 (10)	87 (11)	84 (15)	86 (14)	85(k. A.)
Thermisches System	k. A.	-	-	-	-	-	Ja
Modulkonfiguration	6s,8s,12s, 16s -1p	16s1p	16s1p	16s1p	11s1p	16s1p	12s1p
V_{Bat} (l)	154-183	160	160	160	161	160	238
K_{tot} ($)	6480	5716	5716	5716	5952	5716	k. A.
K_{kWh} ($/kWh)	300	268	268	268	271	268	k. A.
$K_{tot,kWh}$ 100k ($ ($/kWh))	-	3906 (183)	3906 (183)	3906 (183)	4068 (185)	3906 (183)	k. A.
E_{nom} (kWh)	21,6	21,34	21,34	21,34	22	21,34	22
w (Wh/l)	118-140	133	133	133	137	133	92



(a) (b)

Abbildung 4.50: Mechanische Integration der Batterie für die Gleichdesigns (NEDC, WLTC, CADC 130 und PREMIUM) (a) und für den CADC 150 (b) mit abgebildeter Bauraumbegrenzung.

Die Unterschiede zum Originalbatteriepack sollen im Folgenden kurz beleuchtet werden. Die Modulkonfiguration der Gleichdesigns mit 16 Zellen in Serie besitzt eine Maximalspannung von 66,4 V und liegt damit über der in der ISO 6469-3 beschriebenen Grenze für den Low Voltage Bereich von 60 V. Diese Begrenzung wurde bewusst nicht in die Auslegung einbezogen (siehe Abschnitt 4.3.1). Der Vergleich der Volumina zeigt ebenfalls einen großen Unterschied zwischen den Batteriekonfigurationen aus der Optimierung und dem Originalbatteriepack. Im Original sind die CSCs außerhalb der Module zwischen den Modulen

angeordnet. Zusätzlich besitzt die Originalbatterie ein thermisches System und größere Zwischenräume zwischen den Modulen. Ferner ergibt die Zellanordnung hintereinander weniger Platzbedarf für die Modulendplatten.

Zwischenfazit aus der Auslegung über die Optimierungsmethode

Die Optimierungsmethodik kommt für die meisten Nutzungsbedingungen auf dieselbe Batteriekonfiguration, wie die manuelle Auslegung über die nominellen Kenngrößen. Dennoch ist zu beachten, dass die überschlägige manuelle Auslegung weder die Optimierungsziele, noch die KPIs betrachtet hat. Es stellt keinen Zufall dar, dass sich die Batteriekonfigurationen wenig unterscheiden, da die Anforderungen für nutzbaren Energieinhalt und Leistung von dem Originalpack abgeleitet wurden und nicht von der Fahrzeugebene. Letztlich obliegt es dem Fahrzeughersteller, die übliche Nutzung für sein Fahrzeug abzuschätzen und damit den Kundennutzen in Form einer Reichweite bei ebendieser Nutzung zu definieren. Die erzielten Reichweiten mit den Best Designs aus der obigen Optimierungsmethodik unterscheiden sich deutlich, wie Abbildung 4.51 entnommen werden kann. Im Vergleich zu den Angaben zum Originalbatteriepack (190 km) wird hier, trotz einer sehr ähnlichen Batteriekonfiguration nur eine Reichweite von 154 km auf dem NEDC erreicht. Bezogen auf den kombinierten NEDC Verbrauch nach Herstellerangaben von 12,9 kWh/100km kommt man rechnerisch auf 145 km Reichweite mit dem Originalbatteriepack. Der verbleibende Reichweitenunterschied ergibt sich aus einem etwas geringeren Verbrauch in der Simulation und zusätzlich dem geringfügig größeren Energieinhalt (18,96 kWh) und der abweichenden SoC-Swinglage.

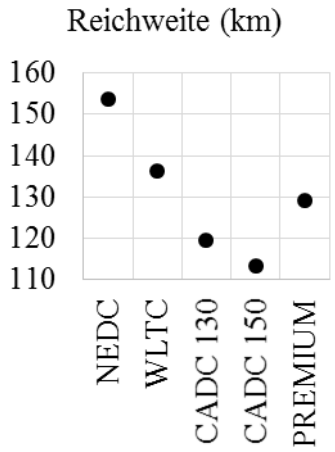


Abbildung 4.51: Reichweite mit den Best Design Batterien für den BMW i3 auf dem jeweiligen Nutzungszyklus bei Optimierung auf Basis des nutzbaren Energieinhalts.

Bereits auf dem WLTC sind 17 km weniger Reichweite möglich. Unter den Nutzungsbedingungen des CADC 130 können nur noch 120 km mit der vollen Batterie gefahren werden. Auf dem CADC 150 sind es noch weniger.
Der CADC 150 zeigt hier deutlich, welchen Einfluss das Auftreten des Autobahnanteils und dessen Lage besitzen kann. Bei der Forderung von 18,8 kWh muss man mit geringem Batterieladezustand den zweiten Autobahnanteil überstehen. An dessen Ende wurden bereits 92,6 % der gewünschten nutzbaren Energie verbraucht (Abbildung 4.52). Dementsprechend

gering ist der Ladezustand der Batterie zu diesem Zeitpunkt. Dennoch müssen in dem darauffolgenden Abschnitt noch bis zu 55 kW zur Verfügung gestellt werden.

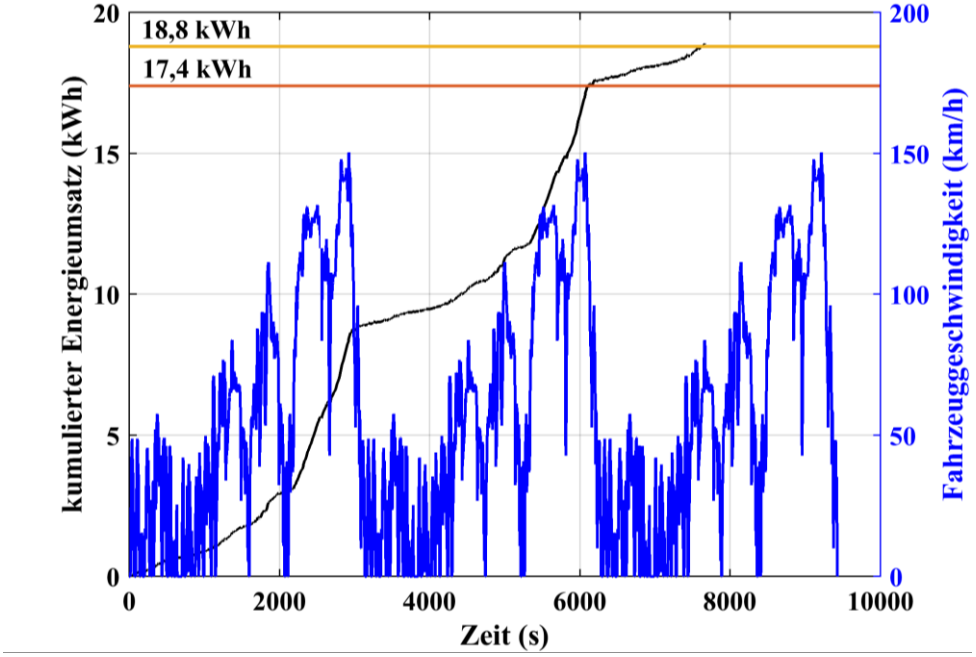


Abbildung 4.52: Energieverbrauch auf dem CADC 150 mit dem BMW i3, mit geforderter nutzbarer Energiemenge und der notwendigen Energiemenge, um den zweiten Autobahnanteil zu durchfahren.

Die Zyklusdauer, beziehungsweise die Strecke, welche ein Durchlauf des CADC 150 repräsentiert ist in diesem Fall eher ungeeignet, da das Fahrzeug eine derart geringe Reichweite aufweist. In diesem Fall betrug der Autobahnanteil, der mit dem EV gefahren werden soll 27 % der gesamten Fahrtstrecke. Rechnet man den Überlandteil mit Geschwindigkeiten von deutlich über 50 km/h ein befindet sich das Fahrzeug zu 60 % außerhalb des Stadtbetriebs. Bei einem Fahrzeug mit einer Reichweite von unter 150 km muss entschieden werden, ob dies ein repräsentatives Nutzerverhalten ist. Die Wichtigkeit einer geeigneten Auswahl des Zyklus entsprechend den Fahrzeuganforderungen wird dadurch erneut erkennbar. Hier wäre ein deutlich kürzerer Zyklus mit geringeren Anteilen an der Überland- und Autobahnfahrt besser geeignet, welcher beispielsweise durch den PREMIUM Zyklus dargestellt wird.

Es kann festgehalten werden, dass die verschiedenen Nutzungsbedingungen tatsächlich einen Einfluss auf die Auslegung der HV-Batterie besitzen. Die Unterschiede sind allerdings gering, solange eine feste nutzbare Energiemenge gefordert wird. Daher kann die These nicht vollständig bestätigt werden. Die sich daraus ergebende weiterführende Frage ist, wie groß die Unterschiede in der Batterieauslegung sind, wenn eine Mindestreichweite gefordert wird, anstatt einer Energiemenge. Dieser Frage wird im nächsten Abschnitt mit demselben Fahrzeug nachgegangen.

4.6.1.2 Optimierte Batterieauslegung für die BMW i3 Batterie auf Basis einer geforderten Reichweite

Nachdem im vorangegangenen Abschnitt festgestellt wurde, dass unterschiedliche Nutzungsbedingungen einen geringen Einfluss auf die Auslegung der HV-Batterie besitzen, so-

lange der nutzbare Energieinhalt als Anforderung dient, soll in diesem Abschnitt eine Mindestreichweite auf allen Nutzungszyklen gefordert werden. Dabei wird erneut der These nachgegangen, dass unterschiedliche Nutzungsbedingungen eines EV eine unterschiedliche optimale Batteriekonfiguration benötigen. Die Optimierungsziele und Anforderungen an die Batterie bleiben, verglichen mit dem vorangegangenen Abschnitt, gleich. Nun wird eine Mindestreichweite von 150 km auf allen Zyklen gefordert. Diese Anforderung findet sich ebenfalls in der Optimierungsvorschrift für den EA600 wieder:

$$\min \begin{cases} \dot{v}_{Fl} \\ K_{tot} \\ V_{Bat} \\ n_{Zellen} \\ S \end{cases}$$

$$unter\ den\ Nebenbedingungen:$$

$$SoC_{Swing} \geq 80\ \%, \qquad \textbf{4.32}$$

$$T_{Zelle;Max} \leq 50\ °C,$$

$$S \geq 150\ km,$$

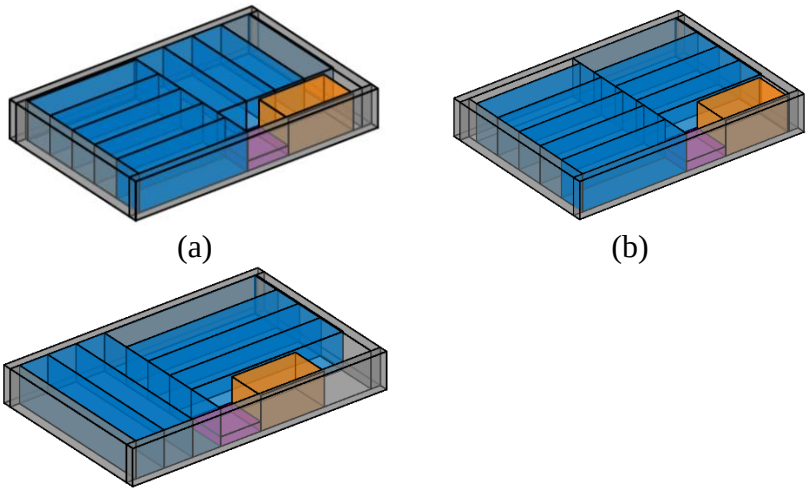
$$P_{Max} \geq 147\ kW.$$

Es bleibt dem Optimierungsalgorithmus überlassen eine geeignete Energiemenge für diese Anforderungen zu bestimmen. Die so ermittelten Best Designs für jeden Zyklus sind in Tabelle 4.25 aufgelistet. Die Designs für die beiden CADC Zyklen sind ausgegraut, da kein gültiges Best Design mit einer Reichweite von 150 km bestimmt werden konnte, ohne eine andere Randbedingung zu verletzen. Es wurde daher die maximale Anzahl von Zellen in dem Bauraum platziert (siehe Abbildung 4.53 (c)).

Tabelle 4.25: Ergebnisse und Vergleich der Best Designs der Optimierung des Batteriepacks für den BMW i3 auf Basis einer Mindestreichweite

	NEDC	**WLTC**	**CADC 130**	**CADC 150**	**PREMIUM**
Packkonfiguration	96s1p	99s1p	112s1p	112s1p	99s1p
SoC-Swinglage (SoC_{Min}) (%)	85 (8)	95 (4)	99 (1)	99 (1)	98 (2)
Thermisches System	-	-	-	-	-
Modulkonfiguration	16s1p	11s1p	16s1p	16s1p	11s1p
V_{Bat} (l)	160	161	180	180	163
K_{tot} ($)	5716	5952	6571	6571	5941
K_{kWh} ($/kWh)	268	271	264	264	270
$K_{tot,kWh}$ 100k ($ ($/kWh))	3906 (183)	4068 (185)			4078 (185)
E_{nom} (kWh)	21,34	22	24,89	24,89	22
w (Wh/l)	133	137	138	138	135
S (km)	152	154	149	146	150

Die Konfiguration für den NEDC bleibt gleich, kommt aber mit einem geringeren SoC-Swing aus, da die geforderte Reichweite geringer ist, als die erreichte Reichweite bei der vorangegangenen Optimierung. Dementsprechend bleibt die mechanische Integration gemäß Abbildung 4.50 (a) für den NEDC erhalten. Die Darstellungen der anderen Batteriepacks befinden sich in Abbildung 4.53. Für WLTC und PREMIUM Zyklus wurde ein Best Design mit 99s1p Konfiguration ermittelt. Bei beiden Konfigurationen kommen Module mit 11 Zellen in Serie zum Einsatz. Der Batteriepreis bleibt unter $6000, mit einem energetischen Preis von $270 /kWh. Die maximale mittlere Zelltemperatur liegt bei 33 °C, weshalb kein thermisches System für die Batteriekühlung benötigt wird. Obwohl beide Batteriepacks dieselbe elektrische Konfiguration und Modulgröße besitzen, erreichen sie unterschiedliche Volumina und damit Energiedichten. Der Grund hierfür liegt in dem stochastischen Optimierungsalgorithmus bedingt. Dieser ist auf eine zufällige Mutation bei den Positionierungsflags des PA angewiesen, um die beste Packungsdichte der Modulanordnung zu erreichen. Im Fall der PREMIUM Optimierung wurde diese Kombination von Flags nicht gefunden. Die Wahl der hohen SoC-Swings wurde bereits mit der Korrelation der KPI Parameter bei der Auswahl der Best Designs begründet (Abschnitt 4.5.2). Mit der 99s1p Konfiguration aus WLTC und PREMIUM ist in beiden Nutzerszenarien eine Reichweite von 150 km möglich. Obwohl auf dem WLTC deutlich höhere Geschwindigkeiten gefahren werden, können dort sogar 154 km Reichweite erreicht werden. Dafür waren lediglich 3 Zellen mehr notwendig, als in der Originalkonfiguration bzw. der NEDC Konfiguration. Preislich unterscheiden sich diese Varianten dennoch deutlich (um min. $225). Jede Zelle kostet eigentlich nur $42,5 (inklusive Lernrate). Beinahe $98 kommen also aufgrund der größeren Menge von Zellelektronik (6 CSCs NEDC, 9 CSCs PREMIUM/WLTC), Modulverbindern und wegen des größeren Batterierahmens hinzu. Eine Erhöhung der Produktionsmenge auf 100 000 Batteriepacks pro Jahr ($K_{tot}100k$) führt dazu, dass die Batteriepreise um mehr als 30 % fallen.



(a) (b) (c)

Abbildung 4.53: Mechanische Integration der Best Designs für den WLTC (a), den PREMIUM Zyklus (b) und mit maximal möglicher Zellmenge (CADC 130/150) (c).

4.6.1.3 Fazit zur Gesamtoptimierung auf Basis verschiedener Fahrzyklen

Die zu Beginn dieses Abschnitts aufgestellte These 1 konnte bestätigt werden. Die Kenntnis des Nutzerverhaltens ist essentiell, um eine geeignete Batterie für das Fahrzeug auszulegen. Der OEM muss daher seine/n Standardnutzer/in sehr gut kennen. Für den/die Käufer/in eines

EVs ist bei der Reichweitenangabe wünschenswert die eigene Fahrweise entsprechend einordnen zu können. Für den/die Batterieausleger/in ist die Kenntnis der Nutzungsbedingungen ebenfalls notwendig, um die Anforderungen des/der Kunden/in zu treffen.
Ein sehr gutes Beispiel stellt der PREMIUM Zyklus dar. Für diesen konnte ein Best Design ermittelt werden, welches die Anforderungen exakt erfüllt. Der Zyklus entspricht genau dem Nutzerverhalten bei Fahrten mit dem untersuchten Fahrzeug und führt zu einer abweichenden Konfiguration von der Originalkonfiguration. Zusätzlich ist der Zyklus kurz genug, um bei der geringen geforderten Reichweite repräsentativ zu sein. Die damit dargestellte übliche Fahrt mit einer Streckenlänge von 4,6 km kann mit einer Batterieladung hier 32 Mal absolviert werden. Trotz der größeren Anzahl von Zellen passt die Batterie in den vorgegebenen Bauraum und weicht dabei lediglich um einen Liter von dem vergleichbaren Volumen der NEDC Konfiguration ab. Die vorgestellte Auslegungsmethodik ist hierbei in der Lage alle gestellten Anforderungen zu berücksichtigen und zu erfüllen. Dabei war es hilfreich den nutzbaren Energieinhalt nicht im Vorhinein einzuschränken, sondern eine geforderte Reichweite bei bekannten Nutzungsbedingungen vorzugeben. Die Auslegung für den PREMIUM Zyklus unterstreicht in diesem Zusammenhang die bestätigte These zusätzlich.

Im folgenden Abschnitt wird nun der Frage nachgegangen, ob sich eine 400 oder eine 800 V Spannungslage und ein großes prismatisches Zellformat am besten für ein sportliches Oberklassefahrzeug eignen.

4.6.2 Optimierung mit unterschiedlichen Batteriezellen und Spannungslagen

Die Optimierungen in diesem Abschnitt werden mit unterschiedlichen Batteriezellen und für verschiedene Batteriespannungslagen durchgeführt. Dabei soll der Fragestellung nachgegangen werden, welche Batteriespannungslage sich unter dem gegebenen Satz von KPIs am besten für die Anwendung in einem sportlichen Oberklassefahrzeug mit großer Reichweite eignet. Betrachtet werden zwei unterschiedliche Spannungslagen welche als 400 V Spannungslage (200-470 V) und 800 V Spannungslage (520-870 V) bezeichnet werden. Dadurch, dass zusätzlich für die Auslegung verschiedene Batteriezellen zum Einsatz kommen, wird im Laufe der Untersuchung zwei Thesen nachgegangen:

These 2: *Die 800 V Spannungslage ist für sportliche Oberklassefahrzeuge bei dynamischer Beanspruchung am besten geeignet.*

These 3: *Großformatige Zellen mit hohem Energieinhalt eignen sich für Batterien mit hohem Energieinhalt am besten und erreichen die besten Werte für die KPIs.*

Vor der Durchführung der Optimierungsmethodik, werden das Fahrzeug und die sich daraus ergebenen Anforderungen vorgestellt. Als Nutzungszyklus kommt hier der CADC 150 zum Einsatz. Zusätzliche Zyklen werden für die Untersuchung von These 3 herangezogen, um eine allgemeine Aussage hierzu zu treffen.

Sportliches Oberklassefahrzeug, Anforderungen und Batteriezellen

Als Basis für die hier durchgeführte Untersuchung wird der Tesla Model S mit 85 kWh Energieinhalt verwendet[100]. Dieser besitzt eine Reichweite zwischen 415 und 485 km (Silvestro, 2013; Könekamp, 2015). Letztere Angabe entspricht der offiziellen Reichweite auf dem NEDC (Könekamp, 2015), während die deutlich kleinere Reichweite von 415 km aus einer Berechnung des ADAC stammt (Silvestro, 2013). Hierfür lag ein Realverbrauch von durchschnittlichen 20,5 kWh/100km zugrunde. Die Herstellerangabe für den Verbrauch ist 17,7 kWh/100km. Für den Batterieentwurf wird als Reichweitenanforderung eine Strecke von 450 km gewählt. Der verfügbare Bauraum für die Auslegung wurde von den äußeren Abmessungen des Originalbatteriepacks übernommen. Die Maße betragen 2667x1549x200 mm (Koenig (A2Mac1.com), 2017). Das entspricht 826 l Volumen. Aus den Basisrahmen in (Frank und Pan, 2017) wird ein Rahmen unter strikten Crashbedingungen und aus Aluminium gewählt (siehe Tabelle 6.3 im Anhang), welcher auf denselben Maßen beruht. In den Modulen dürfen zwischen 5 und 20 Zellen enthalten sein. Der Moduldeckel und die Modulendplatten besitzen eine Dicke/Höhe von 15 mm.
Neben den bereits beschriebenen Spannungsgrenzen muss die Batterie eine Leistung von 294 kW bereitstellen, welche sich aus der mechanischen Leistung laut Hersteller von 270 kW und einem Gesamtwirkungsgrad von Elektromotor und Leistungselektronik von 92 % nach (Kasper und Schünemann, 2012) ergibt. Als Produktionsmenge wird eine Stückzahl von 50 000 Batterien pro Jahr festgelegt (vgl. IT-Times, 2017).

Anforderungen:

- Mindestreichweite S: 450 km,
- Maximale Leistungsfähigkeit P_{Anf}: 294 kW,
- Verfügbarer Bauraum: 2667x1549x200 mm,
- Spannungsgrenzen: 200 – 470 V und 520 – 870 V,
- Fahrzeugklasse: sportliches Oberklassefahrzeug (Tesla Model S),
- Nutzungsbedingungen (verschieden): CADC 150 (zusätzlich NEDC, WLTC, CADC 130 für allgemeine Aussagen),
- Auftragsvolumen n_{Bat}: 50 000 Einheiten.

Randbedingungen des Batterieherstellers:

- Batteriezellen[101]:
    - 28 Ah PHEV2, 148x26,5x91 mm, $20,6,
    - 40 Ah BEV1, 173x32x125 mm, $30 ,
    - 63 Ah BEV2, 173x45x125 mm, $50 (Basispreise).
- SoC-Swing: ≥ 80 %,
- Anzahl Zellen pro Modul: 5 – 20,
- Höhe des Moduldeckels mit integrierter CSC: 15 mm,
- Dicke der Modulendplatten jeweils: 15 mm.

Als Optimierungsalgorithmus kommt erneut der EA600, jeweils für die beiden Spannungsebenen und zusätzlich für jeden der oben angegebenen Zyklen, zum Einsatz. Neben der notwendigen Energiemenge, um die Reichweitenbedingung zu erreichen, kann der Optimierungsalgorithmus die Zelle selbst wählen. Über die EA interne Bewertung wird damit die

[100] Die Fahrzeugparameter für die Simulation befinden sich in Tabelle 4.13 in Abschnitt 4.3.3.
[101] Weitere Details zu den (elektrischen) Zellparametern befinden sich im Anhang in Abschnitt 6.12.

am besten geeignete Schar von Batteriekonfigurationen, unabhängig von der gewählten Batteriezelle, über die folgende Optimierungsvorschrift ermittelt:

$$\min \begin{cases} \dot{v}_{Fl} \\ K_{tot} \\ V_{Bat} \\ n_{Zellen} \\ S \end{cases}$$

$$unter\ den\ Nebenbedingungen:$$

$$SoC_{Swing} \geq 80\ \%, \qquad \textbf{4.33}$$

$$T_{Zelle,Max} \leq 50\ °C,$$

$$S \geq 450\ km,$$

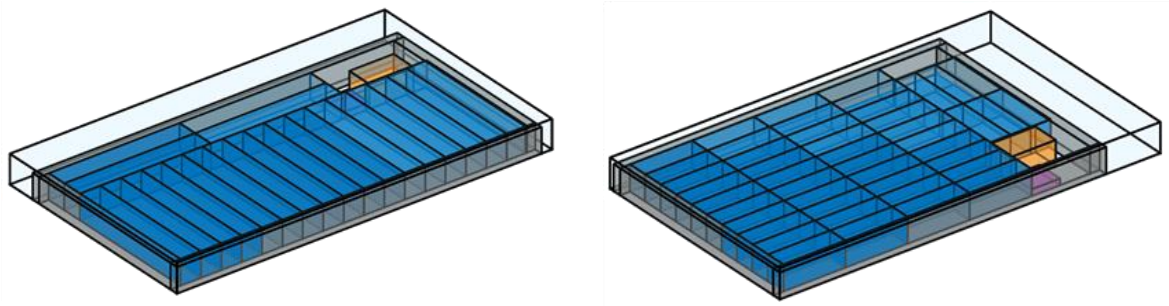
$$P_{Max} \geq 294\ kW.$$

Bewertung der Batteriekonfigurationen für verschiedene Spannungslagen

Mit Hilfe der KPIs erfolgt die Auswahl der jeweiligen Best Designs zu jeder Spannungsebene für den CADC 150. Die beiden Best Designs für 400 und 800 V Spannungslage befinden sich in Tabelle 4.26.

Tabelle 4.26: Ergebnisse und Vergleich der Best Designs der Optimierung des Batteriepacks für das sportliche Oberklassefahrzeug für die 400 und 800 V Spannungslage

	400 V	**800 V**
Packkonfiguration (Zellanzahl)	84s5p (420)	207s2p (414)
SoC-Swinglage (SoC_{Min}) (%)	93 (6)	99 (1)
Verwendete Zelle	63 Ah BEV2	63 Ah BEV2
Thermisches System	ja	-
Modulkonfiguration (Anzahl)	4s5p (21)	9s1p (46)
V_{Bat} (l)	599	600
K_{tot} ($)	19 266	19 198
K_{kWh} ($/kWh)	189	192
E_{nom} (kWh)	102	100
w (Wh/l)	170	167
S (km)	453	468



(a) (b)

Abbildung 4.54: Mechanische Anordnung der Batteriekomponenten der Best Designs für das sportliche Oberklassefahrzeug für die 400 V (a) und 800 V (b) Spannungslage.

Bei beiden Konfigurationen wurde die 63 Ah Zelle für das Best Design gewählt. Das Best Design für die 400 V Spannungslage benötigt 6 Batteriezellen mehr, als das Best Design der 800 V Spannungslage. Dafür wird beim 800 V Best Design ein größerer SoC-Swing verwendet. Beim 400 V Best Design kommt ein thermisches System zum Einsatz, während dies für das 800 V Best Design nicht der Fall ist. Die Maximaltemperatur auf dem CADC 150 bei dem 400 V Design liegt allerdings nur bei 28 °C, die Hinzunahme des thermischen Systems ist daher dem EA600 geschuldet, welcher entlang der paretooptimalen Designs keine Durchflussrate von 0 versucht hat[102].

Die Modulkonfigurationen unterscheiden sich stark. Bei dem 400 V Best Design kommen Module mit 20 Zellen zum Einsatz (nur 4 in Serie), im Batteriepack für 800 V wurden 9er Zellmodule als optimal ermittelt. Bei den 400 V Konfigurationen sind grundsätzlich weniger Module notwendig, weil die Anzahl paralleler Zellen höher ist und damit mehr Modulkonfigurationen möglich sind (siehe Abbildung 4.55).

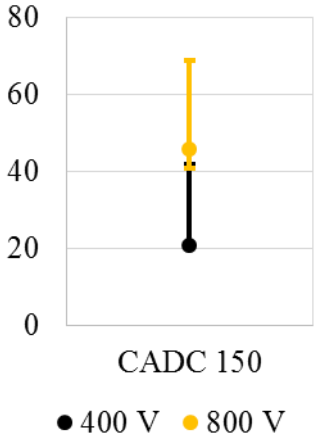


Abbildung 4.55: Modulanzahl der paretooptimalen Batteriekonfigurationen für 400 und 800 V Spannungslage mit auftretendem Wertebereich.

Trotz der unterschiedlichen Modulanzahl, kommen beide Best Designs auf nahezu dasselbe Volumen. Auch wenn sich die Modulanordnung und die äußere Form unterscheiden (Abbildung 4.54). Der 400 V Batteriepack ist schmaler und länger, als der 800 V Pack. Auch preislich gibt es keinen großen Unterschied zwischen den beiden Best Designs. Beide kosten ca. $19200. Die Preisdichte ist für den 400 V Pack etwas geringer, als für den 800 V Pack,

[102] Eine Einzelsimulation bei gleicher Konfiguration, ohne thermisches System ergibt eine mittlere Zelltemperatur von 38 °C. Die Konfiguration wäre also auch ohne thermisches System gültig.

obwohl der 800 V Pack günstiger ist. Der Grund hierfür ist der geringfügig größere nominelle Energieinhalt von 102 kWh beim 400 V Pack, gegenüber 100 kWh beim 800 V Pack. Bei der volumetrischen Energiedichte liegen beide Packs nahe beieinander (167 & 170 Wh/l). Aufgrund des größeren SoC-Swings sind mit der 800 V Variante 15 km mehr zu erreichen, als mit dem 400 V Batteriepack

Für die Betrachtung von These 2, wurde die Bewertungsmethodik für beide Spannungslagen kombiniert, um festzustellen, welches der beiden Best Designs auf derselben Bewertungsgrundlage besser abschneidet. Die resultierenden Bewertungsparameter sind in Abbildung 4.56 abgebildet.

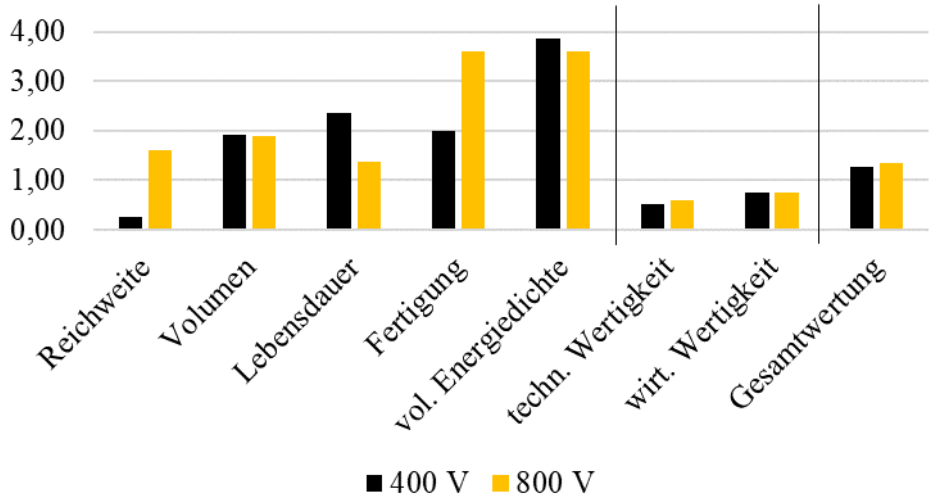


Abbildung 4.56: Vergleich der KPI Bewertungen und daraus resultierende technische Wertigkeit. Die wirtschaftliche Wertigkeit auf Basis des Batteriepreises und die Gesamtwertung für die 400 und 800 V Best Designs.

Der 800 V Batteriepack bekommt eine etwas bessere Gesamtbewertung, als der 400 V Pack. Damit wird These 2 auf Basis der Bewertungskriterien bestätigt. Das liegt vor allem an der besseren Bewertung bei der Fertigung, bei der für den 800 V Pack kein Kühlsystem verbaut werden muss. Allerdings könnte auch im 400 V Design, wie oben bereits beschrieben, die Kühlung entfernt werden. Ein einzelner Simulationsdurchlauf inklusive mechanischer Optimierung ergibt, dass die Gesamtbewertung weiterhin hinter der 800 V Bewertung bleibt[103]. In diesem Fall wird zwar die Fertigungsbewertung verbessert, jedoch auf Kosten der Lebensdauer.

Der Wertungsvergleich zeigt, dass die Gewichtung und die Auswahl der Bewertungskriterien starken Einfluss auf die Auswahl des besten Gesamtsystems besitzen. Diese Tatsache relativiert die Bestätigung der These etwas. Des Weiteren spielt bei der Betrachtung von 400 und 800 V Spannungslagen die Ladeperformance bei sehr hohen Leistungen (150 – 350 kW) eine wichtige Rolle. Hier sind die C-Raten, welchen die einzelnen Batteriezellen ausgesetzt sind, und die Batteriekühlung von zentraler Wichtigkeit. Die Bestätigung von These 2 ist somit kontextabhängig.

[103] Der KPI Vergleich und die Gesamtbewertung, sowie ein Bild des Batteriepacks für dieses veränderte Best Design befinden sich im Anhang in Abschnitt 6.11.

Bewertung der verschiedenen Zellformate bezüglich ihrer Eignung für Batteriepacks mit großem Energieinhalt

In diesem Abschnitt wird These 3 näher betrachtet. Hierfür kommen die paretooptimalen Designs, aller Nutzungszyklen zum Einsatz. Alle Batteriekonfigurationen werden der KPI Bewertung unterzogen, womit sich das folgende Bild (Abbildung 4.57) ergibt:

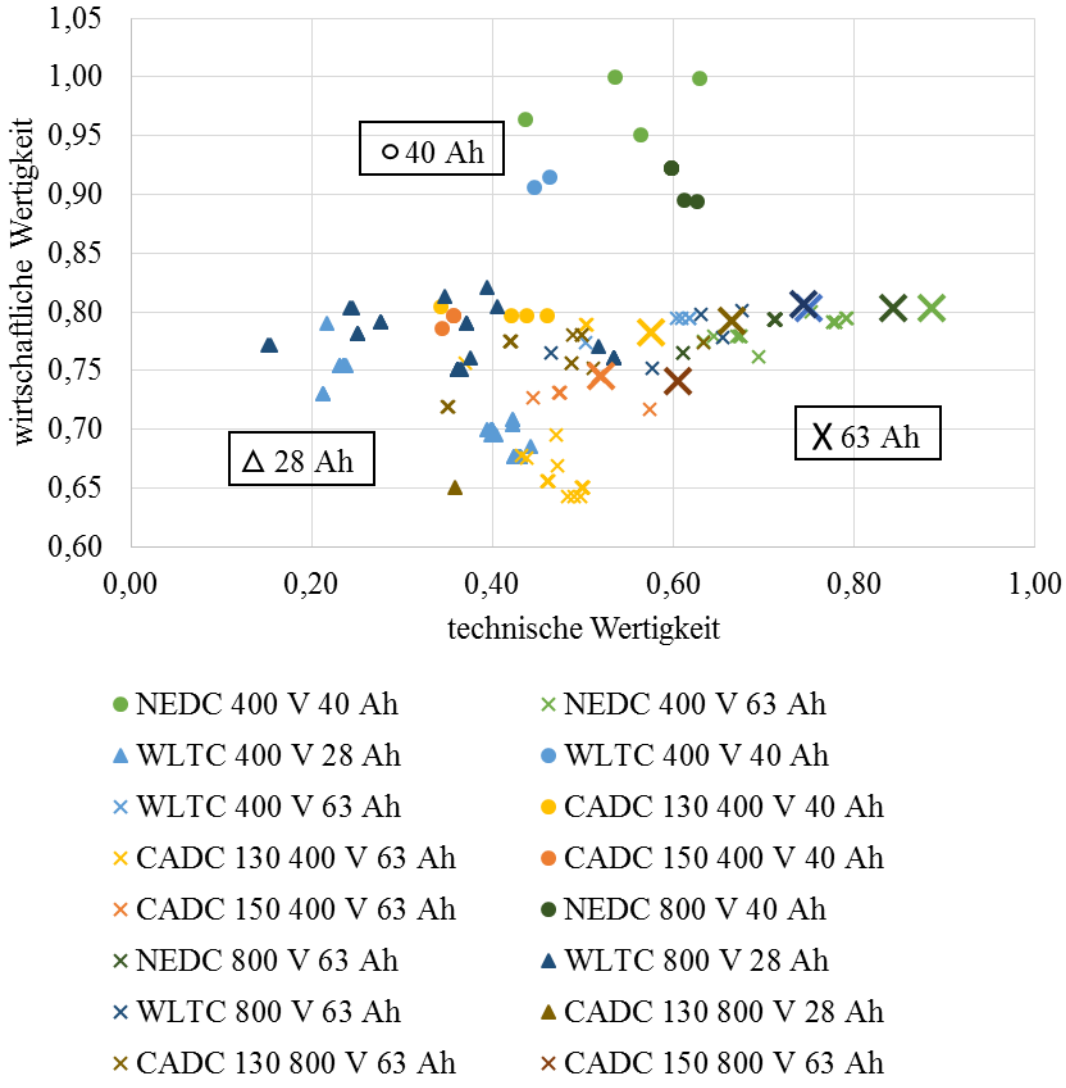


Abbildung 4.57: Wirtschaftliche und technische Wertigkeit aller paretooptimalen Designs auf 400 und 800 V Basis mit verschiedenen Batteriezellen. Batteriekonfigurationen mit der 28 Ah Zelle sind mit Dreiecken markiert, Konfigurationen mit der 40 Ah Zelle mit Kreisen und Designs mit der 63 Ah Zelle mit Kreuzen. Die jeweiligen Best Designs (alle 63 Ah) sind zusätzlich hervorgehoben.

Des Weiteren werden für jeden Zyklus anhand der Bewertungsmethode die jeweiligen Best Designs ausgewählt. Die These wird dahingehend zunächst bestätigt. In allen Optimierungen wird als Best Design eine Batteriekonfiguration mit der 63 Ah Zelle gewählt. Das Ergebnis ist besonders für die 28 Ah Zelle eindeutig, welche im Vergleich mit den Bewertungen der Batteriepacks mit den beiden anderen Zellen deutlich abgeschlagen ist. Die Ergebnisse für die 40 Ah und die 63 Ah Zelle liegen nah beieinander. Die 63 Ah Zelle erhält tendenziell die bessere technische Wertigkeit, während die 40 Ah Zelle auf Basis des Batteriepreises deutlich besser bewertet wird. Abbildung 4.58 zeigt explizit die Batteriepreise in Abhängigkeit

von der Zellanzahl. In dieser Darstellung sind die unterschiedlichen Zelltypen sehr gut voneinander zu trennen. Die Batteriepreise mit der 40 Ah Zelle sind teilweise $4000 geringer, als die vergleichbaren Batteriepreise mit 28 und 63 Ah Zelle. Aufgrund der gemeinsamen Bewertung von wirtschaftlichen und technischen Größen, werden dennoch die Batteriepacks mit den 63 Ah bevorzugt. Trotz Verifikation der These im hier aufgeführten Zusammenhang, wird die These gleichzeitig widerlegt, wenn die Kosten als wichtigstes Auswahlkriterium genutzt würden. Es kann daher nicht von einer allgemeingültigen These gesprochen werden, da die Bewertungsgrößen der Auswahlmethodik das Ergebnis stark beeinflussen. Bei einer Fokussierung auf die Kosten, eignet sich diejenige Batteriezelle am besten, welche das beste Verhältnis von Zellkosten zu mechanischer Integration bietet. Eine methodische Betrachtung, wie hier durch die vergleichenden Optimierungen geschehen, ist daher angebracht, um eine passende Systemauslegung festzulegen.

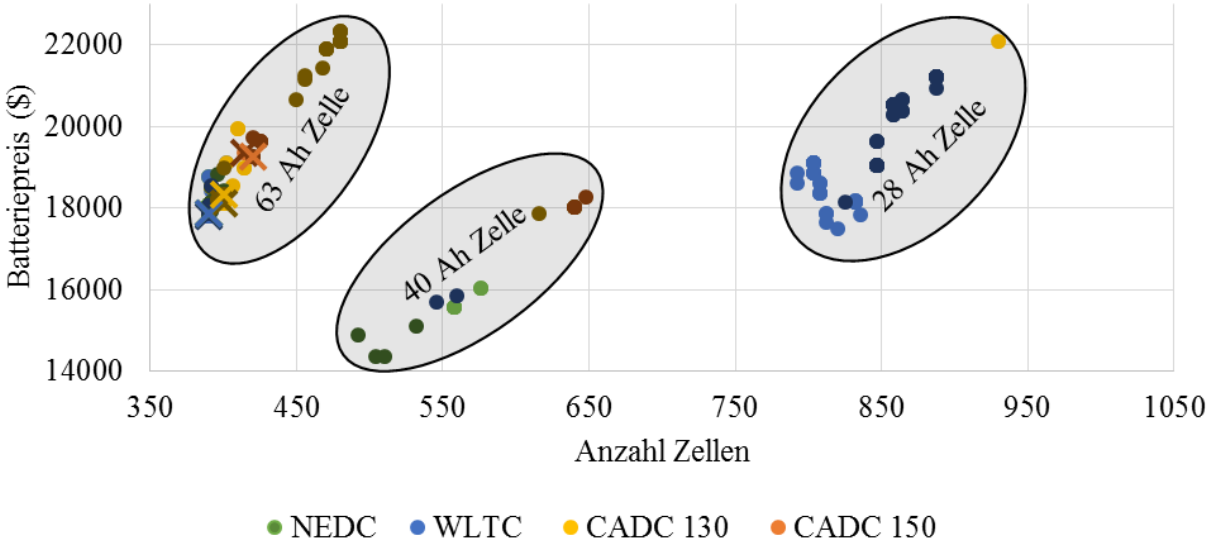


Abbildung 4.58: Batteriepreise über der Anzahl verwendeter Zellen. Die Farben geben den Zyklus wieder. Mit Kreuzen sind die Best Designs der jeweiligen Zyklen markiert.

Die hier untersuchte Fragestellung nach einer optimalen Spannungslage und der Eignung unterschiedlicher Batteriezellen hat gezeigt, dass ein breites Spektrum an Fragen und Thesen mit Hilfe der vorgestellten modellbasierten Auslegungsmethodik beleuchtet werden kann. Es wurde herausgestellt, dass die Auswahl des anwendungsfallspezifisch besten Batteriepacks von den dafür genutzten Bewertungsgrößen (KPIs) abhängt. Im folgenden Anwendungsfall wird daher das Auslegungsziel dahingehend verändert, als dass nun der Batteriepreis das wichtigste Auswahlkriterium bildet.

4.6.3 Variierung der Zellkapazität bei gleichbleibendem Zellformat

Mit Hilfe der modellbasierten Auslegungsmethodik soll in diesem Abschnitt der Fragestellung nachgegangen werden, ob es eine optimale Zellkapazität für einen gegebenen Bauraum bei gleichbleibendem Zellformat und minimalem Preis gibt. Auf Basis der vorangegangenen Untersuchung wird die folgende These als Untersuchungsgegenstand formuliert:

These 4: *Die Zelle mit der größten Kapazität erfüllt die Anforderungen mit weniger Zellen und kann dadurch mit geringeren Kosten und einem kleinen Volumen die beste Bewertung erzielen.*

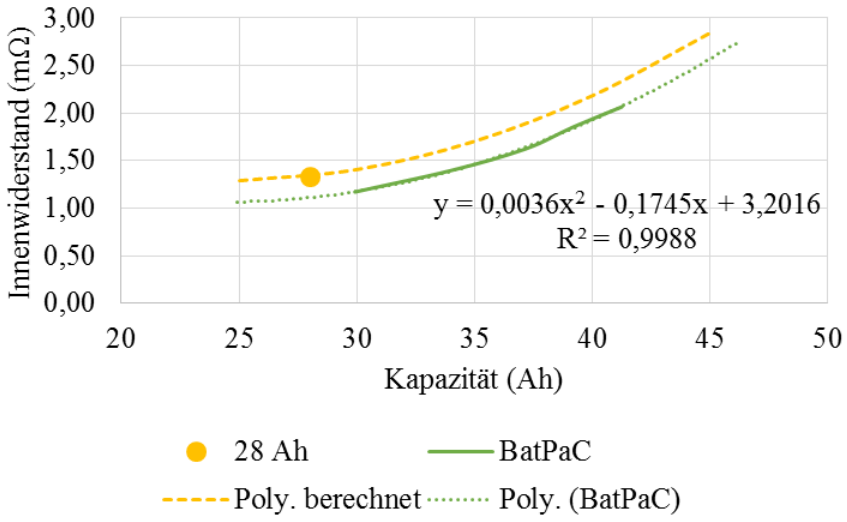
Conversion Design Kompaktfahrzeug, Randbedingungen, Anforderungen und Batteriezellen

Die Grundlage für die Untersuchung stellt ein Kompaktfahrzeug im Conversion Design dar. Das Fahrzeug orientiert sich dabei an dem VW e-Golf (2013)[104]. Die Originalbatterie des VW e-Golf dient hier zusätzlich als Basis und Vergleich[105]. Die e-Golf Batterie besitzt eine 88s3p Verschaltung von 25 Ah PHEV2 Zellen (400 V Spannungslage). Es kommen Module mit sechs und zwölf Zellen zum Einsatz und die Batterie besitzt kein aktives Kühlsystem (BioAge Group, 2014a). Da im Original PHEV2 Zellen eingesetzt werden, wird dasselbe Zellformat hier ebenfalls verwendet. Der Bauraum wurde bereits im Rahmen der Beschreibung des PA vorgestellt (Abbildung 4.36, Seite 107). Dadurch, dass für diesen Bauraum kein anpassbares Rahmenmodell vorhanden ist, wird der Rahmen hier nicht näher betrachtet. Der Rahmen kostet bei allen Auslegungen pauschal $365[106]. Aus diesem Grund kann kein resultierendes Volumen ermittelt werden, weshalb alle volumenbezogenen Größen in Relation zu dem entsprechenden Volumen aller Bauteile der Originalkonfiguration angegeben werden.
Der e-Golf besitzt eine motorische Leistung von 85 kW (Volkswagen AG, 2016), was, über den bereits im vorherigen Beispiel verwendeten Wirkungsgrad von 92 % nach (Kasper und Schünemann, 2012), zu einer elektrischen Leistung von 93 kW führt. Als NEDC Reichweite werden vom Hersteller 190 km angegeben (Volkswagen AG, 2016), wobei ebendort darauf verwiesen wird, dass im realen Gebrauch die Reichweite zwischen 130 und 190 km liegt. Der ADAC kommt in seinem Test auf eine reale Reichweite von 145 km (Giuliani, 2014). Die Reichweitenanforderung wird daher auf 150 km gesetzt, um die Batterieauslegung unter realen Fahrbedingungen vorzunehmen. Zusätzlich soll die Reichweite ebenfalls bei dynamischer Beanspruchung des Fahrzeugs gewährleistet sein, weshalb hier trotz der geringen geforderten Reichweite der CADC 150 als Auslegungszyklus gewählt wird.
Auf Basis von (Pontes, 2017) wird die jährliche Produktionsmenge von Batterien gemessen an den Fahrzeugverkäufen auf 10 000 angenommen.

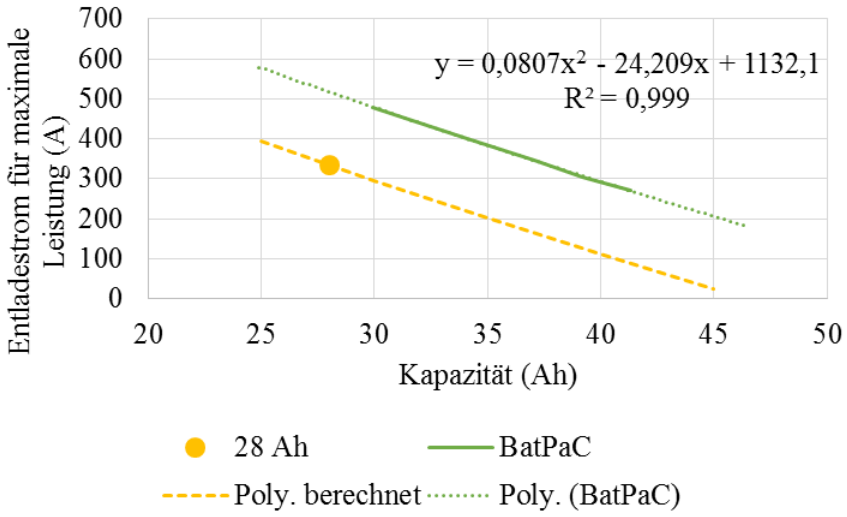
Um Zellen desselben Formats mit unterschiedlicher Kapazität abzubilden, müssen die wichtigsten elektrischen Größen (Innenwiderstand und maximaler Entladestrom) für die Simulation angepasst werden. Für die Ermittlung der elektrischen Größen wird das BatPaC Tool (Nelson et al., 2012) verwendet. Dort werden die Zellen bei gleichbleibendem Aktivmaterial (NMC333-G) entsprechend der gewünschten Kapazität (25, 30, 35, 40 Ah) ausgelegt. Dies geschieht durch Beibehaltung des Seitenverhältnisses und Veränderung der Aktivmaterialdicke. Dadurch können Zellkonfigurationen ermittelt werden, deren Volumen maximal um 1 % von den PHEV2 Formaten abweicht. Mit Hilfe der resultierenden Kenngrößen in BatPaC und unter Zuhilfenahme der in (Gallagher et al., 2011) von den BatPaC Entwicklern vorgestellten Area Specific Impedance wird der Zellinnenwiderstand in Abhängigkeit der

[104] Die Fahrzeugparameter für die Simulation befinden sich in Tabelle 4.13 in Abschnitt 4.3.3.
[105] Eine Abbildung des Originalbatteriepacks befindet sich auf Seite 56 (Abbildung 4.35).
[106] Basis hierfür ist ein Rahmen aus Aluminium (Tabelle 6.3), welcher auf die äußeren Maße der e-Golf Batterie angepasst und einmalig im Kostenmodell berechnet wurde.

Zellkapazität ermittelt (Abbildung 4.59 (a)). Ebenfalls aus den BatPaC Daten kann der Entladestrom für die maximale Leistung entnommen werden (Abbildung 4.59 (b)).



(a)



(b)

Abbildung 4.59: Veränderung des Innenwiderstands einer PHEV2 Batteriezelle bei unterschiedlichen Kapazitäten (a) und dazugehöriger maximaler Entladestrom (b).

Aus Abbildung 4.59 kann entnommen werden, dass sowohl der Innenwiderstand, als auch der maximale Entladestrom von der vorhandenen 28 Ah PHEV2 Zelle abweicht. Um ein elektrisches Modell für die Simulation zu erhalten, wird angenommen, dass sich die neu anzulegenden Simulationsmodelle ähnlich dem der 28 Ah Zelle verhalten. Dementsprechend werden die Werte aus Abbildung 4.59 verschoben und die Größen des Ersatzschaltbilds im selben Verhältnis aufgeteilt. Die OCV und die thermischen Parameter werden vereinfachend als gleich angenommen.

Anforderungen:

- Mindestreichweite S: 150 km,
- Maximale Leistungsfähigkeit P_{Anf}: 93 kW,
- Verfügbarer Bauraum: 1992x859x225 mm,
- Spannungsgrenzen: 200 – 470 V ,
- Fahrzeugklasse: Conversion Design Kompaktfahrzeug (VW e-Golf),
- Nutzungsbedingungen: CADC 150,
- Auftragsvolumen n_{Bat}: 10 000 Einheiten.

Randbedingungen des Batterieherstellers:

- Batteriezellen (alles PHEV2, 148x26,5x91 mm):
  - 25 Ah, $20,
  - 30 Ah, $24,
  - 35 Ah, $28,
  - 40 Ah, $32.
- SoC-Swing: ≥ 80 %,
- Anzahl Zellen pro Modul: 5 – 20,
- Höhe des Moduldeckels mit integrierter CSC: 15 mm,
- Dicke der Modulendplatten jeweils: 15 mm.

Da für die Optimierung in diesem Fall nur ein einzelnes Ziel vorgegeben ist, läuft der Optimierungsalgorithmus deutlich schneller als zuvor, weshalb hier auf den EA10000 zurückgegriffen wird. Die Optimierungsvorschrift und die dazugehörigen Nebenbedingungen sind die folgenden:

$$\begin{gathered} \min K_{tot} \\ unter\ den\ Nebenbedingungen: \\ SoC_{Swing} \geq 80\ \%, \\ T_{Zelle,Max} \leq 50\ °C, \\ S\ \geq 150\ km, \\ P_{Max} \geq 93\ kW. \end{gathered} \qquad \textbf{4.34}$$

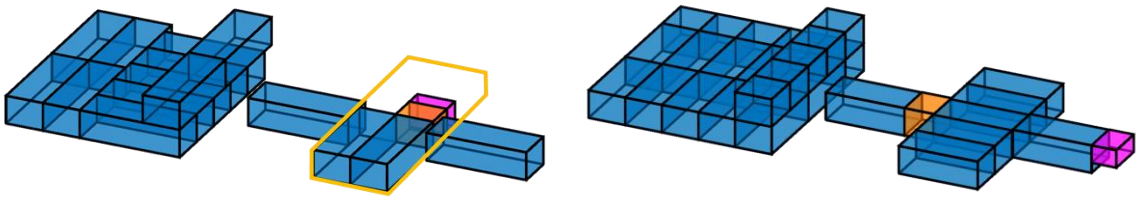
In Tabelle 4.27 ist, neben der Batteriekonfiguration des Originalbatteriepacks, das Ergebnis der Optimierung und der darauffolgenden Auswahl durch die Bewertungsmethode aufgeführt. Aus den Optimierungsdaten geht hervor, dass es keine gültige Batteriekonfiguration mit den 25 und 30 Ah Zellen gibt. Die Reichweitenanforderung kann mit diesen Zellen nicht erfüllt werden. Das Originaldesign aus Tabelle 4.27 zeigt dasselbe Ergebnis. Die zurückgelegte Strecke beträgt lediglich 117 km.

Der SoC-Swing des Best Designs ist sehr groß. Dadurch wird eine maximale Reichweite bei minimalen Kosten erreicht. Des Weiteren wurde bei dem Best Design nur eine Modulgröße verwendet und insgesamt kommen weniger Zellen zum Einsatz, als im Original. Trotz der geringeren Anzahl von Zellen und Modulen ist das Best Design teurer, als der Preis des modellierten Originaldesigns. Allerdings dürften die Herstellkosten der Originalbatterie höher ausfallen als hier angegeben, da dort die unterschiedlichen Modulgrößen, sowie deren Positionierung zu einer aufwändigen Aufbau- und Verbindungstechnik führen. Das Volu-

men des Best Designs ist erwartungsgemäß kleiner. Aufgrund des hohen nominellen Energieinhalts sind die energetischen Kosten und die relative Energiedichte zusätzlich günstiger. Eine Erhöhung der Produktionskapazitäten um das 10-fache auf 100 000 Batteriepacks pro Jahr senkt den Batteriepreis um 40 % (K_{tot} $100k$).

Tabelle 4.27: Ergebnis und Vergleich des Best Designs der Optimierung des Batteriepacks für den VW e-Golf mit dem Ziel minimaler Kosten

	Best Design	**Originaldesign**
Packkonfiguration (Zellanzahl)	70s3p (210)	88s3p (264)
SoC-Swinglage (SoC_{Min}) (%)	98 (1)	85[107] (10)
Verwendete Zelle	40 Ah PHEV2	25 Ah PHEV2
Thermisches System	Ja	Nein
Modulkonfiguration (Anzahl)	14s1p (15)	12s1p (17) 6s1p (10)
$relatives\ V_{Bat}$ (%)	86	100
K_{tot} ($)	9714	8110
K_{kWh} ($/kWh)	316	333
$K_{tot,kWh}$ 100k ($ ($/kWh))	5661 (184)	4727 (194)
E_{nom} (kWh)	30,74	24,39
$relative\ w$ (%)	146	100
S (km)	164	117



(a) (b)

Abbildung 4.60: Mechanische Integration des Best Designs (a) und der Originalkonfiguration (b) über den PA im verfügbaren Bauraum.

Bei Betrachtung der mechanischen Integration (Abbildung 4.60) können noch Anpassungen an dem Best Design vorgenommen werden. Beispielsweise könnten die vier Module im vorderen Bereich (hell markiert) entsprechend der Anordnung im Originaldesign platziert werden. Dieser Bereich befindet sich unterhalb der Vordersitze. Der ehemalige Kardanwellentunnel bliebe dann größtenteils frei.

[107] Hierbei handelt es sich um eine Annahme, da es keine Angaben zu dem nutzbaren Energieinhalt der Originalbatterie gibt.

Analyse der Ergebnisse für den VW e-Golf

Mit dem Ziel These 4 zu bewerten, werden alle paretooptimalen Batteriekonfigurationen auf Basis ihres nominellen Energieinhalts betrachtet. Bezogen auf den Preis und den erforderlichen Energieinhalt (Abbildung 4.61), liegen vergleichbare Batteriekonfigurationen mit der 35 und der 40 Ah Zelle sehr nahe beieinander. Der Grund hierfür ist die Ermittlung des Zellpreises über dasselbe $/kWh Verhältnis. Preisdifferenzen ergeben sich in Folge dessen vor allem aus den Unterschieden der Modulkonfiguration, der Verbinder und des Kühlsystems.

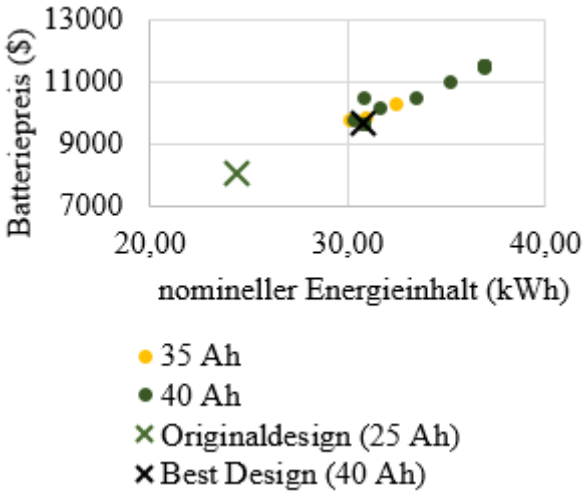


Abbildung 4.61: Batteriepreis über dem nominellen Energieinhalt mit verschiedenen Zellen (nur gültige Designs).

Erweitert man die Ansicht um die ungültigen Designs[108] wird deutlicher, dass sich bezüglich des Preises keine klare Tendenz zu einer bestimmten Zellkapazität erkennen lässt.

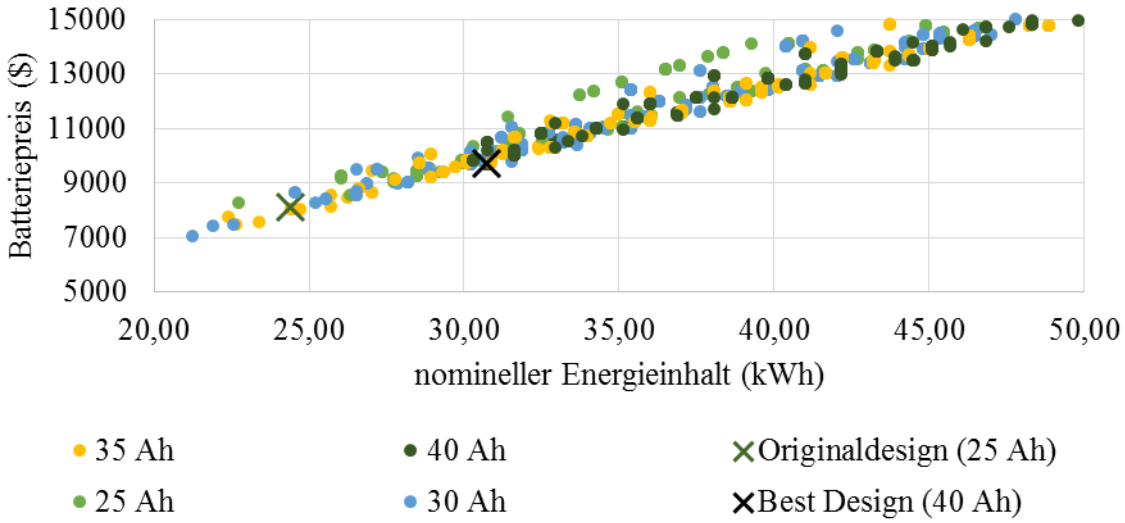


Abbildung 4.62: Batteriepreis über dem nominellen Energieinhalt mit verschiedenen gleichformatigen Batteriezellen.

[108] Die Konfigurationen wurden vor allem durch eine zu große Anzahl von Zellen oder eine zu geringe Reichweite ungültig.

Bei Betrachtung des Volumenverhältnisses gegenüber der Originalkonfiguration in (Abbildung 4.63 (a)) zeichnet sich die 40 Ah Zelle besser aus als die 35 Ah Zelle. Die gleiche Tendenz ist bei der relativen Energiedichte zu erkennen (Abbildung 4.63 (b)). Hier schneiden die Zellen mit größerer Kapazität grundsätzlich besser ab. Im Gegensatz dazu zeigen die Konfigurationen mit der 35 Ah Zelle eine geringere Erwärmung (Abbildung 4.63 (c)). Diese Tendenz war bereits zu erwarten, da die thermischen Zellparameter nicht verändert wurden und bei höherer Kapazität der Innenwiderstand steigt. Eine Reichweitenerhöhung wird in jedem Fall bei gleichbleibendem nominellem Energieinhalt durch Vergrößerung des SoC-Swings erreicht. Hier zeigt sich kein Unterschied zwischen den Zellen. Insgesamt zeigen sich also kleinere Vorteile bei den Batteriekonfigurationen mit der 40 Ah Zelle.

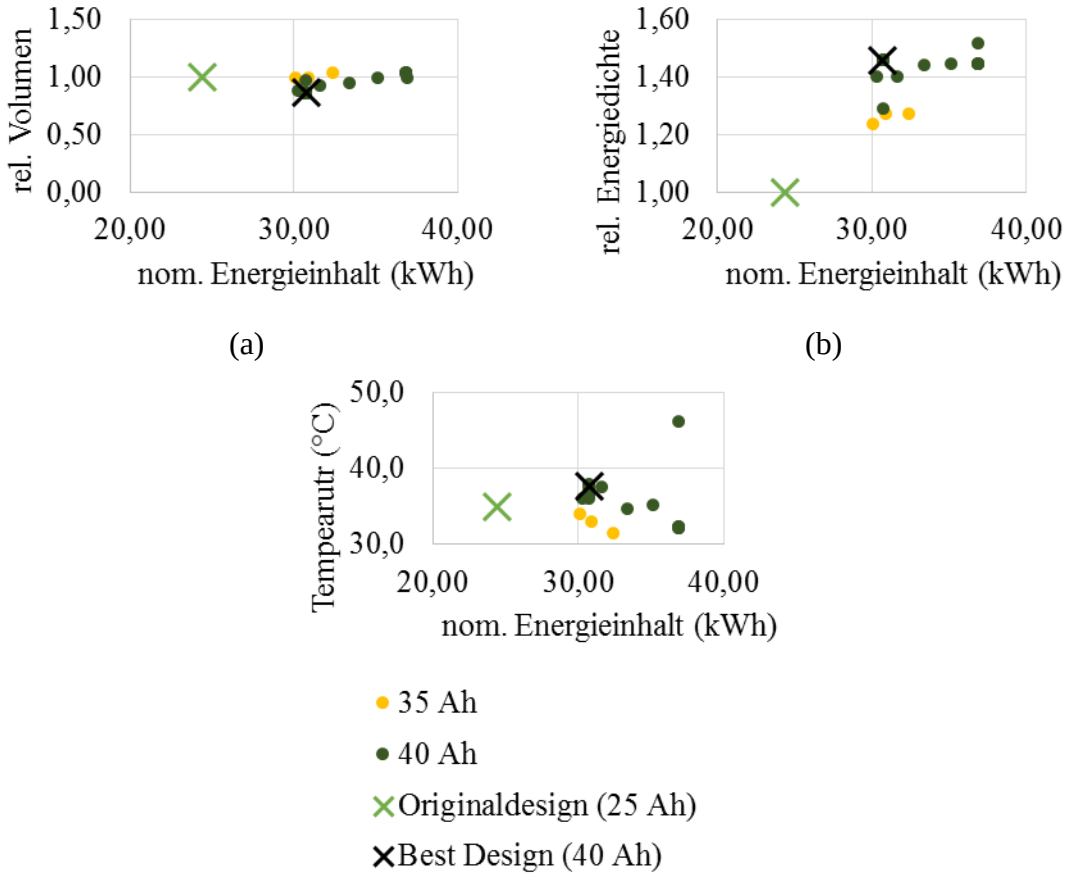


Abbildung 4.63: Relatives Volumen (a), relative Energiedichte (b) und mittlere Temperatur (c) über dem nominellen Energieinhalt für Batteriekonfigurationen mit der 35 und 40 Ah Zelle für den VW e-Golf.

Fazit zu der Frage nach einer optimalen Zellkapazität bei gleichbleibendem Zellformat

Von den verfügbaren Zellen stellte sich die, mit der größten Zellkapazität als optimal heraus. Während die meisten Bewertungskriterien bezogen auf die Batteriekonfigurationen mit unterschiedlichen Zellen keine Tendenz zeigen, besitzen die Batteriekonfigurationen mit der 40 Ah Zelle bei der Energiedichte und dem Volumen Vorteile. These 4 konnte damit zum größten Teil bestätigt werden. Bezüglich der Batteriekosten konnte allerdings keine Tendenz zugunsten der 40 Ah Zelle festgestellt werden.

Bei einer größeren Zellkapazität würden immer weniger Zellen in den Batteriepack verbaut werden, um die Kosten zu minimieren, während die geforderte Reichweite gleichbleibt. Potentiell könnte mit der maximalen Anzahl von Zellen, die in den Bauraum passen, eine Reichweite von 200 km auf dem CADC 150 erreicht werden (37 kWh, ca. $12 000 /Batteriepack, $311 /kWh).
Unter Verwendung von detaillierteren Zellinformationen (auch mit einer anderen Zellchemie) und mit Hilfe eines volumenadaptiven Batterierahmens, könnte die dargestellte Studie erweitert werden. Zusätzlich könnte die Untersuchung zu verschiedenen Zellkapazitäten auf weitere Fahrzeugklassen und Bauräume für die Batterien ausgedehnt werden. Dies würde zudem eine allgemeinere Aussage bezüglich These 4 zulassen.

4.7 Diskussion der Ergebnisse

Zu Beginn dieses Kapitels wurden die hier verwendeten Modelle für das elektrische und thermische Verhalten der Hochvoltbatterie, sowie das Kostenmodell und das mechanische Modell vorgestellt. Die Zusammensetzung der Modelle zu einer Gesamtoptimierung war Bestandteil der darauffolgenden Abschnitte. Besonderes Augenmerk wurde auf die Definition der Anforderungen für den Batterieentwurf, sowie die elektrische und mechanische Voroptimierung gelegt. Des Weiteren wurde gezeigt, wie aus einer Schar potentiell optimaler Batteriekonfigurationen, auf Basis einer KPI Bewertungsmethode, ein Best Design aus einem Optimierungsdurchlauf ausgewählt wird. Der Betrachtung der Systemsynthese und der Sensitivität der Gesamtoptimierung folgten drei Untersuchungen anhand verschiedener Thesen.

Im Rahmen der ersten Untersuchung wurde die modellbasierte Optimierung für den Entwurf der Batterie eines Kompaktfahrzeugs (BMW i3) eingesetzt (Abschnitt 4.6.1). Dort wurde untersucht, wie groß der Einfluss der zu erwartenden Fahrzeugnutzung auf die Batterieauslegung ist. Das Ergebnis dieser Untersuchung zeigte, dass die genaue Kenntnis der Nutzungsbedingungen sehr wichtig ist, um die gestellten Anforderungen im Fahrbetrieb zu erfüllen. Der verwendete Fahrzyklus sollte dabei zusätzlich in seiner Länge und der Gestalt zu dem Fahrzeug und seiner gewünschten elektrischen Reichweite passen. Der CADC 150 diente hier exemplarisch als Beispiel für einen ungeeigneten Fahrzyklus in Bezug auf ein EV mit geringer Reichweite und voraussichtlicher Verwendung im städtischen Bereich. Im Gegensatz dazu konnte mit Hilfe des PREMIUM Zyklus ein Beispiel für einen dedizierten Nutzungszyklus und den dazu passenden Batterieentwurf gezeigt werden. Zusätzlich zeigt dieser Anwendungsfall, dass die modellbasierte Auslegungsmethodik für eine noch größere Menge von Fahrzyklen eingesetzt werden kann, um mit dem Batteriedesign die gestellten Anforderungen für eine gewünschte Menge von Nutzungsbedingungen zu erfüllen.

Der zweite Anwendungsfall betrachtete zwei verschiedene Spannungsklassen (400 und 800 V) und die Verwendung von unterschiedlichen prismatischen Zellen unter gleichbleibenden Anforderungen an die Batterie (Abschnitt 4.6.2). Hierbei sollte festgestellt werden, welche der beiden Spanungsklassen und welche Batteriezelle sich am besten für ein sportliches Oberklassefahrzeug eignet. Unter den gegebenen Randbedingungen wurde die 800 V Spannungsebene besser bewertet, als die 400 V Spannungsebene. Wenn auch die Bewertungen nahe beieinander lagen. Die zugrundeliegende Bewertung auf Basis von KPIs (Abschnitt 4.5.2) wies in diesem Anwendungsfall einen starken Einfluss auf. Trotz unterschiedlicher

Spannungslage und der unterschiedlichen Anzahl von Zellen und Modulen lagen beide Batteriepacks preislich nahezu gleichauf. Für einen weiterführenden Vergleich der verschiedenen Spannungsklassen, wäre er hier sinnvoll die Ladeperformance bei hohen Ladeleistungen in die Bewertung einzubeziehen. Dieser Hinweis gilt ebenfalls für die Betrachtung der unterschiedlichen Batteriezellen. Die Zelle mit der größten Kapazität konnte im vorliegenden Fall die beste Bewertung erlangen. Es zeigte sich aber deutlich, dass mit einer anderen Zelle die Batteriepacks einen geringeren Batteriepreis auswiesen. Diese Auswertung zeigte zusätzlich den Einfluss der verwendeten Bewertungsgrößen, bei der Auswahl eines Best Designs aus der Menge potentiell optimaler Batteriekonfigurationen.

Im dritten Anwendungsfall wurde nun der Batteriepreis als alleiniges Optimierungsziel verwendet (Abschnitt 4.6.3). Ferner wurde der Frage nachgegangen, ob sich eine bestimmte Zellkapazität zwischen 30 und 40 Ah im selben Format (PHEV2) für den VW e-Golf Batteriepack als optimal erweist. Hierfür wurden zu Beginn elektrische Zellgrößen für die verschiedenen Zellen hergeleitet. Die Bewertung sprach sich zwar für die Zelle mit der größten Kapazität aus. Dennoch wurde gezeigt, dass sich die Preise bei demselben nominellen Energieinhalt mit unterschiedlichen Zellen sehr wenig unterschieden. Es konnte sogar festgestellt werden, dass es keine eindeutige Tendenz zu einer bestimmten Zelle über verschiedene Energieinhalte hinweg gab. Lediglich beim Volumen und der daraus abgeleiteten Energiedichte konnte die Zelle mit der größten Kapazität punkten.

Insgesamt wurde gezeigt, wie zielführend die modellbasierte Optimierungsmethodik zur Untersuchung unterschiedlichster Fragestellungen eingesetzt werden kann. Das Potential ist demnach groß, durch Erweiterung und Ausgestaltung der Modelle die Aussagen zu präzisieren und noch umfangreichere Untersuchungen auf dieser Basis durchzuführen. Ebenso können die betrachteten Anforderungen erweitert werden. Hier bieten sich die Einbeziehung des Ladevorgangs, verschiedener Klimazonen und des Batteriegewichts an. Auch die Ergänzung der Modelle, beispielsweise durch verschiedene thermische Systeme und/oder eine größere Auswahl von Batteriezellen, bietet zusätzliches Potential.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Traktionsbatterie stellt in einem elektrifizierten Fahrzeug einen essentiellen Bestandteil dar. Sie dient der Speicherung von elektrischer Energie und definiert darüber die verfügbare Reichweite des Fahrzeugs. Zusätzlich stellt sie die elektrische Leistung bereit, mit der das Fahrzeug beschleunigen oder verzögern kann. Abhängig vom Hybridisierungsgrad, hin zum vollständig elektrisch fahrenden Elektrofahrzeug, steht die Batterie damit immer im Mittelpunkt der Fahrzeugperformance, aber auch der Nutzerzufriedenheit (Reichweite und Ladefähigkeit) und der Kosten. Aufgrund dieser zentralen Rolle bei der Entwicklung von elektrifizierten Fahrzeugen wurde die Batterieauslegung hier einer systematischen Analyse, mit dem Ziel den Batterieentwurf zu optimieren, unterzogen. Für die Umsetzung dieser Aufgabe wurde zunächst eine Situationsanalyse durchgeführt. Auf dieser Basis erfolgte die Konzeptionierung einer Methodik für die Entwicklung einer modellgestützten Batterieoptimierung, die zuletzt umgesetzt wurde und deren Aussagefähigkeit anhand konkreter Anwendungsfälle unter Beweis gestellt wurde.

Unter einem optimalen Batterieentwurf wird verstanden, dass eine geeignete Zellanzahl, deren Integration in den verfügbaren Bauraum im Fahrzeug und die Produktionskosten ermittelt werden. Hierbei erfüllt der optimale Batterieentwurf alle gestellten Anforderungen an elektrische, thermische und mechanische Randbedingungen. Das bedeutet im Einzelnen: Die Batteriespannung befindet sich in dem vorgegebenen Bereich, die geforderte elektrische Antriebsleistung wird zur Verfügung gestellt, die verfügbare Energiemenge reicht aus, um eine geforderte Mindestreichweite des Elektrofahrzeugs zu ermöglichen, die Batterietemperatur überschreitet die maximal erlaubte Zelltemperatur nicht, gegebenenfalls ist das thermische Batteriesystem ausreichend dimensioniert, um eine effektive Kühlung der Batterie zu gewährleisten, es wurde eine passende Modulgröße ermittelt und alle Batteriekomponenten konnten kompakt in den vorhandenen Bauraum integriert werden.

Um eine solche Optimierung durchführen zu können, wurde in Kapitel 3 eine Methode konzipiert, welche die Entwicklung eines computergestützten Entwurfswerkzeugs zum Ziel hat. Die Methode besteht aus zwei Bereichen, der Konzeptionierung und der Modellierung (siehe Abbildung 3.6, Seite 41).
Die Konzeptionierung diente der Analyse und Strukturierung der Aufgabenstellung. In diesem Zusammenhang fand die Herleitung einer Funktionsstruktur für Hochvoltbatterieauslegung statt. Die Funktionsstruktur besitzt drei Haupthandlungspfade. Der erste Pfad beinhaltet die Auslegung der Batterie, bezogen auf zwei Haupteinflussfaktoren: die elektrischen und thermischen Randbedingungen. Diese beiden Haupteinflussfaktoren können aufgrund ihrer starken Kopplung nicht getrennt voneinander betrachtet werden. Der zweite Pfad umfasst die mechanische Auslegung. Auf dem dritten Pfad befindet sich die Betrachtung der (Herstellungs-) Kosten eines Batterieentwurfs. Keiner der Pfade kann ohne Rückwirkungen auf einen anderen Pfad beschritten werden. Hier wurde die Komplexität der Batterieauslegung

deutlich. Für den umfassenden Batterieentwurf müssten diverse Detailuntersuchungen vorgenommen werden (beispielsweise eine Betriebsfestigkeits- und Dichtigkeitsanalyse des gesamten Batteriepacks). Daher wurden zunächst eine Bündelung und eine Priorisierung auf die wichtigsten Teilfunktionen vorgenommen. So entstand ein dreistufiges Lösungskonzept, das aus der Erhebung der Ausgangsdaten, der Vorbereitung der Optimierung und der eigentlichen Optimierung besteht. Die Optimierungsumgebung wurde auf Basis bekannter (elektrisches Ersatzschaltbild- und thermisches Knotenmodell) und eigens entwickelter Modelle (mechanisches Modell mit Anordnungsalgorithmus und hybrides[109] Kostenmodell) aufgesetzt.
Zuletzt wurde in Kapitel 3 erneut verdeutlicht, welche Bereiche der Batterieauslegung von den ausgewählten Modellen abgedeckt werden können und welche nicht (Betriebsfestigkeit, elektromagnetische Verträglichkeit, Zellalterung und Dichtigkeit).

In Kapitel 4 wurde die Modellierung gemäß der entwickelten Methodik umgesetzt, um eine robuste, aussagekräftige Optimierungsumgebung zu erhalten. Dort erfolgten eine Beschreibung und Validierung des elektrischen und thermischen Simulationsmodells anhand beispielhafter Messzyklen im Gültigkeitsbereich der Modelle. Der Gültigkeitsbereich des elektrischen Simulationsmodells befindet sich im Bereich positiver Temperaturen. Bei Temperaturen unterhalb des Gefrierpunkts kann das Modell das elektrochemische Verhalten der Batteriezellen nicht geeignet wiedergeben. Diese Bereiche wurden daher in dieser Arbeit ausgespart. Oberhalb von 0 °C besitzt das elektrische Modell allerdings eine hohe Genauigkeit, bezogen auf die Spannungswiedergabe, bei sehr guter Rechengeschwindigkeit. Im Detail konnte die Zellspannungsabbildung einen RMSE (Root Mean Square Error) von 8 - 21,7 mV im Rahmen der Validierungsmessungen erreichen. Die Ladezustandsberechnung erreichte einen RMSE von 0,07 – 0,3 %. Das thermische Modell der Zellen zeigte einen RMSE von unter einem Kelvin auf Modulebene. Bei aktiviertem Kühlsystem sank der RMSE auf unter ¼ Kelvin.
Der Validierung der elektrischen und thermischen Modelle folgte eine detaillierte Darstellung des Produktionskostenmodells und dessen Plausibilisierung anhand öffentlich verfügbarer Kostendaten. Ferner wurde das Kostenmodell einer Sensitivitätsanalyse unterzogen, welche aufzeigte, dass die Zellanzahl, wie zu erwarten, einen großen Einfluss auf die Kosten einer Hochvoltbatterie besitzt. Zusätzlich spielten ebenfalls die firmeninterne Kostenstruktur, die Modulkonfiguration und der gewählte SoC-Swing eine Rolle bei der Höhe der Kosten.
Die Beschreibung der mechanischen Modellierung schloss den Abschnitt 4.1 ab. Diese Modellierung bezog sich vor allem auf den Aufbau der Module mit einer Kühlplatte unter, und einem Moduldeckel über den Zellen. Zusätzlich werden die Module durch Modulendplatten abgeschlossen und verpresst. Ebenfalls zum mechanischen Modell gehören die vorgefertigten Rahmenkonfigurationen, die eigens für diese Arbeit entwickelt wurden und ausführlich in (Frank und Pan, 2017) beschrieben sind. Die vorhandenen Rahmenkonfigurationen bestehen aus dem äußeren Batterierahmen, um bei einem Unfall die Verformungskräfte aufzunehmen, Querstreben zur Stabilisierung und jeweils einer Boden und Deckelplatte. Hinzu kommt ein Pufferbereich zwischen Innenseite des Rahmens und den Batteriekomponenten. Welche eine Verformbarkeit des äußeren Rahmens ermöglichen.

[109] Mit *hybrid* wird hier eine Mischung aus Bottom-Up und Top-Down Modell bezeichnet.

Nachdem die einzelnen Modelle beschrieben wurden, erfolgte die Darstellung der Systemstrukturierung, bei der das Zusammenspiel der Modelle dargestellt wird. Die Systemstrukturierung startet mit einem Satz von Anforderungen, welche mit Hilfe der elektrischen und thermischen Modelle in eine elektrische Batteriekonfiguration umgewandelt werden. Diese Batteriekonfiguration wird im mechanischen Modell für die Ermittlung einer möglichst platzsparenden Anordnung verwendet. Zusammen mit dieser Anordnung wird im Produktionskostenmodell ein Batterieverkaufspreis ermittelt. Im Rahmen der Systemstrukturierung wurde zudem gezeigt, wo die globale Optimierung mit Hilfe einer Evolutionsstrategie ansetzt. Die Evolutionsstrategie stellt einen Optimierungsalgorithmus dar, der auf Basis der Evolutionstheorie, mit Hilfe von Selektion und Mutation, vorhandene Startkonfigurationen (hier Batterieentwürfe) zielgerichtet verändert und so die Batteriekonfigurationen ermittelt, welche die vorgegebenen Optimierungsziele am besten erfüllen. Die Optimierungsstrategie kann hierfür das verwendete Ladezustandsfenster, die Kühlmitteldurchflussrate, die mechanische Optimierung und den geforderten nutzbaren Energieinhalt beeinflussen.

Der Systemstrukturierung folgte die Darstellung der Eingangsgrößen, in Form von Anforderungen, in die Batterieoptimierung. Beispielsweise wurden Spannungsgrenzen und eine Mindestleistung für die elektrische Auslegung gefordert. Ebenfalls wurden Nebenbedingungen für die mechanische Gestalt der Module (Anzahl der Zellen pro Modul, Größe der Modulendplatten, etc.) und für die Berechnung der Produktionskosten angegeben. Weitere Eingangsgrößen sind die Nutzungsbedingungen der Hochvoltbatterien. In dieser Arbeit wurden zu diesem Zweck Zyklen auf Fahrzeugebene[110] verwendet, die sich in ihrer Länge und Dynamik voneinander unterscheiden, um dadurch verschiedene Nutzungsszenarien eines Elektrofahrzeugs abzubilden.

Für die Gesamtoptimierungen wurden, zur Ermittlung der passenden elektrischen Batteriekonfiguration und der optimalen Anordnung und Größe der Batteriemodule, Voroptimierungen durchgeführt. Die elektrische Voroptimierung minimiert die notwendige Anzahl von Batteriezellen zur Erfüllung der elektrischen Anforderungen (Energieinhalt und Antriebsleistung) basierend auf einem SoC-Swing. Mit dem SoC-Swing wird das nutzbare Ladezustandsfenster beschrieben, welches den maximal verwendbaren Spannungsbereich der Batterie und damit den verfügbaren Energieinhalt einschränkt. An dieser Stelle wurde zusätzlich ausgeführt, welchen Einfluss die SoC-Swinglage auf die Batterieauslegung besitzt. Im Vergleich zu der üblichen Verwendung eines Faktors für die Berechnung des nutzbaren Energieinhalts, hat die Betrachtung der tatsächlichen SoC-Swinglage einen wesentlichen Einfluss auf die verwendete Anzahl von Zellen in der Batterie und deren Verschaltung. Abhängig von der Veränderung des Zellinnenwiderstands über den gesamten SoC-Bereich und die Stromlast, ist die verfügbare Energiemenge einer Batteriezelle, bei gleichem Betrag des SoC-Swings aber unterschiedlicher Lage dessen, deutlich abweichend voneinander.
Für die mechanische Voroptimierung kam ein eigens entwickelter Packalgorithmus in Form einer Baumsuche zum Einsatz. Dieser ist in der Lage in kurzer Zeit volumeneffiziente Anordnungen der Batteriekomponenten zu ermitteln. Des Weiteren werden die am besten geeignete Modulgröße bestimmt und der Batterierahmen entsprechend angepasst.

[110] Im Gegensatz zu Zyklen auf Batterieebene, welche ein Strom- oder Leistungsprofil vorgeben, die mit der Batterie simuliert werden. Zyklen auf Fahrzeugebene bilden im Gegensatz dazu die Fahrzeuggeschwindigkeit über der Zeit ab.

Das Verhalten aller Heuristiken und Modelle, zusammen mit der globalen Optimierung, wurde in Abschnitt 4.5 näher analysiert. Dadurch, dass es sich bei der Optimierung um eine Mehrzieloptimierung handelte, konnte kein einzelnes Optimum ermittelt werden. Stattdessen erfolgte die Auswahl einer Schar von paretooptimalen Batteriekonfigurationen, welche jeweils einen Kompromiss unter den verschiedenen Optimierungszielen abbildeten. Da bei einem tatsächlichen Batterieentwurf aus dieser Menge von Möglichkeiten eine Variante zur weiteren Verfolgung ausgewählt wird, wurde eine solche Auswahl auch hier vorgenommen und als Best Design bezeichnet. Dabei erfolgte die Auswahl des Best Designs mit Hilfe eines Satzes von Schlüsselparametern (Key Performance Indicators – KPIs). Diese Auswahlmethode ermöglichte den Vergleich verschiedener Optimierungsergebnisse untereinander. Als Schlüsselparameter wurden die Reichweite (oder der nutzbare Energieinhalt der Batterie), das Batterievolumen, die volumetrische Energiedichte, der Batteriepreis und Indikatoren für die Lebensdauer und die Fertigbarkeit verwendet. Die Auswahl der verwendeten KPIs erfolgte nach ihrer Wichtigkeit, im Abgleich mit diversen Literaturquellen, und der Aussagefähigkeit der verwendeten Modelle und Verfahren. Die Bewertungen der einzelnen KPIs jeder paretooptimalen Batteriekonfiguration wurden einer wirtschaftlich-technischen Bewertung nach VDI 2225 (Richtlinie VDI 2225 Blatt 1) unterzogen und so ein Best Design ermittelt.

Eine Sensitivitätsanalyse der Gesamtsystemoptimierung zeigte die Wirkungszusammenhänge zwischen Batterieauslegung und den Einflussgrößen der Optimierung (SoC-Swinglage, Kühlmitteldurchflussrate und geforderter Energieinhalt). Die mittlere Batterietemperatur steigt tendenziell mit größerem SoC-Swing, was zum einen an der Inkludierung der SoC-Randbereiche mit höheren Innenwiderständen und zum anderen an der längeren Nutzung der Batterie bei größerem verfügbaren Energieinhalt liegt. Erwartungsgemäß sinkt die mittlere Batterietemperatur bei Erhöhung der Kühlmitteldurchflussrate. Des Weiteren sinkt die mittlere Batterietemperatur tendenziell mit steigendem gefordertem Energieinhalt. Hier spielt die Erhöhung der notwendigen Zellanzahl und die dadurch allgemeine Erhöhung der Batteriespannungslage die entscheidende Rolle. Für allgemeine Aussagen bezüglich des Temperaturverhaltens waren die linearen Bestimmtheitsmaße bezogen auf die Temperaturveränderung in der Batterie jedoch zu klein. Ebenfalls den Erwartungen entspricht die Steigerung des Platzbedarfs der Batterie mit steigender Anzahl von Zellen bzw. gefordertem Energieinhalt. Allerdings steigt das Volumen der Tendenz nach deutlich stärker, als das Volumen der hinzugekommenen Batteriezellen. Dieser Effekt wird jedoch unter Umständen stark von der effizienten Modulanordnung innerhalb der Batterie konterkariert. Ein relativ hohes Bestimmtheitsmaß (0,95) konnte bei der Steigerung des Batteriepreises mit Erhöhung der Zellanzahl (welche sich aus den Einflussgrößen der SoC-Swinglage und dem geforderten Energieinhalt mit deutlich geringerem Bestimmtheitsmaß ergibt) erreicht werden. Hierbei ist zu beachten, dass das Kostenmodell eigene Sensitivitäten aufweist. Eine weitere Tendenz ließ sich bei der Senkung des energetischen Batteriepreises ($/kWh) mit steigender Zellanzahl erkennen. Maßgeblich für diese Tendenz ist der steigende Preis bei Erhöhung der Zellanzahl, während der Energieinhalt dadurch jedoch stärker steigt. In allen festgestellten Tendenzen zeigte sich der Einfluss der SoC-Swinglage, welche zu einer großen Streuung der Ergebnisse führte. Die Sensitivitätsanalyse zeigte, dass das Systemverhalten plausibel ist, auf dieser Basis aber keine allgemeinen Aussagen getroffen werden können. Es bedurfte daher der expliziten Betrachtung von Anwendungsfällen.

Nachdem das Systemverhalten ausführlich analysiert wurde, erfolgte in Abschnitt 4.6 die Durchführung von Optimierungen anhand drei verschiedener Fahrzeuge. Im Rahmen des ersten Anwendungsfalls wurde eine Batterie auf Basis der Fahrzeuganforderungen des BMW i3 entworfen. Im Mittelpunkt dieser Untersuchung stand die Frage, ob das erwartete Nutzerverhalten mit einem solchen Fahrzeug die Gestalt der Batterie wesentlich beeinflusst. Das Nutzerverhalten wurde durch verschiedene Fahrprofile (Zyklen) abgebildet. Hierbei kamen zum einen die Standardzertifizierungszyklen (NEDC, WLTC), zum anderen zwei Real-Drive-Emission (RDE) Zyklen (CADC 130, CADC 150) und ein dedizierter Fahrzyklus (PREMIUM), welcher ein gemitteltes, tatsächliches Nutzungsprofil für den BMW i3 darstellt, zum Einsatz. Bei der Batterieauslegung wurde eine prismatische 60 Ah Zelle im BEV2 Format eingesetzt. Eine solche wird ebenfalls im BMW i3 der ersten Generation verwendet. Auf Basis einer geforderten Mindestreichweite von 150 km wurde die Entwurfsoptimierung für jedes Nutzungsprofil durchgeführt. Während für den NEDC die ermittelte elektrische Konfiguration der Originalbatterie des BMW i3 (96s1p) entsprach, wurden für den WLTC und den PREMIUM Zyklus Konfigurationen mit drei zusätzlichen Zellen ermittelt. Um auf den RDE Zyklen die Reichweitenanforderung zu erfüllen, reichte der vorhandene Bauraum nicht aus. Demnach konnte hier unter Verwendung der 60 Ah Zelle keine gültige Batterieauslegung vorgenommen werden. Die gültigen Batteriekonfigurationen für NEDC, WLTC und PREMIUM Zyklus erreichten Batteriepreise unter $6000, was ca. $270 /kWh entspricht. Die beste Energiedichte wurde mit 137 Wh/l für den Batterieentwurf des WLTC erreicht.
Der betrachtete Anwendungsfall machte deutlich, dass eine Kenntnis des Nutzerverhaltens beziehungsweise des Belastungsprofils der Batterie für die Ermittlung eines passenden Batterieentwurfs unabdingbar ist. Wie die beiden RDE Zyklen zeigen, führt die (Vor-) Auswahl einer Zelle mit zu wenig Kapazität dazu, dass die Fahrzeuganforderungen nicht eingehalten werden können. Bezogen auf die anderen Zyklen ist die Kenntnis der passenden Batteriekonfiguration notwendig, um geeignete Modulgrößen und den Platzbedarf im Fahrzeug zu ermitteln. Die modellbasierte Entwurfsoptimierung konnte an diesem Beispiel zusätzlich zeigen, wie flexibel auf eine Änderung der Anforderungen reagiert wird und was diese Änderung, sowohl für die Batteriekonfiguration, als auch für die Herstellungskosten und den Platzbedarf im Fahrzeug bedeutet.

Im darauf folgenden Anwendungsfall wurden zwei unterschiedliche Spannungslagen für die Batterie eines Fahrzeugs miteinander verglichen (400 und 800 V Klassifizierung). Das Ziel der Untersuchung war herauszufinden, ob eine der beiden Spannungsklassen beim Batterieentwurf einen Vorteil gegenüber der Anderen besitzt. Die Fahrzeuganforderungen wurden von einem sportlichen Oberklassefahrzeug auf Basis des Tesla Model S abgeleitet. Hier wurde eine Reichweite von 450 km auf einem RDE Zyklus (CADC 150) verlangt. Des Weiteren bestand für diesen Anwendungsfall die Möglichkeit aus drei unterschiedlichen prismatischen Batteriezellen zu wählen (28 Ah PHEV2, 40 Ah BEV1, 63 Ah BEV2). Die ermittelten Batterieentwürfe für die beiden Spannungslagen verwendeten jeweils die 63 Ah Zelle. Auch preislich und volumetrisch unterschieden sich die beiden Entwürfe wenig (ca. $19 300, $190 /kWh, 600 l, 170 Wh/l). Die deutlichsten Unterschiede zeigten sich in der elektrischen und mechanischen Konfiguration. Für die 400 V Spannungslage wurde fünffach parallel verschaltet und ein eher geringes Spannungsniveau (nominale Batteriespannung: 315 V) ermittelt. Der Batterieentwurf für die 800 V Spannungslage besaß zwei parallele Zweige. Den

deutlichsten Unterschied machte die Modulanzahl aus. Grundsätzlich waren bei allen paretooptimalen 800 V Batteriepacks ca. doppelt so viele Module notwendig, wie bei den entsprechenden 400 V Batteriepacks.
Um eine objektive Bewertung der beiden konkurrierenden Batterieentwürfe vorzunehmen, wurden diese mit Hilfe ihrer KPIs verglichen. Der 800 V Batterieentwurf konnte sich sehr knapp gegen den 400 V Batterieentwurf durchsetzen. Dabei wurde nachgewiesen, dass die Wahl des „besseren" Batterieentwurfs sehr stark von den Bewertungskriterien und deren Gewichtung untereinander abhängt. Ein stärkerer Fokus auf die Lebensdauer oder den Batteriepreis und die 400 V Batteriekonfiguration wäre gewählt worden. Ferner wurde hier darauf hingewiesen, dass eine Hinzunahme von Ladeanforderungen für diesen Vergleich eine sinnvolle Ergänzung für die Optimierungsumgebung ist. Besonders im Bereich des Schnellladens (> 200 kW) wird eine 800 V Batterie Vorteile gegenüber der 400 V Batterie ausspielen können, besonders wenn der Ladestrom hierfür begrenzt ist (bspw. auf 500 A).
Neben der Betrachtung der unterschiedlichen Spannungslagen diente der Anwendungsfall des sportlichen Oberklassefahrzeugs einer Bewertung der Eignung verschiedener Batteriezellen für Batteriepacks mit großem Energieinhalt. Hierfür kamen paretooptimale Batteriekonfigurationen unter Verwendung aller verfügbaren Belastungsprofile und weiterhin auf den beiden verschiedenen Spannungslagen zum Einsatz. Die KPI Bewertung der Batteriekonfigurationen führte erneut zu einer Auswahl der 63 Ah Zelle. Besonders deutlich konnte die 28 Ah Zelle ausgeschlossen werden, welche sowohl bei den technischen Wertigkeiten (bezogen auf Volumen, Lebensdauer, Reichweite, Fertigung und Energiedichte), als auch bei der wirtschaftlichen Bewertung (Batteriepreis) klar am schlechtesten abschnitt. Im Gegensatz dazu lagen die Bewertungen der 40 und 63 Ah Zelle sehr nah beieinander. Die 63 Ah Zelle konnte tendenziell bessere Wertungen im technischen Bereich erzielen. Bezogen auf die wirtschaftliche Bewertung waren die Batteriekonfigurationen mit der 40 Ah Zelle jedoch unschlagbar. Vergleichbare Batterieentwürfe konnten so teilweise $4000 günstiger sein, als die entsprechenden Batterien mit 63 Ah Zelle. Die Auswahl geeigneter Bewertungsgrößen im Einzelfall wurde somit auch in diesem Beispiel deutlich.

Nachdem in den vorangegangenen Untersuchungen deutlich wurde, dass ein Fokus auf den Batteriepreis zu anderen Ergebnissen geführt hätte, wurde im letzten Anwendungsfall ein geringer Batteriepreis zum einzigen Optimierungsziel erklärt. Es wurde die Vermutung aufgestellt, dass sich eine Batteriezelle mit größerer Kapazität vorteilhafter erweist als Zellen mit kleinerer Kapazität. Um den Vergleich nachvollziehbar zu gestalten, wurden die Abmessungen der Zellen gleich behalten während die Zellkapazität verändert wurde (zwischen 25 und 40 Ah). Hierbei musste das elektrische Verhalten der Zellen entsprechend angepasst werden, da mit einer veränderten Zellkapazität direkt eine Veränderung der Aktivmaterialschichten im Inneren der Zelle einhergeht. Um eine Basis für die Veränderung des Zellinnenwiderstands und der Stromtragfähigkeit der Zellen zu erhalten, wurde das BatPaC Tool verwendet, welches in der Lage ist die Veränderungen im Zellinnern wiederzugeben. Die Simulationsmodelle der Zellen wurden entsprechend angepasst. Zellen mit einer Kapazität größer als 40 Ah konnten allerdings nicht ausgelegt werden, da die Stromtragfähigkeit auf Basis der verwendeten Zellauslegungsmethodik gegen Null tendierte. Ferner wurde als repräsentative Fahrzeugklasse ein Kompaktfahrzeug, auf Basis des VW e-Golf, gewählt. Der VW e-Golf gab zudem das Zellformat vor. Da bei diesem Fahrzeug im Original prismatische PHEV2 Zellen eingesetzt werden, sollte dieses Zellformat auch hier Einsatz finden. Die Er-

gebnisse der Optimierung zeigten, dass der Batteriepreis für die Wahl einer optimalen Zellkapazität nicht geeignet ist. Die Preise für Batterien mit gleichem nominellem Energieinhalt unterschieden sich unter den verschiedenen Zellen nur marginal. Bezüglich des notwendigen Batterievolumens und den erreichbaren Energiedichten Schnitten die Zellen mit der größten Kapazität am besten ab. Die Batterieoptimierung konnte also die Erwartung bestätigen. Eine wichtige Randbedingung bei der Bewertung der Erwartung ist die Vernachlässigung der Veränderung des thermischen Verhaltens der Zellen bei einer Kapazitätserhöhung. Es ist davon auszugehen, dass sich die Zellen thermisch träger verhalten, wenn die Schichtdicken größer sind. Zusammen mit einem höheren Innenwiderstand müssten Zellen mit höherer Kapazität und gleichbleibendem Format daher thermisch kritischer sein. Ab einer bestimmten Zellkapazität wird die Erwärmung der Zellen zunehmend schädlicher werden und die Verwendung eines Kühlsystems erfordern, welches dann eine negative Auswirkung auf den Bauraum und die Kosten mit sich bringt. Die Ausdehnung der Ergebnisse auf Zellen noch höherer Kapazität ist vor diesem Hintergrund zu sehen.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass die Optimierungsumgebung für die Untersuchung der verschiedensten Fragestellungen sehr gut geeignet ist. Bereits im vorhandenen Zustand können weit mehr als die aufgeführten Anwendungsfälle untersucht werden. Dennoch stellen die Modelle in der derzeitigen Ausgestaltung lediglich eine erste Version dar. Die Ergänzung des elektrischen Zellmodells um Alterungseffekte liegt bei diesem Modell am Nächsten. Ferner existieren Anforderungen an die Fahrzeuge für die Fahrt in extremen Kälteumgebungen. Durch eine Steigerung der Genauigkeit des elektrischen Modells in diesen Bereichen könnten diese Anforderungen ebenfalls für den optimalen Batterieentwurf berücksichtigt werden. Mit Hilfe der bereits erwähnten Alterungsbetrachtung kann der elektrischen Auslegung eine Bewertung der Alterung unter den gewählten Nutzungs- und Einbaubedingungen hinzugefügt werden. Diese Erweiterung könnte noch durch die Einführung verschiedener thermischer Systeme ergänzt werden. Hierfür müssten für die mechanische Anordnung zusätzliche Randbedingungen für die Modulplatzierung und die Modulgestaltung hinzugefügt werden. Das mechanische Modell und der Packalgorithmus sollten zunächst um eine Heuristik für die Verlegung der Modulverbinder ergänzt werden. Dies käme auch der Genauigkeit des Kostenmodells zugute. Relativ einfach könnte auch die Gestaltung der Battery Disconnect Unit (BDU) auf Basis ihrer Bestandteile erweitert werden. Die Ergänzung der Komponentengewichte ermöglicht zusätzlich die Ermittlung einer gravimetrischen Energiedichte (Wh/kg).
Das Kostenmodell besteht bereits aus einer angemessenen Menge an Parametern für die Preisabschätzung im Entwurfsstadium. An dieser Stelle könnten kleinere Kostenmodelle für die BDU und deren enthaltene Komponenten (Schütze, Sicherungen, Strommessvorichtungen), das Batteriesteuergerät und die Modulelektronik eingeführt werden. Die Kosten der Modulelektronik hängen von der Anzahl an Messkanälen ab. Bezüglich der Nutzungsprofile bietet es sich an Lade- oder Beschleunigungszyklen zu integrieren.

Das Ziel eine Optimierungsumgebung zu entwickeln, welche die wichtigsten Einflussfaktoren bei der Batterieauslegung berücksichtigt wurde erreicht. Die vorliegende Batterieoptimierung ermittelt, unter Berücksichtigung der elektrischen Zelleigenschaften, der Erwärmung der Zellen in passenden Modulgrößen, welche volumeneffizient in den verfügbaren Bauraum integriert werden, und unter Berücksichtigung der Produktionskosten, optimale Batteriekonfigurationen. Dabei erfüllen diese Konfigurationen die vorgegebenen Anforderungen, die bereits eingangs erwähnt wurden. Die Ziele der Optimierung, können innerhalb

der verfügbaren Modellparameter frei gewählt werden. Ferner wurden die allgemeinen Optimierungsziele von den Zielen für die Auswahl des besten Entwurfs getrennt. Diese Methode besitzt den Vorteil, dass die Optimierungsergebnisse für verschiedene Untersuchungen verwendet werden können. Zudem ermöglicht dieses Vorgehen den möglichen Lösungsraum zu analysieren. Bei einer Änderung der Auswahlkriterien für die Ermittlung des besten Entwurfs können die Ergebnisse der vorangegangenen Optimierung direkt wiederverwendet werden.
Die wichtige Rolle der SoC-Swinglage sei an dieser Stelle erneut hervorgehoben, da die präzise Lage des SoC-Swings die notwendige Anzahl von Batteriezellen und deren Verschaltung maßgeblich beeinflusst. Eine Batteriekonfiguration mit zu wenigen Batteriezellen wird bei der realen Verwendung des Fahrzeugs zu einer geringeren Reichweite und einer verminderten Antriebsleistung führen. Zudem werden die Zellen elektrisch stärker belastet. Eine zu große Anzahl von Zellen treibt den Preis für die Batterie in die Höhe. Allerdings gilt dies nur solange passende Modulgrößen und eine volumeneffiziente Anordnung der Module im Bauraum ermittelt werden können. Gegebenenfalls stellt sich ein Batteriepack mit mehr Zellen als günstiger heraus, als ein Batteriepack mit weniger Zellen. Eine geeignete SoC-Swinglage trägt maßgeblich dazu bei die Anzahl der Zellen geeignet zu wählen und gleichzeitig die elektrische Belastung der Zellen einzustellen. Hierfür ist die Kenntnis eines, am besten, qualitativen Verlaufs der Zellspannung und des Innenwiderstands über den SoC notwendig.
Ferner sei angemerkt, dass die Fokussierung auf eine spezifische Kenngröße, wie die volumetrische Energiedichte für die ökonomische, sowie technische Wertigkeit weniger sinnvoll ist, als die Betrachtung der tatsächlichen elektrischen, thermischen und wirtschaftlichen Performance. Eine hohe volumetrische Energiedichte bedeutet nicht, dass eine optimale Batteriekonfiguration unter Berücksichtigung aller Anforderungen vorliegt. Im Allgemeinen erzielen Batteriepacks mit großem Energieinhalt bessere volumetrische Energiedichten, als Batteriepacks mit kleinem Energieinhalt. Eine Möglichkeit einen optimalen Batteriepack aus einer Menge in Frage kommender Batterieentwürfe auszuwählen, wurde anhand der Bewertungsmethode über verschiedene Schlüsselparameter vorgestellt. Verglichen mit einer konventionellen, iterativen Vorgehensweise bei der Bestimmung eines geeigneten Batterieentwurfs zeigt die vorgestellte Methode deutliche Vorteile bei der Schnelligkeit, der Aussagefähigkeit und der Adaption auf sich ändernde Randbedingungen. Zudem wird gleichzeitig der vorhandene Lösungsraum systematisch erfasst. Dadurch können zusätzlich Schwachstellen bei den Prämissen der Batterieauslegung aufgedeckt werden. Ein Beispiel hierfür war der erste Anwendungsfall, bei dem deutlich wurde, dass die ausgewählte Batteriezelle nicht dazu geeignet war die Reichweitenanforderung auf einem realen Fahrzyklus zu erfüllen. Hier zeichnet sich der modellbasierte Ansatz durch die Verwendung von Fahrzeugsimulationen aus.

Die vorgestellte Batterieoptimierung ist in der Lage, auf dem Weg zu einer emissionsfreien Mobilität, einen wichtigen Beitrag bei der effizienten Entwicklung von Elektro- und Hybridfahrzeugen zu leisten. Dabei können technische, kundenspezifische und ökonomische Anforderungen gleichermaßen eingebracht und berücksichtigt werden.

6 Anhang

Im Anhang sind vor allem Abbildungen zu finden, welche die obige Arbeit ergänzen. Dabei orientiert sich die Struktur des Anhangs an den Kapiteln der Arbeit. Anhand der Überschriften können das dazugehörige Kapitel oder der entsprechende Abschnitt zugeordnet werden.

6.1 Zur Methodik und dem Konzept der Programmstruktur

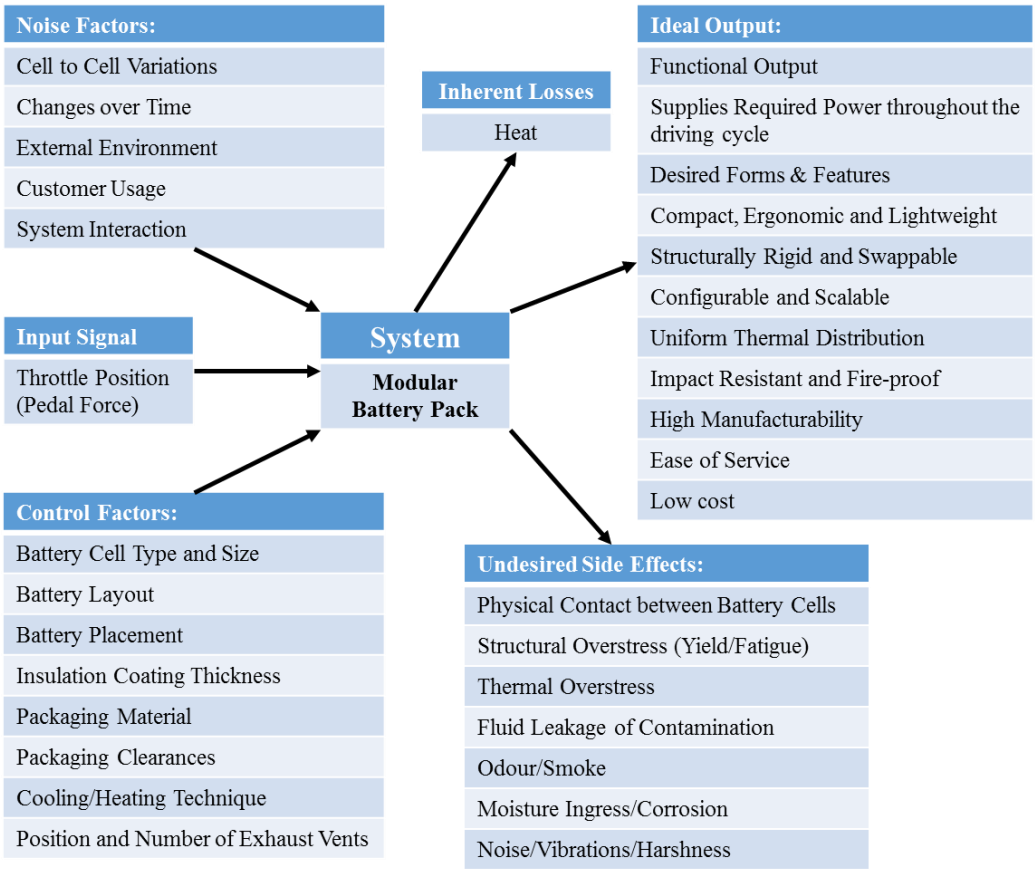


Abbildung 6.1: Parameterdiagramm für den Batterieentwurf, welches Störgrößen, Einflussmöglichkeiten und verschiedene Ausgänge eines Batteriesystems zeigt, gemäß (Arora et al., 2015).

In Tabelle 6.1 befinden sich die Wertebereiche und Ausprägungen der Funktionen aus der Funktionsstruktur (Abbildung 3.7, Seite 46). Die jeweiligen Funktionen sind in den Überschriften der Tabellenspalten zu finden. Die darauffolgende Tabelle (Tabelle 6.2) stellt die Zusammenfassung und Synthese der Funktionsbereiche zu allgemeinen Programmmerkmalen dar.

Tabelle 6.1: Parameter und Ausprägungen der hoch priorisierten Funktionen

Zellen/Module/Packs verschalten

Parameter	Wertebereich/ Ausprägung
NrSerl	
NrParl	
Modul	Anzahl
	Zellanzahl
SoC-Swing	[0-100]

Kühlkonzept auswählen

Parameter	Wertebereich/ Ausprägung
Kühlprinzip	Aktiv
	Passiv
	Ohne
Kühlmedium	Luft
	Wasser
	Kühlmittel (Mischverhältnis)
Kühlvorrichtung	Kühlplatte
	Kühlschlauch
	Kühlkanal
Kosten	Festpreis

Kühlkonzept dimensionieren

Parameter	Wertebereich/ Ausprägung
Kühlfläche	
Fluidvolumen	
Wärmeübergänge	
Vorlauftemperatur	
Lüfter/Pumpe	Leistung
	Fördermenge
Kosten	Kostenneuberechnung
Gewicht	
Anbindungsorte	

Zellen auswählen

Parameter	Wertebereich/ Ausprägung
Zellform	PHEV1
	PHEV2
	BEV1
	BEV2
	18650
	Pouch
Zellchemie	NCM
	NCA
	LMO
	(…)
Gewicht	
Kosten	€;$
Orientierung	[x,y,z]

Rahmen auslegen

Parameter	Wertebereich/ Ausprägung
Abmaße	
Rahmendicke	Seitenteile
	Deckel
	Boden
Streben	Anzahl
	Dicke
Lückengröße	
Gewicht	
Material	Aluminium
	Stahl
	Komposit
Kosten	Festpreis
	Kostenberechnung

Bauteile automatisch anordnen

Parameter	Wertebereich/ Ausprägung
Anordnung	gleichmäßig
	unregelmäßig
Bauteildrehung	offen
	beschränkt
Zusätzliche Bauteile	BDU
	CSC
	BCU
	Kabel
	Verschlauchung
	Verbinder
	Schrauben
	Stecker
Rahmenanpassung	Verkleinerung

Gesamtkosten ermitteln

Parameter	Wertebereich/ Ausprägung
Materialkosten	
Teilekosten	
Fertigungskosten	Festpreis/ Zuschlag
Gemeinkosten	
Entwicklungskosten	
Profit	Zuschlag

Simulation durchführen

Parameter	Wertebereich/ Ausprägung
Modelle	elektrisch
	thermisch

Tabelle 6.2: Zuordnung und Synthese der Funktionsmerkmale

Zellen/Module/Packs verschalten

Parameter	Wertebereich/ Ausprägung
NrSerl	
NrParl	
Modul	**Berechnung** Anzahl
	Zellanzahl
SoC-Swing	**Optimierung** [0-100]

Kühlkonzept auswählen

Parameter	Wertebereich/ Ausprägung
Kühlprinzip	Aktiv
	Passiv
	Ohne
Kühlmedium	Luft
	Wasser
	Kühlmittel (Mischverhältnis)
Kühlvorrichtung	Kühlplatte
	Kühlschlauch
	Kühlkanal
Kosten	**Kostenmodell** Festpreis

Kühlkonzept dimensionieren

Parameter	Wertebereich/ Ausprägung
Kühlfläche	**Berechnung**
Fluidvolumen	
Wärmeübergänge	**Eingangsdaten**
Vorlauftemperatur	
Lüfter/Pumpe	**Optimierung** Leistung
	Fördermenge
Kosten	**Kostenmodell** Kostenneuberechnung
Gewicht	
Anbindungsorte	

Zellen auswählen

Parameter	Wertebereich/ Ausprägung
Zellform	PHEV1
	PHEV2
	BEV1
	BEV2
	18650
	Pouch
Zellchemie	**Eingangsdaten** NCM
	NCA
	LMO
	(…)
Gewicht	
Kosten	€;$
Orientierung	[x,y,z]

Rahmen auslegen

Parameter	Wertebereich/ Ausprägung
Abmaße	
Rahmendicke	Seitenteile
	Deckel
	Boden
Streben	Anzahl
	Rahmendimensionierung Dicke
Lückengröße	
Gewicht	
Material	Aluminium
	Stahl
	Komposit
Kosten	**Kostenmodell** Festpreis
	Modellberechnung

Bauteile automatisch anordnen

Parameter	Wertebereich/ Ausprägung
Anordnung	**Packalgorithmus** gleichmäßig
	unregelmäßig
Bauteildrehung	offen
	beschränkt
	Eingangsdaten BDU
	OSC
	BCU
Zusätzliche Bauteile	Kabel
	Verschlauchung
	Verbinder
	Schrauben
	Stecker
Rahmenanpassung	**Berechnung** Verkleinerung

Gesamtkosten ermitteln

Parameter	Wertebereich/ Ausprägung
Materialkosten	
Teilekosten	
Fertigungskosten	**Kostenmodell** Festpreis/ Zuschlag
Gemeinkosten	
Entwicklungskosten	
Profit	Zuschlag

Simulation durchführen

Parameter	Wertebereich/ Ausprägung
Modelle	**elektrisches Zellmodell** Schaltbilder
	thermisches Zellmodell Schaltbilder

6.2 Zum elektrischen und thermischen Zell- und Batteriemodell

Ein Beispiel für den Wärmeaustausch im thermischen Zellmodell:

Wird die Summe der ohmschen Verluste an den Widerständen des ECM $\dot{Q}_{Ohm,1}$ an Punkt 1 in das thermische Zellmodell eingespeist. Dieser Punkt steht, über entsprechende Wärmeaustauschkoeffizienten, im Austausch mit den Punkten 2, 4, 5, der Umgebung, der Kühlplatte am Boden der Zelle und den Nachbarzellen. Die Verbindung mit der Umgebung, den Nachbarzellen und der Kühlplatte sind flächenabhängig. Die Zellverbinder (Punkt 3) stehen in Verbindung mit dem Punkt 2 und ein Weiterer mit Punkt 5. Die Besonderheit der Zellverbinder (Punkt 3) und der Stromsammler (Punkte 2 und 5) besteht darin, dass in ihnen zusätzlich ohmsche Verluste durch den fließenden Strom entstehen, welche ebenfalls zu der Wärmeentwicklung in der Zelle beitragen. Abhängig von der Modulgröße wird die Wärmeübertragung auch zwischen den Zellen durch den Wärmeaustausch an den Zellverbindern (Punkt 3 der einen Zelle zu Punkt 5 der nächsten Zelle) und zwischen den Zellen (Punkt 1 einer Zelle zu Punkt 1 einer weiteren Zelle) ermittelt.

6.2.1 Vergleichsdiagramme für die Modellverifizierung

Zusätzlich zu den bereits oben aufgeführten Abbildungen, befinden sich hier zwei weitere Diagramme zu dem Zyklus mit aktiviertem Kühlsystem.

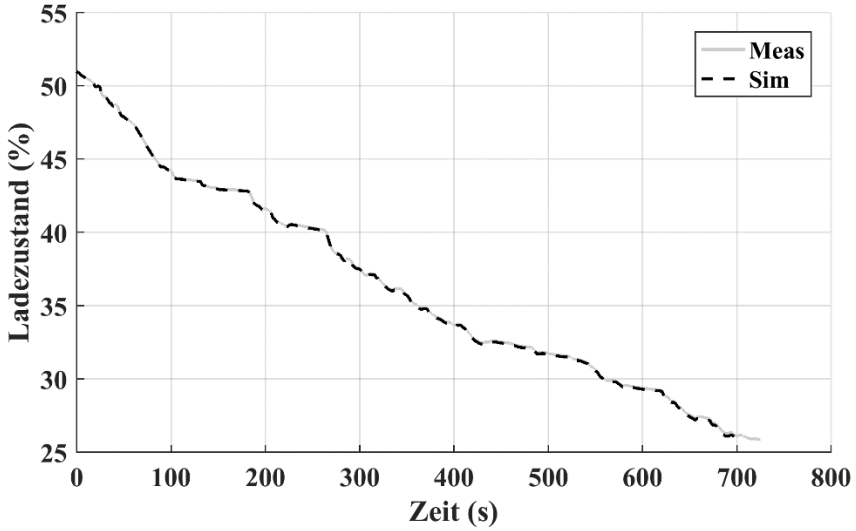


Abbildung 6.2: Vergleich des modellierten SoC-Verlaufs (schwarz, gestrichelt) mit dem gemessenen SoC-Verlauf (grau) auf dem Zyklus mit aktiviertem Kühlsystem.

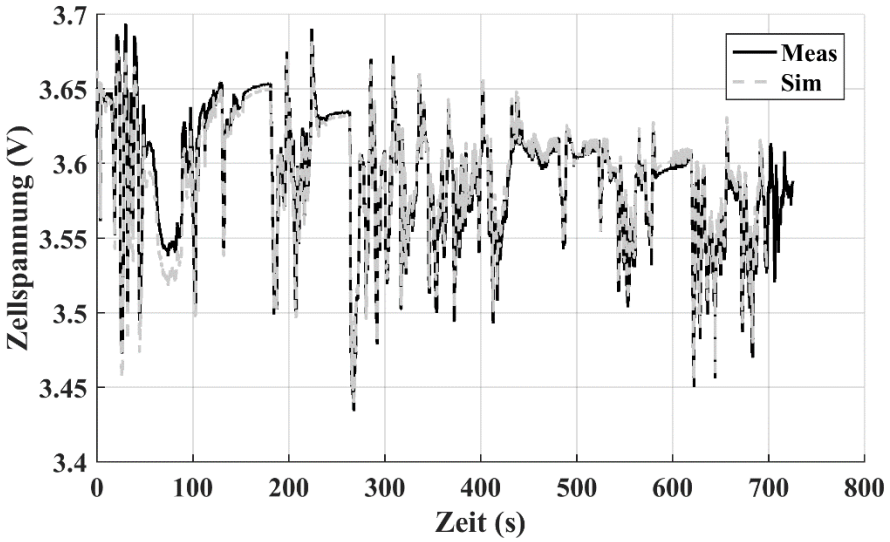


Abbildung 6.3: Vergleich der Zellspannung zwischen Modell (schwarz, gestrichelt) und Messung (grau) auf dem Zyklus mit aktiviertem Kühlsystem.

6.3 Zum Kostenmodell

Im Kostenmodell kommen Rohstoffpreise für Stahl, Aluminium und Kupfer zum Einsatz. Die hierfür zugrundeliegenden Daten und die daraus abgeleiteten funktionalen Zusammenhänge befinden sich in den folgenden Abbildungen.

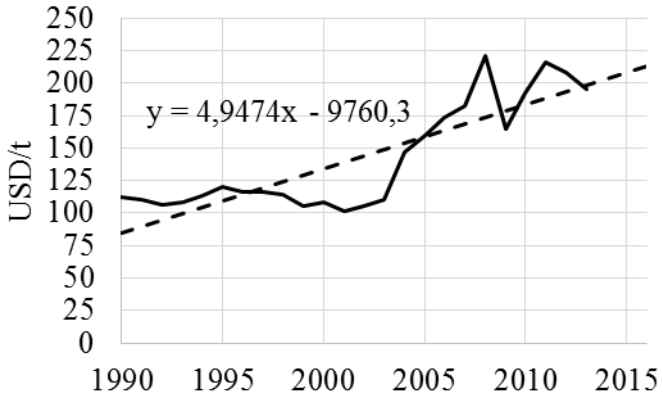


Abbildung 6.4: Stahlpreise in den USA (Kelly und Matos, 2014).Gestrichelt ist eine lineare Prognoselinie eingezeichnet.

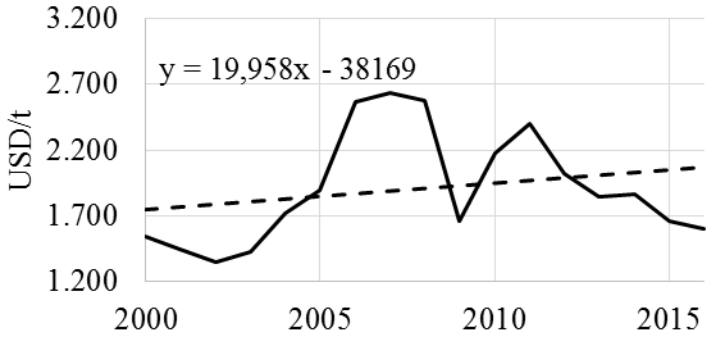


Abbildung 6.5: Weltweiter Aluminiumpreis (Statista GmbH, 2017b) mit linearer Trendlinie.

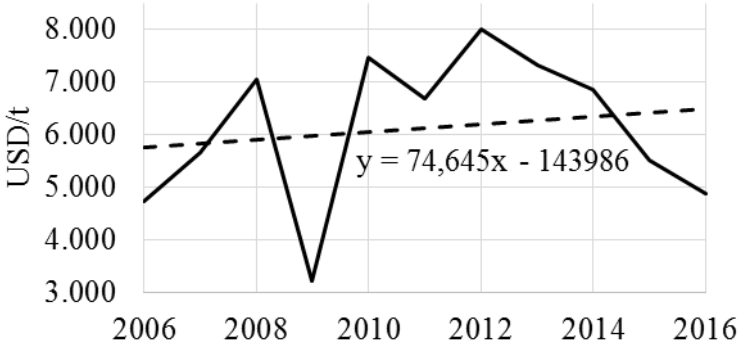


Abbildung 6.6: Weltweite Kupferpreise (Statista GmbH, 2017a, 2012, 2016). Gestrichelt eingezeichnet ist eine lineare Trendlinie.

Um Kosten und Preise zwischen US$ und € umzurechnen und dadurch eine korrekte Währungsbetrachtung durchzuführen sind im Kostenmodell die in Abbildung 6.7 aufgeführten Wechselkurse hinterlegt. Bei Einstellung eines Basisjahrs wird entsprechend automatisch der passende Wechselkurs verwendet.

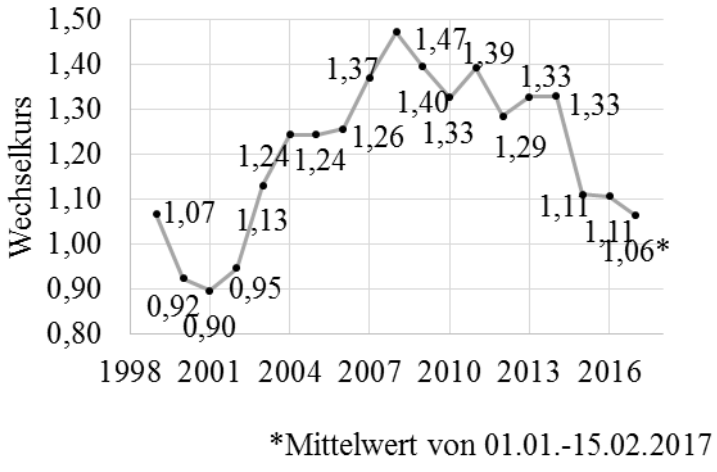


Abbildung 6.7: Mittlere Wechselkurse zwischen 1999 und 2017 von Euro in US Dollar (Europäische Zentralbank, 2017).

6.4 Zur Rahmendimensionierung

Für jede Batterieauslegung in der vorliegenden Arbeit kommen Basiskonfigurationen des Batterierahmens, passend zu dem jeweiligen Fahrzeug zum Einsatz. Diese wurden in (Frank und Pan, 2017) vorgestellt. Die Rahmendimensionierungen aus ebendieser Quelle befinden sich zusätzlich hier in Tabelle 6.3, Tabelle 6.4 und Tabelle 6.5.

Tabelle 6.3: Rahmendimensionierung für Batterien im Unterboden aus (Frank und Pan, 2017) für Kompakt- und Oberklassefahrzeuge

Vehicle size	Gap length (mm)	Number of cross-bars	Material	Require-ments	Minimum thickness of cross-bar t1(mm)	Minimum thickness of outer frame t2 (mm)	Weight of whole crash frame (kg)
Small	*30*	4	alumi-num	standard	3	10	35
				strict	12	20	65
			steel	standard	2	3	49
				strict	4	11	108
			compo-site	standard	1	3	9
				strict	1	9	17
Full size	*40*	7	alumi-num	standard	1	8	64
				strict	3	18	122
			steel	standard	1	3	121
				strict	2	8	201
			compo-site	standard	1	3	25
				strict	1	9	41

Tabelle 6.4: Rahmendimensionierung für eine Batterie im Hinterwagen aus (Frank und Pan, 2017) für ein SUV

Vehicle size	Gap length (mm)	Number of cross-bars	Material	Require-ments	Minimum thickness of cross-bar t1(mm)	Minimum thickness of outer frame t2 (mm)	Weight of whole crash frame (kg)
SUV	*10*	1	alumi-num	standard	1	14	28
				strict	6	23	47
			steel	standard	1	6	39
				strict	2	17	100
			compo-site	standard	1	8	10
				strict	4	20	24

Tabelle 6.5: Rahmendimensionierung für eine Batterie im Kardantunnelbereich in Ergänzung zu (Frank und Pan, 2017) für ein SUV

Vehicle size	Gap length (mm)	Number of cross-bars	Material	Require-ments	Minimum thickness of cross-bar t1(mm)	Minimum thickness of outer frame t2 (mm)	Weight of whole crash frame (kg)
SUV	*20*	1	aluminum	standard	16	13	47
			steel		1	3	33
			composite		1	7	14
		3	aluminum		2	6	22
			steel		1	3	34
			composite		2	3	7

6.5 Parameterdatensätze für die Gesamtsystemoptimierung

Neben den Parametern der Gesamtoptimierung, welche oben vorgestellt wurden, existieren weitere. Diese wurden für die vorliegenden Untersuchungen nicht verändert, können aber in dem entwickelten Optimierungswerkzeug ebenfalls verändert werden. Die Parameter sind der Übersicht wegen in elektrisch/thermische Größen (Tabelle 6.6), mechanische Größen (Tabelle 6.7) und Größen des Kostenmodells (Tabelle 6.8) unterteilt.

Tabelle 6.6: Parameter und Anforderungen elektrisch/thermisch. Grau hinterlegt sind interne Parameter, welche im Rahmen der vorgestellten Optimierungen nicht verändert wurden.

Parameter		**Ein-heit**	**Wertebe-reich**	**Basiswerte**
Simulationsschrittweite		s	-	0,1
Packspan-nung	Max	V	>0	ISO 19295 oder
	Min	V	>0	LV 123
Zellstrom	Ch_Max	A	>0	-
	DisCh_Max	A	<0	-
	BMS Beschränkung	-	[0-1]	1
Packleistung	Geforderte Leistung	kW	>0	
	SoC-Level	%	[0 - 100]	50
	Temperatur	°C	>0	25
	Zeit	s	>0	10
	Exakte Erfüllung	-	[0;1]	0
	Generelle Erfüllung	-	[0;1]	1
Energieinhalt	EoL Energieinhalt	kWh	>0	
	BoL Energieinhalt	kWh	>0	
	Restkapazität EoL	-	[0-1]	0,8
	Innenwiderstand EoL	-	>0	1,2
Auslegungs-punkt	Temperatur	°C	>0	25
	Starttemperatur	°C	> 0	25

Fortsetzung Tabelle 6.6:

Auslegungspunkt	Starttemperatur der Kühlflüssigkeit	°C	> 0	25
Simulationsparameter	Parameter des Temperatursensors T	-	-	15
	K	-	-	1
Kühlplattenparameter	Ein oder beidseitige Kühlung	-	[1;2]	1
	Kühlung mit der Kühlmitteldurchflussrate oder über die Pumpenleistung	-	[0;1]	0
	Grenzkühlmitteldurchflussrate	l/h	[0-5]	5
Zellkonfigurationsbegrenzung	Minimale Anzahl paralleler Zellen	-	>0	1
	Maximale Anzahl paralleler Zellen	-	>0	100
Alterung	Kapazitive Alterung	-	[0-1]	1
Elektrische Voroptimierung	Maximale Schleifendurchläufe	-	>0	20
Optimierungsparameter	Max SoC (Initialwert)	%	[0-100]	
	Min SoC (Initialwert)	%	[0-100]	
	Kühlmitteldurchflussrate (Initialwert)	l/h	>0	
Parameter für eine Einzelsimulation	Aktivierung	-	[0;1]	0
	Anzahl serieller Zellen	-	>0	
	Anzahl paralleler Zellen	-	>0	
1C Entladezyklus	Zyklusdauer	s	3800	3800
	Max SoC	%	100	100
	Min SoC	%	0	0
	Aging Widerstand	-	1	1
	Aging Kapazität	-	1	1

Tabelle 6.7: Parameter und Anforderungen mechanisch. Grau hinterlegt sind Parameter, die im Rahmen der vorgestellten Optimierungen nicht verändert wurden.

Parameter		**Einheit**	**Wertebereich**	**Basiswerte**
Platzierung identischer Objekte	entlang der y-Achse	-	[0;1]	1
	entlang der z-Achse	-	[0;1]	0
	entlang der x-Achse	-	[0;1]	1
Modulbeschränkungen	Minimale serielle Anzahl Zellen	-	>0	1
	Maximale serielle Anzahl	-	>0	Inf
	Minimale parallele Anzahl	-	>0	1
	Maximale parallele Anzahl	-	>0	Inf
	Minimale Anzahl Zellen	-	>0	1
	Maximale Anzahl Zellen	-	>0	Inf
	Höhe des Moduldeckels	mm	>=0	15

Fortsetzung Tabelle 6.7:

Packalgorithmus	Satz oder Einzelkonfiguration der E-Funktionen	-	siehe Abschnitt 4.4.2 dazu	
	Anordnungen paralleler Zellen im Modul	-	[0;1]	0
	Ortsvektor für den Start	-		[0 0 0]
	Maximale Suchbaumbreite	-	>0	100
	Nur Beste HEval oder mehr?	-	>0	1
	Rahmenanpassung und speichern der besten Konfig	-	[0;1]	1
	Module als identische Pakete behandeln oder einzeln platzieren?	-	[0;1]	1
	Modulendplatten	mm	>0	15

Tabelle 6.8: Parameter des Kostenmodells. Grau hinterlegt sind Parameter, die im Rahmen der vorgestellten Optimierungen nicht verändert wurden.

Parameter	**Einheit**	**Wertebereich**	**Basiswerte**
Betrachtungsjahr		[2009-2016]	2016
Stückzahl	-	>0	1000
Lernrate	-	[0,8-0,9]	0,85
Dichte Aluminium	kg/m³	2700	2700
Dichte Stahl	kg/m³	7900	7900
Dichte Kupfer	kg/m³	8900	8900
Wechselkurse	-	USD/EUR	
Leiterquerschnitte Kuper	mm	-	A_Cu_DIN43671
Leiterquerschnitte Aluminium	mm	-	A_Al_DIN43670
Inflationsbereinigung	- - -	Erzeugerindizes USA Erzeugerindizes DE Metall Erzeugerindizes DE Kfz	
Zuschlag PressUStanz	-	[2,299-2,695]	2,315
Zuschlag Buntmetallgiesserei	-	1,592	1,592
Zuschlag Metallkonstruktion	-	[2,463-2,907]	2,681
Zuschlag KFZTeile	-	[1,1-1,923]	1,715
Zuschlag Leichtmetallgiesserei	-	2,571	2,571
Sonstige Bestandteile	%	[5-20]	7
Umsatzrendite	%	[0-20]	5
Verbindermaterial Zellverbinder	-	Aluminium; Kupfer	Aluminium
Verbindermaterial Modulverbinder	-	Aluminium; Kupfer	Kupfer
Referenzproduktionsmenge	-	1000	1000

6.6 Zu den Fahrzyklen

Im obigen Abschnitt 4.3.2 ab Seite 87 wurden die verwendeten Fahrzyklen nach Leistungsbereichen für ein Kompaktfahrzeug aufgeteilt. Abbildung 6.8 zeigt exemplarisch die Veränderung der relativen Häufigkeiten in Abhängigkeit der Fahrzeugklasse für den NEDC. Vor allem für den großen SUV treten nun deutlich höhere Belastungen des Antriebsstrangs auf.

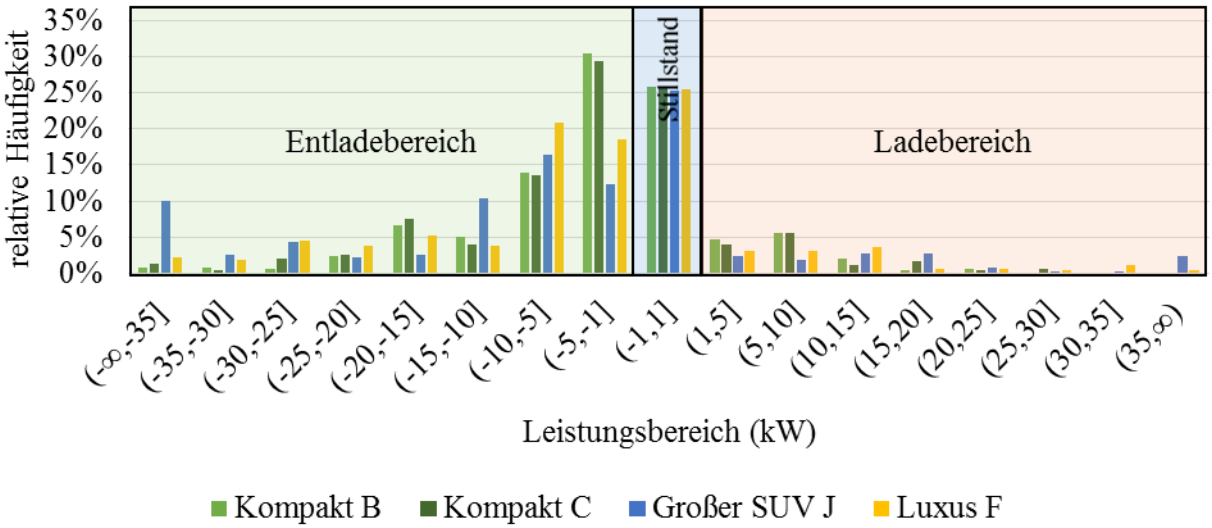


Abbildung 6.8: Vergleich der Leistungsbereiche und der relativen Aufenthaltsdauern auf dem NEDC für verschiedene Fahrzeugklassen.

6.7 Zur Ermittlung des Energieinhalts

Spannungsabschaltung vs. SoC-Abschaltung in der Simulation

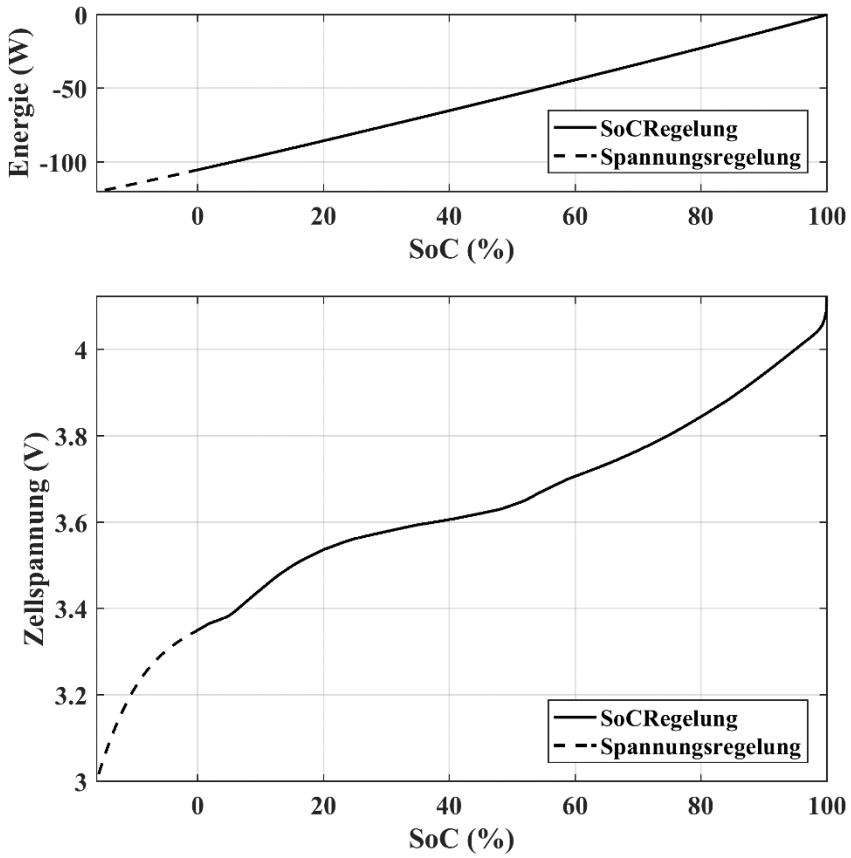


Abbildung 6.9: Vergleich der kumulierten Energie (oben) und der Zellspannung (unten) über dem SoC bei SoC-Abschaltung (durchgezogene Linie) und Spannungsabschaltung bei 3V (gestrichelte Linie).

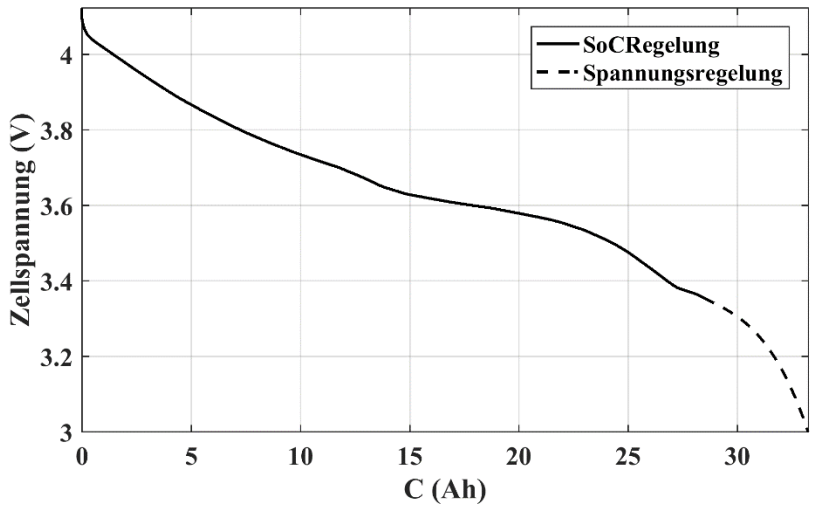


Abbildung 6.10: Kapazitätsdurchsatz über der Spannung im Vergleich zwischen SoC-Abschaltung (durchgezogen) und Spannungsabschaltung (gestrichelt).

6.8 Zum Packalgorithmus

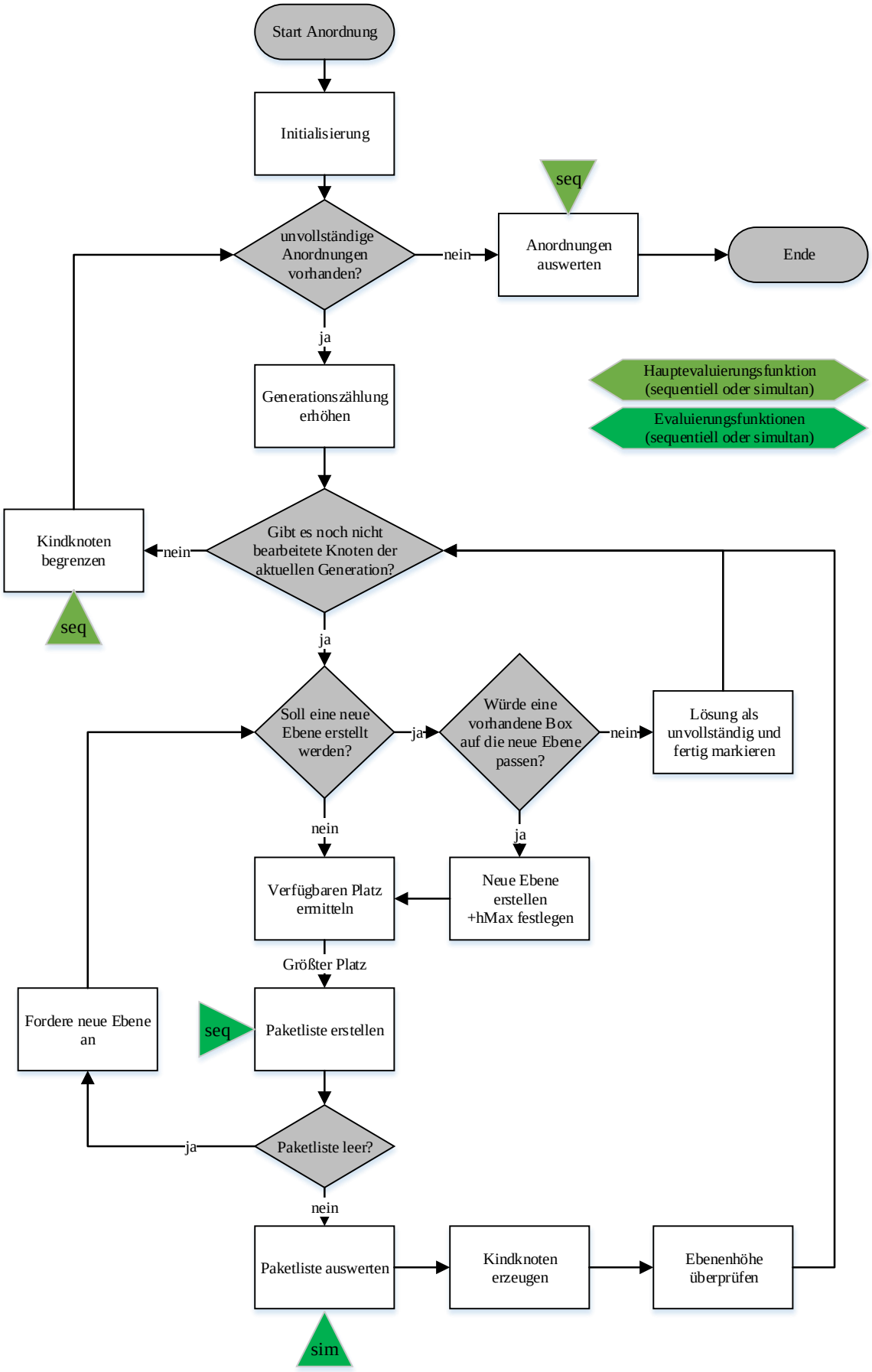


Abbildung 6.11: Ablaufdiagramm des Packalgorithmus.

6.9 Detailergebnisse EA10000 und EA400/EA200

Gefunden EA10000: 94 Best Designs auf der Paretofront

Gefunden EA400: 15 Best Designs auf der Paretofront

Gefunden EA200: 34 Best Designs auf der Paretofront

Tabelle 6.9: Betrachtung der Sieger in jedem Optimierungsziel (Extremdesigns)

	EA10000	EA400	EA200
		Designnummer	
Kleinste Anzahl von Zellen	2160	371	3/200
Kleinstes Volumen	2240	419	96
Geringster energetischer Preis	1316	376	137
Geringster absoluter Preis	2160	318	200
Kleinste Kühlmitteldurchfluss-rate	Alle	Alle	Alle
Kleinster SoC-Swing	1411/1316	376	137
Maximale Temperatur	2160	371	3/200

Tabelle 6.10: Die wichtigsten Parameter der Extremdesigns von EA10000

	1316	**2160**	**2240**	**1411**
Nominelle nutzbare Energie $E_{Swing,1C}$ (kWh)	7,32	7,44	7,30	7,46
Simulierte nutzbare Energie E_{Sim} (kWh)	7,00	7,03	7,01	7,00
Nomineller Energieinhalt E_{Nom} (kWh)	9,27	7,90	8,22	9,48
Batterievolumen V_{Bat} (l)	55	55	48	55
Volumetrische Energiedichte w (Wh/l)	167	144	170	172
Batteriepreis K_{tot} ($)	5390	4732	4975	5565
Energetischer Batteriepreis K_{kWh} ($/kWh)	581	599	605	587
n_S	88	75	78	90
n_P	1	1	1	1
Modulkonfiguration	22s1p	25s1p	13s1p	15s1p
SoC_{Min} (%)	3	4	5	1
SoC_{Max} (%)	83	98	94	81
SoC_{Swing} (%)	80	94	89	80
$\dot{v}_{Fl}$ (l/h)	0	0	0	0
$T_{Zelle,Max}$ (°C)	38	43	42	38

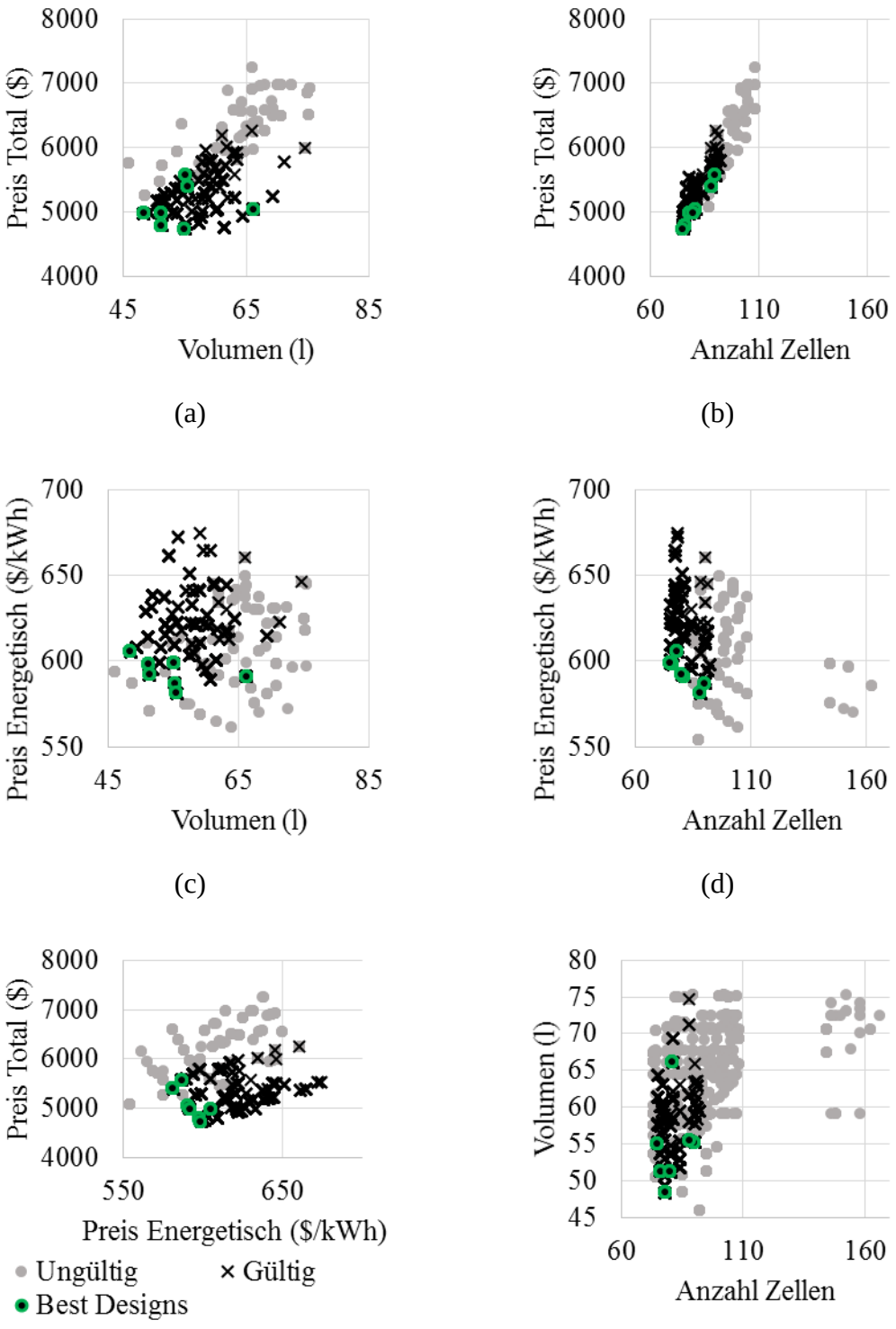


Abbildung 6.12: Vollständige Ergebnisse des EA10000. Graue Kreise: Ungültige Designs, Kreuze: Gültige Designs, Eingerahmte Kreise: Best Designs.

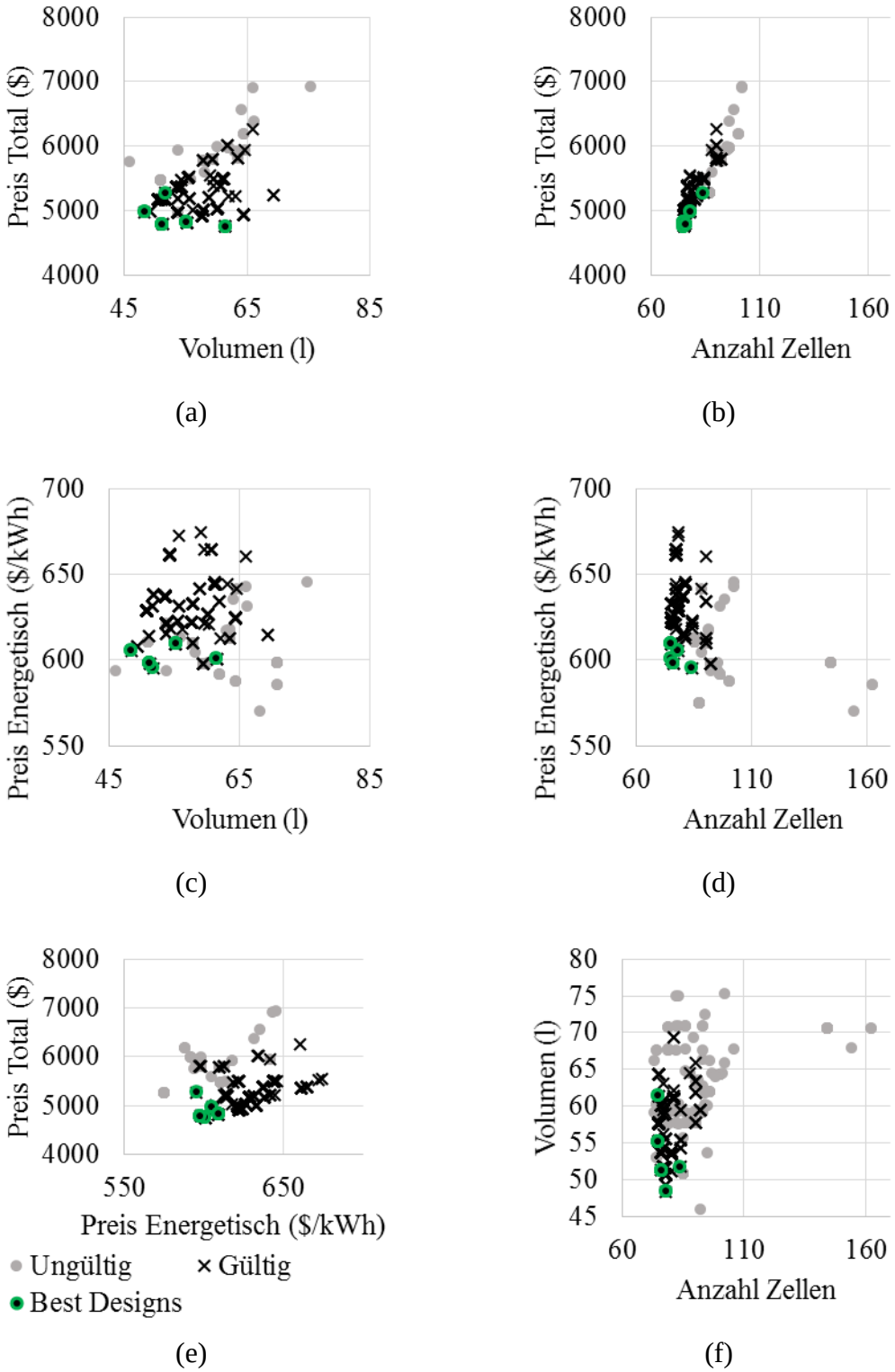


Abbildung 6.13: Vollständige Ergebnisse des EA400. Graue Kreise: Ungültige Designs, Kreuze: Gültige Designs, Eingerahmte Kreise: Best Designs.

Tabelle 6.11: Die wichtigsten Parameter der Extremdesigns von EA400

Designnummer	**318**	**371**	**376**	**419**
Nominelle nutzbare Energie $E_{Swing,1C}$ (kWh)	7,66	7,29	7,3	7,53
Simulierte nutzbare Energie E_{Sim} (kWh)	7,03	7,03	7,08	7,01
Nomineller Energieinhalt E_{Nom} (kWh)	7,9	7,9	8,85	8,22
Batterievolumen V_{Bat} (l)	61	55	55	48
Volumetrische Energiedichte w (Wh/l)	129	143	171	170
Batteriepreis K_{tot} ($)	4748	4816	5270	4975
Energetischer Batteriepreis K_{kWh} ($/kWh)	601	609	595	605
n_S	75	75	84	78
n_P	1	1	1	1
Modulkonfiguration	25s1p	15s1p	14s1p	13s1p
SoC_{Min} (%)	1	6	13	2
SoC_{Max} (%)	98	98	95	94
SoC_{Swing} (%)	97	92	82	92
$\dot{v}_{Fl}$ (l/h)	0	0	0	0
$T_{Zelle,Max}$ (°C)	43	43	39	42

Tabelle 6.12: Die wichtigsten Parameter der Extremdesigns von EA200

Designnummer	**3**	**96**	**137**	**200**
Nominelle nutzbare Energie $E_{Swing,1C}$ (kWh)	7,29	7,29	7,24	7,29
Simulierte nutzbare Energie E_{Sim} (kWh)	7,03	7,05	7,01	7,03
Nomineller Energieinhalt E_{Nom} (kWh)	7,9	8,22	8,53	7,9
Batterievolumen V_{Bat} (l)	55	48	66	61
Volumetrische Energiedichte w (Wh/l)	143	170	129	129
Batteriepreis K_{tot} ($)	4816	4975	5043	4748
Energetischer Batteriepreis K_{kWh} ($/kWh)	609	605	591	601
n_S	75	78	81	75
n_P	1	1	1	1
Modulkonfiguration	15s1p	13s1p	27s1p	25s1p
SoC_{Min} (%)	6	11	14	6
SoC_{Max} (%)	98	99	98	98
SoC_{Swing} (%)	92	88	84	92
$\dot{v}_{Fl}$ (l/h)	0	0	0	0
$T_{Zelle,Max}$ (°C)	43	42	40	43

6.10 Zur optimalen Batteriekonfiguration für den BMW i3

Die Auswahl der Best Designs erfolgt aus den paretooptimalen Designs des Optimierungsalgorithmus. Für die Optimierung des Batteriepacks für den BMW i3 auf Basis des nutzbaren Energieinhalts stellt die folgende Zusammenstellung von Diagrammen die verfügbaren Parameterbereiche auf den Paretofronten und das jeweils daraus ausgewählte Best Design dar (Abbildung 6.14 und Abbildung 6.15).

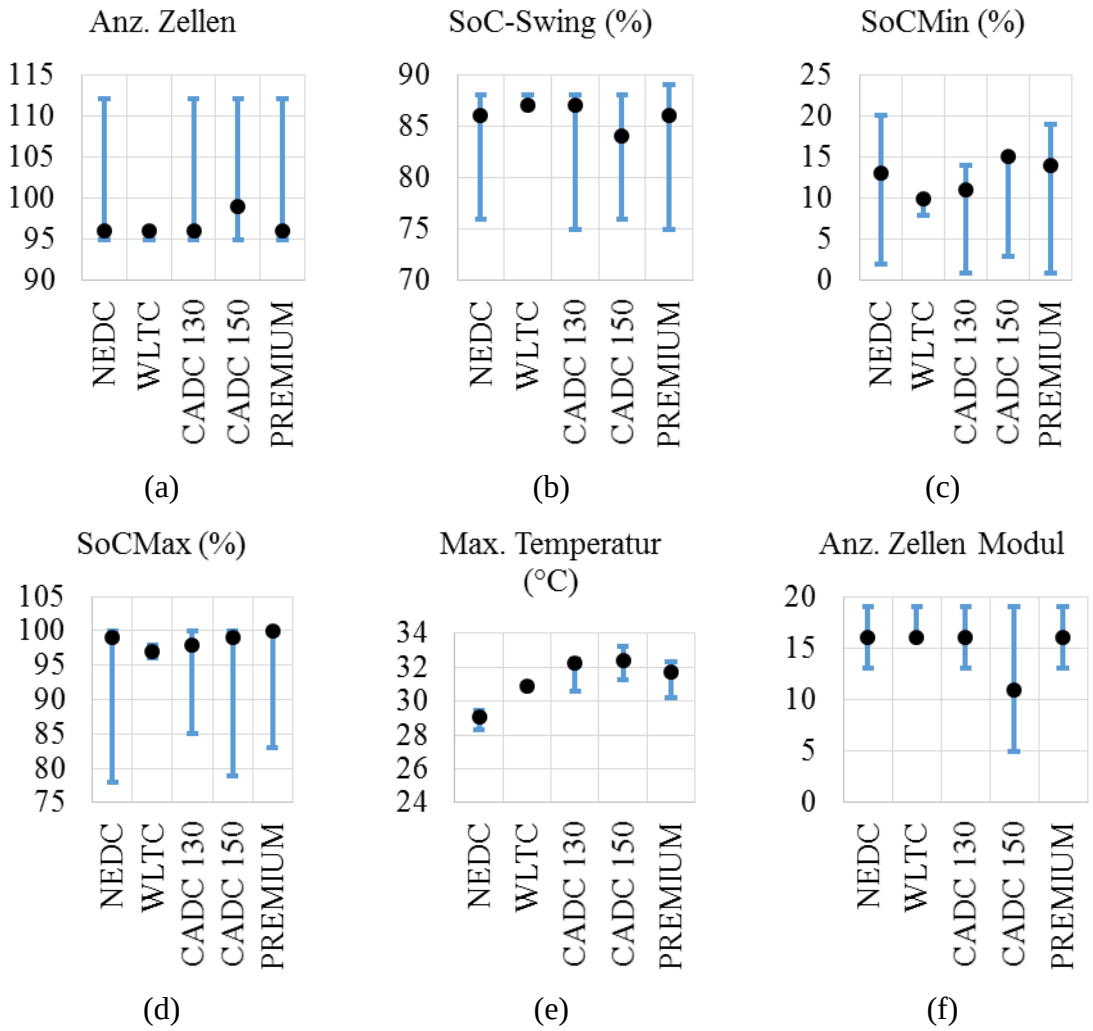


Abbildung 6.14: Parameterbereiche der Paretofronten der Batteriekonfigurationen für den BMW i3 auf Basis des nutzbaren Energieinhalts und daraus gewählte Best Designs (1/2).

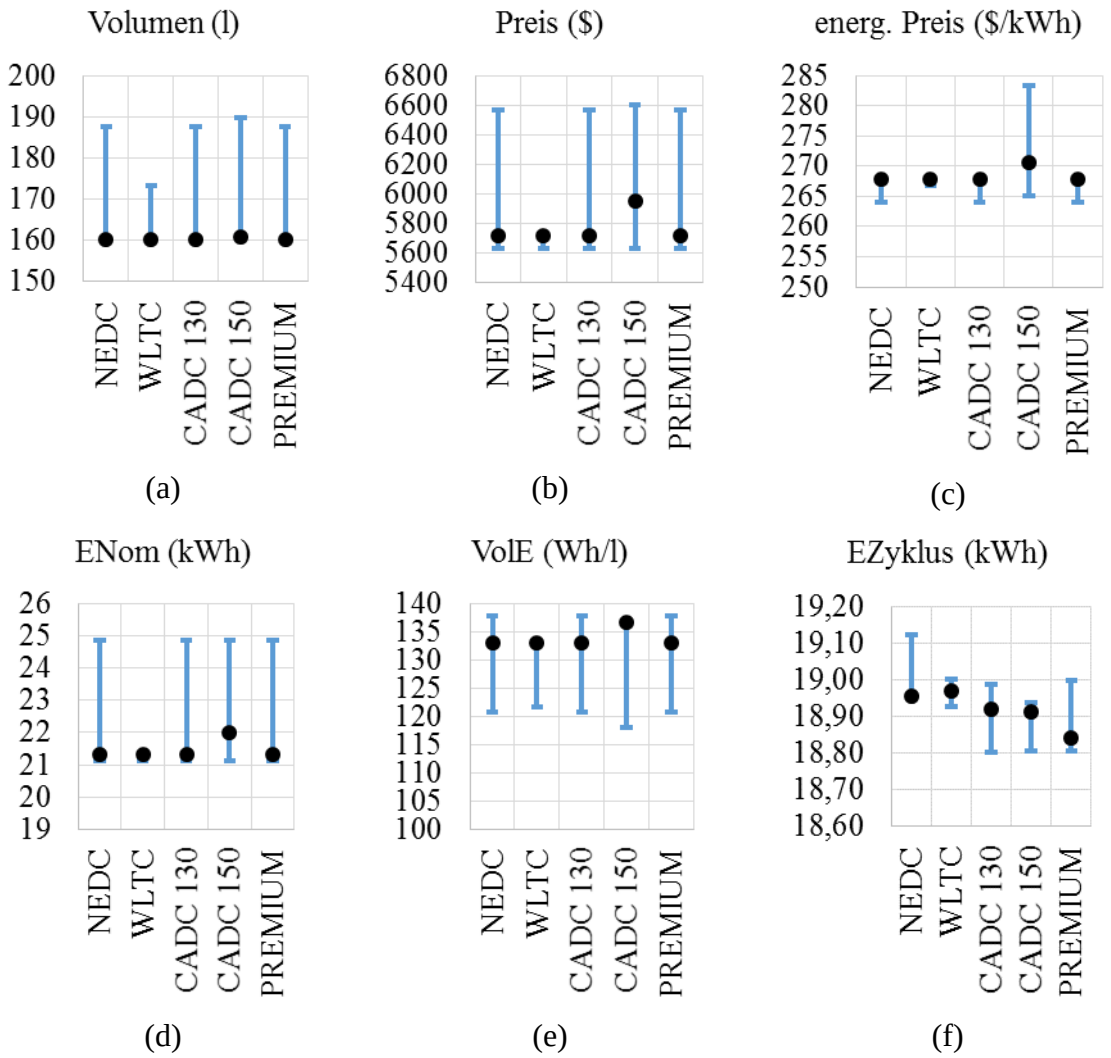


Abbildung 6.15: Parameterbereiche der Paretofronten der Batteriekonfigurationen für den BMW i3 auf Basis des nutzbaren Energieinhalts und daraus gewählte Best Designs (2/2)

Aus den obigen Abbildungen geht hervor, dass für den CADC 150 ebenfalls eine Konfiguration mit 96s1p möglich war. Diese schnitt allerdings bei der Anwendung der Bewertungsmethodik schlechter ab, als die gewählte 99s1p Konfiguration. Der Grund hierfür liegt in dem Verhalten des Optimierungsalgorithmus (EA600), der bei den Positionierungsflags des PA in diesem Fall die optimale Einstellung ebd. Flags nicht gefunden hat.

6.11 Zur optimalen Batteriekonfiguration für das sportliche Oberklassefahrzeug

Da in dem Anwendungsfall zum Vergleich der 400 V und der 800 V Spannungsebene festgestellt wurde, dass das Best Design im 400 V Fall ein Kühlsystem besitzt, während das 800 V Best Design keines hat, wurde das 400 V Best Design außerhalb der Optimierung gezielt ohne Kühlsystem simuliert und berechnet. Die sich daraus ergebende KPI Bewertung ist in Abbildung 6.16 zu sehen. Abbildung 6.17 zeigt die mechanische Integration dieser Batteriekonfiguration.

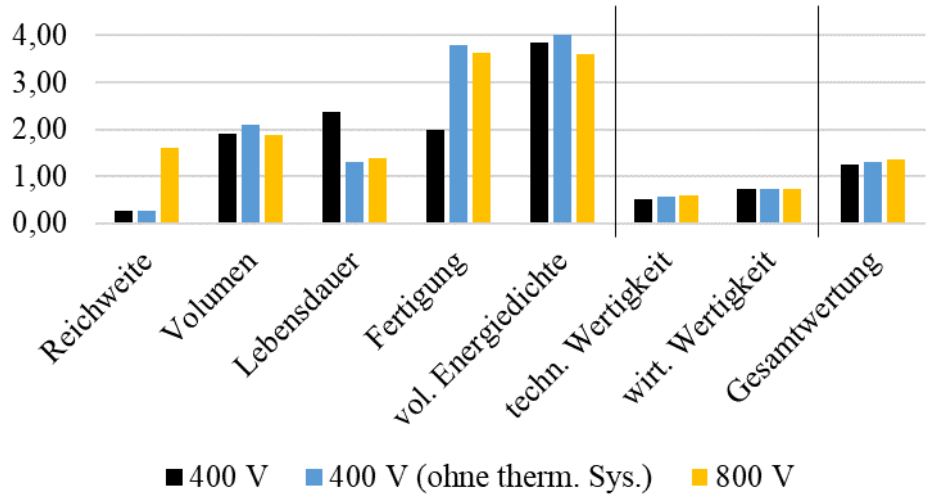


Abbildung 6.16: Vergleich der KPI Bewertungen, daraus resultierende technische Wertigkeit, wirtschaftliche Wertigkeit auf Basis des Batteriepreises und Gesamtwertung für die 400 und 800 V Best Designs mit zusätzlicher Bewertung des 400 V Best Designs ohne thermisches System.

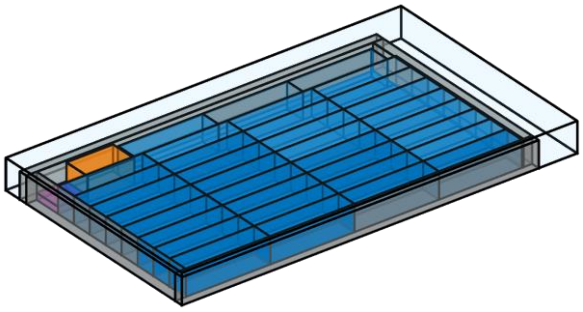


Abbildung 6.17: Mechanische Konfiguration des 400 V Best Designs für das sportliche Oberklassefahrzeug ohne thermisches System.

6.12 Zu den elektrischen Zellparametern

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit kommen vier verschiedene prismatische Batteriezellen zum Einsatz. Die wichtigsten Eigenschaften dieser Zellen sind in Tabelle 6.13 aufgeführt. Abbildung 6.18 stellt zusätzlich die OCVs der jeweiligen Zellen dar. Die OCV für 60 und 63 Ah Zelle sind gleich.

Tabelle 6.13: Zelleigenschaften der verschiedenen Batteriezellen im Vergleich

Zellbezeichnung	28 Ah	40 Ah	60 Ah	63 Ah
Zellformat	PHEV2	BEV1	BEV2	BEV2
$\boldsymbol{U_{Nom}}$ **(V)**	3,67	3,75	3,75	3,75
$\boldsymbol{C_{Nom}}$ **(Ah)**	28,64	41,8	60	65,5
$\boldsymbol{U_{Min}}$ **(V)**	2,8	2,8	2,5	2,8
$\boldsymbol{U_{Max}}$ **(V)**	4,15	4,2	4,15	4,15
Aktivmaterial	NMC-G	NMC-G	NMC-G	NMC-G
$\boldsymbol{R_{25°C,50\,\%\,SoC}}$ $(\boldsymbol{m\Omega})$	1,33	1,15	0,71	0,8
$\boldsymbol{I_{Max,DisCh,10\,s,25\,°C,50\,\%\,SoC}}$ **(A)**	335	380	360	189
$\boldsymbol{I_{Max,Ch,10\,s,25\,°C,50\,\%\,SoC}}$ **(A)**	180	239	189	189
$\boldsymbol{K_{Zelle}}$ ($)	20,6	30	50	50

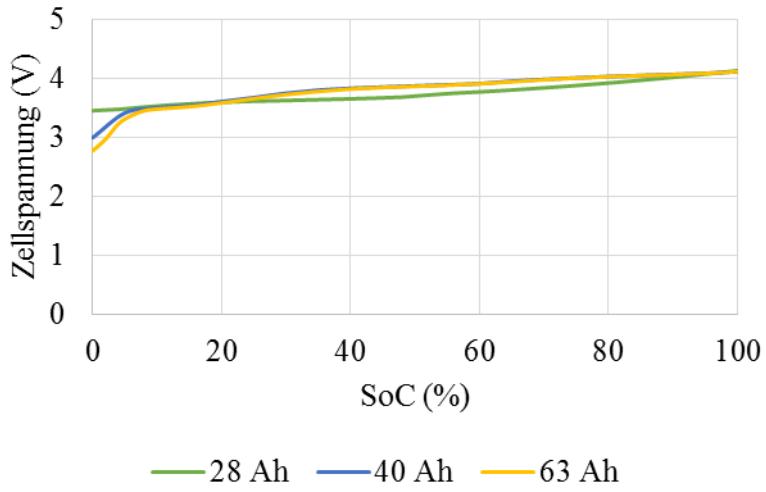


Abbildung 6.18: Leerlaufspannungsverläufe für drei verschiedene Li-Ionen Zellen mit unterschiedlichem Format und Kapazität.

7 Literaturverzeichnis

ALBERS, ALBERT; SPADINGER, MARKUS; WAGNER, DANIEL (2015): *Ein Beitrag zum automatischen Packaging von Energiespeichern in einer frühen Phase des Produktentstehungsprozesses*. In: Daniel Roth, Wilhelm Bauer und Hansgeorg Binz (Hg.): Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2015.

AMARAN, SATYAJITH; SAHINIDIS, NIKOLAOS V.; SHARDA, BIKRAM; BURY, SCOTT J. (2014): *Simulation optimization.* A review of algorithms and applications. In: *Journal of Operations Research* 12 (4), S. 301–333. DOI: 10.1007/s10288-014-0275-2.

ANDERMAN, MENAHEM (2014): *The Tesla Battery Report.* Tesla Motors: Battery Technology, Analysis of the Gigafactory, and the Automakers' Perspectives. Hg. v. Total Battery Consulting Inc. Online verfügbar unter http://doc.xueqiu.com/1493d8803372d3fd67cb5c51.pdf, zuletzt geprüft am 17.11.2017.

ANDERMAN, MENAHEM (2016): *xEV Expansion, Technology and Market Outlook*. Advanced Automotive Battery Conference 2016. Total Battery Consulting, Inc. Detroit, 15.06.2016.

ANDERMAN, MENAHEM (2017): *The Tesla Battery Report.* Tesla Motors: Battery Technology, Analysis of the Gigafactory and Model 3, and the Automakers' Perspectives. Hg. v. Total Battery Consulting Inc. Online verfügbar unter https://www.totalbatteryconsulting.com/industry-reports/Tesla-report/Extract-from-the-Tesla-Battery-Report.pdf, zuletzt geprüft am 17.11.2017.

ANDRÉ, MICHEL (2004): *The ARTEMIS European driving cycles for measuring car pollutant emissions*. In: *The Science of the total environment* 334-335, S. 73–84. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2004.04.070.

ANDRÉ, MICHEL; JOUMARD, ROBERT; VIDON, ROBERT; TASSEL, PATRICK; PERRET, PASCAL (2006): *Real-world European driving cycles, for measuring pollutant emissions from high- and low-powered cars*. In: *Atmospheric Environment* 40 (31), S. 5944–5953. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2005.12.057.

ANDREA, DAVIDE (2010): *Battery management systems for large lithium-ion battery packs*. Boston: Artech House.

ARORA, SHASHANK; SHEN, WEIXIANG; KAPOOR, AJAY (2015): *Designing a Robust Battery Pack for Electric Vehicles Using a Modified Parameter Diagram*. Warrendale, Pennsylvania: SAE International.

AUDI MEDIACENTER (2015): *Audi battery technology - Batterietechnologien*. Hg. v. Audi AG. online. Online verfügbar unter https://www.audi-mediacenter.com/de/pressemappen/audi-battery-technology-batterietechnologien-5114, zuletzt geprüft am 15.12.2015.

BANDHAUER, TODD; GARIMELLA, SRINIVAS; FULLER, THOMAS (2011): *A Critical Review of Thermal Issues in Lithium-Ion Batteries*. In: *Journal of The Electrochemical Society* (158), S. R1-R25. Online verfügbar unter http://jes.ecsdl.org/content/158/3/R1.full.pdf+html.

BARNETT, BRIAN; REMPEL, JANE; HYUNG, YOOEUP (2013): *PHEV Battery Cost Assessment*. Hg. v. TIAX LLC. Online verfügbar unter http://energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f13/es001_barnett_2013_o.pdf, zuletzt geprüft am 22.05.2015.

BECKER, JAN (2017a): *Flexible Dimensionierung und Optimierung hybrider Lithium-Ionenbatteriespeichersysteme mit verschiednenen Auslegungszielen*. Dissertation. RWTH Aachen. Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik. Online verfügbar unter http://publications.rwth-aachen.de/record/707501/files/707501.pdf.

BECKER, JAN (2017b): *Dimensioning and Optimization of (Hybrid) Li-Ion Batteries*. Doktorandenvorträge ISEA - RWTH Aachen. Lehrstuhl für Elektrochemische Energiewandlung und Speichersystemtechnik, 22.09.2017.

BEHR, LUKAS; ZIMMERMANN, ULRICH; TRINKERT, STEFAN; KRUSE, THOMAS; REES, STEPHAN; BRÖCKEL, FRIEDHELM; XIE, JIAN (2016): *Increased efficiency in the calibration process of automotive Li-ion battery systems*. In: Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart - FKFS (Hg.): 16th Stuttgart International Symposium. Automotive and Engine Technology, Bd. 1. Stuttgart, 03/2016. 2 Bände. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 101–115.

BINE INFORMATIONSDIENST (2017): *Professor Dr. Martin Winter: Eine Million E-Autos bis 2025 machbar*. Hg. v. Heindl Server GmbH. emobilserver.de. Online verfügbar unter http://www.emobilserver.de/elektro-magazin/emobil-interview/interview/professor-dr-martin-winter-eine-million-e-autos-bis-2025-machbar.html, zuletzt geprüft am 15.03.2017.

BIOAGE GROUP (2014a): *Driving the VW e-Golf; strategy, assembly in Wolfsburg, Braunschweig battery plant*. Hg. v. Green Car Congress. Online verfügbar unter http://www.greencarcongress.com/2014/07/20140721-egolf.html, zuletzt geprüft am 22.02.2016.

BIOAGE GROUP (2014b): *USABC reopens 4 RFPIs for development of advanced high-performance batteries for start/stop, 48V HEV, PHEV and EVs*. Hg. v. Green Car Congress. Online verfügbar unter http://www.greencarcongress.com/2014/10/20141010-usabc.html, zuletzt geprüft am 20.05.2015.

BIRKE, PETER; SCHIEMANN, MICHAEL (2013): *Akkumulatoren.* Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft elektrochemischer Energiespeicher. München: Utz (Fachbuch).

BIRKL, C. R.; HOWEY, D. A.: *Model identification and parameter estimation for LiFePO4 batteries*. In: Hybrid and Electric Vehicles Conference 2013 (HEVC 2013). London, UK, 6-7 Nov. 2013.

BLOOMBERG NEW ENERGY FINANCE (2016): *Electric Vehicles To Be 35% Of Global New Car Sales By 2040*. PR Newswire. Online verfügbar unter http://www.prnewswire.com/news-releases/electric-vehicles-to-be-35-of-global-new-car-sales-by-2040-300225689.html, zuletzt geprüft am 26.02.2016.

BLUM, STEPHAN; RIEDEL, JÖRG (2004): *Mehrzieloptimierung durch evolutionäre Algorithmen*. Weimarer Optimierungs- und Stochastiktage. Weimar, 2004.

BMW AG: *Der BMW i3.* Informationsbroschüre. Hg. v. BMW AG. Online verfügbar unter https://m.bmw.de/content/dam/bmw/marketDE/m_bmw_de/new-vehicles/pdf/BMW_i3_Katalog.pdf.asset.1480437226874.pdf, zuletzt geprüft am 25.07.2017.

BORTFELDT, ANDREAS; WÄSCHER, GERHARD (2013): *Constraints in container loading – A state-of-the-art review*. In: *European Journal of Operational Research* 229 (1), S. 1–20. DOI: 10.1016/j.ejor.2012.12.006.

BRÜNGLINGHAUS, CHRISTIANE (2015): *Wie sich die Batterietechnik für Elektroautos entwickelt | Automobil- und Motorentechnik*. Hg. v. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH. Wiesbaden. Online verfügbar unter http://www.springerprofessional.de/wie-sich-die-batterietechnik-fuer-elektroautos-entwickelt/5695218.html, zuletzt geprüft am 24.04.2015.

BURKARD, RAINER ERNST; ZIMMERMANN, U. (2012): *Einführung in die Mathematische Optimierung*. Berlin: Springer Spektrum (Springer-Lehrbuch).

CHAIR OF PRODUCTION ENGINEERING OF E-MOBILITY COMPONENTS - RWTH AACHEN; VDMA - VERBAND DEUTSCHER MASCHINEN- UND ANLAGENBAU (2015): *Produktionsprozess einer Lithium-Ionen-Batteriezelle*. 2. Aufl. Unter Mitarbeit von Achim Kampker, Heiner Hans Heimes, Christoph Deutskens, Mathias Ordung, Eric Maiser und Sarah Michaelis. Hg. v. Chair of Production Engineering of E-Mobility Components - RWTH Aachen und VDMA - Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau. Aachen, Frankfurt am Main. Online verfügbar unter https://www.pem.rwth-aachen.de/global/show_document.asp?id=aaaaaaaaaaoqixv, zuletzt geprüft am 13.10.2015.

CHATTERLEY, MARK (2015): *Semi-solid Lithium-ion Batteries Could Hit Less Than $100 per Kilowatt-hour*. Hg. v. TransportEvolved.com. Littlecollie Ltd. Online verfügbar unter https://transportevolved.com/2015/07/07/semi-solid-lithium-ion-batteries-could-hit-less-than-100-per-kilowatt-hour/, zuletzt geprüft am 10.07.2015.

CHEN, DAFEN; JIANG, JIUCHUN; KIM, GI-HEON; YANG, CHUANBO; PESARAN, AHMAD (2016): *Comparison of different cooling methods for lithium ion battery cells*. In: *Applied Thermal Engineering* 94, S. 846–854. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.10.015.

CHOI, SEUNGDON (2016): *Advances in High-Energy Density Lithium-ion Polymer Battery for EV*. AABC Europe 2016. LG Chem Energy Solution Company, 01/2016.

CLUZEL, CELINE; DOUGLAS, CRAIG (2012): *Cost and performance of EV batteries*. Element Energy Limited. Cambridge. Online verfügbar unter http://www.element-energy.co.uk/wordpress/wp-content/uploads/2012/04/CCC-battery-cost_-Element-Energy-report_March2012_Public.pdf, zuletzt geprüft am 12.03.2015.

COIS, OLIVIER (2016): *Reducing Battery Specific Costs Usind Advanced Battery Management Systems*. AABC Europe 2016. Cambridge EnerTech. Mainz, 01/2016.

COLE, JAY (2015): *GM: Chevrolet Bolt Arrives In 2016, $145/kWh Cell Cost, Volt Margin Improves $3,500*. Hg. v. Inside EVs. Online verfügbar unter http://insideevs.com/gm-chevrolet-bolt-for-2016-145kwh-cell-cost-volt-margin-improves-3500/, zuletzt geprüft am 07.10.2015.

COOPER, ROBERT G. (2002): *Top oder Flop in der Produktentwicklung.* Erfolgsstrategien: von der Idee zum Launch. 1. Auflage. Weinheim: Wiley-VCH.

CORDOBA-ARENAS, ANDREA; ONORI, SIMONA; RIZZONI, GIORGIO (2015): *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, S. 791–808. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.12.048.

DIEZ, ARMIN; GOESMANN, HUBERTUS; HAUCK, AXELLE; ZACHAR, CHRISTIAN (2014): *Cell Connector.* Angemeldet durch Bayerishe Motoren Werke Aktiengesellschaft; Elring Klinger AG. Anmeldenr: 14/084,2013. Veröffentlichungsnr: US 2014/0069690 A1. Prioriätsdaten: DE 102011076624.3.

DITTES, FRANK-MICHAEL (2015): *Optimierung.* Wie man aus allem das Beste macht. Berlin: Springer Berlin Heidelberg (Technik im Fokus).

DR. ING. H.C. F. PORSCHE AG (Hg.) (2017): *Porsche Cayenne S E-Hybrid.* Enthusiasmus. Gesteigert. Online verfügbar unter http://www.porsche.com/germany/models/cayenne/cayenne-s-e-hybrid/, zuletzt geprüft am 09.03.2017.

ECKARDT, STEFFI (2015): *dSpace und RWTH Aachen ermöglichen virtuelle Batterieentwicklung*. Hg. v. elektroniknet.de. Weka Fachmedien GmbH. Online verfügbar unter http://www.elektroniknet.de/automotive/elektromobilitaet/artikel/123388/, zuletzt geprüft am 09.10.2015.

ECKER, MADELEINE; GERSCHLER, JOCHEN B.; VOGEL, JAN; KÄBITZ, STEFAN; HUST, FRIEDRICH; DECHENT, PHILIPP; SAUER, DIRK UWE (2012): *Development of a lifetime prediction model for lithium-ion batteries based on extended accelerated aging test data*. In: *Journal of Power Sources* 215, S. 248–257. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2012.05.012.

ECKER, MADELEINE; SAUER, DIRK UWE (2013): *8. Batterietechnik Lithium-Ionen-Batterien*. In: *MTZ Motortech Z* 74 (1), S. 66–70. DOI: 10.1007/s35146-013-0014-9.

EGHTESSAD, MARJAM (2014): *Optimale Antriebsstrangkonfigurationen für Elektrofahrzeuge*. 1. Aufl. Herzogenrath: Shaker (Schriftenreihe des Instituts für Fahrzeugtechnik TU Braunschweig, 35).

EHRLENSPIEL, KLAUS; KIEWERT, ALFONS; LINDEMANN, UDO; MÖRTL, MARKUS (2014): *Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren.* Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung. 7. Aufl. 2014. Berlin, Heidelberg: Imprint: Springer Vieweg (VDI-Buch).

EHRLENSPIEL, KLAUS; MEERKAMM, HARALD (2013): *Integrierte Produktentwicklung.* Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 5., überarb. und erw. Aufl. München: Hanser.

EICHNER, TANJA (2014): *Degradationen in Lithium-Ionen-Batterien unter Anforderungen im automobilen Umfeld*. Dissertation. Universität Ulm, Ulm. Fakultät für Naturwissenschaften.

EIGNER, MARTIN; ROUBANOV, DANIIL; ZAFIROV, RADOSLAV (Hg.) (2014): *Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung*. Berlin: Springer Vieweg.

EINHORN, MARKUS; CONTE, FIORENTINO VALERIO; KRAL, CHRISTIAN; FLEIG, JÜRGEN (2013): *Comparison, Selection, and Parameterization of Electrical Battery Models for Automotive Applications*. In: *IEEE Trans. Power Electron.* 28 (3), S. 1429–1437. DOI: 10.1109/TPEL.2012.2210564.

Norm SAE J 2464, 11.06.2009: *Electric and Hybrid Electric Vehicle Rechargeable Energy Storage System (RESS) Safety and Abuse Testing*.

ISO 6469-3, 01.12.2011: *Electrically propelled road vehicles - Safety specifications - Part 3: Protection of persons against electric shock.*

ISO/PAS 19295, 01.04.2016: *Electrically propelled road vehivles - Specification of voltage sub-classes for voltage class B.*

Werknorm MBN LV 123, 03-2014: *Elektrische Eigenschaften und elektrische Sicherheit von Hochvolt-Komponenten in Kraftfahrzeugen - Anforderungen und Prüfungen*, zuletzt geprüft am 21.07.2017.

Vornorm DIN SPEC 91252, 01/2011: *Elektrische Straßenfahrzeuge - Batteriesysteme - Abmessungen für Lithium-Ionen-Zellen*, zuletzt geprüft am 12.03.2015.

Richtlinie VDI 2206, 06/2004: *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*.

EUROPÄISCHE ZENTRALBANK (2017): *Wechselkurse Euro in USD 1999-2017*. Online verfügbar unter https://www.ecb.europa.eu/stats/policy_and_exchange_rates/euro_reference_exchange_rates/html/usd.xml, zuletzt geprüft am 15.02.2017.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY; EUROPEAN TOPIC CENTRE FOR AIR POLLUTION AND CLIMATE CHANGE MITIGATION (2018): *Annual European Union greenhouse gas inventory 1990-2016 and inventory report 2018*. Hg. v. European Environment Agency (EEA Report/2018). Online verfügbar unter https://www.eea.europa.eu/publications/european-union-greenhouse-gas-inventory-2018, zuletzt geprüft am 30.11.2018.

FAHLBUSCH, ECKHARD (Hg.) (2014): *Batterien als Energiespeicher*. 1., Aufl., neue Ausg. Berlin: Beuth (Beuth Wissen).

FANSLAU, TOBIAS; BORTFELDT, ANDREAS (2010): *A Tree Search Algorithm for Solving the Container Loading Problem*. In: *INFORMS Journal on Computing* 22 (2), S. 222–235. DOI: 10.1287/ijoc.1090.0338.

FATHABADI, HASSAN (2014): *A novel design including cooling media for Lithium-ion batteries pack used in hybrid and electric vehicles*. In: *Journal of Power Sources* 245, S. 495–500. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2013.06.160.

FINK, HOLGER; FETZER, JOACHIM (2014): *Li-Ionen-Batterie.* Wege zur Verbesserung der Schlüsselkomponente der Elektromobilität. In: Der Antrieb von morgen. 9. MTZ-Fachtagung. 9. MTZ-Fachtagung. Wolfsburg. ATZlive.

FINK, HOLGER; REES, STEPHAN (2015): *2. Generation Li-Ionen-Batteriesysteme.* Technikttrends und KPIs. 10. MTZ Fachtagung. ATZlive. Wolfsburg, 27.01.2015.

FRANK, FELIX; PAN, HANG (2017): *Designing Crash Frames for High-Voltage Batteries at an Early Development Stage*. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/334233642_Designing_Crash_Frames_for_High-Voltage_Batteries_at_an_Early_Development_Stage.

FRANK, FELIX; WILHELM, JÖRG; LÖW, CHRISTIAN; LORENZ, LISA; SCHRAMM, DIETER (2016a): *Optimierung von Hochvolt-Batterien für automobile Anwendungen mit Hilfe ther-*

mischer und elektrischer Modelle. In: Heike Proff und Thomas Fojcik M. (Hg.): Individual, Integrated and Connected Products and Services in Mobility. 8. Wissenschaftsforum. Wiesbaden: Springer Gabler.

FRANK, FELIX; WILHELM, JÖRG; SCHRAMM, DIETER (2016b): *Influencing Factors on High-Voltage Battery Design for Mobile Applications*. In: Carsten Hoff und Ottmar Sirch (Hg.): Elektrik/Elektronik in Hybrid- und Elektrofahrzeugen und elektrisches Energiemanagement VII. Renningen: Expert (Haus der Technik - Fachbuchreihe, 142), S. 225–245.

FRANK, FELIX; WILHELM, JÖRG; SCHRAMM, DIETER (2017): *SoC-Swing based Optimization of Automotive Batteries using Simulations*. Hg. v. VDI - Verein Deutscher Ingenieure. Bonn (Electronics in Vehicles (ELIV)).

FRIESKE, BENJAMIN; KLÖTZKE, MATTHIAS; KREYENBERG, DANNY; BIENGE, KATRIN; HILLEBRAND, PHILIPP; HÜGING, HANNA ET AL. (2015): *Begleitforschung zu Technologien, Perspektiven und Ökobilanzen der Elektromobilität.* STROMbegleitung im Rahmen der Förderbekanntmachung Schlüsseltechnologien für die Elektromobilität (STROM) des BMBF. Hg. v. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH.

FUCHS, JOHANNES; HUBER, RAINER; LIENKAMP, MARKUS; RIEMENSCHNEIDER, THOMAS (2013): *Impact of Electrification on the Vehicle Concept – Potential of Determining Components and Technologies*. In: Markus Lienkamp (Hg.): Conference on Future Automotive Technology. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 119–146.

GALLAGHER, KEVIN G.; NELSON, PAUL A.; DEES, DENNIS W. (2011): *Simplified calculation of the area specific impedance for battery design*. In: *Journal of Power Sources* (196), S. 2289–2297. Online verfügbar unter http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775310017477?_rdoc=1&_fmt=high&_origin=gateway&_docanchor=&md5=b8429449ccfc9c30159a5f9aeaa92ffb#bib0010, zuletzt geprüft am 26.07.2017.

GENERAL MOTORS CO. (09.12.2011): *Volt Introduces Revolutionary Voltec System*. Online verfügbar unter http://media.gm.com/media/us/en/gm/news.detail.html/content/Pages/news/au/en/2011/Dec/1209_VoltIntroducesRevolutionaryVoltecSystem.html, zuletzt geprüft am 14.07.2017.

GENERAL MOTORS CO. (2016): *2016 Chevrolet Volt Battery System*. Online verfügbar unter https://media.gm.com/content/dam/Media/microsites/product/Volt_2016/doc/VOLT_BATTERY.pdf, zuletzt geprüft am 14.07.2017.

GIULIANI, STEFAN (2014): *VW e-Golf*. Hg. v. ADAC e.V. Online verfügbar unter https://www.adac.de/_ext/itr/tests/Autotest/AT5134_VW_e_Golf/VW_e_Golf.pdf, zuletzt geprüft am 04.04.2017.

HACKMANN, MARKUS; STANEK, ROBERT (2016): *Feasibility Study of a Cell Production in Germany on the Basis of New Cell Technologies*. Kraftwerk Batterie 2016. P3 automotive GmbH. Haus der Technik e.V. Münster, 04/2016.

HAWKINS, ED (2018): *Warming stripes*. Climate Lab Book. Online verfügbar unter http://www.climate-lab-book.ac.uk/2018/warming-stripes/, zuletzt geprüft am 30.08.2018.

HETTLER, STEFAN: *Automotive SPICE*. Hg. v. VDA Verband der Automobilindustrie e.V. Online verfügbar unter http://vda-qmc.de/software-prozesse/automotive-spice/, zuletzt geprüft am 23.06.2015.

HORIBA, TATSUO (2014): *Lithium-Ion Battery Systems*. In: *Proc. IEEE* 102 (6), S. 939–950. DOI: 10.1109/JPROC.2014.2319832.

HOWELL, DAVID (2014): *USA Hybrid and Electric Vehicles Market and R&D Activity*. Hg. v. U.S. Department of Energy. Washington DC.

Norm DIN ISO/IEC 15504, 04/2011: *Informationstechnik - Prozess-Assessment - Teil 1-4*.

INTERNATIONAL MONETARY FUND (2017): *Prices, Production and Labor selected indicators.* United States. Online verfügbar unter http://data.imf.org/regular.aspx?key=60998113, zuletzt geprüft am 15.02.2017.

IPCC (2014): *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability.* Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Hg. v. Christopher B. Field, Vincente R. Barros, David Jon Dokken, Katharine J. Mach, Michael D. Mastrandrea, T. Eren Bilir, et al. Cambridge University Press. New York.

IT-TIMES (Hg.) (2017): *Tesla Motors stellt auch in 2016 das meistverkaufte Elektroauto - Nissan und BYD auf den Plätzen 2 und 3*. Online verfügbar unter http://www.it-times.de/news/tesla-motors-stellt-auch-in-2016-das-meistverkaufte-elektroauto-nissan-und-byd-auf-den-platzen-2-und-3-122460/, zuletzt geprüft am 19.07.2017.

JARRETT, ANTHONY; KIM, IL YONG (2014): *Influence of operating conditions on the optimum design of electric vehicle battery cooling plates*. In: *Journal of Power Sources* 245, S. 644–655. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2013.06.114.

JECKEL, ALFRED (2016): *Thermische Herausforderungen der Li Ionen Batterien*. VDI Wissensforum. Daimler AG. Filderstadt, 11/2016.

JOSSEN, ANDREAS; WEYDANZ, WOLFGANG (2006): *Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen.* 36 Tabellen. 1. Aufl. Neusäß: Ubooks.

JU, FENG; WANG, JUNWEN; LI, JINGSHAN; XIAO, GUOXIAN; BILLER, STEPHAN (2013): *Virtual Battery.* A Battery Simulation Framework for Electric Vehicles. In: *IEEE Trans. Automat. Sci. Eng.* 10 (1), S. 5–15. DOI: 10.1109/TASE.2012.2203121.

JUNGNICKEL, DIETER (2014): *Optimierungsmethoden.* Eine Einführung. 3 Aufl. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag (Springer-Lehrbuch).

KALLRATH, JOSEF (2013): *Gemischt-ganzzahlige Optimierung.* Modellierung in der Praxis ; mit Fallstudien aus Chemie, Energiewirtschaft, Papierindustrie, Metallgewerbe, Produktion und Logistik. 2., überarb. u. erw. Aufl. Wiesbaden: Springer (Studium und Praxis).

KAMPKER, ACHIM (2014): *Elektromobilproduktion*. Aufl. 2014. Berlin: Springer Berlin.

KARLE, ANTON (2017): *Elektromobilität.* Grundlagen und Praxis. 2., aktualisierte Auflage. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag.

KASPER, ROLAND; SCHÜNEMANN, MARTIN (2012): *Elektrische Fahrantriebe.* Topologien und Wirkungsgrad. In: *MTZ Motortech Z* 73 (10), S. 802–807.

KATSIMPOURAS, THEODOROS (2016): *Akku der Basisversion des Model 3 kleiner als 60 kWh, Batteriekosten bereits unter $190/kWh*. Hg. v. TeslaMag.de. Online verfügbar unter http://teslamag.de/news/akku-basisversion-model3-kwh-batteriekosten-8423, zuletzt geprüft am 02.05.2016.

KEIL, PETER; JOSSEN, ANDREAS (2012): *Aufbau und Parametrierung von Batteriemodellen*. In: 19. DESIGN&ELEKTRONIK-Entwicklerforum Batterien und Ladekonzepte. München. Haar, München: Weka Fachmedien GmbH. Online verfügbar unter https://mediatum.ub.tum.de/doc/1162416/1162416.pdf, zuletzt geprüft am 04.05.2016.

KELLY, THOMAS D.; MATOS, GRECIA R. (2014): *Historical Statistics for Mineral and Material Commodities in the United States.* Supersedes Open-File Report 01-006. Unter Mitarbeit von David Buckingham, Carl DiFrancesco und Kenneth Porter. Hg. v. U.S. Geological Survey. Online verfügbar unter https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/historical-statistics/, zuletzt geprüft am 20.01.2017.

KETTERER, B.; KARL, D.; MÖST, D.; ULRICH, S. (2009): *Lithium-Ionen Batterien: Stand der Technik und Anwendungspotential in Hybrid-, Plug-In Hybrid- und Elektrofahrzeugen*. Wissenschaftlicher Bericht, Karlsruhe. Forschungszentrum Karlsruhe GmbH. Online verfügbar unter http://d-nb.info/1012521621, zuletzt geprüft am 24.02.2015.

KOCHHAN, ROBERT; FUCHS, STEPHAN; REUTER, BENJAMIN; BURDA, PETER; MATZ, STEPHAN; LIENKAMP, MARKUS (2014): *An Overview of Costs for Vehicle Components, Fuels and Greenhouse Gas Emissions*. Technische Universität München, München. Institute of Automotive Technology.

KOENIG (A2MAC1.COM), WILHELM PAUL (2017): *Abmessungen der Batteriepacks von BMW i3, Tesla Model S und BMW xDrive 40e von A2Mac1.com*, 17.11.2017. E-Mail Korrespondenz.

KÖNEKAMP, ANDREAS (2015): *The Tesla Model S Battery.* A Battery Pack Analysis Study. Hg. v. AVL List GmbH.

Richtlinie VDI 2225 Blatt 3, 11/1998: *Konstruktionsmethodik Technisch-wirtschaftliches Konstruieren Technisch-wirtschaftliche Bewertung*.

Richtlinie VDI 2225 Blatt 1, 11/1997: *Konstruktionsmethodik Technisch-wirtschaftliches Konstruieren Vereinfachte Kostenermittlung*.

KORTHAUER, REINER (2013): *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.

KRÜGER, IMKE; ANDERSSON, DANIEL; MODROW, NILS; DIEHL, STEPHAN (2014): *Simulative Optimization of Designs of Battery Cold Plates*. In: Peter Steinberg (Hg.): Wärmemanagement des Kraftfahrzeugs IX. Energiemanagement. Renningen: expert-Verlag (Haus der Technik - Fachbuchreihe, 135), S. 67–79. Online verfügbar unter http://www.modelon.com/fileadmin/user_upload/Products/Modelon/BL/2014_HdTWaermemanagement.pdf, zuletzt geprüft am 09.04.2015.

KUCHENBUCH, KAI (2012): *Methodik zur Identifikation und zum Entwurf packageoptimierter Elektrofahrzeuge*. Dissertation. Berlin: Logos-Verlag (AutoUni-Schriftenreihe, Bd. 25).

KUCHENBUCH, KAI; VIETOR, THOMAS; STIEG, JÜRGEN (2011): *Optimierungsalgorithmen für den Entwurf von Elektrofahrzeugen*. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 113 (7-8), S. 548–551. DOI: 10.1365/s38311-011-0072-x.

KULKARNI, AMBARISH; KAPOOR, AJAY; ARORA, SHASHANK (2015): *Battery Packaging and System Design for an Electric Vehicle*. Warrendale, Pennsylvania: SAE International.

KUSTOSCH, MARIO (2016): *Li-Ion Batteries for Next Generation EV*. eCarTec 2016. MunichExpo Veranstaltungs GmbH. München, 15.09.2016. Online verfügbar unter http://www.emove360.com/wp-content/uploads/2016/11/01_20161020_eCarTec_final_Mario_Kustosch.pdf, zuletzt geprüft am 03.03.2017.

LELIE, MARKUS; BRAUN, THOMAS; KNIPS, MARCUS; NORDMANN, HANNES; RINGBECK, FLORIAN; ZAPPEN, HENDRIK; SAUER, DIRK UWE (2018): *Battery Management System Hardware Concepts: An Overview*. In: *Applied Sciences* 8 (534), S. 1–27.

LI, JIANWEI; MAZZOLA, MICHAEL S. (2013): *Accurate battery pack modeling for automotive applications*. In: *Journal of Power Sources* 237, S. 215–228. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2013.03.009.

LINSE, C.; KUHN, R. (2015): *Design of high-voltage battery packs for electric vehicles*. In: Bruno Scrosati, Jürgen Garche und Werner Tillmetz (Hg.): Advances in battery technologies for electric vehicles. Cambridge [u. a.]: Woodhead Publishing (Woodhead publishing series in energy, 80), S. 245–263.

LIU, SHENG; TAN, WEI; XU, ZHIYUAN; LIU, XIWEI (2014a): *A tree search algorithm for the container loading problem*. In: *Computers & Industrial Engineering* 75, S. 20–30. DOI: 10.1016/j.cie.2014.05.024.

LIU, WEI (2013): *Introduction to hybrid vehicle system modeling and control*. Hoboken, N.J.: Wiley.

LIU, ZHONGMING; WANG, YUXIN; ZHANG, JUN; LIU, ZHIBIN (2014b): *Shortcut computation for the thermal management of a large air-cooled battery pack.* In: *Applied Thermal Engineering* 66 (1-2), S. 445–452. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.02.040.

LJUNG, LENNART (2009): *System identification : theory for the user*. 11. Aufl. 2 Bände: Prentice Hall (Prentice-Hall information and system sciences series).

MARIE, JULIEN (2016): *New Challenges for Increasing EV Range*. AABC Europe 2016. Renault, Electric Energy Storage Systems Department, 01/2016.

MCKINSEY & COMPANY (2017): *Electrifying insights: How automakers can drive electrified vehicle sales and profitability*. Hg. v. McKinsey & Company. Online verfügbar unter https://www.mckinsey.de/files/161223_mckinsey_e-vehicles.pdf, zuletzt geprüft am 10.01.2017.

MI, CHRIS; GAO, DAVID WENZHONG; MASRUR, M. ABUL (2014): *Hybridkraftfahrzeuge.* Grundlagen und Anwendungen mit Perspektiven für die Praxis. Weinheim: Wiley-VCH.

MIT TECHNOLOGY REVIEW (2011): *The Price of Batteries.* Although costs are uncertain, they will be key to the success of electric cars., S. 61. Online verfügbar unter http://www.technologyreview.com/sites/default/files/legacy/jan11_feature_electric_cars_p61.pdf, zuletzt geprüft am 19.05.2015.

MOCK, PETER (2010): *Entwicklung eines Szenariomodells zur Simulation der zukünftigen Marktanteile und CO2-Emissionen von Kraftfahrzeugen (VECTOR21)*. Dissertation. Universität Stuttgart. Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik.

MOUSAVI G., S. M.; NIKDEL, M. (2014): *Various battery models for various simulation studies and applications*. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 32, S. 477–485. DOI: 10.1016/j.rser.2014.01.048.

NELSON, P. A.; GALLAGHER, KEVIN G.; BLOOM, I.; DEES, D. W. (2012): *Modeling the Performance and Cost of Lithium-Ion Batteries for Electric-Drive Vehicles*. 2. Aufl. Hg. v. Argonne National Laboratory. U.S. Department of Energy; UChicago Argonne, LLC. Online verfügbar unter http://www.cse.anl.gov/batpac/files/BatPaC%20ANL-12_55.pdf, zuletzt geprüft am 07.05.2015.

NELSON, PAUL A.; AHMED, SHABBIR; GALLAGHER, KEVIN G.; DEES, DENNIS W. (2015): *Cost savings for manufacturing lithium batteries in a flexible plant*. In: *Journal of Power Sources* 283, S. 506–516. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2015.02.142.

NYKVIST, BJÖRN; NILSSON, MÅNS (2015): *Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles*. In: *Nature Climate change* 5 (4), S. 329–332. DOI: 10.1038/nclimate2564.

OGRZEWALLA, JÜRGEN (2012): *Traction Battery and Battery Control Unit Development*. In: SAE International (Hg.): SAE 2012 World Congress & Exhibition, 24.04.2012: SAE International, Warrendale, Pennsylvania (SAE Technical Paper Series).

OSTADI, AMIR; KAZERANI, MEHRDAD (2014): *Optimal Sizing of the Battery Unit in a Plug-in Electric Vehicle*. In: *IEEE Trans. Veh. Technol.* 63 (7), S. 3077–3084. DOI: 10.1109/TVT.2014.2302676.

PAPAGEORGIOU, M.; LEIBOLD M.; BUSS M. (2012): *Optimierung.* Statische, dynamische, stochastische Verfahren. 3., neu bearb. und erw. Aufl. Berlin: Springer.

PARK, JUNG-KI (2012): *Principles and applications of lithium secondary batteries*. Weinheim: Wiley-VCH.

PARREÑO, F.; ALVAREZ-VALDES, R.; TAMARIT, J. M.; OLIVEIRA, J. F. (2008): *A Maximal-Space Algorithm for the Container Loading Problem*. In: *INFORMS Journal on Computing* 20 (3), S. 412–422. DOI: 10.1287/ijoc.1070.0254.

PATRY, GAËTAN; ROMAGNY, ALEX; MARTINET, SÉBASTIEN; FROELICH, DANIEL (2015): *Cost modeling of lithium-ion battery cells for automotive applications*. In: *Energy Sci Eng* 3 (1), S. 71–82. DOI: 10.1002/ese3.47.

PAULY, CHRISTOPH (2016): *BMW i3 (94 Ah)*. Hg. v. ADAC e.V. Online verfügbar unter https://www.adac.de/_ext/itr/tests/Autotest/AT5542_BMW_i3_94_Ah/BMW_i3_94_Ah.pdf, zuletzt geprüft am 04.04.2017.

PERNER, A.; VETTER, J. (2015): *Lithium-ion batteries for hybrid electric vehicles and battery electric vehicles*. In: Bruno Scrosati, Jürgen Garche und Werner Tillmetz (Hg.): Advances in battery technologies for electric vehicles. Cambridge [u. a.]: Woodhead Publishing (Woodhead publishing series in energy, 80), S. 172–190.

PESARAN, AHMAD A.; KIM, GI-HEON; KEYSER MATT (2009): *Integration Issues of Cells into Battery Packs for Plug-In and Hybrid Electric Vehicles*. National Renewable Energy

Laboratory. Stavanger, Norwegen (EVS-24 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium).

PETRI, RALF (2015): *Technologiebasiertes Materialkostenmodell für Li-Ionen Batteriezellen in der Elektromobilität*. Essen: Vulkan-Verlag (Schriftenreihe des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der Technische Universität Braunschweig).

PETRI, RALF; GIEBEL, TOBIAS; ZHANG, BIN; SCHÜNEMANN, JAN-HINNERK; HERRMANN, CHRISTOPH (2015): *Material cost model for innovative li-ion battery cells in electric vehicle applications*. In: *Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech.* 2 (3), S. 263–268. DOI: 10.1007/s40684-015-0031-x.

PILLOT, CHRISTOPHE (2017): *Lithium ion battery raw material Supply & demand 2016-2025*. International Battery Seminar & Exhibit. Avicenne Energy. Fort Lauderdale, 22.03.2017.

PISINGER, DAVID (2002): *Heuristics for the container loading problem*. In: *European Journal of Operational Research* 2 (141), S. 382–392.

PLESCHAK, FRANZ; SABISCH, HELMUT (1996): *Innovationsmanagement*. Stuttgart: Schäffer-Poeschel (UTB für Wissenschaft, 8122).

PONTES, JOSE (2017): *Europe's Best-Selling Electric Car = Renault Zoe.* Europe Electric Car Leaders (Top 30 - December 2016). Hg. v. CleanTechnica.com. Sustainable Enterprises Media, Inc. Online verfügbar unter https://cleantechnica.com/2017/02/03/europes-best-selling-electric-car-renault-zoe/, zuletzt geprüft am 19.07.2017.

PROPFE, BERND (2015): *Marktpotentiale elektrifizierter Fahrzeugkonzepte unter Berücksichtigung von technischen, politischen und ökonomischen Randbedingungen*. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik. Online verfügbar unter http://d-nb.info/1093404264/34, zuletzt geprüft am 22.09.2016.

REIF, KONRAD (2010): *Hybridantriebe - Antriebsstrukturen und Betrieb*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner (Bosch Fachinformation Automobil).

REN, JIDONG; TIAN, YAJIE; SAWARAGI, TETSUO (2011): *A tree search method for the container loading problem with shipment priority*. In: *European Journal of Operational Research* 214 (3), S. 526–535. DOI: 10.1016/j.ejor.2011.04.025.

REZVANIZANIANI, SEYED MOHAMMAD; LIU, ZONGCHANG; CHEN, YAN; LEE, JAY (2014): *Review and recent advances in battery health monitoring and prognostics technologies for electric vehicle (EV) safety and mobility*. In: *Journal of Power Sources* 256, S. 110–124. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.01.085.

RIED, MICHAEL (2014): *Lösungsraumanalyse für Plug-In-Hybridfahrzeuge hinsichtlich Wirtschaflichkeit und Bauraumkonzept*. Dissertation. Universität Duisburg-Essen, Duisburg. Fakultät für Ingenieurwissenschaften. Online verfügbar unter http://d-nb.info/1053227035.

RIED, MICHAEL; BOLLIG, MARCUS; BERGER, HELMUT; SCHRAMM, DIETER (2012): *Conceptual design of plug-in hybrid electric vehicles – the challenge to balance efficiency, dynamics and interior space*. RWTH Aachen. Aachen (Hybrid and Electric Drivetrains).

RIED, MICHAEL; KELNBERGER, A.; GUMM, A.; JUNG, MERTEN; SCHRAMM, DIETER (2013): *Paramtrische Geometriemodelle für die Konzeptgestaltung elektrifizierter Fahrzeuge*. In:

Heike Proff (Hg.): Schritte in die künftige Mobilität. Technische und betriebswirtschaftliche Aspekte. Wiesbaden: Springer Gabler, S. 19–33.

ROTHGANG, SUSANNE; BAUMHÖFER, THORSTEN; VAN HOEK, HAUKE; LANGE, TOBIAS; DE DONCKER, RIK W.; SAUER, DIRK UWE (2015): *Modular battery design for reliable, flexible and multi-technology energy storage systems*. In: *Applied Energy* 137, S. 931–937. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.06.069.

ROTHGANG, SUSANNE; NORDMANN, HANNES; SCHAPER, CHRISTOPH; SAUER, DIRK UWE (2012): *Challenges in battery pack design*. In: IEEE (Hg.): Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion (ESARS). Bologna, Italy, S. 1–6.

RUETER, GERO (2017): *Elektroautos werden attraktiv*. Hg. v. Deutsche Welle. Online verfügbar unter http://dw.com/p/2Z7NM, zuletzt geprüft am 15.03.2017.

SABATIER, JOCELYN; FRANCISCO, JUNIOR MBALA; GUILLEMARD, FRANCK; LAVIGNE, LOIC; MOZE, MATHIEU; MERVEILLAUT, MATHIEU (2015): *Lithium-ion batteries modeling.* A simple fractional differentiation based model and its associated parameters estimation method. In: *Signal Processing* 107, S. 290–301. DOI: 10.1016/j.sigpro.2014.06.008.

SABATIER, JOCELYN; MERVEILLAUT, MATHIEU; FRANCISCO, JUNIOR MBALA; GUILLEMARD, FRANCK; PORCELATTO, DENIS (2014): *Lithium-ion batteries modeling involving fractional differentiation*. In: *Journal of Power Sources* 262, S. 36–43. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.02.071.

SAKTI, APURBA; FUCHS, ERICA R.H.; MICHALEK, JEREMY J.; GALLAGHER, KEVIN G.; WHITACRE, JAY F. (2016): *Consistency and Robustness in Forecasting for Emerging Technologies.* The Case of Li-ion Batteries for Electric Vehicles. In: *SSRN Journal. DOI:* 10.2139/ssrn.2868386.

SAKTI, APURBA; MICHALEK, JEREMY J.; FUCHS, ERICA R.H.; WHITACRE, JAY F. (2015): *A techno-economic analysis and optimization of Li-ion batteries for light-duty passenger vehicle electrification*. In: *Journal of Power Sources* 273, S. 966–980. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.09.078.

SAUER, DIRK UWE (2017): *Recent advancements in battery technologies and battery prices - myth and reality*. Electric & Electronik Systems in Hybrid and Electrical Vehicle and Electrical Energy Management (EEHE). Lehrstuhl für Elektrochemische Energiewandlung und Speichersystemtechnik. Bamberg, 17.05.2017.

SAW, L. H.; YE, Y.; TAY, A.A.O. (2014): *Electro-thermal analysis and integration issues of lithium ion battery for electric vehicles*. In: *Applied Energy* 131, S. 97–107. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.06.016.

SCHARER, MICHAEL (2002): *Quality Gate-Ansatz mit integriertem Risikomanagement : Methodik und Leitfaden zur zielorientierten Planung und Durchführung von Produktentstehungsprozessen*. Dissertation. Universität Karlsruhe, Karlsruhe. Insitut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik.

SCHMIDT, JAN PHILIPP (2013): *Verfahren zur Charakterisierung und Modellierung von Lithium-Ionen Zellen*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing (Schriften des Instituts für Werkstoffe der Elektrotechnik, Karlsruher Institut für Technologie, 25).

SCHNEIDER, DAVID; OCHSENFAHRT, DANIELA; BLUM, STEPHAN (2010): *Benchmark of Nature - inspired Optimization Algorithms in fields of single and multiobjective scopes*. Weimarer Optimierungs- und Stochastiktage. Weimar, 2010.

SCHOEWEL, FLORIAN; HOCKGEIGER, ELMAR (2014): *The High Voltage Batteries of the BMW i3 and BMW i8*. AABC 2014. BMW AG. Atlanta, 02/2014.

SCHRAMM, DIETER; DUDENHÖFFER, FERDINAND; DRIESCH, PATRICK; KANNSTÄTTER, TIMM (2017): *Plug-In-, Range-Extender- und Elektrofahrzeuge unter realen Mobilitätsumständen: Infrastruktur, Umweltbedingungen und Marktakzeptanz*. Schlussbericht Universität Duisburg-Essen. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Duisburg (FuE-Programm "Erneuerbar Mobil" des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB)).

SCHRAMM, DIETER; KOPPERS, MARTIN (2014): *Das Automobil im Jahr 2025.* Vielfalt der Antriebstechnik. Wiesbaden: Springer Vieweg.

SCHUMACHER, AXEL (2013): *Optimierung mechanischer Strukturen.* Grundlagen und industrielle Anwendungen. 2., aktual. u. erg. Aufl. 2013. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.

SEIDEL, MICHAEL (2005): *Methodische Produktplanung.* Grundlagen, Systematik und Anwendung im Produktentstehungsprozess. Dissertation. Universität Fridericiana Karlsruhe, Karlsruhe. Institut für Rechneranwendung in Planung und Konstruktion. Online verfügbar unter www.ksp.kit.edu/download/1000003141, zuletzt geprüft am 15.06.2015.

SEVERINO, BERNARDO; GANA, FELIPE; PALMA-BEHNKE, RODRIGO; ESTÉVEZ, PABLO A.; CALDERÓN-MUÑOZ, WILLIAMS R.; ORCHARD, MARCOS E. ET AL. (2014): *Multi-objective optimal design of lithium-ion battery packs based on evolutionary algorithms*. In: *Journal of Power Sources* 267, S. 288–299. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.05.088.

SILVESTRO, D. (2013): *Tesla Model S Performance*. Hg. v. ADAC e.V. Online verfügbar unter https://www.adac.de/_ext/itr/tests/Autotest/AT5022_Tesla_Model_S_Performance/Tesla_Model_S_Performance.pdf, zuletzt geprüft am 04.04.2017.

SMITH, JOSHUA; HINTERBERGER, MICHAEL; HABLE, PETER; KOEHLER, JUERGEN (2014): *Simulative method for determining the optimal operating conditions for a cooling plate for lithium-ion battery cell modules*. In: *Journal of Power Sources* 267, S. 784–792. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.06.001.

SPINNINGMAGNETS [NICKNAME] (2017): *Salvaged EV cells index: Leaf, Volt, Tesla, Zero, etc [Disskussionstitel]*. Forenbeitrag vom 24.07.2017. Online verfügbar unter https://endless-sphere.com/forums/viewtopic.php?t=89680, zuletzt geprüft am 23.07.2018.

Technische Regel (TR) FMVSS 571.305 * Standard No. 305, 28.10.2013: *Standard No. 305; Electric-powered vehicles: electrolyte spillage and electrical shock protection*.

STATISTA GMBH (2012): *Preisentwicklung ausgewählter Rohstoffe in den Jahren von 2006 bis 2012 (in US-Dollar).* Online verfügbar unter https://de.statista.com/statistik/daten/studie/246395/umfrage/preisentwicklung-ausgewaehlter-rohstoffe/, zuletzt geprüft am 16.02.2017.

STATISTA GMBH (2016): *Durchschnittspreise ausgewählter mineralischer Rohstoffe in den Jahren 2010 bis 2015 (in US-Dollar).* Online verfügbar unter https://de.statista.com/statistik/daten/studie/260427/umfrage/durchschnittspreise-ausgewaehlter-mineralischer-rohstoffe/, zuletzt geprüft am 16.02.2017.

STATISTA GMBH (2017a): *Durchschnittlicher Preis für Kupfer* weltweit von Januar 2014 bis Dezember 2016 (in US-Dollar je Tonne).* Online verfügbar unter https://de.statista.com/statistik/daten/studie/665319/umfrage/durchschnittlicher-preis-fuer-kupfer-weltweit-monatlich/, zuletzt geprüft am 16.02.2017.

STATISTA GMBH (2017b): *Entwicklung des Aluminiumpreises* weltweit in den Jahren 1960 bis 2016 (in US-Dollar je Tonne).* Online verfügbar unter https://de.statista.com/statistik/daten/studie/432518/umfrage/aluminiumpreis-weltweit/, zuletzt geprüft am 16.02.2017.

STATISTISCHES BUNDESAMT (2016): *Produzierendes Gewerbe.* Kostenstruktur der Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden. Hg. v. Statistisches Bundesamt (Fachserie 4, Reihe 4.3). Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/IndustrieVerarbeitendesGewerbe/Strukturdaten/Kostenstruktur2040430147004.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 10.01.2016.

STATISTISCHES BUNDESAMT (2017): *Erzeugerpreisindizes gewerblicher Produkte: Deutschland, Jahre, Güterverzeichnis*. (GP2009 1-/3-/5-/6-/9-Steller/Sonderpositionen). Hg. v. Statistisches Bundesamt. Online verfügbar unter https://www-genesis.destatis.de/genesis/online;jsessionid=10BD3A034B17F64D5EA05B40C5B3F59D.tomcat_GO_2_1?operation=previous&levelindex=4&levelid=1487145310818&step=4, zuletzt geprüft am 15.02.2017.

STOPPEL, KAI (2015): *Zäher Fortschritt in der Forschung: Platzt der Traum vom Super-Akku für Autos?* Hg. v. n-tv Nachrichtenfernsehen GmbH. Online verfügbar unter http://www.n-tv.de/wissen/Platzt-der-Traum-vom-Super-Akku-fuer-Autos-article15809796.html, zuletzt geprüft am 01.09.2015.

DIN 43670, 1975-12: *Stromschienen aus Aluminium; Bemessung für Dauerstrom*.

DIN 43671, 1975-12: *Stromschienen aus Kupfer*.

SUN, HONGGUANG; WANG, XIAOHUI; TOSSAN, BRIAN; DIXON, REGAN (2012): *Three-dimensional thermal modeling of a lithium-ion battery pack.* In: *Journal of Power Sources* 206, S. 349–356. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2012.01.081.

SUNBEAM GMBH (2015): *Lux Research erwartet klare Preisvorteile für Panasonic und Tesla*. Hg. v. pv magazine. Online verfügbar unter http://www.pv-magazine.de/nachrichten/details/beitrag/lux-research-erwartet-klare-preisvorteile-fr-panasonic-und-tesla_100019225/, zuletzt geprüft am 20.05.2015.

Norm ISO/IEC 12207, 02/2008: *Systems and software engineering - Software lilfe cycle processes,* zuletzt geprüft am 23.06.2015.

THIELMANN, AXEL; SAUER, ANDREAS; WIETSCHEL, MARTIN (2015): *Produkt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030*. Hg. v. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI.

TONG, WEI; SOMASUNDARAM, KARTHIK; BIRGERSSON, ERIK; MUJUMDAR, ARUN S.; YAP, CHRISTOPHER (2015): *Numerical investigation of water cooling for a lithium-ion bipolar battery pack.* In: *International Journal of Thermal Sciences* 94, S. 259–269. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2015.03.005.

TOTAL BATTERY CONSULTING INC. (2016): *Battery Packs of Modern xEVs.* A Comprehensive Engineering Assessment - Extract. Hg. v. Total Battery Consulting Inc. Online verfügbar unter http://totalbatteryconsulting.com/industry-reports/Battery-packs-report/Extract-from-the-Battery-Pack-Report.pdf, zuletzt geprüft am 01.06.2016.

Technische Regel (TR) UNECE 100 * UNECE 100/REV 2, 08.12.2013: *Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to specific requirements for the electric powertrain*.

VDI/VDE INNOVATION + TECHNIK GMBH (Hg.) (2016): *PREMIUM.* Plug-In-, Range-Extender- und Elektrofahrzeuge unter realen Mobilitätsumständen: Infrastruktur, Umweltbedingungen und Marktakzeptanz. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Online verfügbar unter http://erneuerbar-mobil.de/projekte/premium, zuletzt geprüft am 17.12.2017.

VERGOSSEN, DAVID (2016): *Das Hochvolt-Batteriesystem des Audi R8 e-tron*. Batterietag NRW 2016. Audi AG. Haus der Technik e.V. Münster, 25.04.2016.

VOLKSWAGEN AG (2016): *Der e-Golf.* Technik und Preise Gültig für das Modelljahr 2017. Online verfügbar unter http://www.volkswagen-asw.de/content/medialib/vwd4/de/dialog/pdf/golf-a7/egolf_preisliste/_jcr_content/renditions/rendition.download_attachment.file/e-golf_preisliste.pdf, zuletzt geprüft am 25.07.2017.

WAHEED, ABDUL (2016): *Modellierung, Echtzeitsimulation und genaue Prognose der Lebensdauer und Kosten einer LFP-Batterie am Beispiel eines A- und C-Segment E-Autos*. Dissertation. Universität Duisburg-Essen, Duisburg. Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik.

WALLENTOWITZ, HENNING; FREIALDENHOVEN, ARNDT (2011): *Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges.* Technologien, Märkte und Implikationen. 2., überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden.

WANG, TAO; TSENG, K. J.; ZHAO, JIYUN; WEI, ZHONGBAO (2014): *Thermal investigation of lithium-ion battery module with different cell arrangement structures and forced air-cooling strategies*. In: *Applied Energy* 134, S. 229–238. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.08.013.

WÄSCHER, GERHARD; HAUßNER, HEIKE; SCHUMANN, HOLGER (2007): *An improved typology of cutting and packing problems*. In: *European Journal of Operational Research* 183 (3), S. 1109–1130. DOI: 10.1016/j.ejor.2005.12.047.

WERZ, ULRICH (2012): *Zellverbinder.* Angemeldet durch ElringKlinger AG am 02.02.2012. Veröffentlichungsnr: DE 10 2012 100 862 A1. Prioriätsdaten: DE 30 33 117 A1; DE 10 2008 018 204 A1; DE 10 2009 046 505 A1; DE 10 2009 058 723 A1; DE 10 2010 031 380 A1; DE 10 2010 031 457 A1; DE 20 2010 012 555 U1.

WINTERHAGEN, JOHANNES (2016): *Weniger Teile, weniger Arbeit, weniger Jobs?* Elektroautos werden anders gebaut als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor. Das stellt Hersteller

und Zulieferer vor große Herausvorderungen. In: *Frankfurter Allgemeine Zeitung* 2016, 29.11.2016.

WIPFLER, KLAUS (2015): *Lithium-Ionen Batterie.* Wege zur Verbesserung der Schlüsselkomponente der Elektromobilität. Fachkonferenz Zukunftmobil. Robert Bosch Battery Systems GmbH. Nürnberg, 02.07.2015.

WIRTSCHAFTSWOCHE (Hg.) (2015): *Autozulieferer: Angriff auf die Jobmaschine*. Online verfügbar unter http://tool.wiwo.de/wiwoapp/3d/Elektroauto/go.html, zuletzt aktualisiert am 11.12.2015, zuletzt geprüft am 16.12.2015.

WITZENHAUSEN, HEIKO (2015): *Spatially resolved electrical-thermal litium-ion battery pack simulation for real-time application in electric vehicles*. Kraftwerk Batterie 2015. ISEA - Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe, RWTH Aachen. Haus der Technik e.V. Aachen, 04/2015.

Global technical regulation No. 15 UNECE/Trans/180/Add.15, 12.05.2014: *Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure*. Online verfügbar unter https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29r-1998agr-rules/ECE-TRANS-180a15e.pdf, zuletzt geprüft am 17.12.2017.

XUE, NANSI (2014): *Design and Optimization of Lithium-Ion Batteries for Electric-Vehicle Applications*. Dissertation. University of Michigan, Michigan. Online verfügbar unter https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/107299/courtrun_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y, zuletzt geprüft am 03.03.2016.

XUE, NANSI; DU, WENBO; GRESZLER, THOMAS A.; SHYY, WEI; MARTINS, JOAQUIM R.R.A. (2014): *Design of a lithium-ion battery pack for PHEV using a hybrid optimization method*. In: *Applied Energy* 115, S. 591–602. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.10.044.

ZHANG, CHENG; LI, KANG; MCLOONE, SEAN; YANG, ZHILE (2014): *Battery Modelling Methods for Electric Vehicles.* A Review. In: 13th European Control Conference (ECC), 2014. Strasbourg, 24. - 27.06.2014. European Control Conference; ECC. Piscataway, NJ: IEEE, S. 2673–2678.

ZHAO, XIAOZHOU; BENNELL, JULIA A.; BEKTAŞ, TOLGA; DOWSLAND, KATH (2016): *A comparative review of 3D container loading algorithms*. In: *Intl. Trans. in Op. Res.* 23 (1-2), S. 287–320. DOI: 10.1111/itor.12094.

ZHOU, WEI (2016): *Modellbasierte Auslegungsmethode von Temperierungssystemen für Hochvolt-Batterien in Personenkraftfahrzeugen*. Dissertation. RWTH Aachen, Aachen. Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA).