

Franziska Beste

**Thermisch-elektrische Analyse  
und Ableitung von Verbesserungs-  
maßnahmen für den elektrischen  
Antrieb eines Plug-In-Hybridfahrzeugs**



**Cuvillier Verlag Göttingen**  
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag



FRANZISKA BESTE (AUTOR)

**Thermisch-elektrische Analyse und Ableitung von Verbesserungsmaßnahmen  
für den elektrischen Antrieb eines Plug-In-Hybridfahrzeugs**





Franziska Beste

**Thermisch-elektrische Analyse  
und Ableitung von Verbesserungs-  
maßnahmen für den elektrischen  
Antrieb eines Plug-In-Hybridfahrzeugs**



**Cuvillier Verlag Göttingen**  
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag



### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2016

Zugl.: (TU) Braunschweig, Univ., Diss., 2016

**Dissertation an der Technischen Universität Braunschweig,  
Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik**

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2016

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

[www.cuvillier.de](http://www.cuvillier.de)

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2016

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-7369-9302-0

eISBN 978-3-7369-8302-1

## Kurzfassung

Im Zuge der steigenden Elektromobilität rücken Plug-in-Hybridfahrzeuge verstärkt in den Fokus der Forschung und der Entwicklung. Diese Antriebsstruktur gewinnt zunehmend an Bedeutung, da sie einen elektrischen sowie einen uneingeschränkten hybriden Betrieb ermöglicht. Mit dem Einsatz dieser komplexen Antriebsstrukturen wird ein anspruchsvolles Wärmemanagement, insbesondere für die Hochvoltsysteme, notwendig. Die Hochvoltkomponenten besitzen verschiedene Charakteristika, die aufgrund des thermisch-elektrischen Verhaltens beeinflusst werden. Diese Mechanismen der Bauteile hängen maßgeblich von der Einhaltung der optimalen Temperatur ab. Gleichzeitig müssen die realen Fahrzeugbedingungen zu einem frühen Zeitpunkt der Entwicklung beachtet werden. Ein gesamtheitliches Wärmemanagement ist erforderlich, um die Kernpunkte wie Energieverbrauch, Leistung, Lebensdauer, Kosten und Bauraum umzusetzen. Das aktuell eingesetzte thermische System basiert auf den Vorgaben der maximal kritischen Belastung. Dies schließt die Möglichkeit einer überdimensionierten Auslegung und eines erhöhten Energieverbrauchs ein. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Ansätze beinhalten hingegen eine bedarfsgerechte Kühlung abhängig von dem aktuellen Betriebszustand der jeweiligen Komponente. Diese Methode stellt sicher, dass die garantierte Lebensdauer der Komponente und ein minimaler Energieverbrauch für die Kühlung erreicht wird.

Für die Analyse und die Beurteilung der neuen Konzeption ist eine Fahrzeugmodellierung in dieser Abhandlung wesentlich. Infolgedessen wird eine Modellierung entworfen und detailliert beschrieben. Die Simulation ermöglicht eine Berechnung von definierten Stand- und Betriebsphasen des elektrischen Antriebsstrangs unter verschiedenen thermischen Randbedingungen. Auf Grundlage der resultierenden thermisch-elektrischen Signale der Komponenten kann eine prognostizierte Lebensdauerberechnung durchgeführt werden. Die Wechselwirkung der Komponenteneigenschaften mit dem Kühlsystem werden bewertet. Ein Versuchsträger und reale Messungen sind erforderlich für die Erfassung der Wärmeübergänge und für die Überprüfung der Signalgüte in den Berechnungen. Mit Hilfe der messtechnischen und simulativen Untersuchungen wird die Bestimmung von Wärmeverlusten und der Zuverlässigkeit in verschiedenen Fahrbereichen vorgenommen. Aufgrund der resultierenden Erkenntnisse werden die innovativen Maßnahmen auf der Systemebene in der Modellierung umgesetzt. Die Basis bilden die Lebensdauerindikatoren. Diese sind sowohl die Lebensdauererbräuche der Halbleiter als auch der Kapazitätsverlust der Batterie. Die prognostizierten Lebensdauerzustände werden genutzt, um dem Wärmemanagement nach definierten Zeitabschnitten aktuelle Vorgaben zu übermitteln. Unterschiedliche Auswirkungen der Algorithmen werden aufgezeigt. Die Konzeption liefert einen wertvollen Beitrag für die Verbesserung des thermischen Verhaltens der Bauteile und die Auswirkungen auf deren Lebensdauer.



## Abstract

With the increasing importance of hybrid and electrical vehicles for automotive manufacturers, the plug-in hybrid moves into focus for research and development. The plug-in powertrain enables the vehicle to drive electrically in urban traffic and long distance. A holistic thermal management is essential through the integration of this complex drivetrain, especially for the high voltage system.

There are many characteristics of the electrical components which are influenced by their thermal-electrical behavior. Hence these qualities are depending on the ability to ensure the ideal temperature for every part of the high voltage system. A holistic view on the high voltage components is essential to ensure key aspects like energy consumption, performance, lifetime, cost and package. Simultaneously the real life conditions of the vehicle have to be considered in an early stage of the thermal development.

The actual design of the thermal management system is based on the worst case usage of the vehicle. Actually this bares the possibility of overengineering and the waste of valuable energy. The new approaches are to have a cooling on demand system depending on the actual status of the component. This method makes sure that there will be no failure during the predicted lifetime of the powertrain and that the energy which is used for cooling will be minimized. This concept calculates the standstill and drive phases of the electrical powertrain under different thermal boundary conditions. With the resulting thermal-electrical signals of the components a lifetime calculation can be performed.

For the analysis and evaluation a simulation model of the powertrain is necessary. Consequently a simulation will be outlined and described. A prototype test vehicle for measurement of the actual signals is used to identify the heat transfer and verify the quality of the models. With the vehicle testing and the simulation method several drive situations were investigated to get waste heat and reliability of the high voltage components. The results were used to create the new innovative methods to focus on thermal and lifetime aspects and integrate it in the simulation model. Ageing indicators like the lifetime consumption of the semiconductors or the capacity loss of the battery are the base for this solution. The predicted lifetime conditions were used to adjust the thermal system in chronological steps. Different algorithms were created and used. Their influences on the component features and the cooling will be judged. This concept is a valued contribution to improve the thermal behavior of the high voltage components and the influence of temperature on reliability.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b>	<b>i</b>
<b>Abstract</b>	<b>ii</b>
<b>1 Einleitung und Zielsetzungen</b>	<b>1</b>
<b>2 Erkenntnisstand für die alternativen Antriebe</b>	<b>5</b>
2.1 Systemarchitektur eines Plug-In-Hybridfahrzeugs . . . . .	5
2.2 Elektrische und mechanische Antriebsleistungen . . . . .	9
2.3 Permanent erregte Synchronmaschinen . . . . .	11
2.4 Leistungselektroniken . . . . .	12
2.5 Lithium-Ionen-Eisenphosphat-Batterien . . . . .	16
2.5.1 Auswirkungen des Niedertemperaturverhaltens . . . . .	18
2.5.2 Mechanismen des Hochtemperaturverhaltens . . . . .	18
2.5.3 Erfassung des Alterungszustands eines LiFePO <sub>4</sub> Zellsystems . . . . .	20
2.6 Betrachtung weiterer Hochvoltkomponenten . . . . .	21
2.7 Stand der Technik zum Wärmemanagement der Hochvoltsysteme . . . . .	23
2.8 Anwendungen von Kühl- und Heizmethoden . . . . .	29
2.8.1 Wärmeübertragung in den eingesetzten Bauteilen . . . . .	30
2.8.2 Bedeutung der Kühlsystemauslegung . . . . .	32
<b>3 Beitrag für das Wärmemanagement</b>	<b>35</b>
3.1 Einfluss der thermischen Konditionierung auf die Alterungsmechanismen . . . . .	37
3.2 Innovative Konzeption für verschiedene Komponenten . . . . .	38
3.3 Vorgehensweise . . . . .	40
3.4 Experimentelle Bedingungen und die betrachteten Fahrzyklen . . . . .	42
3.5 Thermische Initialisierung des Antriebsstranges und empirische Alterungsbestimmungen . . . . .	44
<b>4 Erstellung eines Modells des Hochvoltsystems der thermisch-elektrischen Eigenschaften und der Alterung</b>	<b>45</b>
4.1 Anforderungen und Zweck der Modellierung . . . . .	45

4.2	Struktur der Gesamtmodellierung . . . . .	47
4.2.1	Definierte Annahmen der Modellierung . . . . .	49
4.3	Modellierung einer Synchronmaschine . . . . .	51
4.3.1	Thermisch-elektrisches Ersatzschaltbild von Rotor und Stator . . . . .	56
4.3.2	Bedarfsgerechte Kühlung in der rein elektrischen Fahrt . . . . .	59
4.4	Modellierung eines Drei-Phasen-Inverters . . . . .	60
4.4.1	Thermisches Ersatzschaltbild des Halbleiteraufbaus . . . . .	63
4.4.2	Lebensdauer- und Zuverlässigkeitsberechnung . . . . .	67
4.5	Modellierung eines Lithium-Ionen-Batteriesystems . . . . .	78
4.5.1	Thermisch-elektrisches Ersatzschaltbild des Zellsystems . . . . .	79
4.5.2	Identifikation des Alterungszustands des Zellsystems . . . . .	82
4.5.3	Auswirkungen des State of Health auf die elektrischen Zustände der Zellen . . . . .	83
4.5.4	Auswirkungen der kalendarischen und zyklischen Alterung auf den Ka- pazitätsverlust . . . . .	86
4.6	Modellierung eines Gleichspannungswandlers und des Niedervoltbordnetzes . .	90
4.7	Modellierung eines Ladegeräts . . . . .	91
4.8	Wertebereiche und Einschränkungen . . . . .	92
<b>5</b>	<b>Entwurf und Aufbau eines Versuchsträgers</b>	<b>94</b>
5.1	Anforderungen und Zweck der thermisch-elektrischen Messtechnik . . . . .	94
5.2	Thermische Sensorik für die Bestimmung der Stellgrößen und Validierung der Modellierung . . . . .	97
5.2.1	Bestimmung der thermischen Widerstände und der Wärmeübergänge in dem Stator . . . . .	98
5.2.2	Bestimmung der thermischen Widerstände und der Wärmeübergänge in den Halbleiterbrücken . . . . .	100
5.2.3	Bestimmung der thermischen Widerstände und der Wärmeübergänge in dem Zellsystem . . . . .	101
<b>6</b>	<b>Validierung der Modellierung und Analyse der ausgewählten Betriebszustände</b>	<b>103</b>
6.1	Bewertung der Systemmodellierung und der Einfluss auf die Signalgenauigkeit	103
6.1.1	Validierung der Betriebsstrategie . . . . .	104
6.1.2	Validierung der wesentlichen Hochvoltkomponenten . . . . .	105
6.2	Ladevorgang und thermische Grenzwertbetrachtung des Energiespeichers . . .	106
6.3	Auswirkungen der transienten Zyklen auf die Zustände des Hochvoltsystems .	108
<b>7</b>	<b>Realisierung und Bewertung der adaptiven thermischen Strategien</b>	<b>111</b>
7.1	Zuverlässigkeitsanforderungen und die Berechnung der Lebensdauerzustände .	112



7.2	Lebensdauerorientierte Konditionierung der Leistungselektronik . . . . .	114
7.2.1	Resultate der Autobahnfahrt und Konsequenzen der Erhöhung der Kühl- wassertemperatur . . . . .	118
7.2.2	Resultate im städtischen Verkehr und Auswirkung des Eingreifens . . .	119
7.3	Lebensdauerorientierte Konditionierung eines Energiespeichers . . . . .	121
7.3.1	Resultate der Autobahnfahrt und Konsequenzen der Erhöhung der Kühl- wassertemperatur . . . . .	125
7.3.2	Resultate in unkritischen Belastungsprofilen . . . . .	126
7.3.3	Resultate im städtischen Verkehr und Auswirkung des Eingreifens . . .	127
7.3.4	Dimensionierung der Stellgrößen für den Energiespeicher . . . . .	129
7.4	Vorteile der neuartigen Kühlalgorithmen . . . . .	131
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>135</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>147</b>
	<b>Nomenklatur</b>	<b>148</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>154</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>161</b>
<b>A</b>	<b>Thermische Eigenschaften der Kühlmedien</b>	<b>162</b>
<b>B</b>	<b>Zyklen für die Zuverlässigkeitsbestimmung</b>	<b>163</b>



# 1 Einleitung und Zielsetzungen

Die Gesetzgebung für den zulässigen Ausstoß von CO<sub>2</sub>-Emissionen für Personenkraftfahrzeuge setzt verbindliche Vorgaben. Die Regelung erlaubt in der europäischen Union pro Flotte einen durchschnittlichen Wert von 130 Gramm von CO<sub>2</sub> pro Kilometer bis 2015 und 95 Gramm bis 2020. Dies entspricht einen Kraftstoffverbrauch von 5.6 Liter beziehungsweise 4.9 Liter pro Kilometer. Die Bedeutung der Entwicklung von Fahrzeugen mit geringen Emissionen für die Automobilhersteller wird ersichtlich.

Mit einem Plug-In-Hybridfahrzeug wird gegenüber den rein elektrischen Fahrzeugen und dem Hybridfahrzeug eine längere elektrische Reichweite und ein hybridisches Fahren ermöglicht [1]. Für die Erhöhung der Reichweite und die Verbesserung des Kraftstoffverbrauchs muss der Gesamtwirkungsgrad optimal ausgenutzt und verbessert werden [2]. Das Hochvoltsystem eines Plug-In-Hybridfahrzeugs setzt sich beispielhaft aus einer Lithium-Ionen-Batterie, einer Synchronmaschine, einer Leistungselektronik, einem Gleichspannungswandler und einem Ladegerät zusammen. Diese Komponenten besitzen thermische Charakteristika, die bei der Integration in das Fahrzeug wesentlich sind und berücksichtigt werden müssen. Das Wärmemanagement besitzt aktuell die Aufgabe, die entstehende Wärme der Bauteile abzuführen und die Elemente auf die geeignete Temperatur zu konditionieren.

In diesem Zusammenhang besteht der Bedarf an Verbesserungen für eine effiziente Kühlung und Vorwärmung der Komponenten, bei gleichzeitiger Minimierung des Energiebedarfs der elektrischen Verbraucher. Jede Hochvoltkomponente besitzt ein thermisches Betriebsfenster, in dem die jeweilige Leistung am effizientesten ist. Für den Erhalt einer möglichst genauen Zustandsbeschreibung der Bauteile, wird eine gesamtheitliche Betrachtung von der Fahrzeugebene bis zur Materialebene der Einzelteile unter realen Einsatzbedingungen erforderlich.

Thermische und elektrische Modelle der Hochvoltkomponenten und des Verbrennungsmotors unter stationären und transienten Bedingungen wurden in letzten Jahren erstellt [3] [4]. Diese sind aktuell in Forschungs- und Entwicklungsbereichen bereits im Einsatz. Aufgrund der Komplexität der Hochvoltsystemebene und der Betriebszustände steigt bei den Plug-In-Hybriden die Wichtigkeit einer gesamtheitlichen thermischen Fahrzeugbetrachtung. Des Gleichen sind Wechselwirkungen im Hochvoltsystem ausschlaggebend für die elektrische Effizienz des gesamten Fahrzeugs. In der Entwicklung muss frühzeitig eine simulative Analyse erfolgen, um die thermischen Anforderungen für die Fahrzeugintegration definieren zu können. Im Rahmen der Simulation sollen die Teilsysteme der Hochvoltsystemebene instationär zusammenschal-



tet werden, damit in warmen und kalten Umgebungsbedingungen die elektrischen Betriebszustände im realen Verkehrsgeschehen energetisch beschrieben werden können.

Die richtige Konditionierung der einzelnen Komponenten und die energetische Effizienz stellen konkurrierende Ziele dar. Welche Kühl- und Heizleistung für die Bauteile im realen Betrieb zur Verfügung gestellt werden muss, ist eine Frage, die nur in Abhängigkeit der Zustände, unter anderen den Wärmeverlusten, beantwortet werden kann. Um die anforderungsgerechte Konditionierung jedes Bestandteils zu gewährleisten, muss der Einsatz von Nebenverbrauchern, wie den Pumpen, den Ventilen, dem Kältemittel-Wasser-Wärmetauscher (Chiller) und den Heizelementen (Positive Temperature Coeffizients), analysiert werden.

Für die Variation von Fahrzyklen und der Umgebungsbedingungen ist eine Modellierung des Fahrzeuges sinnvoll. Eine Fahrzeugmodellierung ermöglicht eine zusätzliche Verbesserung des Verständnisses des Hochvoltsystems und kann die Durchführung von aufwendigen Fahrzeugmessungen reduzieren. Insbesondere für die Herleitung und Bewertung des neuen Ansatzes ist eine Simulation von großem Vorteil. Die Güte des Modells muss aufgezeigt und die Aussagefähigkeit bewiesen werden. Anhand von Fahrzeugmessungen muss eine Prüfung der Validität durchgeführt werden.

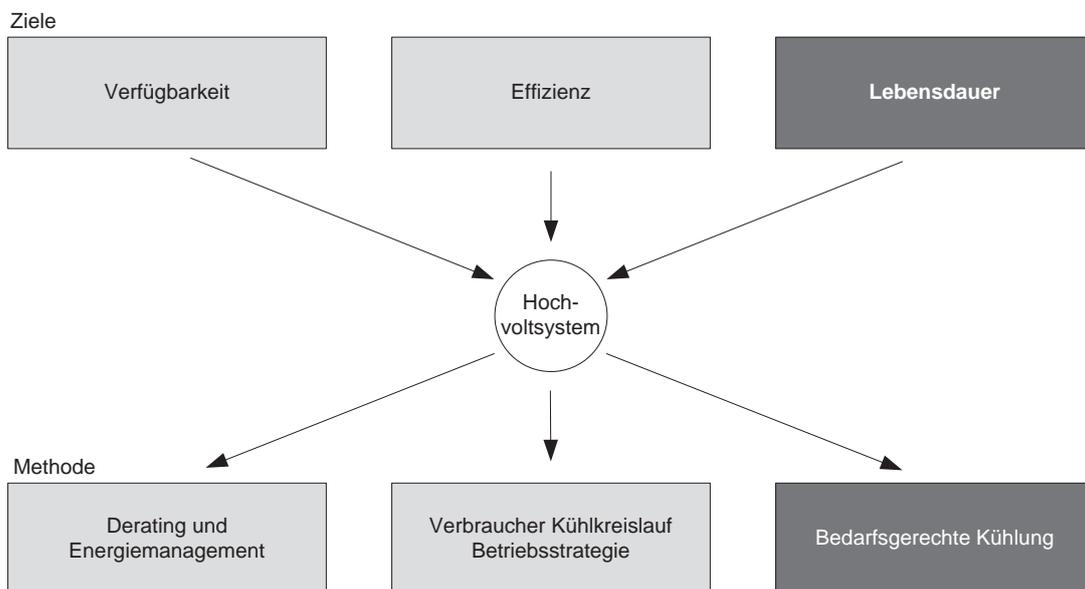


Abbildung 1.1: Optimierungsansätze des Hochvoltsystems

Das Ziel ist die eingehende Untersuchung der Wärmeverluste in den Hochvoltkomponenten und des gesamten energetischen Wirkungsgrades eines Plug-In-Hybridfahrzeugs. Die anschließende thermische Auslegung der Komponenten soll die elektrische Verfügbarkeit, eine hohe energetische Gesamteffizienz und eine garantierte Lebensdauer der Bauteile unter allen Umgebungsbedingungen gewährleisten, dargestellt in Abbildung 1.1. Das aktuelle Wärmemana-

gementsystem und die Ansteuerung der Kühlungsaktuatoren sollen in ihrem aktuellen Stand analysiert und Verbesserungen hergeleitet werden.

Neben einer Weiterentwicklung sind wesentliche Ziele eines innovativen Wärmemanagements in alternativen Antrieben die Reduzierung von Kosten, die Schaffung von Bauraum, die Reduktion des Gewichts und der optimale Einsatz der zur Verfügung stehenden Leistung durch die vorhandenen Energiespeicher [5].

Aus realen Fahrbedingungen und -anforderungen resultieren elektrische Leistungsflüsse. Diese generieren spezifische Wärmeverluste, die vom Kühlsystem bestmöglich abgeführt werden müssen. Die Verluste sowie das daraus resultierende Aufwärmen beeinflussen die Komponenten in ihrer Leistungsfähigkeit und ihre Alterungsmechanismen. Negative Einflüsse, verursacht durch die Temperaturen, bewirken in den Komponenten eine Einschränkung oder im Extremfall den Ausfall der Funktion.

Ein zu gestaltendes intelligentes Wärmemanagement berücksichtigt die Auswirkungen der Wärmeverluste und die Wechselwirkungen mit anderen Teilsystemen. Aus diesem Hintergrund schließt eine gesamtheitliche Betrachtung den Antriebsstrang und das Hochvoltsystem an sich, als auch die Klimatisierung, die Kühlsysteme und die Heizelemente mit ein.

Die zu erarbeitenden Wärmemanagementmaßnahmen ermöglichen Vorteile für die elektrische Verfügbarkeit, den Verbrauch von Energie und die Lebensdauer der Bauteile.

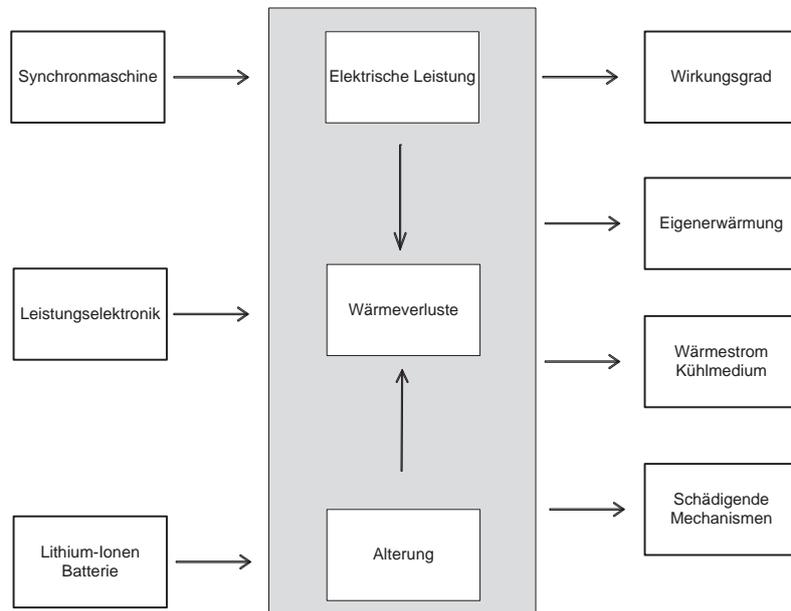


Abbildung 1.2: Vorteile gegenüber dem aktuellen Forschungs- und Entwicklungsstand



Zur Erreichung der oben genannten Zielsetzungen werden in dieser Arbeit zwei innovative Methoden entwickelt, die das Hochvoltsystem thermisch-elektrisch berechnen und eine Bestimmung der optimalen Konditionierung in einer Fahrzeugumgebung durchführen. Aktuell wird eine Regelung der Kühlungsaktuatoren konstant nach den maximalen kritischen Werten der Hochvoltkomponenten zu Grunde gelegt. Wesentlicher Ansatz für eine deutliche Effizienzsteigerung sowie ein bedarfsgerechten Konditionieren ist eine gesamtheitliche Strategie des Hochvoltsystems. Diese bestimmt die Verlustleistungen und analysiert die Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit. Auf Grundlage der Verlustleistungen und der Lebensdauermechanismen werden Sollwerte für das Kühlmedium generiert.

Die Zusammenhänge von der Lebensdauer, des thermischen Verhaltens und der Nutzung sind bekannt. Die Forschung ist bisher jedoch nicht auf die thermischen Wechselwirkungen in Bezug auf die Alterung des Systems näher eingegangen. Die Optimierung der Lebensdauer anhand der Reduzierung der Nutzung ist bereits in vielen Anwendungen umgesetzt. Ein neuer Ansatz ist, den Zusammenhang zwischen Zuverlässigkeit und Kühlung darzustellen.

## 2 Erkenntnisstand für die alternativen Antriebe

Das Plug-In-Hybridfahrzeug vereint den komplexen verbrennungsmotorischen Antrieb mit konventioneller Kühlung und dem Hochvoltsystem mit zusätzlich notwendiger Kühlung der Hochvoltkomponenten. In den letzten Jahren werden verschiedenste Technologien und Innovationen für die Integration von alternativen Antrieben in die Fahrzeuge entwickelt. Der Begriff Hochvolt wird für Spannungslagen von höher 30V bis 1000V bei Wechsellspannung und höher 60V bis 1500V bei Gleichspannung nach der ECE R 100 definiert.

### 2.1 Systemarchitektur eines Plug-In-Hybridfahrzeugs

Ein Hybridfahrzeug wird definiert durch seinen hybriden Antrieb, der über zwei Energiequellen gespeist wird [6]. Neben dem Energiespeicher sind die wesentlichen Grundelemente die elektrische Maschine und die Leistungselektronik. Die drei-phasige Leistungselektronik besitzt einen Steuer- und Leistungsanteil, um das Antriebsmoment der elektrischen Maschine regeln zu können [7].

Für einen hybriden Antriebsstrang können vier grundlegende Hybridisierungsgrade definiert werden. Im **Micro-Hybrid** schaltet eine Start- und Stopp- Funktion den Verbrennungsmotor im Stand aus.

Im **Mild-Hybrid**-Konzept wird ein Hochvoltsystem integriert, das den Verbrennungsmotor in unterschiedlichen Betriebszuständen unterstützt sowie die Bremsenergie rekuperiert. Die erzeugte elektrische Leistung aus der Hochvoltbatterie kann bis zu 20kW betragen. Jedoch ist ein rein elektrisches Fahren nicht vorgesehen.

Der **Full-Hybrid**-Antrieb setzt sich aus einer elektrischen Maschine und einem Verbrennungsmotor zusammen. Mit diesem Konzept ist ein verbrennungsmotorisches, ein hybridisches und ein elektrisches Fahren möglich.

Bei dem Vollhybridfahrzeug existiert zusätzlich die Möglichkeit, die Traktionsbatterie extern zu laden (Plug-In). Diese Antriebsstruktur wird als **Plug-In-Hybrid** bezeichnet [7]. Diese Hybride können ebenfalls als Variante des Range Extender ausgeführt werden.

Die Kategorisierung der Hybridfahrzeuge erfolgt nach dem Antriebskonzept oder nach dem Energiespeicher. Die Antriebstopologie wird in seriell, parallel und leistungsverzweigt unterschieden. Der **serielle Hybrid** ermöglicht keine mechanische Trennung vom Verbrennungsmotor zu den angetriebenen Achsen. Die elektrischen Maschinen (Motor und Generator) sind in Reihe zum Verbrennungsmotor geschaltet.

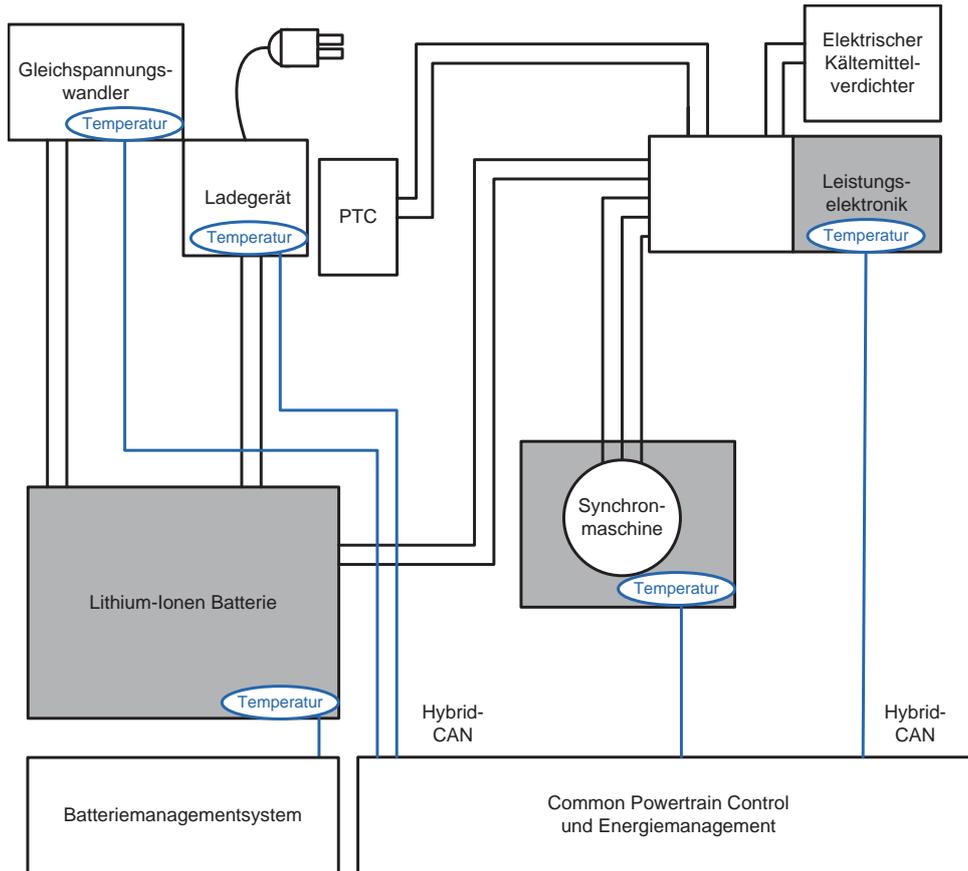


Abbildung 2.1: Struktur des Hochvoltsystems eines Plug-In Hybridfahrzeugs

Der **parallele Hybrid** ermöglicht eine Abkopplung vom Verbrennungsmotor und folglich das elektrische Fahren. In dieser Struktur ist nur eine elektrische Maschine erforderlich.

Der **leistungsverzweigte Hybrid** zeichnet sich durch seinen Mischbetrieb aus. Der Verbrennungsmotor gibt mechanische Leistung an die Antriebsachse, und des Weiteren wird elektrische Energie der Maschine hinzugefügt.

In der vorliegenden Untersuchung wird, aufgrund der ausgeprägten Anwendung in der Forschung und Entwicklung, ein paralleler elektrischer Antriebsstrang herangezogen, siehe Abbildung 2.2. Die ECE-Norm R101 reglementiert die korrekte Berechnung des Verbrauchs des Kraftstoffs und der elektrischen Leistung für Plug-In-Hybridfahrzeuge.

Der Kraftstoffverbrauch  $C$  berechnet sich aus dem Verbrauch  $l/100\text{km}$  mit voller Hochvoltbatterie (State of charge = 100 Prozent) und aus dem Verbrauch  $l/100\text{km}$  mit einer leeren Hochvoltbatterie (State of charge = 10 Prozent) [8].

$$C_{\text{Kraftstoff}} = \frac{(D_{\text{OVC}} \cdot C_{1,\text{Kraftstoff}} + D_{\text{av}} \cdot C_{2,\text{Kraftstoff}})}{(D_{\text{OVC}} + D_{\text{av}})} \quad (2.1)$$

Der Verbrauchswert der elektrischen Leistung wird äquivalent vorgeschrieben [8].

$$E = \frac{(D_E \cdot E_1 + D_{av} \cdot E_4)}{(D_e + D_{av})} \quad (2.2)$$

Bei der zugrunde gelegten parallelen Antriebstopologie handelt es sich um einen PLUG-IN-HYBRID der Daimler AG. Das rein elektrische Fahren ist mit dem herangezogenen Antrieb bis zu einer Reichweite von 33km möglich. Der zertifizierte Verbrauch berechnet sich auf 2,8 Liter pro 100km (kombiniert). Dies entspricht 65g CO<sub>2</sub> pro Kilometer.

Der ausgewählte Versuchsträger verfügt über einen V6-Benzinmotor mit 2,96 Liter Hubraum und einem Hybridmodul. Die elektrische Maschine ist ein permanent erregter Synchronmotor.

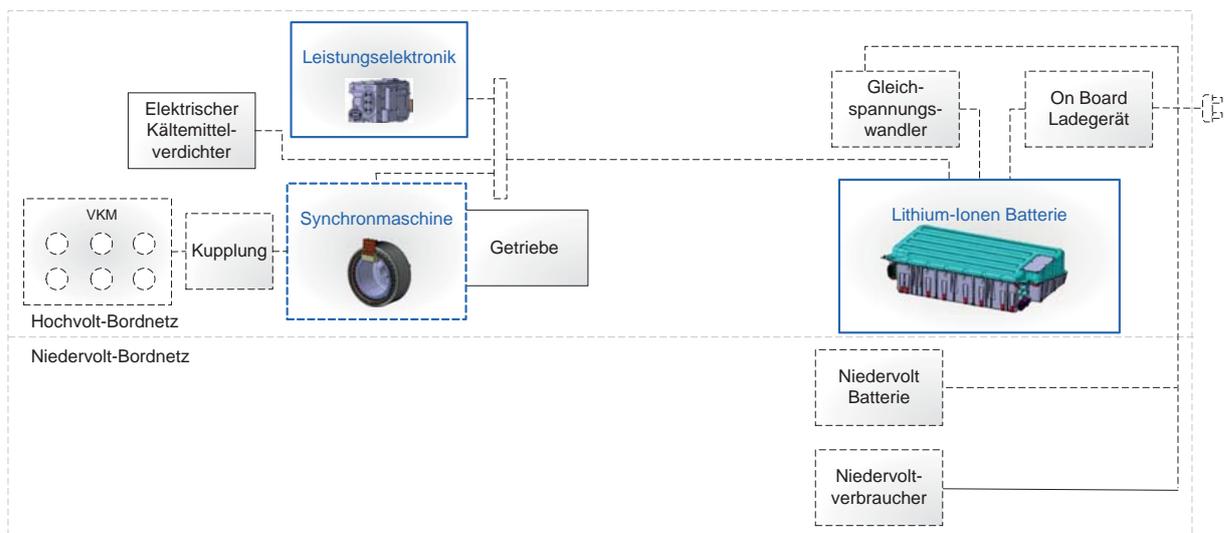


Abbildung 2.2: Anordnung der Hochvoltkomponenten eines Plug-In-Antriebs

Grundsätzlich werden für ein Plug-In-Hybridantrieb Betriebszustände definiert, die sich dadurch unterscheiden, in welcher Form der Antrieb durch den Elektromotor und den Verbrennungsmotor versorgt wird. Fünf Betriebsmodi kann der Fahrer vor Beginn der Fahrt wählen:

- HYBRID-MODE: Verbrennungsmotor und elektrischer Antrieb sind aktiv
- E-MODE: Rein elektrischer Antrieb
- E-SAVE: Geladene Batterie und deren State of Charge (SOC) wird gehalten
- CHARGE: Batterie wird während des Fahrens geladen

Das Zusammenarbeiten der beiden Antriebe kann in verschiedenen Betriebsfällen erfolgen. Das hybride Fahren bezeichnet den Zustand, in dem Verbrennungsmotor und Elektromotor zusammen oder abwechselnd das Fahrzeug antreiben.



In dem Zustand des rein elektrischen Fahrens erfolgt der Antrieb durch die elektrische Maschine. Der Verbrennungsmotor wird in diesem Zustand von der elektrischen Maschine getrennt.

Im Betriebszustand des Boostens wird der Antrieb durch den Verbrennungsmotor und den zugeschalteten elektrischen Motor mit zusätzlichem Drehmoment gespeist.

Zuletzt wird beim rekuperativen Bremsen die kinetische Energie des Fahrzeugs in elektrische Energie gewandelt und zur Beladung des Energiespeichers genutzt [7] [9]. Des Weiteren wird in dieser Arbeit der Ladevorgang der Batterie durch eine Ladestation betrachtet. Die Tabelle 2.1 fasst abschließend die technischen Merkmale des herangezogenen Referenzfahrzeuges zusammen.

Tabelle 2.1: Eigenschaften des Plug-In-hybriden Antriebsstrangs des Referenzfahrzeuges

Komponente	Technische Daten
Verbrennungsmotor	2.996 Liter-Benzinmotor, 6 Zylinder Nennleistung 245kW
Synchronmaschine	Nennleistung 85kW @ 3500 1/min
Getriebe	7-Gang Automatik
Gleichspannungswandler	Max.Leistung 4,0kW
Ladegerät	Max.Leistung 3,6kW, 400V/16A oder 230V/8A
Leistungselektronik	Dauer 190A(Effektivwert), Max. Strom 290A(Effektivwert)
Batterie	Lithium-Ionen, 120 Zellen @ 22Ah 6,1kWH (End of Life), Nennspannung 396V
Höchstgeschwindigkeit (E-MODE)	140km/h

## 2.2 Elektrische und mechanische Antriebsleistungen

Die Temperatur und die entstehende Abwärme der Antriebsstrangkomponenten, aufgeführt in Abbildung 2.3, haben einen hohen Einfluss auf die elektrische Leistung und auf den Kraftstoffverbrauch des Fahrzeugs [10].

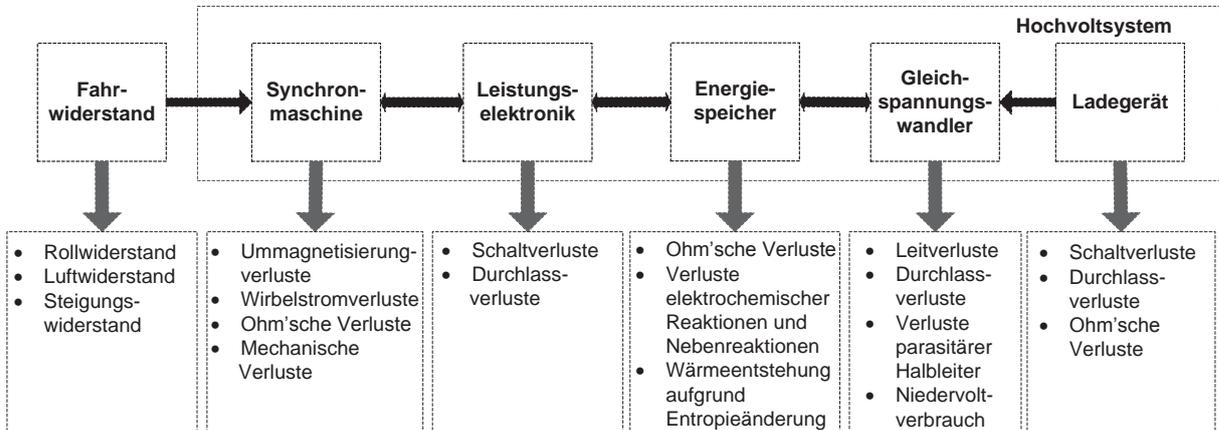


Abbildung 2.3: Aufzubringende Energie und resultierende Verluste des gesamtheitlichen Antriebs im elektrischen Betrieb

Eine Leistungsbilanz des gesamten Antriebs ergibt einen Überblick über die entstehenden Verlustleistungen. Die Leistung, die der Antriebsstrang während der Fahrt aufbringen muss, setzt sich unter anderem aus dem Fahrwiderstand und den resultierenden Verlusten zusammen [11].

$$P_W = F_W \cdot v \quad (2.3)$$

Der Fahrwiderstand bildet die Addition aus dem Roll-, Luft- und Steigungswiderstand.

$$F_W = F_{Ro} + F_L + F_{ST} \quad (2.4)$$

Der Rollwiderstand nach [5] ist aufgrund der Reibwirkung des Reifens und der Fahrbahn eine wesentliche Beeinflussungsgröße der Antriebsleistung.

$$F_{Ro} = f_{Ro} \cdot m \cdot g \cdot \cos\alpha_{ST} \quad (2.5)$$

Die Luftanströmung des Fahrzeugs wird durch den Luftwiderstand definiert [11]. Die Umgebung des Fahrzeugs wird mittels Luftdruck, -dichte und -temperatur beschrieben.



Für jede lokale Höhe ergibt sich ein spezifischer Luftdruck und eine örtliche Temperatur, aus denen die Luftdichte hergeleitet werden kann. Die Norm DIN 4710 erörtert Statistiken zu meteorologischen Daten in Deutschland.

$$p = p_0 \cdot \exp \left[ -\frac{g}{R_L \cdot T} \cdot z \right] \quad (2.6)$$

$$F_L = 0.5 \cdot \rho_{LU} \cdot c_w \cdot A_{Fzg} \cdot (v_{Fzg} + v_{Wind})^2 \quad (2.7)$$

Der Steigungswiderstand ist abhängig von der Fahrzeugmasse, der Gravitationskraft und dem Steigungswinkel.

$$F_{St} = m_{Fzg} \cdot g \cdot \sin \alpha_{ST} \quad (2.8)$$

Die zu erbringende Leistung im elektrischen Modus setzt sich aus dieser geforderten Fahrleistung und den Wirkungsgraden der aktiven Komponenten zusammen [12], die wiederum von ihren Verlusten beeinflusst werden.

$$E_{Gesamt,Antrieb} = \int_0^{t_{End}} P_{Gesamt,Antrieb} dx \quad (2.9)$$

Diese Energie wird dem Energiespeicher letztendlich entnommen. Im elektrischen Fahrmodus wird die Fahrleistung wie folgt bestimmt.

$$P_{Fahrleistung} = P_{El} \cdot \eta_{Bat} \cdot \eta_{Inverter} \cdot \eta_{EM} - P_{Niedervolt} \cdot \eta_{DCDC} - P_{HV-PTC+eKMV} \quad (2.10)$$

Die Leistung im Zustand des Ladens resultiert hingegen aus der Eingangsleistung an dem Ladegerät. Des weiteren wird der Verbrauch aus dem 12V Bordnetzes gespeist. Die Wärmeverluste der aktiven Komponenten wirken sich auf die verbleibende Ladeleistung der Batterie aus.

$$P_{Ladeleistung} = P_{El} \cdot \eta_{Bat} \cdot \eta_{OBL} - P_{Niedervolt} \cdot \eta_{DCDC} - P_{HV-PTC+eKMV} \quad (2.11)$$

Im folgenden werden die einzelnen Komponenten des elektrischen Antriebs genauer betrachtet.

## 2.3 Permanent erregte Synchronmaschinen

In Hybridantrieben können unterschiedliche Bauarten für elektrische Maschinen angewandt werden. Durch die unterschiedlichen Aufbauten und Anordnungen können Asynchronmaschinen, Synchronmaschinen, Gleichstrommaschinen, Reluktanzmaschinen und Transversalmaschinen unterschieden werden. Die Unterschiede der eingesetzten Maschinen liegen in der Leistungsdichte, der maximalen Drehzahl, dem Wirkungsgrad und den resultierenden Verlusten im Leerlauf und unter Volllast. In den Hybridantrieben werden vorwiegend Asynchronmaschinen (ASM) und permanent erregte Synchronmaschinen (PMSM) eingesetzt [9].

Im vorliegenden Antrieb ist eine permanent erregte Maschine verbaut. Der Rotor dreht sich synchron zum erregten Feld. Die Permanentmagneten sind im Rotorblech integriert und tangential angeordnet [13]. Für die Gewährleistung einer hohen Lebensdauer und der elektrischen Verfügbarkeit müssen die Temperaturgrenzen eingehalten werden. Zu diesem Zweck ist ein geeignetes und effizient ausgelegtes Kühlsystem erforderlich.



Abbildung 2.4: Erwärmung der Materialien aufgrund der Verlustleistungen

Aufgrund der Verlustleistung findet eine Erwärmung in den Materialien des Rotors und des Stators statt, wie in Abbildung 2.4 abgebildet. Die Wärmeentstehung ist abhängig von der Masse und der spezifischen Wärmekapazität des jeweiligen eingesetzten Materials.

$$\left( \frac{dT}{dt} \right)_{t=0} = \frac{P_V}{m \cdot c} \quad (2.12)$$

Exemplarische Möglichkeiten einer Kühlungsanbindung sind folgend aufgeführt:

- Wasser-Glykol-Glysantin-Kühlung um das Statorgehäuse
- Getriebeölkühlung zwischen Stator und Rotor und Stator-Ölumspritzung

Mit dem Einsatz der Wasserkühlung des Gehäuses entsteht ein konvektiver Wärmeübergang lediglich zum Statorträger. Die Ölkühlung zwischen Stator und Rotor erzielt im Vergleich dazu eine deutliche Effizienzsteigerung. Im Fall der Statorkühlung wird das Kühlmedium über das Hybridkopfgehäuse geführt. Der Wärmeübergang an der Außenseite des Statorträgers wird zur Entziehung der Wärme genutzt.

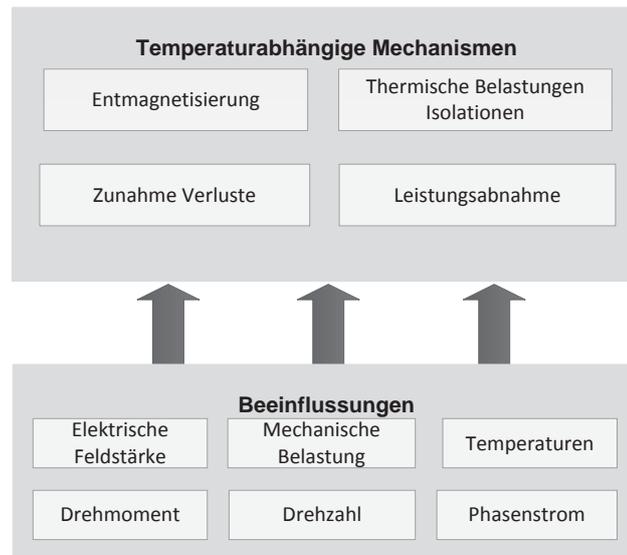


Abbildung 2.5: Mechanismen aufgrund thermischer Belastung in Stator und Rotor

Ein hoher Anteil der Abwärme einer elektrischen Maschine entsteht im Stator. Bei Maschinen mit hoher Leistungsdichte reicht die Mantelfläche des Stators nicht aus, um eine nennenswerte Luftkühlung zu erlangen. Hier wird zwischen Stator und Rotor der Luftspalt mit Luft-Ölgemisch gefüllt, um die Magneten und die Wicklungen zu kühlen. Oftmals werden aus Packagegründen ölgekühlte Maschinen in das Getriebe integriert. Die Abwärme, die durch das Getriebe und die Kupplung eingebracht wird, ist deutlich höher als der Anteil der Verluste der elektrischen Maschine.

Die Ziele der Kühlung sind die Senkung der Magnettemperatur und die Steigerung der Leistungsdichte. Die Alterung und Zuverlässigkeit von elektrischen Maschinen hängt von den thermischen, mechanischen und elektrischen Belastungen in der Fahrzeugumgebung ab. Je nach Wärmebeständigkeitsklasse werden Isolierungen für die Wicklungen eingesetzt. Durch die Verwendung von Isolierlacken und -güssen können die Leistungsdichten erhöht werden. Des Weiteren können die Materialkosten von Stator und Rotor reduziert werden [14]. In der Lebensdauerbetrachtung bilden die Ermüdungen von Wicklungen und Isolierungen die Haupteinflussfaktoren.

## 2.4 Leistungselektroniken

Aufgrund des Maschinentyps des elektrischen Motors wird ein dreiphasiger Wechselrichter eingesetzt. Der Wechselrichter erlaubt einen motorischen und generatorischen Betrieb. Diese Leistungselektronik hat eine Brückenschaltung mit drei Leistungsmodulen und einen Zwischenkreiskondensator integriert. Diese muss den mechanischen und den thermischen Bedingungen

in der Fahrzeugumgebung standhalten. Durch die hohen Leistungsdichten der Halbleiter entsteht ein anspruchsvoller Bedarf an die thermische Kontrolle der Bauelemente. Durch eine effiziente thermische Gestaltung können elektrische Verluste und thermische Widerstände verringert werden [15]. Eine B6-Brücke erzeugt eine dreiphasige Ansteuerung der Synchronmaschine, aufgezeigt in Abbildung 2.6. Die Ansteuerung des elektrischen Motors steht in Abhängigkeit von dessen Drehmoment und der jeweiligen Phase.

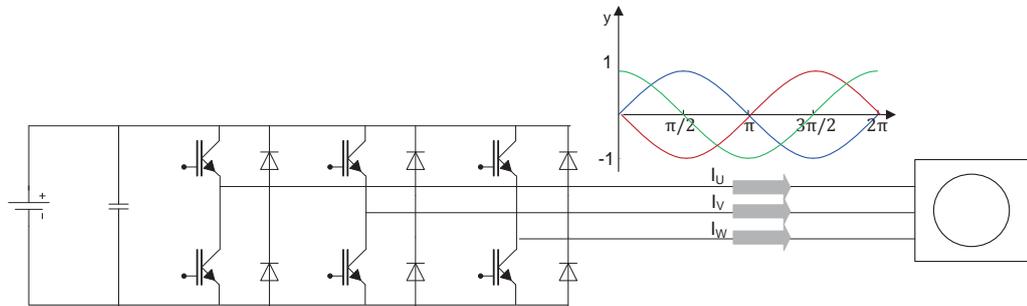


Abbildung 2.6: Sinusförmige Pulsweitenmodulation und die Ansteuerung eines Synchronmotors [16] mit einer B6-Brücke

Im motorischen Einsatz der elektrischen Maschine fließt der Kollektorstrom in den IGBTs der Halbleiterbrücken. In diesen IGBTs entstehen Schalt- und Durchlassverluste. Diese IGBT-Verluste hängen von der Leistungsdichte im IGBT ab. Insbesondere die Bewegung der Elektronen verursacht einen Temperaturanstieg. Die höchste Temperatur ist an der Oberfläche des Chips nachgewiesen und nimmt mit der Chiptiefe homogen ab [17].

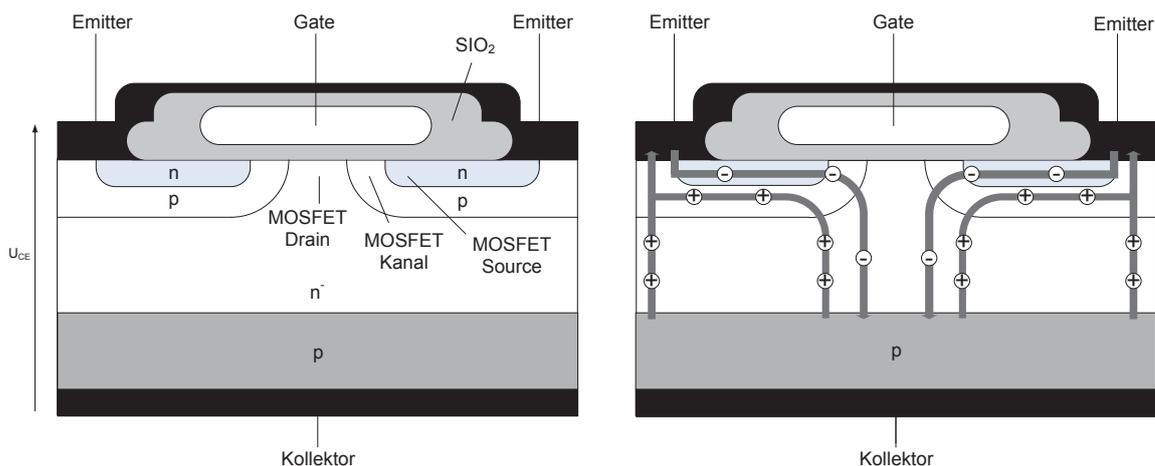


Abbildung 2.7: Struktur und Ladungsträgerbewegung eines IGBT nach [18]

Wird bei einer Spannung zwischen Collector und Emitter eine Spannung zwischen Gate und Emitter angelegt, bildet sich ein leitfähiger Kanal. In Abbildung 2.7 ist der Aufbau eines Hochvolt-IGBTs dargestellt. Durch Anlegen der Spannung zwischen Gate und Emitter  $U_{GE}$ , die größer



ist als die Schwellspannung, wandern die Elektronen in das  $n^-$ -Substrat und injizieren die dort liegenden Löcher. Die Ladungsträgerdichte wird vom Laststrom und Durchlasswiderstand bestimmt [18]. Die Durchlassverluste sind im Wesentlichen abhängig von dem  $n^-$ -Substrat und dessen Widerstand. Die höchsten Energieverluste eines IGBTs treten im Einschalt- und Abschaltverhalten auf. Diese Schaltverluste sind abhängig von der Schaltfrequenz.

Im generatorischen Fall fließt ein Strom über eine Diode einer Halbleiterbrücke. Die Wärmeverluste der Dioden sind dabei abhängig von dem Sperrstrom und der Sperrspannung. Abbildung 2.8 zeigt den Aufbau einer Leistungsdiode.

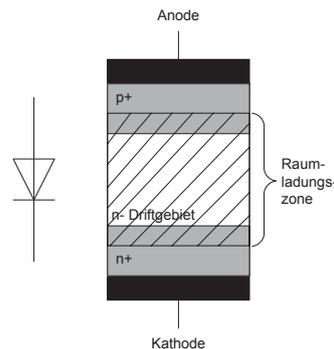


Abbildung 2.8: Aufbau einer Leistungsdiode nach [18]

Desgleichen ist je nach Umgebungstemperatur und Luftanströmung des Fahrzeugs die Einlass-temperatur des Kühlmediums instationär. Eine turbulente instationäre Kühlung führt an der Kühlplatte vorbei und nimmt die Wärme auf. Die Leistungshalbleiter sind auf der Kühlplatte mit unterschiedlicher Verbindungstechnik angebracht. Verschiedene Verbindungstechniken, wie Löten, Kleben, Bonding oder Sintern, werden in Elektroniken angewandt werden, um Chips an einen Träger zu befestigen [19]. Diese Verbindungstechnologien besitzen unterschiedliche Materialeigenschaften. Die gewählten Materialien und die Aufbautechnik müssen eine hohe thermische Leitfähigkeit und einen geringen Ausdehnungskoeffizienten besitzen. Das Direct Bonded Copper (DCB)-Substrat setzt sich aus einer Keramikschicht und zweiseitig anliegendem Kupfer zusammen. Die Leistungshalbleiter werden auf diesem DCB-Substrat angebracht. Die Platte zwischen Kühlkörper und DCB-Schicht ist üblicherweise aus Aluminiumoxid  $Al_2O_3$ . Die Kühlkörper sind häufig aus Aluminiumcarbid AlC oder Aluminiumsiliziumcarbid AlSiC. Während des Betriebs der Leistungshalbleiter entsteht eine Erwärmung aufgrund der beschriebenen Leistungsverluste. Die eingesetzten Materialien müssen so gewählt werden, dass geringe mechanische Spannungen bei Temperaturgradienten auftreten. Besonders der Kurzschlussfall verursacht beim Abschalten der hohen Ströme kritische Temperaturgradienten [18]. Neue Technologien wenden gesintertes Silber-Substrat als Verbindungstechnik an. Heuck [20] untersuchte neuartige silberbasierte Anwendungen. Des Weiteren gibt es neue Technologien der Leistungshalbleiter, die auf die Kupferbonddrähte verzichten.

Um eine hohe Lebensdauer zu erreichen und Schädigungen an den Leistungshalbleitern zu vermeiden, muss eine Leistungselektronik im Hochvoltbereich durch Anwendung unterschiedlicher Techniken flüssig gekühlt werden. Empfindliche Elemente sind vor allem Halbleiter, Induktivitäten, Kondensatoren und Verbindungen. Die Alterungseffekte werden besonders aufgrund der Abwärme, der thermomechanischen Belastungen und der Vibrationen in der Fahrzeugumgebung vergrößert. Die Ursachen und Auswirkungen auf die Lebensdauer verdeutlicht Abbildung 2.9.

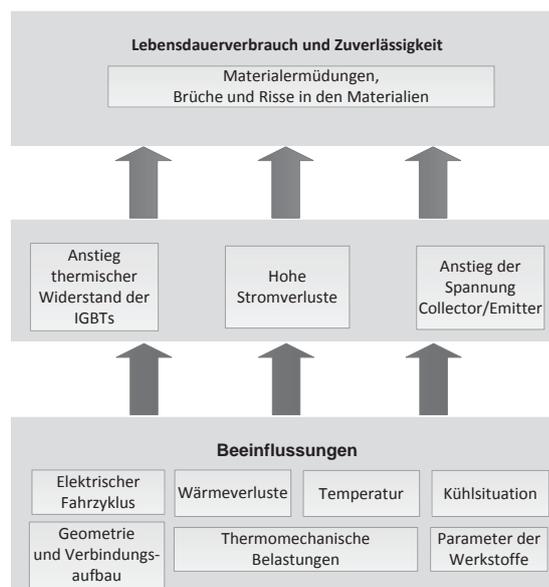


Abbildung 2.9: Lebensdauermechanismen in Anlehnung an [21]

Während der Aktivität im motorischen und generatorischen Betriebszustand entstehen thermische Wechsellasten in den Halbleitern. Die mechanischen Verformungen verursachen Ermüdungen der Werkstoffe. Diese Ermüdungen führen in Form von Rissen und Brüchen des Lotwerkstoffs oder den Kupferbonddrähten (wenn diese eingesetzt werden) zum Ausfall. Folgende Schädigungsmechanismen bedingen eine frühzeitige Alterung und haben negative Auswirkungen [18] [21].

- Bruch und Verformung der Kupferdrähte
- Beschädigung des Oxids am Gate der IGBTs
- Lotwerkstoffe und Verbindungen bilden Risse

Für die Vermeidung von irreversiblen Schädigungen an den Bauelementen wird durch den Komponentenhersteller ein thermisches Betriebsfenster vorgegeben. In diesem sind maximale und



minimale Werte der zulässigen Bauteiltemperaturen definiert. Für die IGBTs, die für Hochleistung ausgelegt sind, gilt ein exemplarischer Temperaturbereich von 65 bis maximal 150 Grad Celcius [22]. Bei dieser Angabe werden der Wärmeübergang der Halbleiterbrücken zur Kühlplatte und zum Kühlmedium und die daraus resultierenden thermischen Widerstände nicht exakt berücksichtigt. Auch die transienten Eingangssignale der Halbleiterschaltung in realen Fahrsituationen, wie die Gleichspannung, der Phasenstrom, die Schaltfrequenz, die Zwischenkreisspannung, werden für die Kühlungsansteuerung nicht als Signal mit einbezogen. Der Alterungszustand in den Materialien bleibt bisher ebenfalls unberücksichtigt.

## 2.5 Lithium-Ionen-Eisenphosphat-Batterien

In hybriden und elektrischen Antriebssträngen werden primär Hochvoltenergiespeicher mit Lithium-Ionen-Technologien eingesetzt. Die Anwendung von Lithium-Ionen-Batterien haben sich aufgrund der Leistungsdichte, der Energiedichte und der hohen zyklischen Lebensdauer gegenüber Batterielösungen mit Nickelmetallhydrid (NimH) und Nickel-Cadmium (NiCd) durchgesetzt [23].

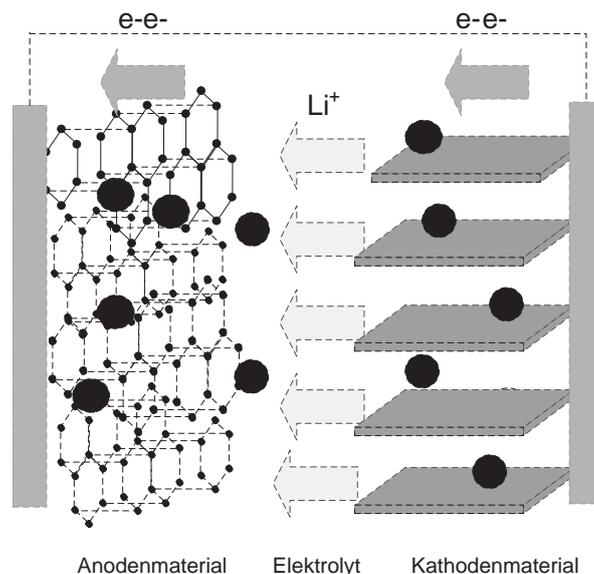


Abbildung 2.10: Schematischer Aufbau einer Lithium-Eisenphosphat-Zelle [24]

Die Batterie kann mit Hilfe des Ladergeräts extern von einer Stromquelle geladen werden. Die ausgewählte Batteriegröße ermöglicht eine entsprechende elektrische Reichweite. Die Lithium-Ionen-Zellen des Energiespeichers werden in unterschiedlichen Ausführungen (prismatisch, zylindrisch, pouch) gefertigt und in ein Gehäuse integriert. Eine Zelle setzt sich wie in Abbildung 2.10 aus einer Anode (Graphit), einer Kathode (z.B.  $LiFePO_4$ ), einem Elektrolyt und einem Separator zusammen. Wesentliche Bestandteile einer Zelle sind des Weiteren der posi-

ve Stromableiter (Aluminiumfolie) und der negative Stromableiter (Kupferfolie). Je nach dem, ob ein Lade- und Entladevorgang vorliegt, wandern die Lithium-Ionen zur Anode oder Kathode.



Wesentliche Größen sind durch den Zelltyp und die Chemie vorgegeben. Die Limitierungen definieren die dynamische Maximal- und Minimalspannung, die dauerhafte Maximal- und Minimalspannung, den kurzzeitig beziehungsweise langfristig zulässigen Lade- und Entladestrom, sowie die maximale und die minimale Zelltemperatur. Um den Zustand des Energiespeichers zu bestimmen, werden des Weiteren die Nennkapazität  $C_{Nenn}$  und die Nennspannung  $U_{Nenn}$  der Zelle benötigt. Die maximale Leistung einer Lithium-Ionen-Batterie resultiert aus den Zusammenhang zwischen der Zellspannung  $U_{Nenn}$  und dem Innenwiderstand  $R_i$ .

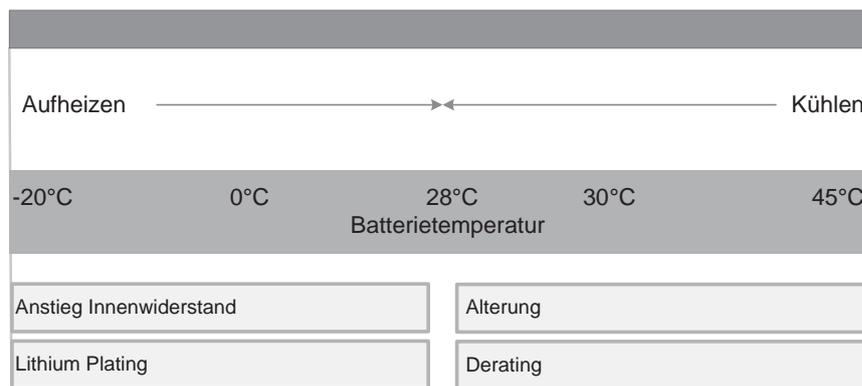


Abbildung 2.11: Thermisches Betriebsfenster und die Auswirkungen auf LiFePO<sub>4</sub>-Zellen in Anlehnung an [25]

Für die Umgehung der schädigenden Mechanismen und einer energetischen Einschränkung, müssen die Zellen optimal konditioniert werden. So ist aus der Forschung bekannt, dass zu hohe und niedrige Temperaturen eine Leistungsabnahme von Lithium-Ionen-Batterien hervorrufen [26] [27] [28] [23].

Diese Erkenntnis leitet die Notwendigkeit eines Zuheizens bei negativen Temperaturen und eines Abkühlens bei Temperaturen über 28 Grad Celsius, wie in Abbildung 2.11 gezeigt, her. Zudem müssen Überladungen und Tiefentladungen vermieden werden. Diese führen zu schädlichen Mechanismen, wie zum Beispiel einem thermischen Durchbrennen [26]. Es wird deutlich, dass sowohl eine Kühlung als auch eine Aufheizung für eine lange Lebensdauer und einen optimalen Betrieb ausschlaggebend sind.



### 2.5.1 Auswirkungen des Niedertemperaturverhaltens

Eine dauerhafte Ablagerung des Lithiums auf einer Elektrode ist ein Mechanismus der Degradation. Diese Ablagerungen (Plating) des Lithiums können zu unkontrollierten chemischen Reaktionen und zum Kurzschluss führen. Das Lithium-Plating tritt besonders bei kalten Temperaturen auf, aufgezeigt in Abbildung 2.11. Um einem Lithium-Plating vorzubeugen, wird der Ladestrom in Abhängigkeit der Temperatur durch den Eingriff des Batteriemanagementsystems begrenzt. Hohe Temperaturgradienten können eine Porosität der Elektroden und die irreversible Ablagerung der Lithium-Ionen im Graphit beschleunigen. Dies hat ein reduziertes Aktivitätsniveau zur Folge. Das Laden bei tiefen Temperaturen hingegen hat die Porosität der Separatoren zur Folge, und es resultiert die Dendritenbildung, die bis zu einer Durchstoßung des Separators führen kann. Der Innenwiderstand  $R_i$  der Zelle erhöht sich gleichermaßen [29].

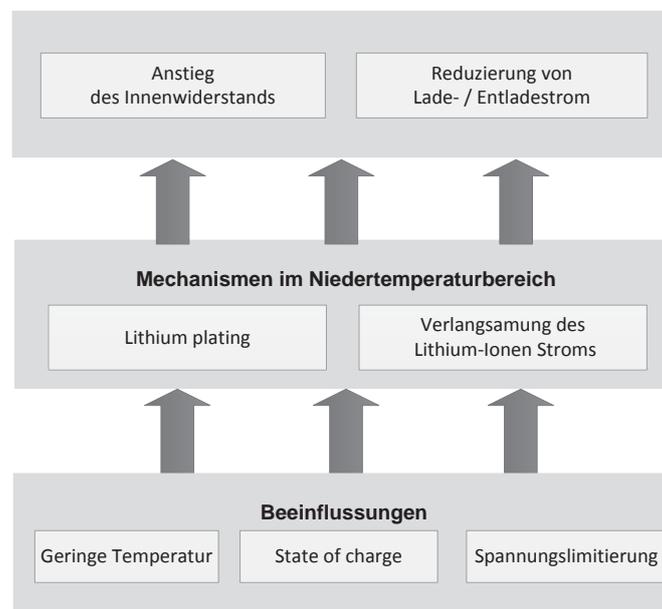


Abbildung 2.12: Mechanismen der Zellen bei kalten Temperaturen in Anlehnung an [27]

### 2.5.2 Mechanismen des Hochtemperaturverhaltens

Höhere Zelltemperaturen verstärken die Alterungseffekte. Es werden zwei Effekte der Lebensdauer unterschieden. Die kalendarische Alterung beschreibt die nachlassende Kapazität und Leistungsfähigkeit aufgrund der fortschreitenden Zeit unabhängig von der Nutzung der Batterie. Die zyklische Degradation ist die Alterung aufgrund von Zyklisierung, also der Nutzung durch Ladung und Entladung des Energiespeichers. Für beide Abnutzungen gibt es verschiedene Einflussfaktoren. Die Temperatur hat einen deutlichen Einfluss auf die gesamtheitliche

Lebensdauer sowohl im Betrieb als auch im Stand. Die Alterung der Batterie setzt sich folglich aus der kalendarischen und der zyklischen Alterung zusammen.

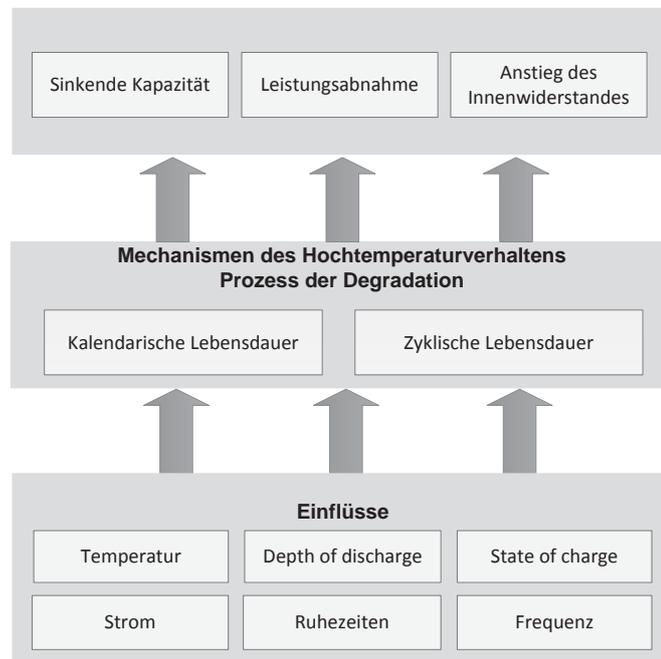


Abbildung 2.13: Mechanismen der Zellen bei Temperaturen über 30 Grad in Anlehnung an [27]

Grundsätzlich resultieren die Alterungseffekte einer Zelle aus der Veränderung des Materials. Die zyklische Alterung kann durch eine Funktion definiert werden, die sich aus den Größen Zellstrom, Zelltemperatur, Ladungszustand und Zeit zusammensetzt. Die kalendarische Alterung wird durch den State of Charge, die Zelltemperatur und die Standzeit während der Lagerung der Batterie maßgeblich beeinflusst. Dies bedeutet, dass sowohl die Lagertemperatur im Ruhezustand als auch die Temperatur während des Betriebs eine Auswirkung auf den Alterungsfortschritt darstellen. Diese Alterung beinhaltet sinkende Kapazität, energetische Verluste und ansteigenden Innenwiderstand. Der Fahrer erkennt die Alterung aufgrund geringerer Leistung und abnehmender Kapazität (Reichweite). Je länger eine Zelle im Einsatz ist, desto höher wird der kapazitive Verlust. Die Kapazitätsverluste können mit Anwendung von Gleichung 2.14 messtechnisch oder simulativ bestimmt werden [30].

$$C_{\text{Verlust,Zellsystem}} = f \left\{ \begin{array}{l} SOC, T_{\text{Zellsystem}}, t_{\text{Standphase,Zellsystem}} \\ \text{Pulshöhe, Pulsstärke, DOD, } N_{\text{Puls,Zellsystem}} \end{array} \right\} \quad (2.14)$$

Abbildung 2.14 zeigt das exemplarische Verhalten der Abnahme der Kapazität in Abhängigkeit zur Zeit. Insbesondere im ersten Jahr ist der Fortschritt der Alterung am gravierendsten. Dieser



Zusammenhang ist im weiteren Vorgehen zu überprüfen und kann als eine wesentliche Grundlage für die Herleitung von neuen Maßnahmen zur Verbesserung des thermischen Managements dienen.

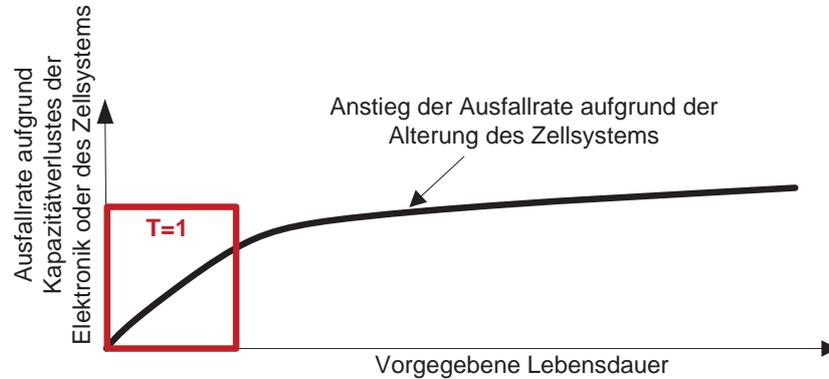


Abbildung 2.14: Ausfallrate eines Lithium-Ionen-Zellsystems nach [25] aufgrund der Alterung des Zellsystems

### 2.5.3 Erfassung des Alterungszustands eines $\text{LiFePO}_4$ Zellsystems

Das Batteriemanagementsystem hat die Funktion, die Zellen vor irreversiblen Schädigungen zu schützen und die Lebensdauer zu gewährleisten. Im Batteriemanagementsystem wird der Ladungszustand (State of Charge) und der Alterungszustand (State of Health) berechnet, beispielhaft aufgezeigt in Abbildung 2.15.

Die Beeinflussung der Temperatur auf die kalendarische und zyklische Alterung wird in einem State of Health (SOH)-Algorithmus verarbeitet, der in Abbildung 2.15 veranschaulicht wird. Der Zustand Begin-of-Life (BoL)  $\text{SOH} = 100\%$  beschreibt das volle Leistungs- und Kapazitätsvermögen.

Der Zustand am Lebensende End-of-Life (EoL)  $\text{SOH} = 0\%$  besitzt eine geringere verfügbare Leistung und Kapazität [23] [32], je nach Alterungsfortschritt der Zellen.

$$\text{SOH} = \frac{\text{Gemessene Kapazität}_{\text{Zellsystem, Ist}}}{\text{Nennkapazität}_{\text{Zellsystem}}} \quad (2.15)$$

Niedrige Umgebungstemperaturen ( $T < +8^\circ\text{C}$ ) wirken sich negativ auf das Lade- und Entladeverhalten des Energiespeichers aus. In niedrigen Temperaturniveaus wird nur ein eingeschränktes oder kein elektrisches Laden und Schnellladen zugelassen. Diese Beschränkung soll das Lithium-Plating in den Zellen verhindern. In niedrigen Umgebungstemperaturen wird bei Aktivierung der Zündung der Verbrennungsmotor gestartet und mit diesem das Fahrzeug motorisch

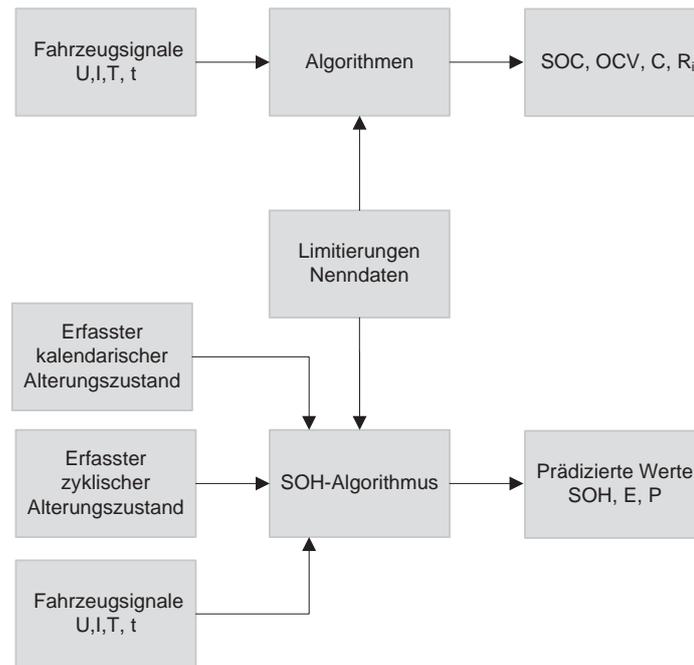


Abbildung 2.15: Algorithmen der Zustandserkennung mittels State of Health in Anlehnung an [31]

angetrieben. Erst wenn die Zellen ihre Betriebstemperatur erreichen, können diese wieder vollfunktional geladen oder entladen werden.

Der hohe Innenwiderstand und die Deratingfunktionen der Batterie reduzieren den Strom in zu hohen ( $t > 45^\circ\text{C}$ ) und zu niedrigen Temperaturen ( $t < 0^\circ\text{C}$ ).

## 2.6 Betrachtung weiterer Hochvoltkomponenten

Für den energetischen Austausch zwischen Nieder- und Hochvoltbordnetz wird ein bidirektionaler Gleichspannungswandler in Hybridfahrzeugen eingesetzt. Im Hybridantrieb dient der 3,6kW Gleichspannungs- (DC/DC) Wandler zur Versorgung der Verbraucher in dem Niedervoltbordnetz. Die Wärmeverluste eines Wandlers setzen sich aus unterschiedlichen Anteilen zusammen.

- Leitverluste
- Schaltverluste
- Verluste in den parasitären reaktiven Elementen

Je nach Betriebszustand (Laden, Fahren) werden unterschiedliche Verbraucher des Niedervoltbordnetzes benötigt [7]. Der Leistungsbedarf in den jeweiligen Zuständen ist abhängig von



der Umgebungstemperatur. Des Weiteren kann die Niedervoltbatterie aus dem Hochvoltsystem nachgeladen werden. Die Gesamtverluste lassen sich aus den aufgeführten Verlusten berechnen.

$$P_{V,DCDC} = P_{V,DCDC,L} + P_{V,DCDC,S} + P_{V,DCDC,P} \quad (2.16)$$

Die resultierenden Leitverluste entstehen in den Induktivitäten, den Kapazitäten und den Leistungshalbleitern. In Gleichung 2.17 wird die gemittelte Verlustleistung aller Schaltvorgänge berechnet. Die Verluste in den parasitären aktiven Bauteilen werden induktiv oder kapazitiv bestimmt.

$$P_{V,DCDC,PInduktiv} \cdot n = t_{Schalt} \cdot \int_{Schaltvorgang} L \cdot I^2 dt \quad (2.17)$$

$$P_{V,DCDC,PKapazitiv} \cdot n = t_{Schalt} \cdot \int_{Schaltvorgang} C \cdot U^2 dt \quad (2.18)$$

Eine weitere Komponente stellt das elektrische Ladegerät dar. In dieser Arbeit werden die Einflüsse auf den Wirkungsgrad des Ladens von der Ladedose bis hin zum elektrischen Antrieb untersucht [33].

$$\eta_{Lader} = f(U_{AC}, I_{AC}, T_{Kühlmedium}, T_{Umgebung}, \dots) \quad (2.19)$$

$$\eta_{Lader} = \frac{P_{AC} - P_{V,Konstant} - P_{V,Var}(I^2)}{P_{AC}} \quad (2.20)$$

Die Wärmeverluste des Ladegeräts setzen sich unter anderem aus folgenden Anteilen zusammen [33].

- MOSFET-Verluste
- Dioden-Verluste
- Transformatorverluste

Der maßgebliche Einfluss auf die Wärmeverluste ergibt sich durch die Kühlmediumtemperatur und nicht durch die Umgebungstemperatur. Becker [33] untersucht die Auswirkungen unterschiedlicher Ladungsströme für 230V (EU) und 120V (USA).

$$P_{V,Lader} = P_{V,MOSFET} + P_{V,Dioden} + P_{V,Transformator} \quad (2.21)$$

Das Ladegerät besitzt ebenfalls eine Deratingfunktion. Im Derating wird der anliegende Strom begrenzt, um die Schädigung der elektronischen Bauteile bei zu hohen Temperaturen zu verhindern. Des Weiteren kann ein Derating einsetzen, wenn der maximale Spannungswert überschritten wird.

## 2.7 Stand der Technik zum Wärmemanagement der Hochvoltsysteme

Aktuelle Forschungsprojekte [34] erkennen, dass ein gesamtheitliches Thermomanagement von alternativen Antrieben konträre Ziele verfolgt. So können die Kühlungsanforderungen und die Innenraumklimatisierung im Gegensatz zur Energieeffizienz stehen. Alle relevanten Bereiche in der Fahrzeugentwicklung müssen frühzeitig berücksichtigt werden und in jedem Betriebszustand bedient werden. Ein gesamtheitliches Wärmemanagement und die Schnittstellen zeigt Abbildung 2.16.

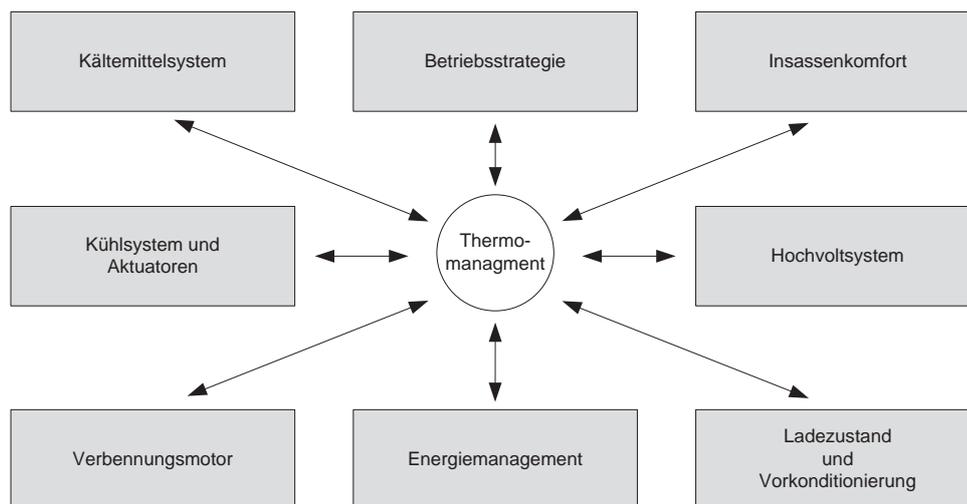


Abbildung 2.16: Gesamtheitliche Wärmemanagement eines Hybridfahrzeugs und seine Schnittstellen

Zu Beginn der Arbeit werden verschiedene am Markt befindliche Plug-In-Hybridfahrzeuge und ein elektrisches Fahrzeug analysiert und deren Wärmemanagement im aktuellen Stand zusammengefasst. Abbildung 2.17 zeigt die Maßnahmen unterschiedlicher Hersteller zur richtigen Konditionierung des Antriebs.

Der **Porsche Panamera S E-Plug-In-Hybrid** besitzt eine getriebeintegrierte Synchronmaschine. Der Hochtemperaturkreislauf kühlt den Verbrennungsmotor und den Kühlmantel des Stators der Synchronmaschine. Mit Rippen am Statorgehäuse wird der Wärmeübergang zum Kühlme-



dium erhöht. Im Hochtemperaturkühlkreislauf wird die elektrische Maschine neben dem Verbrennungsmotor direkt mit Wasser gekühlt. Ein Temperatursensor liefert den aktuellen Wert und wird für die Ansteuerung der Hochtemperaturlüfter weiter verarbeitet. Der konventionelle Niedertemperaturkühlkreislauf versorgt den Ladeluftkühler und die Leistungselektronik mit integriertem Gleichspannungswandler. Die Batterie und das Ladegerät werden durch den zusätzlichen zweiten Niedertemperaturkühlkreislauf konditioniert. Reicht die Kühlleistung des Frontwärmetauschers nicht aus, wird über den Chiller Kühlleistung zugeführt. Der Wärmetauscher ist mit dem Kältemittelkreislauf der Klimaanlage verbunden. Dieser wird bei Überschreiten einer festgelegten Batterietemperatur aktiv eingeschaltet. Für kalte Umgebungsbedingungen wurde ein Heizgerät im Kühlwasserkanal der Batterie integriert. Dies ermöglicht ein schnelles Aufheizen des Energiespeichers [35].

Der **Volkswagen Golf Plug-In-Hybrid** von Volkswagen ordnet den jeweiligen Komponenten Temperaturfenster zu. In diesem Fahrzeug sind aufgrund der thermischen Anforderungen der Bauteile drei Kühlkreisläufe verbaut. Im konventionellen Hochtemperaturkühlkreislauf sind der Verbrennungsmotor und der Getriebeölkühler angeordnet, diese liegen im zulässigen Temperaturbereich über 90 Grad Celsius. Dieser Kühlkreis ist gekoppelt mit der Klimatisierung. Bei Heizbedarf des Innenraums wird dieser entkoppelt und mit einem PTC-Heizer erwärmt. Im ersten Niedertemperaturkühlkreislauf werden die Komponenten mit einer Wohlfühltemperatur von 75 bis 90 Grad Celsius integriert. Dies sind der Ladeluftkühler und die elektrische Maschine. Die elektrische Maschine wird mit Wasser-Glykol am Statorgehäuse gekühlt. Der zweite Kühlkreislauf versorgt die Hochvoltbatterie, die Leistungselektronik und das Ladegerät. Die eingesetzten Komponenten mit ihren sensiblen Bauteilen liegen im Temperaturbereich deutlich unter 60 Grad Celsius. Die Batterie ist flüssig gekühlt und wird mit einer Kühlplatte pro Zellmodul ausgestattet [36].

Der **Toyota Prius Plug-In-Hybrid** verfügt über einen 5,2kWh Lithium-Ionen-Speicher, eine 60KW permanent erregte Synchronmaschine, ein Planetengetriebe, einen Generator, einen 73kW Verbrennungsmotor, eine Leistungselektronik, einen Gleichspannungswandler und ein Ladegerät. Die Ladezeit beträgt 1,5 Stunden. Die prismatischen Lithium-Ionen-Zellen werden mit Luft gekühlt, ebenso das Ladegerät. Der konventionelle Hochtemperaturkühlkreislauf beinhaltet den Verbrennungsmotor, das Getriebe und die Leistungselektronik. Der Prius der dritten Generation enthält zudem über verschiedene Generationen weiterentwickelte Hochvoltkomponenten. Die Leistungselektronik wurde in ihrem Gewicht und Volumen verkleinert. Die fluidgekühlte Kühlanbindung der IGBTs wurde von dem Aufbau mit Löttschicht, Isolierung, Kupferschicht, Wärmeleitpaste und Aluminiumkühlkörper auf eine Direktkühlung umgestellt. Der Aufbau der Direktkühlung ersetzt die Kupferschicht und Wärmepaste mit einer neuen Lochplatte. Die Leistung konnte trotz geringeren Bauraums verbessert werden, da die Wärmeabfuhr der IGBTs erhöht wurde.

	 Porsche Panamera S E Plug-In Hybrid	 VW Golf Plug-In Hybrid	 Toyota Prius Plug-In Hybrid	 Opel Ampera Plug-In Hybrid	 BMW i8 Plug-In Hybrid	 Volvo V60 Plug-In Hybrid	 VW e-UP
Verbrennungsmotor	Hochtemperaturkühlkreislauf Wasser-Glykol Gemisch						-
Getriebe	Ölgekühlt, Kopplung mit Hochtemperaturkühlkreislauf über den Getriebeölkühler						-
Elektrische Maschine	Getriebeintegriert, Wasser und Öl gekühlt			Getriebeintegriert, Öl gekühlt	Getriebeintegriert, Öl gekühlt		Wasser gekühlt
Generator					Startergenerator		
Leistungselektronik	Fluidgekühlt/NT		Fluidgekühlt	Fluidgekühlt/NT	Fluidgekühlt		Fluidgekühlt
Lithium-Ionen-Batterie	Fluidgekühlt/NT		Luftgekühlt	Fluidgekühlt/NT	Kältemittel gekühlt		Keine aktive Kühlung
Gleichspannungswandler	Fluidgekühlt/NT		Fluidgekühlt/HT	Luftgekühlt			Fluidgekühlt
Ladegerät	Fluidgekühlt/NT		Luftgekühlt	Fluidgekühlt/NT			Fluidgekühlt
Zuheizer	HV-PTC	HV-PTC		HV-PTC		HV-PTC	

Abbildung 2.17: Komponenten des Antriebsstrangs und ihr Wärmemanagement

Des Weiteren werden die Schaltzeiten der IGBTs verkürzt, um die Schaltverluste zu verringern [37]. Die Ursachen der hohen Verluste im Ein- und Ausschaltvorgang erörtert fundiert Abschnitt 2.4 .

Der **Opel Ampera Plug-In-Hybrid** verfügt über vier Kühlkreisläufe. Der erste Niedertemperaturkühlkreislauf wurde für die Batterie entwickelt, und der zweite beinhaltet die Leistungselektronik und das Ladegerät. Das Kühlmedium ist ein Gemisch aus deionisiertem Wasser und Glykol. Die Batterie ist über den Chiller mit dem Kältekreislauf verbunden [38]. Sie ist flüssig gekühlt und besitzt pro Zelle eine Kühlplatte. Ein drei-Wege-Ventil nach der Batterie kann den Kühlkreislauf je nach Bedarf der Batterie regeln und gegebenenfalls den Chiller zuschalten. In dem Batteriegehäuse ist des Weiteren ein 360V Heizelement verbaut. Diese Kühlanbindung ist thermisch effizient; jedoch erfordert diese einen großen Bauraum und einen hohen Aufwand. Die elektrische Maschine ist mit Getriebe ATF Öl gekühlt. Das Öl wird mit einer konventionellen Getriebeölpumpe umgewälzt. Der Verbrennungsmotor und die Anbindung der Innenraumheizung sind im Hochtemperaturkreislauf angeordnet. Ein 360V Zuheizter sorgt für die notwendige Wärme im Innenraum.

Der **BMW i8 Plug-in-Hybrid** besitzt auf der Hinterachse einen Ottomotor, eine Synchronmaschine, eine maschinennahe Leistungselektronik und einen Startergenerator. Dieser Verbau der Hochvoltkomponenten in der Umgebungsluft und der Abwärme des Verbrennungsmotors muss bei der thermischen Integration berücksichtigt werden. Des Weiteren wurde die Lithium-Ionen-



Batterie unter der Mittelkonsole angeordnet. Diese ist direkt an den Kältemittelkreislauf der Klimaanlage angebunden. Insbesondere die flache Karosserie wirkt sich auf die Senkung des Luftwiderstands durch den geringen Luftwiderstandsbeiwert und die Luftführung aus [39].

**Der Volvo V60 Plug-In-Hybrid** wird elektrisch mit dem Elektromotor im Heck angetrieben. Der Lithium-Ionen-Hochvoltspeicher ist unter dem Boden des Kofferraums integriert. Innerhalb von 4,5 Stunden kann diese Hochvoltbatterie von extern geladen werden. Im Preconditioning kann die Batterie im Stand gekühlt werden. Zudem wird diese in kalten Umgebungstemperaturen mit einem PTC-Zuheizelement auf die benötigte Zelltemperatur gebracht [40].

**Der Volkswagen e-up!** ist ein rein elektrisches angetriebenes Fahrzeug. Grundsätzlich werden, wie bereits bei den Plug-In-Hybriden erörtert, eine elektrische Maschine, eine Leistungselektronik mit eingebautem Gleichspannungswandler sowie ein Ladegerät eingesetzt. Diese Komponenten sind in einem gemeinsamen flüssigkeitsgekühlten Kreislauf verbaut. Die Hochvoltbatterie am Boden des Fahrzeugs ist hingegen luftgekühlt [41].

Ein wesentlicher weiterer Fokus des Thermomanagements liegt auf dem Innenraumkomfort. Der Innenraum muss schnell und komfortabel konditioniert werden [42]. Das Ziel liegt darin, einen hohen Komfortanspruch bei geringem Energieverbrauch zu verwirklichen. Mit der Aufheizung des Innenraums in unmittelbarer Insassennähe (zum Beispiel Flächenheizung) wird dies realisierbar. Zudem wird eine schnelle Aufheizung des Innenraums mit einem Luft-PTC ermöglicht. Viele Studien befassen sich mit der Energieeinsparung, um das Heiz- und Klimasystem effizienter zu gestalten [43]. Neue Ansätze erfolgen mit integrierten Wärmepumpen im Kältemittelkreislauf. Eine Vorkonditionierung im Stand bewirkt einen hohen Komfort für den Insassen und das Konditionieren der Komponenten [34] im Stand während der Ladezeiten. Die neuen Technologien mit dem Einsatz der Kältemittel 1234yf und CO<sub>2</sub> fasst [44] zusammen.

Beim elektrischen Antrieb liegen große thermische Herausforderungen in den Energiespeichern. Über das Thermomanagement und die thermischen Berechnungen von Lithium-Ionen-Hochleistungsbatterien berichten [28] [45] [46] [47] [24]. Die Leistung und die Lebensdauer sind abhängig von einer homogenen Kühlung der Zellen und der Zellmodule. Umfangreichere Untersuchungen zeigen, dass sowohl die maximale Zelltemperatur als auch die maximale Differenz derselben nicht überschritten werden dürfen. Die thermische Auslegung erfolgt in der Literatur in Anbetracht der maximalen kontinuierlichen Batterieverlustleistung. Diese Verlustleistung, beziehungsweise abgeführte Wärmeleistung der Batterie, wird mit einer Kühlung abgeführt. Das Ziel ist die Auslegung bis zu einer maximal zulässigen Batterietemperatur und einer garantierten Temperaturhomogenität. Es erfolgt eine Abschaltung der Batteriekühlung bei Unterschreitung definierter Zelltemperatur. Mittels Heizgerät im Kühlwasserstrom werden die Energiespeicher herstellerübergreifend aufgewärmt. Der Vorteil des PTC-Heizers ist die Verfügbarkeit von hoher Heizleistung in kurzer Zeit. Viele Hersteller verwenden einen zusätzlichen

Niedertemperaturkühlkreislauf, um das niedrige Temperaturniveau der Lithium-Ionen-Zellen zu gewährleisten. Es werden je nach Hersteller Kopf-, Boden- oder vertikale Kühlsysteme in die Batteriegehäuse integriert. In den Plug-In-Hybriden werden je nach Hersteller Luft, Kältemittel oder Wasser/Glykol als Kühlmedium für den Energiespeicher eingesetzt.

Die thermische-elektrische Modellbildung von Lithium-Eisenphosphat-Energiespeichern zeigen [48] [49]. Die Alterung der Zellen in den Energiespeichern erfolgt in Abhängigkeit von der Temperatur [50] [51] [27] [52]. Um die Energiespeicher zu schützen, werden Batteriemangement-Systeme [31] in unterschiedlichen Anwendungen eingesetzt. Mittels der Diagnose können die Kapazität und der Innenwiderstand gemessen werden [26]. Dies dient der Zustands- und Alterungserkennung [23] von den Zellen.

Für die Zuverlässigkeit von Leistungselektroniken [21] [53] [19] ist die thermische Anbindung und der Aufbau [15] [18] wesentlich, wie in Abschnitt 2.4 aufgezeigt wird. Die Berechnung der Sperrschichttemperaturen der IGBTs mit der pulsweiten Modulation zeigt [54]. Die effizienten Kühlanbindungen und die Wärmeübergänge der Halbleiter auf den Kühlplatten werden in [55] berechnet und veranschaulicht. Eine Flüssigkeitskühlung ist üblich. Die Hersteller integrieren diese Elektronik sowohl in den Nieder- als auch in den Hochtemperaturkühlkreislauf [56]. Der thermische Stress der Halbleiterbrücken [57] in Messung und Simulation [58] [59] zeigt, dass die immer kleineren Bauteile steigenden Leistungen standhalten müssen. Die Aufbautechnik ist wesentlich, um Schädigungen der Halbleiter zu vermeiden. Die Kupferdrähte sind aufgrund der mechanischen Ausdehnung und hieraus folgenden Brüchen Ursache für Ausfälle. Die Kupferdrähte werden zukünftig nicht mehr eingesetzt, und das Sintern mit Silber bietet einen effizienteren Wärmeübergang. Bei Hochleistungsanwendungen wird oftmals für die Bauteile eine Wasserkühlung benötigt, da diese eine bessere Wärmeleitung als die Luftkühlung gewährleistet.

Die permanent erregten Synchronmaschinen werden aufgrund ihrer Leistungsdichte und Robustheit bevorzugt von den Herstellern in Plug-In-Hybrid-Antriebssträngen eingesetzt. Die thermischen Belastungen von Synchronmaschinen erforschen [60] [61] [62] [63]. Die Alterung insbesondere der Wicklungen und Isolierungen von Synchronmaschinen auf Komponentenebene zeigen [14] [64]. Die Kühlungssituationen [13] [65] werden in stationären thermischen Zuständen ermittelt. Der Verlustoptimierung des elektrischen Antriebs widmen sich [66] [67]. So werden die Konstruktionen von Rotor und Stator auf thermische Effizienz überprüft. Auch die Anbindung dieser an das Kühlmedium wurde bereits von [68] analysiert und die Wärmeübergänge von Magnet und Wicklung zum Kühlmedium verbessert. [69] stellt sich der Herausforderung der Simulation von permanent erregten Synchronmaschinen. Die Kühlung mit Getriebeöl im Luftspalt bietet sich aufgrund der Bauraumsituation der Maschinen im Getriebe an. Kleinere Maschinen werden mit Wasser am Statorgehäuse gekühlt. Einige Studien widmen sich der verlustoptimierten Auslegung der Ansteuerung der Synchronmaschinen durch die Antriebsleistungselektronik.



Mit Hilfe einer gesamtheitlichen Fahrzeugmodellierung [70] [71] [72] kann das komplexe System eines Plug-In-Hybridfahrzeugs dargestellt werden. Durch die hohe Komplexität ermöglicht eine gesamtheitliche Simulationsumgebung sowohl die Beantwortung von konventionellen Fragestellungen der Hybridfahrzeuge, unter anderem der Fahrdynamik und der Betriebsstrategie, als auch die Entwicklung von neuen thermischen Lösungsansätzen. Baltzer [73] konnte mit einer Fahrzeugmodellierung, die die Batterietemperatur berechnet, deren Einsatz als Wärmespeicher erfolgreich aufzeigen. Steinberg et al. [74] fasst verschiedene Studien zum Einsatz thermischer Fahrzeugmodellierung zusammen. Einige Studien integrieren ein Alterungsmodell der Batterie, um die Auswirkungen auf die sinkende Leistungsfähigkeit des Energiespeichers und den Gesamtverbrauch zu prognostizieren.

Insbesondere das Zusammenarbeiten von einem Thermomanagement mit dem Energiemanagement im Fahrzeug gewinnt zunehmend an Bedeutung. So führen unterschiedliche Ansätze eine Energieeffizienzanalyse und ein prädiktives Energiemanagement von Hybridfahrzeugen durch [43] [75] [6] [5]. Das gesamtheitliche Thermomanagement von elektrischen Antrieben zeigen [44] [73] [2]. Folgende Ansätze existieren bereits in der Forschung:

- Einsatz von elektrischen Deratingstrategien, um thermische Schädigungen einzelner Komponenten zu vermeiden
- Kühlauslegung nach Extremwert-Kriterien und maximalen kontinuierlichen Verlustleistungen
- Bedarfsgerechtes Wärmemanagement des elektrischen Antriebs und Regelung der Kühlungsaktuatoren nach Wirkungsgraden

Wie oben aufgezeigt, existiert in den aktuellen Forschungen keine Beschreibung der Hochvolt-systeme, die alle wesentlichen thermischen Eigenschaften der eingesetzten Bauteile zusammenführt. Die Kühlungsregelung eines Hochvoltsystems erfolgt bisher unabhängig vom Betriebszustands des gesamten Antriebs. Die Lebensdauerzustände der Bauteile in Zusammenhang mit den thermischen Zuständen werden nicht beobachtet. Die Alterungen werden maßgeblich beeinflusst von dem gefahrenen Zyklus, der Zeit und den Temperaturen. Die Lebensdauer Auswirkungen auf die Regelung von Kühlung, Betriebsstrategie und Energiemanagement wurden bisher nicht weiter bearbeitet.

Das Ziel dieser Arbeit ist es daher, die Methoden zur Konditionierung, die zum Teil aus konventionellen Antrieben stammen, mit den thermischen Mechanismen der Hochvoltelemente miteinander zu koppeln.

## 2.8 Anwendungen von Kühl- und Heizmethoden

Die Herausforderungen des elektrischen Antriebs erschließen sich aus den weltweiten Klimabedingungen [42]. In dieser Arbeit wird zwischen Warm- und Kaltumgebung unterschieden. Die Zustände des elektrischen Antriebs entstehen aus folgenden Umgebungsbedingungen.

*Warmstart:*

- Einfluss Sonneneinstrahlung, Aufheizung des Antriebstrangs bei langer Standphase, dieser muss gekühlt werden,
- Gleichzeitige Kühlung des Systems auf die optimale Betriebstemperatur
- Frühzeitiges Eintreten des Deratings verursacht Leistungsbegrenzung des gesamten Antriebs

*Kaltstart:*

- Beim Kaltstart ist thermische Energie Mangelware
- Der Energiespeicher ist nicht leistungsfähig, eine Aufheizung scheint notwendig, um elektrisch Fahren und Laden zu können
- Es besteht der Konflikt zwischen dem Bedarf, den Antrieb auf die Betriebstemperatur zu bringen und den Innenraum möglichst schnell komfortabel zu konditionieren

Neben den Komponenten und den Ausstattungsmerkmalen des verbauten Kühlsystems, werden Kennparameter ausgewählt, um das thermische Verhalten auf Systemebene aufzuzeigen. Tabelle 2.2 verdeutlicht grundlegend die Äquivalenz zwischen thermischen und elektrischen Signalen. Dieser Sachverhalt ist für die Untersuchung des Hochvoltsystems eine wesentliche Voraussetzung.

Tabelle 2.2: Äquivalenz von thermischen und elektrischen Größen

Thermisch		Elektrisch	
Größe	Zeichen	Größe	Zeichen
Temperatur	T	Spannung	U
Wärmestrom	$\dot{Q}$	Strom	I
Thermischer Widerstand	$R_{th}$	Widerstand	R
Thermische Kapazität	$C_{th}$	Kapazität	C



### 2.8.1 Wärmeübertragung in den eingesetzten Bauteilen

Um genaue Aussagen über das Temperaturverhalten der Hochvoltkomponenten zu erarbeiten, ist es wesentlich, die Wärmequellen und -senken in den elektronischen Bauteilen zu identifizieren und zu analysieren. Die Wärmeübertragung basiert auf physikalischen Mechanismen [76]. Der Energieaustausch zwischen einem System und dessen Umgebung kann durch Konduktion, Konvektion oder Radiation erfolgen, aufgezeigt in Abbildung 2.18.

Der Mechanismus der *Konduktion* tritt in zwei Schichten unterschiedlicher molekularer Aktivität auf. Die Schichten können ein ruhendes Fluid, ein festes Material oder ein Gas darstellen. Die Diffusion der Energie erfolgt von dem höheren Aktivitätsniveau zum geringeren Niveau unter der Annahme von stationären Temperaturen. Die *Konvektion* beschreibt einen instationären Mechanismus mit Materientransport zum Ort geringerer Energie. Erzwungene Konvektionen werden mit Hilfe von Lüftern, Kühlmedienpumpen oder Änderungen der Dichte im Material hervorgerufen. Die *Radiation* beschreibt die Wärmeübertragung durch Strahlung [77].

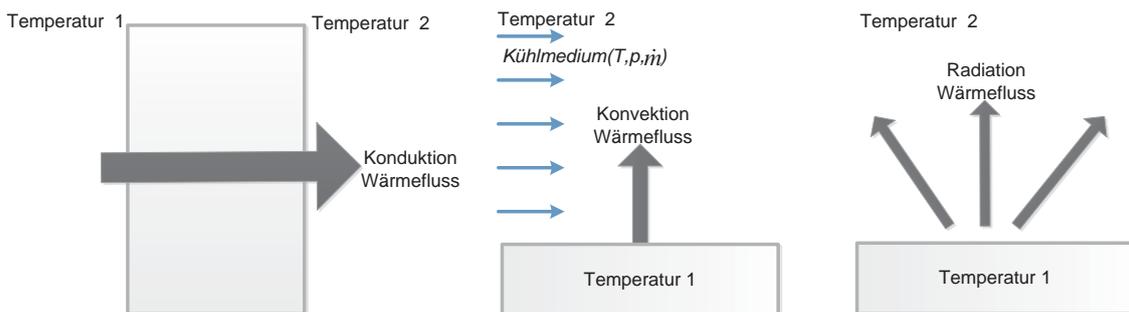


Abbildung 2.18: Wärmeübertragung mittels Konduktion, Konvektion und Radiation

Die Wärmeübertragung über Kontakt wird durch Fourier nach [77] definiert.

$$-\dot{Q} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.22)$$

Mit Anwendung des Stefan-Boltzmann-Gesetzes wird die Übertragung der Wärme durch Strahlung berechnet. Dieser Mechanismus tritt vorwiegend auf, wenn ein Wärmestrom von den Bauteilen in die Umgebungsluft abgegeben wird.

$$-\dot{E} = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2.23)$$

Befinden sich die Medien, die zueinander Wärme übertragen, in Ruhe, wird diese mit Hilfe des Wärmeübergangskoeffizienten bestimmt.

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A(T_{\text{Medium}} - T_{\text{Kontakt}}) \quad (2.24)$$

Im Falle einer stationären Wärmeleitung kann die Nußelt-Zahl  $Nu$  als dimensionsloser Wärmeübergangswert herangezogen werden [42].

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} = f(Re, Pr) \quad (2.25)$$

Die Prandtl-Zahl  $Pr$  definiert in dieser Anwendung das Stoffwert-Verhältnis. Die spezifische Wärmekapazität deklariert die Wärmekapazität pro Masseneinheit und wird als  $c_p$  Wert bezeichnet [78].

$$Pr = \frac{\eta_{\text{Viskosität}} \cdot c_p}{\lambda} \quad (2.26)$$

Das Verhältnis der Kräfte von Trägheit und Reibung eines Kühlmediums durch den Kühlkörper wird durch die Reynolds-Zahl  $Re$  beschrieben [77].

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu} \quad (2.27)$$

Welche Abwärme von den Kontaktflächen zum Kühlmedium abgeführt wird, hängt von der Viskosität des Kühlmediums ab, wie in Tabelle A.1 aufgeführt. Ein Unterschied liegt zwischen der dynamischen und kinematischen Viskosität [77].

$$\eta_{\text{Viskosität}} = \nu \cdot \rho \quad (2.28)$$

Wird zwischen einem Kühlmedium und einer Kühlplatte Wärme übertragen, kann diese mit dem Wärmedurchgangskoeffizienten beschrieben werden.

$$\frac{1}{k_{12}} = \frac{1}{\alpha_1} \cdot \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \quad (2.29)$$

Um die Kühlleistung zu gewährleisten, ist es zusätzlich wesentlich, in den Kühlkörpern der Hochvoltkomponenten einen hohen Druckabfall zu vermeiden [79].



$$\Delta p = \zeta \cdot a \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2} \quad (2.30)$$

$\zeta$  beschreibt den Reibungsbeiwert und wird durch die Konakov-Gleichung beschrieben [77].

$$\zeta = (1.8 \cdot \log_{10} \cdot Re - 1,5)^2 \quad (2.31)$$

## 2.8.2 Bedeutung der Kühlsystemauslegung

Tabelle 2.3 zeigt ein Beispiel für die auftretende Verteilung der Umgebungstemperaturen in Europa. In jeglichen Umgebungsbedingungen müssen die Anforderungen an das Hochvoltssystem gewährleistet sein.

Tabelle 2.3: Häufigkeiten von Umgebungstemperaturen in Europa [80]

Temperatur	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30
Tage pro Jahr	10	10	20	25	30	45	50	50	50	35	35

Es werden unterschiedliche Temperaturbereiche in den Kühlsystemarchitekturen definiert. Für den Verbrennungsmotor wird der Hochtemperaturbereich gewählt. Andere Komponenten, wie die Lithium-Ionen-Batterie, benötigen ein Kühlsystem mit Temperaturen im deutlich geringeren Niveau, wie in Tabelle 2.4 erörtert.

- Niedertemperatur (NT): 20-70 Grad
- Hochtemperatur (HT): 80-110 Grad

In den Kühlkreisläufen wird als Kühlmittel Wasser-Glykol im Verhältnis 50 zu 50 Prozent eingefüllt. Im Kältekreis der Klimatisierung wird momentan das Kältemittel R134a eingesetzt. Dieser wird in den Untersuchungen lediglich als Einflussgröße über den Chiller mitberücksichtigt. Aufgrund der Integration der Synchronmaschine im Getriebe wird diese mit einem Luft-Öl Gemisch gekühlt.

Die Ansteuerung der Aktuatoren des Kühlsystems, wie unter anderem die elektrische Wasserpumpe, der elektrische Sauglüfter sowie die Ventile, erfolgt mittels der Stellsignale der Hochvoltkomponenten. Neben dem Hochtemperaturkühlkreislauf des Verbrennungsmotors entsteht beim Hybridfahrzeug der Bedarf nach Niedertemperaturkühlkreisläufen für die Hochvoltkomponenten.

Tabelle 2.4 fasst die angewandten Kühltechnologien des Referenzfahrzeuges zusammen.

Tabelle 2.4: Kühl- und Heizmethoden der Hochvoltkomponenten

Komponente	Kühlmedium	Kühlsystem	Bauteiltemp.
Energiespeicher	Wasser/Glykol 50/50	Fluidführende Aluprofile	<45°C
Synchronmaschine	ATF Getriebeöl	Ölkühlung Rotor/Stator	<150°C
Leistungselektronik	Wasser/Glykol 50/50	Fin-Pin AlSiC-Kühlplatte	<85°C
Gleichspannungswandler	Wasser/Glykol 50/50	Direkte Umströmung	<75°C
Ladegerät	Wasser/Glykol 50/50	Aluminium-Kühlplatten	<75°C

$$\dot{Q}_{NT1} = \dot{Q}_{Inverter} + \dot{Q}_{Getriebeölwassertauscher} + \dot{Q}_{Ladeluft} - \dot{Q}_{Wärmetauscher} \quad (2.32)$$

Mit Hilfe der Kirchhoffschen Knotengleichungen können in den Kühlkreisläufen die Wärmeströme zusammengefasst und kalkuliert werden, definiert in Gleichung 2.32 und Gleichung 2.33.

$$\dot{Q}_{NT2} = \dot{Q}_{Batterie} + \dot{Q}_{DCDCconverter} + \dot{Q}_{OnBoardLader} - \dot{Q}_{Chiller} - \dot{Q}_{Wärmetauscher} \quad (2.33)$$

Die Kühlleistung einer Hochvoltkomponente ergibt sich in Abhängigkeit von der Architektur des Kühlkreislaufes und den Wärmeströmen der anderen Komponenten im Kühlsystem [81].  $\xi$  beschreibt den Reibungsbeiwert.

$$P_{Kühl,Kreis1} = f(P_{Wärmetauscher}, P_{Pumpe}) \quad (2.34)$$

$$P_{Kühl,Kreis2} = f(P_{Wärmetauscher}, P_{Pumpe}, P_{Chiller}, P_{PTC}) \quad (2.35)$$

$$P_{Kühl,Kreis1} = f(T_{Umg}, T_{Kühl}, P_{V,Inverter}, P_{V,Getriebe}, P_{V,Ladeluft}, \dot{m}, \xi) \quad (2.36)$$

$$P_{Kühl,Kreis2} = f(T_{Umg}, T_{Kühl}, P_{V,OBL}, P_{V,DC/DC}, P_{V,BAT}, P_{V,Chiller}, \dot{m}, \xi) \quad (2.37)$$



Die Leistungselektronik ist im Niedertemperatur-Kühlkreislauf mit Ladeluftkühler und Ölwas-serkühler für die Getriebekühlung integriert.

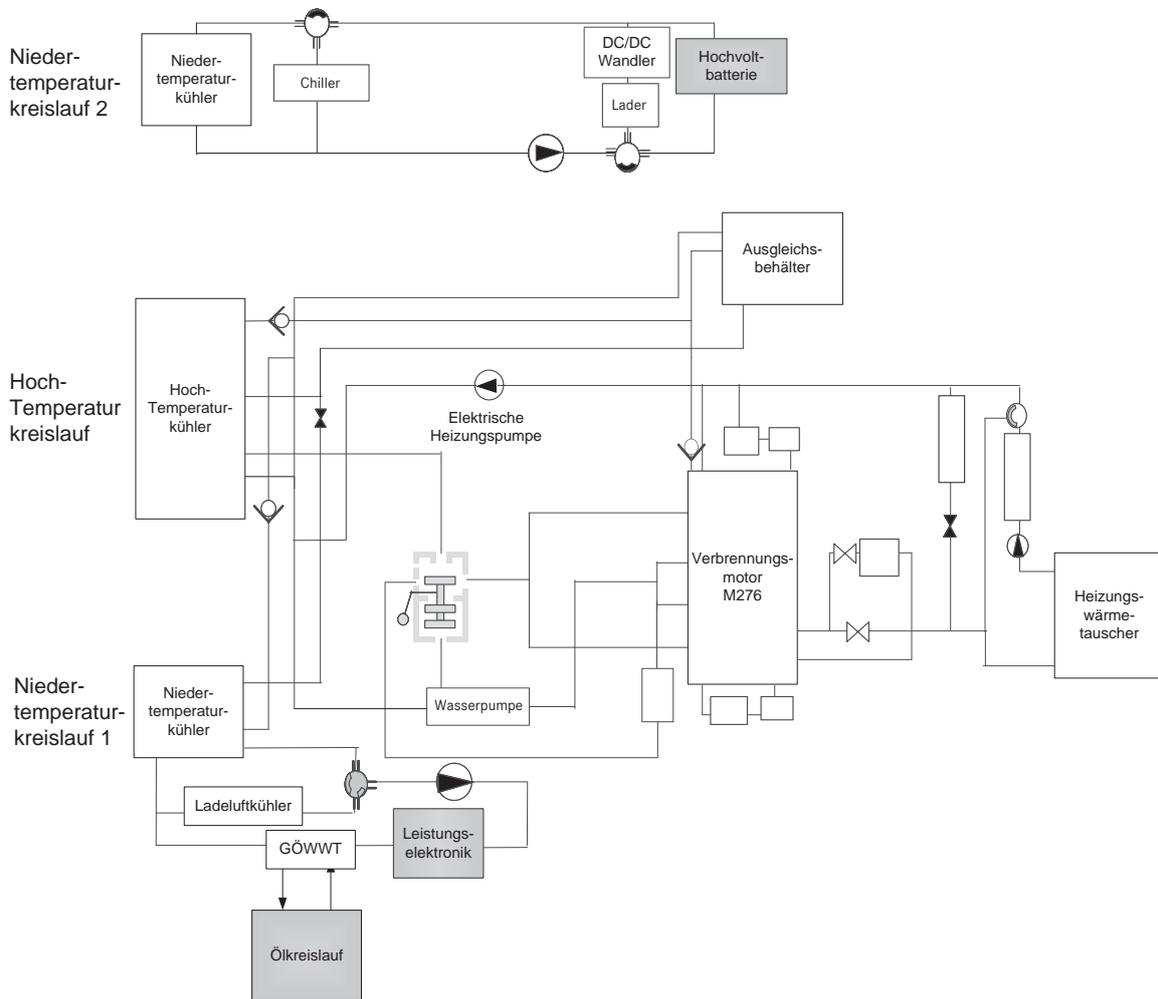


Abbildung 2.19: Kühlsystemarchitektur des Referenzfahrzeugs

### 3 Beitrag für das Wärmemanagement

Ausgewählte wesentliche Kernpunkte, die bisher nicht tiefer untersucht wurden, jedoch zwingend erforderlich sind, um den elektrischen Antriebsstrang zukünftig effizienter gestalten zu können, werden in dieser Arbeit als Grundlage für neue Konzepte definiert. Die folgenden bestimmten Zielfunktionen dieser Untersuchung bilden die Grundlage, abgebildet in Abbildung 1.2. Für die Zielerreichungen werden innovative thermisch-elektrische Sollwertalgorithmen für die Hochvoltkomponenten entwickelt. Die neuen Konzepte sind für Plug-In-Hybridfahrzeuge allgemein anwendbar und nicht abhängig von den detaillierten Spezifikationen der verwendeten Bauteilen. Das Zielbild für die Verbesserungsmaßnahmen setzt sich zusammen aus:

- Verbesserung der elektrischen Verfügbarkeit in jeglichen Klimabedingungen
- Maximale energetische Effizienz des gesamten Antriebsstrangs durch bedarfsgerechte Kühlung
- Gewährleistung der geforderten Lebensdauer der Komponenten aufgrund zustandsabhängiger Konditionierung

Eine Zielfunktion eines optimalen Thermomanagements ist **die Verfügbarkeit des elektrifizierten Antriebsstrangs** und somit die Vermeidung des internen Deratings aufgrund von kritischen Bauteiltemperaturen. Des Gleichen muss eine richtige Konditionierung in jeder Umgebungstemperatur einen uneingeschränkten elektrischen Betrieb ermöglichen, aufgezeigt in Abschnitt 2.5.

Die **Effizienzsteigerung** berücksichtigt, dass bei einer elektrisch hohen Aktivität des Systems auch hohe thermische Wärmeverluste resultieren. Eine bedarfsgerechte Kühlung in Abhängigkeit der Leistungsanforderung im Antriebsstrang ist eine wesentliche Maßnahme, um Energie je nach Fahrzeugzustand einzusparen, da aufgrund von hohem Kühlungsbedarf Energie verbraucht wird (Pumpe, Lüfter, Klimaanlage). Die energetische Effizienz soll gesamtheitlich für alle Hoch- und Niedervoltverbraucher gesteigert werden.

Die Einhaltung der **Lebensdauieranforderungen** der Komponenten beinhaltet die Vermeidung von thermomechanischem Stress und die Identifikation der thermischen Stressfaktoren in den Komponenten. Die Alterungsfaktoren dieser Elemente müssen durch geeignete Kühlmaßnahmen in thermisch kritischen Zuständen verhindert oder ausgeglichen werden. Genau diese Wechselwirkung ist Schwerpunkt der weiteren Vorgehensweise.

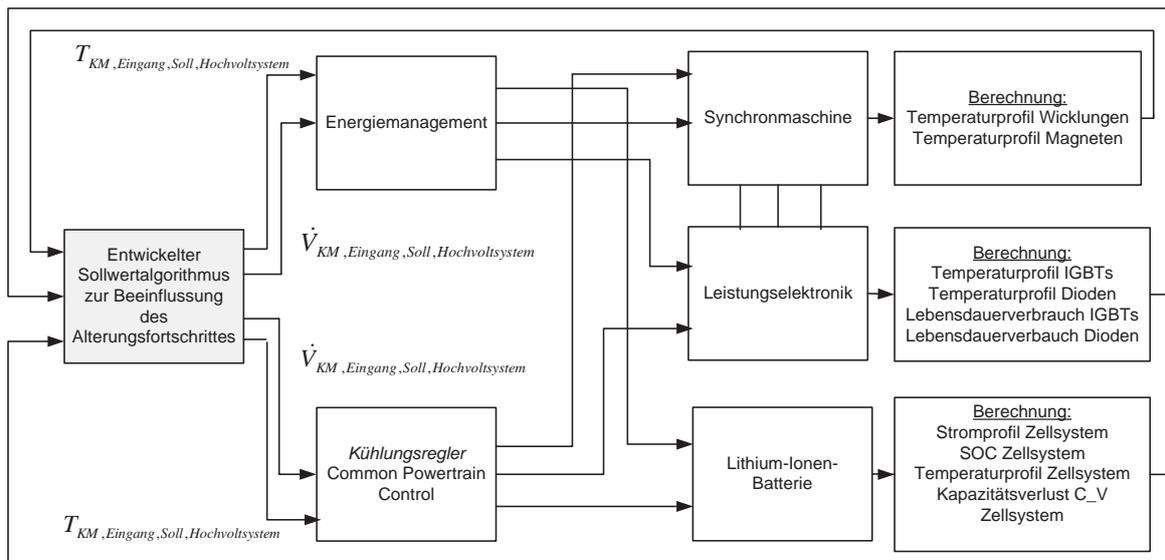


Abbildung 3.1: Thermische Auslegung aufgrund von Indikatoren der Alterung [82]

Zur Vermeidung frühzeitiger Schädigungsmechanismen wird das Kühlsystem mit den Stellgrößen Kühlwassertemperatur sowie Volumenstrom nach dem Lebensdauerfortschritt jedes Zeitabschnittes eingestellt. Die Ansteuerung der Kühlung erfolgt heute nach festen Grenzwerten ohne Berücksichtigung des Lebensdauerzustandes.

Die neu erarbeitete Technologie beinhaltet eine zusätzliche integrierte Software in dem Steuergerät der Kühlung und des Energiemanagements, aufgezeigt in Abbildung 3.1, welche die Lebensdauerkenngößen überwacht. In dieser Steuereinheit werden die Ist-Größen aller Hochvoltkomponenten und Zustände des Kühlsystems erfasst und analysiert. Die prognostizierte Lebensdauer für die Betriebsstunden im nächsten Zeithorizont wird iterativ angepasst, indem der Alterungsfortschritt anhand der Kühlung gezielt beeinflusst wird.

### 3.1 Einfluss der thermischen Konditionierung auf die Alterungsmechanismen

Nach Spezifikation der Leistung eines elektrischen Antriebs werden die Hochvoltkomponenten elektrisch ausgelegt und entsprechend entwickelt. Jede dieser Komponenten enthält Materialien und Eigenschaften, die das Lebensdauerverhalten parametrisieren. Neben der mechanischen und elektrischen Belastung, wirken sich das Temperaturniveau und der Temperaturgradient der Bauteile negativ auf die Lebensdauer aus. Sowohl zu hohe, als auch zu niedrige Temperaturen erhöhen den Fortschritt der Alterung [83].

Die thermisch sensiblen Bauelemente von elektrischen Maschinen sind die Magneten, die Wicklungen und die Isolierungen. Der Alterungszustand der Wicklungen lässt sich zudem durch die thermische Belastung der Isolierungen bestimmen. Temperaturabhängige Mechanismen wirken schädigend auf die Kupferwicklungen und die Isolierstoffe, siehe Abschnitt 2.3.

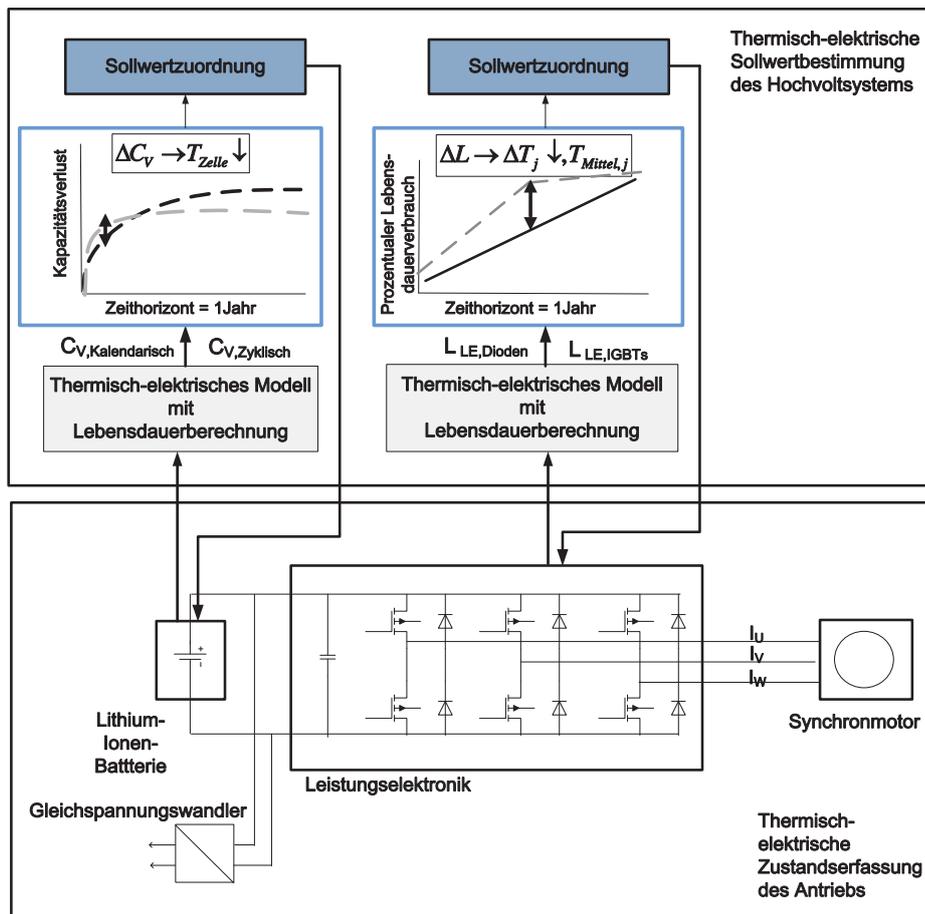


Abbildung 3.2: Blockdiagramm der Zustandserfassung und der adaptiven Bestimmung der Stellgrößen des Hochvoltsystems



Empfindliche Elemente von Elektroniken sind vor allem Leistungshalbleiter, Induktivitäten, Kondensatoren und Verbindungswerkstoffe. Besonders durch Wärme, thermomechanischen Stress und Vibrationen werden Alterungseffekte vergrößert, wie in Abschnitt 2.4 aufgezeigt. Des Weiteren sind irreversible Schädigungen an einer Verbindung zwischen Halbleiter und Lot oder zwischen Lote und Kühlplatte durch diese Einflüsse möglich. Grundsätzlich resultieren die Alterungseffekte eines Hochvoltenergiespeichers aus der Veränderung des aktiven Materials in der Zelle. Der Fahrer erkennt die Alterung aufgrund geringerer Leistung und abnehmender Kapazität (Reichweite) in Abhängigkeit der Zeitkonstante.

Auf Basis von Lebensdauerberechnungen wird in dieser Abhandlung eine Schätzung der Alterung im Stand des Fahrzeuges vorgenommen und die analysierten Werte in einem Algorithmus verarbeitet. Der neue Algorithmus korrigiert die Sollwerte der elektrisch-thermischen Signaleingänge des Systems. Das thermisch-elektrische Verhalten und dessen Auswirkung auf die Lebensdauer des Hochvoltsystems in der Fahrzeugumgebung wird erfasst. Abbildung 3.2 zeigt das grundlegende Schema für die Sollwerterfassung. Diese muss in der Simulation hinterlegt werden, um die Algorithmen ausführen zu können. Nachfolgende Berechnungen werden für die neue Konzeption benötigt. Die Messung und die Simulation der relevanten Signale des Hochvoltsystems sowie die statistische Auswertung der Belastungen für jeden Zeithorizont  $t = 1-15$  Jahr erfolgt unter nachstehenden Annahmen für jeden Tag:

- Standphase und Betrieb im elektrischen und hybridischen Modus wird erfasst
- Die Identifikation der Schädigungsmechanismen und der Lebensdauerzustände der ausgewählten Bauteile wird nach jedem Zeithorizont durchgeführt.
- Die Regelung des Alterungsfortschrittes der empfindlichsten Bauteile verwendet die Stellgrößen  $T_{KM,Ein,Soll}$  und  $\dot{V}_{KM,Ein,Soll}$  für die gewählten Hochvoltkomponenten.

Für jeden Algorithmus der betroffenen Komponente wird eine zusätzliche Berechnung aufgebaut und in die entwickelte Modellierung eingebunden. Die Rückführung der Sollwerte nach jedem Zeithorizont  $t$  erfolgt adaptiv. Folglich ergibt sich die Möglichkeit, dass jede Einheit getrennt oder als System angewendet werden kann.

### 3.2 Innovative Konzeption für verschiedene Komponenten

Die Bestimmung der Lebensdauererbräuche und die dazugehörige Sollwertberechnung erfolgen nach diesem zeitlichen Horizont ( $t = 1$  Jahr, Servicetermin in der Werkstatt). Die Eingangswerte des Hochvoltsystems werden iterativ ausgelesen und analysiert. In thermisch kritischen Zuständen berechnen die Algorithmen neue Sollwerte für die Konditionierung im Einlass der Komponenten. Diese werden in realer Fahrzeugumgebung an das Kühlungssteuergerät übermittelt.

Für die neuartige thermische Lebensdauerstrategie werden zunächst die thermischen Belastungen der Synchronmaschine in ausgewählten thermischen Zyklen berechnet und ausgewertet. Die *thermischen durchschnittlichen Belastungen* der elektrischen Maschine werden mithilfe folgender Größen

- dem Drehmoment, der Drehzahl
- der Rotor- und Statorblechtemperatur
- der Öltemperatur am Kühleinlass
- dem Druck des Getriebeöls

berechnet. Die prozentualen Lebensdauererbräuche von IGBTs sowie Dioden werden anhand nachstehender Werte ermittelt:

- der Phasenstrom, die Schaltfrequenz, der Modulationsindex, die Zwischenkreisspannung
- die Einlasstemperatur des fluiden Kühlmittels
- der Volumenstrom des fluiden Kühlmittels
- die durchschnittliche Bauteiltemperatur und die Temperaturamplituden

Insbesondere die Kühlwassertemperatur dient in dieser Abhandlung als Stellgröße, um die Lebensdauer der empfindlichen Elemente zu erhöhen.

Aus der Zunahme des Kapazitätsverlustes und des Innenwiderstands resultiert ein abnehmendes Leistungsvermögen des Zellsystems. Folgende Werte werden für die Kapazitätsverlustbestimmung benötigt:

- der State of Charge
- der Eingangsstrom des Zellsystems
- die Einlasstemperatur des fluiden Kühlmittels
- der Volumenstrom
- die durchschnittliche Temperatur des Zellsystems

In realitätsnahen Fahrzyklen werden diese Signale messtechnisch und simulativ bestimmt. Um die entworfene Methodik umzusetzen, werden in den folgenden Abschnitten zunächst die grundlegenden Wärmeübertragungsmechanismen betrachtet. Die Lebensdauermechanismen, die in den Komponenten aus den Wärmeverlusten oder der thermischen Einwirkung durch die Fahrzeugumgebung resultieren, werden beschrieben. Abbildung 3.3 stellt die neue Ablaufstruktur zur Beeinflussung der Alterung und der Energieeffizienz dar.

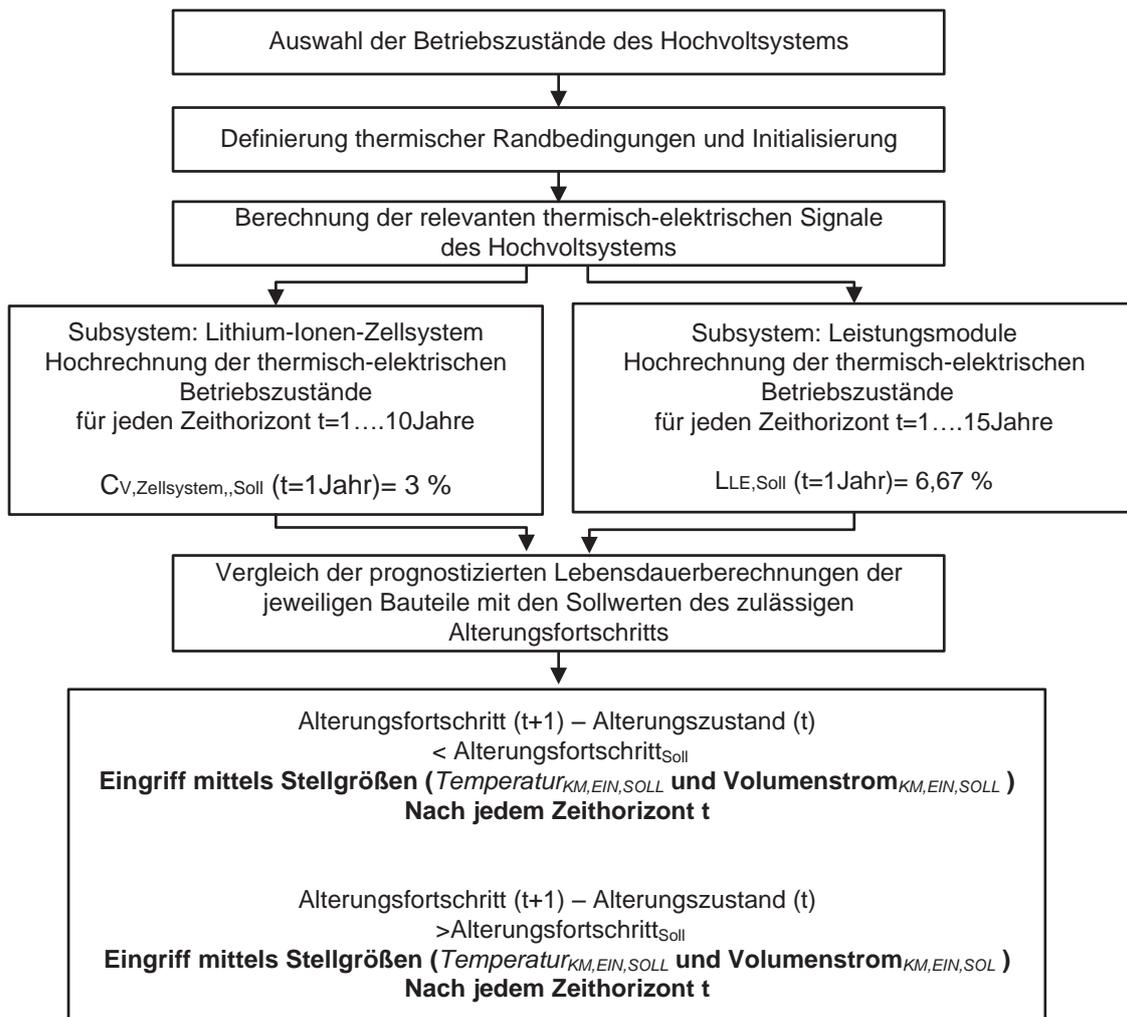


Abbildung 3.3: Neue Ablaufstruktur zur Beeinflussung der Alterungsmechanismen des Hochvoltsystems

### 3.3 Vorgehensweise

Zu Beginn werden der elektrische Antrieb und die Hochvoltkomponenten des Versuchsträgers erklärt. Die Systemarchitektur sowie die thermischen Eigenschaften der Hochvoltkomponenten werden detailliert aufgezeigt und zeigen einen Handlungsbedarf für zukünftige Technologien. Kapitel 2 fasst den aktuellen Stand der Technik zusammen, und es wird ersichtlich, welche thermischen Fragestellungen für zukünftige Hochvoltsysteme zu verbessern und zu beantworten sind. Eine neue Konzeption, die bisher nicht existiert, wird vorgestellt.

Sämtliche Komponenten sind mit Fluiden gekühlt. Die aktuelle Integration der Hochvoltkomponenten im Kühlsystem stellt Abschnitt 2.8 dar. In dieser Abhandlung werden thermodynamische Grundlagen erörtert und die Architektur des Kühlsystems verdeutlicht. Das Wärmemanagement wird anhand des Referenzfahrzeugs beschrieben.

Für die Realisierung und die Bewertung der erarbeiteten Verbesserungspotentiale ergibt sich folgende Vorgehensweise in Abbildung 3.4, die sich zunächst aus der Erstellung und Validierung eines Fahrzeugmodells aufbaut. Eine neue Definition von thermischen Lastfällen für die alternativen Antriebe ist erforderlich und wird durchgeführt.

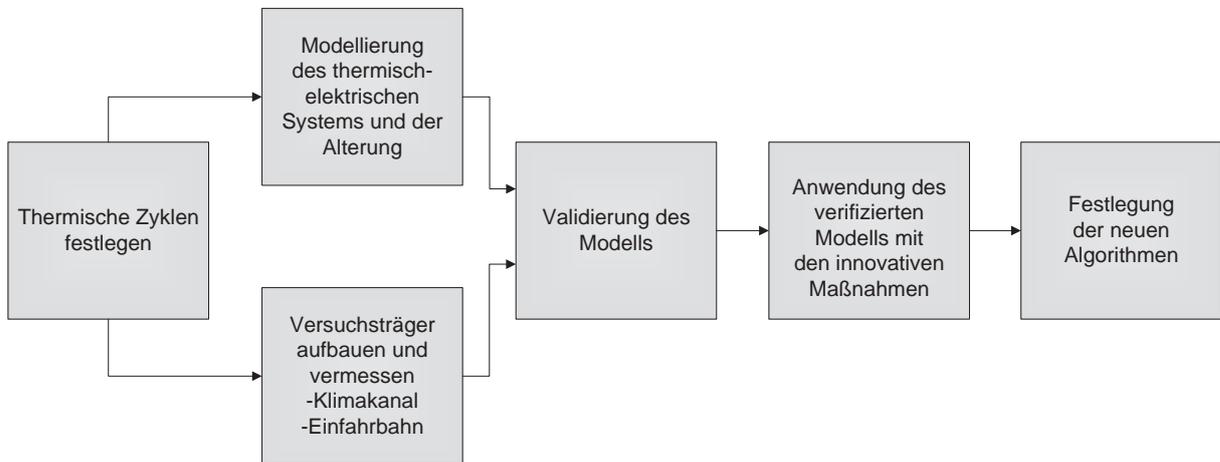


Abbildung 3.4: Schematik der Vorgehensweise sowie des zeitlichen Ablaufs

Kapitel 4 zeigt die Notwendigkeit und die Konzeption des Fahrzeugmodells. Ein detaillierter Einblick in die umgesetzte Modellierung im Hinblick auf die neue Konzeption erklärt die ausgewählten Berechnungsmethoden. In dieser thermisch-elektrischen Gesamtfahrzeugmodellierung mit Berücksichtigung der Alterungsmechanismen werden die Komponenten bis auf die Materialebene nachgebildet. Die elektrisch-thermischen Zustände und die Verluste der sensiblen Bauteile werden transient berechnet. Das Hauptaugenmerk der Analyse liegt auf der Darstellung der thermisch-elektrischen Ersatzschaltbilder anhand vermessener Parameter. Das Definieren aussagefähiger Berechnungsgrößen der einzelnen Subsysteme ist eine unerlässliche Grundlage, um die thermischen Belastungen explizit zu beschreiben. Des Weiteren werden die Alterungszustände der Komponenten fokussiert und anhand der ausgewählten Kenngrößen ermittelt. Um die Qualität und die Genauigkeit des Modells zu bewerten, wird ein Messfahrzeug aufgebaut. Damit kann anhand von ermittelten Daten ein Vergleich mit der Simulation durchgeführt werden.

Für die reale Erfassung der Wärmeverluste und der Wärmeübergangszahlen in Materialien, wird in Kapitel 5 ein Versuchsträger mit ausgewählten Messaufnehmern ausgestattet. Der Stand der Technik identifizierte bereits die die Wärmequellen und -senken und liefert die Vorlage für die Platzierung der Sensoren. In thermischen Lastfällen unter den Umgebungstemperaturen  $-20^{\circ}\text{C}$  bis  $+40^{\circ}\text{C}$  wird das Wärmeverhalten in realen Fahrzuständen gleichermaßen charakterisiert. Besonders thermisch kritische Betriebspunkte müssen in diesem Zusammenhang analysiert werden. Die Wärmeverluste und -ströme werden messtechnisch erfasst, und die Erkenntnisse zeigen, ob die gewählten Berechnungsmethoden eine hohe Qualität besitzen.



Kapitel 6 widmet sich der Beurteilung, der Verifikation und der Validierung der Modellierung. Inwiefern die Güte der Teilmodelle die Abbildung der Wärmeverluste, die Wärmeflüsse zum Kühlmedium, die Leistung und die Lebensdauerberechnung beeinflusst, werden transparent dargestellt und diskutiert. Die Einflüsse und die Wechselwirkungen aufgrund der Fahrzyklen und der verschiedenen Randbedingungen wird diskutiert. Die thermisch-elektrischen Korrelationen mit der geforderten Lebensdauer werden herausgearbeitet.

Die angestrebte Verbesserung wird in Kapitel 7 umgesetzt und in die Modellierung integriert. Mit der Simulationsumgebung werden in unterschiedlichen Versuchen die Auswirkungen berechnet und die Vorteile hinsichtlich der Effizienz und der Lebensdauer aufgezeigt. Ein bedeutender Unterschied zu den bestehenden Technologien liegt in der bedarfsgerechten thermischen Auslegung unter Einbezug der Zuverlässigkeit. Die entwickelten Methoden der Komponenten werden abschließend verglichen und bewertet.

Es wird eine Empfehlung für die zukünftige thermisch-elektrische Systemintegration mit einer Lebensdauerzustandserkennung gegeben.

### 3.4 Experimentelle Bedingungen und die betrachteten Fahrzyklen

Für die anstehende Validierung und die Untersuchungen der Beanspruchung des Hochvoltsystems werden zu Beginn auf realen und synthetischen Fahrten basierende Zyklen gewählt. Zusätzlich wird der Ladezustand für die Untersuchung des Energiespeichers und des Ladegeräts betrachtet. Die benötigten Zyklen sollen das Fahrverhalten von den Kunden realistisch abbilden. Für den Abgleich der Messungen und der Simulationen bedarf es Fahrzyklen, die den Energieumsatz der Komponenten in unterschiedlichen Betriebsanforderungen darstellen.

Das Geschwindigkeitsprofil, die Fahrbahnsteigung, die Umgebungstemperatur, die Gesamtdauer und die Fahrstrecke sowie der elektrische Betriebsmodus werden in den Messungen und den Simulationen in gleicher Weise vorgegeben. Dieses Vorgehen verringert jegliche Störgrößen, die auf das fahrdynamische Verhalten im Fahrzeug wirken und die Validierung mit dem Modell erschweren würden. Die Auswirkungen der unterschiedlichen Fahrbereiche auf die elektrischen Antriebe werden bereits durch die Forschung und Entwicklung untersucht [84]. Die Gründe für die Auswahl der nachstehend angewandten Zyklen sind:

- Die Betrachtung verschiedener realer Lastfälle: Stadt, Land- und Langstrecke und Laden
- Der Fokus liegt auf dem elektrischen Modus des Antriebsstrangs

Die Zyklen werden zunächst nach der Fahrzeit, der Geschwindigkeit, der maximalen und mittleren Leistung sowohl im motorischen als auch im generatorischen Betrieb ausgewählt. Tabelle 3.1 fasst die wesentlichen Eckdaten der gewählten Zyklen zusammen.

Tabelle 3.1: Grundsätzliche Kenndaten der ausgewählten Fahrzyklen

Zyklus	Mode	Zeit (s)	Maximale Geschwindigkeit (km/h)	Maximale Leistung (kW)	Mittlere Leistung (kW)
<i>Japan</i>	Elektrisch	660	72	58	6.48
<i>NEFZ</i>	Elektrisch	1180	120	77.9	10.89
<i>SC03</i>	Elektrisch	596	90	80	9.58
<i>ADAC BAB</i>	Hybridisch	778	130	96.49	3.38
<i>UDDS</i>	Elektrisch	1372	91	70.82	3.05
<i>Konstant</i>	Elektrisch	100	50	80	12.53
<i>Ladevorgang</i>	Standphase ohne Preconditioning	6840	-	3.6	3.6

In diesen Lastfällen werden in den verschiedenen Umgebungsbedingungen die messtechnischen als auch die simulativen Untersuchungen abgearbeitet. Die Fahrzeugversuche werden, anlehnend an die Fahrzeugmodellierung, auf einem einachsiger Rollenprüfstand in einem Klimawindkanal umgesetzt. Mittels Rollkoeffizienten, auch bekannt als a,b,c Parameter, des Fahrzeugs können der reale Rollwiderstand am Prüfstand mit Gleichung 3.1 und die Berechnungen optimal eingestellt werden [85]. Gleichung 3.1 definiert die Laufwiderstandskraft des Prüfstands. In Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit wirkt sich diese Laufwiderstandskraft auf die benötigte Antriebsleistung des Versuchsträgers aus.

$$W = a + (b \cdot v) + (c \cdot v^2) \quad (3.1)$$

Der Rollenprüfstand und die Modellierung werden für die Untersuchungen mit den Rollkoeffizienten  $a=86$ ,  $b=2.1$ ,  $c=0,0162$  parametrisiert. Die Fahrzeugmessungen und -simulationen werden zudem mit den folgenden Parametern realisiert.

- Fahrzeugmasse: 2870kg
- Stirnfläche Fahrzeug: 2,44m<sup>2</sup>
- Luftwiderstandsbeiwert: 0,26

Es wird ein Vergleich zwischen den einzelnen Kühlbedingungen mit den variierenden Voraussetzungen der Vorkonditionierung des Antriebsstranges (Heißland, Kaltland) angestrebt, dokumentiert in Tabelle 3.2. Die Umgebungstemperatur, die Luftdichte und -feuchte, die Luftgeschwindigkeit und die Fahrbahnsteigung werden im Klimakanal gezielt eingestellt und die



Messungen mit dem aufgebauten Versuchsträger durchgeführt und belegt. Dies ermöglicht die realen Umgebungsbedingungen, wie die Lufttemperatur, die relative Luftfeuchte und die Luftanströmung exakt zu vermessen.

Tabelle 3.2: Zusammenstellung der Umgebungsbedingungen für die Fahrzeugmessungen

Bedingung	Heißland	Kaltland	Laden Warm	Laden Kalt
Umgebungstemperatur (°C)	40	-20	20	-12
Luftdruck (bar)	971	971	971	971
Luftfeuchte (%)	40	40	50	50

### 3.5 Thermische Initialisierung des Antriebsstranges und empirische Alterungsbestimmungen

Für die weiteren Untersuchungen und für die Umsetzung der Maßnahmen wird in der Simulationsumgebung eine Ablaufstruktur von einzelnen Skripten zur Einstellung der Berechnung hinterlegt, schematisiert in Abbildung 3.5. Die Maßnahmen beinhalten die bedarfsgerechte Kühlungseinstellung der Batterie als auch der Leistungselektronik in Abhängigkeit des Alterungsfortschritts. Mit Hilfe der Verkettung der einzelnen entwickelten Skripte können jegliche thermische und elektrische Anfangszustände jeder einzelnen Hochvoltkomponente vor der Berechnung definiert werden. Des Weiteren werden der Fahrzyklus, die Fahrbahnsteigung, die Fahrzeit, die Standzeit und die gewünschten Wiederholungen der Simulation vorgegeben.

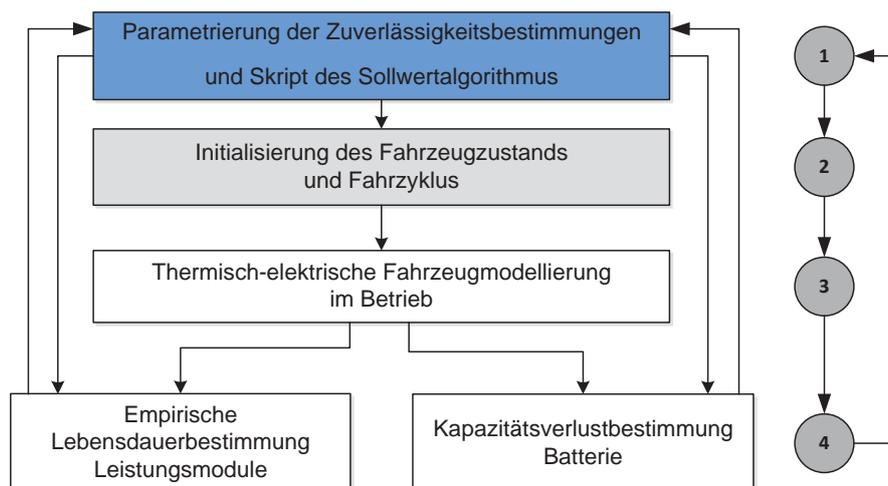


Abbildung 3.5: Initialisierung der thermischen Zustände und Zuverlässigkeitsbestimmungen

## 4 Erstellung eines Modells des Hochvoltsystems der thermisch-elektrischen Eigenschaften und der Alterung

Um numerische Simulationen des Antriebsstrangs durchzuführen und Optimierungen entwickeln zu können, wird in dieser Arbeit eine modellgestützte Methode gewählt. Ein thermisches Modell des elektrischen Antriebs wird zu diesem Zweck aufgebaut. In diesem Kapitel erfolgt die Darstellung der Konzeption und die Erörterung der mathematischen Zusammenhänge. Die Erforschung der optimalen thermischen Sollwerte und die daraus abzuleitenden Maßnahmen erfordern die Berechnung der instationären Zustände des Wärmehaushalts.

Es folgt die Notwendigkeit für Rechenmodelle, die den energetischen Fluss, die resultierenden Verluste und den Wärmefluss in den Komponenten zum Kühlmedium transient beschreiben und anschließend eine Lebensdauerabschätzung durchführen.

### 4.1 Anforderungen und Zweck der Modellierung

Die grundlegenden Vorteile einer Simulationsumgebung gegenüber Realfahrten zeigen sich in verschiedenen, folgenden Aspekten [86]:

- Konstante und sichere Fahrzeugumgebung und -parametrierung
- Hohe Freiheitsgrade in Hinsicht auf die Vorkonditionierung, die Bauteiltemperaturen, die Fahrzyklen und die Ladezustände können genau erfasst werden, störende Größen können ausgeschlossen werden
- Modifizierung der Kühlsituationen, um die thermischen Sollwerte der Hochvoltkomponenten zu identifizieren
- Beliebige Wiederholungen der Berechnungen und Fahrprofile
- Vielzahl von Versuchsbedingungen können initiiert werden. Kritische thermische Zustände für das Hochvoltsystem können abgebildet werden.

Für die komplexe Antriebsstrangmodellierung eines Plug-In-Hybridfahrzeugs werden zu Beginn in diesem Kapitel Anforderungen und Restriktionen definiert. Der Fokus liegt auf dem Hochvoltsystem, der Kühlsystemanbindung und dem Energiemanagement. Aus konventioneller Anwendung, der Verbrauchsberechnung, konnte ein thermisches Modell Abbildung 4.1 des

Verbrennungsmotors M276DEH30LA und des Hochtemperaturkühlkreislaufs beziehungsweise Getriebeölkreislaufs herangezogen werden.

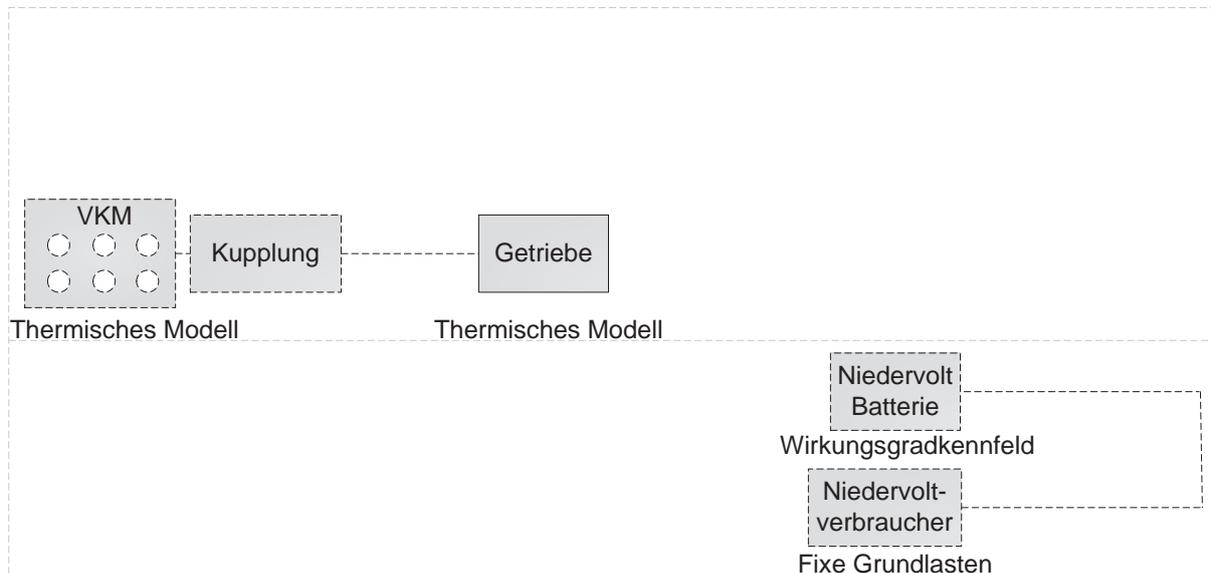


Abbildung 4.1: Modellierung des verbrennungsmotorischen Anteils und des Niedervoltbordnetzes

Das elektrisch-thermische Model des Plug-In-Hybriden, abgebildet in Abbildung 4.3, soll folgende Anforderungen erfüllen [86]. Das System musste um nachstehende Werte erweitert werden:

- Initialisierung der thermischen Vorkonditionierung und der elektrischen Zustände vor Ablauf der Simulationen
- Abbildung der Fahrzeugdynamik und der Fahrzeugparameter zur Berücksichtigung von Fahrprofilen und Fahrbahnsteigung, Berechnung der resultierenden Fahrwiderstände
- Detaillierte Simulation der thermisch-elektrischen Subsysteme, sowie die Berechnung der relevanten Signale
- Berücksichtigung von Grundlasten des Niedervoltverbrauchs
- Darstellung der Betriebsstrategie, des elektrischen Verhaltens der Hochvoltebene, Deringstrategien der Komponenten
- Temperaturabhängige Lebensdauermechanismen und thermische Belastungen mit deren Folgen für die elektrische Leistungsfähigkeit der Hochvoltkomponenten
- Auswirkungen des Fahrprofils und der Fahrzeugumgebung auf die Zuverlässigkeit des Hochvoltsystems
- Anwendung von geeigneten Lebensdauerabschätzungen der kritischen Bauteile des Systems

Die durchzuführende Erweiterung der Modellierung mit dem Hochvoltssystem zeigt Abbildung 4.2 und wird in diesem Kapitel erarbeitet.

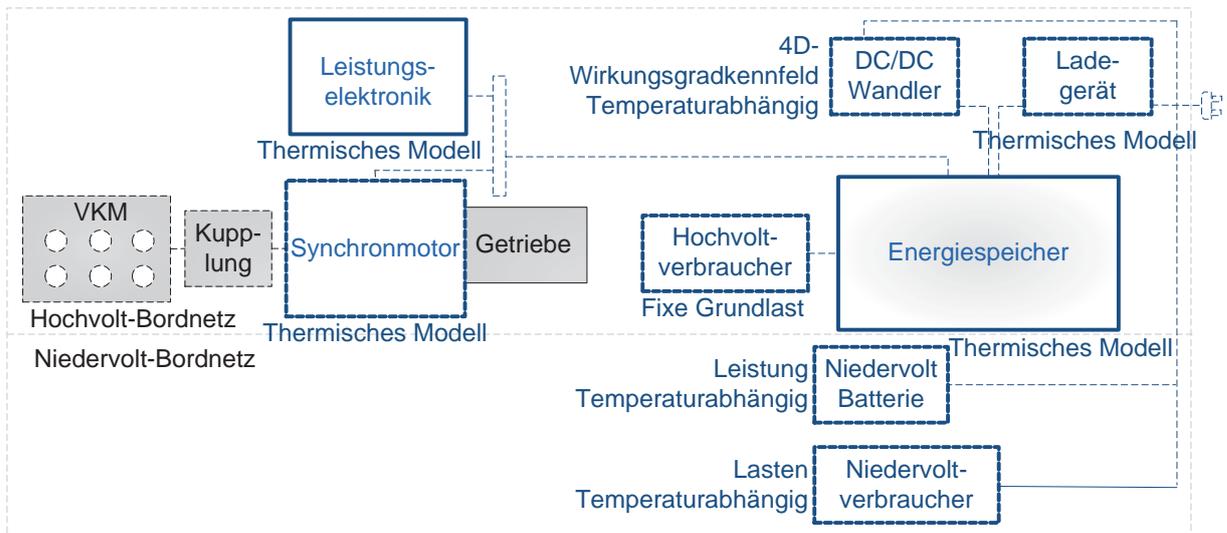


Abbildung 4.2: Modellierung des Hochvoltsystems [73]

## 4.2 Struktur der Gesamtmodellierung

Folgende Ebenen sind grundlegend für einen elektrisch-thermischen Modellentwurf zu berücksichtigen. Die **Fahrzeugebene** bildet den Zusammenhang zwischen Fahrprofil und dem resultierenden Energiebedarf ab. Mit Hilfe der fahrdynamischen Größen und eines Fahrermodells können Fahrzyklen berechnet werden.

Die Modellierung der **Hochvoltsystemebene** ermöglicht es, die Wechselwirkungen der Hochvoltkomponenten aufzuzeigen [87]. Aufgrund der Fahrbedingungen resultieren in den Komponenten elektrische Zustände. Mit der Modellkonzeption werden Spannungs- sowie Stromlagen und resultierende elektrische Verluste im aktiven Hochvoltssystem vorwärts simuliert.

Die **Komponentenebene** setzt sich aus den jeweiligen elektrisch-thermischen Modellen und den Lebensdauerberechnungen der Hochvoltkomponenten zusammen. Die Betriebspunkte und die resultierenden Bauteiltemperaturen werden mit Hilfe thermischer Ersatzschaltbilder abgebildet. Die Zuverlässigkeitsbetrachtungen in den Komponenten unterscheiden sich in ihrer Methodik. Anhand der Berechnungen und Analyse der thermischen Beanspruchungen wird der aktuelle Lebensdauerzustand der Bauteile ermittelt. Dies dient als Grundlage für die innovative thermische Strategie, dargestellt in Kapitel 7, um eine frühzeitige Schädigung oder einen Ausfall zu verhindern.

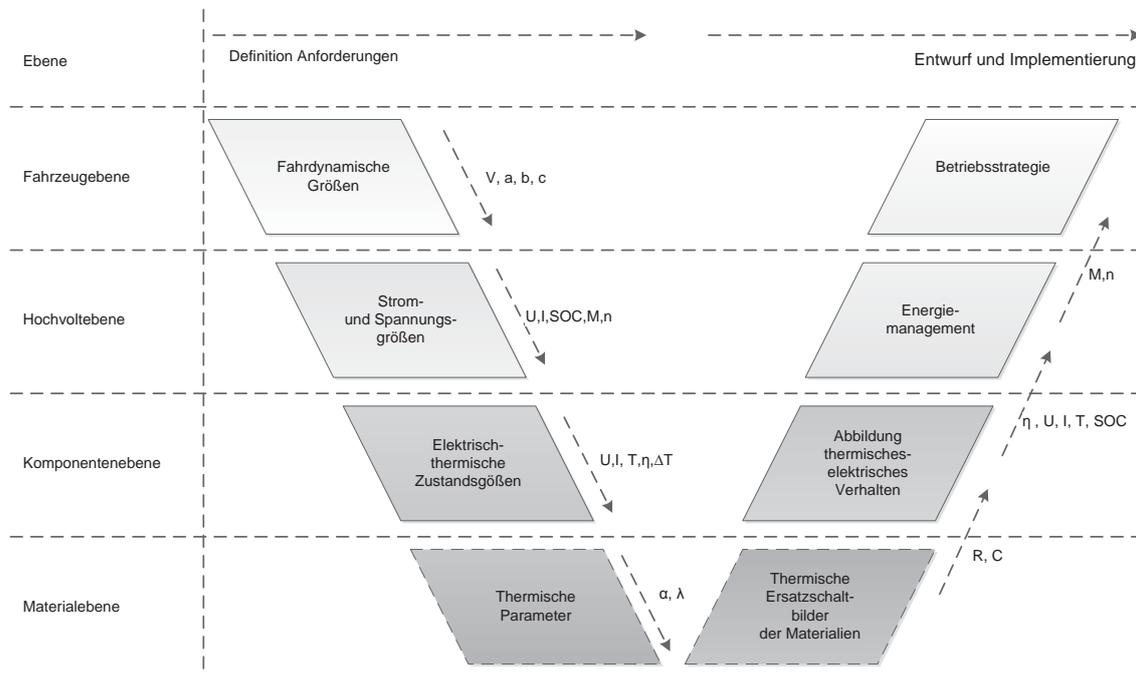


Abbildung 4.3: Konzeption des entworfenen Modells in Anlehnung an [88]

In der **Materialebene** werden unter den Umgebungsbedingungen (unter anderem Außentemperatur, Kühlmediumtemperatur) die Wärmeverluste und die thermischen Belastungen in den Bauteilen berechnet. Diese thermodynamischen und elektrischen Abhängigkeiten werden mittels der Wärmeübergänge und der thermischen Widerstände der verwendeten Materialien hinterlegt. Die einzelnen Modelle werden mit den thermischen Eigenschaften der Materialien entsprechend parametrisiert und mit Komponentenmessungen validiert. Diese Modellierung verwendet Ersatzschaltbilder, welche die Anordnung der Materialien abbilden. Die herangezogenen Bilanzräume und deren thermische Ersatzwiderstände werden mit Hilfe von Netzwerken miteinander verschaltet [76] [89].

Mittels der angewandten Methodik sind thermische Berechnungen für komplexe Hochvoltssysteme mit geeignetem Rechenaufwand möglich. Abbildung 4.4 zeigt die Umsetzung der gesamtheitlichen Modellierung in Simulink. Der Signalfluss erfolgt iterativ vorwärtsgerichtet.

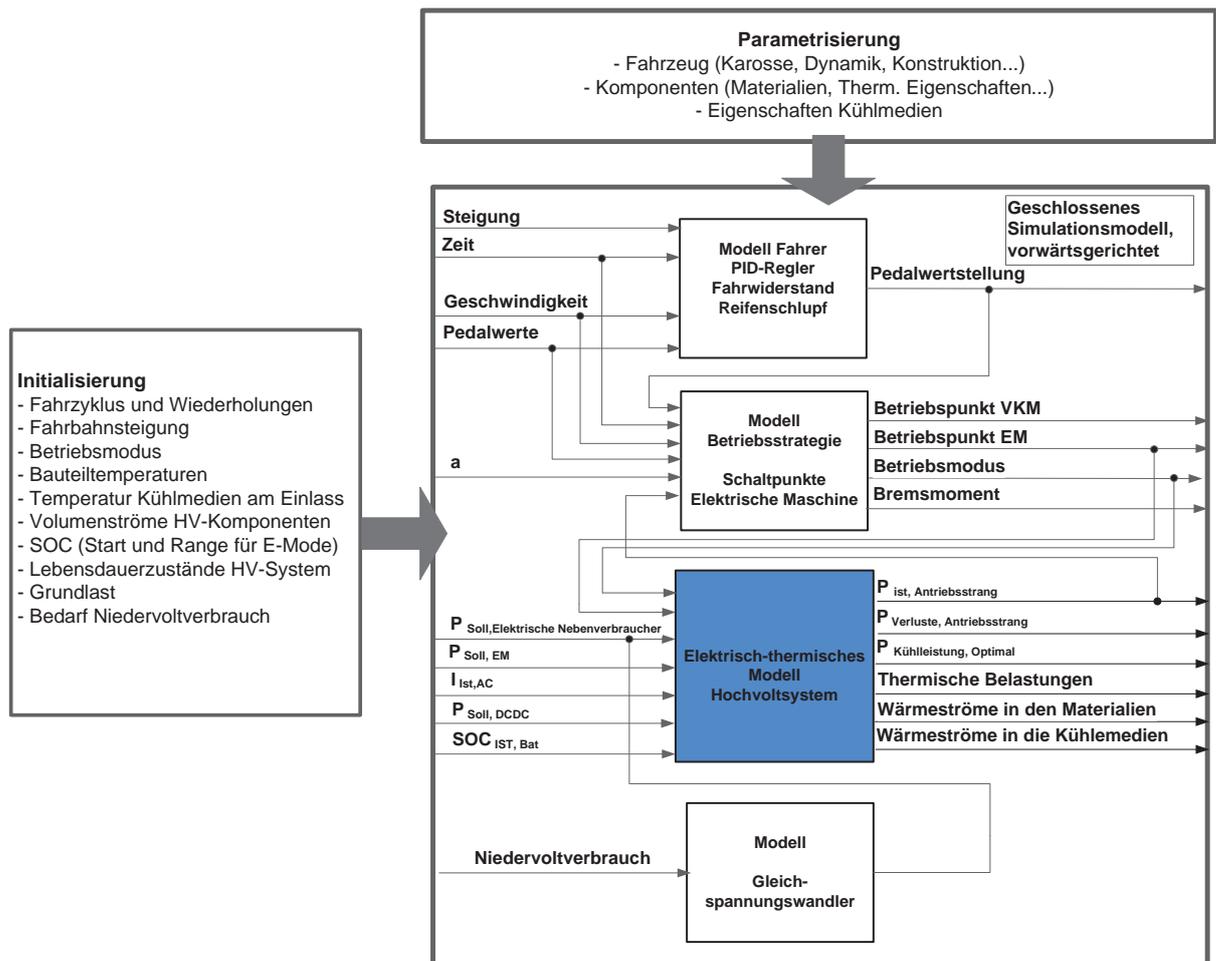


Abbildung 4.4: Struktur der vorwärtsgerichteten Systemmodellierung

### 4.2.1 Definierte Annahmen der Modellierung

Bei der Entwicklung und Umsetzung der Simulation werden die nachfolgenden Aspekte vereinfacht, um eine geeignete Recheneffizienz des komplexen Systems zu ermöglichen. Die Vereinfachungen reduzieren den Rechenaufwand, beeinträchtigen den Modellzweck und die Durchführung der thermischen Maßnahmen jedoch nicht.

- Anwendung eines PID-Reglers für das Fahrermodell, Querdynamik wird als Grundlage herangezogen
- Abgasanlage und Schadstoffemissionen des Verbrennungsmotors werden nicht berücksichtigt, lediglich die hybridische und elektrische Reichweite
- Vernachlässigungen von Sonneneinstrahlungen und deren Auswirkungen
- Thermische und mechanische Verluste des Verbrennungsmotors werden untergeordnet mit einbezogen

- Verluste im Hochvoltkabelsatz werden nicht betrachtet
- Verluste im Getriebe werden als Randbedingung als Eintrag in Getriebeöl angenommen
- Der Kältemittelkreislauf der Klimatisierung wird nicht abgebildet
- Wärmetauscher, Pumpen, Wegeventile und deren Einfluss auf die Kühlsituation in den Kreisläufen werden nicht nachgebildet
- Idealisierte konstante Grundlasten und Niedervoltverbräuche für warme und kalte Umgebungsbedingungen

Ein PID-Regler-basiertes Fahrermodell musste zu Beginn validiert werden. Dieses Teilmodell errechnet sich aus dem Sollfahrprofil und der Istfahrzeuggeschwindigkeit, sowie dem prozentualen Pedalwert von Gas und Bremse. Die P-, I-, D-Glieder sind parallel geschaltet [4].

$$u(t) = Ke(t) + K \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + KT_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.1)$$

Die Istgeschwindigkeit berechnet sich auf Grundlage der Fahrwiderstände Gleichung 2.4 und der Rollenkoeffizienten.

Tabelle 4.1: Feste Parametrierung des Fahrzeugmodells anhand des Referenzfahrzeugs

<b>Parameter</b>	<b>Wert</b>
<i>Rollenkoeffizienten</i>	a=86, b=2,1, c=0,0162
<i>Fahrzeugmasse</i>	2870kg
<i>Stirnfläche Fahrzeug</i>	2,44m <sup>2</sup>
<i>Luftwiderstandsbeiwert</i>	0,26

### 4.3 Modellierung einer Synchronmaschine

Berücksichtigt werden in dem Modell, abgebildet in Abbildung 4.5, insbesondere die Kühlmitteltemperatur, die Temperatur des Magneten, die maximale Temperatur an den Wicklungen und die durchschnittliche Temperatur der Wicklungen.

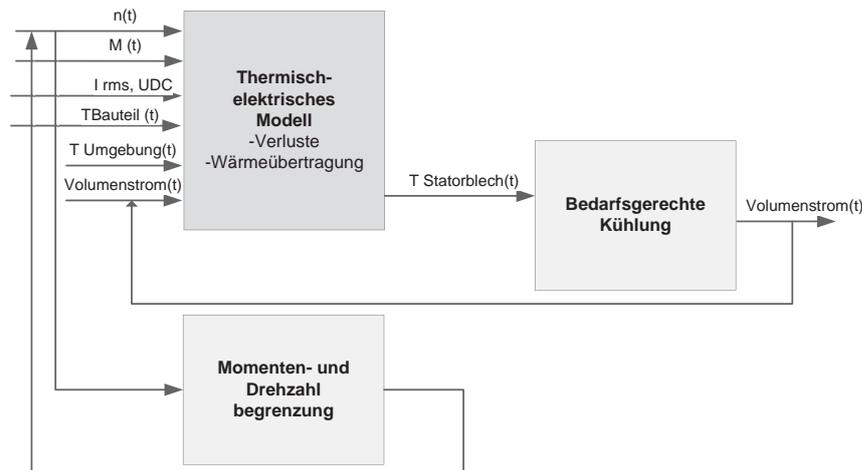


Abbildung 4.5: Schematik der implementierten Submodelle für die Berechnung der Synchronmaschine

Abbildung 4.6 zeigt den Entwurf zur Modellierung der Synchronmaschine. Mittels Initialisierungen werden die Randbedingungen zu Beginn vorgegeben. Die Verlustkennfelder werden vorab aus Messungen in die Simulation als look-up-Table hinterlegt. Die Parametrisierung enthält die Koordinaten der Bilanzräume als auch die thermischen Eigenschaften der Materialien.

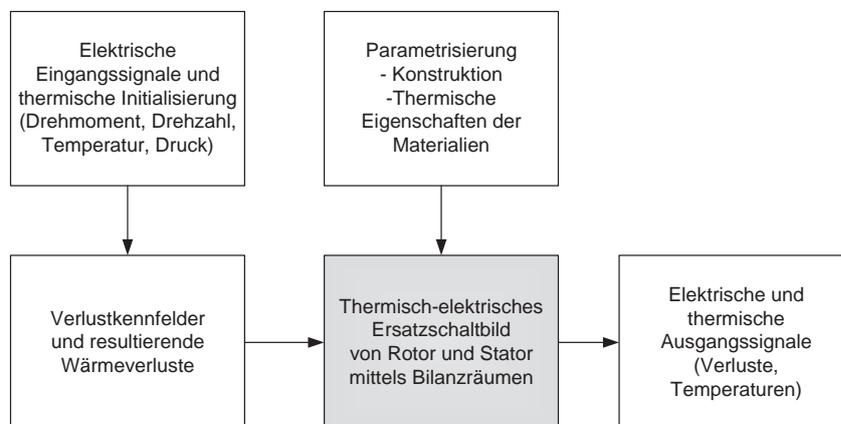


Abbildung 4.6: Implementieren von thermisch-elektrischen Berechnungen [90] auf Grundlage von definierten Bilanzräumen

Nach [61] ist das Verhältnis von zugeführter und abzugebener Leistung wie folgt definiert.

$$\eta_{\text{Maschine}} = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot M}{P_{zu}} \quad (4.2)$$

$$U_{\text{Wicklung}} = \int_0^{l_{\text{Wicklung}}} (\vec{B} \cdot \vec{v}_{\text{Rotor}}) dl_{\text{Wicklung}} \quad (4.3)$$

Der Leistungsfaktor  $\cos(\varphi)$  ist das Verhältnis von Wirkleistung  $P$  zur Scheinleistung  $S$ . Der Leistungsfaktor liegt im Wertebereich zwischen -1 und 1 (generatorisch und motorisch).

$$\cos(\varphi) = \frac{P_{\text{Wirk}}}{S} \quad (4.4)$$

Der Wirkungsgrad einer elektrischen Maschine wird in jedem Betriebspunkt berechnet. Die Abbildung 4.8 zeigt die Wirkungsgrade für den motorischen und den generatorischen Fall der Synchronmaschine.

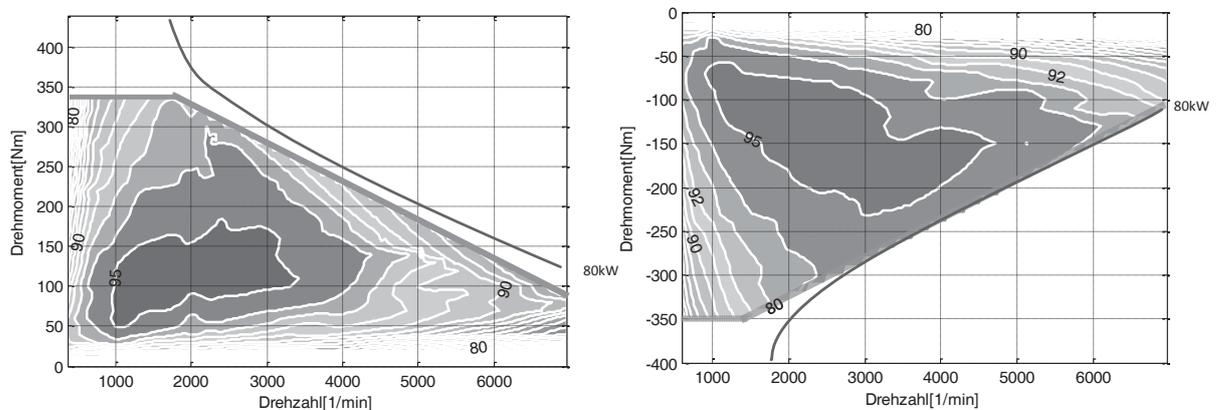


Abbildung 4.7: Wirkungsgradkennfelder der permanent erregten Synchronmaschine in dem Referenzfahrzeug

Die Nennleistung einer Synchronmaschine wird durch die Nenndrehzahl und den Nennmoment bestimmt.

$$P_{\text{Maschine,Nenn}} = 2 \cdot \pi \cdot n_{\text{Nenn}} \cdot M_{\text{Nenn}} \quad (4.5)$$

Die elektrische Leistung berechnet sich aus  $U_{DC}$  und  $I_{DC}$ . Es liegt hierbei das Wirkprinzip einer Sternschaltung vor.

$$P_{Maschine,Zu} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos(\varphi) \quad (4.6)$$

In den permanent erregten Synchronmotoren wird zwischen Verlusten im Leerlauf und im Lastbetrieb unterschieden. Der Kurzschluss ist ebenfalls eine Betriebsart, jedoch existiert keine Wirkleistung. Die Verluste unter Last werden in Abhängigkeit von Drehmoment und Drehzahl, wie in Gleichung 4.8 definiert, bestimmt [68][67].

$$P_{V,Gesamt} = P_{V,Ummagnetisierung} + P_{V,Ohm} + P_{V,Mechanisch} \quad (4.7)$$

$$P_{V,Gesamt} = P_{V,Hysteresese} + P_{V,Wirbel} + P_{V,Ohm} + P_{V,Mechanisch} \quad (4.8)$$

Die Ummagnetisierungsverluste können [67] nach der Steinmetzformel bestimmt werden. Diese Verlustentstehung resultiert aus den Hysteresese- und Wirbelstromanteilen.

$$P_{V,Ummagnetisierung} = m_{Statorblech} \cdot (c_{Hysteresese} \cdot f \cdot B^n + c_{Wirbelstrom} \cdot f^2 \cdot B^2) \quad (4.9)$$

Die Wirbelstromverluste sind die Verluste in den permanent erregten Magneten und berechnen sich aus der elektrischen Leitfähigkeit  $\sigma$  und der quadratischen Wirbelstromverlustdichte  $J$  integriert über das Volumen des Magneten.

$$P_{V,Wirbel} = \int \frac{1}{\sigma_{El}} \cdot \vec{J}_{Wirbelstrom}^2 \cdot dV_{Magnet} \quad (4.10)$$

Die Lastverluste sind schaltabhängig vom Strom [91]. Der herangezogene Strom ist der effektive Wert des Statorstromes  $I_{Stator}$ . Diese Stromwärmeverluste nach [67] werden temperaturabhängig berechnet und treten in den Wicklungen und in den Hochvoltleitungen auf. Die Verluste in den Leitungen werden in dieser Arbeit vernachlässigt.

$$P_{V,Ohm} = P_{V,Ku,Leitungen} + P_{V,Ku,Stator} \quad (4.11)$$

Der Widerstand resultiert aus der Anzahl der Windungen, der Länge, der thermischen Leitfähigkeit ( $\lambda = 0.4 \text{ J/K}$ ) und der spezifischen Wärmekapazität ( $c_p = 496 \text{ J/kg/K}$ ) des Kupfermaterials. Für eine Wicklung (U,V,W) kann der Wärmeverlust nach Gleichung 4.12 bestimmt werden.

$$P_{V,Ku,Stator} = R_{Ku} \cdot I^2 \quad (4.12)$$

$$P_{V,Ku,Leitungen} = R_L \cdot (I_U^2 + I_V^2 + I_W^2) \quad (4.13)$$

Des Weiteren entsteht Wärme bei hohen Umdrehungszahlen verursacht durch die Lagerreibung und die Luftverluste [66]. Die irreversible Eigenschaft kann bei zu hohen Temperaturen die Entmagnetisierung der permanent erregten Magneten sein.

Die mechanischen Verluste sind die Reibungsverluste des Rotors. Die Reibungsverluste entstehen durch die Reibung mit dem Lager, der Welle und mit dem Luft/Öl Gemisch an Rotor und Stator. Die mechanische Arbeit ist die resultierende Energie, die aus der zugeführten Energie und den Verlusten resultiert.

$$P_{V,Mechanisch} = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M \quad (4.14)$$

Die Hystereseverluste, die Wirbelstromverluste, die Ohmschen Verluste (im Kupfer der Wicklungen und der Leitungen) und die mechanischen Verluste zum Lager und der Luft zum Gehäuse werden postprocessing in 5D-Lockup-Tables Abbildung 4.9 implementiert. Diese Kennfelder wurden auf einem Motorenprüfstand evaluiert und anschließend berechnet. Das integrierte Modell greift auf die interpolierten Werte in den Verlustkennfeldern zu und ordnet dem Drehmoment, der Drehzahl und den Anfangstemperaturen der Materialien entsprechende Verluste zu.

In Abbildung 4.8 und Abbildung 4.9 werden die resultierenden Wärmeverluste der Synchronmaschine veranschaulicht. Die Zusammenhänge des angesteuerten Betriebspunkts und des Gesamtwärmeeintrags in die Materialien und in das Getriebeöl werden deutlich.

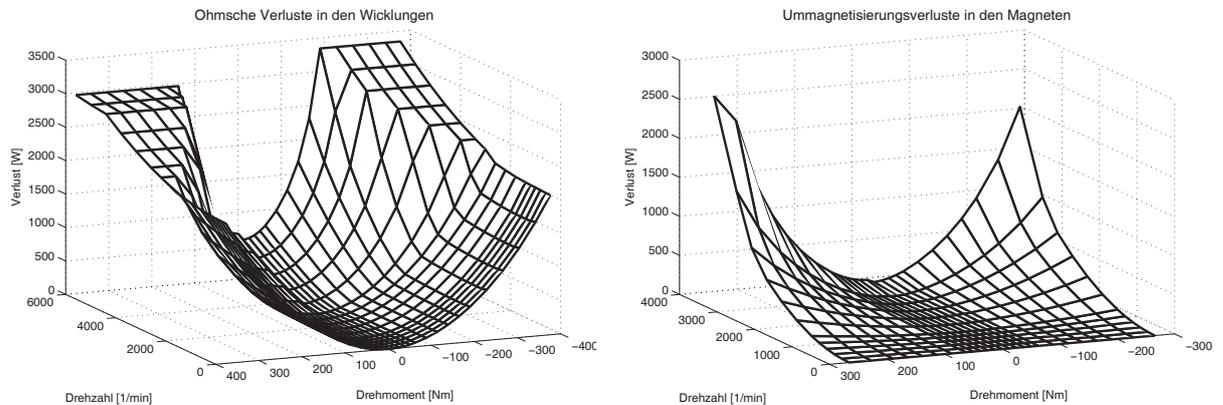


Abbildung 4.8: Betriebspunktabhängige ohmsche Wärmeverluste und die Verluste der Magneten [90]

Je höher der Drehmoment und die Drehzahl, desto höher ist die thermische Belastung in den empfindlichen Elementen. Die Häufigkeit der Betriebspunkte in realen Fahrzyklen wird in Kapitel 6 ersichtlich. Um eine thermische Schädigung zu vermeiden, kann zwar eine Abregelung erfolgen, die Leistungsfähigkeit des gesamten Antriebsstranges soll aber nicht begrenzt werden. Besonders kritische Wärmeverluste treten im hohen Drehmoment- und Drehzahlbereich auf (motorisch als auch rekuperativ). In Kapitel 6 wird überprüft, ob thermisch kritische Beanspruchungen in realen Fahrzeugbedingungen dauerhaft erreicht werden.

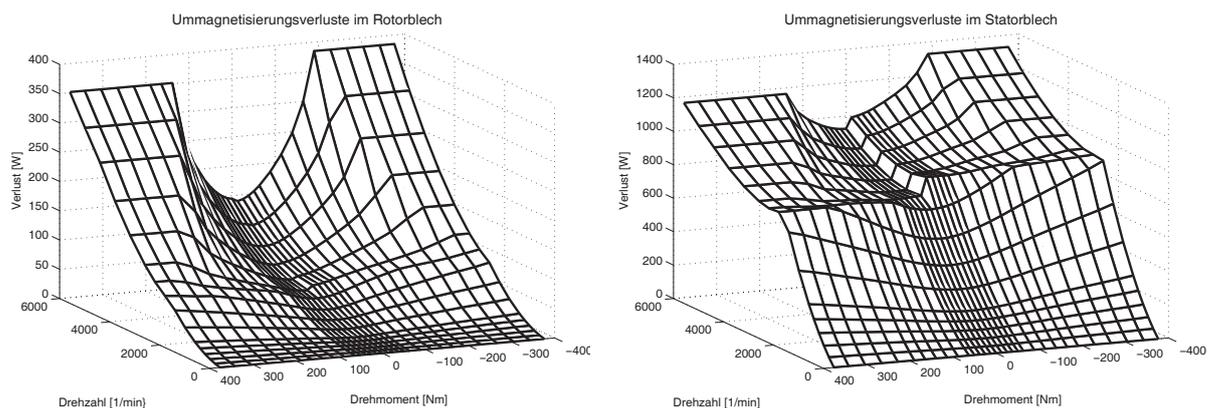


Abbildung 4.9: Betriebspunktabhängigen Ummagnetisierungsverluste im Rotorblech und im Statorblech [90]

### 4.3.1 Thermisch-elektrisches Ersatzschaltbild von Rotor und Stator

Das thermische Ersatzschaltbild setzt sich aus einzelnen idealisierten Bilanzräumen und Bezugspunkten zusammen. Jeder Bilanzraum bildet einen thermischen Widerstand und wird durch seine Materialeigenschaften parametrisiert. So werden die Materialien in Stator und Rotor in drei dimensionale Bilanzräume aufgeteilt und mit den thermischen Parametern der jeweiligen Materialschicht hinterlegt. Die benötigte Energie, um eine Temperaturerhöhung in einem Medium zu erreichen, wird mit dem thermischen Widerstand und der Wärmekapazität erfasst.

$$R_{Th} = \frac{l}{\lambda \cdot A} = \frac{\Delta T}{\dot{Q}} \quad (4.15)$$

$$C_{Th} = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \quad (4.16)$$

Der Wärmefluss in dem Material, über die thermischen Widerstände zwischen den Bezugspunkten, kann mit Hilfe des thermischen Differentialgleichungssystems ermittelt werden.

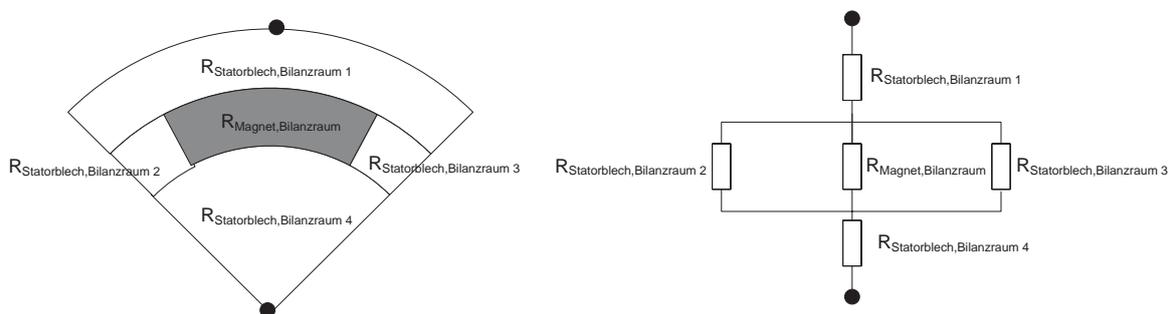


Abbildung 4.10: Vereinfachtes thermisches Ersatzschaltbild des Rotors [61]

Der thermische Widerstand eines Bilanzraumes und der Wärmefluss, der das Material passiert, ergeben die Differenz der Temperatur, wie in Gleichung 4.17 definiert. Der Wärmeverlust als auch der thermische Widerstand und die thermische Kapazität definieren den Temperaturanstieg.

$$\Delta T_{Bilanzraum} = R_{th} \cdot P_V \quad (4.17)$$

Die thermischen Widerstände der Bilanzräume werden zur Verdeutlichung aufgezeigt. Das thermisch-elektrische Submodell wurde auf Komponentenebene von [90] erarbeitet.

$$R_{Statorgehäuse,Bilanzraum}(27^{\circ}C) = \frac{l}{\lambda \cdot A} = \frac{l}{221W/M/K \cdot A} \quad (4.18)$$

$$R_{Statorblech,Bilanzraum}(27^{\circ}C) = \frac{l}{\lambda \cdot A} = \frac{l}{27W/M/K \cdot A} \quad (4.19)$$

$$R_{Wicklung,Bilanzraum}(27^{\circ}C) = \frac{l}{\lambda \cdot A} = \frac{l}{282W/M/K \cdot A} \quad (4.20)$$

$$R_{Rotorblech,Bilanzraum}(27^{\circ}C) = \frac{l}{\lambda \cdot A} = \frac{l}{27W/M/K \cdot A} \quad (4.21)$$

$$R_{Magnet,Bilanzraum}(27^{\circ}C) = \frac{l}{\lambda \cdot A} = \frac{l}{9W/M/K \cdot A} \quad (4.22)$$

Mit Hilfe der nodalen Netzwerke kann der Wärmefluss dargestellt werden. Der Temperaturgradient zwischen zwei Bilanzräumen wird wie in Gleichung 4.23 definiert [76].

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{T_{m,n} - T_{m-1,n}}{\Delta x} \quad (4.23)$$

Die konduktive Wärmeübertragung findet von einem zum nächsten Bezugspunkt der Bilanzräume statt. Thermische Berechnung basiert auf der Finite-Differenzen-Methode. Im stationären Betriebspunkt lässt sich mit Hilfe der Wärmeleitungsgleichung von Poisson die Wärmeübertragung bestimmen. Die Wärmestromdichte in einem Bilanzraum bestimmt sich wie folgt, mit Angabe der Wärmeleitfähigkeit der zu betrachtenden Materialien [19]:

$$\dot{q} = \lambda \cdot \left( \frac{\partial^2 T}{\partial^2 x^2} \right) + \left( \frac{\partial^2 T}{\partial^2 y^2} \right) + \left( \frac{\partial^2 T}{\partial^2 z^2} \right) \quad (4.24)$$

Die Konduktion wird in den kartesischen Koordinaten wie folgt beschrieben [55].

$$\dot{q} = \lambda \cdot \left( \frac{\partial^2 T}{\partial^2 x^2} \right) + \left( \frac{\partial^2 T}{\partial^2 y^2} \right) + \left( \frac{\partial^2 T}{\partial^2 z^2} \right) + (c_p \cdot \rho \frac{\partial T}{\partial t}) \quad (4.25)$$

Die Anwendung des Maschinenmodells im transienten Fahrverhalten ist in dieser Arbeit zu überprüfen. Die Verlustbestimmung muss mit den Messungen aus dem realen Versuchsträger übereinstimmen.

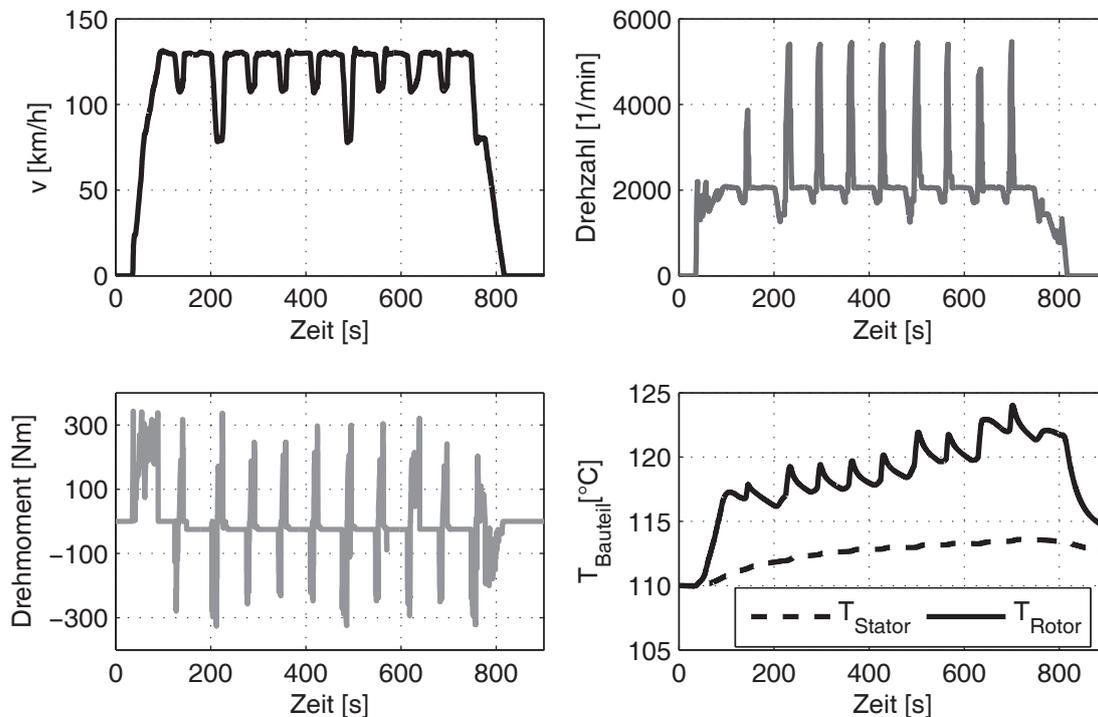


Abbildung 4.11: Resultate der simulierten Eingangsdaten und Temperaturverläufe im Fahrzyklus ADAC BAB

Nach Implementierung in die Gesamtfahrzeugmodellierung und der Vorgabe des Drehmomentes und der Drehzahl über die Fahrerpedalwerte ergibt sich am Beispiel des ADAC-Autobahnzyklus der Verlauf der simulierten Bauteiltemperaturen vom Stator und Rotor. Der Wärmeeintrag resultiert aus dem betriebspunktabhängigen Gesamtverlust  $P_{V,Gesamt}$ , dieser wurde in Gleichung 4.7 beschrieben.

Die ersten Ergebnisse zeigen, dass das Komponentenmodell in die Hochsystemebene integriert werden kann und die Ausgangssignale plausibel sind. Weitere Validierungsschritte werden in Kapitel 6 durchgeführt und erörtert. In dem aufgezeigten Autobahnfahrzyklus Abbildung 4.11 werden die Bereiche von kritischen Verlusten zunächst nicht erzielt.

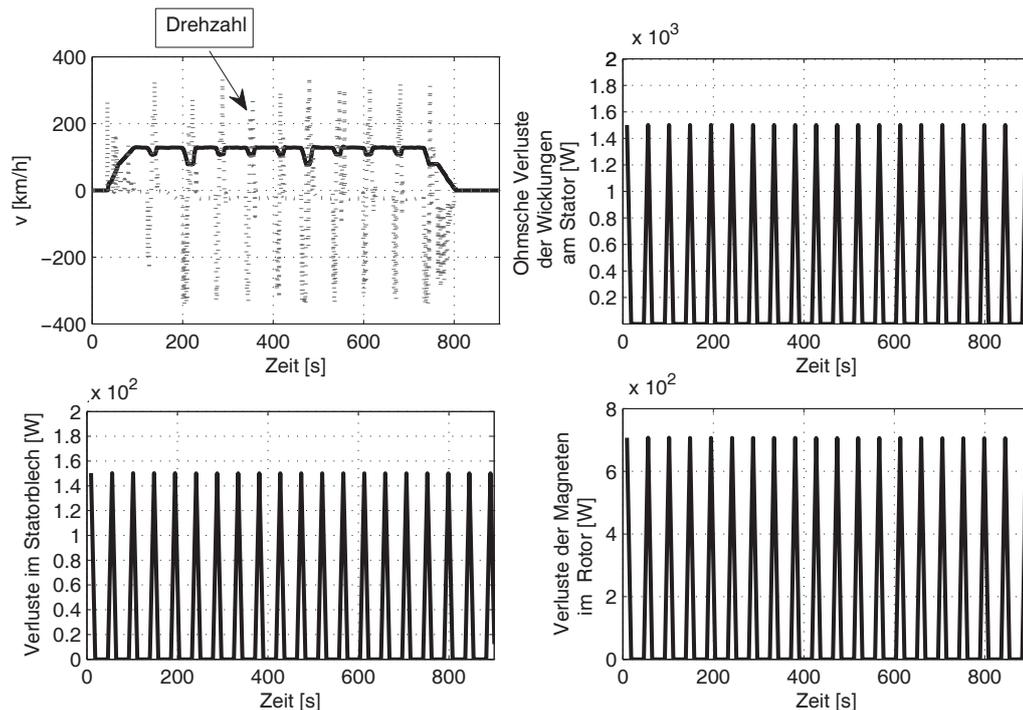


Abbildung 4.12: Berechnete Verlustverteilung im Stator und Rotor der elektrischen Maschine in der thermischen Vorkonditionierung  $T_{\text{System,Start}} = +40^{\circ}\text{C}$  und  $\text{SOC}_{\text{Start}} = 90\%$  im ADAC BAB

### 4.3.2 Bedarfsgerechte Kühlung in der rein elektrischen Fahrt

Aktuell ist eine Funktion integriert, um die Maschine bedarfsgerecht zu kühlen. In der rein verbrennungsmotorischen Fahrt wird die Kühlung der Statorumspritzung deaktiviert, um die Leistung der elektrischen Getriebeölpumpe einzusparen. In dem rein elektrischen Betrieb wird hingegen diese Getriebeölpumpe aktiviert und das Öl durch den Statormantel nach vorgegebenem Druck gefördert.

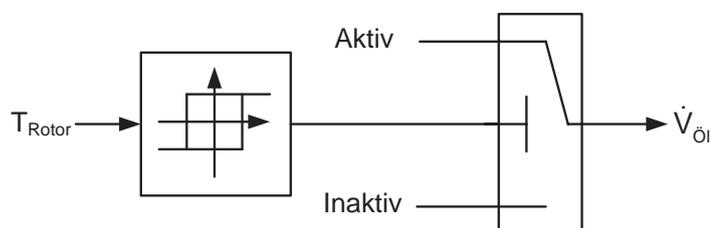


Abbildung 4.13: Struktur der aktiven Rotorkühlung

### 4.4 Modellierung eines Drei-Phasen-Inverters

Für die thermisch-elektrische Simulation von elektronischen Schaltungen wird ein Modell benötigt, welches dynamische Berechnungen durchführen kann. Abbildung 4.14 zeigt die Teilsysteme der benötigten Berechnungen des Drei-Phasen-Inverters. Das thermisch-elektrische Modell und die Postprocessing-Lebensdauerschätzung wurden vom Komponentenhersteller [92] entwickelt, parametrisiert und mit Komponentenmessungen validiert. Um dieses Teilsystem in der gesamtheitlichen Methodik anwenden zu können, werden Plausibilitätsprüfungen auf Grundlage der theoretischen Zusammenhänge aus dem aktuellen Forschungsstand durchgeführt.

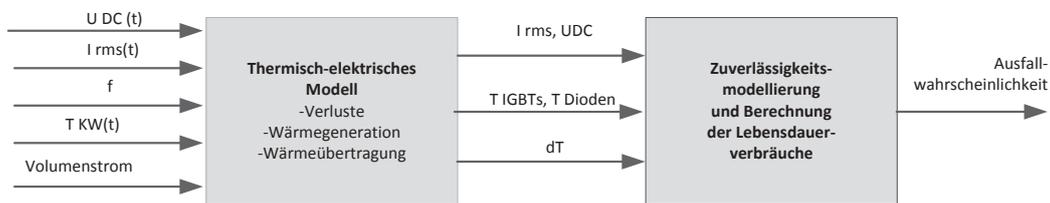


Abbildung 4.14: Schematik des Leistungselektronikmodells

Für jeden Fahrzustand ergibt sich ein instationäres Verhalten der Eingangssignale wie dem Phasenstrom, der Gleichspannung und der Schaltfrequenz. Im motorischen Fall der elektrischen Maschine fließt ein Kollektorstrom in den Insulated-gate bipolar Transistoren (IGBT) der Halbleiterbrücken.

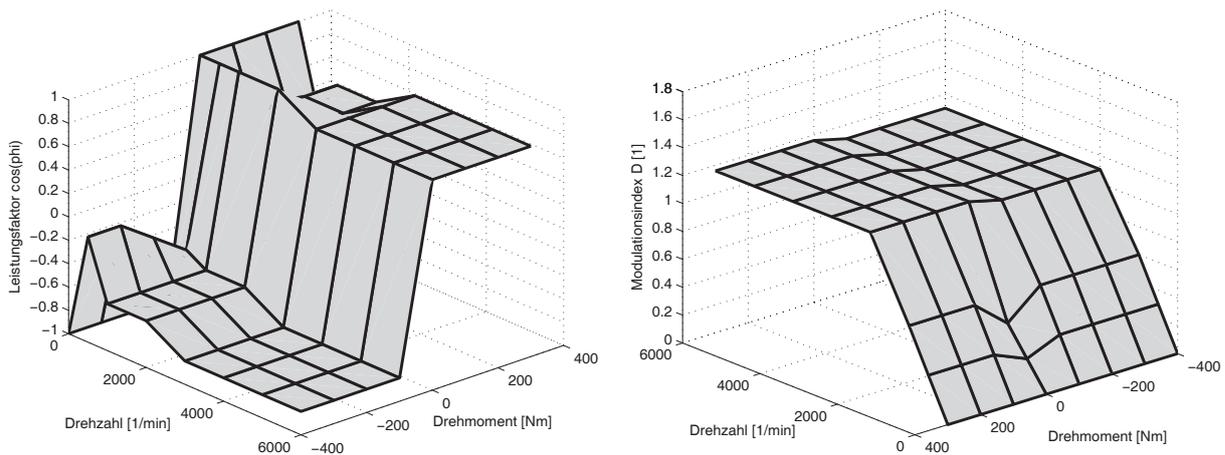


Abbildung 4.15: Der betriebspunktabhängige Leistungsfaktor und der Modulationsindex in vereinfachter Darstellung des Referenzfahrzeugs

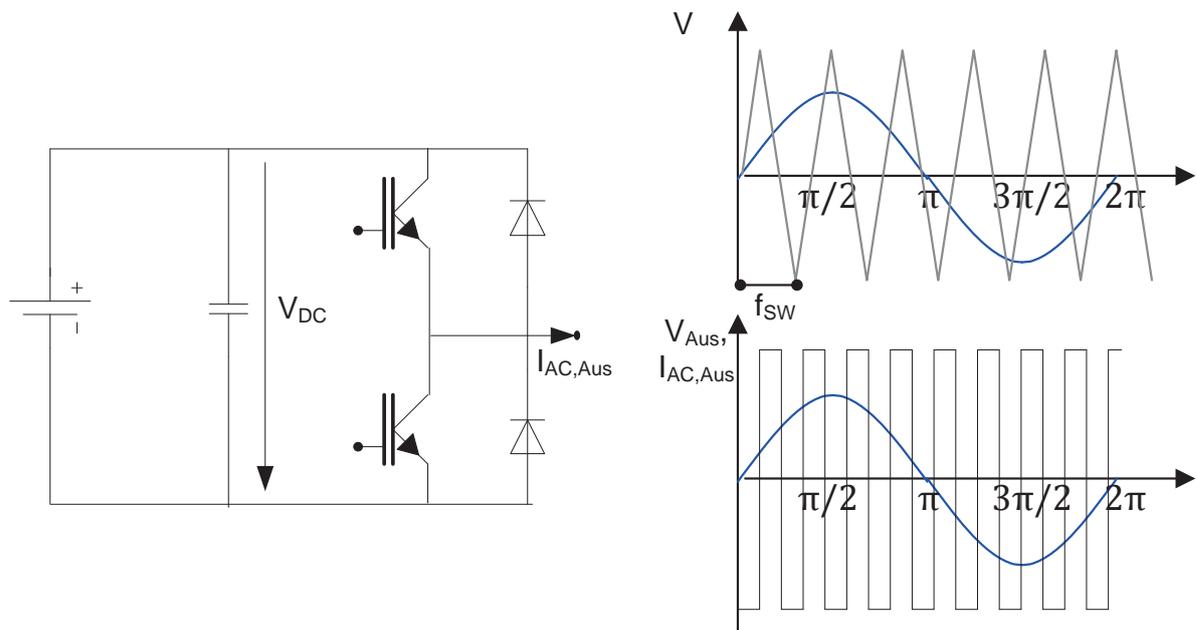


Abbildung 4.16: Regelung einer Synchronmaschine mit der Leistungselektronik

Die Ansteuerung der Synchronmaschine erfolgt in Abhängigkeit von dessen Drehmoment und der jeweiligen Phase, wie in Abbildung 4.16 schematisiert. In dem IGBT entstehen Schalt- und Durchlassverluste und bilden den gesamten Wärmeverlust eines Transistors. Nach [15] sind die Schaltverluste abhängig von der Temperatur.

$$U_{C,E} = I_{AC} \cdot R_{CE} + U_{Thr} \quad (4.26)$$

$$P_V(t, T_{j,IGBT}) = P_{V,ST}(t, T_{j,IGBT}) + P_{V,SW}(t, T_{j,IGBT}) + P_{V,Fahr}(t, T_{j,IGBT}) \quad (4.27)$$

Nach [54] werden stationäre (steady-state) und instationäre Verluste auf Halbleiterebene definiert. Die Gleichung 4.28 stellt [16] für den Fall einer sinusförmigen Puls-Weiten-Modulation dar.

$$P_{V,ST} = \left( \frac{1}{2 \cdot \pi} + \frac{D \cdot \cos(\varphi)}{8} \right) \cdot U_{Thr} \cdot \hat{I}_{AC,Peak} + \left( \frac{1}{8} + \left( \frac{D \cdot \cos(\varphi)}{3 \cdot \pi} \right) \right) \cdot R_{CE} \cdot \hat{I}_{AC,Peak}^2 \quad (4.28)$$

Das stationäre Verhalten des IGBTs wird mit Hilfe eines Ausgangskennfelds  $I_C, V_{CE}$  dargestellt. Durch die Kennlinien bei stationären Temperaturen können die Durchlassverluste bestimmt werden. Annäherungsweise können in Abhängigkeit von den elektrischen Eingangsgrößen ( Sperrschichttemperatur, Modulationsindex, Leistungsfaktor, anliegende Ströme sowie Spannungen) die Schalt- und Durchlassverluste der Dioden und der IGBTs bestimmt werden. Die Kreisfrequenz ist  $\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T}$ .

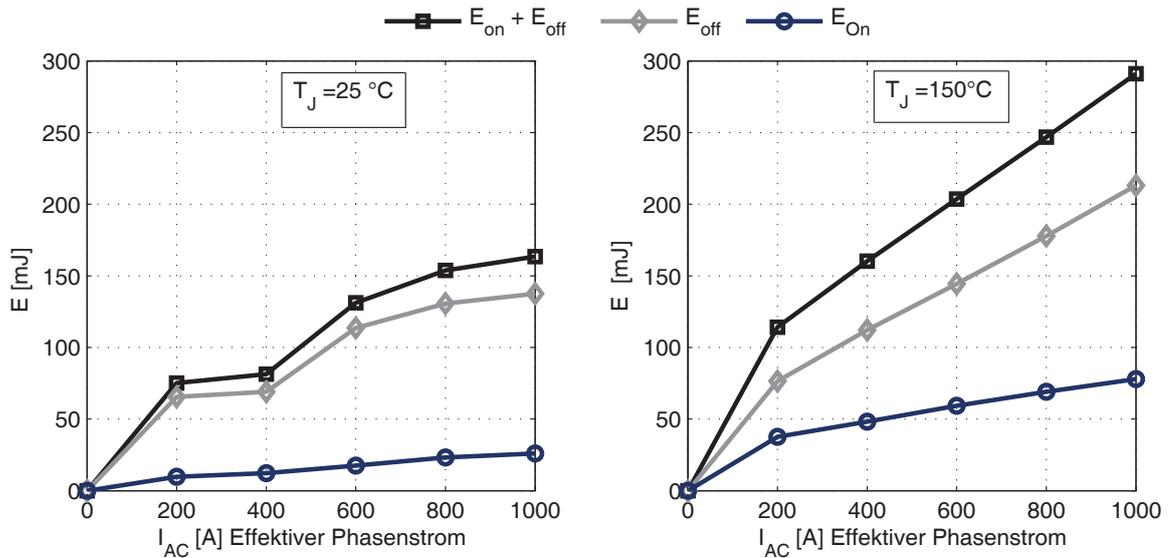


Abbildung 4.17: Schaltenergie im Ein- und Ausschaltprozess nach [93] für 25 und 150 Grad

Die zeitabhängigen Schaltverluste definieren [54] [16] [56] und entstehen bei den Ein- und Ausschaltvorgängen der Leistungsmodule. Die Schaltverluste sind abhängig von der Schaltfrequenz  $f_{SW}$  und dem maximalen Phasenstrom  $\hat{I}_{AC,Peak}$  und der Schaltenergie  $E_{on} + E_{off}$ .

$$P_{V,SW} = (E_{on} + E_{off}) \cdot f_{SW} \cdot \hat{I}_{AC,Peak} \cdot \sin(\omega t) \quad (4.29)$$

$$Q_{t,T_j,IGBT} = P_{st}(t, T_j, IGBT) + P_{Sw}(t, T_j, IGBT) \quad (4.30)$$

Die Wärmeverluste der Dioden sind dabei abhängig vom Sperrstrom und der Sperrspannung. Die Schichten einer Leistungsdiode veranschaulicht Abbildung 2.8.

$$U_{C,E} = I_{AC} \cdot R_{CE} + U_{Thr} \quad (4.31)$$

$$P_{V,Diode,Durchlass} = \left( \frac{1}{2 \cdot \pi} - \frac{D \cdot \cos(\varphi)}{8} \right) \cdot U_{Diode} \cdot \hat{I}_{AC,Peak} + \left( \frac{1}{8} - \left( \frac{D \cdot \cos(\varphi)}{3 \cdot \pi} \right) \right) \cdot R_{Diode} \cdot \hat{I}_{AC,Peak}^2 \quad (4.32)$$

D ist der Modulationsindex (Wert=0 oder 1) und  $\cos(\varphi)$  definiert den Leistungsfaktor mit der Phasenverschiebung in Abhängigkeit der Zeit. Der Wärmeeintrag resultiert aus den elektrischen Gesamtverlusten  $P_{V,IGBT}(t, T_j)$  und  $P_{V,Diode}(t, T_j)$  der Halbleiterbrücken, aufgezeigt in Abbildung 4.18. Die Wärmeübertragung mittels Radiation wird in dieser Abhandlung vernachlässigt. Besonders kritische Wärmeverluste treten bei Phasenströmen  $I_{AC} > 150 \text{ Arms}$  auf.

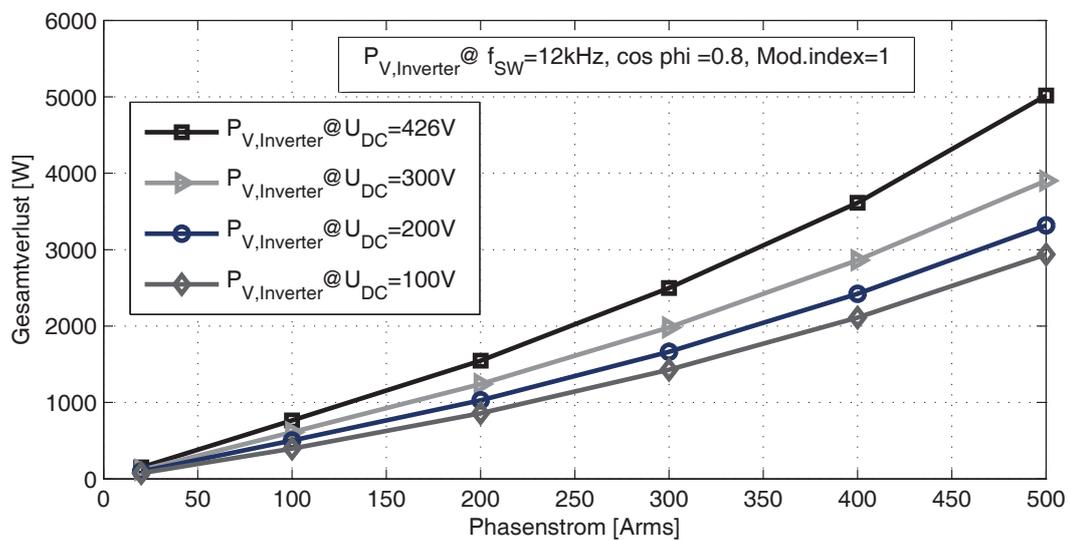


Abbildung 4.18: Berechnung der gesamten Wärmeverluste  $P_V(t, T_j)$  mit der Kühlsituation  $\dot{V} = 6 \text{ l/min}$  und  $T_{KM, Ein, LE} = 40^\circ \text{C}$

#### 4.4.1 Thermisches Ersatzschaltbild des Halbleiteraufbaus

Das simulierte Temperaturverhalten in einem stationären Arbeitspunkt bis zum eingeschwungenen Zustand zeigt Abbildung 4.22. Die eingesetzten Materialien und Bauteile stellen thermische Widerstände und Kapazitäten dar, die mit Hilfe ihrer thermischen Eigenschaften parametrisiert sind.

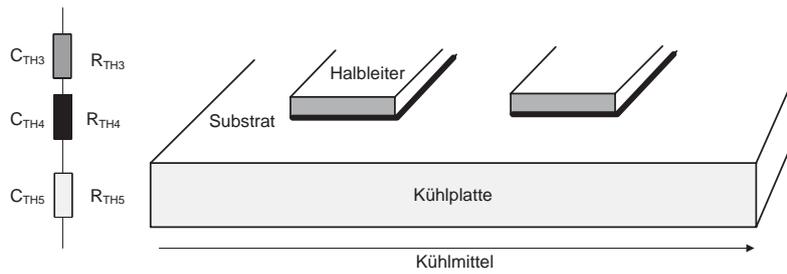


Abbildung 4.19: Indirekte Kühlung der Leistungshalbleiter nach [55]

Der Zwischenkreiskondensator und die stromführenden Elemente werden in diesen Verlustberechnungen vernachlässigt.

$$R_{th,LE} = \frac{d}{\lambda \cdot A} \quad (4.33)$$

$$C_{th,LE} = c \cdot \rho \cdot d \cdot A \quad (4.34)$$

Das Foster- und das Cauer-Netzwerk werden allgemein angewandt. Diese Ansätze ermöglichen die Darstellung von mehreren thermischen Senken in der Leistungselektronik. Der eindimensionale Wärmestrom durch die Materialien wird als Impedanz berechnet [89]. Im Foster-Netzwerk werden die Bilanzräume der Materialien und Schichten als RC-Glied abgebildet, wie Abbildung 4.20 erörtert.

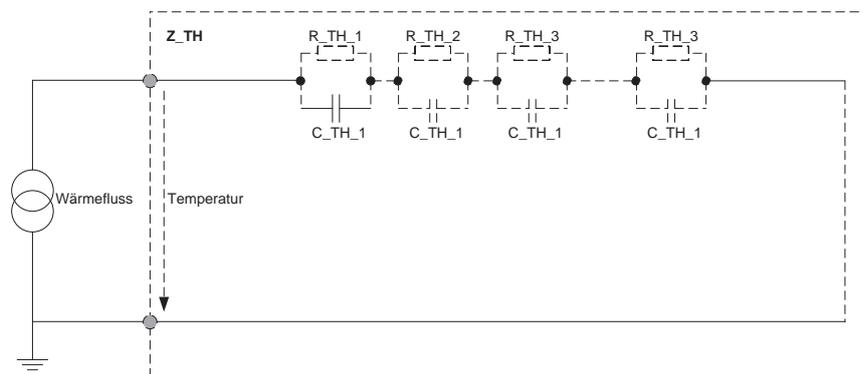


Abbildung 4.20: Netzwerk nach Foster

Die eingesetzten Materialien im Inverter werden durch ihre Dichte, ihre thermische Leitfähigkeit und ihre spezifische Wärmekapazität parametrisiert. Am Beispiel des Lotwerkstoffs wird ein thermischer Widerstand und eine thermische Kapazität aufgezeigt.

$$R_{th, Lot} = \frac{d}{60 \frac{W}{m \cdot K} \cdot A} \quad (4.35)$$

$$C_{th, Lot} = 0.2 \frac{J}{g \cdot K} \cdot 9 \frac{g}{cm^3} \cdot d \cdot A \quad (4.36)$$

Die Entfaltung des Foster-Netzwerks und somit die Bildung des Bezugs zwischen Bauteil und Umgebungstemperatur transformiert das Foster-Netzwerk zum Cauer-Netzwerk [89] [94]. Die Übertragungsfunktion wird im Laplace-Bereich äquivalent berechnet .

$$Z_{th, LE}(s) = \frac{1}{sC_{th} + \frac{1}{R_{-th} + \frac{1}{sC_{th} + \dots + \frac{1}{R_{th}}}}} \quad (4.37)$$

Die Sprungantwort  $Z_{th}$  wird mit der Laplacetransformation erzeugt.

$$Z_{th, LE} = \sum_n^1 R_i (1 - e^{-\frac{t}{R_i \cdot C_i}}) \quad (4.38)$$

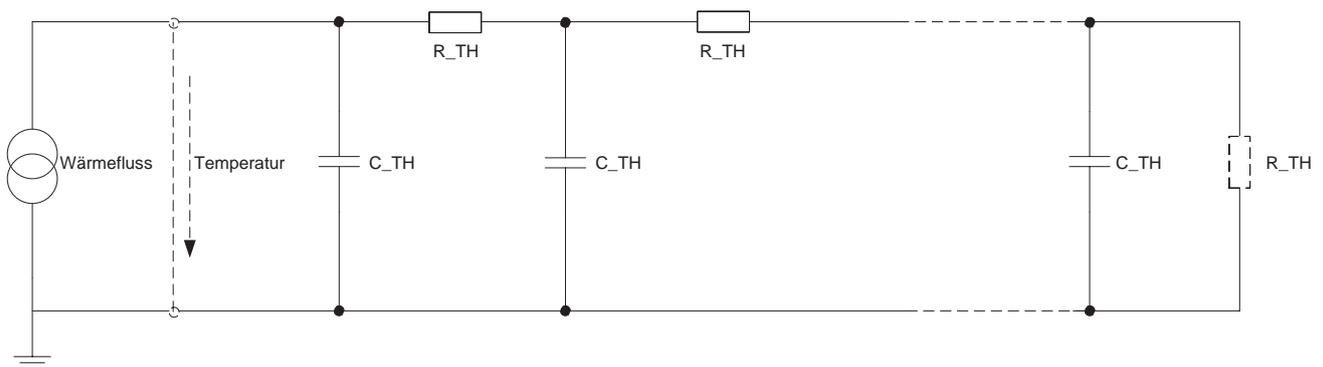


Abbildung 4.21: Netzwerk nach Cauer

Um das Kühlsystem vereinfacht darstellen zu können, wird das Gesetz von Newton angewandt Gleichung 4.39. Die Integration des Kühlkörpers kann dabei als idealisierter Hohlzylinder von Kühleinlass zum Kühlausgang der Leistungselektronik angesehen werden. Resultierende Wärmeverluste, entstehende Wärmeeinträge in das Kühlwasser und absolute Temperaturen im In-

verter müssen messtechnisch aufgezeichnet und mit der Simulation validiert werden. In Abhängigkeit der Kühlplattentemperatur ergibt sich ein Gradient der Kühlmediumtemperatur vom Einlass zum Auslass des Kühlmediums.

$$\frac{dT_{KM, Ein, LE}}{dx} = \frac{A \cdot \alpha \cdot (T_{KM, Aus} - T_{KM, Ein})}{\dot{V} \cdot c_P \cdot l} \quad (4.39)$$

Gleichung 4.39 verwendet den  $\alpha$  Wärmeübergangskoeffizienten,  $T_{KM}$  die Kühlmediumtemperatur und  $c_P$  die spezifische Wärmekapazität, um den Temperaturgradienten des Kühlwassers im Hohlzylinder zu bestimmen. Die Integration erfolgt über den Weg vom Kühleinlass zum Kühlausgang, wie in Abbildung 4.19 abgebildet. Nach Umstellung von Gleichung 4.39 ergibt sich Gleichung 4.40.

$$\frac{T_S - T_{KM, Aus}}{T_S - T_{KM, Ein}} = \exp\left(-\frac{A \cdot \alpha}{\dot{V} \cdot c_P}\right) \quad (4.40)$$

Mittels dieses Temperaturgradienten und des Massenstromes kann die benötigte Kühlleistung bestimmt werden, wie in Gleichung 4.41 definiert. Mit diesen beiden Variablen kann die Bauteiltemperatur und damit der Lebensverbrauch der Bauteile beeinflusst werden.

$$Q_{LE} = \dot{V} \cdot c_p \cdot (T_{out} - T_{In}) \quad (4.41)$$

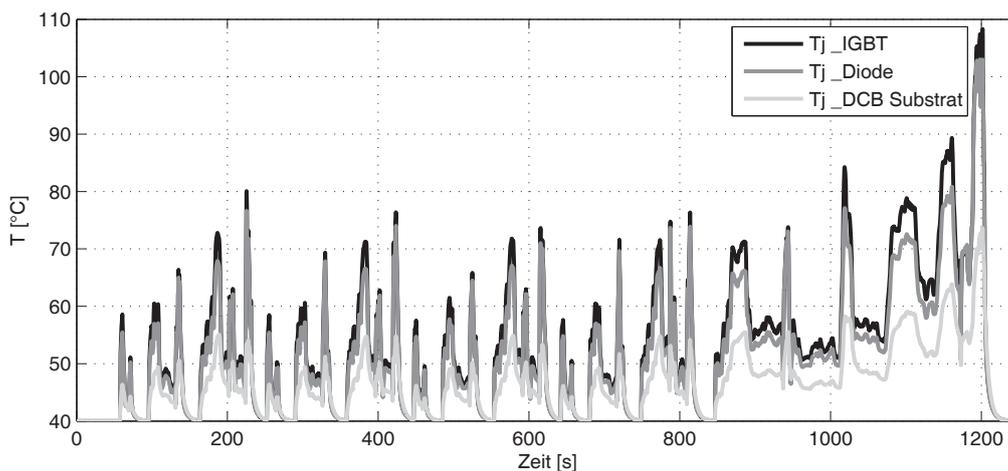


Abbildung 4.22: Simuliertes Einschwingverhalten in den Elementen der Halbleiterbrücke in dem Fahrzyklus NEFZ und in der thermischen Vorkonditionierung  $T_{System, Start} = +40^{\circ}\text{C}$

### 4.4.2 Lebensdauer- und Zuverlässigkeitsberechnung

Ein Schädigungsmechanismus in der Leistungselektronik kann durch zu hohe Temperaturen, zu niedrige Temperaturen, zu hohe Temperaturgradienten und einen steilen Temperaturanstieg verursacht werden [95]. Die Lebensdauervorhersage ist vor allem von der durchschnittlichen Betriebstemperatur und den Temperaturgradienten der Bauteile und des Kühlmediums abhängig [21] [53]. Dies wurde bereits in Abschnitt 2.4 aufgezeigt. Abbildung 4.23 zeigt die Schematik der Lebensdauersimulation und die Vorgehensweise.

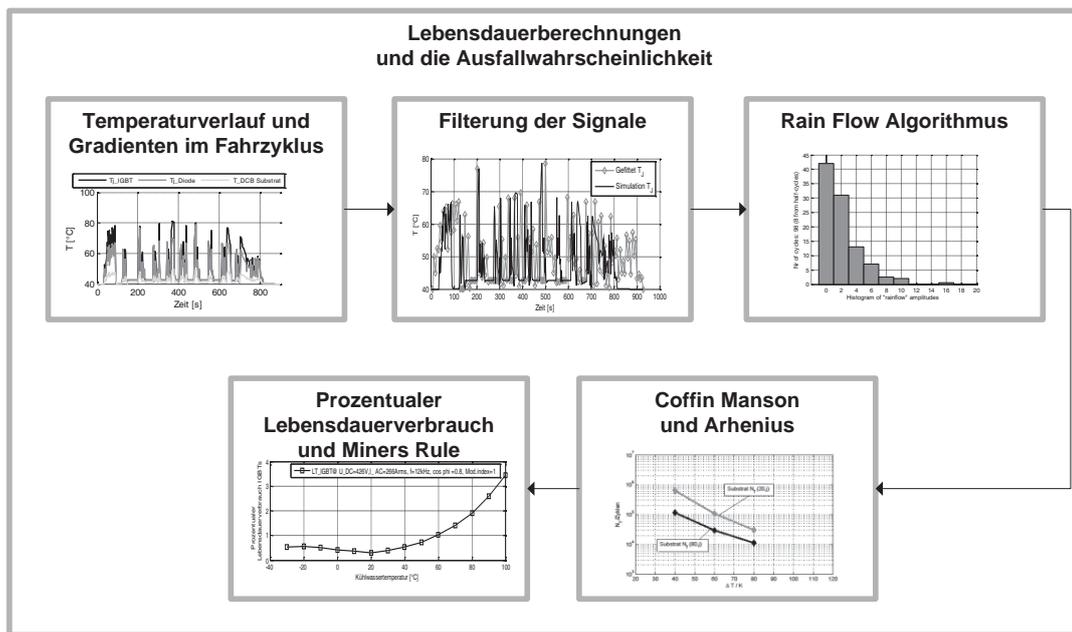


Abbildung 4.23: Angewandte Lebensdauer- und Ermüdungsberechnung

Die Berechnungen basieren auf Zählalgorithmen und empirischen statistischen Modellen. Die angewandten Lebensdauerberechnungen werden in diesem Abschnitt erörtert. Um die Anzahl der Zyklen bis zum Ausfall, die Ausfallwahrscheinlichkeit und die Lebensdauer der Komponenten bestimmen zu können, wird mit der Simulation der Leistungselektronik (vom Hersteller) eine Post Processing-Berechnung folgender wesentlicher Größen durchgeführt:

- Temperaturverläufe  $T_j$ , durchschnittliche Temperatur und Temperaturgradienten  $\Delta T$  in den Betriebspunkten
- Filter der Extremwerte in den Temperaturverläufen mit einer Abtastrate von  $T_{LE,F} = 1K, 5K$ . Mit  $T_{LE,F} = 5K$  ist die Lebensdauerberechnung im zuverlässigen Bereich [96]
- **Lebensdauerbestimmung mittels Zählverfahren**, Temperaturprofilidentifikation mittels Rainflow Algorithmus [97] [98] [99]
- **Empirische Lebensdauerberechnungen** mittels Coffin Manson  $N_f$ -Gesetz und Arrhenius-Koeffizient
- Prozentualer Lebensdauerverbrauch von Dioden  $L_{LE,Dioden}$  und IGBTs  $L_{LE,IGBTs}$  und Ermittlung der Fittingkonstanten

Um die Alterungsmechanismen in Abhängigkeit von den thermischen Belastungen der Elemente aufzeigen zu können, ist es wesentlich, transiente Fahrzyklen und die resultierenden Temperaturprofile zu erfassen. Abbildung 4.24 bildet die Verläufe des Phasenstroms und der Zwischenkreisspannung am Eingang der Inverterschaltung im ADAC BAB 130 ab.

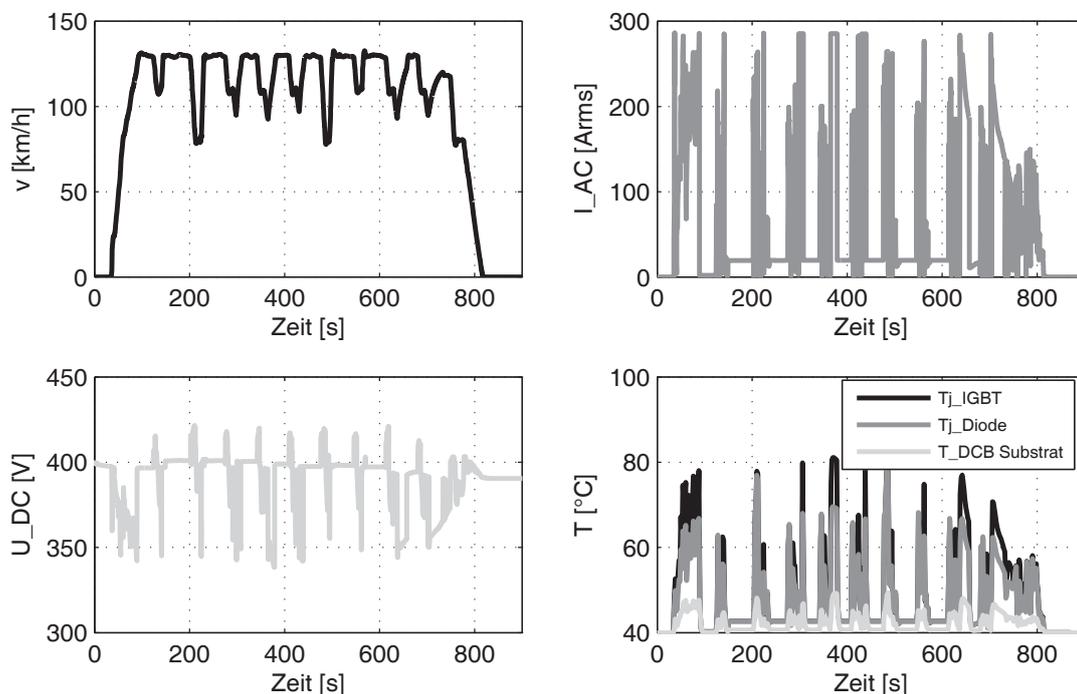


Abbildung 4.24: Simulierte Eingangsdaten und Temperaturverläufe im Fahrzyklus ADAC BAB mit der Schaltfrequenz  $f_{SW} = 1.2kHz$

Aufgrund des Fahrzyklus ergibt sich ein Strom- und Spannungsprofil am Eingang der Leistungselektronik, aufgezeigt in Abbildung 4.24. Der sich ergebende Leistungsfaktor und Modulationsindex wurde in Abbildung 4.15 gebildet. Für die Analyse des Einflusses von Strom- und Spannungsprofil werden in dieser Berechnung der Leistungsfaktor  $\cos(\varphi) = 1$ , der Modulationsindex  $= 0,8$  und der Volumenstrom  $\dot{V} = 6\text{l/min}$  als konstant angenommen. Der Phasenstrom bestimmt die resultierenden Wärmeverluste, siehe Abbildung 4.18. Der maximale Phasenstrom liegt bei 281 Arms. Es wird deutlich, dass ebenfalls Untersuchungen bei Phasenströmen bis zu  $I_{AC}$  von 400 Arms nötig sind, um die optimalen Sollwerte der Kühlung zu generieren.

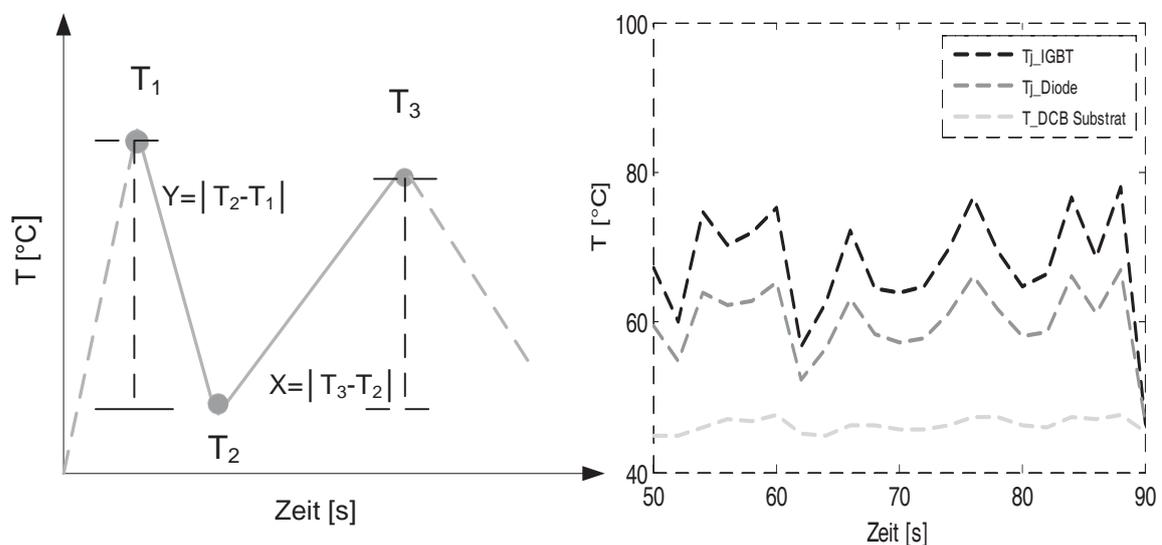


Abbildung 4.25: Drei-Punkte-Algorithmus des Rainflowzählverfahrens

Die Temperaturverläufe der Bauteile zeigen Temperaturgradienten bis zu  $\Delta T = 50\text{Grad}$  auf. Die maximalen Temperaturen sind im zulässigen Betriebsfenster.

Der Zyklus wird in diesem Abschnitt zur Verdeutlichung der Methodik der Lebensdauerschätzungen herangezogen. Der **Rainflow-Algorithmus ist ein Zählverfahren**. Dieses wird angewandt für die Identifizierung der Temperaturamplituden und mittleren Temperaturen der Materialien [98]. Das Rainflowzählverfahren wird in der Literatur zur Analyse der Extrema der Temperaturverläufe verwendet. Mit dieser Zählmethode werden Gradienten im Temperaturverlauf ausgewertet.

Es werden die Differenzen von  $T_1$  nach  $T_2$  und  $T_3$  erfasst. Der Algorithmus wird in Abbildung 4.25 betrachtet [100] [101]. Dieser wird an den simulierten Temperaturen von den IGBTs, Dioden und dem DCB-Substrat in Matlab angewandt. Die Verteilung der Amplituden und die mittleren Temperaturen der IGBTs zeigt das Histogramm in Abbildung 4.26. Abbildung 4.27 bildet die Rainflow-Matrix ab.

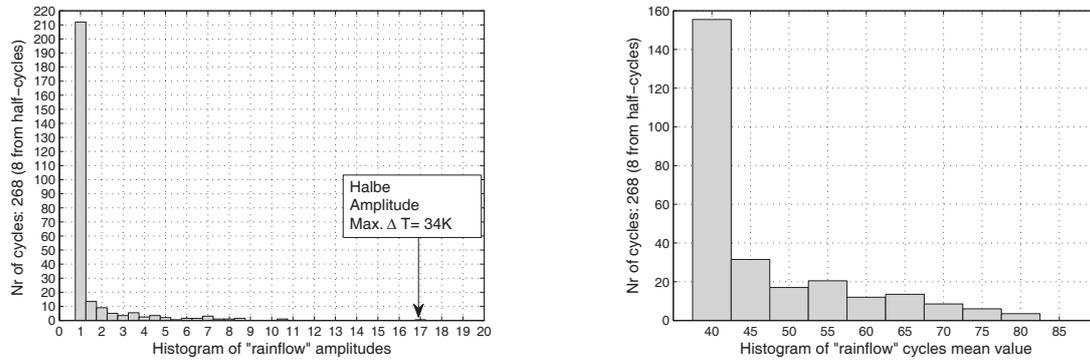


Abbildung 4.26: Auswertung Sperrschichttemperatur der Dioden  $T_{j,IGBT}$  im ADAC BAB-Warmland mit dem Rainflow-Zählverfahren

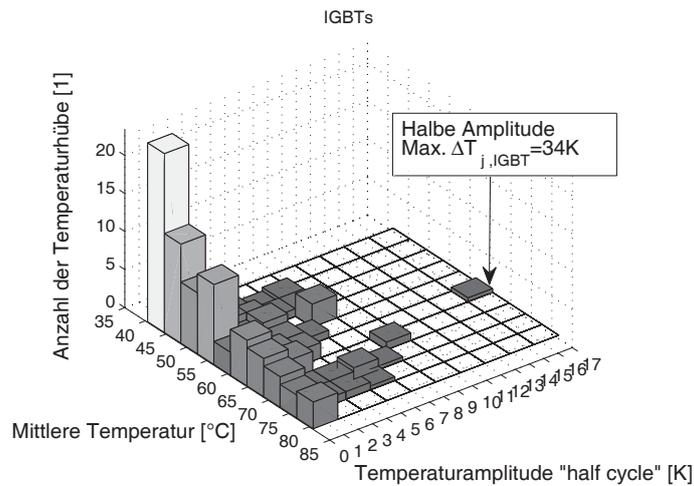


Abbildung 4.27: Rainflow Matrix  $T_{j,IGBT}$  im ADAC BAB

Die Auswertung des Rainflow-Algorithmus der Dioden zeigt Abbildung 4.28 und Abbildung 4.29. Der höchste Gradient liegt bei 16K im Temperaturverlauf des Fahrzyklus im Warmland. Der Startwert durch die Vorkonditionierung ist  $T_{j,Diode} = 40^{\circ}C$ .

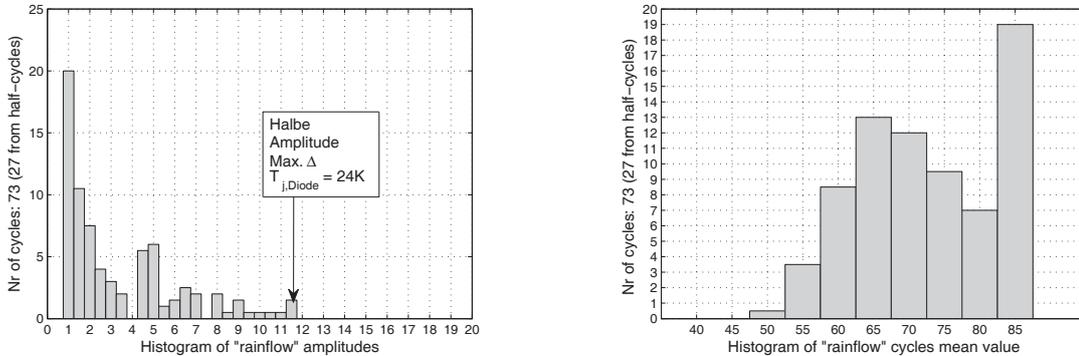


Abbildung 4.28: Auswertung Sperrschichttemperatur der Dioden  $T_{j,Diode}$  im ADAC BAB-Warmland mit dem Rainflow-Zählverfahren

Der maximale Wert der Diode liegt bei  $T_{j,Diode} = 80^{\circ}C$  und führt nicht zu Schädigungsmechanismen der Dioden. Im Vergleich zu den IGBTs unterscheiden sich die Temperaturgradienten gering.

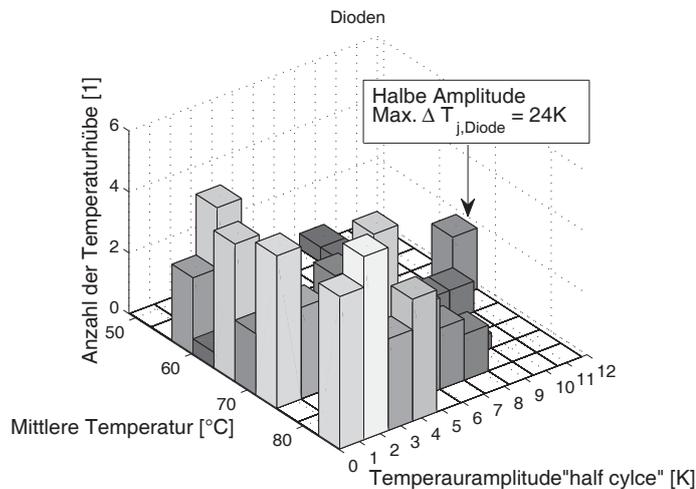


Abbildung 4.29: Rainflow-Matrix  $T_{j,Diode}$  im ADAC BAB

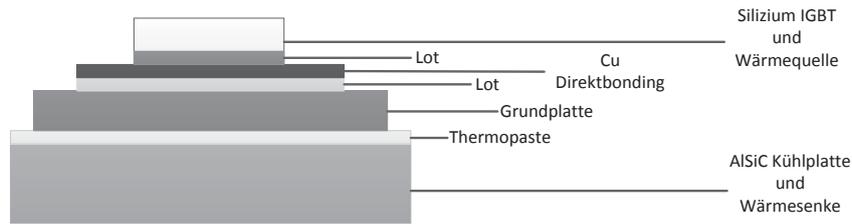


Abbildung 4.30: Verschiedene Materialschichten mit unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten nach [102]

Die Analyse der Temperaturen des Kupfersubstrates ist wesentlich, um die Dehnung  $\epsilon$  des Kupfers bei Wärmeeintrag aufgrund des Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  zu berücksichtigen. Abbildung 4.30 verdeutlicht die Anbindung der Silizium-IGBTs und des Kupfersubstrates an die Lotwerkstoffe.

Tabelle 4.2: Eigenschaften von Lotlegierungen für die Halbleiterbrücken [103]

Legierung des Lots	Daten	Verbindung
$Sn96,5Ag3Cu0.5$	$m = 4.3, \beta = 11.9970$	Zinn-Silber-Kupfer-Lot, Aluminium gebondet
$Sn96,5Ag3Cu0.5$	$m = 2.1, \beta = 208.00$	Zinn-Silber-Kupfer-Lot, Silber gesintert

Die aufgezeigten Materialien in Abbildung 4.30 besitzen unterschiedliche thermische Parameter.

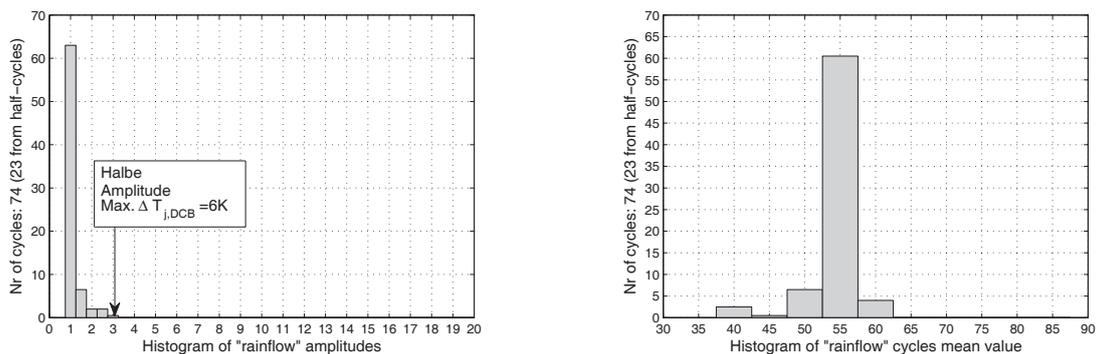
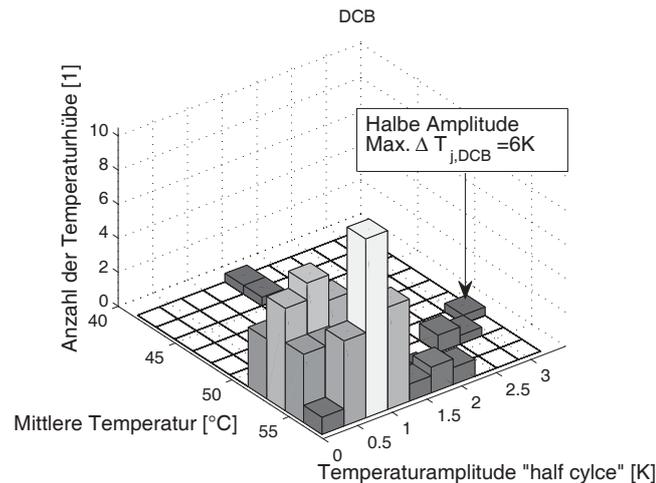


Abbildung 4.31: Auswertung DCB-Subtrat  $T_{J,DCB}$  im ADAC BAB-Warmland mit dem Rainflow-Zählverfahren

Abbildung 4.32: Rainflow-Matrix  $T_{j,DCB}$  im ADAC BAB

Durch die Temperaturschwankungen treten Dehnungen in den Materialschichten auf. Die thermischen Ausdehnungskoeffizienten bestimmen die Dehnung, siehe Gleichung 4.42. Die resultierenden mechanischen Belastungen der Lotwerkstoffe durch die Halbleiter und Substrate verursachen Dehnungen. Die Temperaturgradienten sind, wie bereits erörtert, abhängig von dem Strom- und Spannungsprofil. Des Weiteren besteht ein Zusammenhang mit der Kühlmitteltemperatur, Abbildung 4.33.

$$\Delta\epsilon_{Dehnung} = \Delta T \cdot \alpha \quad (4.42)$$

Der Arbeitspunkt zur **empirischen Untersuchung der Lebensdauerberechnung** ist der maximale Wert des real gemessenen Fahrzyklus ADAC BAB mit dem Referenzfahrzeug.

Tabelle 4.3: Betriebspunkt zur Lebensdaueranalyse

Parameter	Wert
Zwischenkreisspannung	426V
Phasenstrom	281Arms
$f$	12kHz
Modulationsindex	1
Leistungsfaktor	0.8
$T_{\text{Start,Bauteile}}$	40°C
Volumenstrom	2 l/min, 4 l/min, 6 l/min

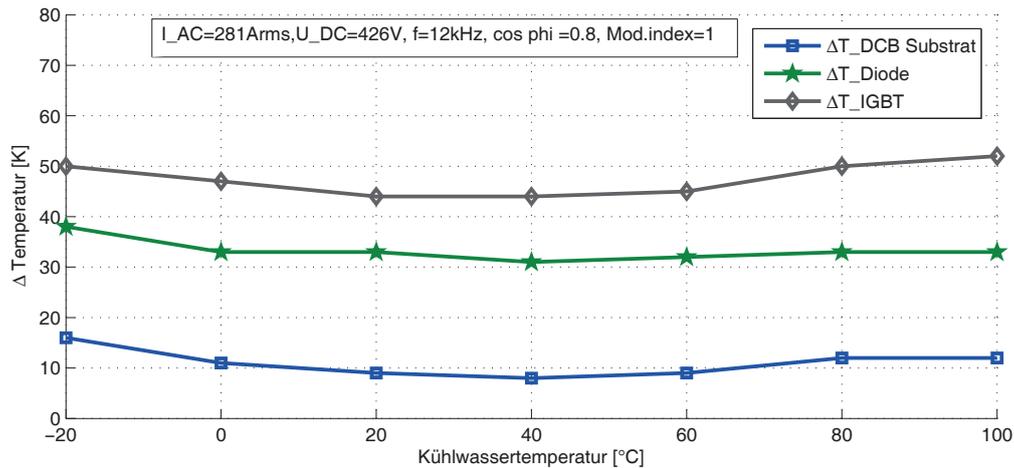


Abbildung 4.33: Temperaturgradienten der IGBTs, der Dioden und des Substrates in unterschiedlichen Kühlsituationen

Das Coffin-Manson-Gesetz dient als Grundlage zur Simulation des thermischen Stresses [57]. Dieses Gesetz berechnet die thermischen Belastungen für eine Anzahl an Betriebsstunden beziehungsweise Fahrzyklen.

Tabelle 4.4: Erwartete Lebensdauer der IGBTs mit dem Modell berechnet in Anlehnung an [103]

Parameter	Wert
<i>Betriebsstunden</i>	10.000 Stunden
<i>Maximaler Phasenstrom</i>	281Arms
<i>Zeit eines Zyklus</i>	25s (Stromprofil:0-281Arms-10)
<i>Anzahl der Zyklen in den Betriebsstunden</i>	1.428.000
<i>Mittlere Temperatur</i>	100 °C
<i>Temperaturamplitude ΔT</i>	80K

Nach [98] ergeben sich folgende Beziehungen Gleichung 4.43 .

$$N_f = A \cdot \Delta T^{-b} \cdot e^{-\frac{E_A}{k_b \cdot T_{Mean}}} \quad (4.43)$$

Auf den Coffin-Manson-Gesetz basierend kann das Norris-Landzberg-Modell angewendet werden [104].

$$N_f = A \cdot f^\beta \cdot \Delta T^{-b} \cdot e^{-\frac{E_A}{k_b \cdot T_{Mean}}} \quad (4.44)$$

Ein Abgleich mit den Coffin-Manson-Modellen aus der Literatur ist notwendig. Die Güte ist aufzuzeigen, und fehlende Zusammenhänge zwischen der mittleren Temperatur sowie der Temperaturamplitude und die Anzahl zum Ausfall sind zu belegen.

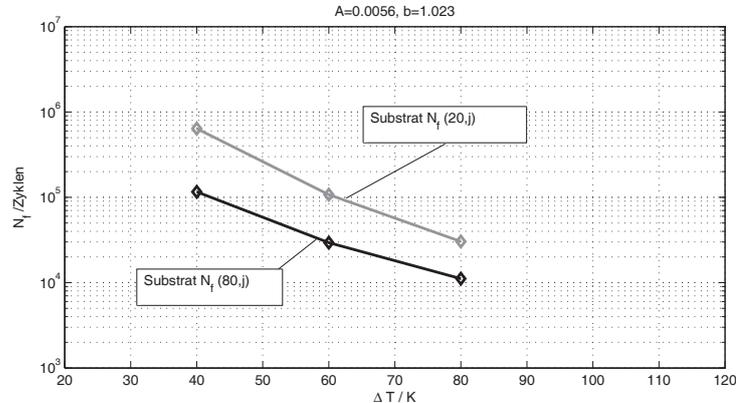


Abbildung 4.34: Anzahl der Zyklen bis zum Ausfall vom Substrat nach [102] als Funktion der Temperaturgradienten mit der mittleren Temperatur als Parameter @ $T_{mean} = 20, 80$  Grad

Der Koeffizient  $N_f$  berechnet die Anzahl der Zyklen bis zum Ausfall. Die Coffin-Manson-Beziehung liefert die Anzahl der Zyklen zum Bruch in Abhängigkeit der Dehnung [102].  $\beta$  und  $m$  werden durch Materialparameter gebildet.  $f$  beschreibt die Zyklusfrequenz,  $k_b$  die Boltzmann-Konstante ( $k_B = 8.6234 \times 10^{-5} \text{ eV/k}$ ) und  $E_A =$  die Aktivierungsenergie [95].  $\Delta \epsilon_{In}$  stellt die Dehnungsamplitude der Materialschichten dar.  $\Delta T$  kennzeichnet den Temperaturgradienten in den Sperrschichten von Dioden und IGBTs oder in dem Substrat. Diese Temperaturgradienten sind wesentliche Einflussgrößen auf den Coffin-Manson-Koeffizienten, aufgezeigt in Abbildung 4.33.

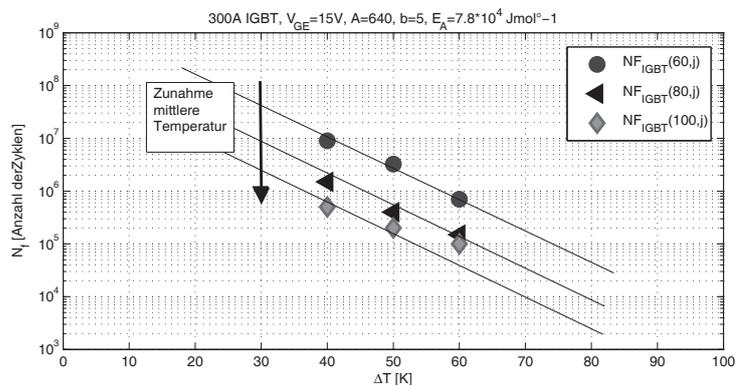


Abbildung 4.35: Anzahl der Zyklen bis zum Ausfall von IGBT-Modulen nach [103] [105] als Funktion des Temperaturgradienten mit der mittleren Temperatur als Parameter @ $T_{mean} = 60, 80$  und  $100$  Grad

Die Miner-Regel wird mittels Palmgreen-Miner-Gesetz Gleichung 4.45 hergeleitet.  $N_i$  bildet die Anzahl der aufgetretenen Ereignisse der Temperaturamplituden und  $N_f$  ist die Anzahl der Zyklen bis zum Ausfall.

$$MinerRegel = \sum_{i=1}^n \frac{N_i}{N_f} \quad (4.45)$$

Die Miner-Rule wird in dieser Abhandlung angewandt, um den prozentualen Lebensdauerverbrauch zu präzisieren. Der prozentuale Lebensdauerverbrauch wird nach Gleichung 4.46 auf Grundlage der Miner-Regel berechnet [96] .

$$Lebensdauerverbrauch = L_{Le} = \sum_{i=1}^n \frac{N_{i,j}}{N_{f,i,j}} \quad (4.46)$$

Wenn der prozentuale Lebensdauerverbrauch  $L_{LE} = 1 = 100\%$  ist, liegt ein Ausfall mit der Wahrscheinlichkeit von  $L_{LE} = 1\%$  vor [93]. Für die Berechnungen und die jeweilige Messreihe, beschreibt  $i$  die mittlere Temperatur und  $j$  die Amplitude des Temperaturzyklus. Für die weiteren Untersuchungen wird an dieser Stelle die Beeinflussung von Volumenstrom und der Kühlwassertemperatur auf die Lebensdauerverbräuche der IGBTs und Dioden eingehend untersucht. Das Modell wird in dem kritischsten Betriebspunkt aus dem ADAC BAB eingestellt, und die Volumenströme und Temperaturen werden simulativ variiert. Die resultierende Auswirkung der unterschiedlichen Volumenströme und Temperaturen im Kühlsystem auf die hergeleiteten Lebensdauerverbräuche wird in Abbildung 4.37 und Abbildung 4.36 zusammengefasst.

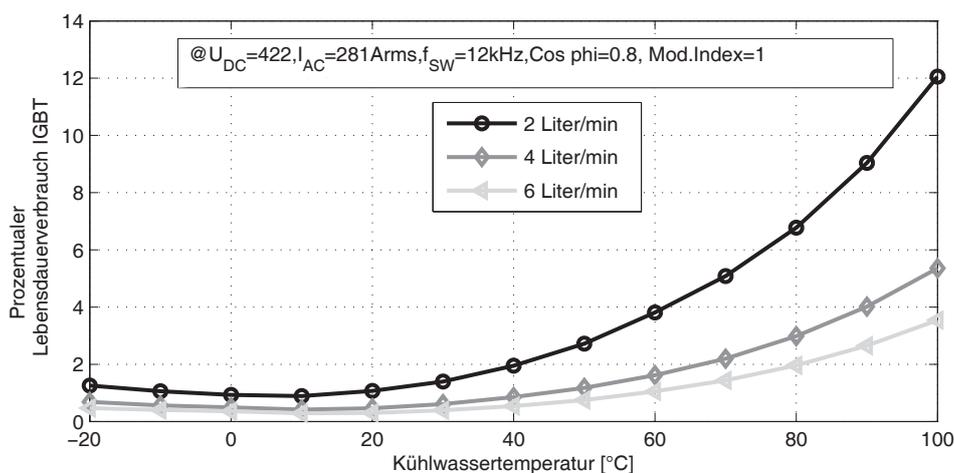


Abbildung 4.36: Prozentuale Lebensdauerberechnung der Silizium-IGBTs in Abhängigkeit der mittleren Temperatur für 6.000h Betriebsstunden

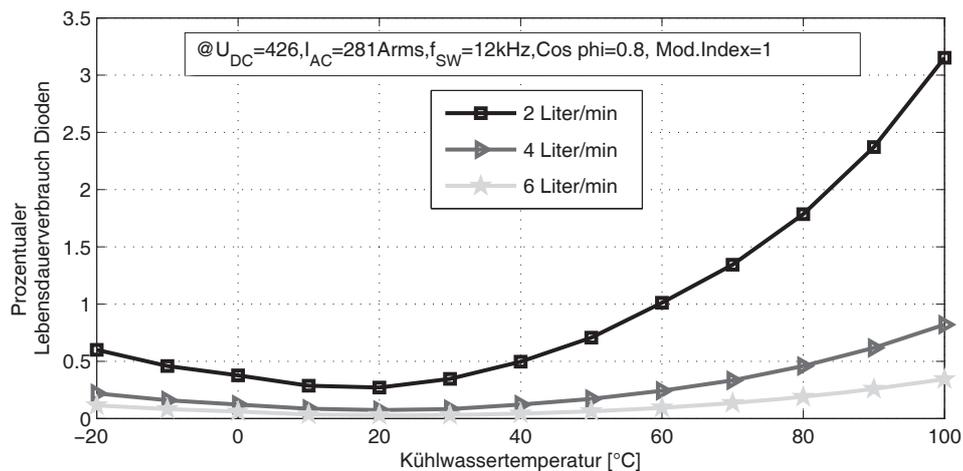


Abbildung 4.37: Prozentuale Lebensdauerberechnung der Dioden in Abhängigkeit der Temperatur für 6.000h

Auf Grundlage der Modellierung können die Temperaturprofile und -wechsel ausgewertet werden. Abbildung 4.35 zeigt den Einfluss der mittleren Temperatur und der Temperaturamplitude auf die Anzahl der Zyklen bis zum Ausfall für die geforderten Betriebsstunden. Die Temperaturprofile werden durch die elektrischen Größen bestimmt, aufgezeigt in Abbildung 4.18.

Anhand des thermisch-elektrischen Ersatzschaltbildes wird der Wärmefluss erfasst. Mit Hilfe des Volumenstroms  $\dot{V}$  und der richtigen Kühlwassertemperatur kann der prozentuale Lebensdauerverbrauch in den geforderten Betriebsstunden verringert werden. Der optimale Betrieb für IGBTs und Dioden liegt bei  $T_{KM, Ein, Inverter} = 20^\circ C$ . Abbildung 4.36 und Abbildung 4.37 veranschaulichen die Zuordnungen der Sollwerte für die Kühlungen. In Kapitel 7 wird auf Grundlage der Ausgangssignale eine Software entwickelt, die anhand dieser Kenngrößen eine thermische Vorgabe an das Kühlungs- und Energiemanagement sendet. Die Ausgangssignale, insbesondere die Temperaturen, werden im Stand des Fahrzeugs zunächst vereinfacht und analysiert. Die Strategie und Umsetzung erörtert Kapitel 7.

Besonders die Variation der Kühlwassertemperatur hat hohen Einfluss auf die mittleren Temperaturen und die Temperaturamplituden.

Eine Volumenstromvariation (Aktuelle Anforderung:  $\dot{V}_{KM, LE} \geq 3l/Min$ ) bewirkt hingegen einen geringeren Einfluss auf die Halbleitertemperaturverläufe. Die gezielte Einstellung der Kühlwassertemperatur kann demgemäß die Anzahl der Zyklen bis zum Ausfall und die prozentualen Lebensdauererbräuche bedarfsgerecht lenken.

## 4.5 Modellierung eines Lithium-Ionen-Batteriesystems

Grundlegend gibt es unterschiedliche Methoden, um einen Energiespeicher zu modellieren. So wird in der Literatur zwischen physikalisch-chemischen, elektrischen und elektrisch-thermischen Modellen unterschieden [23]. Mittels elektrisch-thermischer Ersatzschaltbilder kann das Verhalten von Zellen vereinfacht eindimensional dargestellt werden.

Abbildung 4.38 verdeutlicht, welche Teilmodelle zunächst benötigt werden, um den Gesamtzustand in Anbetracht der Ziele und gewählten Methoden abbilden zu können. Ein Teilmodell bildet das Batteriemanagementsystem und ein Weiteres das Zellsystem. Ein Look-Up-Table, basierend auf thermischen Messungen, definiert das elektrisch-thermische Verhalten des Zellstroms. Zusätzlich wird diesen Teilmodellen eine kalendarische und zyklische Alterungsberechnung angefügt.

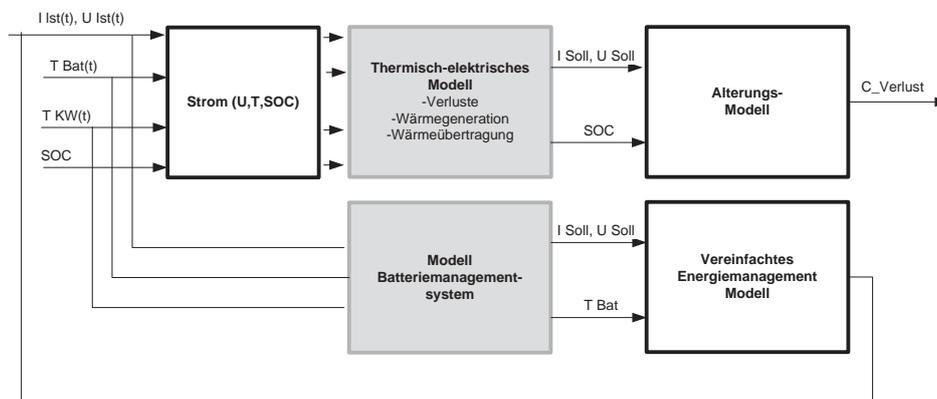


Abbildung 4.38: Schematik des aufgebauten Batteriemodells

Die Leistungsverluste, definiert in Gleichung 4.47, ergeben sich aufgrund der ohmschen Wärmeverluste, der Wärmeentwicklung der chemischen Reaktionen, sowie der Wärmeabgabe durch Radiation und die stromführenden Elemente in dem Energiespeicher.

$$P_{V,Batterie} = P_{V,Ohm} + P_{V,Reakt} + P_{V,Rad} \quad (4.47)$$

$$P_{V,Ohm} = R_{Bat} \cdot I_{Zelle}^2 \quad (4.48)$$

$$P_{V,Reak} = \frac{dU}{dT} \cdot I \cdot T \quad (4.49)$$

Der Lade- und Entladevorgang einer Lithium-Ionen-Batterie findet mittels Interkalation und Dekalation der Ionen statt [46], siehe Abschnitt 2.5. In dem beschriebenen Lade- und Entladevorgang einer Lithium-Ionen-Zelle wird Wärme absorbiert. Die Wärmeverluste der Radiation  $P_{V, \text{Rad}}$  sind lediglich ein geringer Anteil und werden in dieser Arbeit vernachlässigt.

### 4.5.1 Thermisch-elektrisches Ersatzschaltbild des Zellsystems

In dieser Arbeit wird mit Hilfe eines thermisch-elektrischen Ersatzschaltbildes der Zellen gearbeitet. Diese eindimensionale Modellierung ermöglicht eine auf Fahrzeugebene gesamtheitliche Simulation mit geeigneter Recheneffizienz. In Abbildung 4.39 wird die vereinfachte Ersatzschaltung des Zellsystems aufgezeigt. Die Systemspannung des Batteriesystems berechnet sich in Abhängigkeit vom State of Charge [48].

$$U_{Klemm}(SOC, t) = U_{OCV}(SOC, T) + U_{R_i}(SOC, T) + U_{R_{th, 1...n}} \quad (4.50)$$

Das angewandte Modell bildet das Zellsystem thermisch und elektrisch ab. Die Schaltung setzt sich aus einer Reihenschaltung von RC-Gliedern und dem Innenwiderstand zusammen [48].

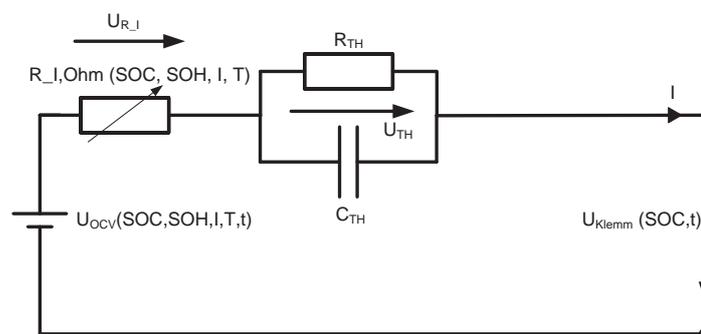


Abbildung 4.39: Ersatzschaltbild des Modells mit dem R-Glied für den Innenwiderstand und dem RC-Glied für die Zelle

Der Wärmefluss durch die Zelle wird über eine Parallelschaltung des thermischen Widerstands  $R_{TH}$  und der thermischen Kapazität  $C_{TH}$  der  $\text{LiFePO}_4$ -Zelle im Ersatzschaltbild beschrieben. Die Spannung des Zellsystems ergibt sich aus der Anzahl der Zellen und der Zellspannung. Die Ruhespannungen und der Ladezustand wurden mittels Kennlinien in die Modellierung eingebunden, die auf realen Messungen beruhen. Der Innenwiderstand des Gesamtsystems wird definiert durch die Innenwiderstände der 120 Zellen. Gleichung 4.51 definiert die resultierende thermische Impedanz  $Z_{TH}$  einer Zelle.

$$Z_{TH} = R_{TH} \left( 1 - e^{\left( \frac{1}{R_{TH} \cdot C_{TH}} \right)} \right) \quad (4.51)$$

$$G(j\omega) = \frac{U_{Bat}(j\omega)}{I_{Bat}(j\omega)} = R_i + \frac{R_{TH}}{R_{TH}C_{TH}j\omega + 1} \quad (4.52)$$

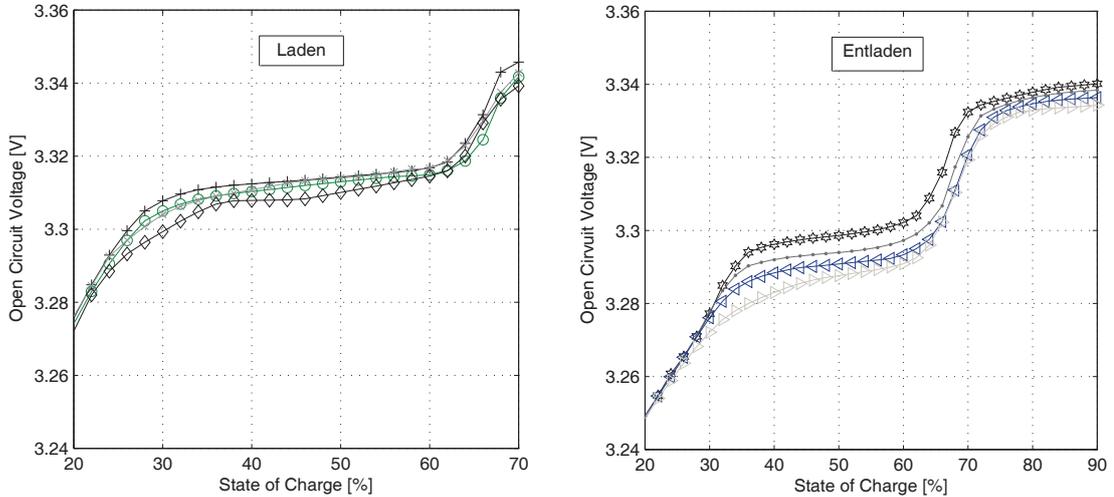


Abbildung 4.40: Exemplarische Ruhespannung (Open Circuit Voltage) beim Lade- und Entladevorgang einer  $\text{LiFePO}_4$ -Zelle

Die Abhängigkeit zwischen Temperatur und dem Innenwiderstand wird in Unterabschnitt 4.5.2 aufgezeigt. Der Innenwiderstand setzt sich aus dem Verhältnis zwischen Ruhe- und Batteriespannung sowie Batteriestrom am Ausgang zusammen [26].

$$U_{Klemm} = U_{OCV} + R_I \cdot I_{Zellsystem} \Rightarrow R_I = \frac{U_{Klemm} - U_{OCV}}{I_{Zellsystem}} \quad (4.53)$$

In dem Black Box-Modell der Zellen wird die Auswirkung des Innenwiderstands auf die Leistungsfähigkeit der Zellen nicht elektrochemisch korrekt abgebildet.

Aus diesem Grund wird der Strom in Abhängigkeit von SOC und Temperatur mittels Look-up-Table dem thermischen Modell vorgeschaltet, dargestellt in Abbildung 4.41. Die Energiebilanz innerhalb einer Zelle lässt sich mit Hilfe der Zellmasse, der spezifischen Wärmekapazität, der Zelltemperatur und der generierten Wärme definieren. Das thermische Modell berechnet den Wärmefluss von den Zellen zum Kühlwasser. In jeder Zelle müssen große Temperaturspreizungen vermieden werden, um schädigende Mechanismen, siehe Abschnitt 2.5, zu verhindern.

$$\Delta T_{Zelle} = P_V \cdot R_{TH} \left(1 - e^{\left(\frac{1}{R_{TH} \cdot C_{TH}}\right)}\right) \quad (4.54)$$

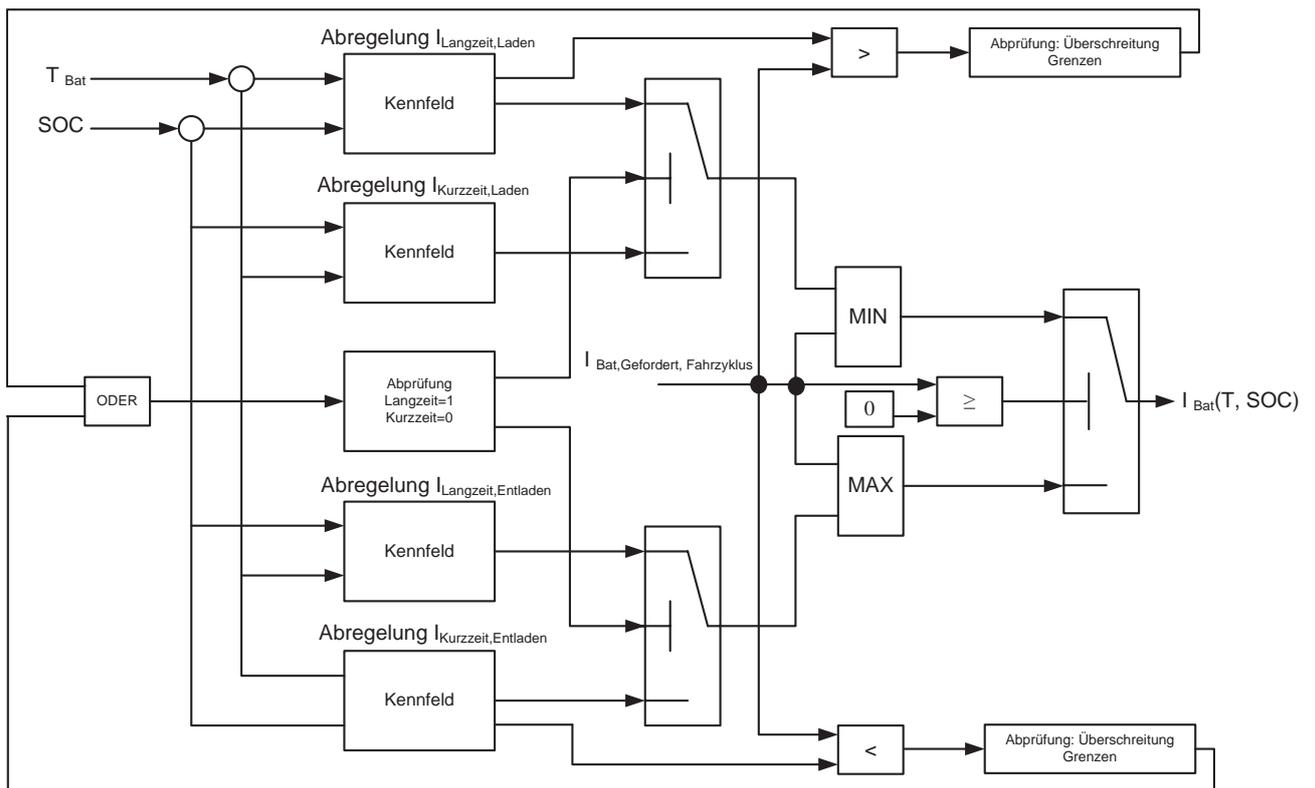


Abbildung 4.41: Implementierung des Verhaltens des Zellstroms in Abhängigkeit von Temperatur und SOC als Erweiterung für das thermisch-elektrische Modell

Im Anwendungsbeispiel wird als Kühlmedium Wasser-Glykol verwendet. Die Zusammensetzung von Wasser und Glykol hat das Verhältnis 50/50. In jeder Kühlplatte befinden sich Kühlkanäle, durch diese fließt das Kühlmedium vom Einlass zum Auslass. Die Kühlplatte besteht aus einer AlSi-Legierungen. Die Kühlsituation hängt von der Geometrie und Anzahl der Kühlkanäle ab. Die Wärmeübergänge durch die Zellwände und die Kühlplatte werden mit dem Wärmeübergangskoeffizienten und der  $Nu_{\beta}$  Zahl in Gleichung 4.55 hinterlegt.

$$\text{Mittlere } Nu_{\beta} \text{ Zahl} = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} = 3,66 + \frac{0,0668 \cdot \left(\frac{d}{l}\right) Re Pr}{1 + 0,04 \left[\left(\frac{d}{l}\right) \cdot Re \cdot Pr\right]^{\frac{2}{3}}} \quad (4.55)$$

Die Wärmekapazität einer Zelle des Versuchsträgers beträgt circa 754 J/K. Die spezifische Wärmekapazität der Zelle ist 1206 J/(kg·). Die Zelldichte  $\rho$  liegt bei 2007 kg/m<sup>3</sup>. Der absolute Wärmeleitwert  $k$  pro Zelle ( $k=0,44-0,53$ W/K) und die Zellgröße sind wesentliche thermische Kenndaten.

## 4.5.2 Identifikation des Alterungszustands des Zellsystems

Der Lebensdauerzustand der Batterie setzt sich aus den überlagernden Effekten der **kalendari-schen Alterung** und der **zyklischen Alterung** zusammen, siehe Abschnitt 2.5. Um die Auswirkung des Alterungszustands auf die irreversiblen Leistungs- und Kapazitätsverluste oder den Innenwiderstand der Zellen zu erfassen, werden mit Anwendung der Simulation (vom Komponentenhersteller) wesentliche Indikatoren berechnet. Die Klemm- und Ruhespannung werden zu Beginn in Abhängigkeit zur Zelltemperatur untersucht und aufgezeigt. Anschließend erfolgt die Analyse des Kapazitätsverlustes.

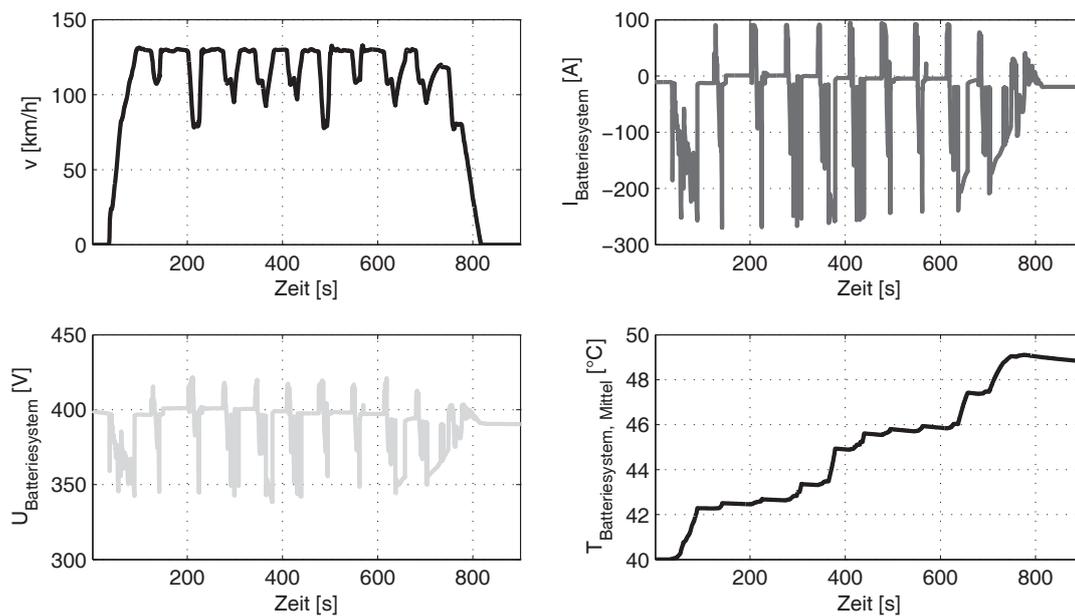


Abbildung 4.42: Simulierte Eingangsdaten und Temperaturverläufe im Fahrzyklus ADAC BAB

Der Hauptindikator für die Alterung ist in dieser Betrachtung der Kapazitätsverlust. Für die Erfassung der erforderlichen Kapazitätsverluste, siehe Kapitel 7, werden in dieser Abhandlung folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

- Simulation der Temperaturverläufe  $T_{\text{Zellsystem}}$ , Temperaturgradienten  $\Delta T$ , Spannungs- und Stromprofile in den Betriebspunkten oder Fahrprofilen für die zyklische Alterung
- Aktuelle Lebensdauerbestimmung und die Auswirkung mittels Messung von Ruhespannung, Klemmspannung, Innenwiderstand nach einem definierten Zeithorizont  $t$  im Stand des Fahrzeugs beziehungsweise der Offlinephase des Modells im Bereich ( $\text{SOC} = 10 \dots 90\%$ )
- Aufzeigen des kumulierten Kapazitätsverlustes  $C_{\text{Verlust, Zellsystem}}$  für die Zellen unter thermischen Umgebungsbedingungen

### 4.5.3 Auswirkungen des State of Health auf die elektrischen Zustände der Zellen

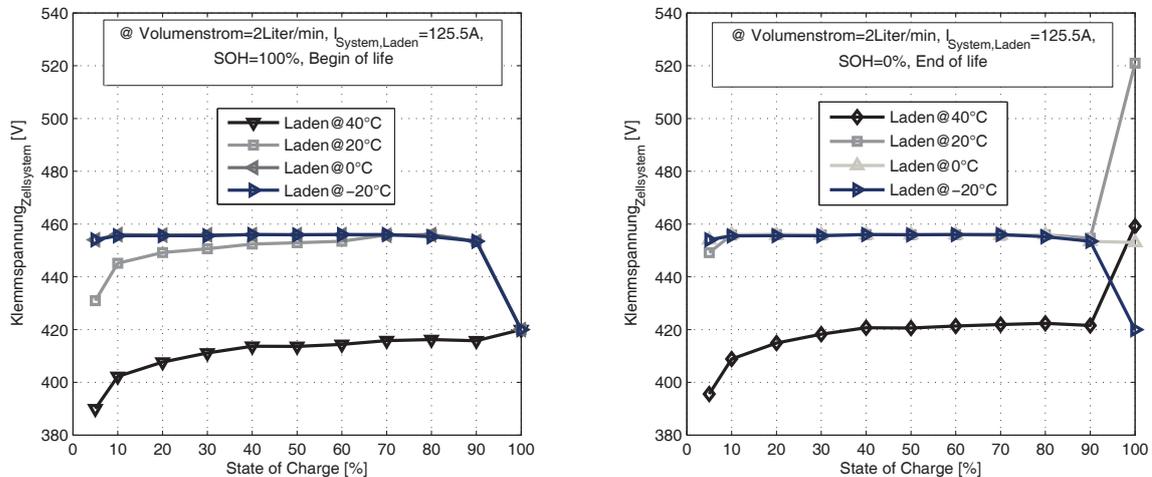


Abbildung 4.43: Klemmspannung  $U_{\text{Klemm}}$  mit  $T_{\text{Zellsystem}} = -20^\circ\text{C}$  bis  $+40^\circ\text{C}$  und die Kühlsituation  $@ \dot{V} = 2 \text{ l/min}$  in den Zuständen Begin of life und End of life

Die Variation des Volumenstroms in den Untersuchungen zeigte keinen Einfluss auf die Klemm- und Ruhespannung. Es ist zu beachten, dass die Zellen im State of Charge-Bereich ( $\text{SOC} = 0 - 10\%$  und  $\text{SOC} = 90 - 100\%$ ) in ihrem Verhalten abweichen, wie in Abbildung 4.43 und Abbildung 4.44 zu erkennen ist. Mit den anliegenden Spannungen kann folgend das elektrisch-thermische Verhalten mit Anwendung der Ersatzschaltung des Zellsystems, wie bereits in Abbildung 4.39 verbildlicht, abgebildet werden.

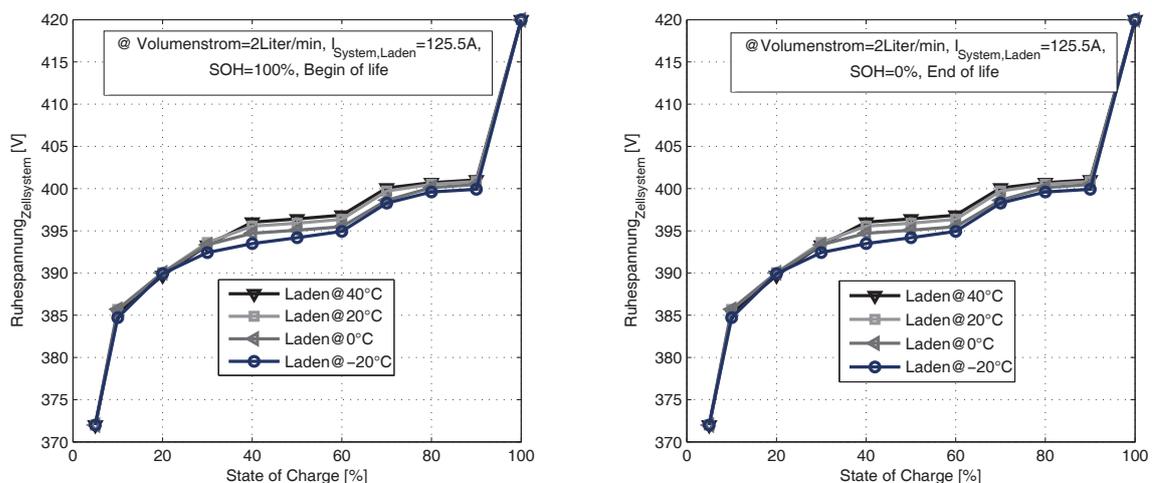


Abbildung 4.44: Ruhespannung  $U_{\text{OCV}}$  mit  $T_{\text{Zellsystem}} = -20^\circ\text{C}$  bis  $+40^\circ\text{C}$  und die Kühlsituation  $@ \dot{V} = 2 \text{ l/min}$  in den Zuständen Begin of life und End of life

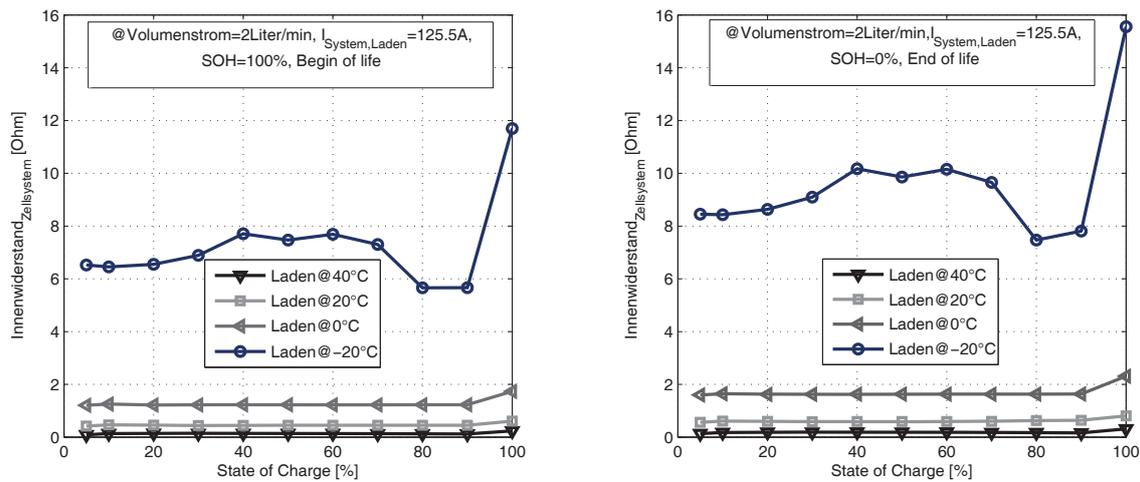


Abbildung 4.45: Berechneter Innenwiderstand des Zellsystems  $R_i$  ( $n=120$ ) mit  $T_{\text{Zellsystem}} = -20^\circ\text{C}$  bis  $+40^\circ\text{C}$  und die Kühlsituation @  $\dot{V} = 2\text{l/min}$  in den Zuständen Begin of life und End of life

Die Auswirkungen des thermischen Anfangszustandes und des Alterungszustandes des Zellsystems werden ersichtlich. Bei der kalendarischen Alterung ist der Beitrag der Temperatur besonders ausgeprägt, siehe Abbildung 4.45. In Unterabschnitt 2.5.1 wurde verdeutlicht, dass aufgrund von kalten Temperaturen ein Anstieg des Innenwiderstands und eine Reduzierung des Lade- und Entladestroms zu erwarten ist. Abbildung 4.45 bestätigt diese Annahme, dass der Innenwiderstand sich aufgrund der Batterietemperatur verändert. Dieser Effekt bedeutet eine geringere Leistungsfähigkeit sowohl beim Laden als auch beim Entladen der Batterie. Einen zusätzlichen negativen Effekt in tiefen Batterietemperaturen stellt das sogenannte Lithium Plating dar. Das Lithium Plating wird in dieser Arbeit jedoch nicht näher untersucht. Gleichung 4.56 berechnet beispielhaft den Innenwiderstand  $R_I(40^\circ\text{C}, \text{SOC} = 50\%)$ .

$$R_I(40^\circ\text{C}, \text{SOC} = 50\%, t = 500\text{s}) = \frac{U_{K\text{lemm}} - U_{OCV}}{I_{\text{System}}} \quad (4.56)$$

$$R_I(40^\circ\text{C}, \text{SOC} = 50\%, t = 500\text{s}) = \frac{413.622\text{V} - 396.408\text{V}}{125.5\text{A}} = 0.1372\text{Ohm}$$

Gleichzeitig wird ersichtlich, dass bei zunehmender Alterung auch der Innenwiderstand besonders in tiefen Umgebungstemperaturen, um bis zu  $R_{I,\text{Zellsystem}} = 2\Omega$  zusätzlich zunimmt.

Dieser Zusammenhang zeigt, dass der Innenwiderstand ein wesentlicher Indikator für den Alterungszustand darstellt. Die Identifikation muss jedoch unter thermisch-elektrisch festgelegten Betriebspunkten erfolgen, da andernfalls der Einfluss der Temperatur oder der Spannung den Alterungseffekt überlagert. Eine exakte Alterungserfassung wäre nicht mehr möglich.

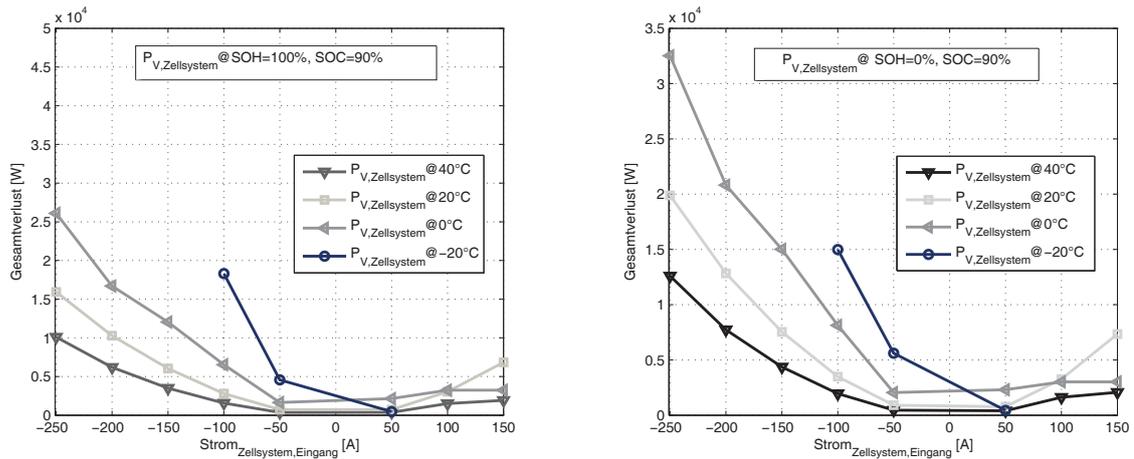


Abbildung 4.46: Berechnung der gesamten Wärmeverluste  $P_{V,Zellsystem}$  mit  $T_{Zellsystem} = -20^{\circ}\text{C}$  bis  $+40^{\circ}\text{C}$  und die Kühsituation  $@ \dot{V} = 2\text{l}/\text{min}$  in den Zuständen Begin of life und End of life

Trotz der Annahme in Unterabschnitt 2.5.2, dass die Wärmeverluste in niedrigen Temperaturen  $T_{Zellsystem} < 0^{\circ}\text{C}$  abnehmen, zeigen die Erkenntnisse der Berechnungen Abbildung 4.46 das Gegenteil. Insbesondere bei kalten Temperaturen ist der Innenwiderstand hoch und die Gesamtverluste  $P_{V,Zellsystem}$  steigen.

Bei  $T_{Zellsystem} = 40^{\circ}\text{C}$  liegt die maximale Verlustleistung bei  $P_{V,Zellsystem} = 1500\text{W}$ . Im kalten Zustand  $T_{Zellsystem} = 0^{\circ}\text{C}$  liegt die  $P_{V,Zellsystem}$  um ein Vielfaches höher. Es ist zu erkennen, dass die Wärmeverluste von dem Eingangsstrom, dem State of Charge, der Zelltemperatur und von dem Alterungszustand abhängen. Ist das Zellsystem gealtert, erhöht sich diese  $P_{V,Zellsystem}$  in jeglichen thermischen Zuständen, wie in Abbildung 4.46 verdeutlicht und gegenübergestellt wird. Besonders kritische Wärmeverluste bestehen für  $T_{Zellsystem} < 0^{\circ}\text{C}$  und beim Entladen für  $I_{Zellsystem} > 100\text{A}$ . Dies liegt an dem äquivalenten Verhalten des Innenwiderstandes.

Auf Grundlage dieser Zusammenhänge kann in der Standphase nach einem Zeithorizont der Alterungszustand mittels Modellierung oder Messung bestimmt werden. Sind die erfassten Kennparameter in dem State of health-Bereich  $\text{SOH} = 0 - 50\%$ , wird die entwickelte Sollwertanordnung an das Energiemanagement und an die Kühlungssteuerung weitergeleitet. Abbildung 4.46 und Abbildung 4.45 dienen als Referenzkennlinien, um den Alterungszustand des Zellsystems identifizieren zu können.

### 4.5.4 Auswirkungen der kalendarischen und zyklischen Alterung auf den Kapazitätsverlust

Für die Erfassung der Auswirkung eines transienten Fahrzyklus auf den **Kapazitäts- und Leistungsverlust des Zellsystems** müssen die Zeit, der Strom und der SOC-Verlauf herangezogen werden. Die Anzahl der Pulse, die Pulshöhe, die Pulsdauer und die Entladungstiefe der Zellen sind desgleichen ausschlaggebend. Zu diesem Zweck werden in der Abhandlung folgende Arbeitsschritte für die Ermittlung **der zyklischen Alterung** durchgeführt:

- Berechnung des Stromes  $I_{Zellsystem}$ , SOC-Verlaufes während eines Zyklus beziehungsweise eines Zeithorizonts
- Filterung des Stromsignals  $I_{Zellsystem}$  mit Indexierung  $I_n$  für jeden Nulldurchgang
- Für jeden detektierten Index  $I_n$  wird der maximale und minimale Strom erfasst
- Für jeden detektierten Index  $I_n$  wird die Pulshöhe und die Pulsdauer berechnet
- Für jeden detektierten Index  $I_n$  wird der maximale und der minimale SOC hinterlegt, um den  $DOD_{Zellsystem}[\%]$  über die Zeit zu ermitteln
- Umrechnung des DOD über die Nennkapazität in Ah
- Anwendung der Fittingfunktionen
- Aufkumulieren vom kalendarischen und zyklischen Kapazitätsverlust pro Tag

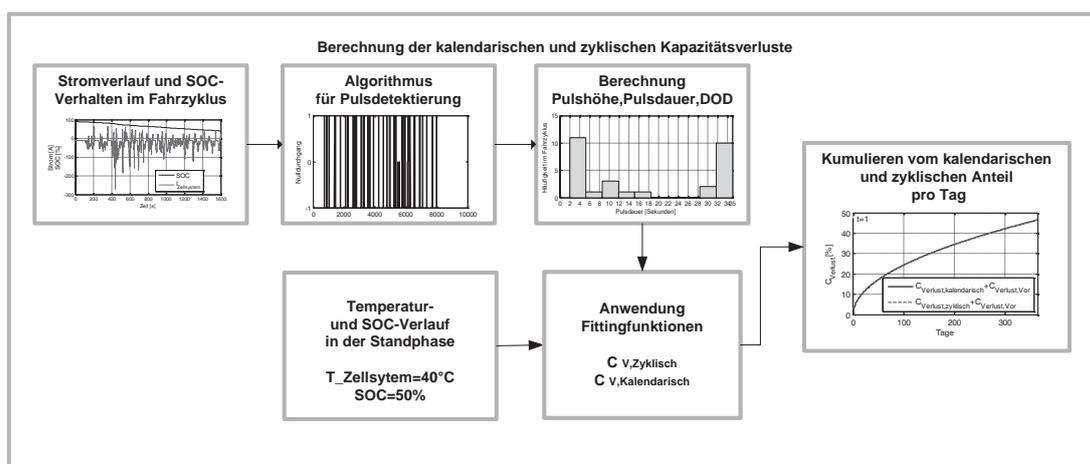


Abbildung 4.47: Angewandte Lebensdauerberechnung des Energiespeichers

Für die Erfassung der kalendarischen Alterung in den nicht aktiven Zeiten des Fahrzeuges werden folgende Größen initialisiert:

- Temperaturprofil des Zellsystems  $T_{\text{Zellsystem}}$
- $\text{SOC}_{\text{Zellsystem}}$  des Zellsystems

Ebenfalls ist die Zyklentiefe (Depth of Discharge) eine wesentliche Einflussgröße der zyklischen Alterung von Lithium-Ionen-Zellen, definiert in Gleichung 4.57.

$$\Delta \text{DoD} = \text{minDoD} - \text{maxDoD} = \text{SOC}_{\text{Max}} - \text{SOC}_{\text{Min}} \quad (4.57)$$

Um den Alterungsfortschritt zu berechnen, wird zu Beginn auf der Grundlage von Fahrzeugmessungen der Kapazitätsverlust  $C_{\text{Verlust,Zellsystem}}$  des Zellsystems unter verschiedenen Randbedingungen messtechnisch bestimmt [106]. Der gesamte Kapazitätsverlust  $C_{\text{Verlust,Zellsystem}}$  resultiert aus der Überlagerung des kalendarischen und zyklischen Kapazitätsverlustes, zusammengefasst in Gleichung 4.58.

$$\begin{aligned} C_{\text{Verlust,Zellsystem}} &= C_{\text{Verlust,kalendarisch}} + C_{\text{Verlust,zyklisch}} \\ \text{SOC} &\in [0\% \dots 100\%] \\ T_{\text{Zelle}} &\in [-20^\circ\text{C} \dots +45^\circ\text{C}] \\ \text{Pulshöhe} &\in [10\text{A} \dots +150\text{A}] \\ \text{Pulsdauer} &\in [2\text{s} \dots 35\text{s}] \end{aligned} \quad (4.58)$$

Für die kalendarische Alterung ergibt sich nach [106] [107] ein Zusammenhang der Abnahme der Kapazität von den Haupteinflussfaktoren also dem Ladezustand, der Zelltemperatur  $T_{\text{Zellsystem}}$  und der Zeit  $t_{\text{Standphase,Zellsystem}}$ . Mit Anwendung einer Fittingfunktion nach [107] ergibt sich der kalendarische Anteil in Gleichung 4.59 mit dem Alterungsfaktor  $k_{\text{kal}}$ .

$$C_{\text{Verlust,Zellsystem,kalendarisch}} = k_{\text{kal}}(\text{SOC}, T_{\text{Zellsystem}}) \cdot \sqrt{t_{\text{Standphase,Zellsystem}}} \quad (4.59)$$

Der Kapazitätsverlust aufgrund der zyklischen Alterung wird hingegen durch die Hauptfaktoren Pulshöhe, Pulsdauer, Anzahl der Pulse und Ladungstiefe des Stromprofils maßgeblich beeinflusst, definiert in Gleichung 4.60.

$$C_{\text{Verlust,Zellsystem,zyklisch}} = k_{\text{zyk}}(\text{Pulshöhe}, \text{Pulsstärke}, \text{DOD}) \cdot \sqrt{N_{\text{Puls,Zellsystem}}} \quad (4.60)$$

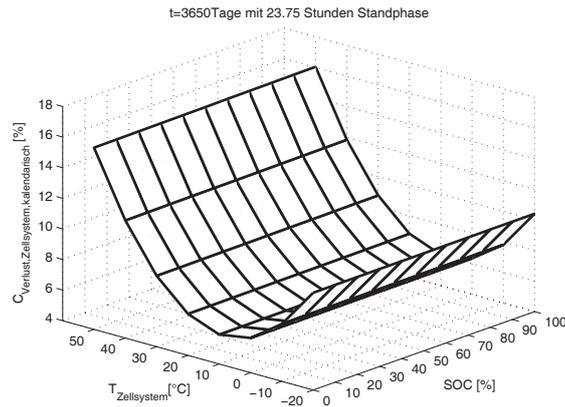


Abbildung 4.48: Berechnete kalendarische Kapazitätsverluste des Zellsystems für 3650 Tage mit der Annahme einer Standphase in Abhängigkeit von der Zelltemperatur und dem State of Charge

Abbildung 4.48 zeigt den ermittelten kalendarischen Verlust mittels Fitting-Methode. Abbildung 4.49 verbildlicht die Auswirkung der Veränderung der Zelltemperatur für den kalendarischen Alterungsfortschritt in Bezug auf den Kapazitätsverlust. Die optimale Temperatur für diese Betrachtung liegt bei  $T_{Zellsystem} = 10^{\circ}\text{C}$ . Eine Überschreitung von  $T_{Zellsystem} = 30^{\circ}\text{C}$  als auch eine Unterschreitung von  $T_{Zellsystem} = 0^{\circ}\text{C}$  wirkt sich schädlich auf die Mechanismen aus. Abbildung 4.49 zeigt, dass ein Absenken der Zelltemperatur um 10K eine Verbesserung des kalendarischen Kapazitätsverlustes um  $\Delta C_{\text{verlust,Zellsystem,kalendarisch}} = 4\%$  erzielt. Die Kurven der Betriebstemperaturen von  $T_{Zellsystem} = 40^{\circ}\text{C}$  und  $T_{Zellsystem} = 10^{\circ}\text{C}$  im Vergleich weisen eine Abweichung von  $\Delta C_{\text{verlust,Zellsystem,kalendarisch}} \geq 10\%$  nach. Dieser Zusammenhang bestätigt die verdeutlichten Auswirkungen im Nieder- als auch Hochtemperaturverhalten, beschrieben in Abschnitt 2.5.

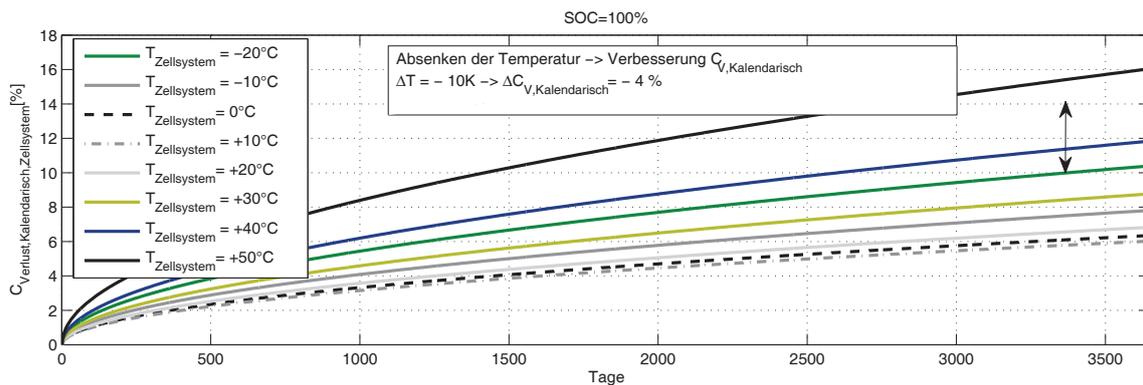


Abbildung 4.49: Kalendarischer Kapazitätsverlust des Zellsystems für zehn Jahre unter Annahme einer Standphase 23.75h und dem SOC = 100 Prozent

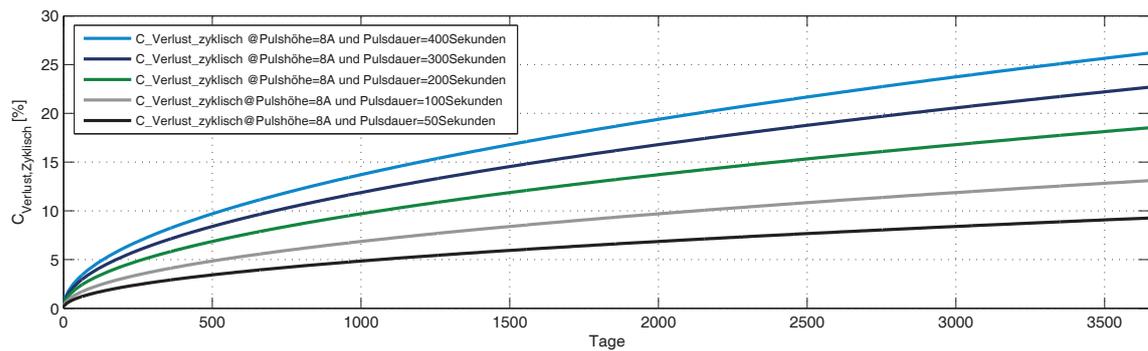


Abbildung 4.50: Auswirkung der Pulsdauer auf den zyklischen Kapazitätsverlust für zehn Jahre

Abbildung 4.50 verdeutlicht die Auswirkung der Pulsdauer auf den zyklischen Anteil. Die resultierenden kalendarischen und zyklischen Verluste pro Tag werden miteinander kumuliert, verdeutlicht in Abbildung 4.51. Wesentlich ist die Berücksichtigung der Vorschädigung zu den Berechnungszeitpunkten. Abbildung 4.51 verbildlicht, anhand eines Fallbeispiels, die Kapazitätsverläufe für den Zeitraum von zehn Jahren. Die Berechnung setzt sich aus einer Standphase und einer Betriebsphase mit einer konstanten Belastung des Energiespeichers zusammen.

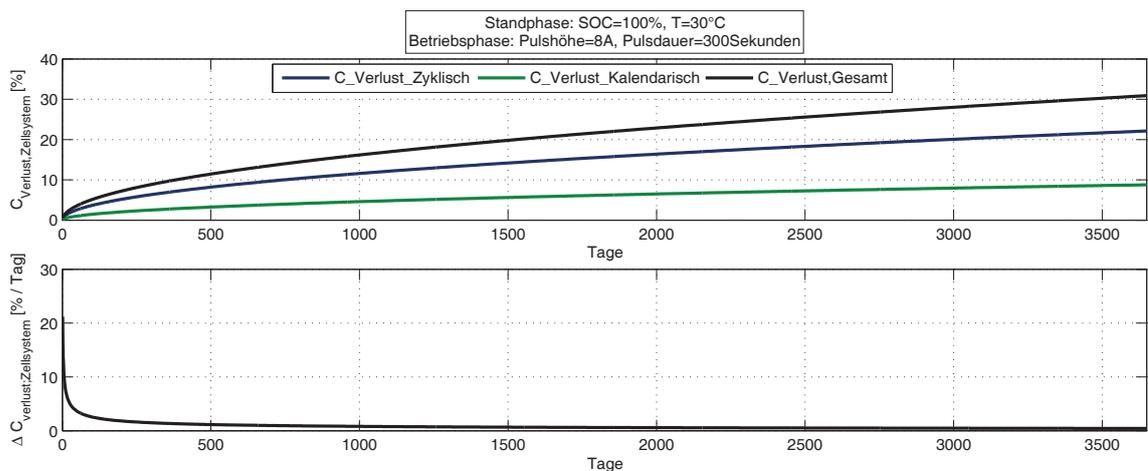


Abbildung 4.51: Berechnete Kapazitätsverluste  $C_{\text{Verlust,Zellsystem}}$  des Zellsystems für zehn Jahre mit der Annahme einer Konstantfahrt pro Tag von 300 Sekunden und einer Standphase  $t = 23.9\text{h}$ ,  $T_{\text{Zellsystem}} = 30^\circ\text{C}$ ,  $\text{SOC} = 100\%$

Die Steigung des Kapazitätsverlustes ist im ersten Jahr am gravierendsten. Eine Neugenerierung der Sollwertkurve ist deshalb erforderlich. Abbildung 4.52 zeigt die zu Grunde gelegte Sollwertkurve unter Berücksichtigung des Kurvenverhaltens analog der Wurzelfunktion. Die Sollkurve wird überschritten. Wesentlich ist die Berücksichtigung der Vorschädigung zu den Berechnungszeitpunkten.

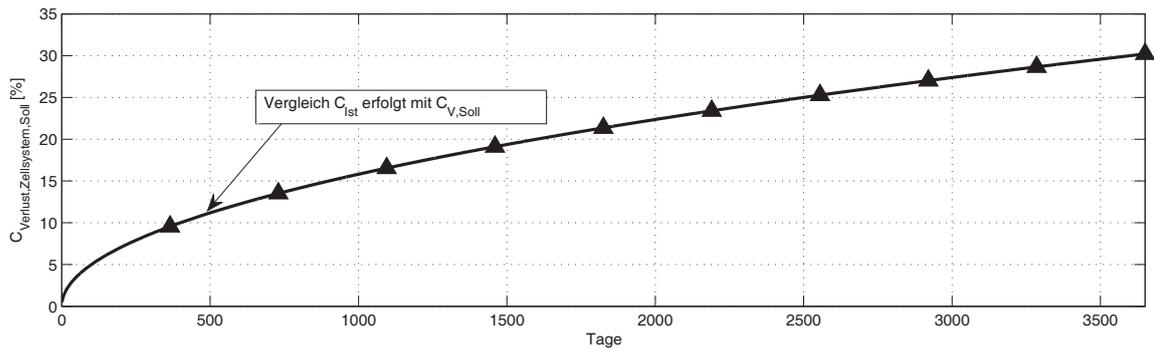


Abbildung 4.52: Generierte Sollwertkurve des Kapazitätsverlustes

## 4.6 Modellierung eines Gleichspannungswandlers und des Niedervoltbordnetzes

Die Niedervoltgrundlast wird als zusätzlicher elektrischer Verbrauch aus der Hochvoltbatterie hinterlegt. So wird je nach Lade- oder Fahrzustand eine fixe Grundlast angenommen. Die Wärmeverluste des Gleichspannungswandlers in den unterschiedlichen thermischen Umgebungsbedingungen werden auf Grundlage von Prüfstandsmessungen in einem Look-up-Table hinterlegt. Den Strömen und den Spannungen auf Hoch- und Niedervoltseite werden in verschiedenen thermischen Zuständen die Verluste zugeordnet. Mit Hilfe der linearen Interpolation lassen sich die Verluste von  $-20^{\circ}\text{C}$  bis  $+40^{\circ}\text{C}$  abbilden. Die Zwischenwerte werden mit Hilfe einer linearen Funktion gebildet.

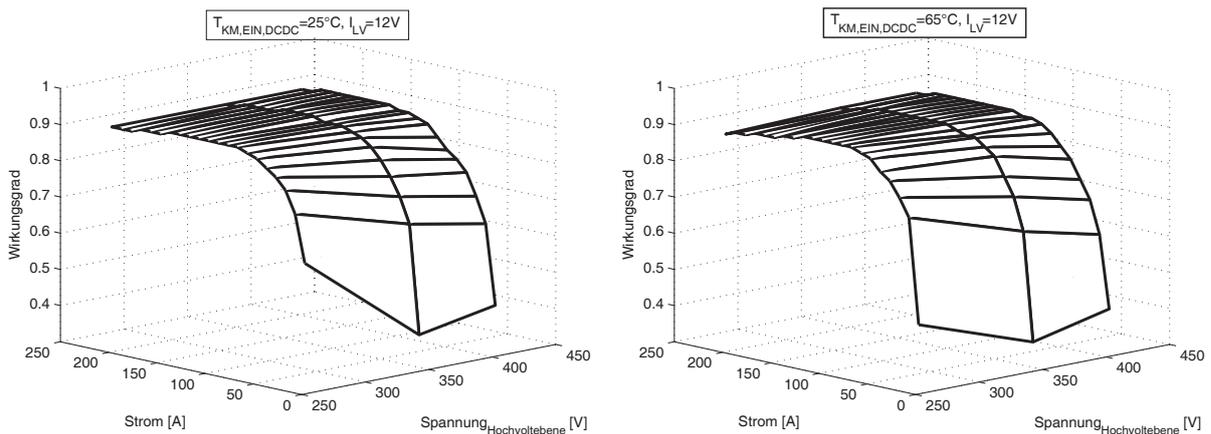


Abbildung 4.53: Resultierende Wirkungsgrade des Gleichspannungswandlers aufgrund der Verluste  $P_{V,DCDC}$  mit  $T_{KM,EIN,DCDC} = -20^{\circ}\text{C}$  bis  $+40^{\circ}\text{C}$  und die Kühsituation @  $\dot{V} = 2\text{l/min}$  in den Zuständen Begin of life und End of life

### 4.7 Modellierung eines Ladegeräts

Das Ladegerät wird ebenfalls mit Hilfe eines Cauer- und Foster-Netzwerkes der Materialien entwickelt. Abbildung 4.54 zeigt die angewandte Methodik.

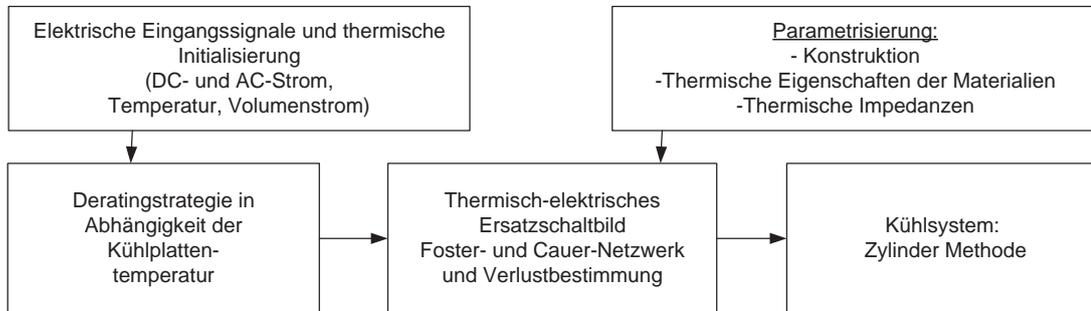


Abbildung 4.54: Schema der Modellierung des Ladegeräts

Mittels messtechnischer Untersuchungen werden die RC-Elemente erfolgreich parametrisiert.

$$Z_{th,Lader}(t) = \frac{T_{Mean} - T(t)}{P_{V,Lader}} \iff Z_{th,Lader} = \sum_n^1 R_i(1 - e^{-\frac{t}{R_i \cdot C_i}}) \tag{4.61}$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{C_{TH}} \left( P(t)_{V,Lader} - \frac{T}{R_{TH}} \right) \tag{4.62}$$

Das Gesetz von Newton wird angewandt für die Abbildung der Kühlleistung. Dieses Modell berechnet seine Kühlsituation mit der vereinfachten Annahme eines zylinderförmigen Kühlsystems.

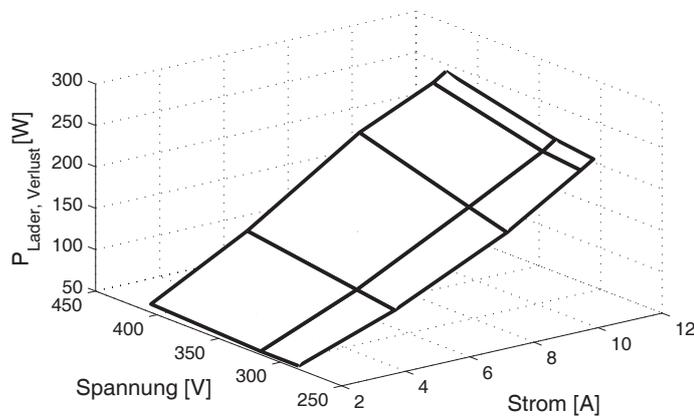


Abbildung 4.55: Resultierende Verluste im Ladegerät

## 4.8 Wertebereiche und Einschränkungen

Die Modellierung bildet für die Anwendung der thermischen Maßnahmen eine wesentliche Berechnungsgrundlage und dient als Nachweis der Auswirkungen auf die Komponenten. Aufgrund der Wichtigkeit der Nachweise wird in Kapitel 6 die Güte gegenüber realen Fahrzeugmessungen überprüft. Die zulässigen Limitierungen und die zu Grunde gelegte Spezifikation der Teilmodelle werden nachfolgend aufgezeigt. Diese dürfen in der Modellierung nicht überschritten werden und müssen in allen Fahrsituationen eingehalten werden.

Die einzelnen Wertebereiche und Einschränkungen der Submodelle werden in dem Hochvolt-system zusammengefasst und für jedes Teilmodell definiert. Das Aufzeigen der Bereiche dient der richtigen Anwendung der Submodelle in der Fahrzeugumgebung. Eine falsche Initialisierung und Nutzung des Hochvolt-systemmodells muss vermieden werden.

Die Verlust- und Wärmemodellierung von Rotor und Stator erfolgt in den Wertebereichen der Synchronmaschine mit folgenden Größen.

Tabelle 4.5: Wertebereiche der Modellierung der elektrischen Maschine

Systemgröße	Wertebereich
Drehzahl <sub>Ein</sub> [1/min]	0...6000
Drehmoment <sub>Ein</sub> [Nm]	-375...375
Druck <sub>KM, Ein, Rotor</sub> [Bar]	0...15000
Druck <sub>KM, Ein, Stator</sub> [Bar]	0...15000

Das Submodell der Leistungselektronik arbeitet mit effektiven Größen des Phasenstroms. Die zeitlichen Verläufe des Phasenstroms, die bei der Messung mit aufgezeichnet werden, können nicht direkt zum Abgleich verwendet werden.

Tabelle 4.6: Wertebereiche des Leistungselektronikmodells

Systemgröße	Wertebereich
Phasenstrom <sub>Ein</sub> [A]	0...450
Zwischenkreisspannung <sub>Ein</sub> [V]	90...450
Kühlwassertemperatur <sub>Ein</sub> [°C]	-30...105
Leistungsfaktor <sub>Ein</sub> [1]	-1...1

Es findet in der Modellierung eine Zuordnung des Phasenstroms und des Leistungsfaktors in Abhängigkeit von Drehmoment und Drehzahl der Synchronmaschine statt. Aktuell läuft diese mit einer Abtastrate von  $t=0,01s$ . Nach Umstellung auf eine Abtastrate von  $t=0,02s$  kann

das Modell in die Umgebung eingebunden werden. Die thermisch-physikalische Stromregelung, das Zellsystem, das Batteriemangement und die Kapazitätsverlustbestimmung sind für folgende Grenzen konzipiert.

Tabelle 4.7: Wertebereiche des Batteriemodells

<b>Systemgröße</b>	<b>Wertebereich</b>
State of Charge <sub>Ein</sub> [%]	5...100
Zelltemperatur <sub>Ein</sub> [°C]	-25...65
Batteriestrom <sub>Ein</sub> [A]	-325...150
Zellspannung <sub>Ein</sub> [V]	2...3,6

Der Vergleich mit elektrischen Zuständen ergibt, dass die gemessenen Werte der Zyklen in simulierbaren Grenzbereichen der Subsysteme liegen. Die Look-up-Tables des Gleichspannungswandlers decken folgende Wertebereiche ab.

Tabelle 4.8: Wertebereiche des Verlustkennfeldes des Gleichspannungswandlers

<b>Systemgröße</b>	<b>Wertebereich</b>
Niedervoltstrom <sub>Ein</sub> [A]	10...210
Hochvoltspannung <sub>Ein</sub> [V]	260...410
Bauteiltemperatur <sub>Ein</sub> [°C]	-30...65

Das Ersatzschaltbild des Ladegeräts wurde mit Hilfe von Messungen für die aufgeführten Wertebereiche entworfen.

Tabelle 4.9: Wertebereiche der Modellierung des Ladegeräts

<b>Systemgröße</b>	<b>Wertebereich</b>
Strom <sub>Aus</sub> [A]	2...11
Spannung <sub>Aus</sub> [V]	285...410

Zwischen simulierter und real gemessener Größe können Abweichungen aufgrund von Parametrierungen und Messeinstellungen resultieren. Infolge von Messunsicherheiten am Versuchsträger können in der Simulation gewisse Abweichungen erwartet werden. In den folgenden Arbeitsschritten sollen entstandene kritische Abweichungen erkannt und verbessert werden.

## 5 Entwurf und Aufbau eines Versuchsträgers

Die Erkenntnisse aus dem aktuellen Stand der Technik und die Modellierungsergebnisse werden nachstehend mit realen Messungen in einem Versuchsträger verifiziert. Der Zusammenhang zwischen den Wärmeeinträgen, den thermischen Randbedingungen und den Alterungsmechanismen in den Bauteilen, behandelt in Kapitel 4, wird in diesem Abschnitt mit realen Fahrzeugmessungen detailliert überprüft. Die Wärmeverluste und der Wärmefluss von den Wärmequellen zu den Wärmesenken werden vermessen. Elektrische Signale in der Hochvoltsystemebene werden über die Datenbussysteme und ausgewählte Steuergeräte aufgezeichnet und dokumentiert. Die gemessenen Größen schaffen die Voraussetzung für eine ausführliche Überprüfung der Signalgüte des elektrischen Systemverhaltens in der Simulation. In gleichem Maße zu den thermischen Ersatzschaltbildern werden an den Wärmequellen und den Wärmesenken der Hochvoltkomponenten spezifizierte Sensoren angebracht. Der Zweck und die Platzierung dieser Messaufnehmer wird zu Beginn in Abschnitt 5.1 beschrieben. Die resultierenden Systemausgangssignale zeigen die Genauigkeit und die Anwendbarkeit der thermisch-elektrischen Ersatzschaltbilder in Anbetracht der beabsichtigten Maßnahmen. Der thermische Einfluss der Umgebungsluft beziehungsweise der Radiation wird zudem erfasst und der Einfluss auf die Zielsetzungen verdeutlicht.

### 5.1 Anforderungen und Zweck der thermisch-elektrischen Messtechnik

Grundlegend wird das thermisch-elektrische Verhalten der Hochvoltkomponenten in direkter Fahrzeugumgebung identifiziert. Die Sensoren werden an den Bauteilen, in den Kühlsystemen und in der direkten Umgebung (Luft oder Getriebe) zur Überwachung und Aufzeichnung platziert. Abbildung 5.3 verdeutlicht die Integration der Leistungselektronik im Vorbau und das Getriebe mit den integrierten Messstellen für den elektrischen Motor. Eine Integration von Luftsensoren unter anderem im Motorraum, im Kofferraum, an der Oberfläche der Getriebeglocke, am Leistungselektronikgehäuse und am Hochvoltkabelsatz erfolgt und wird im Nachfolgenden beschrieben. Die Fragestellung, inwiefern eine Wärmebeeinflussung durch die Umgebungsluft auf die Wärmequellen erfolgt, kann mittels der Luftsensorik untersucht werden. Desgleichen wird im Getriebe der Wärmeaustausch zwischen dem Getriebeöl und den Wärmequellen der elektrischen Maschine analysiert.

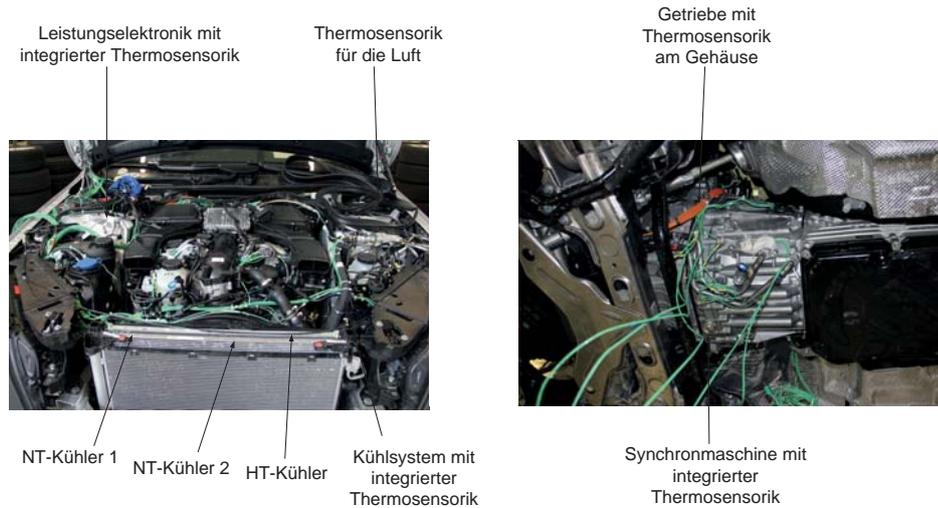


Abbildung 5.1: Einbau der Temperatursensorik im Motorraum und im Getriebe

Die Temperaturdifferenzen in den Leistungsmodulen und die Erwärmung der Motorraumluft aufgrund der Motorabwärme im Vergleich zu der Außenlufttemperatur zeigt exemplarisch Abbildung 5.2. Insbesondere die Kühlwassertemperatur konditioniert die Kühlplatte und die Substrate. Die Materialien nahe der Leistungshalbleiter werden durch die Schalt- und Durchlassverluste thermisch beansprucht. In den Aufbauten entstehen hohe Temperaturspreizungen  $\Delta T=12\text{K}$  zwischen den einzelnen Materialschichten. Die thermischen Haupt Einflussfaktoren sind zum einen die resultierenden Wärmeverluste und zum anderen die Kühlwassertemperatur. Die Radiation an die Umgebungsluft ist hingegen gering und vernachlässigbar. Die Kühlwassertemperatur bietet sich folglich als Stellgröße an, um eine thermische Beanspruchung der IGBTs und Dioden zu beeinflussen.

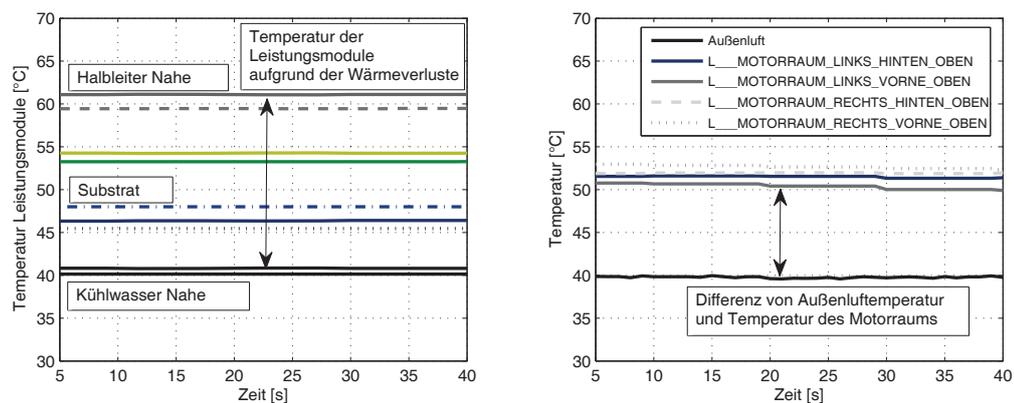


Abbildung 5.2: Wechselwirkung zwischen Luft  $T_{\text{Luft,Start}} = 40^{\circ}\text{C}$  und der  $T_{\text{KM,EIN,LE}} = 40^{\circ}\text{C}$

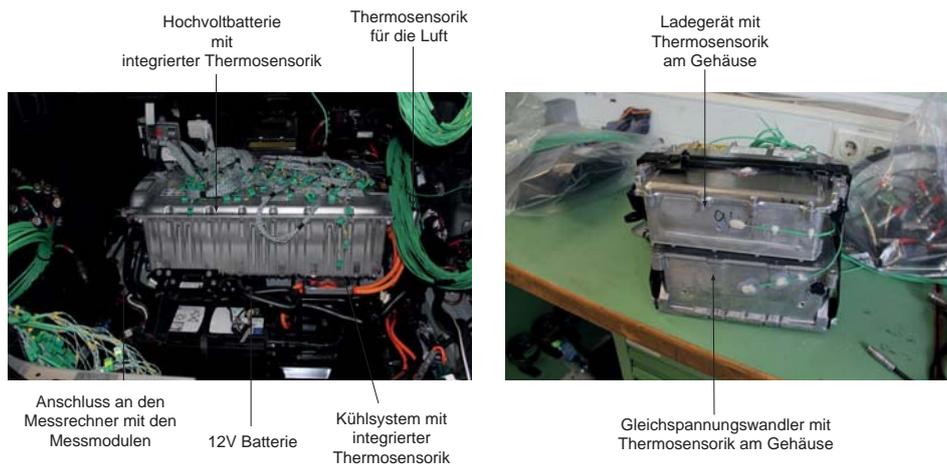


Abbildung 5.3: Einbau der Temperatursensoren im Kofferraum und Umgebung

Den Verbauort der Batterie, des Gleichspannungswandlers und des Ladegeräts im Kofferraum demonstriert Abbildung 5.3. Abbildung 5.4 veranschaulicht die Temperaturspreizung in der Batterie sowie die Wärmeübertragung von der Außenluft zur Kofferraumluft. Es wird ersichtlich, dass die Zelltemperatur  $T_{\text{Zellsystem}}$  nicht von der Umgebungs- oder Kofferraumtemperatur wesentlich beeinflusst wird. Die Zelltemperatur wird maßgebend durch die Wärmeverluste und die Konvektion der Wärme in das Kühlwasser bestimmt. Dieser Sachverhalt verdeutlicht, dass die Vernachlässigung der Radiationseffekte in der Modellierung keine negative Auswirkung auf die Temperatur des Zellsystems bedeutet. Letztendlich wird das Leistungsverhalten der Batterie nicht durch diese Effekte geprägt.

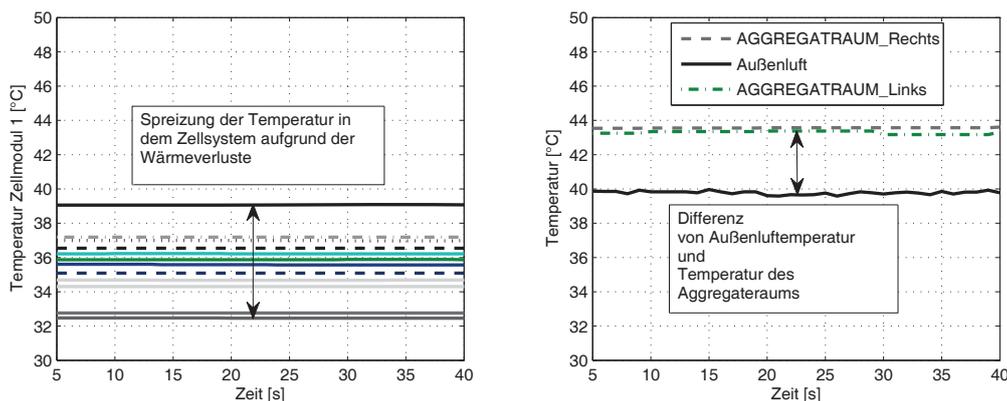


Abbildung 5.4: Wechselwirkung zwischen Luft  $T_{\text{Luft,Start}} = 40^{\circ}\text{C}$  und dem Zellsystem  $T_{\text{Zellsystem,Start}} = 30^{\circ}\text{C}$



## 5.2 Thermische Sensorik für die Bestimmung der Stellgrößen und Validierung der Modellierung

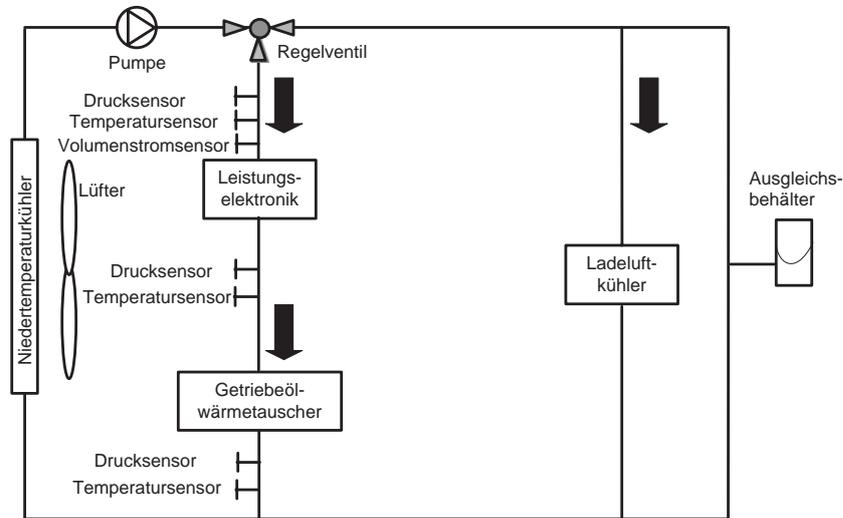


Abbildung 5.5: Thermische Sensorik in dem ersten Niedertemperaturkreislauf

Im Vorlauf und dem Nachlauf des Kühlwassers jeder Komponente wird ein Temperatur- und Volumenstrommesser installiert. Für die Batterie und die Leistungselektronik können folglich die Kühlwassersituationen messtechnisch bestimmt werden. Die Wärmeflüsse, -leitungen und -übergänge in die Materialien der Komponenten und der Kühlmedien werden mit diesem Aufbau vermessen. Für die Umsetzung der neuen Konzeption ist es sinnvoll, das thermische Verhalten des Kühlsystems im Vor- und Rücklauf der jeweiligen Komponente in der realen Fahrzeugumgebung zu identifizieren. Der erste Niedertemperaturkühlkreislauf in Abbildung 5.5 wurde aus dem konventionellen Antriebsstrang übernommen und in die Leistungselektronik integriert.

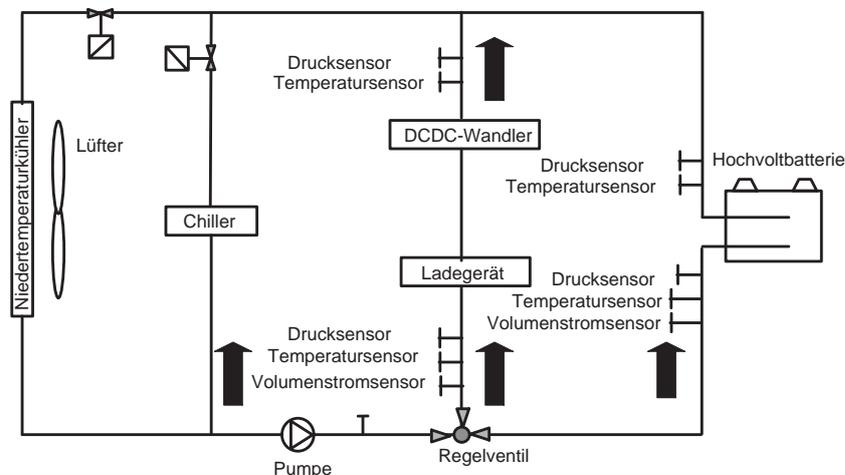


Abbildung 5.6: Thermische Sensorik in dem zweiten Niedertemperaturkreislauf



Dieser hat die Funktion, die Ladeluft und das Getriebeöl über den Getriebeölwärmetauscher zu kühlen. Des Weiteren ist in diesem Kreis die Leistungselektronik in dem Versuchsträger integriert. In einem zusätzlichen Niedertemperaturkreislauf ist die Batterie integriert, dargestellt in Abbildung 5.6. Aufgrund der thermischen Anforderungen benötigt die Batterie einen zweiten separaten Kühlkreislauf. Dieser zweite Kühlkreislauf ist zudem über den Chiller mit dem Klimatisierungskreislauf gekoppelt. Bei nicht ausreichender Kühlung kann der Chiller das Kühlwasser aktiv abkühlen. Parallel dazu werden in diesem Kühlkreislauf der Gleichspannungswandler und das Ladegerät gekühlt.

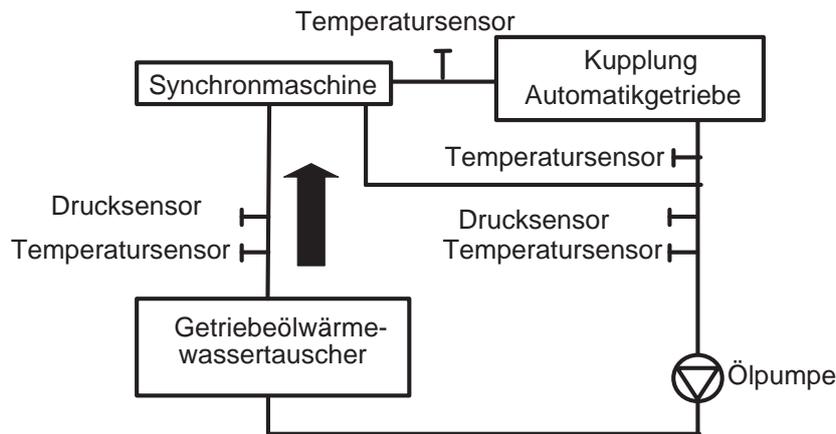


Abbildung 5.7: Thermische Sensorik in dem Getriebeölkreislauf

In dem Getriebekühlkreislauf werden am Eingang der Getriebeglocke und der Anfahrkupplung Volumenstrom und Temperatursensoren zusätzlich verbaut, dargestellt in Abbildung 5.7. Dies ermöglicht eine Differenzierung von den Wärmeeinträgen des Getriebes, der Kupplung und der Synchronmaschine.

### 5.2.1 Bestimmung der thermischen Widerstände und der Wärmeübergänge in dem Stator

Für die Untersuchungen und die Validierung der transienten Modellierung der permanent erregten Synchronmaschine werden an einem Stator definierte Thermolemente installiert. Insbesondere die Wärmeentstehung in den Wicklungen und die Wärmeabfuhr in das Getriebeöl können nur im Rahmen von experimentellen Analysen in realer Fahrzeugumgebung erfasst werden [108]. Die Ausstattung der empfindlichen Magneten entfiel im Rahmen dieser Arbeit aufgrund der schwierigen Integration der Infrarotsensoren zur Messung der Rotortemperaturen in dem Getriebegehäuse.

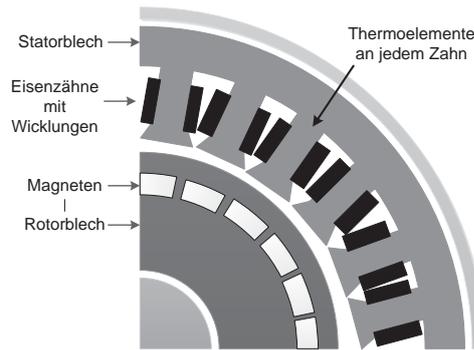


Abbildung 5.8: Integrierte Thermoelemente im Statorpaket zur Erfassung der Ohmschen Verluste

Die Temperaturen in den Magneten und dem Rotorblech werden simulativ bestimmt. Die Thermosensoren sind an dem Statorblech installiert, in den Eisenzähnen und zwischen den Kupferwicklungen sowie an den Phasenkontaktierungen. Der Messstator, abgebildet in Abbildung 5.8, wird in die Synchronmaschine des Versuchsträgers eingebaut.

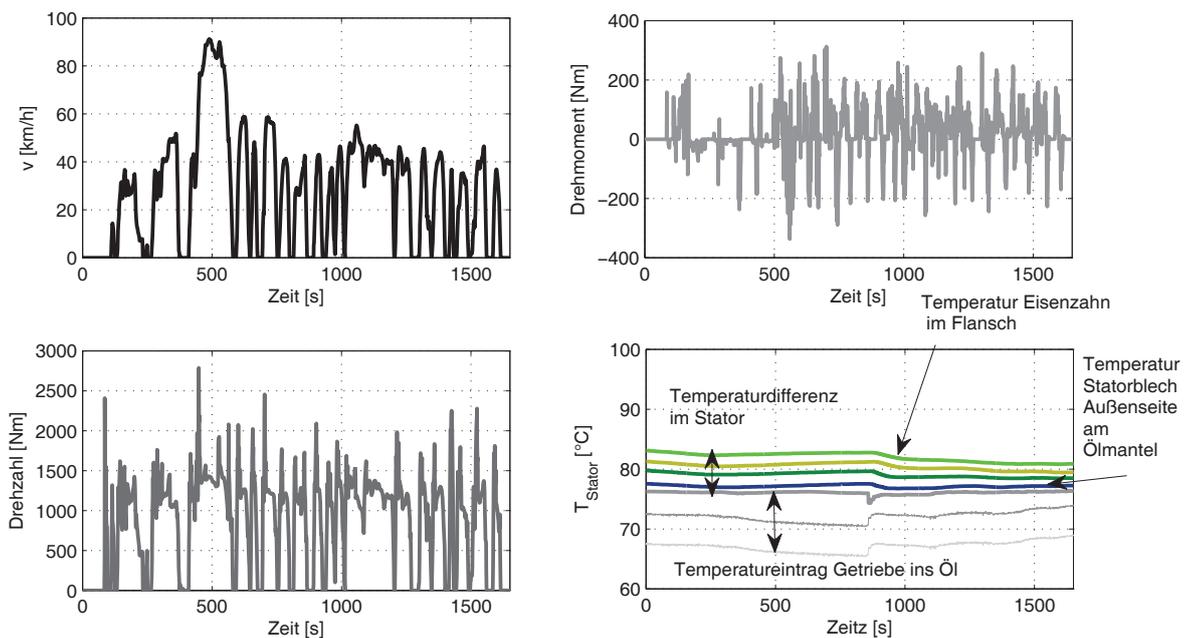


Abbildung 5.9: Gemessene Temperaturverteilung im Statorpaket der elektrischen Maschine im UDDS



Die Messung der Wärmeleitung in dem Statorblech im Zyklus UDDS dokumentiert Abbildung 5.9. Mit Hilfe der Messstellen im Getriebeöl wird deutlich, dass die Kühlsituation und die Statortemperaturen hauptsächlich durch die Getriebeverluste dominiert werden.

## 5.2.2 Bestimmung der thermischen Widerstände und der Wärmeübergänge in den Halbleiterbrücken

Für die Untersuchungen der mittleren Temperaturen und Temperaturamplituden der Halbleiter wird die Halbleiterschaltung mit den vorgesehenen Thermoelementen nahe der wesentlichen Wärmequellen und -senken aufgebaut. Die Thermosensoren werden, in Anlehnung des Leistungselektronikmodells, auf der Platine, in der Luft innerhalb des Gehäuses und an den Welding Points nahe der Leistungsmodule montiert.

Diese Installation in Abbildung 5.10 ermöglicht die detaillierte Messung der Wärmeübergänge in dem Aufbau. Um den elektrischen Leistungsfluss instationär zu messen, werden die Zwischenkreisspannung  $U_{DC}$ , der Eingangsstrom  $I_{DC}$  und der Phasenstrom  $I_{AC}$  über den CAN Bus mit aufgezeichnet. Die gemessene Temperaturverteilung in Abbildung 5.11 verbildlicht die Temperaturspreizung zwischen dem Kühlwasser, den Temperaturen nahe den Halbleitern und der Motorraumluft.

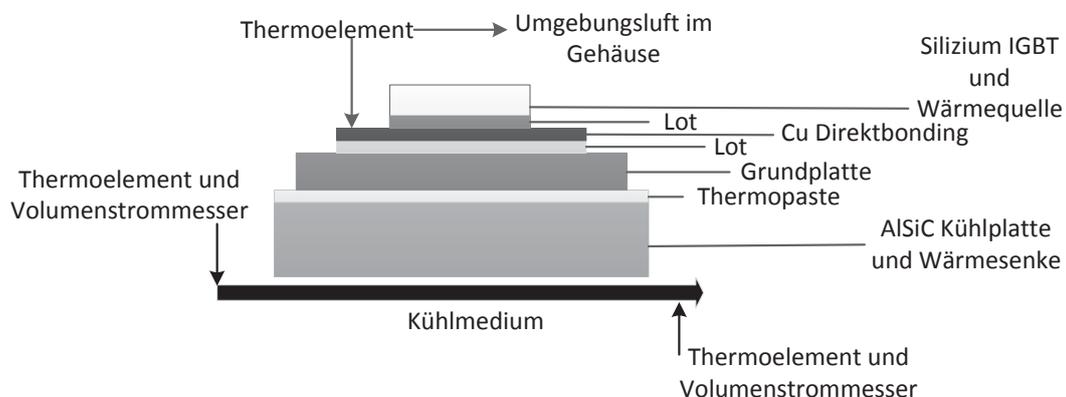


Abbildung 5.10: Integrierte Thermoelemente an den Leistungsmodulen zur Bestimmung der mittleren Temperaturen und Temperaturgradienten  $\Delta T$  des Lotes

Die Temperaturen auf der Platine zeigen im Gegensatz zu den Sperrschichttemperaturen keine Temperaturamplituden auf. Die simulierte mittlere Sperrschichttemperatur stimmt hingegen mit diesem Ergebnis überein.

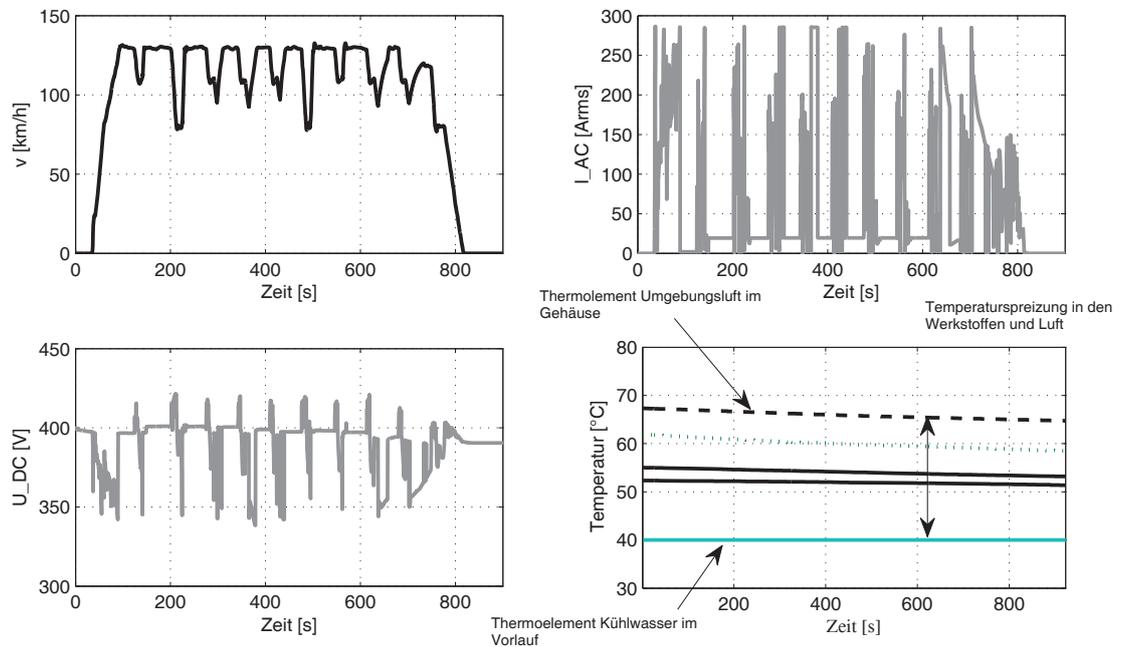


Abbildung 5.11: Gemessene Temperaturverteilung der Umgebung der Leistungsmodule mit der Kühlsituation @  $\dot{V} = 6\text{l/min}$  und  $T_{\text{KM,Ein,LE}} = 40^\circ\text{C}$

### 5.2.3 Bestimmung der thermischen Widerstände und der Wärmeübergänge in dem Zellsystem

Auftretende Temperaturschwankungen in den Zellmodulen und in der Zelle sind, wie in Abschnitt 2.5 beschrieben, zu vermeiden. Für den Erhalt eines umfassenden Überblicks, werden verschiedene definierte Thermosensoren in der Messstellenbatterie an unterschiedlichen Bereichen der Zelle angebracht, siehe Abbildung 5.12. Mit Hilfe der Datenbusse werden unter anderem eine weitere Batterietemperatur, die Kühlmediumtemperatur, der Volumenstrom des Kühlmediums, die Zellspannung, die Systemspannung und der Batteriestrom gemessen.

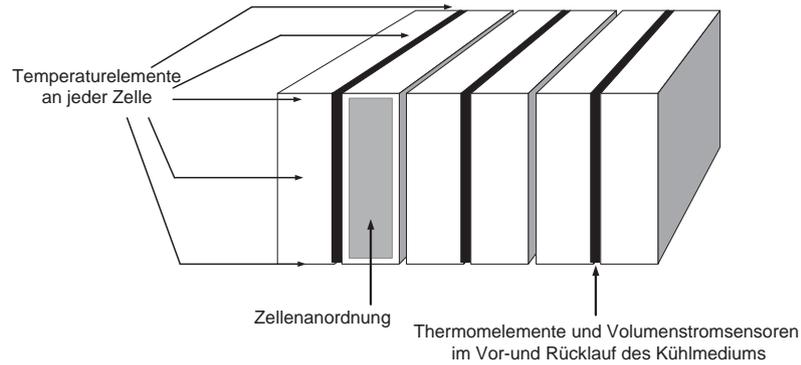


Abbildung 5.12: Thermische Sensorik in der Batterie

Abbildung 5.13 zeigt diese gemessenen Werte exemplarisch im Fahrzyklus ADAC BAB zusammen. In weiteren Lastzyklen werden nachstehend die Wärmeverluste, die Temperaturen und die Wärmeübergänge untersucht und aufgezeigt. Insbesondere in Zyklen mit hoher elektrischer Leistung und konstanter elektrischer Beanspruchung wird erwartet, dass die Temperaturen und die Temperaturgradienten in den Materialien kritisch sind. Mit Hilfe der Nenndaten und der gemessenen Signale kann der Zustand des Zellsystems erfasst werden. Jede Zelle ist an ein Zellüberwachungsmodul angeschlossen, um die Zellspannung zu erfassen. Die Temperaturüberwachung auf Zellebene erfolgt mit Hilfe einer Thermosensorik.

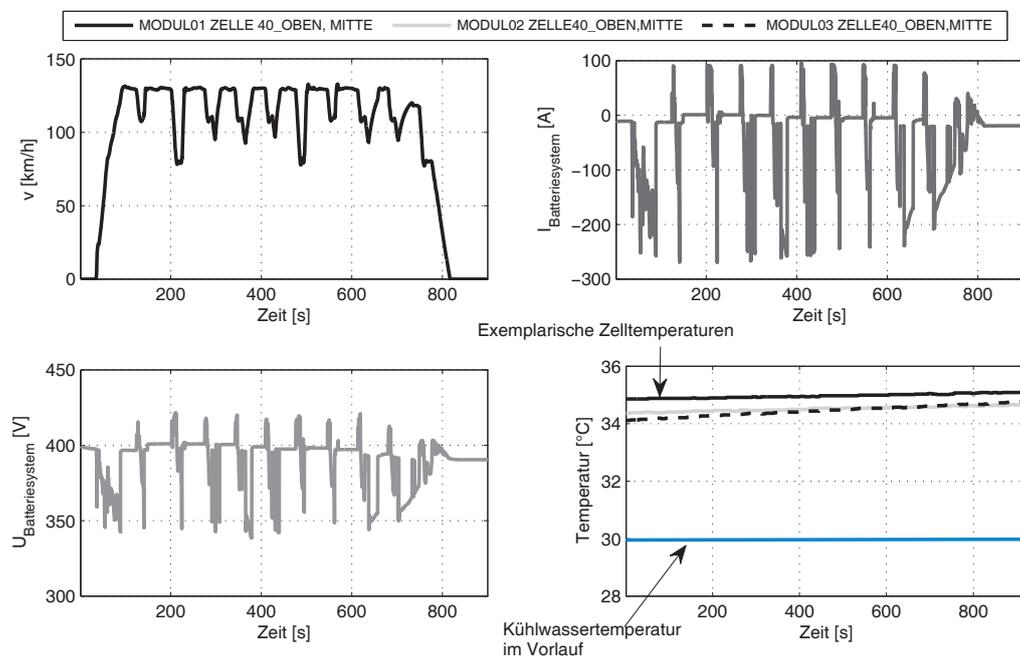


Abbildung 5.13: Gemessene Temperaturverteilung in den Zellmodulen mit  $T_{\text{Bat,Start}} = +30^{\circ}\text{C}$  und der Kühlsituation @  $\dot{V} = 2\text{l/min}$

## **6 Validierung der Modellierung und Analyse der ausgewählten Betriebszustände**

Die umfangreichen Messungen und Simulationen sind für eine optimale thermische Auslegung und Integration in frühen Entwicklungsphasen des Hochvoltsystems äußerst hilfreich. In Kapitel 4 wird, wie bereits erörtert, eine Modellierung des Hochvoltsystems entworfen im Hinblick auf die thermischen Belastungen und die Zuverlässigkeit der empfindlichen Bauteile. In Kapitel 5 wird der Aufbau eines Versuchsträgers beschrieben und die Messtechnik eingehend begründet.

In diesem Kapitel wird infolgedessen das aufgebaute Fahrzeugmodell mit Hilfe von Messungen des Versuchsträgers auf seine Güte untersucht. Damit die Maßnahmen realitätsgetreu mit hoher Qualität modelliert werden können, ist nun nach Aufbau des Versuchsträgers und der Simulationsumgebung eine Bewertung der Ein- und Ausgangssignale der Subsysteme wesentlich. Die Auswirkungen der Subsysteme auf die Qualität des Gesamtergebnisses werden zu diesem Zweck folgend eingehend nachgewiesen.

Für die Umsetzung der beabsichtigten Ziele werden in Abschnitt 3.4 experimentelle Bedingungen definiert und Fahrzyklen ausgewählt. Verschiedene Variationen der thermisch-elektrischen Zustände und eine abschließende Lebensdauerbewertung jeder Komponente in unterschiedlichen Lastfällen werden zudem aufgezeigt. Die energetischen Flüsse, die Wärmeverluste und die resultierenden Wärmeströme in den Materialien werden mit Hilfe der sorgfältig aufgenommenen Messungen validiert und analysiert.

### **6.1 Bewertung der Systemmodellierung und der Einfluss auf die Signalgenauigkeit**

Die durchzuführende Validierung dient zur generellen Überprüfung der Modelle, ob diese zur Lösungsfindung der thermischen Algorithmen geeignet sind. In diesem Abschnitt werden die Empfindlichkeiten der Ausgangssignale der Teilmodelle auf die thermisch-elektrischen Zustände am Eingang jeder der Komponenten in einem exemplarischen Fahrbereich verdeutlicht. Der Fokus der Validierung liegt nachstehend auf den wesentlichen Größen der Betriebsstrategie, sowie der Lebensdauerberechnung der Batterie und der Leistungselektronik.



### 6.1.1 Validierung der Betriebsstrategie

Der neue europäische Fahrzyklus wird für die Validierung angewandt, da er eine durchschnittliche Belastung darstellt und als Verbrauchszyklus etabliert ist. Zusätzlich absolviert der Versuchsträger diesen Zyklus rein elektrisch. Mit Hilfe des exemplarischen NEFZ kann die Betriebsstrategie (Gangwahl, Zuschaltpunkte der elektrischen Maschine und des Verbrennungsmotors) erfolgreich implementiert werden.

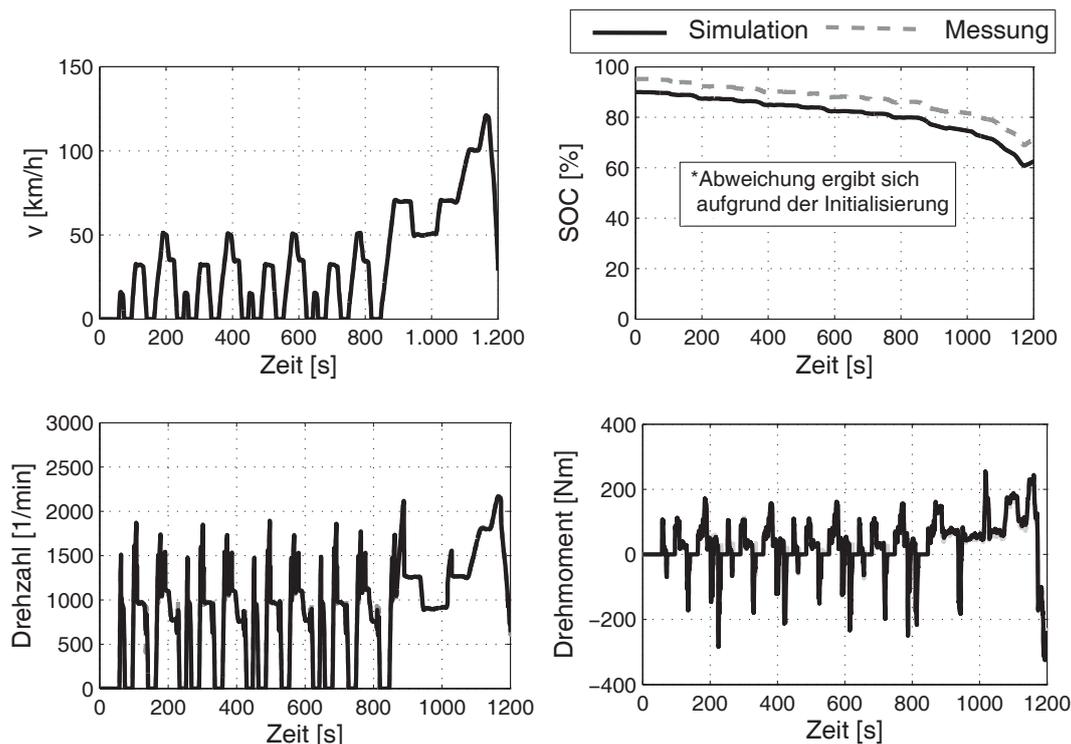


Abbildung 6.1: Berechnete und gemessene Signale des Pedalwertgebers und der elektrischen Maschine in der thermischen Vorkonditionierung  $T_{\text{System,Start}} = +40^{\circ}\text{C}$  und  $\text{SOC}_{\text{Start}} = 90\%$  im NEFZ nach der Validierung

Der NEFZ wird bis zu einem  $\text{SOC}_{\text{Start}} = 20\%$  rein elektrisch gefahren. Nach Abgleich der Verläufe der Ausgangsgrößen des elektrischen Motors ist eine Abweichung des simulierten Drehmoments zu dem gemessenen Drehmoment zu erkennen. Mit Hilfe der Messungen und der Simulationsergebnisse werden die Gangwahl des Getriebes, das Schaltkennfeld des Verbrennungsmotors M276, das Schaltkennfeld des Synchronmotors und die Grundlasten des Niederspannungsnetzes erneuert und entsprechend in der Simulation dem Referenzträger angepasst. Nach Abarbeitung dieser Implementierungen bildet die Modellierung die Betriebsstrategie des Versuchsträgers zielgenau ab, verbildlicht in Abbildung 6.1.

### 6.1.2 Validierung der wesentlichen Hochvoltkomponenten

Abbildung 6.2 verdeutlicht, dass anhand der exakten Validierung der Betriebsstrategie und der richtigen thermischen Initialisierung des Batteriemodells die Signalverläufe und die Messgrößen übereinstimmen. Für die Kapazitätserfassung müssen die Ausgangssignale Strom, SOC und Temperatur des Batteriemodells korrekt berechnet werden.

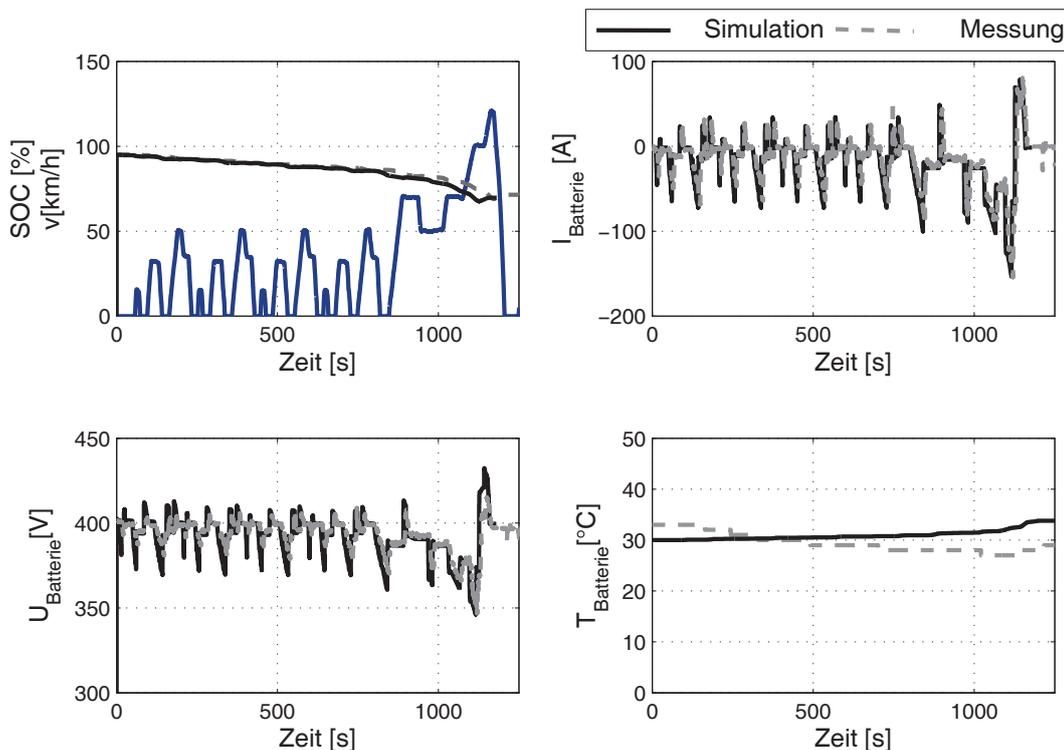


Abbildung 6.2: Signale der Batterie in der thermischen Vorkonditionierung  $T_{\text{System,Start}} = +40^{\circ}\text{C}$  und  $\text{SOC}_{\text{Start}} = 90\%$  im NEFZ vor der Validierung

Desgleichen ist der Verlauf von Phasenstrom und Halbleitertemperaturen in der Modellierung ausschlaggebend für das richtige Eingreifen der Maßnahmen. Der Phasenstrom ist nach Abbildung 6.3 gut abgeglichen. Die simulierten Sperrschichttemperaturen nähern sich den gemessenen Temperaturen in den Sensoren nahe der Halbleiter an. Die Validierung anhand der Fahrzeugmessungen zeigt in dem NEFZ, dass eine ausreichende Signalgenauigkeit für die betrachteten Komponenten erreicht wird. Die thermischen Maßnahmen basieren auf den richtigen Alterungsbestimmungen der Halbleiter und des Zellsystems.

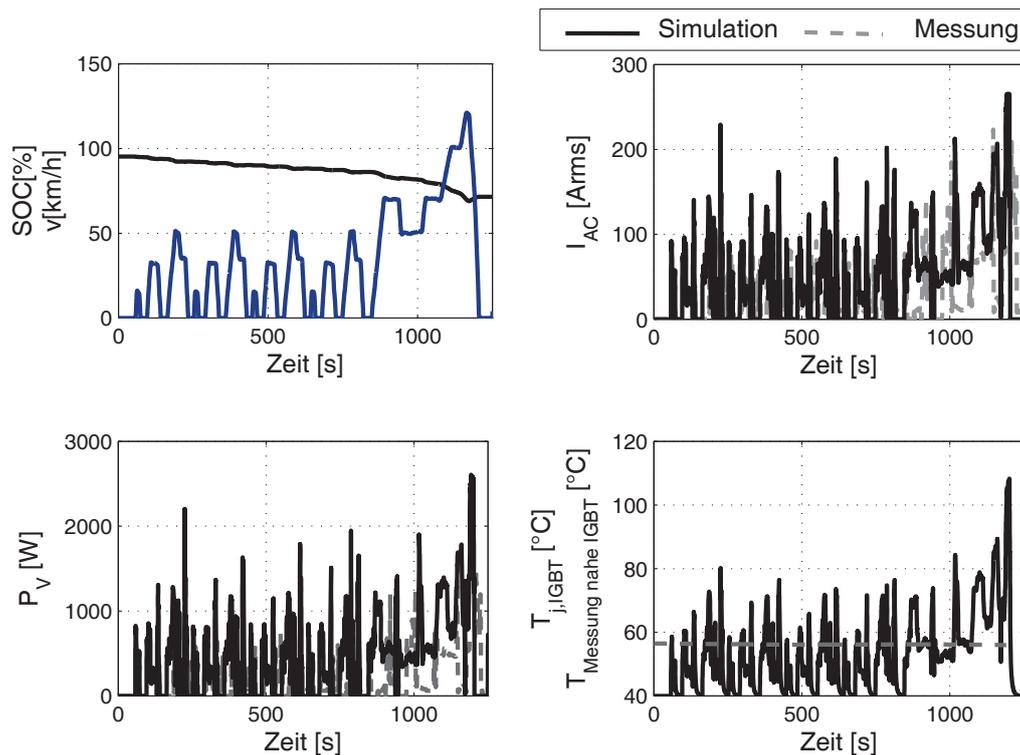


Abbildung 6.3: Signale der Leistungselektronik in der thermischen Vorkonditionierung  $T_{System,Start} = +40^{\circ}C$  und  $SOC_{Start} = 90\%$  im NEFZ vor der Validierung

## 6.2 Ladevorgang und thermische Grenzwertbetrachtung des Energiespeichers

In diesem Abschnitt wird das energetische Verhalten des Hochvoltsystems im Ladezustand aufgezeigt. Die Verluste im Kabelsatz und der Niedervoltverbrauch werden in dieser Betrachtung, wie bisher in der Modellierung, vereinfacht. Der Ladezustand wird in den ausgewählten Batterietemperaturen  $25^{\circ}C$ ,  $0^{\circ}C$ ,  $-10^{\circ}C$ ,  $-20^{\circ}C$ ,  $-25^{\circ}C$  analysiert. Diese Vorkonditionierung wird vor der Berechnung mit den Temperaturen des Zellsystems, des Ladegerätes und des Gleichspannungswandlers und der Kühlmedien eingestellt.

Im Folgenden wird für einen State of Health von 1 (BoL) exemplarisch das Zellsystem von 10 bis 90 Prozent geladen, siehe Abbildung 6.4. Die Ladezeit beträgt 1,9 Stunden (400V/16A) mit der  $T_{Bat} = 25^{\circ}C$ . Das Ziel dieser Untersuchung liegt bei der Identifikation von den Limitierungen der Lade- und Endladeströme auf Grund von physikalischen Eigenschaften der prismatischen Lithium-Ionen-Zelle bei niedrigen Temperaturen. Mit einer konstanten Eingangsleistung aus der üblichen Steckdose wird eine Eingangsleistung am Ladegerät von 3300W erzeugt. Aufgrund der Inaktivität der Kühlung im Ladevorgang wird der Volumenstrom der Kühlmedien auf  $\dot{V} = 0l/min$  im Vorlauf des Ladegeräts und der Hochvoltbatterie in der Simulation gesetzt.

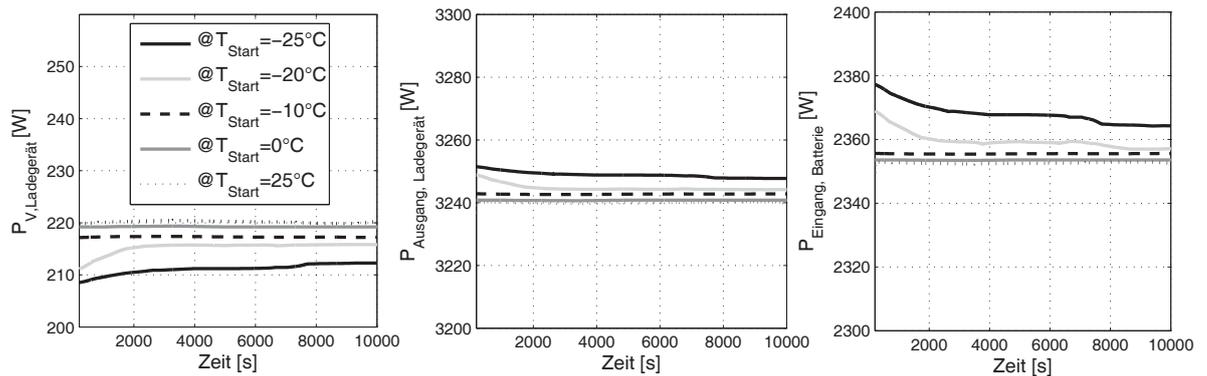


Abbildung 6.4: Berechnete Signale des Ladegeräts für SOC = 10 – 90% mit der Variation von  $\dot{V} = 0\text{l/min}$  und  $T_{\text{Lader,Start}} = -25, -20, -10, 0, 25^\circ\text{C}$  mit der Grundlast  $= 750\text{W}$

Je nach Temperatur des Kühlwassers und der Umgebung schwanken die Verluste des Laders zwischen 210 bis 230W, siehe Abbildung 6.4. Die Grundlast und die Hybridumfänge werden konstant mit 750W hinterlegt. Die Verluste des Gleichspannungswandlers liegen bei 130W. Während des Ladens wird das 12V Bordnetz über die Grundlast gestützt. Bei niedrigen Umgebungstemperaturen liegt eine gesteigerte Leistung an der Batterie an; die Verluste des Ladegeräts sind sehr gering. In diesen Zuständen ist der Innenwiderstand der Zellen jedoch sehr hoch, dies hat eine geringe Leistungsaufnahme der Zellen zur Folge. Der Batteriestrom wird aufgrund des hohen Innenwiderstandes begrenzt. Während des aktiven Ladens steigt die Zelltemperatur transient an.

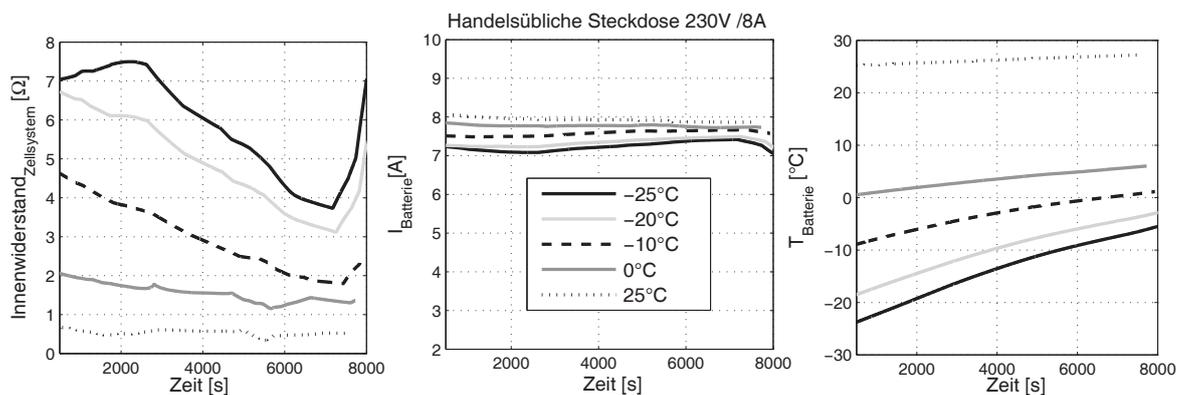


Abbildung 6.5: Auswirkung der thermischen Bedingungen auf das Zellsystem im Ladezustand für den State of Charge-Bereich von 10 – 90% mit der Variation von  $\dot{V} = 0\text{l/min}$  und  $T_{\text{Zellsystem,Start}} = -25, -20, -10, 0, 25^\circ\text{C}$  mit der Grundlast  $P_{\text{Grundlast}} = 750\text{W}$

Mit Hilfe eines zusätzlich eingebauten Heizers lässt sich die Batterie für ein schnelles Laden erwärmen. Diese Randbedingung wird folgend nicht näher betrachtet. Der entnehmbare oder resultierende Strom in den Zellen ist aus diesen Gründen stark abhängig von der Zelltemperatur



und dem Innenwiderstand, aufgezeigt in Abschnitt 6.2. Diese Erkenntnis aus der Untersuchung des Ladezustandes zeigt den deutlichen Einfluss der thermischen Konditionierung auf die Leistungsfähigkeit des gesamten elektrischen Antriebsstrangs.

### 6.3 Auswirkungen der transienten Zyklen auf die Zustände des Hochvoltsystems

Tabelle 6.1 zeigt die resultierenden elektrischen Zustände des Hochvoltsystems in den unterschiedlichen Fahrzyklen unter den Bedingungen eines Heißlandes. Anhand der Messungen ist in Tabelle 6.1 erfolgreich nachgewiesen, dass die Wertebereiche der Komponentenmodellierung in der Fahrzeugumgebung eingehalten werden.

Tabelle 6.1: Elektrische Bilanzen der Komponenten in den durchgeführten Zyklen im Heißland

<b>Maximaler Wert</b>	<b>Japan</b>	<b>NEFZ</b>	<b>SC03</b>	<b>ADAC BAB 130</b>	<b>UDDS</b>	<b>Konstant 50km/h</b>
<i>Strom Laden Bat.</i> (A)	70,94	71,73	64,67	125,5	76,40	0
<i>Strom Entladen Bat.</i> (A)	-158,70	-181,27	-229,88	-277,35	-201,39	-219,35
<i>Drehzahl</i> (1/min)	2058	2167	2800	5470	2991	2110
<i>Motormoment</i> (Nm)	121	254	223	338	336	369
<i>Rekuperationsmoment</i> (Nm)	-241	-324	-328	-326	-332,67	0
<i>Phasenstrom</i> (Arms)	239,48	266,44	272,39	281,84	280,75	289,36
<i>Zwischenkreisspannung</i> (V)	412	423	409	426	414,38	398,1950

Die häufigsten Drehzahlen und Momente der elektrischen Maschine liegen erwartungsgemäß in einem Wirkungsgradbereich von  $\eta \geq 92\%$ .

Abbildung 6.6 zeigt die resultierenden Verluste der Hochvoltkomponenten aufgrund des gefahrenen Fahrprofils und der thermischen Konditionierungen. Infolgedessen können hohe abgefragte Leistungen, mittlere Temperaturen und Temperaturamplituden in Sperrschichten der Halbleiter erzielt werden.

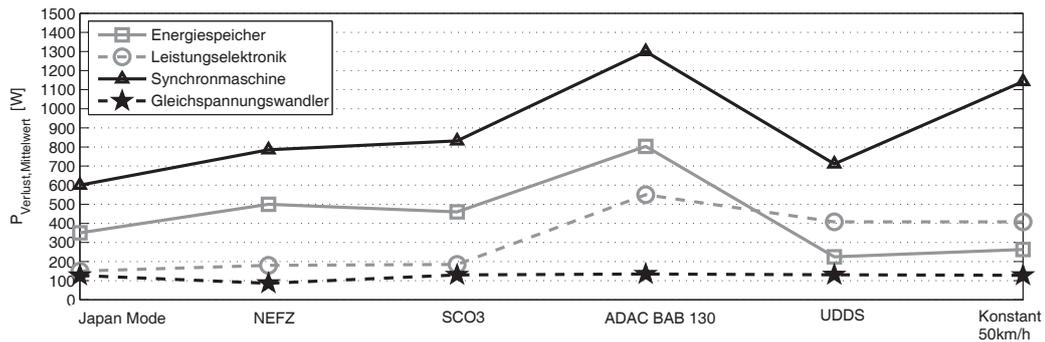


Abbildung 6.6: Auswirkungen der Fahrbereiche auf die durchschnittlichen Wärmeverluste des Hochvoltsystems des Versuchsträgers unter konstanten thermischen Randbedingungen

Abbildung 6.7 verbildlicht die empirisch bestimmten prozentualen Lebensdauererbräuche von den Dioden  $L_{LE,Dioden}$  und den IGBTs  $L_{LE,IGBTs}$  in Abhängigkeit des gefahrenen Lastprofils und der Kühlmitteltemperatur  $T_{KM,EIN,LE} \in [40^{\circ}C...80^{\circ}C]$ . Eine Variation der Kühlwassertemperatur und des Kühlwasservolumenstroms unter konstant elektrischen Bedingungen zeigt die erhebliche Auswirkung der Kühlwassertemperatur auf die mittleren Temperaturen und die Temperaturamplituden der IGBTs und der Dioden. Der Eingriff des Algorithmus auf die Kühlwassertemperatur kann mit dem erzielten Ergebnis mit  $\Delta T_{KM,Ein} = 10K$  zu Beginn festgelegt werden.

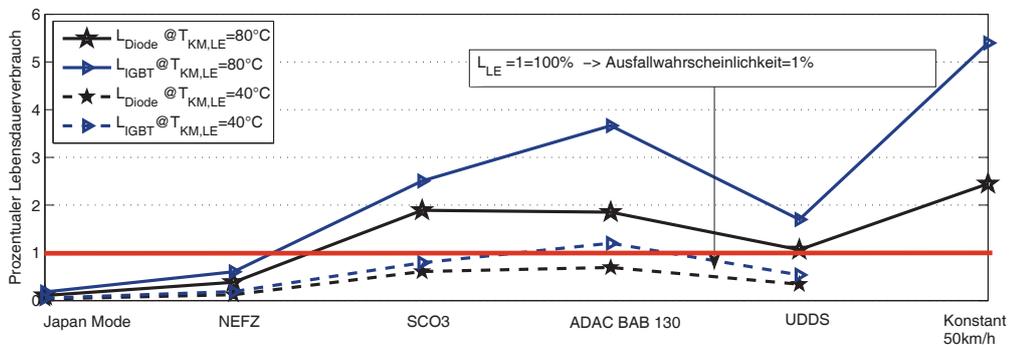


Abbildung 6.7: Resultierende prozentuale Lebensdauererbräuche in den verschiedenen Fahrbereichen für 8000 Betriebsstunden und  $\dot{V} = 1l/min$

Die Kapazitätsverluste sind von den kalendarischen und zyklischen Parametern abhängig. Der kalendarische Anteil für die gleiche Umgebungstemperatur variiert nur leicht aufgrund der Standzeit. Der kalendarische Anteil wird maßgeblich von der Zelltemperatur  $T_{Zellsystem}$  bestimmt. Der State of Charge ist in dieser Analyse konstant  $SOC_{Zellsystem} = 100\%$ .

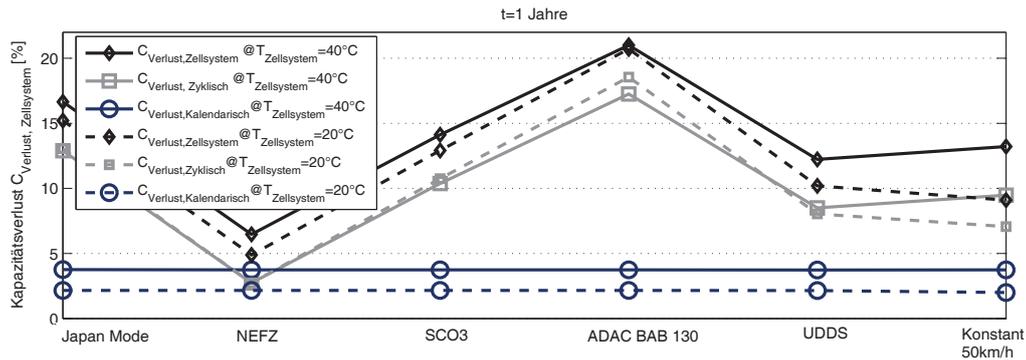


Abbildung 6.8: Kapazitätsverluste aufgrund der kalendarischen und der zyklischen Alterung mit Berücksichtigung der definierten Fahrzyklen mit Standphase @SOC = 100% und Betriebsphase @SOC<sub>Start</sub> = 90%

In Abbildung 6.8 wird der Einfluss eines Fahrzyklus pro Tag auf den Gesamtverlust für den gesamten Zeithorizont verglichen. Es wird ersichtlich, dass die Höhe des  $C_{\text{Verlust,Zellsystem}}$  aufgrund des Fahrbereichs, der Zell- und der Kühlwassertemperatur hervorgeht. Die Temperaturabsenkung um 10K im Vorlauf der Batterie zeigt gleicherweise eine Verbesserung des kalendarischen Kapazitätsverlusts um  $C_{\text{Verlust,Zellsystem}} \geq 4\%$ .

Insbesondere der UDDS und der SC03 erzeugen hohe Wärmeverluste und hohe Lebensdauer- verbräuche. Aus diesem Grund werden diese beiden Zyklen in Kapitel 7 für die Umsetzung und die Beurteilung der neuen Verfahren ausgewählt. Für eine zusätzliche Stabilitätsüberprüfung wird der NEFZ analysiert. Dieser allgemein anerkannter Zyklus bestätigt die hohe Güte der Systemmodellierung auch nach Umsetzung der neuen Verfahren. Der Worldwide harmonized light vehicles test cycle (WLTC) kann als weiterer Zyklus zukünftig untersucht werden. Aufgrund des Fahrprofils des WLTCs wird die benötigte elektrische Leistung voraussichtlich geringer sein, als diese beispielhaft im UDDS und im SC03 bereits in Abschnitt 3.4 bestimmt wurden.

## 7 Realisierung und Bewertung der adaptiven thermischen Strategien

Mit Hilfe der Modellierungen und Messungen der thermisch-elektrischen Signale können die Belastungen und die Lebensdauerzustände des Antriebsstrangs aufgezeigt und die relevanten Daten der jeweiligen Komponente identifiziert werden. Die Resultate der Lastzyklen aus Kapitel 6 verdeutlichen die Wechselwirkungen zwischen den Lastfällen, dem thermischen Verhalten und der Lebensdauererbräuche auf der Hochvoltsystemebene. Eine neue bedarfsgerechte Kühlung ermöglicht die Lebensdauer in kritischen Bedingungen zu erhöhen und die Kühlleistungen  $P_{\text{Kühl,Kreis1+2}}$  in unkritischen Bedingungen zu verringern. Die neuen Maßnahmen können aus diesen Gründen nur mit der Interaktion des gesamten Antriebs begutachtet werden. Dieses Grundprinzip verbildlicht Abbildung 7.1.

In diesem Kapitel werden infolgedessen Methoden entwickelt und umgesetzt, die das Verhalten des Hochvoltsystems erfassen und die Alterung bedarfsgerecht beeinflussen. Folgende wesentliche Voraussetzungen für die erfolgreiche Umsetzung der Algorithmen sind bereits in der Modellierung angewandt, hergeleitet in Kapitel 4.

- Berechnung der relevanten Signale des Hochvoltsystems und statistische Auswertung der Belastungen für jeden Zeithorizont  $t = 1\text{Jahr}$ 
  - Prozentuale Lebensdauer der Halbleiter für 800 Betriebsstunden
  - Kapazitätsverlust des Energiespeichers für eine Stand- und Betriebsphase pro Tag
- Identifikation des Lebensdauerzustands nach jedem Zeithorizont  $t \in \{1T, 15T\}$
- Regelung des Alterungsfortschrittes mit den Stellgrößen  $T_{\text{KM,Ein,Soll}}, \dot{V}_{\text{KM,Ein,Soll}}$  für den nächstfolgenden Horizont

Die Konzeption insbesondere der Sollwertbestimmung und der Vergleich zu den bisherigen thermischen Beanspruchungen ist Schwerpunkt dieses Kapitels. Die resultierenden Auswirkungen der thermischen Sollwertregelung werden nachfolgend analysiert und die Vorteilhaftigkeit der Methoden verdeutlicht.

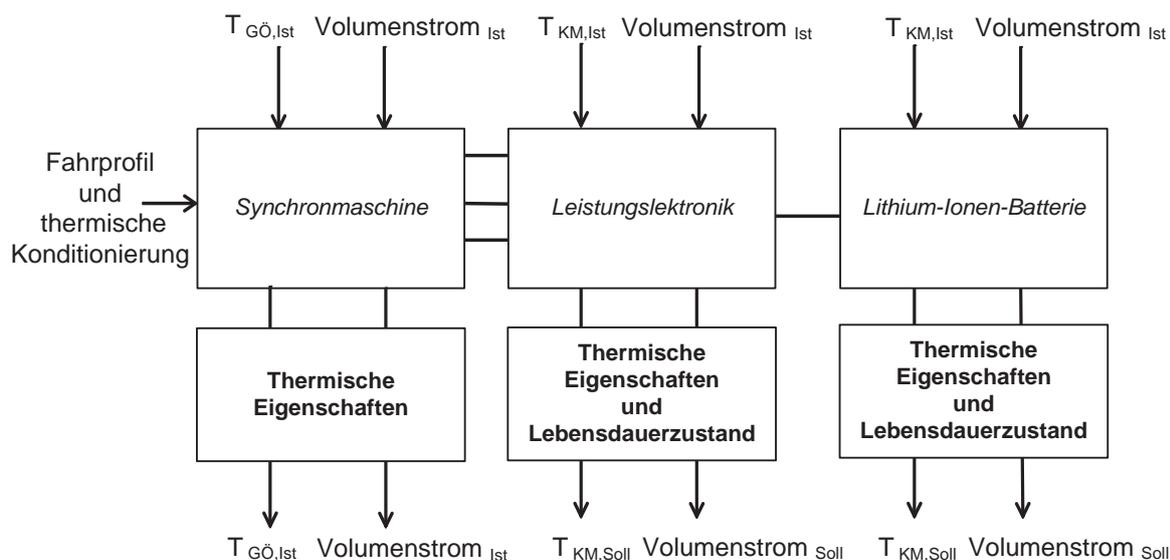


Abbildung 7.1: Schema der Istwertidentifikation und der Sollwertermittlung für das Hochvolt-system

## 7.1 Zuverlässigkeitsanforderungen und die Berechnung der Lebensdauerzustände

Für ein Hochvoltssystem werden Anforderungen für die Lebensdauer, die Sicherheit und die Performance je nach Hersteller und Anwendung vorgegeben. Diese müssen in der Gesamtfahrzeugintegration eingehalten werden.

Es ist zu beachten, dass die Anforderungen und die Standards an die Zuverlässigkeit von jedem Hersteller für seine eingesetzten Bauteile anders definiert werden. Folglich können die Zuverlässigkeitsanforderungen an die Hochvoltkomponenten unterschiedlich sein.

Die Lebensdauervorgaben jedes Bauteils sind in Tabelle 7.1 für den Antriebsstrang des Referenzfahrzeuges zusammengefasst. Diese Anforderungen der Komponenten dienen in den nachstehenden Abschnitten als Basis für das Mindestmaß und die Definition der Sollwerte. Nach Entwurf und Aufbau der Algorithmen werden diese in die Simulation eingebunden, wie Abbildung 7.1 aufzeigt. Die implementierte Softwaremaßnahme erfasst die Temperaturverläufe der IGBTs und der Dioden. Aufgrund der resultierenden mittleren Temperaturen und den Temperaturamplituden werden die prozentualen Lebensdauererbräuche der Leistungsmodule berechnet, bereits detailliert erklärt in Abschnitt 4.4.

Tabelle 7.1: Zielsetzungen der Zuverlässigkeit an die Komponenten

Bauteil	Exemplarische Lebensdauervorgabe und Restriktionen nach den Herstellervorgaben
Hochvoltssystem des Referenzträgers	Elektrischer Betrieb = 3.000 Betriebsstunden Ladezyklus= 12.000h oder 5500 Zyklen
LiFeP <sub>04</sub> -Batterie	Zeithorizont der Lebensdauer t = 10Jahre Zyklischer und kalendarischer Kapazitätsverlust = 20% der nutzbaren Energie (End of life) Zyklischer und kalendarischer Kapazitätsverlust = 30% der Gesamtkapazität (End of life) Betriebstemperatur von -30°C bis 60°C Lagertemperatur von -40°C bis 70°C
Leistungsmodule Abbildung 4.35	Zeithorizont bis zum Ausfall t = 15Jahre Zyklen bis zum Ausfall = 1x10 <sup>6</sup> unter der Annahme ΔT = 80K Proz. Lebensdauerverbrauch Dioden für 8.000 Betriebsstunden = 100% Proz. Lebensdauerverbrauch IGBTs für 8.000 Betriebsstunden = 100% Betriebstemperatur von -55°C bis 150°C

Die Batterie und das Batteriemangement liefern den State of Charge, den Stromverlauf und die Zelltemperatur. Anhand dieser Größen wird mit einer Alterungsberechnung der zyklische und kalendarische Kapazitätsverlust für jedes Jahr ermittelt. Die Ermittlung der Kapazitätsverläufe ist in Unterabschnitt 4.5.4 beschrieben. Mit den gemessenen und den berechneten Größen werden die Lebensdauerzustände ermittelt, sobald der elektrische Antrieb aktiv ist. Die Alterungsüberwachung ist permanent aktiv; und es werden die Kenndaten der Alterungsberechnung generiert. Die geforderte Lebensdauer wird mit den entworfenen Sollwertkurven je nach Komponente hinterlegt, siehe Abbildung 7.2. Die Sollwertkurven beruhen auf den Anforderungen von Tabelle 7.1 und den Lebensdauereigenschaften der Bauteile.

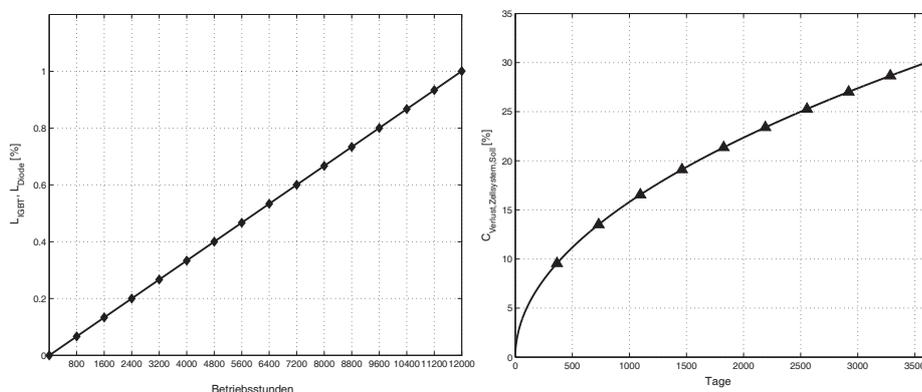


Abbildung 7.2: Entwickelte Sollwertkurven für die Leistungselektronik und die Batterie

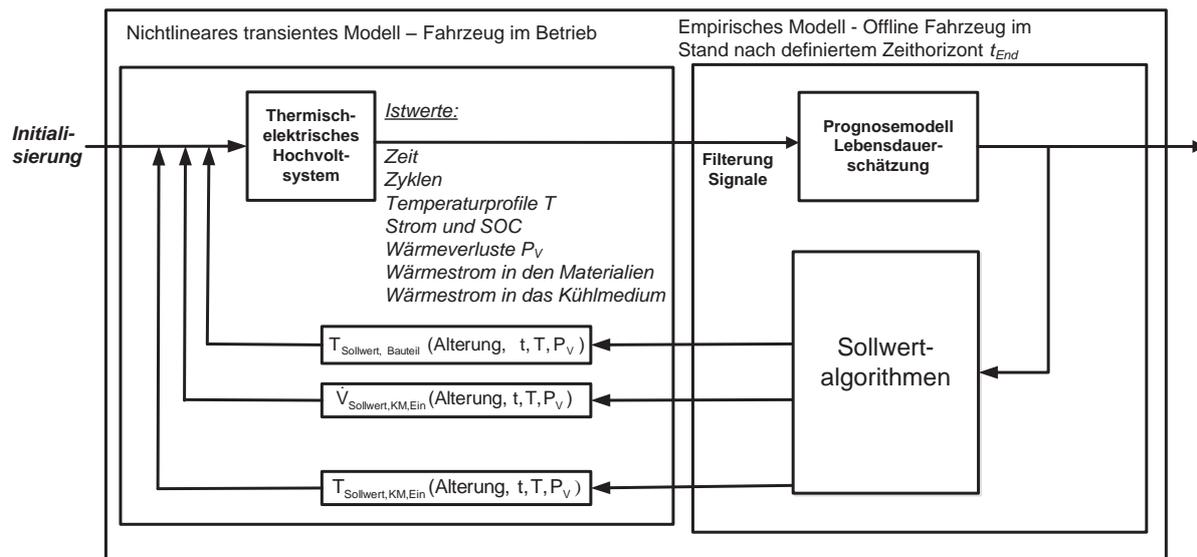


Abbildung 7.3: Diagramm des Modells der Sollwertbestimmung und Rückführung an die Regelung von dem Energiemanagementsystem und der Kühlungssteuerung

Die thermischen Sollwerte resultieren aus dem Vergleich der Referenzpunkte entlang der Kurven mit den tatsächlich ermittelten Zuverlässigkeitswerten. Die angepassten Werte aufgrund der Abweichung zwischen Soll- und Istgrößen werden an die Kühlungssteuerung und das Energiemanagement übertragen [82]. Der Abweichung entsprechend werden in Abbildung 7.3 Sollwerte für die Temperatur des Kühlmediums am Einlass jeder Hochvoltkomponente definiert und in die Berechnung zurückgeführt. Es erfolgt eine Anpassung des Sollwerts um  $(+/- 10\text{K})$  im Kühlwasservorlauf, aufgrund einer Unter- oder Überschreitung der prognostizierten Alterung. Wie in Abschnitt 6.3 bereits erwähnt, werden in den nachfolgenden Abschnitten die Eingriffe für die Leistungselektronik in den Zyklen SC03 und UDDS und für den Energiespeicher in den Zyklen NEFZ, SC03 und UDDS aufgezeigt. In diesen Zyklen resultieren hohe mittlere Temperaturen und hohe Temperaturamplituden in den wesentlichen Bauteilen.

## 7.2 Lebensdauerorientierte Konditionierung der Leistungselektronik

Für die Erreichung der angestrebten Lebensdauer, wird im aktuellen Stand durch den Komponentenhersteller ein Betriebsfenster vorgegeben. In diesem Fenster sind maximale und minimale Werte von Kühlwassertemperatur und -durchsatz definiert, die unter der Annahme des höchsten Wärmeverlustes determiniert sind.

Die transienten Eingangssignale der betrachteten Schaltung (der Phasenstrom, die Zwischenkreisspannung und die Sperrschichttemperaturen) sowie die Kühlungssituation in realen Fahr-situationen werden für die neue Ansteuerung als Signal mit einbezogen. Abbildung 7.4 veranschaulicht die benötigte Signalverarbeitung der Leistungselektronik für die Umsetzung des Ansatzes. Die Verbesserung bildet ein Algorithmus, der unter Berücksichtigung der Alterungs-

mechanismen die Sollwertwerte der Kühlmitteltemperatur der Hochvoltelektronik bedarfsgerecht berechnet und diese Werte einem Kühlsystem zur Ansteuerung von Pumpen und Ventilen als Eingangsgröße zur Verfügung stellt.

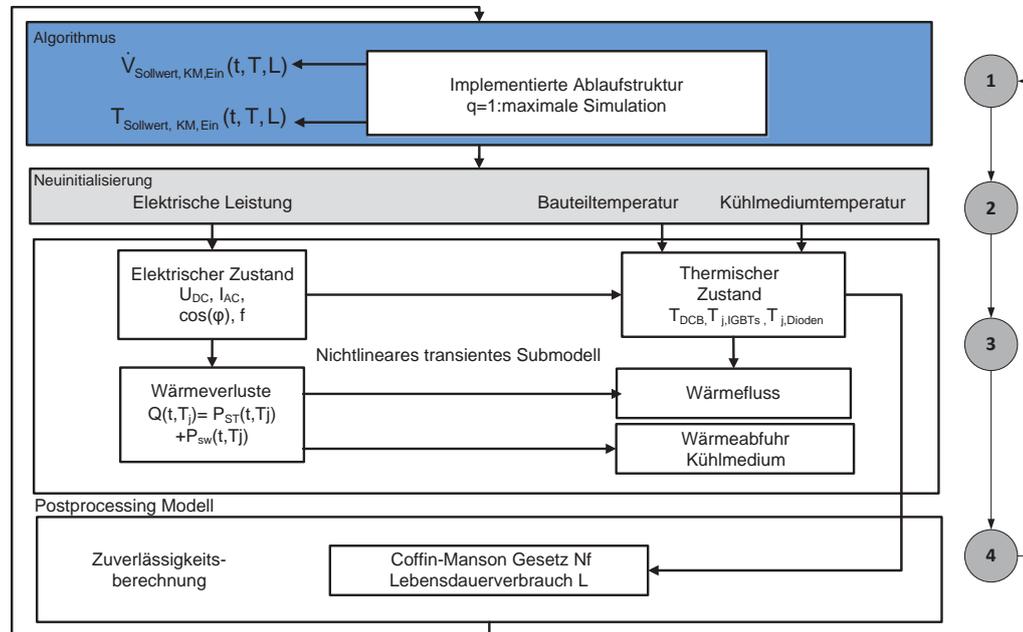


Abbildung 7.4: Flussdiagramm der thermischen Sollwertberechnung der Leistungselektronik

Der Algorithmus in Abbildung 7.4 ist ein Softwareprogramm, welches in der Leistungselektronik oder einer Ansteuerungseinheit implementiert wird. Für jeden Fahrzustand ergibt sich ein instationäres Verhalten der bereits gewählten relevanten Signale. Ein aktueller Istwert der Kühlmittelasstemperatur, Kühlplattentemperatur und des Volumenstroms wird mit aufgezeichnet. Auf Grundlage der entstehenden Eingangsspannungen und -ströme an den IGBTs und Dioden können die Temperaturen in den Halbleitern und der DCB Schicht mit Hilfe des thermischen Modells berechnet werden, aufgezeigt in Abschnitt 4.4. Die entstehenden Schalt- und Durchlassverluste werden für eine Mindestzeitrate ermittelt [109].

In Abhängigkeit der Kühlmittelasstemperatur, des Massenstroms und der Wärmeverluste ergibt sich eine Kühlmittelauslasstemperatur. Mit dem Wärmeübergangskoeffizienten wird die resultierende Kühlmitteltemperatur in einem elektrischen Betriebspunkt im Modell errechnet. Vorhandene Leistungshalbleiter stellen thermische Widerstände und Kapazitäten dar, die in dem thermischen Modell mit berücksichtigt werden. Die resultierenden Wärmeverluste, entstehenden Wärmeeinträge in den Materialschichten und die absoluten Temperaturen im Inverter werden ebenfalls berechnet. Besonders die Temperaturgradienten liefern Aussagen über die thermische Beanspruchung der Halbleiter und der Materialschichten.

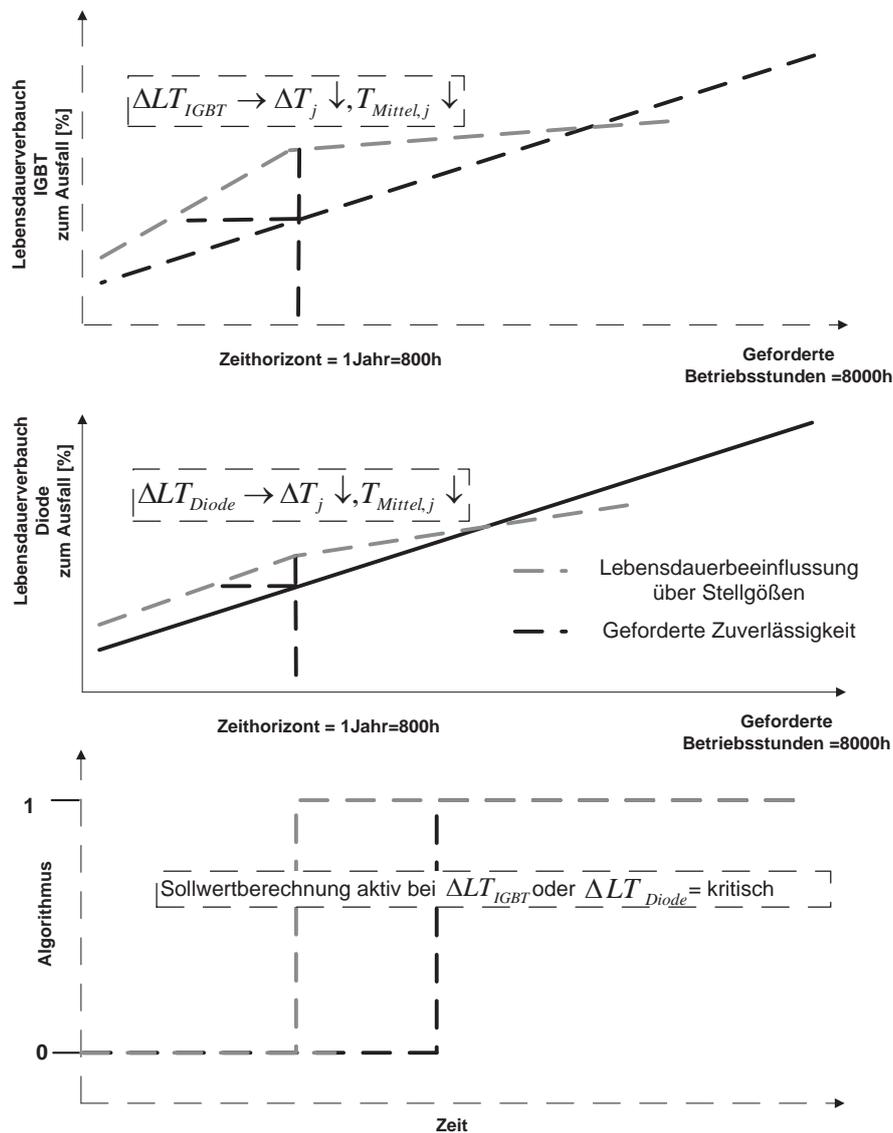


Abbildung 7.5: Sollwertberechnung für die Kühlwassertemperatur  $T_{KM,Ein,LE}(t)$  aufgrund des prozentualen Lebensdauerverbrauches  $L_{Soll}(t)$

Mit den ausgewählten Berechnungen in Unterabschnitt 4.4.1 und Unterabschnitt 4.4.2 können die prozentualen Lebensdauerverbräuche der IGBTs und der Dioden bestimmt werden. In Abhängigkeit von den Fahrzyklen und den angenommenen Betriebsstunden werden die Werte der Lebensdauerverbräuche ermittelt. Mit der berechneten Lebensdauerprognose werden bedarfsgerechte Sollwerte an das Kühlungssteuerungsgerät übergeben. Der Algorithmus berechnet für die nachfolgenden 800 Betriebsstunden den prozentualen Lebensdauerverbrauch Bezug nehmend auf die Leistungshalbleitertemperaturen und die Anzahl der Zyklen bis zum Ausfall.

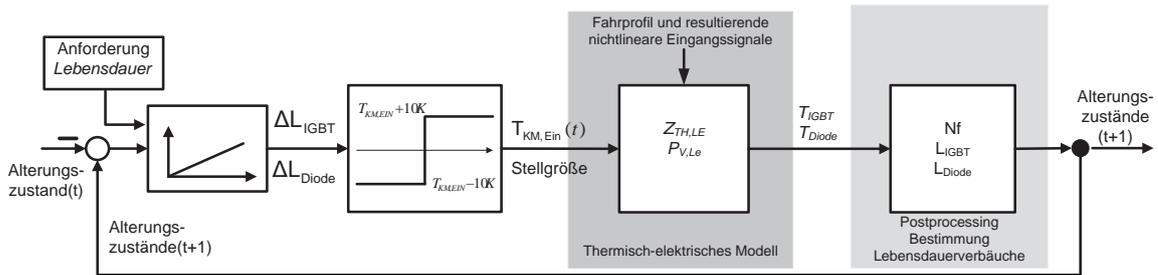


Abbildung 7.6: Schematik der Ablaufstruktur für die Zuverlässigkeitsbeeinflussung des Leistungsmoduls mit der Kühlwassertemperatur als Stellgröße

Abbildung 4.36 und Abbildung 4.37 zeigen, dass eine Erhöhung oder Absenkung der Kühlwassertemperatur um 10K eine Verbesserung beziehungsweise Verschlechterung des prozentualen Lebensdauerertrags um 20% erzielt. Ist ein berechneter Lebensdauerertrag geringer als die Sollwertkurve, wird der Sollwert der Kühlmitteltemperaturen um 10K erhöht. Ist der berechnete Lebensdauerertrag höher als der jeweilige Sollwert in dem Zeitraum, wird die Kühlwassertemperatur durch den Algorithmus um 10K für den nächsten Zeitabschnitt abgesenkt. Die implementierte Logik in der Fahrzeugmodellierung beschreibt Gleichung 7.1.

$$\begin{aligned}
 T_{KM,Ein} &\in [T_{KM,Ein,Min} = 0^{\circ}C, T_{KM,Ein,Max} = 80^{\circ}C] \\
 L_{LE,Soll}(t) &\iff L_{LE,IGBT}(t, T_j, \varnothing T_j, \Delta T_j) \\
 L_{LE,Soll}(t) &\iff L_{LE,Diode}(t, T_j, \varnothing T_j, \Delta T_j) \\
 \Delta t &= 800 \text{ Betriebsstunden} \\
 \Delta T_{KM,EIN,LE} &= 10K \\
 L_{LE,Soll}(t) > L_{LE,IGBT}(t) &\Rightarrow \Delta T_{KM,EIN,LE}(t+1) = -10K \\
 L_{LE,Soll}(t) < L_{LE,IGBT}(t) &\Rightarrow \Delta T_{KM,EIN,LE}(t+1) = +10K \\
 L_{LE,Soll}(t) > L_{LE,Diode}(t) &\Rightarrow \Delta T_{KM,EIN,LE}(t+1) = -10K \\
 L_{LE,Soll}(t) < L_{LE,Diode}(t) &\Rightarrow \Delta T_{KM,EIN,LE}(t+1) = +10K
 \end{aligned} \tag{7.1}$$

Nach Integration von Gleichung 7.1 in die Simulationsumgebung, wird nachstehend ihr Einfluss auf die prozentualen Lebensdauerertrags und die Verringerung der benötigten Leistung des Kühlsystems untersucht.



## 7.2.1 Resultate der Autobahnfahrt und Konsequenzen der Erhöhung der Kühlwassertemperatur

Abbildung 7.7 zeichnet die berechneten prozentualen Lebensdauererbräuche der IGBTs und der Dioden für die geforderten 15 Jahre in dem Zyklus SC03 auf. Die Kühlwassertemperatur wird in dem ersten Jahr dieses Versuches auf  $T_{KM,Ein,Start,LE} = 80^{\circ}C$  eingestellt. Abbildung 7.7 zeigt, dass dieser Zyklus kritische Belastungen darstellt.

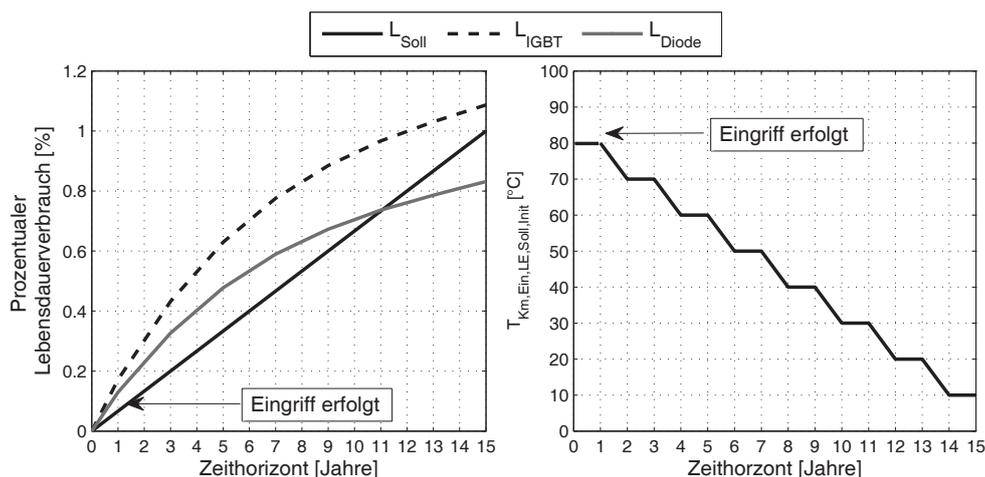


Abbildung 7.7: Ergebnisse mit der Kühlwassertemperatur auf  $T_{KM,Ein,Start,LE} = 80^{\circ}C$  im Fahrzyklus SC03 mit Eingriff der adaptiven innovativen Strategie für jeden Zeithorizont  $t = 800$  Betriebsstunden

Die prozentualen Lebensdauererbräuche von den IGBTs und den Dioden liegen bereits im ersten Jahr  $t = 1$  über dem zulässigen Wert. Infolgedessen wird die Kühlwassertemperatur nach dem ersten Zeithorizont um 10K abgesenkt. Die Begrenzung des Wertebereiches der Kühlwassertemperatur, definiert in Gleichung 7.1, ist eine wesentliche Bedingung für die Stabilität der Algorithmen. Der Verlauf des Phasenstroms im SC03 mit hohen Amplituden wirkt sich, wie bereits erkannt, auf die Wärmeverluste und die Temperaturverläufe der Halbleitermodule aus, dargestellt in Abbildung 7.8. Abbildung 7.8 zeigt exemplarisch die Annahmen der Kühlwassertemperaturen  $T_{KM,Ein,LE}$  und  $T_{KM,Aus,LE}$  für die ersten drei Zeithorizonte. Im ersten Jahr  $t=1$  ist die Einlasstemperatur  $T_{KM,Ein,LE} = 80^{\circ}C$ . Die Auslasstemperatur  $T_{KM,Aus,LE}$  wird durch die Wärmeverluste der Halbleiter beeinflusst. Es resultieren in dem ersten Zeithorizont kurzzeitig Temperaturgradienten bis zu  $\Delta T_{KM,Aus,LE} = 40K$ . Im zweiten Zeithorizont wird die Kühlwassertemperatur im Einlass auf  $T_{KM,Ein,LE} = 70^{\circ}C$  angepasst, nach Gleichung 7.1. Die mittlere Temperatur wird demzufolge abgesenkt. Die Temperaturgradienten bleiben konstant mit dem Maximum von  $\Delta T_{KM,Aus,LE} = 40K$ .

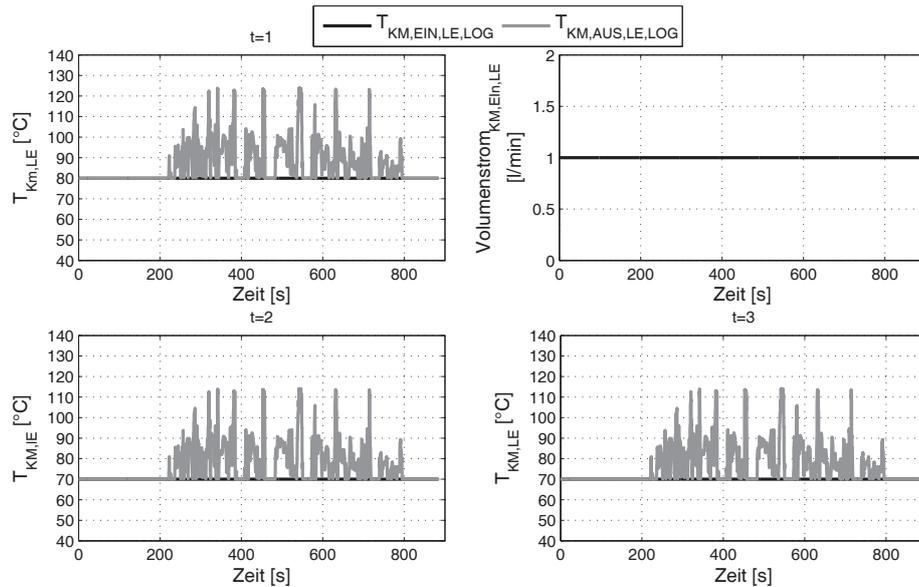


Abbildung 7.8: Verläufe der Kühlwassertemperatur von  $T_{KM,Ein,Start,LE}$  am Einlass und Auslass im Fahrzyklus SC03 für jeden Zeithorizont  $t=800h$

Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass durch ein kontinuierliches Absenken der Kühlwassertemperatur in diesem Lastfall das Lebensdauerziel erreicht wird.

## 7.2.2 Resultate im städtischen Verkehr und Auswirkung des Eingreifens

Das Verhalten des Algorithmus im UDDS wird als weiterer exemplarischer Fall untersucht. Die thermischen Belastungen in dem städtischen Fahrbereich zeigen unter der Annahme von 800 Betriebsstunden, dass die Sollwertkurve durch den resultierenden prozentualen Lebensdauerverbrauch der IGBTs  $L_{IGBT}$  nach dem ersten Zeithorizont bereits überschritten wird. In diesem Fall erfolgt der gewünschte Eingriff des Algorithmus in Abbildung 7.9. Dieser senkt die Kühlwassertemperatur um 10K ab. Nach Unterschreitung des Sollwertes in  $t=10$  wird die Kühlwassertemperatur um 10K angehoben. Mit Anwendung dieser Maßnahme wird am Ende des 15. Zeithorizontes ein prozentualer Lebensdauerverbrauch der IGBTs von 100% erzielt. Abbildung 7.10 beschreibt das Verhalten der Kühlwassertemperaturannahmen in den ersten Jahren  $t=1-3$ . Im ersten Jahr  $t=1$  wird die Einlasstemperatur wiederholt auf  $T_{KM,Ein,LE} = 80^{\circ}C$  eingestellt. Der Volumenstrom ist  $\dot{V} = 1l/min$ . Dies bildet einen kritischen Belastungsfall nach. Aufgrund des zu hohen Lebensdauerverbrauchs wird die Kühlwassertemperatur vom zweiten Jahr bis zum fünften Jahr auf  $T_{KM,Ein,LE} = 50^{\circ}C$  reduziert. Im sechsten Jahr  $t=6$  wird die Kühlwassertemperatur wieder angehoben, da die Lebensdauerverbräuche von IGBTs und Dioden geringer als der Sollwert sind.

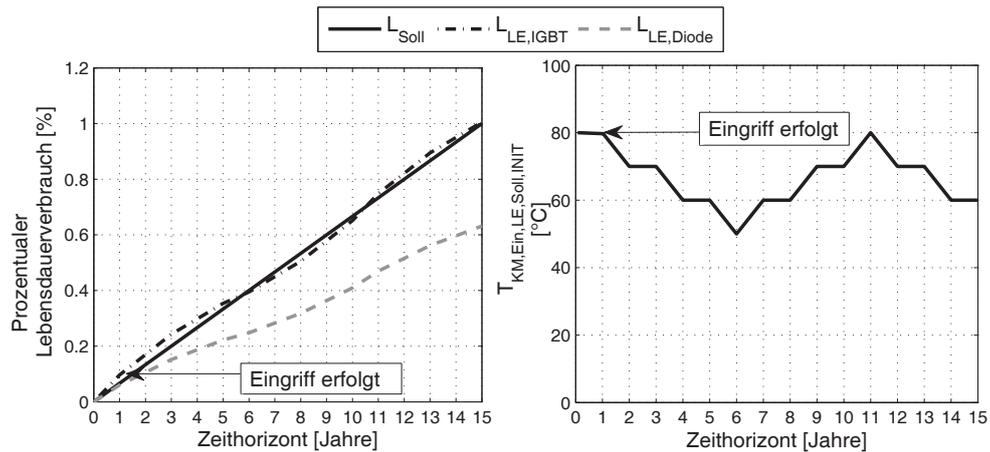


Abbildung 7.9: Ergebnisse des Lebensdauer verbrauchs mit Eingriff der initialisierten Kühlwassertemperatur auf  $T_{KM,Ein,Start,LE} = 80^{\circ}\text{C}$  im Fahrzyklus UDSS

Mit dieser Methode wird der Fortschritt der Alterung gezielt beeinflusst und die Energienutzung der Kühlung auf den Bedarf angepasst. Die Untersuchung dieses Lastfalls zeigt, dass wiederholt mit Anwendung der innovativen Methoden das Lebensdauerziel erlangt wird.

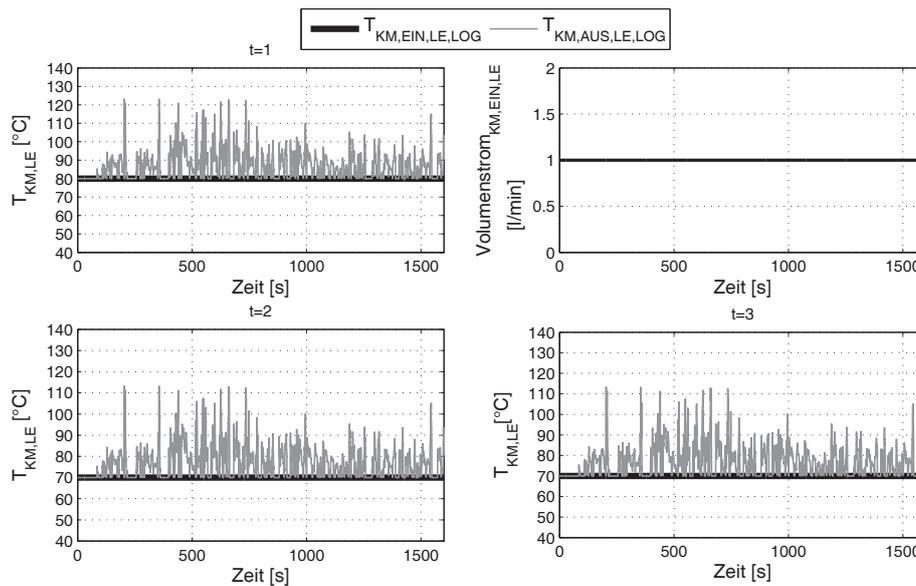


Abbildung 7.10: Simulierte Ergebnisse der Kühlwassertemperatur mit Eingriff der adaptiven innovativen Strategie in dem Einlass und dem Auslass im Fahrzyklus UDSS für die ersten drei Zeithorizonte

### 7.3 Lebensdauerorientierte Konditionierung eines Energiespeichers

Für die anstehenden Untersuchungen des Einflusses auf die Lebensdauer wird die bereits erarbeitete Modellierung mit zusätzlichen Algorithmen erweitert. Diese Anwendung ist unabhängig vom ausgewählten Referenzantriebsstrang. Nach jeweils 365 Tagen Lebenszeit mit festgelegten Stand- und Betriebsphasen wird die Soll- mit der Ist-Alterung verglichen. Ist die Alterung schneller fortgeschritten als geplant, wird darauf reagiert, indem die Zelltemperatur  $T_{\text{Zellsystem}}$  anhand der Kühlwassertemperatur  $T_{\text{KM,Ein,Batterie}}$  abgesenkt wird. Hingegen wird bei einer Unterschreitung der Sollwertkurve die Solltemperatur erhöht. In der Betriebsphase ist der Kühlmitteldurchsatz  $\dot{V}_{\text{KM,Ein,Batterie}}$  nachfolgend exemplarisch mit 2l/min initialisiert. Aufgrund der großen thermischen Masse des Energiespeichers ist der Kühleffekt nach dem Abstellen des Fahrzeugs noch mehrere Stunden in der Standphase weiter wirksam. Infolgedessen wird der letzte Wert dieser Zelltemperatur  $T_{\text{Zellsystem}}$  als konstant angenommen. Insbesondere der Kapazitätsverlust im Stand hängt nach Unterabschnitt 4.5.4 stark von der Kühlungs- als auch Lagerungstemperatur ab. Der Alterungsfortschritt kann zu jedem Zeitpunkt verlangsamt werden, wenn die Zelltemperatur  $T_{\text{Zellsystem}} \in [0^\circ\text{C} \dots 30^\circ\text{C}]$  je nach Bedarf auf das optimale Temperaturniveau eingestellt wird. Ist der Alterungsfortschritt hingegen gering, kann die Kühlanforderung reduziert werden [110].

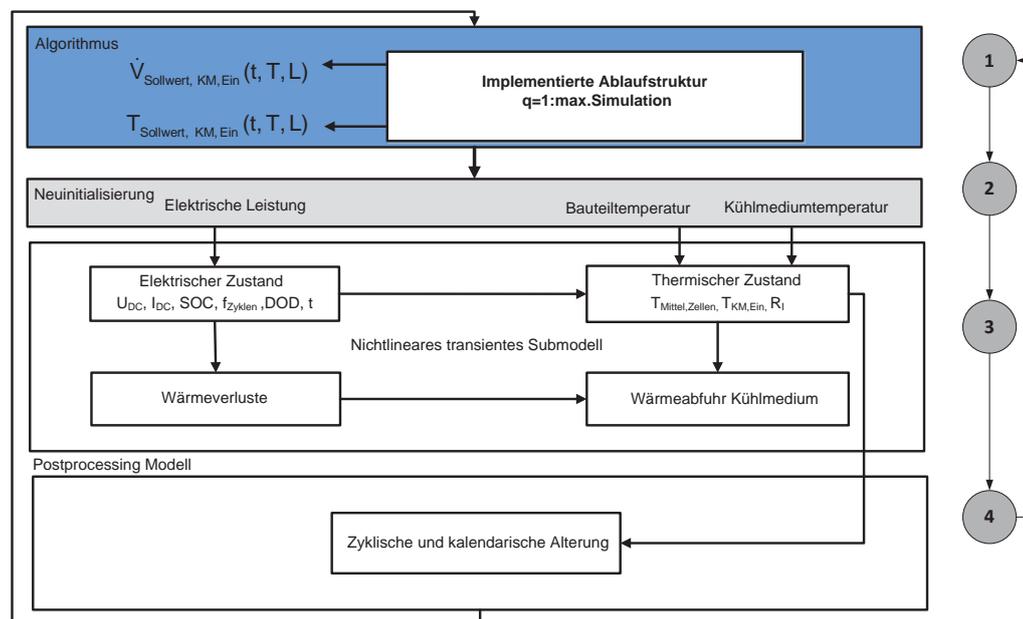


Abbildung 7.11: Flussdiagramm der thermischen Sollwertberechnung des Energiespeichers [110]

Die Höhe des bereits erreichten Kapazitätsverlustes ist jedoch nicht reversibel. Aufgrund der unterschiedlichen Schädigungsmechanismen im Nieder- als auch im Hochtemperaturbereich, konkretisiert in Abschnitt 2.5, können Lithium-Ionen-Eisenphosphat-Batterien irreversibel geschä-



digt werden. Für die Umsetzung des Verfahrens hinsichtlich des Energiespeichers wird, wie bereits in Unterabschnitt 4.5.4 beschrieben, der berechnete Gesamtkapazitätsverlust  $C_{\text{Verlust,Zellsystem}}$  als wesentliche Größe herangezogen. Das entworfene Grundprinzip des Algorithmus für die gezielte Regulierung der Kapazitätsabnahme ist abgebildet in Abbildung 7.12. Dieser Algorithmus setzt den Sollwert für die Zelltemperatur abhängig vom Fortschritt des gesamten Kapazitätsverlustes  $C_{\text{Verlust,Zellsystem}}(t)$  im Vergleich zu der Sollwertkurve  $C_{\text{Verlust,Soll}}(t)$ . Dies setzt voraus, dass der kalendarische und zyklische Kapazitätsverlust im Fahrzeug jährlich bestimmt und eine Vorausberechnung für das nächste Jahr durchgeführt wird.

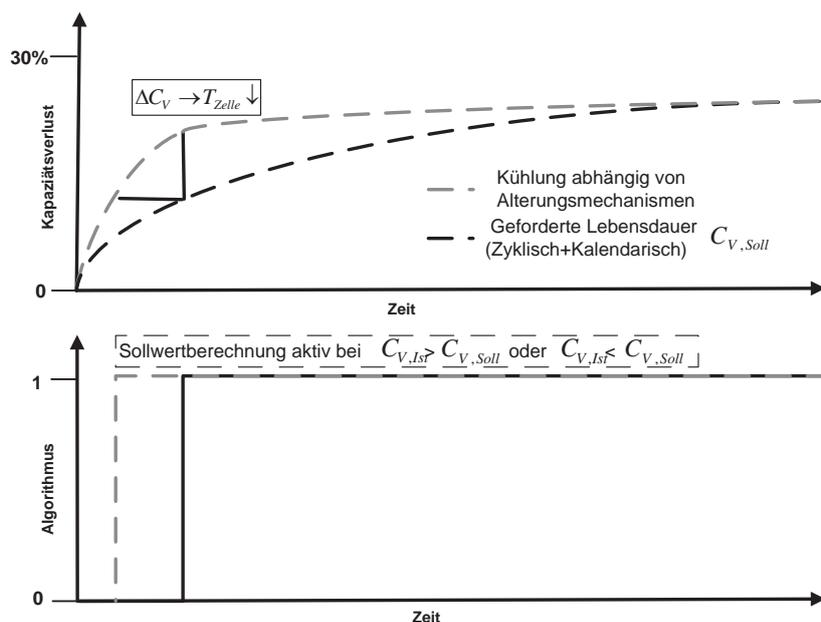


Abbildung 7.12: Sollwertberechnung für die Kühlwassertemperatur  $T_{\text{KM, Ein, Batterie}}(t)$  aufgrund des Kapazitätsverlustes  $C_{\text{Verlust,Soll}}(t)$

Der Wert des gesamten Kapazitätsverlustes  $C_{\text{Verlust,Zellsystem}}(t)$  wird nach jedem Zeithorizont mit dem entsprechenden Sollwert  $C_{\text{Verlust,Soll}}(t)$  verglichen, der weder stark über- noch unterschritten werden soll. Die Ermittlung des Kapazitätsverlustes erfolgt in dieser Maßnahme nach den Zeithorizonten ( $T, 2T, 3T, 4T, 5T, 6T, 7T, 8T, 9T, 10T$  mit  $T = 365$ ). Mit folgenden Verfahren kann zu Beginn die Bestimmung der Alterung im Allgemeinen für ein Lithium-Ionen-Zellsystem erfolgen.

Die Kapazitätsbestimmung kann, wie nachfolgend beschrieben, durchgeführt werden:

- Im Rahmen einer Fahrzeugmessung wird während eines Ladezyklus von 10% bis 98% die aktuelle Kapazität bestimmt
- $C_{\text{Verlust,Zellsystem}}(t) = C_{\text{Verlust,Zellsystem}}(2) - C_{\text{Verlust,Zellsystem}}(1)$

- Oder: Ein geeignetes thermisch-elektrisches Modell ermittelt die wesentlichen Größen Strom, Pulsdauer, Pulslänge, Temperatur und SOC. Eine nachgeschaltete Berechnung ermittelt den gesamten Kapazitätsverlust  $C_{V,Zellsystem}$  in Abbildung 7.11.

Im Hinblick auf eine frühestmögliche Beeinflussung des Kapazitätsverlustes der Zellen ist die Dimensionierung der Stufenregelung in thermischen kritischen Zyklen zu untersuchen. Die Abbildung 7.13 zeigt, dass im Fall von hohen Temperaturen die wirksamste Kühlung mit einem Wert von  $T_{Zellsystem} = 10^\circ\text{C}$  erst nach mehreren Zeithorizonten erreicht wird. Dies kann in der Zwischenzeit zu hohen irreversiblen Kapazitätsverlusten führen.

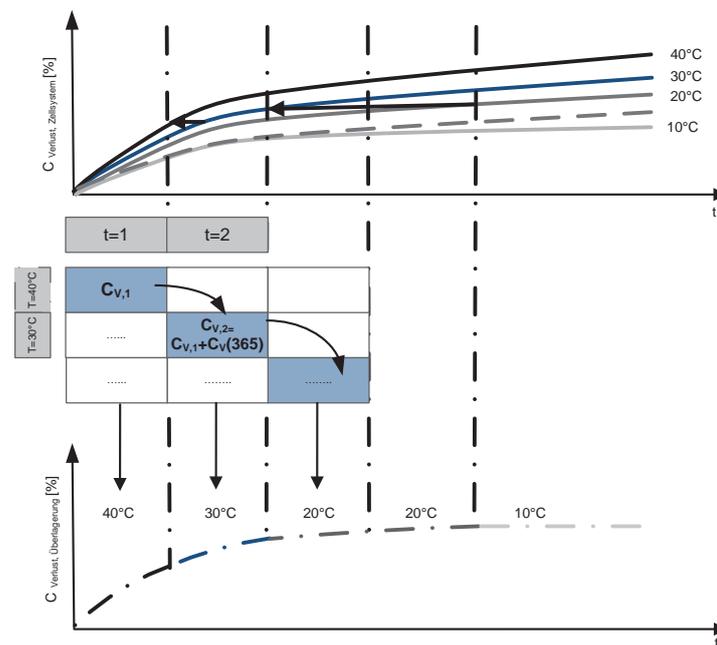


Abbildung 7.13: Auswirkung auf den gesamten Kapazitätsverlust durch die Temperaturänderung des Kühlwassers mittels Überlagerung

Durch den gezielten Eingriff auf die Steigung des Kapazitätsverlaufes kann anhand des Algorithmus sichergestellt werden, dass der geplante Kapazitätsverlust  $C_{Verlust}(\text{End of life})$  in allen thermisch-elektrischen Zuständen nicht deutlich überschritten wird.

Zugleich wird im Gegensatz zum Stand der Technik keine Begrenzung der elektrischen Leistung und der Verfügbarkeit an dem elektrischen Antriebsstrang vorgenommen. Verschiedene Hersteller, unter anderem Toyota, nehmen heute durch Einschränkung der zulässigen Leistung einen Einfluss auf die Lebensdauer in Kauf. Die Erhöhung der Kühlleistung im Kreis 1  $P_{Kühl,Kreis1}$  ist bei Bedarf in Anbetracht der Verlängerung der Lebensdauer hinzunehmen. Mit der gezielten Absenkung und Erhöhung der Bauteiltemperatur mit der Stellgröße Kühlwassertemperatur wird der Alterungsfortschritt  $\Delta C_{Verlust}$  bedarfsgerecht beeinflusst.

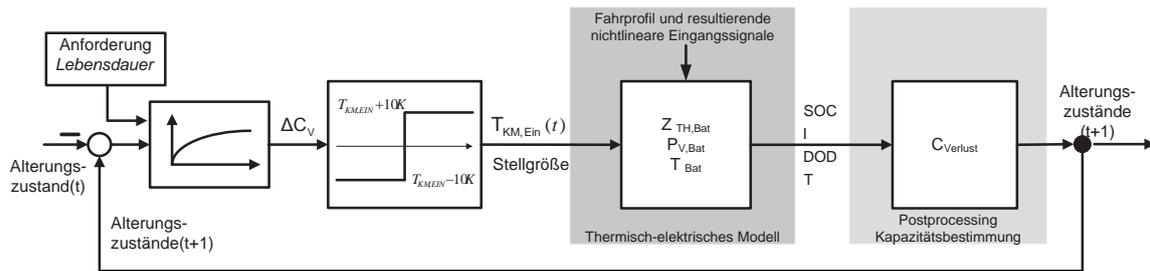


Abbildung 7.14: Algorithmus des Degradationsfortschritts der Zellen mit der Kühlwassertemperatur als Stellgröße

Abbildung 7.14 fasst den Ablauf in der Modellierung zusammen. Mit der Kühlwassertemperatur im Einlass als Stellgröße wird in der ersten Iterationsschleife auf den Alterungsfortschritt des Zellsystems reagiert. Gleichung 7.2 fasst das zusätzlich integrierte Skript zusammen. Abbildung 7.13 stellt die prinzipielle Absenkung der Zelltemperatur um 10K pro Jahr dar und zeigt den Ablauf der entwickelten Logik.

$$\begin{aligned}
 T_{KM,Ein} &\in [T_{KM,Ein,Min} = 10^{\circ}C, T_{KM,Ein,Max} = 40^{\circ}C] \\
 C_{Verlust,Soll}(t) &\iff C_{Verlust,Ist}(SOC, T_{Zellsystem}, I_{Zellsystem}, DOD) \\
 t &\in [1Tag, 3650Tage] \\
 \Delta t &= 365Tage \\
 \Delta T_{KM,EIN,Bat} &= 10K \\
 C_{V,Soll}(t) > C_V(t) &\iff \Delta T_{KM,EIN,Bat}(t+1) = -10K \\
 C_{V,Soll}(t) < C_V(t) &\iff \Delta T_{KM,EIN,Bat}(t+1) = +10K
 \end{aligned} \tag{7.2}$$

Im Folgenden wird dieser Stufenalgorithmus in weiteren Fahrbereichen analysiert und der Einfluss auf die Kapazitätsverluste simuliert. Für die weitere Beurteilung der vorgestellten Maßnahme werden desgleichen die thermischen Lastzyklen und Betriebsphasen, siehe Abschnitt 3.4, herangezogen. Die Einstellparameter und die Dimensionierung der Stufenregelung im Hinblick auf die Kapazitätsverlustbestimmung werden detailliert überprüft. Zu diesem Zweck werden verschiedene Fahrzyklen und Standphasen in die aufgebaute Simulationsumgebung eingestellt, variiert und berechnet.

### 7.3.1 Resultate der Autobahnfahrt und Konsequenzen der Erhöhung der Kühlwassertemperatur

In Abbildung 7.15 ist der berechnete Kapazitätsverlust im Zyklus SC03 über zehn Zeithorizonte für mehrere Initialisierungen der Temperatur aufgezeichnet. Die Einlasstemperatur ist pro Versuch mit  $T_{KM,Bat,Ein} = 40^{\circ}\text{C}$  und  $20^{\circ}\text{C}$  initialisiert, um die Auswirkung der Maßnahme unter verschiedenen thermischen Bedingungen abzu prüfen.

Tabelle 7.2: Initialisierte variable Parameter der Alterungsberechnung im Zyklus SC03

	Anteil	Zeit [h]	Temperatur <sub>Start</sub> [°C]	Volumenstrom [l/min]	SOC <sub>Start</sub> [%]
<i>i.</i>	Betriebsphase	0, 1656	40	2	90
<i>ii.</i>	Betriebsphase	0, 1656	20	2	90
<i>i.</i>	Standphase	23, 8344	40	keine Angabe	100
<i>ii.</i>	Standphase	23, 8344	20	keine Angabe	100

Aufgrund der Absenkung verändert sich die Steigung der Kapazitätsverlaufskurve. Der Kapazitätsverlust endet mit  $C_{\text{Verlust}}(\text{EoL}) = 38.60\%$  mit einem Startwert von  $T_{KM,Bat,Ein} = 20^{\circ}\text{C}$ , zu erkennen in Abbildung 7.15. Aufgrund der Temperaturanpassung nähern sich die simulierten Kapazitätsverläufe der Tests der Sollwertkurve an. Die Absenkung der Temperatur um 10K senkt die Steigung des jeweiligen Kapazitätsverlustes  $C_{\text{Verlust,Zellsystem}}$  erheblich. Grundsätzlich zeigt sich ein Kapazitätsunterschied von  $\Delta C_{\text{Verlust,Zellsystem}} = 5\%$ . Mit Eingriff werden insbesondere bei der hohen thermischen Initialisierung  $T_{\text{Zellsystem}} = 40^{\circ}\text{C}$  im zehnten Jahr die geforderten  $C_{\text{Verlust,Soll}} = 30\%$  nur leicht überschritten.

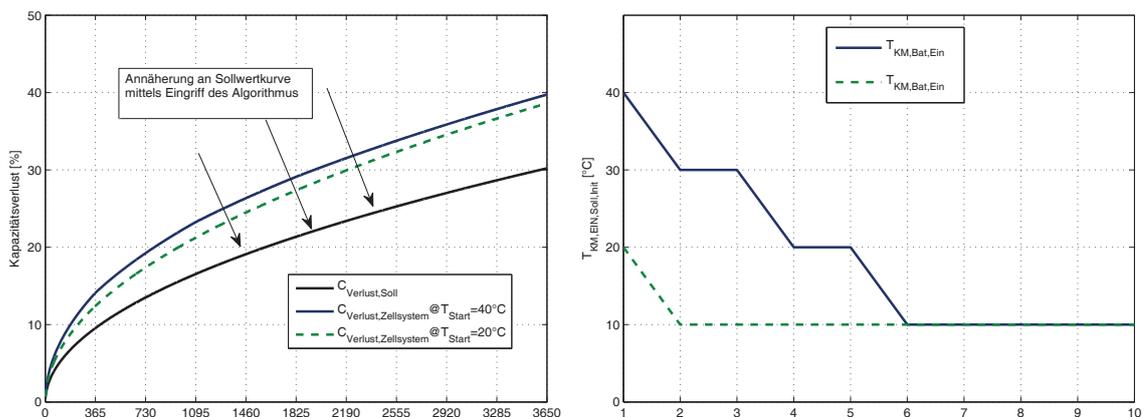


Abbildung 7.15: Angewendete Methode des SC03 mit  $T_{KM,Bat,Start} = 40^{\circ}\text{C}$  und  $20^{\circ}\text{C}$

Die Anwendung der Stellgröße (Kühlwassertemperatur) zeigt eine deutliche Reduzierung des Verlustes und bewirkt eine Annäherung des zeitlichen Verlaufes an die entwickelte Sollwertkurve, Abbildung 7.15.

### 7.3.2 Resultate in unkritischen Belastungsprofilen

Die Kapazitätsverluste aufgrund der kalendarischen und der zyklischen Alterung ermittelt bereits Abbildung 6.8. Tabelle 7.3 deklariert die eingestellten Parameter der Alterungsberechnung im Fahrzyklus NEFZ. Dieser wird als weiterer Lastfall herangezogen.

Tabelle 7.3: Initialisierte variable Parameter der Alterungsberechnung für den NEFZ

Anteil	Zeit [h]	Temperatur <sub>Start</sub> [°C]	Volumenstrom [l/min]	SOC <sub>Start</sub> [%]
Betriebsphase	0,3333	40	2	90
Standphase	23,6667	40	keine Angabe	100

Abbildung 7.16 zeigt die Messung als auch die Berechnung des thermisch-elektrischen Modells in dem Fahrzyklus mit der Kühlsituation  $T_{KM,Bat,Ein} = 40^{\circ}\text{C}$  und  $\dot{V} = 2 \text{ l/min}$ . Abbildung 7.16 zeichnet die wesentlichen Größen für die Anwendung der Ablaufstruktur auf.

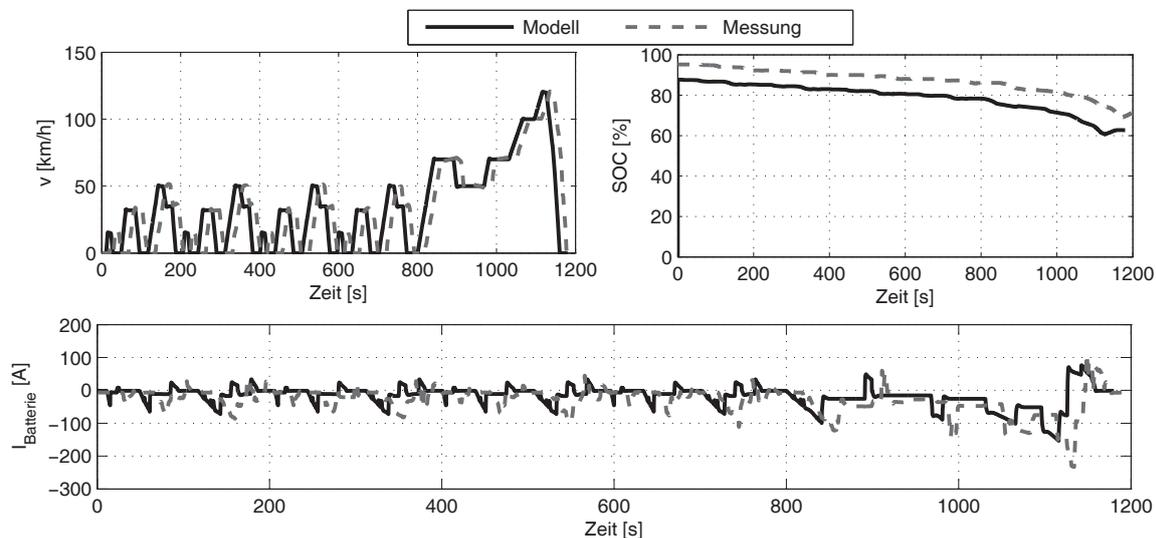


Abbildung 7.16: Wesentliche Systemgrößen Stromverlauf und SOC für die Degradationsbeeinflussung der Zellen im NEFZ

In diesem Fahrzyklus liegt der berechnete Kapazitätsverlust  $C_{V,Zellsystem}(3650) = 20,4676\%$  deutlich unter dem Sollwert  $C_{V,Soll}(3650) = 30\%$ . Dieses Ergebnis bestätigt Abbildung 6.8. Entsprechend der Initialisierung  $T_{KM,Bat,Ein} = 40^{\circ}\text{C}$  und der Wertbeschränkung von Gleichung 7.2 wird in diesem Zyklus, obwohl das Verfahren implementiert ist, kein Eingriff stattfinden.

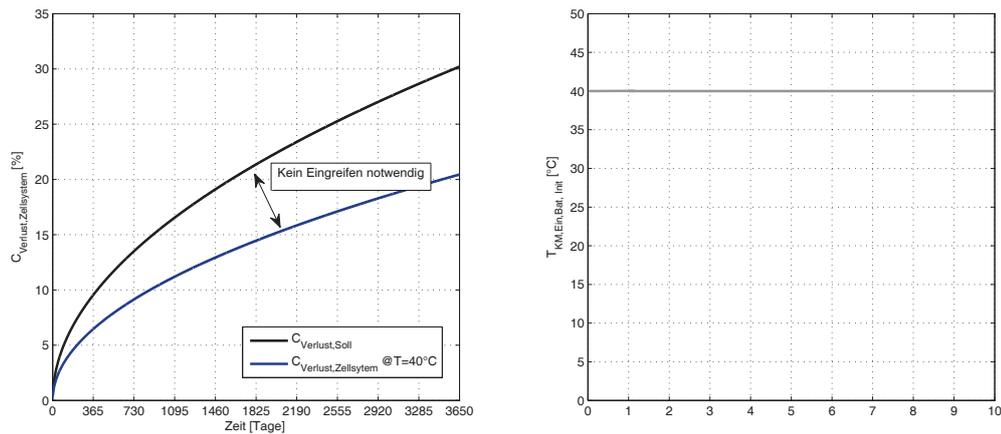


Abbildung 7.17: Degradation der Zellen im NEFZ und einer Standphase pro Tag unter den Bedingungen von  $T = 40^\circ\text{C}$ ,  $\dot{V} = 11/\text{min}$  und  $\text{SOC} = 100\%$

Die Kühlwassertemperatur ist auf den Startwert von  $T_{\text{KM,Bat, Ein}} = 40^\circ\text{C}$  gesetzt und wird durch die Logik des Algorithmus 10 Jahre gehalten, um die Kühlleistung zu minimieren. Eine Absenkung der Kühlwassertemperatur, um den gesamten Kapazitätsverlust zu reduzieren, ist in diesem Betriebsfall nicht notwendig. Durch die umgesetzte Begrenzung  $T_{\text{KM, Ein}} \in [10^\circ\text{C}, 40^\circ\text{C}]$  wird die Stabilität des Systems in der Modellierung gewährleistet.

### 7.3.3 Resultate im städtischen Verkehr und Auswirkung des Eingreifens

Für die weitere Versuchsreihe wird die Kühlwassertemperatur auf  $45^\circ\text{C}$ ,  $40^\circ\text{C}$  und  $20^\circ\text{C}$  gesetzt. Abbildung 7.18 verbildlicht die wesentlichen Systemgrößen in der Betriebsphase. Für die Annahme des UDDS und einer Standphase für  $40^\circ\text{C}$  wird exemplarisch ein Gesamtverlust von 38.66% ermittelt, siehe Tabelle 7.6.

Tabelle 7.4: Initialisierte variable Parameter der Alterungsberechnung für verschiedene Temperaturen im UDDS

	Anteil	Zeit [h]	Temperatur <sub>Start</sub> [°C]	Volumenstrom [l/min]	SOC <sub>Start</sub> [%]
<i>i</i>	Betriebsphase	0, 4583	45	2	90
<i>ii</i>	Betriebsphase	0, 4583	40	2	90
<i>iii</i>	Betriebsphase	0, 4583	20	2	90
<i>i</i>	Standphase	23, 5417	45	keine Angabe	100
<i>ii</i>	Standphase	23, 5417	40	keine Angabe	100
<i>iii</i>	Standphase	23, 5417	20	keine Angabe	100

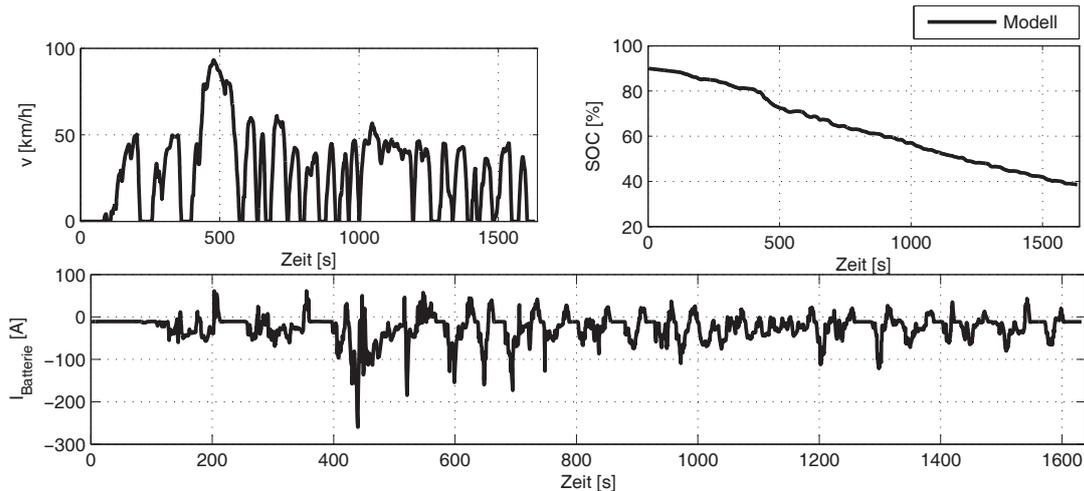


Abbildung 7.18: Regelung des Degradationsfortschritts der Zellen im UDDS aufgrund des Stromverlaufes und des SOC

Die Bestimmung der Kapazitätsverluste erfolgt unter der Annahme einer Stand- und Betriebsphase, definiert in Tabelle 7.4. Die Initialisierung der Post Processing-Funktion ist in Tabelle 7.4 dokumentiert. Mit Einsatz des Algorithmus kann eine Verbesserung auf 33.04% erzielt werden. Abbildung 7.19 zeigt die Ergebnisse des Algorithmus für die jeweilige Startkondition. Für 40°C wird ersichtlich, dass diese Maßnahme noch nicht ausreichend ist.

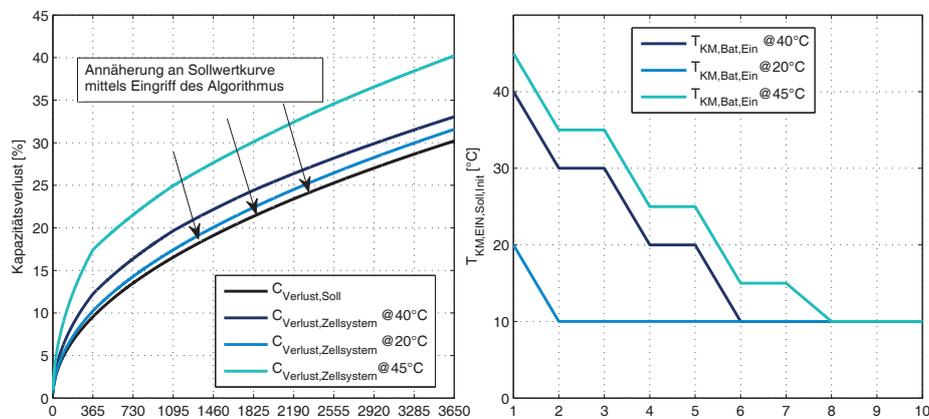


Abbildung 7.19: Angewendete Methode in dem UDDS mit den  $T_{KM,Bat,Ein} = 45^{\circ}\text{C}$ ,  $40^{\circ}\text{C}$  und  $20^{\circ}\text{C}$

Eine 10%ige Abweichung nach oben zum Sollwert liegt vor. Aufgrund dieses Ergebnisses, siehe Abbildung 7.19, muss nachfolgend für das Batteriesystem eine Bewertung der Dimensionierung der Stellgröße erfolgen. Es ist nicht zielführend, erst im fünften Horizont die effizienteste Temperatur zu erreichen. Nach jedem Zeithorizont ist es daher empfehlenswert, eine Delta-betrachtung durchzuführen und nach einer Klassifizierung dementsprechend bedarfsgerecht zu reagieren.

### 7.3.4 Dimensionierung der Stellgrößen für den Energiespeicher

Die bisherigen Untersuchungen haben gezeigt, dass ein Absenken der Kühlwassertemperatur um 10K den Kapazitätsverlauf verbessert, jedoch der irreversible Verlust bereits zu diesem Zeithorizont zu weit vorangeschritten ist. Des Weiteren wird mit Einsatz der stufenförmigen Absenkung, wie in Abbildung 7.15 und Abbildung 7.19 aufgezeichnet, erst nach mehreren Zeithorizonten die optimale Temperatur  $T_{KM,Bat,Ein} = 10^{\circ}C$  erreicht. Eine Analyse der Stellgröße ist daher sinnvoll, um das Verhalten zu verbessern. Ein frühzeitiger Alterungsfortschritt in den ersten Betriebsjahren muss mit Unterstützung der Algorithmen erkannt und zielgerichtet abgewendet werden. Tabelle 7.5 fasst die hergeleiteten Klassen für den Faktor zur bedarfsgerechten Einstellung der Sollwerttemperaturen des Energiespeichers zusammen. Die Parametrisierung der Variationen 1 bis 3 und deren Stellgrößen basieren auf den berechneten Erkenntnissen der Lebensdauer in Abhängigkeit der Zelltemperatur, siehe Abschnitt 4.5.

Tabelle 7.5: Grundsätzliche Dimensionierung der verschiedenen hergeleiteten Verstärkungsfaktoren für den Algorithmus

Variation	Kapazitätsverlust $\Delta C_{Verlust}$	Stellgröße $\Delta T_{KM,Bat,Ein}$
1.	$\Delta C_{Verlust} \in [0\% \dots + / - 1\%]$	$\Delta T = + / - 10K$
	$\Delta C_{Verlust} \in [+ / - 1\% \dots + / - 3,5\%]$	$\Delta T = + / - 20K$
	$\Delta C_{Verlust} > +3,5\% \text{ oder } \Delta C_{Verlust} < -3,5\%$	$\Delta T = + / - 30K$
2.	$\Delta C_{Verlust} \in [0\% \dots + / - 1\%]$	$\Delta T = + / - 10K$
	$\Delta C_{Verlust} \in [+ / - 1\% \dots + / - 2,5\%]$	$\Delta T = + / - 20K$
	$\Delta C_{Verlust} > +2,5\% \text{ oder } \Delta C_{Verlust} < -2,5\%$	$\Delta T = + / - 30K$
3.	$\Delta C_{Verlust} \in [0\% \dots + / - 1\%]$	$\Delta T = + / - 10K$
	$\Delta C_{Verlust} \in [+ / - 1\% \dots + / - 2,2\%]$	$\Delta T = + / - 20K$
	$\Delta C_{Verlust} > +2,5\% \text{ oder } \Delta C_{Verlust} < -2,2\%$	$\Delta T = + / - 30K$

Die Auswirkung der Temperaturvariation wird in Unterabschnitt 4.5.2 und Unterabschnitt 4.5.4 differenziert analysiert und dokumentiert. Der 3650. Tag dient als Referenzpunkt zur Dimensionierung der Stellgröße. Für  $\Delta C_{Verlust} \in [0\% \dots + / - 1\%]$  ist die Absenkung der Temperatur um 10K ausreichend. Für eine höhere Abweichung  $\Delta C_{Verlust} > 1\%$  wird eine Fallunterscheidung vorgenommen und je nach Bedarf eine Absenkung oder eine Erhöhung um 20K oder 30K angefordert. Die Kurven der temperaturabhängigen kalendarischen Alterung, siehe Unterabschnitt 4.5.4, bilden die Grundlage des Verfahrens.

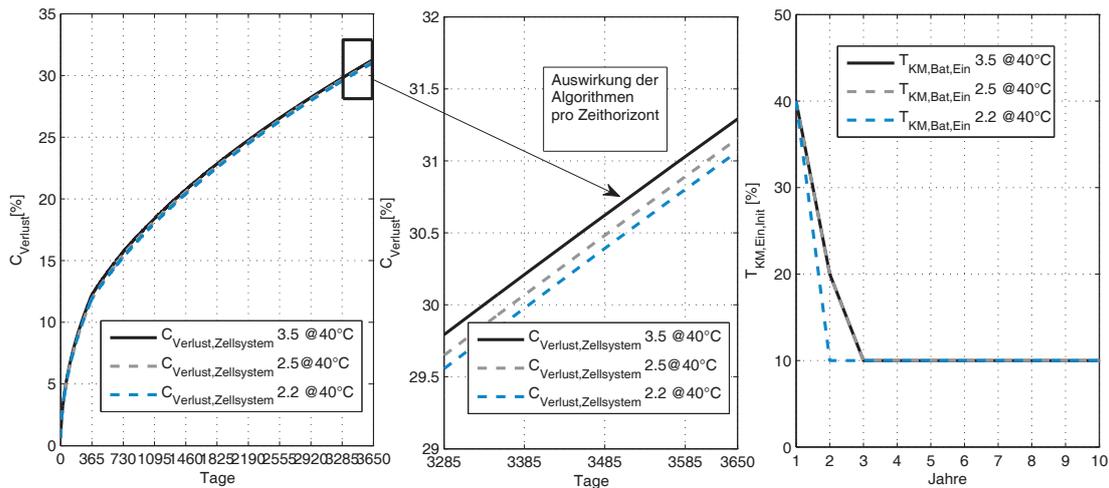


Abbildung 7.20: Vergleich der neuen Methoden mit dem UDDS mit  $SOC_{Start,Betrieb} = 90\%$  und einer Standphase mit  $SOC_{Start,Stand} = 100\%$

In Unterabschnitt 4.5.4 zeigt die Abbildung 4.49 durch eine Herabsetzung von der 40°C-Kurve auf die 30°C-Kurve nach dem zehnten Jahr eine Verbesserung um 3,5%. Der zyklische Einfluss wird den Kapazitätsverlust zusätzlich beeinflussen. Für die nachstehenden Untersuchungen werden diese verschiedenen Varianten der Parameter in der Modellierung hinterlegt und die Reaktionsfähigkeit in Abbildung 7.3.4 verglichen. Die Verbesserung der Schnelligkeit soll anhand einer Klassifizierung der erkannten Abweichung  $\Delta C_V$  erfolgen. Die unterschiedlichen Parametrisierungen werden in der Simulation exemplarisch in den Zyklen UDDS und SC03 mit  $T_{Start} = 40^\circ C$  getestet.

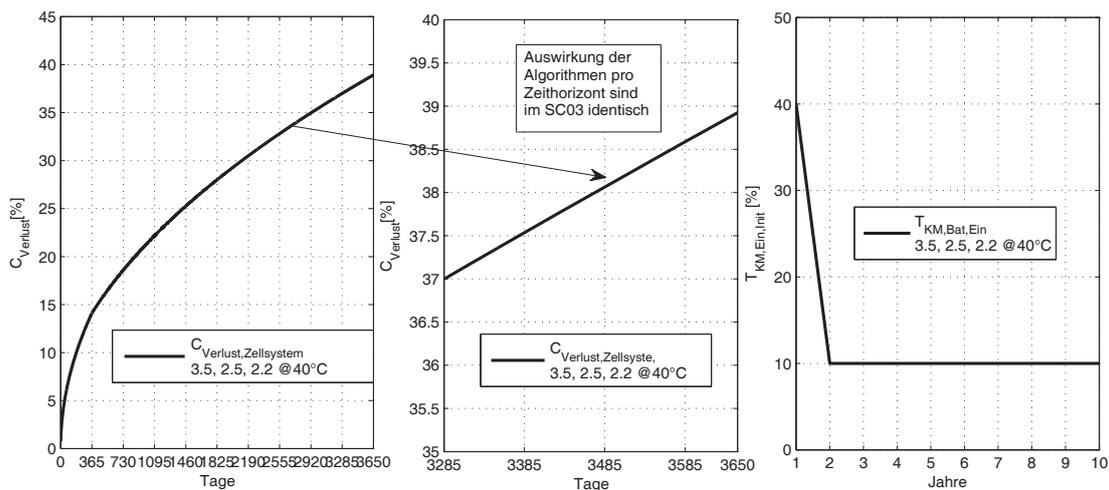


Abbildung 7.21: Vergleich der neuen Methoden mit dem SC03 mit  $SOC_{Start,Betrieb} = 90\%$  und einer Standphase mit  $SOC_{Start,Stand} = 100\%$

Die Verbesserung der Reaktionsgeschwindigkeit erfolgt bei allen Modifikationen des Algorithmus für die eingestellte Batteriekonditionierung. Insbesondere der Algorithmus 2.2 (Variation [3.](#)) verhält sich, wie es erforderlich ist. Die Auswirkung des zügigen und bedarfsgerechten Einstellens von  $\Delta T_{KM,Bat,Ein}$  spiegelt sich in dem verringerten Kapazitätsverlust  $C_{V,Zellsystem} = 32,27\%$  nach zehn Jahren wieder. Diese Parametrisierung wird in Alternative [1.](#) angewandt und im folgenden mit den Alternativen [2.](#) und [3.](#) im UDDS und SC03, wie angekündigt, zusammengefasst und differenziert verglichen.

## 7.4 Vorteile der neuartigen Kühlungsalgorithmen

Tabelle 7.6 fasst die Ergebnisse der neuen entwickelten Algorithmen im Fahrzyklus UDDS zusammen und zieht einen Vergleich zwischen zwei beispielhaften Konditionierungen. Die Ergebnisse beweisen eine Absenkung der gesamten Kapazitätsverluste der Batterie durch den Einsatz der lebensdauerorientierten Stufenalgorithmen bis zu  $-\Delta C_{Verlust} = 5,26\%$ . Aufgrund der Neudimensionierung des Algorithmus 3.5 als auch 2.5 kann diese Verringerung weiter auf  $-\Delta C_{Verlust} = 6,01\%$  mit  $T_{Start} = 40^\circ C$  erhöht werden.

Der Algorithmus 2.2 erzielt sogar  $-\Delta C_{Verlust} = 6,39\%$  mit  $T_{Start} = 40^\circ C$ .

Tabelle 7.6: Vergleich der Algorithmen im Zyklus UDDS mit  $SOC_{Start,Betrieb} = 90\%$  und einer Standphase mit  $SOC_{Start,Stand} = 100\%$

Lebensdauer [%]	$T_{Start}$ [ $^\circ C$ ]	Algorithmus				
		Ohne	Stufen	3.5	2.5	2.2
$C_{Verlust}$	40	0,3866	0,3304	0,3265	0,3227	0,3106
$C_{Verlust}$	20	0,323	0,3157	0,3037	0,3037	0,3037
$L_{IGBT,Sum}$	80	1,6995	1,0051	0,9745	0,9745	0,9737
$L_{IGBT,Sum}$	40	0,5348	0,9914	0,9679	0,9679	0,9679
$L_{Diode,Sum}$	80	1,0650	0,6314	0,6213	0,6219	0,6214
$L_{Diode,Sum}$	40	0,3420	0,6316	0,6265	0,6265	0,6265

Wie bereits ermittelt, wird ohne Anwendung eines Algorithmus, die Anforderung der prozentualen Lebensdauererbräuche der Leistungselektronik mit  $T_{Start} = 80^\circ C$  über- oder mit  $T_{Start} = 40^\circ C$  weit unterschritten. In jeglichen thermischen Randbedingungen kann nur mit Anwendung des entwickelten Stufenalgorithmus die Sollwertkurve eingehalten werden. Tabelle 7.6 belegt die Erwartung, dass der Algorithmus 2.2 die richtige Variation der Stellgröße zu Grunde legt. Bei niedrigeren Temperaturen  $T_{Start} = 20^\circ C$  wirken die Algorithmen 3.5, 2.5, 2.2 aufgrund der Wertbeschränkung der Sollwerttemperatur identisch. Abbildung 7.22 verbildlicht die vorteilhafte Reduzierung des Kapazitätsverlustes. In der Realität wird es einen



Querschnitt von unterschiedlichen Temperaturen geben. Mit der Annahme einer initialisierten Kühlwassertemperatur  $T_{KM,EIN,LE} = 80^{\circ}C$  wird ein kritischer prozentualer Lebensverbrauch  $L_{IGBT} = 169\%$  ohne Eingriff ermittelt.

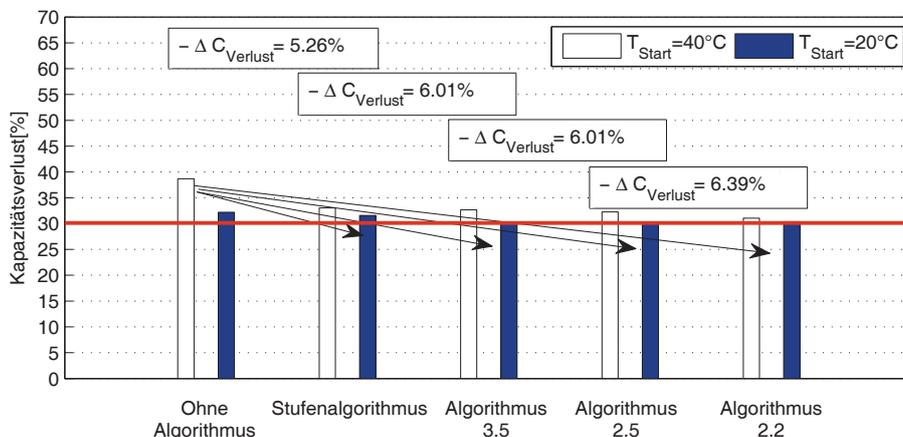


Abbildung 7.22: Reduzierung der Kapazitätsverluste mit Anwendung der neuen lebensdauerorientierten Methoden im UDDS

Mit der eingestellten Kühlwassertemperatur  $T_{KM,EIN,LE} = 80^{\circ}C$  wird ein kritischer prozentualer Lebensverbrauch  $L_{IGBT} = 169\%$  ohne eine Maßnahme erreicht. Die Erkenntnisse in Abbildung 7.23 zeigen insbesondere eine hohe Empfindlichkeit des IGBTs. Die Dioden sind geringer thermisch beansprucht. Der Augenmerk liegt daher auf  $L_{IGBT}$ . Dieser wird daraufhin mit gezieltem Einsatz der stufenweisen Absenkung der Kühlwassertemperatur beträchtlich vermindert  $L_{IGBT} = 100\%$  werden. Die geforderte Zuverlässigkeit wird explizit mit dem neuen Algorithmus erzielt, Abbildung 7.23.

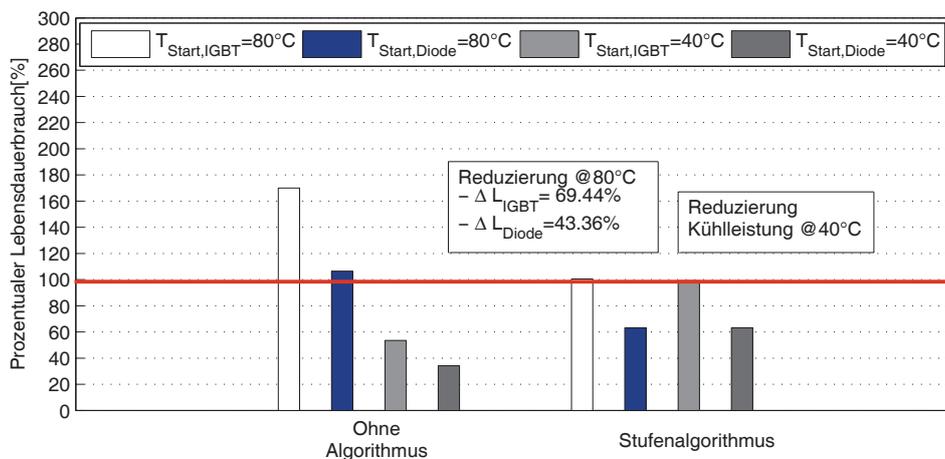


Abbildung 7.23: Einstellung der prozentualen Lebensdauererbräuche mit Anwendung der neuen Methoden im UDDS im Hinblick auf die Effizienzsteigerung

Demgegenüber wird mit der initialisierten Kühlwassertemperatur  $T_{KM,EIN,LE} = 40^{\circ}\text{C}$  lediglich ein sehr geringer Verbrauch ermittelt  $L_{IGBT} = 53,48\%$ . In diesem Fall werden die Kühlwassertemperatur im Stufenalgorithmus und zu hohe Kühlleistungen des Kühlkreises 2 reduziert. Mit dem Stufenalgorithmus liegt zudem der Endwert  $L_{IGBT} = 102\%$  nach Tabelle 7.1 in dem geforderten Bereich.

Tabelle 7.7: Vergleich der Algorithmen im Zyklus SC03 mit  $\text{SOC}_{\text{Start,Betrieb}} = 90\%$  und einer Standphase mit  $\text{SOC}_{\text{Start,Stand}} = 100\%$

Lebensdauer [%]	$T_{\text{Start}} [^{\circ}\text{C}]$	Algorithmus				
		Ohne	Stufen	3.5	2.5	2.2
$C_{\text{Verlust}}$	40	0,4462	0,3974	0,3894	0,3894	0,3894
$C_{\text{Verlust}}$	20	0,3926	0,3860	0,3860	0,3860	0,3860
$L_{IGBT,\text{Sum}}$	40	0,7935	1,0273	1,0289	1,0289	1,0289
$L_{IGBT,\text{Sum}}$	80	257,25	1,0868	1,0868	1,0868	1,0868
$L_{\text{Diode},\text{Sum}}$	40	0,7861	0,7872	0,7872	0,7872	0,7872
$L_{\text{Diode},\text{Sum}}$	80	193,95	0,8316	0,8316	0,8316	0,8316

Um die Stabilität der Maßnahmen in einem weiteren Fahrbereich zu testen, werden die Algorithmen im SC03 mit Einstellung derselben Initialisierung des Antriebsstranges in gleichem Maße analysiert.

Tabelle 7.7 verdeutlicht, dass mit dem Stufenalgorithmus gleichermaßen eine deutliche Verringerung des Kapazitätsverlustes  $-\Delta C_{\text{Verlust}} = 4,88\%$  erzielt wird. Die Dimensionierung ist in diesem Anwendungsfall nicht ausschlaggebend.

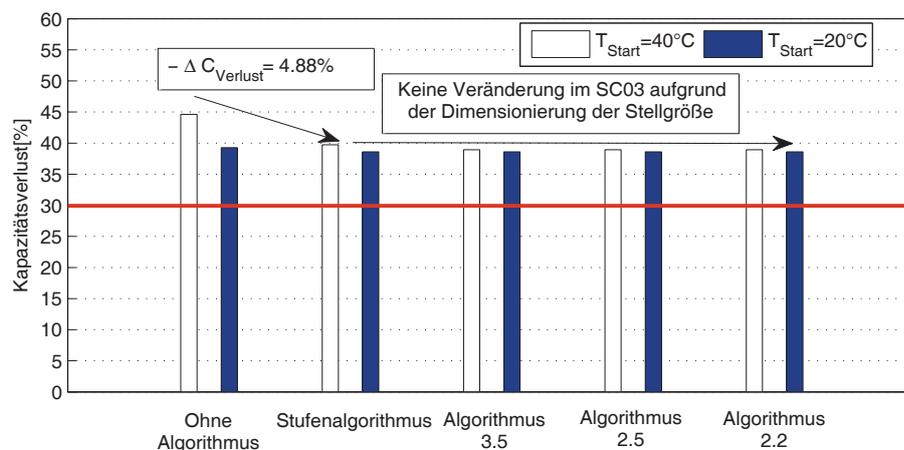


Abbildung 7.24: Reduzierung der Kapazitätsverluste mit Anwendung der neuen lebensdauerorientierten Methoden im SC03

Die prozentualen Lebensdauererbräuche der IGBTs  $L_{IGBT} = 257\%$  und  $L_{Diode} = 194\%$  sind hingegen für die thermische Bedingungen  $T_{KM,EIN,LE} = 80^{\circ}\text{C}$  sehr kritisch. In diesem thermischen Lastzyklus ist ein Eingriff zwingend erforderlich. Der Stufenalgorithmus bewirkt eine hohe Absenkung der mittleren Temperaturen, Temperaturamplituden sowie eine Erhöhung der Zyklen bis zum Ausfall  $Nf_{i,j}$ . Die prozentualen Lebensdauererbräuche berechnen sich daraufhin mit der Miner-Regel  $L_{IGBT} = 108\%$  und  $L_{Diode} = 83\%$ .

Die thermischen Bedingungen  $T_{KM,EIN,LE} = 40^{\circ}\text{C}$  zeigen, wie bereits im UDDS erkannt, keine hohen Belastungen  $L_{IGBT} = 79\%$  und  $L_{Diode} = 76\%$ . Aufgrund dessen wird die Kühlwassertemperatur mit Einbezug der Zuverlässigkeit angehoben. Die Zielerforderung der Zuverlässigkeit wird mit  $L_{IGBT} = 102\%$  erfolgreich eingehalten.

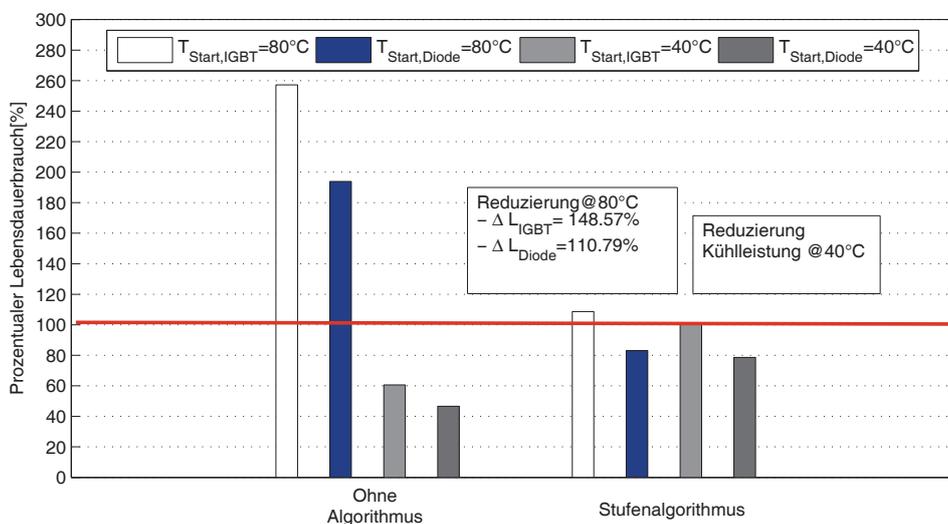


Abbildung 7.25: Einstellung der prozentualen Lebensdauererbräuche mit Anwendung der neuen Methoden im SC03 im Hinblick auf die Effizienzsteigerung

Im Hinblick auf die Batterie zeigt der Algorithmus 2.2 den effektivsten Einfluss auf die geforderte Lebensdauer in verschiedenen Kühlsituationen. Der Verschleiß der Halbleiter hängt stark von der gesetzten Einlasstemperatur ab. Sowohl in zu hohen als in zu geringen Temperaturniveaus ergeben sich Vorteile durch die Anwendung des Algorithmus. Die Vorteile sind sowohl die Lebensdauererhöhung als auch die Effizienzsteigerung der Kühlsysteme. Die eingesparte Leistung wird im elektrischen Betrieb des Fahrzeugs eine höhere Reichweite für den Fahrer bedeuten.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Die Hochvoltsystemebene in alternativen Antrieben besitzt thermische Charakteristika, die für die Integration in das Fahrzeug wesentliche Einflussfaktoren darstellen. Die Alterungsmechanismen in den Hochvoltkomponenten werden von den elektrischen Zuständen und den thermischen Einflüssen stark beeinflusst. Jedes Bauelement benötigt aufgrund seiner Werkstoffeigenschaften ein spezifisches thermisches Betriebsfensters. Insbesondere die Wicklungen, die Isolationen sowie die Magneten in den elektrischen Maschinen werden durch thermomechanische Beeinflussungen irreversibel geschädigt. Die Geometrie, der Verbindungsaufbau, die Temperaturen in den Sperrschichten und den Substraten, die Wärmeverluste und die thermomechanischen Belastungen führen in den Leistungselektroniken zu Ermüdungen und Rissen in den Materialien. Die Mechanismen im Nieder- und im Hochtemperaturverhalten der Lithium-Ionen-Batterien verschlechtern deren Leistungsfähigkeit und reduzieren damit die Kapazität sowie die elektrische Reichweite.

Das thermisch-elektrische Verhalten ist folglich ausschlaggebend für die Zuverlässigkeit. Aus dieser Erkenntnis folgt die Notwendigkeit, die Schädigungsmechanismen und deren Temperaturabhängigkeit für die Bauteile in jeglichen klimatischen Bedingungen und Betriebszuständen mit hoher Genauigkeit zu beschreiben.

Aufgrund der Komplexität des Hochvoltsystems und den vielen resultierenden thermischen Eigenschaften besteht die Notwendigkeit eines gesamtheitlichen Wärmemanagements. In der Forschung und Entwicklung werden aktuell elektrische Deratingstrategien eingesetzt. Die Auslegung der Konditionierung erfolgt nach Extremwert-Kriterien und maximalen Verlusten. In einigen Studien wird ein bedarfsgerechtes Wärmemanagement nach rein energetischen Aspekten bereits betrachtet und umgesetzt. Wesentliche Zielsetzungen, die bisher nicht zusammenhängend vertieft wurden, sind die elektrische Verfügbarkeit, die Effizienzsteigerung und die Lebensdauereinhaltung des Gesamtsystems. Diese veranlassen eine neue Betrachtung der Anforderungen jeder einzelnen Komponente als auch der Wechselwirkungen zu den anderen Systemen im Wärmemanagement. Das Ergebnis dieses ganzheitlichen Ansatzes ist, dass mit Umsetzung einer neuen Konzeption der Kühlungsansteuerung im Hinblick auf die Effizienz und die Lebensdauer das System bedarfsgerechter und effizienter gestaltet werden kann.

Für die Analyse und Umsetzung der neu entwickelten Methodik wird eine Simulationsumgebung in Anbetracht der Zielsetzungen benötigt und im Rahmen dieser Arbeit entworfen. Ein vorhandenes Modell aus den Verbrauchsberechnungen kann als Basis benutzt werden. Dieses muss insbesondere für die Hochvoltsystemebene erweitert und parametrisiert werden. Grund-



legend wird die Fahrdynamik, die Betriebsstrategie und das Energiemanagement in Abhängigkeit von den thermischen Umgebungsbedingungen und elektrischen Zuständen abgebildet. Der Schwerpunkt der Berechnungen ist das Hochvoltsystem, insbesondere die Betrachtung der Wärmeverluste und der Alterungsmechanismen. Die thermischen Modelle der Komponenten sind mit Hilfe von thermisch-elektrischen Ersatzschaltbildern und den Wärmeübergängen von der Wärmequelle bis hin zur -senke abgebildet. Die thermischen Widerstände und Kapazitäten der Werkstoffe sind anhand vermessener Daten hinterlegt. Diese Umsetzung liefert als Resultat eine Berechnung der transienten Leistungen, des Ladezustandes, der Wärmeverluste, der Bauteil- und Kühlmedientemperaturen in der realen Fahrzeugumgebung. Die Wechselwirkungen zwischen den elektrischen Verlusten, den Wärmequellen und -senken werden in spezifischen Klimabedingungen berechnet. Es werden Verlustbestimmungen durchgeführt und kritische Wärmegenerierungen in einzelnen Betriebszuständen ermittelt. In den Berechnungen wird ersichtlich, dass unter anderem die betriebspunktabhängigen ohmschen Verluste und Ummagnetisierungsverluste in dem elektrischen Betrieb keine kritischen Bereiche erreichen. In der Leistungselektronik sind die Wärmeverluste der IGBTs und der Dioden hingegen stark abhängig von dem Phasenstrom, der Zwischenkreisspannung, der Schaltfrequenz, dem Leistungsfaktor und dem Modulationsindex. In realen Zyklen kann insbesondere der hohe Phasenstrom kritische Verluste verursachen. Die resultierenden Temperaturen der Sperrschichten werden anhand der Kühlwassertemperatur als auch des Volumenstroms im gleichen elektrischen Zustand stark abgesenkt oder angehoben.

Die Verluste der Batterie hängen von dem Zellstrom, dem Innenwiderstand und dem Ladezustand ab. Mit der durchgeführten Variation der Kühlwassertemperatur wird ein zu hoher Temperaturanstieg in den Zellen vermieden.

Nach Erhalt der Berechnungsergebnisse werden zwei Alterungsbestimmungen für die Leistungselektronik und die Batterie nachgeschaltet (post processing). Die explizit ausgewählten Berechnungsmethoden der Zuverlässigkeit sind aktuell allgemein anerkannte Verfahren und werden in der Simulationsumgebung hinterlegt.

Die prozentualen Lebensdauererbräuche sind die Indikatoren der thermischen Beanspruchungen der Leistungselektronik. Sowohl die mittleren Temperaturen als auch die Temperaturamplituden der Sperrschichten werden mit dem Rainflowalgorithmus ausgewertet. Die Ergebnisse des Rainflow-Algorithmus zeigen, dass insbesondere die Temperaturgradienten und mittleren Temperaturen der Sperrschichttemperatur kritisch werden können. Mit Anwendung des Coffin Manson-Gesetzes und dem Arrhenius-Koeffizienten wird die Anzahl der Zyklen bis zum Ausfall in Abhängigkeit der Betriebsstunden berechnet. Die Miner-Regel liefert anschließend den prozentualen Lebensdauerverbrauch. Dies führt zur Erkenntnis, dass die Auswirkung der Kühlwassertemperatur auf diese Lebensdauererbräuche erheblich ist.

Die kalendarischen und zyklischen Kapazitätsverluste bilden den Hauptindikator des Alterungsfortschrittes von Lithium-Ionen-Batterien. Dieser hängt entscheidend von dem Strom- und dem

Ladeverhalten als auch der Zelltemperatur im Laufe der Zeit ab. Im fortgeschrittenen Alterungszustand erhöht sich der Innenwiderstand des Zellsystems; demzufolge nehmen die Wärmeverluste zu. Der kalendarische Alterungsfortschritt kann sich je nach Zelltemperatur und der Standzeit beträchtlich unterscheiden. Folgende Tatsachen wurden durch die Berechnung festgestellt. Der zyklische Kapazitätsverlust wird von der Pulslänge und der Pulshöhe des Zellstroms geprägt. Die Pulslänge bewirkt einen hohen Alterungsfortschritt. Der Gesamtkapazitätsverlust ist im ersten Jahr am höchsten. In den restlichen Jahren schreitet der Kapazitätsverlust nur gering voran. Die Prognose der Kapazitätsverluste als auch der Lebensdauererbräuche wird in definierten Stand- und Betriebsphasen für jedes Jahr simuliert und bestimmt.

Mit Anwendung der entworfenen Simulationsmethodik können Hochvoltssysteme energetisch sowie thermisch und deren Zuverlässigkeit in früher Entwicklungsphase abgebildet und ausgelegt werden. Der Einfluss der Schnittstellen, unter anderem der Insassenkomfort, kann für andere Zielsetzungen erweitert und analysiert werden. Ein Modell des Verbrennungsmotors und des Hochtemperaturkühlkreislaufes ist simulativ angekoppelt. Aufgrund der Anwendung von Ersatzschaltbildern der Komponenten ergibt sich eine verwendungsfähige Rechenzeit. Das Niederspannungsbordnetz und die Grundlasten werden mit Konstanten hinterlegt.

Ein Versuchsträger wird mit definierter Messtechnik ausgestattet. Diese spezielle Messausrüstung ermöglicht die Erfassung des energetischen und thermischen Verhaltens des Hochvoltsystems. Mittels der experimentellen Untersuchungen im Klimawindkanal werden die Wärmeübergänge in den Materialien erfasst. Die Auswertung der Radiation zur Umgebungsluft zeigt keinen Einfluss auf die thermischen Beanspruchungen der Bauteile. Die Wärmeübertragung über die Gehäuse in die Umgebungsluft wird daher nicht in den Untersuchungen berücksichtigt.

In ausgewählten Fahrzyklen, die sich durch den energetischen Fluss in den Hochvoltkomponenten maßgeblich unterscheiden, wird eine erfolgreiche Validierung durchgeführt. Dies dient der Überprüfung der wesentlichen Signalen der Komponenten. Im Fokus liegt das rein elektrische Fahren, um die elektrischen Wechselwirkungen ohne den überlagerten verbrennungsmotorischen Betrieb untersuchen zu können. Es werden reale Fahrbereiche eines Kunden in warmen und kalten Umgebungsbedingungen vermessen und berechnet. Mit der eingesetzten Messtechnik werden die definierten elektrischen Signale und die Temperaturen anhand der platzierten Sensorik in verschiedenen Fahrzuständen erfasst.

Die Betriebsstrategie und die thermisch-elektrischen Ersatzschaltbilder werden abgeglichen und auf ihre Qualität überprüft. Das Leistungsverhalten der Batterie in Abhängigkeit von der Zelltemperatur, dem Zellstrom und dem Ladezustand wird zusätzlich mit Kennfeldern neben dem Batteriemodell abgebildet. Die Auswertung des Ladeverhaltens weist eine hohe Abhängigkeit zwischen Temperatur und Leistungsfähigkeit der Batterie nach. Die erzielten Validierungsergebnisse zeigen zudem, dass die thermisch-elektrischen Ausgangssignale der Subsysteme eine hohe Güte aufweisen.



Die neu entwickelten Algorithmen ordnen dem jeweiligen Alterungsfortschritt des Bauteils eine Sollwerttemperatur des Kühlwassers zu. Die Beeinflussung der Lebensdauer der empfindlichsten Bauteile erfolgt mit Hilfe der Einlasstemperatur des Kühlmediums als thermischer Stellgröße für die betroffene Hochvoltkomponente. Die entwickelten lebensdauer- und effizienzorientierten Maßnahmen werden nach der Validierung in die Simulationsumgebung integriert. Je nach Spezifikation wird jeder Komponente eine Soll-Lebensdauer sowie eine zugelassene Abweichung zugeordnet. Die thermisch-elektrische Simulation und die Lebensdauerberechnungen werden mit den Algorithmen auf Grundlage der Zuverlässigkeitsanforderungen erweitert. Die generierten Sollwertkurven der Leistungselektronik und der Batterie liefern die Referenzwerte für die Algorithmen. Die entworfenen Methoden werden auf ihre Potentiale, wie die energetische Effizienz und die höchstmögliche Lebensdauer, in den Fahrzyklen UDDS und SC03 untersucht.

Ein Vergleich zwischen dem Istzustand und den innovativen Maßnahmen liefert die Bestätigung, dass diese die Zielsetzungen erreichen. Die Eingriffe der Algorithmen zeigen in verschiedenen Temperaturniveaus einen zielgerichteten Einfluss auf die Lebensdauererbräuche der Halbleiter sowie auf die Kapazitätsverluste des Zellsystems. Aufgrund dieser auf die Alterung abgestimmten bedarfsgerechten Kühlung kann diese in kritischen Betriebspunkten verringert werden. In unkritischen Betriebspunkten wird der energetische Aufwand der Kühlsysteme reduziert. Es wird der Nachweis erbracht, dass die beschriebenen Maßnahmen ein bedarfsgerechtes Konditionieren ermöglichen. Diese erreichen die Zielsetzungen, die Lebensdauer zu erhöhen oder die Effizienz zu verbessern.

Die erarbeiteten Methoden können nun in einem nächsten Schritt in konkreten Umsetzungen in Plug-In-Fahrzeugen und Elektrofahrzeugen detailliert werden. Die Anpassung der Kühlwasservorgaben kann heute bei den Serviceintervallen erfolgen. Bei zukünftig vorgesehenen Online-Datenerfassungen kann bei Bedarf reagiert werden. Die entsprechenden Bedingungen und die Umsetzung in Software sind die Aufgabe für zukünftige Anstrengungen.

## Literaturverzeichnis

- [1] HACKBARTH, A.; MADLENER, R.; SCHÜRMAN, G.: Plug-in-Hybridfahrzeuge: Marktentwicklung, Marktchancen und ökonomisch interessante Fragestellungen. In: *Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior, RWTH Aachen Themenbereich 5: Mobilität: Womit fahren wir morgen?*(2010)
- [2] LESCOT, J.; SCIARRETTA, A.: On the integration of optimal energy management and thermal management of hybrid electric vehicles. In: *Vehicle Power and Propulsion Conference IEEE 1*(2010)
- [3] SCHRAMM, D.; HILLER, M.; BARDIN, R.: *Modell eines typischen komplexen Gesamtfahrzeugs*. Springer Berlin Heidelberg, 2010
- [4] WEI, L.: *Introduction to hybrid vehicle system modeling and control*. Wiley, 2013
- [5] LANGE, S.; SCHIMANSKI, M.: *Energiemanagement in Fahrzeugen mit alternativen Antrieben*, Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen, Technische Universität Braunschweig, Deutschland, Diss., 2007
- [6] WILDE, A.: *Eine modulare Funktionsarchitektur für adaptives und vorausschauendes Energiemanagement in Hybridfahrzeugen*, Technische Universität München, Deutschland, Diss., 2009
- [7] REIF, K.: *Konventioneller Antriebsstrang und Hybridantriebe*. Vieweg + Teubner, 2012
- [8] *Amtsblatt der Europäischen Union, Regelung Nummer 101 der Wirtschaftskommission der Nationen für Europa UN/ECE, 2013*
- [9] WÖHL-BRUHN, H.: *Synchronmaschine mit eingebetteten Magneten und neuartiger variabler Erregung für Hybridantriebe*, Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen, Technische Universität Braunschweig, Deutschland, Diss., 2010
- [10] STEINBERG, P.: *Wärmemanagement des Kraftfahrzeugs V*. Bd. 93. Expert Verlag, Haus der Technik, 2006
- [11] BRAESS, H.; SEIFFERT, U.: *Handbuch der Kraftfahrzeugtechnik*. Vieweg Verlag, 2007

- [12] BÄKER, B.; MORAWIETZ, L. ; . (Hrsg.): *Energy Efficient Vehicle Technology II*. Expert Verlag, 2012
- [13] SCHEPS, J.: *Thermische Simulation elektrischer Maschinen in Hybridfahrzeugen*, Technische Universität Berlin, Deutschland, Diplomarbeit, 2013
- [14] WARBINEK, K.: *Über die Alterung und Lebensdauer von Wicklungen in elektrischen Maschinen bei hohen Temperaturen*, Universität Kassel, Deutschland, Diss., 1981
- [15] ECKHARDT, W.; MÄRZ, M.; SCHLETZ, A.: High temperature electronics and reliability. In: *ECPE Seminar* (2006)
- [16] WINTRISCH, A.; ULRICH, N.; Tursky, W.; REIMANN, T.: *Applikationshandbuch Leistungshalbleiter*. Semikron International GmbH, 2010
- [17] THOBEN, F.; HONG, T.; HILLE, F.: Hoch-zeitaufgelöste Zth-Messung an IGBT-Modulen. In: *35. Kolloquium Halbleiter-Leistungsbaulemente und ihre systemtechnische Integration, Freiburg*, 2006
- [18] SCHMITT, G.: *Ansteuerung von Hochvolt-IGBTs über optimierte Gatestromprofile*, Universität Wuppertal, Deutschland, Diss., 2009
- [19] MÄRZ, M.: Thermisches Management in der Leistungselektronik. In: *Peak Seminar*, 2008
- [20] HEUCK, N.: *Untersuchungen an silberbasierten Verbindungstechnologien für die Leistungs- und Hochtemperaturelektronik*, Technische Universität Braunschweig, Deutschland, Diss., 2012
- [21] THOBEN, M.: *Zuverlässigkeit von großflächigen Verbindungen in der Leistungselektronik*, Universität Bremen, Deutschland, Diss., 2007
- [22] MATSUMOTO, S.: Advancement of hybrid vehicle technology. In: *IEEE ASSP Magazine* 1(2005), S. 1-7
- [23] ROSCHER, M.: *Zustandserkennung von LiFePO<sub>4</sub>- Batterien für Hybrid- und Elektrofahrzeuge*, RWTH Aachen, Deutschland, Diss., 2010
- [24] SELMAN, R.: Thermal modeling of secondary lithium batteries for vehicle/hybrid electric vehicle application. In: *Journal of Power Sources* 110(2002), S. 341-348
- [25] KORTHAUER, R (Hrsg.): *Handbuch Lithium-Ionen-Batterie*. Springer, 2013
- [26] BRILL, M.: *Entwicklung und Implementierung einer neuen Onboard-Diagnosemethode für Lithium-Ionen-Fahrzeugbatterien*, Universität Ulm, Deutschland, Diss., 2012

- [27] GERSCHLER, J.B.: *Ortsaufgelöste Modellbildung von Lithium-Ionen-Systemen unter spezieller Berücksichtigung der Batteriealterung*, RWTH Aachen, Deutschland, Diss., 2012
- [28] LINZEN, D.: *Impedance-based loss calculation and thermal modeling of electrochemical energy storage devices for design considerations of automotive power systems*, RWTH Aachen, Deutschland, Diss., 2006
- [29] BESTE, F.; JECKEL, A.: Thermische Anforderungen von Hochvoltbatterien in elektrischen Antriebssträngen. In: *VDI Konferenz Thermomanagement für elektromotorisch angetriebene Fahrzeuge*, 2013
- [30] WEICKER, P.: *A systems approach to lithium-ion battery management*. Artech House, 2014
- [31] LU, L.: A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles. In: *Journal of Power Sources* 226(2013), S. 272-288
- [32] FLEISCHER, C.; WAAGA, W.; BAIA, Z.; SAUER, D.W.: Self-learning state-of-available-power prediction for lithium-ion batteries in electrical vehicles. In: *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Oct. 9-12, 2012, Seoul, Korea*
- [33] BECKER, J.: Wirkungsgrad von Ladegeräten für Hochvoltbatterien in Elektro- und Hybridfahrzeugen. In: *VDI Fachkonferenz, Plug-In-Hybride, Karlsruhe*, 2013
- [34] GMBH, Bosch: Electric car research and concept development - Thermal management. In: *e performance - Forschungsprojekt* 1(2011), Juni, S. 22
- [35] SEMMLER, D.: Der Antriebsstrang des Porsche Panamera S E-Hybrid. In: *34. Internationales Wiener Motorensymposium* (2013), S. 1-19
- [36] PHILIPP, K.; JELDEN, H.; NEUSSER, H.J.: Der elektrifizierte Antriebsstrang des Volkswagen Golf Plug-In-Hybrid. In: *34. Internationales Wiener Motorensymposium*, 2013
- [37] WANDT, P.: Hybridisierung und Elektrifizierung des Antriebsstrangs - Entwicklungsstand und Potentiale. In: *2. Internationaler AMI Kongress, Leipzig*, 2010
- [38] RAHMANN, K.: The Voltec 4ET50 Electric Drive System. (2011)
- [39] GROUP, BMW: Der BMW i8. (2014)
- [40] GROUP, VOLVO: Volvo V60 Plug-In-Hybrid -model year 2015. (2015)

- [41] ZILLMER, M.; NEUSSER, H.; JELDEN, H.; LÜCK, P.; KRUSE, G.: Der Elektroantrieb des Volkswagen e-up! - ein Schritt zur modularen Elektrifizierung des Antriebsstrangs. In: *34. Internationales Wiener Motorensymposium* (2013)
- [42] GROSSMANN, H.: *Pkw-Klimatisierung*. Springer Vieweg, 2013
- [43] HOFEMEIER, F.: *Ansatz zur Gesamtfahrzeugsimulation für E-Fahrzeuge zur ganzheitlichen Energieeffizienzanalyse*. Logos Verlag Berlin, 2014
- [44] SCHIER, M; KEVLISHVILI, N.; MAYER, B.: Thermal management concepts for vehicles of next generation. In: *International Conference on Ecological Vehicles and renewable energies* (2014)
- [45] BOUQUAIN, D.; BLUNIER, B.; MIRAoui, A.: HEV series architectures evaluation: modeling, simulation and experimentation. (2009)
- [46] MEUSER, C.: *Physikalische und chemische Charakterisierung von Lithiumionenzellen*, Technische Universität Dresden, Deutschland, Diss., 2011
- [47] ALAOUI, C.: Solid State Thermal Management for Lithium-Ion EV Batteries. In: *IEEE Transactions on vehicular Technology* 62(2013), S. 98-107
- [48] QUANTMEYER, F.; KIESSLING, J.; LIU-HENKE, X.: Modellbildung und Identifikation der Energiespeicher für Elektrofahrzeuge. In: *Tagungsband zum ASIM/GI Fachgruppentreffen STS/GMM* (2013)
- [49] PRADA, E.: A coupled 0D electrochemical & electro-thermal Li-ion modeling approach for HEV/PHEV. In: *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference* (2011), S. 1-8
- [50] SARRE, G.; BLANCHARD, P.; BROUSSELY, M.: Aging of lithium-ion batteries. In: *Journal of Power Sources* 127(2004), S. 65-71
- [51] HERB, F.: *Alterungsmechanismen in Lithium-Ionen-Batterien und PEM-Brennstoffzellen und deren Einfluss auf die Eigenschaften von daraus bestehenden Hybrid-Systemen*, Universität Ulm, Diss., 2010
- [52] FELLBERG, E.M.: *Untersuchung von Lithium-Ionen-Zellen und deren Alterungseffekten: Charakterisierung und Bewertung von Materialkomponenten für Lithium-Ionen-Zellen basierend auf Benchmark- und Alterungstests mit besonderem Fokus auf die Inaktivmaterialien Binder und Separatoren*, Universität Münster, Deutschland, Diplomarbeit, 2012
- [53] WALTER, J.: *Simulationsbasierte Zuverlässigkeitsanalyse in der modernen Leistungselektronik*, RWTH Aachen, Deutschland, 2004, Diss.

- [54] ISHIKO, M.; KONDO, T.: A simple approach for dynamic junction temperature estimation of IGBTs on PWM operating conditions. In: *IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2007*
- [55] INCROPERA, F.P.: *Liquid cooling of electronic devices by single-phase convection*. Wiley-Interscience, 1999
- [56] XU, Z.; JIANG, D.; LI, M.; NING, P.: Si IGBT phase-leg module packaging and cooling design for operation at 200°C in hybrid electrical vehicle applications. In: *Applied power electronics conference and expositions, IEEE (2012)*, S. 483-490
- [57] NISHIBE, Y.; YAGI, Y.; NISHIYAMA, K.; OHNO, H.; AKAMATUS, K.; OHNO, Toyota N.: Thermal stress simulation for high voltage inverter module. In: *IEEE Power Conversion Conference, Nagoya, 2007*, S. 558-562
- [58] PROTIWA, F.: *Vergleich dreiphasiger Resonanzwechselrichter in Simulation und Messung*, RWTH Aachen, Deutschland, Diss., 1997
- [59] HAUBROCK, A.: *Verifikationsmethoden für Batteriemodelle*, Universität Saarbrücken, Deutschland, Diss., 2012
- [60] NOBELS, T.; GHEYSEN, T.; VANHOVE, M.; STEVENS, S.: Design consideration for a plug-in-hybrid car electrical motor. In: *Clean Electrical Power, International Conference (2009)*
- [61] FINKEN, T.: *Fahrzyklusgerechte Auslegung von permanent erregten Synchronmaschinen für Hybrid- und Elektrofahrzeuge*, RWTH Aachen, Diss., 2011
- [62] NGUYEN P.H. ; HOANG E. ; GABSI M. ; KOBYLANSKI L. ; CONDAMIN, D.: Permanent magnet synchronous machines: performances during cycle for a hybrid electric vehicle application. In: *Industrial Electronics, IEEE International Symposium* Bd. 60, Issue, 2010, S. 1432-1438
- [63] CHIN Y. K. ; STATON, D. A.: Transient Thermal Analysis using both Lumped-Circuit Approach and Finite Element Method of a Permanent Magnet Traction Motor. In: *Motor Design Ltd.* 1, S. 9
- [64] WEISE, W. (Hrsg.): *Zuverlässigkeit elektrischer Maschinen*. VEB Verlag Technik Berlin, 1981
- [65] HU, W.: *Zuverlässigkeitsbasierte Zustandserkennung und Regelungskonzept für mechanische Systeme*, Technische Universität Berlin, Hochschulschrift, 2013

- [66] GRUNE, R.: *Verlustoptimierter Betrieb einer elektrisch erregten Synchronmaschine für den Einsatz von Elektrofahrzeugen*, Technische Universität Berlin, Diss., 2013
- [67] VOLLMER, U.: *Entwurf, Auslegung und Realisierung eines verlustoptimierten elektrischen Antriebs für Hybridfahrzeuge*, Technische Universität Berlin, Deutschland, Diss., 2012
- [68] STOEHR, G.: *Untersuchungen zum Aufbau einer hocheffizienten Kühlung einer elektrischen Maschine mit großer Leistungsdichte*, Fakultät für Verkehrs- und Maschinensysteme, Technische Universität Berlin, Diss., 2007
- [69] HONG W. ; CHOI C. ; LEE W. ; HONG J.P. ; KUM, D.: Advanced permanent magnet motor drive modeling for automotive application Under matlab/simulink environment. In: *International Journal of Automotive Tehnology* 10(2009), März, Nr. 4, S. 7
- [70] KRAMER, U.; NECULAU, M. ; VERLAG, Hanser (Hrsg.): *Simulationstechnik*. Hanser, 1998
- [71] KRAL, C.; SIMIC, D.: Simulation von Elektrofahrzeugen. In: *Elektrotechnik & Informationstechnik* 128(2011), S. 28-35
- [72] CANDERS, W.-R.; ASAFALI, B.: Simulation von Hybridfahrzeugantrieben. In: *e-motive Expertenforum und HDT Tagung „Trends in der elektrischen Antriebstechnologie für Hybrid und Elektrofahrzeuge“* 1(2011), November, S. 9
- [73] BALTZER, S.; JECK, P.; GISSING, J.; LICHIOUS, T.; ECKSTEIN, L.: Holistic vehicle simulation using modelica - an application on thermal management and operation strategy for electrified vehicle. In: *Proceedings of the 9th Interntaional Modelica Confernce, München* (2012)
- [74] STEINBERG, P. ; TECHNIK, Haus der (Hrsg.): *Wärmemanagement des Kraftfahrzeugs IX*. Bd. 93. expert Verlag, 2014
- [75] BECK, R.: *Prädiktives Energiemanagement von Hybridfahrzeugen*, RWTH Aachen, Deutschland, Diss., 2011
- [76] INCROPERA, F.P. ; HAYTON, J. (Hrsg.): *Fundamentals of heat and mass transfer*. 2007
- [77] *VDI-Wärmeatlas*. Springer Vieweg, 2013
- [78] STAN, C.: *Thermodynamik des Kraftfahrzeugs*. Heidelberg : Springer Verlag, 2005
- [79] GÜNTERT, P.: *Simulation eines Fahrzeugkühlsystems unter besonderer Berücksichtigung der luft- und kühlmitteleitigen Volumenstromverteilung*, Universität Stuttgart, Deutschland, Diss., 1994

- [80] CHRISTMANN, A.: Reliability of power modules in hybrid vehicles. (2009)
- [81] RÖSER, P.: *Energetisch optimiertes Kraftfahrzeugkühlsystem*, Universität Stuttgart, Deutschland, Diss., 2007
- [82] Schutzrecht, Beste, F.; Jeckel, A.: Ansteuerung der Kühlung, des Energiemanagement und der Betriebsstrategie in Abhängigkeit der Alterungseffekte eines Hochvoltsystems (2014).
- [83] BESTE, F.; JECKEL, A.: Thermische Anforderungen und Wärmeverluste des elektrischen Antriebs eines Plug-In Hybrids. In: *11. Symposium: Hybrid- und Elektrofahrzeuge*, Braunschweig, 2014
- [84] NEUDORFER, H.; BINDER, A.; WICKER, N.: Analyse von unterschiedlichen Fahrzeugen für den Einsatz von Elektrofahrzeugen. In: *Elektrotechnik & Informationstechnik* 123/7/8(2006), S. 352-360
- [85] GRAMS, T.: Fahrweisenoptimierung – Eine beispielhafte Anwendung von Heuristiken bei der Optimierung. (2009)
- [86] HAUPT, C.: *Ein multiphysikalisches Simulationsmodell zur Bewertung von Antriebs- und Wärmemanagementkonzepten im Kraftfahrzeug*, Technische Universität München, Deutschland, Diss., 2012
- [87] REIF, K.; NOREIKAT, K.; BORGEST, K.: *Kraftfahrzeug-Hybridantriebe*. Springer Verlag, 2012
- [88] REITER, T.M.: *Reglerentwicklung und Optimierung für DC/DC-Wandler im Kraftfahrzeug*, Technische Universität München, Deutschland, Diss., 2010
- [89] GRIESINGER, A.: Thermische Analyse elektrischer und elektronischer Systeme in Fahrzeugen durch Messung und Simulation. In: *VDI Wissensforum-Thermomanagement im Fahrzeug*, 2013
- [90] KUNCKEL, H.: *Development of a cooling concept for gearbox integrated electrical machine*, Karlsruhe Institute of Technology, Diplomarbeit, 2012
- [91] SCHRÖDER, D.: Verluste und Erwärmung im Antriebssystem. In: *Elektrische Antriebe-Grundlagen*. Springer Verlag, 2007, S. 41-76
- [92] GREIF, A.: Firmeninterne Mitteilung.
- [93] M.IKONEN: *Power cycling lifetime estimation of igt power modules based on chip temperature modeling*, University of Technology Lappeenranta, 2012, Diss.

- [94] MÄRZ, M.; NUANCE, P.: Thermal modeling of power-electronic systems. In: *Infineon Technologies AG Munich* (2000)
- [95] CUI, H.: Accelerated temperature cycle test and coffin-Manson Model for electronic packaging. In: *Reliability and maintainability symposium*, IEEE, 2005
- [96] DENK, M.; BAKRAN, M.-M.: Efficient online-algorithm for the temperature cycle recording of an IGBT power module in a hybrid car during inverter operation. In: *8th International conference of integrated power electronic systems* (2014), S. 428-433
- [97] CIAPPA, M.; CARBOGNANI, F.; FICHTNER, W.: Lifetime prediction and design of reliability test for high power devices in automotive applications. In: *IEEE Transactions on device and materials reliability* 3(2003, No. 4), S. 191-196
- [98] DENK, K.; BAKRAN, M.-M.: Comparison of counting algorithms an empiric lifetime models to analyze the load-profile of n IGBT power module in a hybrid car. In: *IEEE Electric Drives Production Conference* (2013), S. 1-6
- [99] KRÜGER, W.; SCHEUTZOW, M.; BESTE, A.; PETERSEN, J.: *Markov- und Rainflow-Rekonstruktionen stochastischer Beanspruchungs-Zeitfunktionen*. VDI-Verlag, 1985
- [100] MUNK-NIELSEN, S.: *Lifetime estimation of IGBT power modules*, Aalborg Universität, Dänemark, Diplomarbeit, 2013
- [101] LEE, Y.; BARKEY, M.; KANG, H-T.: *Metal fatigue analysis handbook*. Elsevier, 2012
- [102] JOHNSON, M.C.; BAILEY, C.; YIN, C.; MUSALLAM, M.: Application of coupled electro-thermal and physics-of-failure-bases analysis to the design of accelerated life test for power modules. In: *Microelectronics Reliability* 54(2014), S. 172-181
- [103] HELD, M. et a.: Fast power cycling test for igbt modules in traction application. In: *IEEE Power electronics and drive system* 1(1997), S. 425-430
- [104] NORRIS, K. C. ; LANDZBERG, A. H.: Reliability of Controlled Collapse Interconnections. In: *IBM J. Res. Dev.* 13(1969), Nr. 3, S. 266-271
- [105] BAYERER, T.; LICHT, T.; LUTZ, J.; FELLER, M.: Model for power cycling lifetime of IGBT modules – various factors influencing lifetime. In: *IEEE Integrated power systems, 5th International Conference* (2008), S. 1-6
- [106] KELLER, J.: Firmeninterne Mitteilung.
- [107] SCHMALSTIEG, J.; KABITZ, S.; ECKER, M.; SAUER, D.: From accelerated aging test to a lifetime prediction model: analyzing lithium-ion batteries. In: *Electric vehicle symposium and exhibition* 27(2013), S. 1-12

- 
- [108] BOSENIUK, F.; PONICK, B.: Parameterization of transient thermal models for permanent magnet synchronous machines exclusively based on measurements. In: *International symposium on power electronics, electrical drives, automation and motion* (2014)
- [109] Schutzrecht, Beste, F.; Jeckel, A.: Sollwertgeber für eine optimierte Kühlung einer Leistungselektronik in Abhängigkeit von Alterungsmechanismen der Bauelemente (2013). Pr.: DE 102013017089
- [110] Schutzrecht, Beste, F.; Jeckel, A.: Kühlungssteuerung in Abhängigkeit der Alterungseffekte eines Energiespeichers (2013). Pr.: DE 102013018398



## Nomenklatur

$\eta$ <sub>Viskosität</sub>	Dynamische Viskosität
$\epsilon$ <sub>Dehnung</sub>	Dehnung
$\hat{I}_{AC,Peak}$	Scheitelwert des Phasenstroms
$\Phi_{IGBT}$	Fluss IGBT
$C_N$	Nennkapazität
$C_{th}$	Thermische Kapazität
$E_A$	Aktivierungsenergie
$E_W$	Fahrenergie
$M_{Molar}$	Molare Masse
$N_i$	Anzahl der aufgetretenden Zyklen
$P_W$	Fahrleistung
$P_{V,Bat,Ohm}$	Ohmsche Verlustleistung der Batterie
$P_{V,Bat,Rad}$	Verlustleistung der Batterie übertragen durch Radiation
$P_{V,Bat,Reakt}$	Verlustleistung der Batterie aufgrund chemischer Reaktionen
$P_{V,Bat}$	Verlustleistung der Batterie
$Pr$	Prandtl-Zahl
$R_{th}$	Thermischer Widerstand
$Re$	Reynold-Zahl
$T_{j,Diode}$	Sperrschichttemperatur der Diode
$T_{j,IGBT}$	Sperrschichttemperatur des IGBTs
$U_N$	Nennspannung
$\alpha_{ST}$	Fahrbahnsteigung
$\alpha$	Ausdehnungskoeffizient
$\Delta$	Laplace-Operator
$\dot{m}$	Massenstrom

---

$\dot{Q}$	Wärmestrom
$\dot{q}$	Wärmestromdichte
$\dot{V}_{\text{KM, Ein, Batterie}}$	Volumenstrom des Kühlmittels am Einlass des Energiespeichers
$\epsilon$	Emissionsverhältnis
$\eta$	Wirkungsgrad
$\kappa$	Peuckertzahl
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit
$\nabla$	Nabla-Operator
$\nu$	Kinematische Viskosität
$\omega$	$= \frac{2 \cdot \pi}{T}$ , Kreisfrequenz
$\omega$	Kreisfrequenz
$\Phi$	Magnetischer Fluss
$\Psi$	Elektrische Flussdichte
$\rho$	Dichte
$\sigma_{\text{El}}$	Elektrische Leitfähigkeit
$\sigma$	Stefan-Boltzmann-Konstante
$\Theta$	Wärmefluss
$\zeta$	Reibungsbeiwert
$C_p$	Peuckertkapazität
$c_p$	Spezifische Wärmekapazität
$c_w$	Luftwiderstandsbeiwert
$F_W$	Fahrwiderstand
$f_{\text{Ro}}$	Rollwiderstandkoeffizient
$G(j\omega)$	Übertragungsfunktion
$g$	Gravitationskonstante
$J_{\text{Wirbelstrom}}$	Wirbelstromdichte
$L_{\text{LE, Dioden}}$	Prozentualer Lebensdauerverbrauch der Dioden
$L_{\text{LE, IBTs}}$	Prozentualer Lebensdauerverbrauch der IGBTs
$m_{\text{Fzg}}$	Fahrzeugmasse
$P_V$	Verlustleistung



$P_{\text{Kühl,Kreis1}}$	Benötigte Kühlleistung in dem Kühlkreislauf 1
$P_{\text{Kühl,Kreis2}}$	Benötigte Kühlleistung in dem Kühlkreislauf 2
$P_{\text{ST}}$	Stationäre Durchlassverluste
$P_{\text{SW}}$	Schaltverluste
$P_{\text{Wirk}}$	Wirkleistung
$q_{\text{N}}$	spezifische Wärme
$R_{\text{L}}$	Spezifische Gaskonstante von Luft
$S$	Scheinleistung
$T_{\text{B}}$	Bauteiltemperatur
$T_{\text{KM,Aus}}$	Kühlmitteltemperatur Auslass
$T_{\text{KM,Ein,Batterie}}$	Temperatur des Kühlmittels am Einlass des Energiespeichers
$T_{\text{KM,Ein}}$	Kühlmitteltemperatur Einlass
$U_{\text{CE}}$	Spannung Collector Emitter
$U_{\text{Thr}}$	Thresholdspannung
$v$	Fahrzeuggeschwindigkeit
$A$	Durchtrittsfläche
ab	abgeführt
AGB	Ausgleichsbehälter
ASM	Asynchronmaschine
ATF	Automatic transmission fluid
BMS	Batteriemanagementsystem
C	Kapazität
CAN	Controller Area Network
CPC	Common Powertrain Controller
DCB	Direct Copper Bonded
DCDC	Gleichspannungswandler
EM	Elektrische Maschine
EMCU	Electric Motor Control Unit
EMM	Energiemanagement
g	Gravitationskraft

---

HT	Hochtemperatur
HV	High Voltage, Hochspannung (>60V)
I	Strom
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
J	Stromdichte
j	Junction, Sperrschicht
k	Wärmedurchgangskoeffizient
Lu	Luft
LV	Low voltage, Niederspannung
M	Drehmoment
m	Masse
n	Drehzahl
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NT	Niedertemperatur
Nu	Nußelt-Zahl
OBL	On Board Ladegerät
PMSM	Permanenterregte Synchronmaschine
PTC	Positive Temperature Coefficient
PWMG	Pulsweitenmodulierender Generator
Q	Wärme
SOC	State of Charge
SOD	State of Discharge
SOH	State of Health
TXV	Expansionsventil
U	Elektrische Spannung
V	Volumen
w	Strömungsgeschwindigkeit
$T_{j,Diode}$	Temperatur Diode
$\alpha$	Ausdehnungskoeffizient
$\Delta\epsilon_{In}$	Dehnungsamplitude



$\dot{V}_{KM, Ein, LE}$	Volumenstrom des Kühlmittels am Einlass der Leistungselektronik
$\Phi_{Diode}$	Fluss Diode
$f_{SW}$	Schaltfrequenz
$P_{V, Diode, Durchlass}$	Durchlassverluste der Diode
$P_{V, ST}$	Stationäre Verluste der IGBTs
$P_{V, SW}$	Schaltverluste der IGBTs
$t_F$	Lebensdauer
$T_{KM, Ein, LE}$	Temperatur des Kühlmittels am Einlass der Leistungselektronik
$\epsilon$	Dehnung
$C_{Verlust, kalendarisch}$	Der kalendarische Kapazitätsverlust des Zellsystems
$C_{Verlust, Zellsystem}$	Der Kapazitätsverlust des Zellsystems
$C_{Verlust, zyklisch}$	Der zyklische Kapazitätsverlust des Zellsystems
$f^\beta$	Zyklusfrequenz mit $\beta$ als Fitting-Konstante
$k_b$	Boltzmann-Konstante
$N_f$	Coffin Manson-Koeffizient
$P_{V, Diode}(t, T_j)$	Leistungsverluste der Diode
$T_{Mean}$	Mittlere Temperatur
$A$	Arrhenius' sche Gleichung
$C_{Kraftstoff}$	Kraftstoffverbrauch
$D$	Modulationsindex
$DOD$	Depth of discharge, Entladungstiefe
$F$	Faraday-Konstante
$L$	Induktivität
$OCV$	Open Circuit Voltage
$PID$	Proportional-Integral-Differential
$Q$	Volumenstrom
$Z$	Impedanz
$z$	Ladungszahl

## Tabellenverzeichnis

2.1	Eigenschaften des Plug-In-hybriden Antriebsstrangs des Referenzfahrzeugs . . .	8
2.2	Äquivalenz von thermischen und elektrischen Größen . . . . .	29
2.3	Häufigkeiten von Umgebungstemperaturen in Europa [80] . . . . .	32
2.4	Kühl- und Heizmethoden der Hochvoltkomponenten . . . . .	33
3.1	Grundsätzliche Kenndaten der ausgewählten Fahrzyklen . . . . .	43
3.2	Zusammenstellung der Umgebungsbedingungen für die Fahrzeugmessungen . .	44
4.1	Feste Parametrierung des Fahrzeugmodells anhand des Referenzfahrzeugs . . .	50
4.2	Eigenschaften von Lotlegierungen für die Halbleiterbrücken [103] . . . . .	72
4.3	Betriebspunkt zur Lebensdaueranalyse . . . . .	73
4.4	Erwartete Lebensdauer der IGBTs mit dem Modell berechnet in Anlehnung an [103] . . . . .	74
4.5	Wertebereiche der Modellierung der elektrischen Maschine . . . . .	92
4.6	Wertebereiche des Leistungselektronikmodells . . . . .	92
4.7	Wertebereiche des Batteriemodells . . . . .	93
4.8	Wertebereiche des Verlustkennfeldes des Gleichspannungswandlers . . . . .	93
4.9	Wertebereiche der Modellierung des Ladegeräts . . . . .	93
6.1	Elektrische Bilanzen der Komponenten in den durchgeführten Zyklen im Heißland	108
7.1	Zielsetzungen der Zuverlässigkeit an die Komponenten . . . . .	113
7.2	Initialisierte variable Parameter der Alterungsberechnung im Zyklus SC03 . . .	125
7.3	Initialisierte variable Parameter der Alterungsberechnung für den NEFZ . . . .	126
7.4	Initialisierte variable Parameter der Alterungsberechnung für verschiedene Tem- peraturen im UDDS . . . . .	127
7.5	Grundsätzliche Dimensionierung der verschiedenen hergeleiteten Verstärkungs- faktoren für den Algorithmus . . . . .	129
7.6	Vergleich der Algorithmen im Zyklus UDDS mit $SOC_{Start,Betrieb} = 90\%$ und einer Standphase mit $SOC_{Start,Stand} = 100\%$ . . . . .	131
7.7	Vergleich der Algorithmen im Zyklus SC03 mit $SOC_{Start,Betrieb} = 90\%$ und ei- ner Standphase mit $SOC_{Start,Stand} = 100\%$ . . . . .	133



---

A.1	Kühlmedien und ihre thermischen Eigenschaften bei $T=300\text{K}$ [55] . . . . .	162
-----	--	-----

## Abbildungsverzeichnis

1.1	Optimierungsansätze des Hochvoltsystems . . . . .	2
1.2	Vorteile gegenüber dem aktuellen Forschungs- und Entwicklungsstand . . . . .	3
2.1	Struktur des Hochvoltsystems eines Plug-In Hybridfahrzeugs . . . . .	6
2.2	Anordnung der Hochvoltkomponenten eines Plug-In-Antriebs . . . . .	7
2.3	Aufzubringende Energie und resultierende Verluste des gesamtheitlichen Antriebs im elektrischen Betrieb . . . . .	9
2.4	Erwärmung der Materialien aufgrund der Verlustleistungen . . . . .	11
2.5	Mechanismen aufgrund thermischer Belastung in Stator und Rotor . . . . .	12
2.6	Sinusförmige Pulsweitenmodulation und die Ansteuerung eines Synchronmotors [16] mit einer B6-Brücke . . . . .	13
2.7	Struktur und Ladungsträgerbewegung eines IGBT nach [18] . . . . .	13
2.8	Aufbau einer Leistungsdiode nach [18] . . . . .	14
2.9	Lebensdauermechanismen in Anlehnung an [21] . . . . .	15
2.10	Schematischer Aufbau einer Lithium-Eisenphosphat-Zelle [24] . . . . .	16
2.11	Thermisches Betriebsfenster und die Auswirkungen auf LiFePO <sub>4</sub> -Zellen in Anlehnung an [25] . . . . .	17
2.12	Mechanismen der Zellen bei kalten Temperaturen in Anlehnung an [27] . . . . .	18
2.13	Mechanismen der Zellen bei Temperaturen über 30 Grad in Anlehnung an [27] . . . . .	19
2.14	Ausfallrate eines Lithium-Ionen-Zellsystems nach [25] aufgrund der Alterung des Zellsystems . . . . .	20
2.15	Algorithmen der Zustandserkennung mittels State of Health in Anlehnung an [31] . . . . .	21
2.16	Gesamtheitliche Wärmemanagement eines Hybridfahrzeugs und seine Schnittstellen . . . . .	23
2.17	Komponenten des Antriebsstrangs und ihr Wärmemanagement . . . . .	25
2.18	Wärmeübertragung mittels Konduktion, Konvektion und Radiation . . . . .	30
2.19	Kühlsystemarchitektur des Referenzfahrzeugs . . . . .	34
3.1	Thermische Auslegung aufgrund von Indikatoren der Alterung [82] . . . . .	36
3.2	Blockdiagramm der Zustandserfassung und der adaptiven Bestimmung der Stellgrößen des Hochvoltsystems . . . . .	37



3.3	Neue Ablaufstruktur zur Beeinflussung der Alterungsmechanismen des Hochvoltsystems . . . . .	40
3.4	Schematik der Vorgehensweise sowie des zeitlichen Ablaufs . . . . .	41
3.5	Initialisierung der thermischen Zustände und Zuverlässigkeitsbestimmungen . .	44
4.1	Modellierung des verbrennungsmotorischen Anteils und des Niedervoltbordnetzes . . . . .	46
4.2	Modellierung des Hochvoltsystems [73] . . . . .	47
4.3	Konzeption des entworfenen Modells in Anlehnung an [88] . . . . .	48
4.4	Struktur der vorwärtsgerichteten Systemmodellierung . . . . .	49
4.5	Schematik der implementierten Submodelle für die Berechnung der Synchronmaschine . . . . .	51
4.6	Implementieren von thermisch-elektrischen Berechnungen [90] auf Grundlage von definierten Bilanzräumen . . . . .	51
4.7	Wirkungsgradkennfelder der permanent erregten Synchronmaschine in dem Referenzfahrzeug . . . . .	52
4.8	Betriebspunktabhängige ohmsche Wärmeverluste und die Verluste der Magneten [90] . . . . .	55
4.9	Betriebspunktabhängigen Ummagnetisierungsverluste [90] . . . . .	55
4.10	Vereinfachtes thermisches Ersatzschaltbild des Rotors [61] . . . . .	56
4.11	Resultate der simulierten Eingangsdaten und Temperaturverläufe im Fahrzyklus ADAC BAB . . . . .	58
4.12	Berechnete Verlustverteilung im Stator und Rotor der elektrischen Maschine in der thermischen Vorkonditionierung $T_{\text{System,Start}} = +40^{\circ}\text{C}$ und $\text{SOC}_{\text{Start}} = 90\%$ im ADAC BAB . . . . .	59
4.13	Struktur der aktiven Rotorkühlung . . . . .	59
4.14	Schematik des Leistungselektronikmodells . . . . .	60
4.15	Der betriebspunktabhängige Leistungsfaktor und der Modulationsindex in vereinfachter Darstellung des Referenzfahrzeugs . . . . .	60
4.16	Regelung einer Synchronmaschine mit der Leistungselektronik . . . . .	61
4.17	Schaltenergie im Ein- und Ausschaltprozess nach [93] für 25 und 150 Grad . .	62
4.18	Berechnung der gesamten Wärmeverluste $P_V(t, T_j)$ mit der Kühlsituation $\dot{V} = 6\text{l}/\text{min}$ und $T_{\text{KM,Ein,LE}} = 40^{\circ}\text{C}$ . . . . .	63
4.19	Indirekte Kühlung der Leistungshalbleiter nach [55] . . . . .	64
4.20	Netzwerk nach Foster . . . . .	64
4.21	Netzwerk nach Cauer . . . . .	65
4.22	Simuliertes Einschwingverhalten in den Elementen der Halbleiterbrücke in dem Fahrzyklus NEFZ und in der thermischen Vorkonditionierung $T_{\text{System,Start}} = +40^{\circ}\text{C}$	66

4.23	Angewandte Lebensdauer- und Ermüdungsberechnung . . . . .	67
4.24	Simulierte Eingangsdaten und Temperaturverläufe im Fahrzyklus ADAC BAB mit der Schaltfrequenz $f_{SW} = 1.2\text{kHz}$ . . . . .	68
4.25	Drei-Punkte-Algorithmus des Rainflowzählverfahrens . . . . .	69
4.26	Auswertung Sperrschichttemperatur der Dioden $T_{J,IGBT}$ im ADAC BAB-Warmland mit dem Rainflow-Zählverfahren . . . . .	70
4.27	Rainflow Matrix $T_{J,IGBT}$ im ADAC BAB . . . . .	70
4.28	Auswertung Sperrschichttemperatur der Dioden $T_{J,Diode}$ im ADAC BAB-Warmland mit dem Rainflow-Zählverfahren . . . . .	71
4.29	Rainflow-Matrix $T_{J,Diode}$ im ADAC BAB . . . . .	71
4.30	Verschiedene Materialschichten mit unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizien- ten nach [102] . . . . .	72
4.31	Auswertung DCB-Subtrat $T_{J,DCB}$ im ADAC BAB-Warmland mit dem Rainflow- Zählverfahren . . . . .	72
4.32	Rainflow-Matrix $T_{J,DCB}$ im ADAC BAB . . . . .	73
4.33	Temperaturgradienten der IGBTs, der Dioden und des Subtrates in unterschied- lichen Kühlsituationen . . . . .	74
4.34	Anzahl der Zyklen bis zum Ausfall vom Substrat nach [102] als Funktion der Temperaturgradienten mit der mittleren Temperatur als Parameter @ $T_{mean} = 20,$ 80 Grad . . . . .	75
4.35	Anzahl der Zyklen bis zum Ausfall von IGBT-Modulen nach [103] [105] als Funktion des Temperaturgradienten mit der mittleren Temperatur als Parameter @ $T_{mean} = 60, 80$ und $100$ Grad . . . . .	75
4.36	Prozentuale Lebensdauerberechnung der Silizium-IGBTs in Abhängigkeit der mittleren Temperatur für 6.000h Betriebsstunden . . . . .	76
4.37	Prozentuale Lebensdauerberechnung der Dioden in Abhängigkeit der Tempera- tur für 6.000h . . . . .	77
4.38	Schematik des aufgebauten Batteriemodells . . . . .	78
4.39	Ersatzschaltbild des Modells mit dem R-Glied für den Innenwiderstand und dem RC-Glied für die Zelle . . . . .	79
4.40	Exemplarische Ruhespannung (Open Circuit Voltage) beim Lade- und Entlade- vorgang einer $\text{LiFePO}_4$ -Zelle . . . . .	80
4.41	Implementierung des Verhaltens des Zellstroms in Abhängigkeit von Tempera- tur und SOC als Erweiterung für das thermisch-elektrische Modell . . . . .	81
4.42	Simulierte Eingangsdaten und Temperaturverläufe im Fahrzyklus ADAC BAB .	82
4.43	Klemmspannung $U_{Klemm}$ mit $T_{Zellsystem} = -20^\circ\text{C}$ bis $+40^\circ\text{C}$ und die Kühlsi- tuation @ $\dot{V} = 2\text{l/min}$ in den Zuständen Begin of life und End of life . . . . .	83



4.44	Ruhespannung $U_{OCV}$ mit $T_{Zellsystem} = -20^{\circ}C$ bis $+40^{\circ}C$ und die Kühlsituation @ $\dot{V} = 2l/min$ in den Zuständen Begin of life und End of life . . . . .	83
4.45	Berechneter Innenwiderstand des Zellsystems $R_i$ ( $n=120$ ) mit $T_{Zellsystem} = -20^{\circ}C$ bis $+40^{\circ}C$ und die Kühlsituation @ $\dot{V} = 2l/min$ in den Zuständen Begin of life und End of life . . . . .	84
4.46	Berechnung der gesamten Wärmeverluste $P_{V,Zellsystem}$ mit $T_{Zellsystem} = -20^{\circ}C$ bis $+40^{\circ}C$ und die Kühlsituation @ $\dot{V} = 2l/min$ in den Zuständen Begin of life und End of life . . . . .	85
4.47	Angewandte Lebensdauerberechnung des Energiespeichers . . . . .	86
4.48	Berechnete kalendarische Kapazitätsverluste des Zellsystems für 3650 Tage mit der Annahme einer Standphase in Abhängigkeit von der Zelltemperatur und dem State of Charge . . . . .	88
4.49	Kalendarischer Kapazitätsverlust des Zellsystems für zehn Jahre unter Annahme einer Standphase 23.75h und dem SOC = 100 Prozent . . . . .	88
4.50	Auswirkung der Pulsdauer auf den zyklischen Kapazitätsverlust für zehn Jahre . . . . .	89
4.51	Berechnete Kapazitätsverluste $C_{Verlust,Zellsystem}$ des Zellsystems für zehn Jahre mit der Annahme einer Konstantfahrt pro Tag von 300 Sekunden und einer Standphase $t = 23.9h$ , $T_{Zellsystem} = 30^{\circ}C$ , SOC = 100% . . . . .	89
4.52	Generierte Sollwertkurve des Kapazitätsverlustes . . . . .	90
4.53	Resultierende Wirkungsgrade des Gleichspannungswandlers aufgrund der Verluste $P_{V,DCDC}$ mit $T_{KM,EIN,DCDC} = -20^{\circ}C$ bis $+40^{\circ}C$ und die Kühlsituation @ $\dot{V} = 2l/min$ in den Zuständen Begin of life und End of life . . . . .	90
4.54	Schema der Modellierung des Ladegeräts . . . . .	91
4.55	Resultierende Verluste im Ladegerät . . . . .	91
5.1	Einbau der Temperatursensorik im Motorraum und im Getriebe . . . . .	95
5.2	Wechselwirkung zwischen Luft $T_{Luft,Start} = 40^{\circ}C$ und der $T_{KM,EIN,LE} = 40^{\circ}C$ . . . . .	95
5.3	Einbau der Temperatursensorik im Kofferraum und Umgebung . . . . .	96
5.4	Wechselwirkung zwischen Luft $T_{Luft,Start} = 40^{\circ}C$ und dem Zellsystem $T_{Zellsystem,Start} = 30^{\circ}C$ . . . . .	96
5.5	Thermische Sensorik in dem ersten Niedertemperaturkreislauf . . . . .	97
5.6	Thermische Sensorik in dem zweiten Niedertemperaturkreislauf . . . . .	97
5.7	Thermische Sensorik in dem Getriebeölkreislauf . . . . .	98
5.8	Integrierte Thermoelemente im Statorpaket zur Erfassung der Ohmschen Verluste . . . . .	99
5.9	Gemessene Temperaturverteilung im Statorpaket der elektrischen Maschine im UDSS . . . . .	99
5.10	Integrierte Thermoelemente an den Leistungsmodulen zur Bestimmung der mittleren Temperaturen und Temperaturgradienten $\Delta T$ des Lotes . . . . .	100

5.11	Gemessene Temperaturverteilung der Umgebung der Leistungsmodule mit der Kühlsituation @ $\dot{V} = 6\text{l/min}$ und $T_{\text{KM,Ein,LE}} = 40^\circ\text{C}$ . . . . .	101
5.12	Thermische Sensorik in der Batterie . . . . .	102
5.13	Gemessene Temperaturverteilung in den Zellmodulen mit $T_{\text{Bat,Start}} = +30^\circ\text{C}$ und der Kühlsituation @ $\dot{V} = 2\text{l/min}$ . . . . .	102
6.1	Berechnete und gemessene Signale des Pedalwertgebers und der elektrischen Maschine in der thermischen Vorkonditionierung $T_{\text{System,Start}} = +40^\circ\text{C}$ und $\text{SOC}_{\text{Start}} = 90\%$ im NEFZ nach der Validierung . . . . .	104
6.2	Signale der Batterie in der thermischen Vorkonditionierung $T_{\text{System,Start}} = +40^\circ\text{C}$ und $\text{SOC}_{\text{Start}} = 90\%$ im NEFZ vor der Validierung . . . . .	105
6.3	Signale der Leistungselektronik in der thermischen Vorkonditionierung $T_{\text{System,Start}} = +40^\circ\text{C}$ und $\text{SOC}_{\text{Start}} = 90\%$ im NEFZ vor der Validierung . . . . .	106
6.4	Berechnete Signale des Ladegeräts für $\text{SOC} = 10 - 90\%$ mit der Variation von $\dot{V} = 0\text{l/min}$ und $T_{\text{Lader,Start}} = -25, -20, -10, 0, 25^\circ\text{C}$ mit der Grundlast = 750W . . . . .	107
6.5	Auswirkung der thermischen Bedingungen auf das Zellsystem im Ladezustand für den State of Charge-Bereich von 10 – 90% mit der Variation von $\dot{V} = 0\text{l/min}$ und $T_{\text{Zellsystem,Start}} = -25, -20, -10, 0, 25^\circ\text{C}$ mit der Grundlast $P_{\text{Grundlast}} = 750\text{W}$ . . . . .	107
6.6	Auswirkungen der Fahrbereiche auf die durchschnittlichen Wärmeverluste des Hochvoltsystems des Versuchsträgers unter konstanten thermischen Randbedingungen . . . . .	109
6.7	Resultierende prozentuale Lebensdauererbräuche in den verschiedenen Fahrbereichen für 8000 Betriebsstunden und $\dot{V} = 1\text{l/min}$ . . . . .	109
6.8	Kapazitätsverluste aufgrund der kalendarischen und der zyklischen Alterung mit Berücksichtigung der definierten Fahrzyklen mit Standphase @ $\text{SOC} = 100\%$ und Betriebsphase @ $\text{SOC}_{\text{Start}} = 90\%$ . . . . .	110
7.1	Schema der Istwertidentifikation und der Sollwertermittlung für das Hochvolt-system . . . . .	112
7.2	Entwickelte Sollwertkurven für die Leistungselektronik und die Batterie . . . . .	113
7.3	Diagramm des Modells der Sollwertbestimmung und Rückführung an die Regelung von dem Energiemanagementsystem und der Kühlungssteuerung . . . . .	114
7.4	Flussdiagramm der thermischen Sollwertberechnung der Leistungselektronik . . . . .	115
7.5	Sollwertberechnung für die Kühlwassertemperatur $T_{\text{KM,Ein,LE}}(t)$ aufgrund des prozentualen Lebensdauererbräuches $L_{\text{Soll}}(t)$ . . . . .	116
7.6	Schematik der Ablaufstruktur für die Zuverlässigkeitsbeeinflussung des Leistungsmoduls mit der Kühlwassertemperatur als Stellgröße . . . . .	117



7.7	Ergebnisse mit der Kühlwassertemperatur auf $T_{KM,Ein,Start,LE} = 80^{\circ}C$ im Fahrzyklus SC03 mit Eingriff der adaptiven innovativen Strategie für jeden Zeithorizont $t=800$ Betriebsstunden	118
7.8	Verläufe der Kühlwassertemperatur von $T_{KM,Ein,Start,LE}$ am Einlass und Auslass im Fahrzyklus SC03 für jeden Zeithorizont $t=800h$	119
7.9	Ergebnisse des Lebensdauer verbrauchs mit Eingriff der initialisierten Kühlwassertemperatur auf $T_{KM,Ein,Start,LE} = 80^{\circ}C$ im Fahrzyklus UDDS	120
7.10	Simulierte Ergebnisse der Kühlwassertemperatur mit Eingriff der adaptiven innovativen Strategie in dem Einlass und dem Auslass im Fahrzyklus UDDS für die ersten drei Zeithorizonte	120
7.11	Flussdiagramm der thermischen Sollwertberechnung des Energiespeichers [110]	121
7.12	Sollwertberechnung für die Kühlwassertemperatur $T_{KM,Ein,Batterie}(t)$ aufgrund des Kapazitätsverlustes $C_{Verlust,Soll}(t)$	122
7.13	Auswirkung auf den gesamten Kapazitätsverlust durch die Temperaturänderung des Kühlwassers mittels Überlagerung	123
7.14	Algorithmus des Degradationsfortschritts der Zellen mit der Kühlwassertemperatur als Stellgröße	124
7.15	Angewendete Methode des SC03 mit $T_{KM,Bat,Start} = 40^{\circ}C$ und $20^{\circ}C$	125
7.16	Wesentliche Systemgrößen Stromverlauf und SOC für die Degradationsbeeinflussung der Zellen im NEFZ	126
7.17	Degradation der Zellen im NEFZ und einer Standphase pro Tag unter den Bedingungen von $T = 40^{\circ}C$ , $\dot{V} = 1l/min$ und $SOC = 100\%$	127
7.18	Regelung des Degradationsfortschritts der Zellen im UDDS aufgrund des Stromverlaufes und des SOC	128
7.19	Angewendete Methode in dem UDDS mit den $T_{KM,Bat,Ein} = 45^{\circ}C$ , $40^{\circ}C$ und $20^{\circ}C$	128
7.20	Vergleich der neuen Methoden mit dem UDDS mit $SOC_{Start,Betrieb} = 90\%$ und einer Standphase mit $SOC_{Start,Stand} = 100\%$	130
7.21	Vergleich der neuen Methoden mit dem SC03 mit $SOC_{Start,Betrieb} = 90\%$ und einer Standphase mit $SOC_{Start,Stand} = 100\%$	130
7.22	Reduzierung der Kapazitätsverluste mit Anwendung der neuen lebensdauerorientierten Methoden im UDDS	132
7.23	Einstellung der prozentualen Lebensdauer verbräuche mit Anwendung der neuen Methoden im UDDS im Hinblick auf die Effizienzsteigerung	132
7.24	Reduzierung der Kapazitätsverluste mit Anwendung der neuen lebensdauerorientierten Methoden im SC03	133
7.25	Einstellung der prozentualen Lebensdauer verbräuche mit Anwendung der neuen Methoden im SC03 im Hinblick auf die Effizienzsteigerung	134



B.1 Geschwindigkeitsprofile der angewandten Zyklen . . . . . 163

## A Thermische Eigenschaften der Kühlmedien

Tabelle A.1 vergleicht die Dichte  $\rho$ , die spezifische Wärmekapazität  $c_p$  und die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  von typischen Kühlmedien. Insbesondere  $H_2O$  besitzt eine hohe spezifische Wärmekapazität. Folglich können mit diesem Medium die Wärmeverluste der Leistungselektronik und Batterie abgeführt werden. Eine Ethylenglykol-Wasser-Mischung wird als gängiges Medium in den Kühlsystemen verwendet. Das Ethylenglykol dient zur Senkung des Gefrierpunktes. Ein Automatic Transmissions Fluid-Öl wird für die Getriebekühlung und die getriebeintegrierte elektrische Maschine angewandt. Dieses besitzt eine geeignete Viskosität, um die Reibungsverluste zu minimieren und die Wärmeverluste des Getriebes und der Synchronmaschine abzuführen.

Tabelle A.1: Kühlmedien und ihre thermischen Eigenschaften bei  $T=300K$  [55]

Kühlmedium	Dichte[ $kg/m^3$ ]	Spez.Wärmekapazitt.[ $J/(kg \cdot K)$ ]	Wärmeleit.[ $W/mK$ ]
Luft	1,17	1007	0,0261
$H_2O$	997	4179	0,6
Ethylenglykol	1114	2415	0,252
ATF-Öl	950	1630	0,160

Die Wärmeübergangswerte der Materialien in den Hochvoltkomponenten werden experimentell vermessen und in den thermisch-elektrischen Ersatzschaltbildern und Netzwerken hinterlegt. Für reine Feststoffe und reine Gase können die Dichte  $\rho$ , die spezifische Wärmekapazität  $c_p$  und die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  als Stoffwerte aus [77] entnommen werden. Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  definiert den thermischen Widerstand des einzelnen Materials, beziehungsweise des definierten Bilanzraumes. Eine hohe Leitfähigkeit wird bei gleichen Volumen des Bilanzraumes einen geringen thermischen Widerstand darstellen. Die spezifische Wärmekapazität ist für jedes Material und den Aufbau zu bestimmen. Aufgrund der abweichenden Materialeigenschaften kann es zu thermomechanischen Spannungen zwischen den einzelnen Schichten kommen. Aus diesen Gründen sind zu hohe Temperaturamplituden und zu hohe mittlere Temperaturen in der Aufbautechnik zu vermeiden.

## B Zyklen für die Zuverlässigkeitsbestimmung

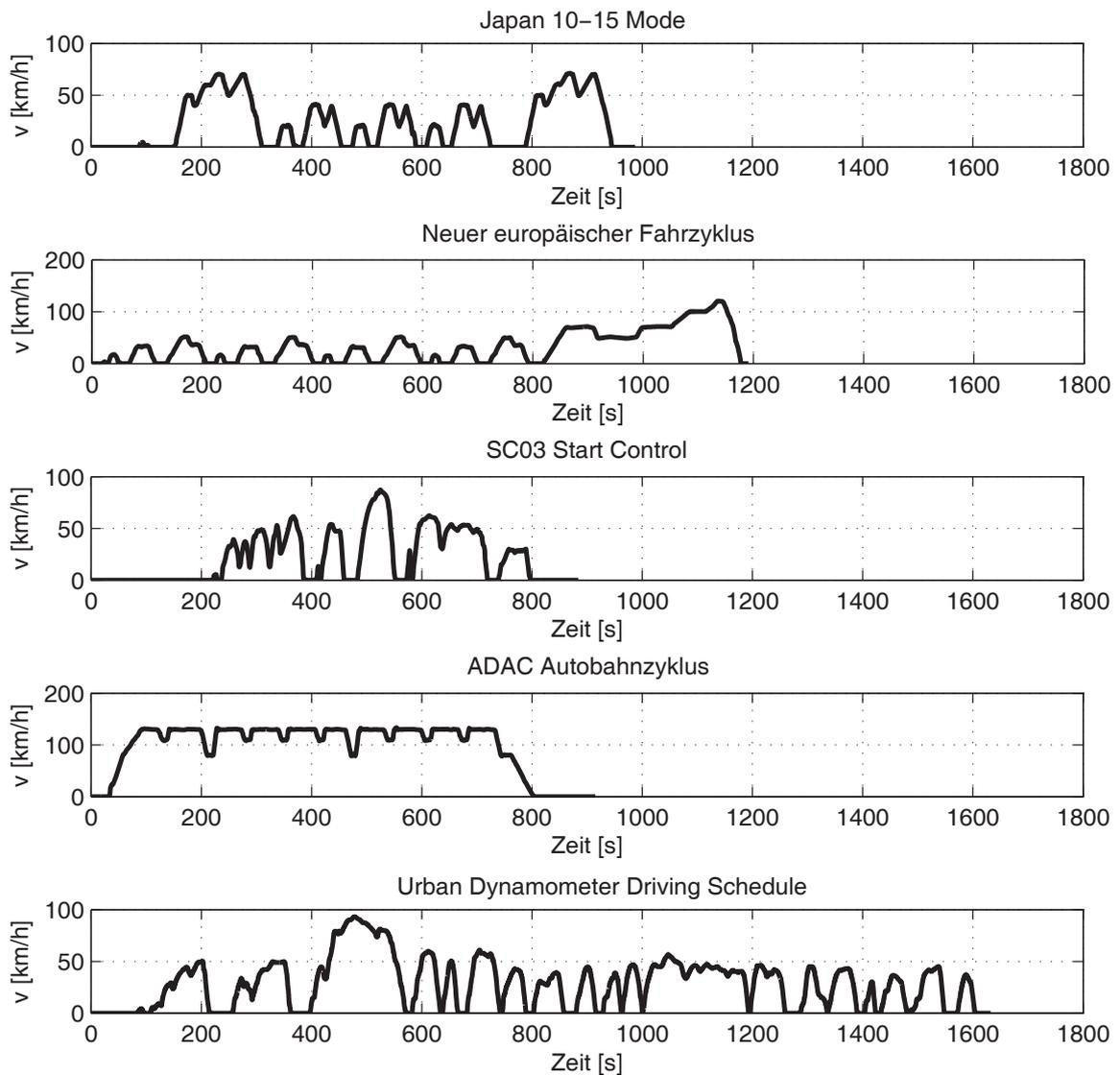


Abbildung B.1: Geschwindigkeitsprofile der angewandten Zyklen





