

Aufgabenstellung



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology



Aufgabenstellung für die Diplomarbeit

Herrn Johannes Felder, Matrikelnummer: 01529123 wird folgende Aufgabe gestellt:

„Optimales Energiemanagement für batterieelektrische Fahrzeuge“

Im Rahmen dieser Diplomarbeit soll das Energiemanagement von Elektrofahrzeugen untersucht werden. Hierzu soll zunächst ein Gesamtfahrzeugmodell eines Elektrofahrzeuges aufgebaut werden. In der Modellierung sollen sowohl die Längsdynamik als auch das Thermalsystem betrachtet werden. Anhand von vorhandenen Fahrzeugmessdaten und Simulationsergebnissen ist das Modell zu parametrieren. Mithilfe des erarbeiteten Modells und geeigneter Optimierungsalgorithmen soll dann das optimale Energiemanagement für ausgewählte Einsatzszenarien ermittelt werden. Aus den Optimierungsergebnissen sind abschließend Empfehlungen für Betriebsstrategien abzuleiten.

Schwerpunkte:

- Modellierung des Gesamtfahrzeuges (Längsdynamik und Thermalsystem)
- Parametrierung des Modells anhand von gegebenen Messdaten
- Definition von Einsatzszenarien und Auswahl des Optimierungsalgorithmus
- Optimierung des Energiemanagements in den erarbeiteten Einsatzszenarien
- Auswertung und Analyse der Optimierungsergebnisse

Die Ergebnisse der Arbeit sind vertraulich zu behandeln und dürfen nur mit schriftlicher Genehmigung des Institutsvorstandes weitergegeben bzw. veröffentlicht werden.

Ein gebundenes Exemplar und eine Version der Diplomarbeit auf Datenträger sind am Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik der Technischen Universität Wien abzugeben.

Dauer: März 2022 - August 2023

Kennzahl: E 066445

Die Benutzung der Versuchseinrichtungen des Institutes hat in den Dienststunden und unter Anleitung des Betreuers zu erfolgen. Dabei dürfen alle Arbeiten nur unter besonderer Beachtung der geltenden Sicherheitsvorschriften durchgeführt werden.

Einverstanden:

Betreuender Assistent:

Johannes Felder BSc

Lukas Acker MSc

Betreuer am Institut:

Institutsvorstand:

Assoc. Prof. Dr. Peter Hofmann

Prof. Dr. Bernhard Geringer

August 2023

B 23021

Eidesstattliche Erklärung

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

„Optimales Energiemanagement für batterieelektrische Fahrzeuge“

Nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin. Ich erkläre weiters an Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Arbeiten selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin/ einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, am 23.08.2023

Johannes Felder

Sperrvermerk:

Ich weise darauf hin, dass die Diplomarbeit vertrauliche Informationen und unternehmensinterne Daten beinhaltet. Daher ist eine Veröffentlichung oder Weitergabe von Inhalten an Dritte ohne die vorherige Einverständniserklärung des Instituts für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik nicht gestattet.

I. Kurzfassung

Im Zuge dieser Arbeit soll das Energiemanagement eines Elektrofahrzeugs untersucht und Optimierungspotentiale gefunden werden. Aus den gefundenen Daten sind schließlich Betriebsstrategien für das Energiemanagement abzuleiten.

Dazu wird ein Gesamtfahrzeugmodell eines batterieelektrischen Fahrzeugs mit speziellem Fokus auf die Längsdynamik und dem Thermalsystem erstellt und weitgehendst über Daten des Audi e-trons vom Rollenprüfstand seitens der TU Wien parametrisiert und validiert.

Das Gesamtfahrzeugmodell wird in einen Optimierungsalgorithmus, basierend auf dem Prinzip der dynamischen Programmierung, in Form von vier unterschiedlichen Einsatzszenarien implementiert und ausgewertet. Die vier Einsatzszenarien behandeln die Themen „Vorkonditionierung der Batterie für einen Schnellladezyklus“, „Adaptive Kabinentemperaturregelung“, „Direkter Einsatz von Rekuperationsleistung zur Batterietemperierung“ und „Vermeidung von Batterieverlusten durch Batterietemperierung“.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei tiefen Temperaturen (0°C , 10°C) durch Vorkonditionieren der Batterie die Ladedauer um 17,9 % bzw. 8,7% gesenkt werden konnte. Aufgrund des hohen Energieaufwandes ist es jedoch nicht zielführend die Batterie derart vorzukonditionieren, sodass gleich zu Beginn des Ladevorganges ein maximaler Ladestrom erreicht wird. Bei hohen Temperaturen (30°C , 35°C) muss die Batterie entsprechend temperiert werden, um eine Überhitzung der Batterie zu vermeiden. Einen entscheidenden Einfluss auf die Ladedauer hat die Temperaturregulierung jedoch nicht. Bei durchschnittlichen Temperaturen (20°C) ist kein aktives Kühlen oder Heizen der Batterie erforderlich.

Durch eine adaptive Temperaturregelung der Fahrerkabine können zwar Batterieverluste eingespart werden, jedoch wirken sich diese auf den gesamten Energiehaushalt gesehen nur gering aus. Dadurch ist kein merklicher Unterschied des SOC's mit oder ohne adaptive Kabinentemperierung am Ende des Fahrzyklus erkennbar.

Eine aktive Temperierung der Batterie zur Steigerung der maximal aufnehmbaren rekuperierbaren Leistung bei tiefen Temperaturen (-20°C bis -5°C) kann in bestimmten Fahrsituationen eine minimale Steigerung des SOC's bewirken. Mit steigender Temperatur reduziert sich der Nutzen dieser Betriebsstrategie stetig.

Die Vermeidung von Batterieverlusten durch Senkung des Innenwiderstandes durch eine aktive Batterietemperierung ist in Anbetracht der hohen Energieanforderungen des Thermalsystems energetisch nicht sinnvoll.

II. Abstract

In the course of this work, the energy management of an electric vehicle will be investigated and optimization potentials will be found. Finally, operating strategies for the energy management are to be derived from the found data.

For this purpose, a complete vehicle model with a special focus on the longitudinal dynamics and the thermal system will be created and largely parameterized using data of the Audi e-tron from the roller dynamometer at the Vienna University of Technology.

The overall vehicle model is implemented and evaluated in an optimization algorithm based on the principle of dynamic programming in the form of four different scenarios. The four scenarios deal with the topics "preconditioning of the battery for a fast charging cycle", "adaptive cabin temperature control", "direct use of recuperation power" and "avoidance of battery losses by battery temperature control".

The results show that at low temperatures (0°C, 10°C), preconditioning the battery reduced the charging time by 17.9% and 8.7% respectively. Due to the high energy input, however, it is not expedient to precondition the battery in such a way that maximum charging current is achieved right at the start of the charging process. At high temperatures (30°C, 35°C), the battery must be tempered to prevent overheating. However, temperature control does not have a decisive influence on the charging time. Battery temperature control at mild temperatures (20°C) was not required.

Although a flexible cabin temperature control can save battery losses, these have only a minor effect on the overall energy balance, which means that no noticeable difference in SOC can be seen at the end of the drive cycle.

Active temperature control of the battery to increase the maximum recuperable power can have a marginal positive effect on the SOC in certain driving situations at low temperatures (-20°C to -5°C). The effectiveness of the operating strategy decreases with rising temperature steadily.

Avoiding battery losses by lowering the internal resistance through active battery temperature control is not energetically sensible due to the high energy requirements of the thermal system.

III. Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung

AC	Wechselstrom („Alternating current“)
BMS	Batteriemanagementsystem
COP	Leistungszahl („Coefficient of Performance“)
DC	Gleichstrom („Direct current“)
DP	Dynamische Programmierung
EMS	Energiemanagementsystem
EM	E-Maschine
EV	Electric Vehicle
MAD	Mittlere absolute Abweichung („mean absolute deviation“)
MSG	Motorsteuergerät
PTC	Positive Temperature Coefficient
RMSE	Root mean square error
SOC	State of Charge
TMS	Thermalmanagementsystem

Formelzeichen

a	$[-]$	Gewichtungsfaktor
$a(t)$	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$	Beschleunigung
A	$[m^2]$	Stirnfläche Fahrzeug
C_0	$[Ah]$	Kapazität Batterie
C	$[-]$	Kostenfunktion
COP	$[-]$	Leistungszahl („Coefficient of Performance“)
$c_{p\ bat}$	$\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$	Spezifische Wärmekapazität Batterie
$c_{p\ kab}$	$\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$	Spezifische Wärmekapazität Kabine
$c_{p\ kar}$	$\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$	Spezifische Wärmekapazität Karosserie
c_w	$[-]$	Strömungswiderstandskoeffizient

F_{trak}	[N]	Traktionskraft
F_r	[N]	Rollwiderstand
F_L	[N]	Luftwiderstand
F_{st}	[N]	Steigungswiderstand
g	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$	Erdbeschleunigung
I_{bat}	[A]	Gesamtbatteriestrom
$I_{bat\ therm}$	[A]	Strom für Batterietemperierung aus Batterie
I_{chrg}	[A]	Ladestrom
$I_{chrg\ max}$	[A]	Maximaler Ladestrom
I_{rek}	[A]	Rekuperierter Strom
$I_{rek\ max}$	[A]	Maximal rekuperierbarer Strom
$I_{rek\ soc}$	[A]	Strom zum Laden der Batterie aus Rekuperation
$I_{rek\ therm}$	[A]	Strom zur Batterietemperierung aus Rekuperation
$I_{therm\ bat}$	[A]	Gesamtstrom des Thermalmanagementsystems für Batterietemperierung
$I_{therm\ kab}$	[A]	Strom des Thermalmanagementsystems für Kabine
I_{trak}	[A]	Strom der Antriebseinheit
$k(t)$	[%]	Steigung
k_{bat}	$\left[\frac{W}{K}\right]$	Wärmeübergangskoeffizient Batterie - Umgebung
k_{kab}	$\left[\frac{W}{K}\right]$	Wärmeübergangskoeffizient Kabine - Karosserie
k_{kar}	$\left[\frac{W}{K}\right]$	Wärmeübergangskoeffizient Karosserie - Umgebung
$MAD_{T_{kab}}$	[°C]	Mittlere absolute Abweichung der Kabinentemperatur
m	[kg]	Masse Fahrzeug
m_{bat}	[kg]	Masse Batterie
m_{kab}	[kg]	Masse Kabineninnenluft
m_{kar}	[kg]	Masse Karosserie und Interieur
$P_{bat\ therm}$	[W]	Elektrische Leistung für Wärmefluss zur Batterietemperierung aus Batterie
P_{chrg}	[W]	Ladeleistung
P_{kab}	[W]	Elektrische Leistung für Wärmefluss zur Kabinentemperierung
P_{last}	[W]	Lastleistung an die Batterie
P_{mech}	[W]	Mechanische Leistung an den Rädern

$P_{mot\ therm}$	[W]	Elektrische Leistung für Kühlmittelpumpe zur Motortemperierung
P_{nv}	[W]	Nebenverbraucherleistung
P_{rek}	[W]	Rekuperierte elektrische Leistung
$P_{rek\ max}$	[W]	Maximal rekuperierbare elektrische Leistung
$P_{rek\ soc}$	[W]	Elektrische rekuperierte Leistung für Laden der Batterie
$P_{rek\ therm}$	[W]	Elektrische rekuperierte Leistung für Wärmefluss zur Batterietemperierung
$P_{therm,i}$	[W]	Gesamte elektrische Leistung des Thermalsystems
P_{trak}	[W]	Elektrische Leistung für Traktionsanforderungen
$P_{v\ mot}$	[W]	Verlustleistung Motor
\dot{Q}_{bat}	[W]	Wärmeentwicklung Batterie
$\dot{Q}_{bat\ amb}$	[W]	Wärmefluss Batterie - Umgebung
$\dot{Q}_{bat\ therm}$	[W]	Wärmefluss für Batterietemperierung
\dot{Q}_{ext}	[W]	Externer Wärmefluss an Kabine
$\dot{Q}_{kar\ kab}$	[W]	Wärmefluss Karosserie - Kabine
$\dot{Q}_{amb\ kar}$	[W]	Wärmefluss Umgebung - Karosserie
$\dot{Q}_{kab\ therm}$	[W]	Wärmefluss für Kabinentemperierung
\dot{Q}_{mot}	[W]	Wärmeentwicklung Motor
R_i	[Ω]	Batterieinnenwiderstand
R_{last}	[Ω]	Lastwiderstand
SOC	[–]	State of Charge
T_{amb}	[$^{\circ}C$]	Umgebungstemperatur
T_{bat}	[$^{\circ}C$]	Batterietemperatur
T_{kab}	[$^{\circ}C$]	Kabinentemperatur
T_{kar}	[$^{\circ}C$]	Karosserietemperatur
T_{set}	[$^{\circ}C$]	Set-Temperatur der Kabinentemperatur
t_{chrg}	[s]	Ladedauer
tm_{kab}	[$\frac{J}{K}$]	Thermische Masse Kabine
tm_{kar}	[$\frac{J}{K}$]	Thermische Masse Karosserie
U_{bat}	[V]	Batteriespannung
U_0	[V]	Leerlaufspannung der Batterie
u_i	[–]	Steuervektor
$v(t)$	[$\frac{m}{s}$]	Geschwindigkeit

x_i	[–]	Zustandsvektor
α	[°]	Steigungswinkel
η_{bat}	[–]	Batteriewirkungsgrad
η_{mot}	[–]	Motorwirkungsgrad
η_{ptc}	[–]	Wirkungsgrad PTC-Heizer
κ	[–]	Faktor zur Berücksichtigung der rotatorischen Massen
λ_i	[–]	Normierungsfaktor
μ_r	[–]	Rollwiderstandskoeffizient
ρ_L	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	Dichte Luft

1 Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	1
1.1	Ausgangssituation und Problemstellung.....	1
1.2	Ziel der Arbeit.....	2
1.3	Methodisches Vorgehen.....	2
1.4	Aufbau und Struktur der Arbeit.....	3
2	Grundlagen.....	4
2.1	Grundlegender Aufbau Audi e-tron.....	4
2.2	Energiemanagementsystem (EMS).....	5
2.3	Hochvoltbatterie.....	6
2.4	Antriebseinheit.....	7
2.5	Thermalmanagementsystem.....	7
2.6	Nebenverbraucher.....	8
2.7	Optimierungsalgorithmus (Dynamische Programmierung).....	9
3	Modellbildung des Gesamtfahrzeugs.....	10
3.1	Struktur des Modells.....	10
3.2	Fahrzyklen.....	11
3.3	Leistungsermittlung.....	12
3.3.1	Antriebsstrang.....	12
3.3.2	Parametrierung des Antriebsstrangs.....	16
3.3.3	Thermisches Kabinenmodell.....	18
3.3.4	Parametrierung des thermischen Kabinenmodells.....	20
3.3.5	Nebenverbraucher.....	22
3.3.6	Ladezyklen.....	23
3.4	Batteriemodell.....	24
3.4.1	Elektrisches Batteriemodell.....	24
3.4.2	Parametrierung des elektrischen Batteriemodells.....	30
3.4.3	Thermisches Batteriemodell.....	31
3.4.4	Parametrierung des thermischen Batteriemodells.....	33
4	Einsatzszenarienmodellierung.....	35
4.1	Vorkonditionierung der Batterie für einen Schnellladezyklus.....	36

4.2	Adaptive Kabinentemperaturregelung	55
4.3	Direkter Einsatz von Rekuperationsleistung zur Batterietemperierung	63
4.4	Vermeidung von Batterieverlusten durch Batterietemperierung	74
5	Interpretation der Simulationsergebnisse	78
5.1	Diskussion der Ergebnisse	78
5.2	Empfehlungen für Betriebsstrategien	85
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	87
6.1	Zusammenfassung	87
6.2	Ausblick	88
7	Literaturverzeichnis	90

1. Einleitung

In Anbetracht des fortschreitenden Klimawandels steigt das Umweltbewusstsein und der Wunsch nach mehr Nachhaltigkeit der generellen Bevölkerung [1]. Ein entscheidender Punkt dabei ist der Automobilsektor, weshalb die Entwicklung neuer nachhaltigeren Antriebsmöglichkeiten ein wichtiger Bestandteil aktueller Forschung ist. Das Konzept eines rein elektrisch betriebenen Fahrzeuges erweist sich aufgrund der zahlreichen Vorteile als eine vielversprechende Technologie. Verglichen mit einem konventionellen Fahrzeug mit Verbrennungsmotor zeichnet sich ein Elektrofahrzeug durch einen hohen Wirkungsgrad, einem hohen Drehmoment, einem simplen mechanischen Aufbau, einem geringen Wartungsaufwand, der Möglichkeit kinetische Energie zu rekuperieren, einer lokalen Emissionsfreiheit, einem geringen Lärmpegel und einem hohen Fahrkomfort aus [2]. Zudem kann durch den Einsatz erneuerbarer Energien ein CO₂-freier Ladevorgang ermöglicht werden. Demgegenüber steht jedoch eine energie- und ressourcenintensive Herstellung der Hochvoltbatterie. Weiters resultiert aus der begrenzten Energiedichte der Batterie eine eingeschränkte Reichweite und hohe Anschaffungskosten, weshalb sich noch viele Kunden gegen den Kauf eines batterieelektrischen Fahrzeuges entscheiden [2]. Auch die lange Ladedauer eines Elektrofahrzeugs verglichen mit der Betankung eines Fahrzeuges mit Verbrennungsmotor wirkt sich negativ auf die Kaufentscheidung aus.

Deshalb ist es unabdingbar durch ein intelligentes Energiemanagement die zahlreichen Energieflüsse innerhalb eines Elektroautos derart zu steuern, so dass die bereitgestellte Energie der Batterie so effektiv wie möglich verwertet wird und Verluste minimiert werden. Dadurch kann das effiziente Arbeiten des Fahrzeuges sichergestellt werden, wodurch die Reichweite erhöht und Betriebskosten gesenkt werden können. Dies steigert die Attraktivität des Elektroautos beim Kunden, wodurch eine Marktetablierung beschleunigt wird, was wiederum ein wichtiger Schritt weg von fossilen Brennstoffen und ein Schritt in eine nachhaltigere Zukunft darstellt.

Im Zuge dieser Arbeit wird das Energiemanagement eines batterieelektrischen Fahrzeuges anhand ausgewählter Einsatzszenarien untersucht und nach verschiedenen Ansätzen zur Verbesserung der Energieeffizienz gesucht.

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Einzigster Ausgangspunkt für die Energiebereitstellung eines batterieelektrisch betriebenen Fahrzeuges ist die Hochvoltbatterie. Verglichen mit einem Verbrennungsmotor entfällt bei einem rein elektrisch betriebenen Fahrzeug die hohe Abwärme des Motors. Somit müssen von der Hochvoltbatterie neben der Bereitstellung der geforderten Leistung des Traktionssystems und den elektrischen

Nebenverbrauchern auch Heiz- und Kühlaufgaben für die Fahrerkabine, die E-Maschinen und der Batterie selbst übernommen werden [3].

Mithilfe eines intelligenten Energiemanagement des Fahrzeugs kann das komplexe Zusammenspiel der verschiedenen Energieflüsse eines Elektrofahrzeugs bestmöglich gesteuert werden, wodurch die begrenzte Energie der Hochvoltbatterie so effizient wie möglich verarbeitet werden kann. Dadurch können auch Aspekte wie Sicherheit, Alterung der Komponenten und Reichweitenanforderungen der Kunden sichergestellt werden.

1.2 Ziel der Arbeit

Ziel der Arbeit ist es, ein Gesamtfahrzeugmodell eines batterieelektrischen Fahrzeuges zu erstellen, mit speziellem Fokus auf die Längsdynamik und das Thermalsystem. Das Modell ist anhand von Daten des Audi e-tron seitens der TU Wien und Simulationsergebnissen eines komplexeren Simscape-Modells zu parametrisieren. In weiterer Folge soll eine Auswahl an verschiedenen Einsatzszenarien über das Energiemanagement des Fahrzeugs erstellt werden. Diese Einsatzszenarien sind durch Abwandeln des Gesamtfahrzeugmodells in einen Optimierungsalgorithmus, basierend auf dem Prinzip der dynamischen Programmierung, zu implementieren und auszuwerten. Die gewonnenen Ergebnisse sollen interpretiert und diskutiert werden. Abschließend sind Empfehlungen für Betriebsstrategien des Energiemanagements abzuleiten.

1.3 Methodisches Vorgehen

Um die Ziele der Arbeit zu erreichen, wurde als erster Schritt ein Gesamtfahrzeugmodell in Simulink erstellt. Dieses diente der Parametrierung sowie dem Darstellen von Zusammenhängen zwischen den einzelnen Komponenten. Dazu wurde verschiedene Literatur [3]–[6] bezüglich der Bildung eines Gesamtfahrzeugmodells eines batterieelektrischen bzw. eines Hybrid-Fahrzeugs analysiert. In weiterer Folge wurden die einzelnen Einheiten (Hochvoltbatterie, Antriebseinheit, Thermalsystem, Fahrerkabine, Nebenverbraucher, Ladezyklen) detaillierter ausgearbeitet und in das Gesamtfahrzeugmodell eingebettet. Wiederum diente Literatur als Ausgangspunkt [3]–[11].

Nach Fertigstellung des Simulink-Modells wurde dieses nach und nach in Matlab überführt und in Simulink sowie in Matlab parametrisiert. Die meisten Parameter wurden von Messungen am Rollenprüfstand an der TU Wien bestimmt. Parameter, welche nicht direkt aus Messungen des Audi e-trons ermittelt werden konnten, wurden aus den Simulationsergebnissen eines komplexeren Modells oder geeigneter Literatur übernommen [3], [5], [6], [12].

Nach der Parametrierung und Validierung des Gesamtfahrzeugmodells, wurde nach interessanten und relevanten Einsatzszenarien für den Optimierungsalgorithmus gesucht. Gesucht wurde nach Problemen und Hypothesen, welche das Energiemanagement eines batterieelektrischen Fahrzeuges betreffen und welche im Sinne der dynamischen Programmierung sinnvoll auswertbar sind. Aus [3], [4], [10], [13]–[15] wurden mehrere Einsatzszenarien zur Modellierung gefunden. Mit Fortschreiten der Arbeit stellten sich Einige als nicht zielführend heraus, woraus sich im Endeffekt vier Einsatzszenarien zur endgültigen Auswertung herauskristallisierten.

Diese Einsatzszenarien wurden in den Optimierungsalgorithmus von [16] implementiert und ausgewertet. Zur Implementierung wurden für jedes Einsatzszenario eine Zielsetzung und entsprechende Anforderungen festgelegt. Daraus wurde anschließend die Problemformulierung abgeleitet, woraus das Einsatzszenario schlussendlich modelliert wurde. Für die Auswertung der Einsatzszenarien wurden die jeweils relevanten Teile des Gesamtfahrzeugmodells verwendet, nicht relevante Teile wurden im Sinne eines geringeren Rechenaufwands vereinfacht modelliert oder gänzlich weggelassen.

Die Auswertung erfolgte bei konstanten Umgebungsparametern und fest vorgelegten Fahrzyklen. Über einen Gewichtungsfaktor wurden zwei in Konflikt zueinander stehenden Variablen zu einer gemeinsamen Ersatzzielfunktion zusammengefasst und daraus optimale Lösungen dieser Ersatzzielfunktion bestimmt [17]. Die Ergebnisse wurden in einer Pareto-Front veranschaulicht.

Nach Aufbereiten der Ergebnisse wurden diese schließlich interpretiert und diskutiert. Aus den daraus gezogenen Schlüssen, wurden anschließend Empfehlungen für mögliche Betriebsstrategien für das Energiemanagement gezogen.

1.4 Aufbau und Struktur der Arbeit

Nach einer kurzen Einleitung in Kapitel 1, werden in Kapitel 2 die Grundlagen eines Elektroautos erläutert. Kapitel 3 beschreibt die Bildung des Gesamtfahrzeugmodells mit den mechanischen, elektrischen und thermischen Zusammenhängen der Komponenten. Daraus werden in Kapitel 4 die verschiedenen Einsatzszenarien abgeleitet, simuliert und ausgewertet. Anschließend werden die Ergebnisse in Kapitel 5 interpretiert und diskutiert, sowie Empfehlungen für Betriebsstrategien des Energiemanagements geschlussfolgert. Eine abschließende Zusammenfassung, sowie ein Ausblick der Arbeit sind in Kapitel 6 angeführt.

2 Grundlagen

Im Folgendem werden die technischen Grundlagen eines batterieelektrischen Fahrzeugs anhand des Audi e-trons erläutert. Zuerst wird ein Überblick über den generellen Aufbau des Audi e-trons geschaffen, anschließend werden wichtige Komponenten näher im Detail betrachtet. Aufbauend auf diesen Grundlagen wird im späteren Verlauf das Gesamtfahrzeugmodell gebildet, woraus schließlich die Modellbildung der Einsatzszenarien abgeleitet wird.

2.1 Grundlegender Aufbau Audi e-tron

In Abbildung 2.1 ist der grundlegende Aufbau des Audi e-trons dargestellt. Die Hauptkomponenten setzen sich aus der Hochvoltbatterie, der Antriebseinheit, dem Thermalsystem, der Fahrerkabine und den Nebenverbrauchern zusammen.

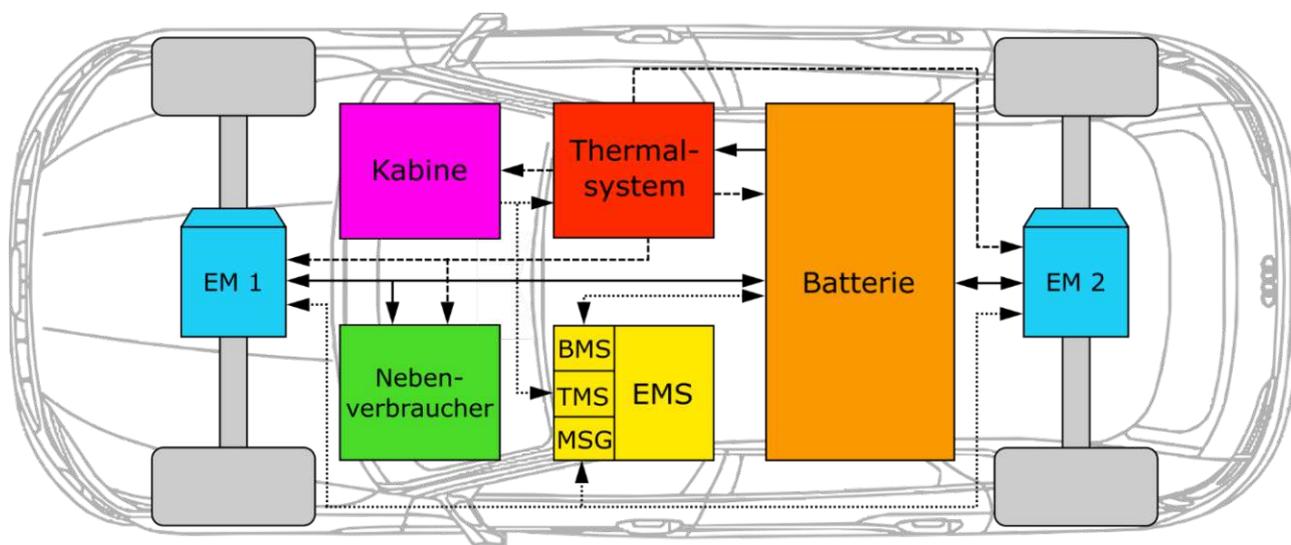


Abbildung 2.1: Grundlegender Aufbau Audi e-tron mit Hochvoltbatterie, E-Maschinen (EM 1/2), Thermalsystem, Fahrerkabine, Nebenverbraucher und Energiemanagementsystem (EMS) mit Batteriemanagementsystem (BMS), Thermalmanagementsystem (TMS), Motorsteuergerät (MSG), — Leistungsfluss, - - - Thermalfluss, ···· Informationsfluss

Alle diese Elemente werden vom Energiemanagementsystem (EMS) überwacht und gesteuert. Wobei das EMS weiter in Batteriemanagementsystem (BMS), Motorsteuergerät (MSG) und Thermalmanagementsystem (TMS) aufgesplittet werden kann.

2.2 Energiemanagementsystem (EMS)

Unter dem Energiemanagement wird die allumfassende Regelung und Steuerung der fahrsituationsabhängigen Energieflüsse zwischen den einzelnen Einheiten verstanden [3]. Dazu steht das Energiemanagementsystem im ständigen Informationsaustausch mit den umliegenden Einheiten. Aufgabe ist es, Komfort- und Sicherheitsaspekte des Fahrers, sowie ein effizientes Arbeiten des Fahrzeugs zu gewährleisten.

Das Energiemanagementsystem kann grob in 3 Teile zerlegt werden:

1) Batteriemanagementsystem (BMS):

Das Batteriemanagementsystem ist verantwortlich für die Ermittlung verschiedenster Batterieparameter und -anforderungen. Diese umfassen die Bestimmung des SOCs oder das Festlegen der maximalen Lade- und Entladeströme. Weitere Anforderungen sind unter anderem das Cell-balancing, Sicherheitsabfragen, die Isolationsüberwachung, Ermittlung von Heiz- und Kühlanforderungen, Schließen der Leistungsschütze bei Inbetriebnahme und Öffnen der Leistungsschütze bei einem Crash [6].

2) Motorsteuergerät (MSG):

Aufgabe des Motorsteuergeräts ist es, die Signale des Fahrzeuglenkers über das Gas- und Bremspedal zu erfassen und die daraus resultierenden Drehzahl- und Momentanforderungen an die E-Maschinen weiterzuleiten. Zusätzlich wird die Rekuperation vom Motorsteuergerät geregelt [6].

3) Thermalmanagementsystem (TMS):

Das Thermalmanagementsystem hat die Aufgabe, die verschiedenen Wärmequellen und -senken optimal aufeinander abzustimmen, um dadurch Wärmeverluste der verschiedenen Thermaleinheiten weitmöglichst zu minimieren. Weiters stellt das Thermalmanagement sicher, dass die jeweiligen Temperaturbereiche der temperatursensiblen Komponenten eingehalten werden [18].

Durch eine intelligente Steuerung der verschiedenen Energieflüsse durch das Energiemanagementsystem können Leistungsanforderungen mit einem minimalen Energieeinsatz erfüllt werden. Weiters können temporäre Energieüberschüsse genutzt werden um thermische Komponenten vorzukühlen bzw. -heizen oder elektrische Energiespeicher aufzuladen, wodurch im späteren Fahrverlauf Energie eingespart werden kann [3]. Dadurch kann die Reichweite, die Lebensdauer der Komponenten und der Komfort der Fahrzeuginsassen schließlich maximiert werden.

2.3 Hochvoltbatterie

Ausgangspunkt für die Energiebereitstellung eines Elektroautos ist die Hochvoltbatterie. Diese hat die Aufgabe elektrische Einheiten wie die E-Maschinen, das Thermalsystem und etliche Nebenverbraucher mit Energie zu versorgen. Gesteuert und überwacht wird die Hochvoltbatterie vom BMS. Somit stellt das BMS die Schnittstelle zwischen Batterie und Fahrzeug dar und zählt dadurch zum EMS des Fahrzeugs [19].

Die Energiebereitstellung wird beim Audi e-tron von 432 Lithium-Ionen Zellen in Pouch-Bauform übernommen [6]. Da die Zellspannung einer einzelnen Zelle für den praktischen Einsatz nicht ausreichend ist, werden mehrere Zellen zu einem Modul zusammengeschaltet. Durch ein Verschalten der Zellen in Reihe werden die Zellspannungen summiert, bei einer Parallelverschaltung wird die Kapazität der Batterie erhöht [19]. Die Module werden wiederum in Reihe geschaltet, woraus schließlich eine Nennspannung von 396 V bei einer Kapazität von 240 Ah für die gesamte Batterie resultiert [6].

Temperiert wird die Hochvoltbatterie über einen Flüssigkeitskreislauf. Über verschiedene Verschaltungen kann eine Kühlung mittels Verdampferkreislauf und eine Erwärmung durch zwei PTC-Elemente erfolgen [6].

Der optimale Arbeitsbereich der Hochvoltbatterie des Audi e-trons liegt zwischen 25-35°C [6]. Verluste in der Batterie äußern sich als Joule'sche Wärme, wodurch sich die Batterie bei steigenden Verlusten dementsprechend aufwärmt [20]. Durch eine unkontrollierte Erwärmung der Batterie kann eine exotherme Reaktion, der „thermal runaway“ ausgelöst werden [19]. Ein Betrieb bei sehr niedrigen Temperaturen und hohen Entladeströmen äußert sich in Lithiumplating, einer Ablagerung von Lithiummetallen an der Anode. Diese Ablagerungen führen zu einem Leistungsverlust der Batterie und können im Extremfall einen Kurzschluss und dadurch wiederum einen thermal runaway herbeiführen [20]. Somit beschleunigt ein Betreiben der Batterie außerhalb des optimalen Arbeitsbereichs Alterungsprozesse und wirkt sich generell negativ auf die Performance der Batterie aus [21].

Auch bei Ladevorgängen müssen einige Sicherheitsaspekte berücksichtigt werden. Um ein Überschreiten der maximalen Zellspannung zu vermeiden, muss der maximale Ladestrom bei hohen SOC's verringert werden, weshalb Schnellladezyklen meist bei einem SOC von 80% enden oder in der Leistung reduziert werden. Zusätzlich zum SOC ist der maximale Ladestrom von der Batterietemperatur abhängig [8]. Bei einer niedrigen bzw. hohen Batterietemperatur muss der Ladestrom entsprechend gedrosselt werden, um eine Beschädigung der Batterie zu vermeiden.

2.4 Antriebseinheit

Der Audi e-tron besitzt zwei Asynchronmaschinen an Vorder- und Hinterachse. Über ein fixes Getriebe in achsparalleler bzw. coaxialer Bauart wird das Moment an die Räder weitergeleitet. Den Drehzahlausgleich zwischen den Rädern bewerkstelligt ein im Getriebe verbautes Planeten-Leichtbaudifferential [6].

Das Motorsteuergerät (MSG) stellt die Kommunikationsschnittstelle zwischen Fahrzeuglenker, E-Maschinen und Hochvoltbatterie dar. Dieses ermittelt die geforderte Leistung der E-Maschinen, welche im Antriebsfall von der Hochvoltbatterie in Form von Gleichstrom bereitgestellt wird. Der gelieferte Gleichstrom der Hochvoltbatterie wird von der Leistungselektronik in Drehstrom für die E-Maschinen umgewandelt, woraus schließlich das Moment an die Räder resultiert [6].

Ist das Moment an den Rädern negativ, wie es bei einem Bremsvorgang der Fall ist, kann ein Teil der Bremsleistung zum Laden der Batterie rekuperiert werden. Die E-Maschinen fungieren dadurch als Generator. In diesem Generatorbetrieb kann von den E-Maschinen eine Verzögerung von 0,3g aufgebracht werden [6]. Die Leistungselektronik wandelt im Rekuperationsfall den erzeugten Drehstrom der E-Maschinen in Gleichstrom zum Laden der Batterie um.

Die im Betrieb entstehende Wärme der E-Maschinen und der Leistungselektronik wird über einen Niedertemperaturflüssigkeitskreislauf abgeführt [6]. Je nach Fahrsituation wird die geforderte Kühlleistung vom Thermalmanagementsystem entsprechend angepasst. In Folgendem wird das Thermalmanagementsystem des Audi e-trons näher beleuchtet.

2.5 Thermalmanagementsystem

Um ein optimales Arbeiten und die Funktionalität der Komponenten eines Elektroautos zu gewährleisten, müssen diese entsprechend vom Thermalmanagementsystem temperiert werden. Äußere Einflüsse der Umgebung und Wärmeentwicklung während des Betriebs können dazu führen, dass Komponenten nicht mehr in ihrem optimalen Arbeitsbereich betrieben werden können oder sogar Leistungsgrenzen erreicht werden.

Aufgrund des hohen Rechenaufwandes der dynamischen Programmierung wurde das komplexe Thermalsystem des Audi e-trons vereinfacht modelliert. Die vielzähligen Ventile und Verschaltungen der jeweiligen Kreisläufe würden den Rechenaufwand der Simulation enorm vergrößern. Deshalb wurde für Heizfälle ein Heizkreislauf mit zwei Positive Temperature Coefficient Heater (PTC) und für Kühlzwecke ein Kältemittelkreislauf mit Kältemittelkompressor zur Modellierung herangezogen.

Generell kann das Thermalmanagementsystem eines Elektroautos in 4 Bereiche eingeteilt werden:

- Hochvoltbatterie
- Antriebseinheit
- Fahrerkabine
- Weitere Einheiten: Leistungselektronik, Ladegeräte etc.

Über das Thermalmanagementsystem (TMS) erhält das Thermalsystem entsprechende Inputs und liefert wiederum die thermischen Zustände der jeweiligen Komponenten zurück. Somit kann das TMS zum Energiemanagement gezählt werden. Da die Antriebseinheiten und die Leistungselektronik auch bei niedrigeren Temperaturen betrieben werden können, benötigen diese nur eine Einheit zur Wärmeabfuhr [4]. Diese Wärmeabfuhr wird beim Audi e-tron über einen Niedertemperaturflüssigkeitskreislauf realisiert. Eine aktive Wärmezufuhr ist nicht notwendig. Anders verhält es sich bei der Hochvoltbatterie sowie der Fahrerkabine. Diese Einheiten benötigen eine Möglichkeit zum Abführen sowie Zuführen von Wärme [4].

Anders als es bei einem Verbrennungsmotor der Fall ist, besteht bei einem Elektroauto keine so große Temperaturspreizung zwischen Motor- und Umgebungstemperatur [3]. Dadurch steht nicht so viel Abwärme für Heizzwecke zur Verfügung, wodurch die Hochvoltbatterie die einzige Energiequelle für das Thermalsystem darstellt. Durch diesen Zusatzaufwand kann die Reichweite des Fahrzeugs entscheidend verkürzt werden [22].

Ziel des Thermalmanagementsystem ist es, durch ein intelligentes Verschalten der zahlreichen Kühlkreisläufe Wärmequellen und Wärmesenken zu kombinieren, um somit Abwärmeströme in das System zurückzuspeisen, anstatt diese an die Umgebung abzugeben [6]. Dadurch kann der Gesamtenergiebedarf des Thermalsystems reduziert werden, was in einer erhöhten Reichweite bei gleichbleibendem Komfort der Fahrzeuginsassen resultiert.

2.6 Nebenverbraucher

Nebenverbraucher besitzen die Aufgabe, Sicherheitsaufgaben zu erfüllen, den Fahrer bei der Lenkung des Fahrzeuges zu unterstützen und gleichzeitig seinen Komfort zu gewährleisten [3]. Die Energiebereitstellung dieser wird wiederum von der Hochvoltbatterie übernommen. Eine detaillierte Modellierung aller Nebenverbraucher wäre angesichts der hohen Rechenkapazität der dynamischen Programmierung nicht zielführend. Daher wird jeder Nebenverbraucher mit einer Einschaltdauer gewichtet, woraus schließlich eine konstante Nebenverbraucherleistung an die Batterie bestimmt wird.

2.7 Optimierungsalgorithmus (Dynamische Programmierung)

Bei der dynamischen Programmierung (DP) handelt es sich um kein direktes Optimierungsverfahren, sondern um eine Strategie zum Lösen eines mehrstufigen Problems, welches in einzelne Teilprobleme aufgespalten wird [23]. Nach dem Bellmanschen Optimalitätsprinzip bildet jede Teillösung einer optimalen Lösung selbst eine optimale Lösung [24]. Darauf aufbauend kann ein globales Optimum gefunden werden, indem zunächst die optimalen Lösungen der Teilprobleme der einzelnen Stufen ermittelt werden, welche anschließend von der DP miteinander verknüpft werden [23].

Zur Beschreibung des Problems müssen die verschiedenen Variablen zuerst diskretisiert werden. In weiterer Folge kann das Teilproblem einer Stufe durch den Zustandsvektor x_n , den Steuervektor u_n und den Kosten C_n beschrieben werden. Über den Steuervektor u_n wird der Anfangszustand einer Stufe x_n beeinflusst, wodurch sich der neue Zustand der nächsten Stufe x_{n+1} bildet. Die Wirksamkeit des Steuervektors u_n kann über die Kosten C_n ermittelt werden. Dieser Prozess wird wiederholt, bis das N-te Glied und somit das Ende des Problems erreicht ist. Der schematische Ablauf ist in Abbildung 2.2 dargestellt [23].

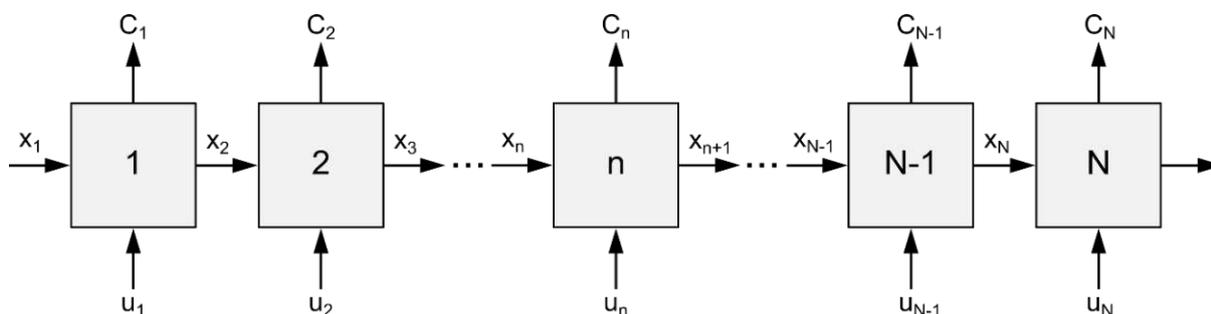


Abbildung 2.2: Grundlegender Ablauf der dynamischen Programmierung

Aufgrund des hohen Rechenaufwandes der DP, kann ein Algorithmus dieser Art nicht direkt in ein Fahrzeug verbaut werden [3]. Zusätzlich müssten der genaue Fahrverlauf und daraus resultierende Parameter über den gesamten Fahrzyklus bekannt sein. Ein Ansatz hier wäre die stochastische DP, welche jedoch in dieser Arbeit nicht weiter behandelt wird. Dennoch birgt die DP ein hilfreiches Werkzeug, um mögliche Betriebsstrategien zu entwickeln und daraus Empfehlungen für Echtzeitfahrten abzuleiten.

3 Modellbildung des Gesamtfahrzeugs

Im Folgenden wird das Gesamtfahrzeugmodell für den Audi e-tron vorgestellt. Um geeignete Strategien für das Energiemanagement ableiten zu können, müssen nicht nur die einzelnen Komponenten an sich untersucht werden, sondern auch ihre Zusammenhänge und ihre gegenseitige Beeinflussung untereinander. Deshalb wurde zuerst ein Gesamtfahrzeugmodell in Simulink erstellt, woraus in späterer Folge die verschiedenen Einsatzszenarien für den DP-Algorithmus in Matlab abgeleitet wurden.

Nach einer kurzen Beschreibung der generellen Struktur des Gesamtfahrzeugmodells und der Fahrzyklen wird die Modellierung und die Parametrierung der einzelnen Einheiten erläutert.

3.1 Struktur des Modells

Das Gesamtfahrzeugmodell ist als ein rückwärtsgerichtetes Modell aufgebaut. Das heißt, dass entsprechende Inputs wie Geschwindigkeit, Beschleunigung und Steigung fix vorgegeben sind. Auf Basis dieser Inputs werden über die Leistungsermittlung die Leistungen der verschiedenen Einheiten generiert, woraus anschließend über das Batteriemodell die entsprechenden Outputs ermittelt werden. Die Outputs beinhalten den Verlauf des Batteriestroms, der Batteriespannung, des SOC's und der Temperatur der Batterie. Weiters können je nach Anwendungsfall auch verschiedene Leistungen als Output dienen, woraus in weiterer Folge die einzelnen Ströme der Einheiten bestimmt werden.

Daraus ergeben sich die 3 Teile der gesamten Simulation:

- 1) Fahrzyklen (Inputs)
- 2) Leistungsermittlung
- 3) Batteriemodell (Outputs)

In Abbildung 3.1 ist die grundlegende Struktur des Gesamtfahrzeugmodells bildlich dargestellt:

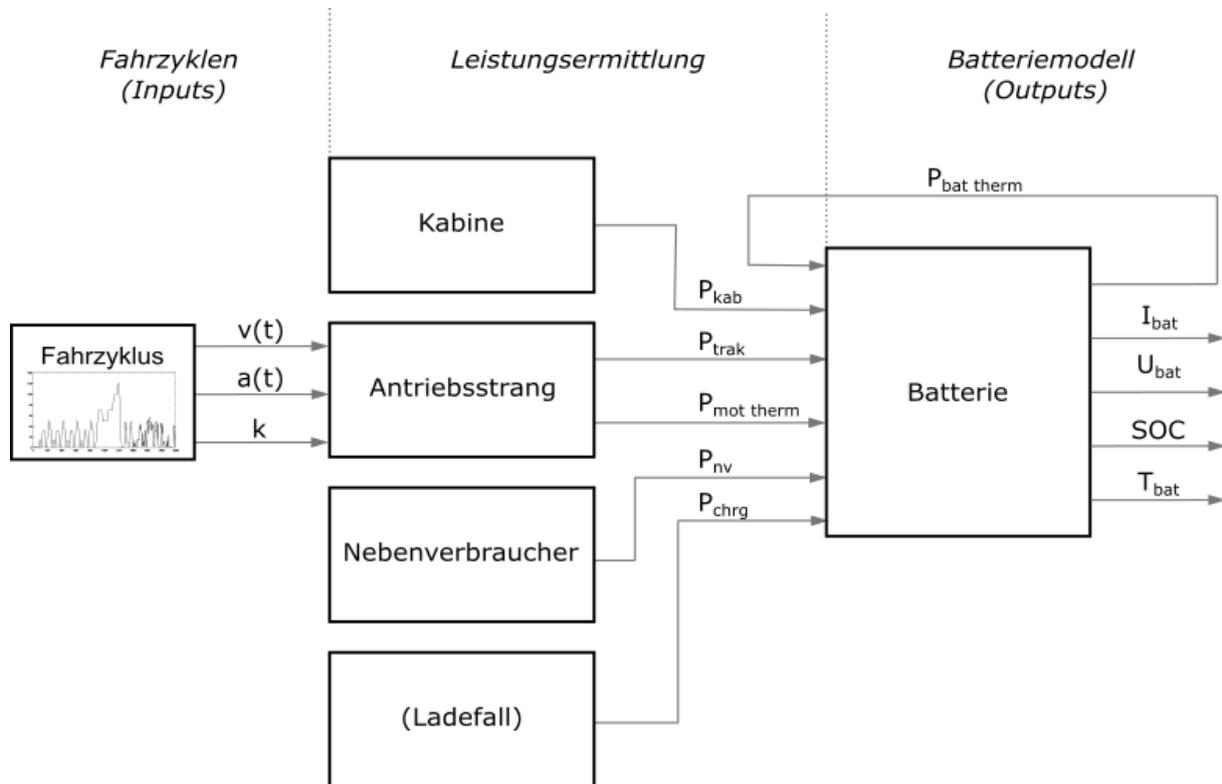


Abbildung 3.1: Struktur des Gesamtfahrzeugmodell

P_{kab}	Leistung für Kabinentemperierung in [W]
P_{trak}	Leistung für Traktionsanforderungen in [W]
P_{mot}	Leistung für Motortemperierung in [W]
P_{nv}	Nebenverbraucherleistung in [W]
P_{chrg}	Ladeleistung in [W]
$P_{bat\ therm}$	Leistung für Batterietemperierung in [W]

3.2 Fahrzyklen

Unterschiedliche Fahrzyklen bilden die Inputs für das Modell. Diese setzen sich aus einzelnen Fahrprofilen für Geschwindigkeit ($v(t)$), Beschleunigung ($a(t)$) und Steigung (k) zusammen. Da nur die Längsdynamik des Fahrzeuges betrachtet wird, beinhalten die Fahrprofile keine Kurvenfahrten. In Abbildung 3.2 ist ein beispielhafter Fahrzyklus ersichtlich.

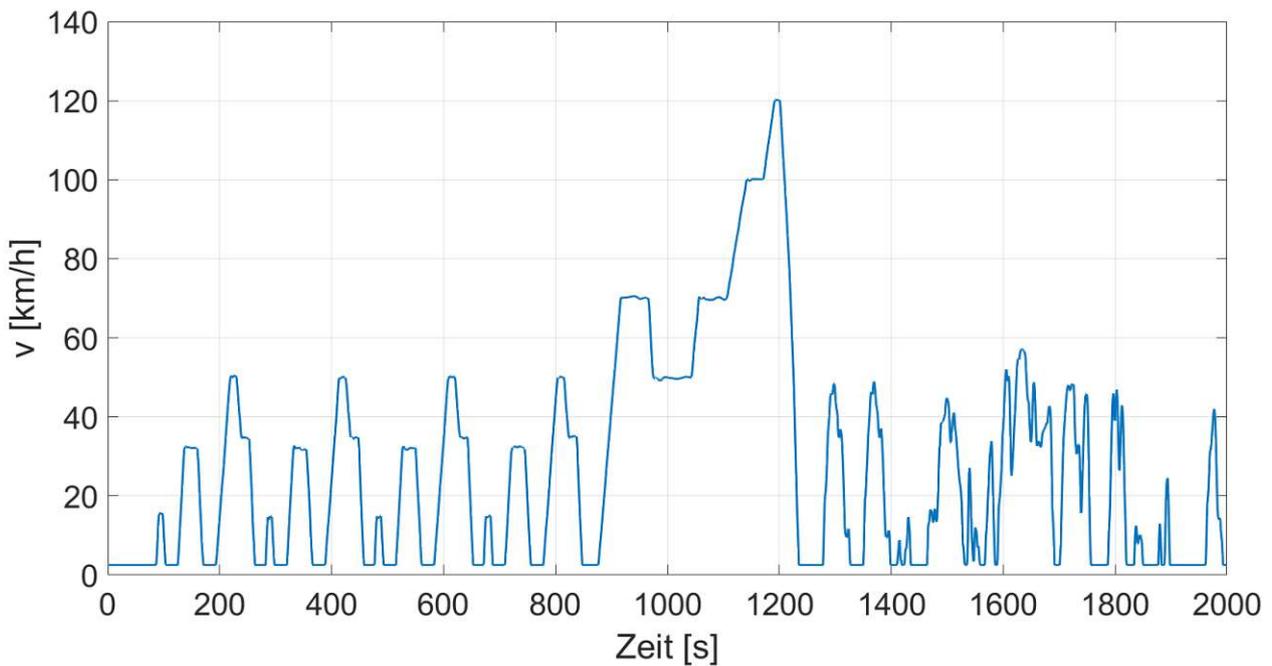


Abbildung 3.2: Geschwindigkeitsprofil eines Fahrzyklus bestehend aus einem NEFZ- und teilhaften WLTP-Fahrzyklus

Dieser Fahrzyklus wird für die Auswertung der meisten Einsatzszenarien bzw. für die Parametrierung der modellierten Einheiten herangezogen. Jedoch können verschiedenste Fahrzyklen als Input für das Modell dienen.

3.3 Leistungsermittlung

Ziel der Leistungsermittlung ist es, aus den erhaltenen Inputs des Fahrzyklus über die mechanischen, thermischen und elektrischen Zusammenhänge die entsprechenden Leistungen der verschiedenen Einheiten zu generieren. Diese werden in weiterer Folge an die Batterie weitergeleitet.

3.3.1 Antriebsstrang

Der Antriebsstrang hat die Aufgabe, aus den Inputs des Fahrzyklus die wirkenden Fahrwiderstände auf das Fahrzeug zu ermitteln und daraus die benötigte elektrische Leistung des Antriebs (P_{trak}) und der Motorkühlung ($P_{mot\ therm}$) an die Batterie zu bestimmen.

Die Längsdynamik beschreibt das dynamische Verhalten des Fahrzeuges in Längsrichtung. Etwaige Querdynamiken, welche in Kurvenfahrten entstehen, werden in der Simulation nicht berücksichtigt. Weiters besitzt der Audi e-tron zwei Antriebseinheiten an zwei verschiedenen Achsen. In der Modellierung wird die gesamte Antriebseinheit zur Vereinfachung als ein Antrieb modelliert. Um die Gesamtleistung des Antriebes zu berechnen, müssen zuerst die Fahrtwiderstände am Fahrzeug bestimmt werden. In Abbildung 3.3 sind die wirkenden Kräfte am Fahrzeug abgebildet.

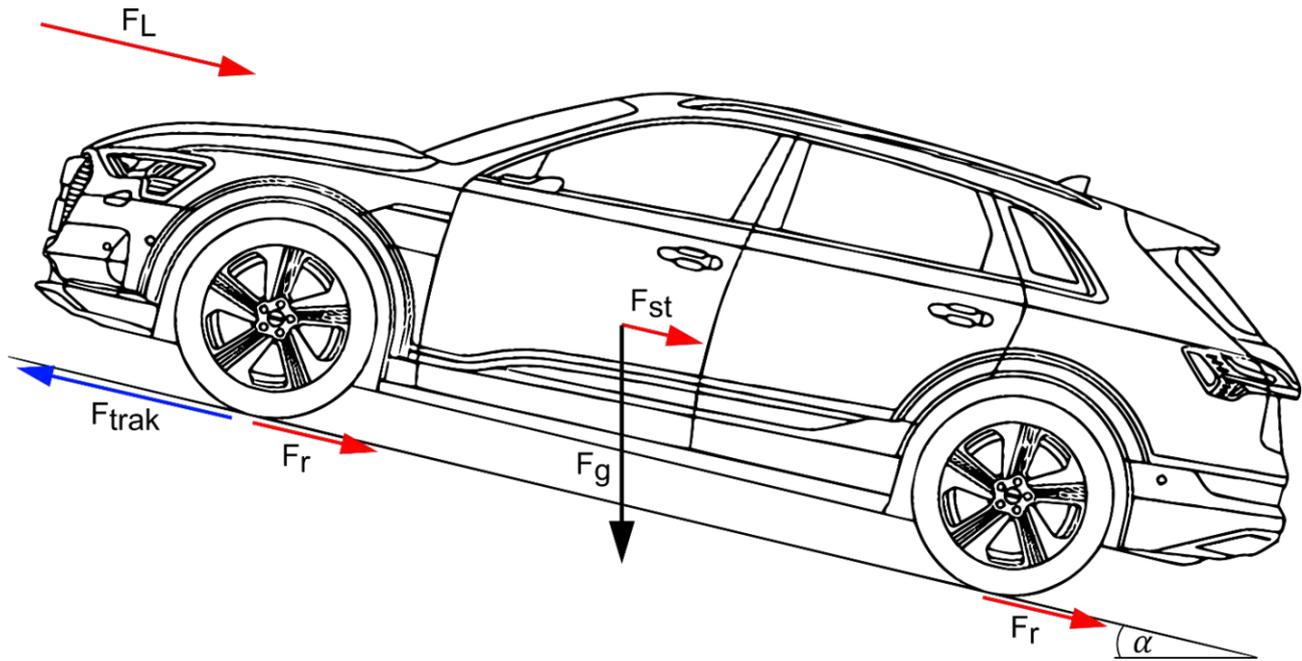


Abbildung 3.3: Fahrzeug mit den in Längsrichtung wirkenden Kräfte

Die benötigte Traktionskraft, welche vom Fahrzeug aufgebracht werden muss, ergibt sich durch Anwendung des 2. Newtonschen Axioms:

$$\kappa \cdot m \cdot a = F_{trak} - F_r - F_L - F_{st} \quad (3.1)$$

$$F_{trak} = \kappa \cdot m \cdot a + F_r + F_L + F_{st} \quad (3.2)$$

m	Masse des Fahrzeugs in $[kg]$
a	Beschleunigung des Fahrzeugs in $\left[\frac{m}{s^2}\right]$
κ	Faktor zur Berücksichtigung der rotatorischen Massen
F_{trak}	Traktionskraft in $[N]$
F_r	Rollwiderstand in $[N]$
F_L	Luftwiderstand in $[N]$
F_{st}	Steigungswiderstand in $[N]$

Zur Berücksichtigung der Trägheit von rotatorischen Massen bei einem Beschleunigungsvorgang, wird der Faktor κ eingeführt. Nach [25] können rotatorische Massen durch eine 5%ige Steigerung der Gesamtmasse bei der Berechnung der Traktionskraft berücksichtigt werden.

Der Rollwiderstand (F_r), der Luftwiderstand (F_L), und der Steigungswiderstand (F_{st}) können noch weiter zerlegt werden [5]:

$$F_r = \mu_r \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha) \quad (3.3)$$

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho_L \cdot A \cdot c_W \cdot v^2 \quad (3.4)$$

$$F_{st} = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (3.5)$$

μ_r	Rollwiderstandskoeffizient
g	Erdbeschleunigung in $\left[\frac{m}{s^2}\right]$
α	Steigungswinkel in $[\circ]$
ρ_L	Dichte Luft in $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
A	Stirnfläche des Fahrzeugs in $[m^2]$
c_W	Strömungswiderstandskoeffizient
v	Geschwindigkeit des Fahrzeugs in $\left[\frac{m}{s}\right]$

Die resultierende Traktionskraft, multipliziert mit der momentanen Geschwindigkeit des Fahrzeugs ergibt die benötigte mechanische Leistung an den Rädern:

$$P_{mech} = F_{trak} \cdot v \quad (3.6)$$

P_{mech}	Mechanische Leistung an den Rädern in $[W]$
------------	---

Aufgrund der Wirkungsgradkette des Antriebstranges, muss von der Batterie mehr Leistung aufgewendet werden als schlussendlich am Rad herrscht. Über den Motorwirkungsgrad η_{mot} werden die Verluste des gesamten Antriebsstrangs (Elektromotor, Wechselrichter, Getriebe, Differential) beschrieben. Daher ergibt sich die benötigte Traktionsleistung an die Batterie zu:

$$P_{trak} = \frac{P_{mech}}{\eta_{mot}} \quad (3.7)$$

P_{trak}	Elektrische Leistung für Traktionsanforderungen in $[W]$
η_{mot}	Motorwirkungsgrad

Die Differenz dieser Gesamtleistung und der Leistung am Rad, stellt die Verlustleistung $P_{v\,mot}$ des Antriebsstrangs dar. Diese kann vereinfacht als Verlustwärme (\dot{Q}_{mot}) angenommen werden, welche von der Motorkühlung ($P_{mot\,therm}$) abgeführt werden muss [26]. Daher gilt näherungsweise:

$$P_{v\,mot} = P_{trak} - P_{mech} = \dot{Q}_{mot} = P_{mot\,therm} \quad (3.8)$$

$P_{v\,mot}$	Verlustleistung des Motors in [W]
\dot{Q}_{mot}	Wärmeentwicklung des Motors in [W]
$P_{mot\,therm}$	Elektrische Leistung für Motorkühlung in [W]

Ist die Traktionskraft negativ, wie es bei einem Bremsvorgang oder einer Bergabfahrt auftritt, arbeiten die E-Maschinen im Generatorbetrieb, wodurch ein Teil der kinetischen Energie rekuperiert werden kann [6]. Hierbei kehrt sich der Leistungsfluss um, wodurch der Motorwirkungsgrad bewirkt, dass nicht die gesamte kinetische Energie in die Batterie eingespeist werden kann. Zur Vereinfachung wurde ein gemeinsamer Gesamtmotorwirkungsgrad für Antriebs- und Rekuperationsfall verwendet, wodurch für die Berechnung der elektrischen Rekuperationsleistung an die Batterie (P_{rek}) gilt:

$$P_{rek} = P_{trak} \cdot \eta_{mot} \quad (3.9)$$

P_{rek}	Rekuperierte elektrische Leistung in [W]
-----------	--

3.3.2 Parametrierung des Antriebsstrangs

Viele Parameter der Antriebsmodellierung können aus Datenblättern oder sonstigen Quellen entnommen werden. Ein entscheidender Punkt ist der Motorwirkungsgrad η_{mot} . Die Effizienz eines Elektromotors hängt von dessen Drehzahl und dem aufgetragenen Moment ab [9]. Um Rechenleistung bei der DP einzusparen, wird ein konstanter Motorwirkungsgrad aus den Messdaten vom Rollenprüfstand der TU Wien berechnet.

Dafür muss zuerst die Traktionsleistung aus den Messdaten bestimmt werden. Durch Abschätzung der Nebenverbraucherleistung und der aufgewendeten Leistung des Thermalsystems kann die Traktionsleistung über die gesamte Lastleistung der Batterie aus den Messdaten ermittelt werden. Nun kann der aus den Messdaten bestimmte Energiebedarf der Traktion mit dem berechneten Energiebedarf der mechanischen Leistung an den Rädern (P_{mech}) gegenübergestellt werden, woraus der Motorwirkungsgrad η_{mot} gebildet werden kann. Nach Gleichung 3.7 kann schließlich die elektrische Leistung für Traktionsanforderungen (P_{trak}) für das Modell bestimmt werden. In Abbildung 3.4 sind die gemessene und berechnete elektrische Leistung des Modells für Traktionsanforderungen dargestellt.

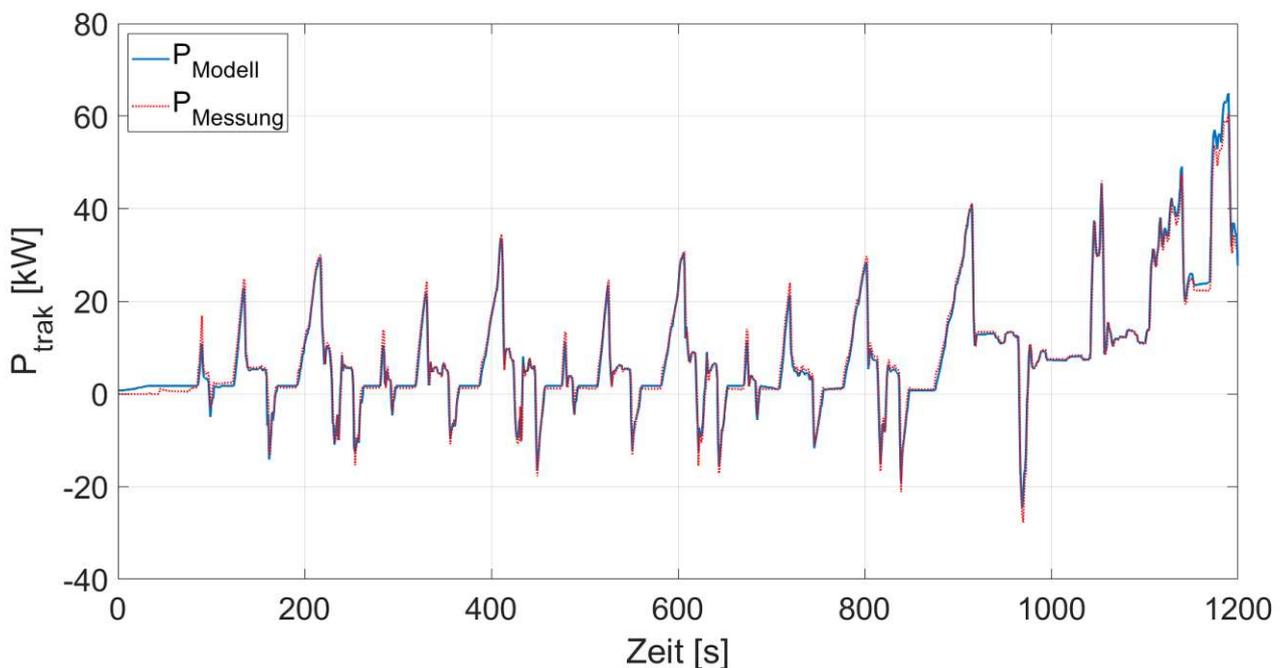


Abbildung 3.4: Gemessene und simulierte elektrische Leistung für Traktionsanforderungen eines NEFZ-Fahrzyklus

Der RMSE beläuft sich auf 1,75 kW. In Tabelle 3.1 sind die Werte aller relevanten Parametern für die Antriebseinheit aufgelistet.

Tabelle 3.1: Parameter des Modells der Antriebseinheit

Parameter	Wert	Einheit	Referenz
m	2565	kg	[6]
κ	1,05	-	[25]
μ_r	0,013	-	[4]*
ρ_L	1,204	kg/m^3	[27]
c_W	0,27	-	[6]
A	2,65	m^2	[6]
η_{mot}	0,85	-	berechnet

* im weiteren Verlauf an Daten angepasst

Maximal aufnehmbarer rekuperierbarer Strom

Tiefe Temperaturen, sowie niedrige Ladezustände erfordern, dass der maximale Lade- und Entladestrom der Batterie entsprechend begrenzt wird [12]. Bei der Berechnung des Entladestroms wurde dieser Zusammenhang nicht berücksichtigt. Beim maximal aufnehmbaren Ladestrom wird aufgrund von zukünftiger Einsatzszenarienentwicklungen, welche das Thema Rekuperation behandeln, die Temperaturabhängigkeit und die Abhängigkeit vom Ladezustand der Batterie mitberücksichtigt. Daraus ergibt sich für den maximal rekuperierbaren Strom ($i_{rek\ max}$) ein 2D-Kennfeld mit der Batterietemperatur und dem SOC als Eingangsgrößen. Das Kennfeld wurde von Messungen aus [12] abgeleitet und ist in Abbildung 3.5 dargestellt.

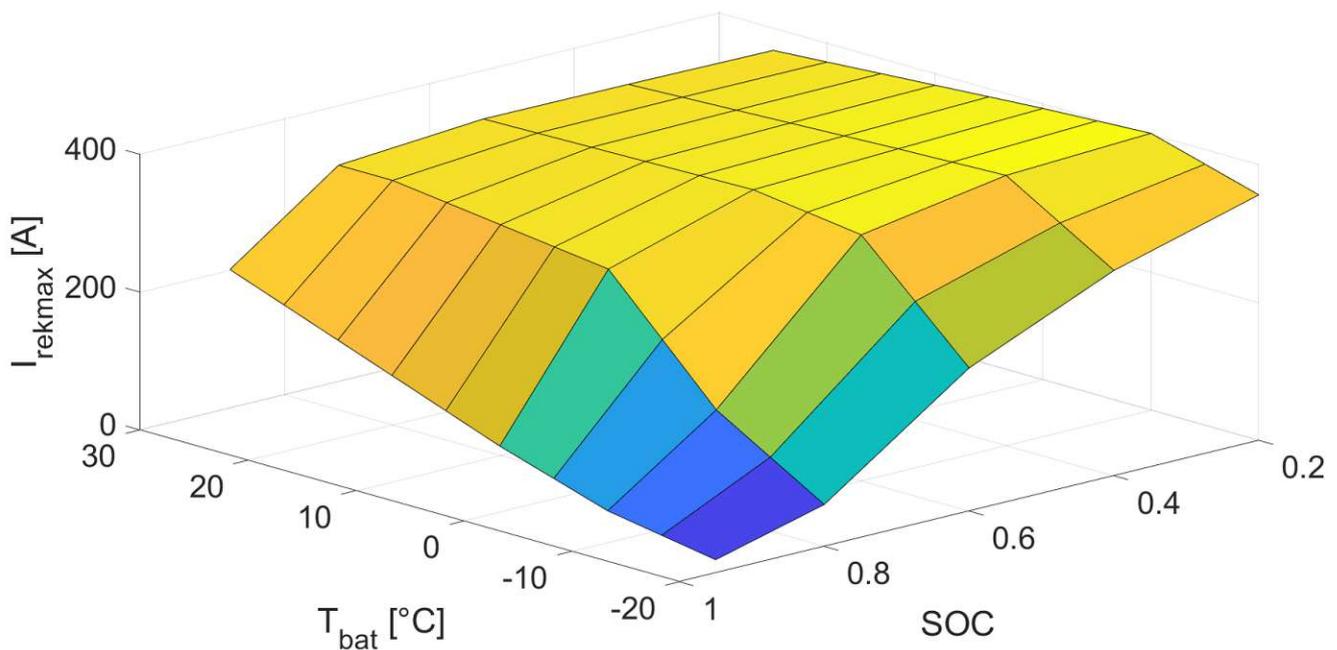


Abbildung 3.5: Maximal aufnehmbarer rekuperierbarer Strom in Abhängigkeit der Batterietemperatur und des SOC

3.3.3 Thermisches Kabinenmodell

Die Fahrerkabine wird als ein System zweier thermischen Massen betrachtet, welche im Wärmeaustausch zueinander stehen. Die erste thermische Masse stellt die Innenluft der Kabine dar. Diese wird als trockene homogene Luftmasse mit einheitlicher Temperatur angenommen. Bei der zweiten thermischen Masse werden die Bauteile der Karosserie, sowie die Einbauten des Innenraumes zusammengefasst. Aufgrund dieser Gegebenheiten stellt die Fahrerkabine ein nichtlineares thermisches System dar. Etwaige Sonneneinstrahlung, sowie erzeugte Wärme der Insassen wird über einen externen Wärmestrom (\dot{Q}_{ext}) berücksichtigt. Der Wärmefluss des Thermalsystems an die Fahrerkabine ist mit $\dot{Q}_{kab\ therm}$ dargestellt. Daraus ergibt sich folgendes thermisches Modell für die Fahrerkabine (Abbildung 3.6):

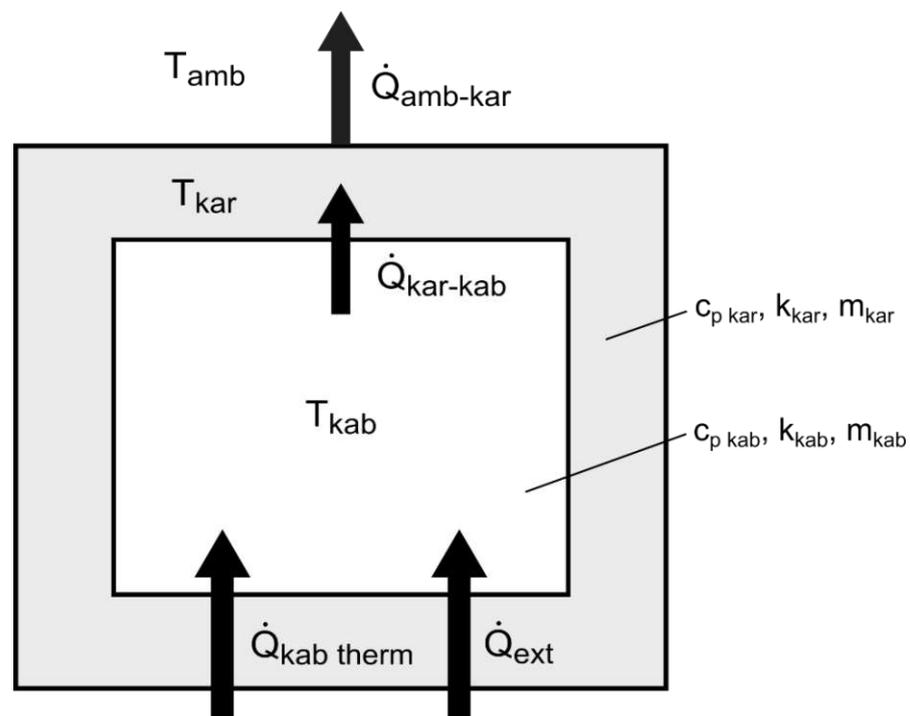


Abbildung 3.6: Thermisches Modell der Fahrerkabine

T_{kab}	Kabinentemperatur in [$^{\circ}\text{C}$]
T_{kar}	Karosserietemperatur in [$^{\circ}\text{C}$]
T_{amb}	Umgebungstemperatur in [$^{\circ}\text{C}$]
$c_{p\ kab}$	spezifische Wärmekapazität Kabine in [$\frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$]
$c_{p\ kar}$	spezifische Wärmekapazität Karosserie in [$\frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$]
k_{kab}	Wärmeübergangskoeffizient Kabine – Karosserie in [$\frac{\text{W}}{\text{K}}$]
k_{kar}	Wärmeübergangskoeffizient Karosserie – Umgebung in [$\frac{\text{W}}{\text{K}}$]
m_{kab}	Masse Kabineninnenluft in [kg]

m_{kar}	Masse Karosserie und Interieur in $[kg]$
$\dot{Q}_{kab\ therm}$	Wärmefluss für Kabinentemperierung in $[W]$
$\dot{Q}_{kar\ kab}$	Wärmefluss Karosserie – Kabine in $[W]$
$\dot{Q}_{amb\ kar}$	Wärmefluss Umgebung – Karosserie in $[W]$
\dot{Q}_{ext}	Externer Wärmefluss an Kabine in $[W]$

Aus dem thermischen Kabinenmodell können über die kalorische Zustandsgleichung Gleichung 3.10 und Gleichung 3.11 zur Bestimmung der Karosserietemperatur (T_{kar}) und der Kabinentemperatur (T_{kab}) abgeleitet werden.

$$T_{kar} = T_{kar0} + \int_{t_0}^t \frac{(\dot{Q}_{kar\ kab} - \dot{Q}_{amb\ kar}) \cdot dt}{c_{p\ kar} \cdot m_{kar}} \quad (3.10)$$

$$T_{kab} = T_{kab0} + \int_{t_0}^t \frac{(\dot{Q}_{kab\ therm} + \dot{Q}_{ext} - \dot{Q}_{kar\ kab}) \cdot dt}{c_{p\ kab} \cdot m_{kab}} \quad (3.11)$$

Wobei der Wärmefluss zwischen Umgebung-Karosserie ($\dot{Q}_{amb\ kar}$) und Karosserie-Kabine ($\dot{Q}_{kar\ kab}$) durch die stationäre Wärmeleitungsgleichung noch weiter aufgesplittet werden können.

$$\dot{Q}_{amb\ kar} = k_{kar} \cdot (T_{kar} - T_{amb}) \quad (3.12)$$

$$\dot{Q}_{kar\ kab} = k_{kab} \cdot (T_{kab} - T_{kar}) \quad (3.13)$$

Die aufgebrachte Leistung für die Kabinentemperierung P_{kab} wird im Heizfall über zwei PTC-Heizer und im Kühlfall über den Kühlmittelkreislauf mittels Kältemittelkompressor bereitgestellt. Daraus ergibt sich je nach Fall über den geforderten Wärmefluss $\dot{Q}_{kab\ therm}$ für die elektrische Leistung der Kabinentemperierung:

$$P_{kab} = \begin{cases} \frac{\dot{Q}_{kab\ therm}}{COP}, & \dot{Q}_{kab\ therm} < 0 \\ \frac{\dot{Q}_{kab\ therm}}{\eta_{ptc}}, & \dot{Q}_{kab\ therm} \geq 0 \end{cases} \quad (3.14)$$

P_{kab}	Elektrische Leistung der Kabinentemperierung in $[W]$
COP	Leistungszahl des Kühlmittelkreislaufs
η_{ptc}	Wirkungsgrad PTC-Heizer

Wobei η_{ptc} den Wirkungsgrad der PTC-Heizer darstellt. Die Leistungszahl COP (engl. „Coefficient of performance“) beschreibt das Verhältnis zwischen erbrachter Kälteleistung und eingesetzter elektrischer Leistung des Kältemittelkompressors.

3.3.4 Parametrierung des thermischen Kabinenmodells

Die Parametrierung der Kabine erfolgt über Daten eines detaillierteren Simscape-Modells des Audi e-trons. Entsprechende Parameter wurden zuerst geeignet abgeschätzt/berechnet und in späterer Folge an den, mit dem Simscape-Modell berechneten Temperaturverlauf angepasst. Anzupassende Parameter sind die thermischen Massen der Innenluft (tm_{kab}) und der Karosserie (tm_{kar}), sowie die Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Innenraum-Karosserie (k_{kab}) und Karosserie-Umgebung (k_{kar}).

In Abbildung 3.7 und Abbildung 3.8 werden die Ergebnisse des parametrisierten Modells und des Simscape-Modells für einen Kühlfall und einen Heizfall verglichen.

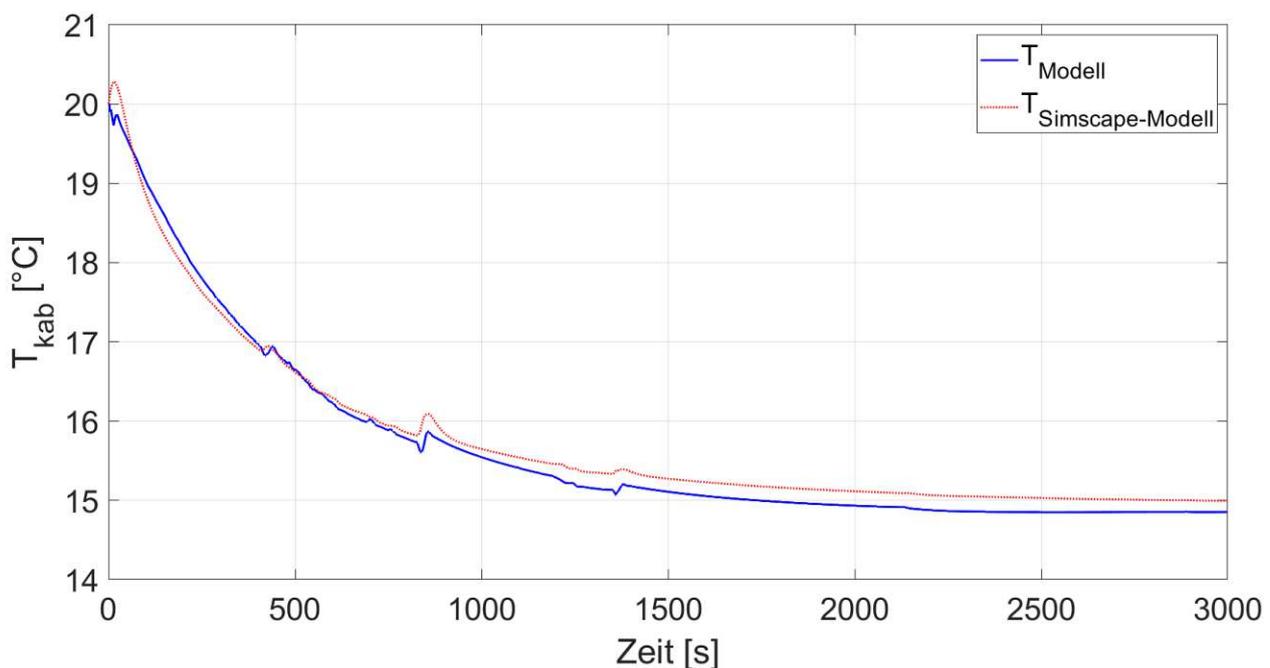


Abbildung 3.7: Vergleich der berechneten Kabinentemperatur des Simscape-Modells und des thermischen Kabinenmodells für einen Kühlvorgang auf 15°C

Für den Kühlfall wird die Kabine um 5°C abgekühlt, ein RMSE von 0,16°C resultiert.

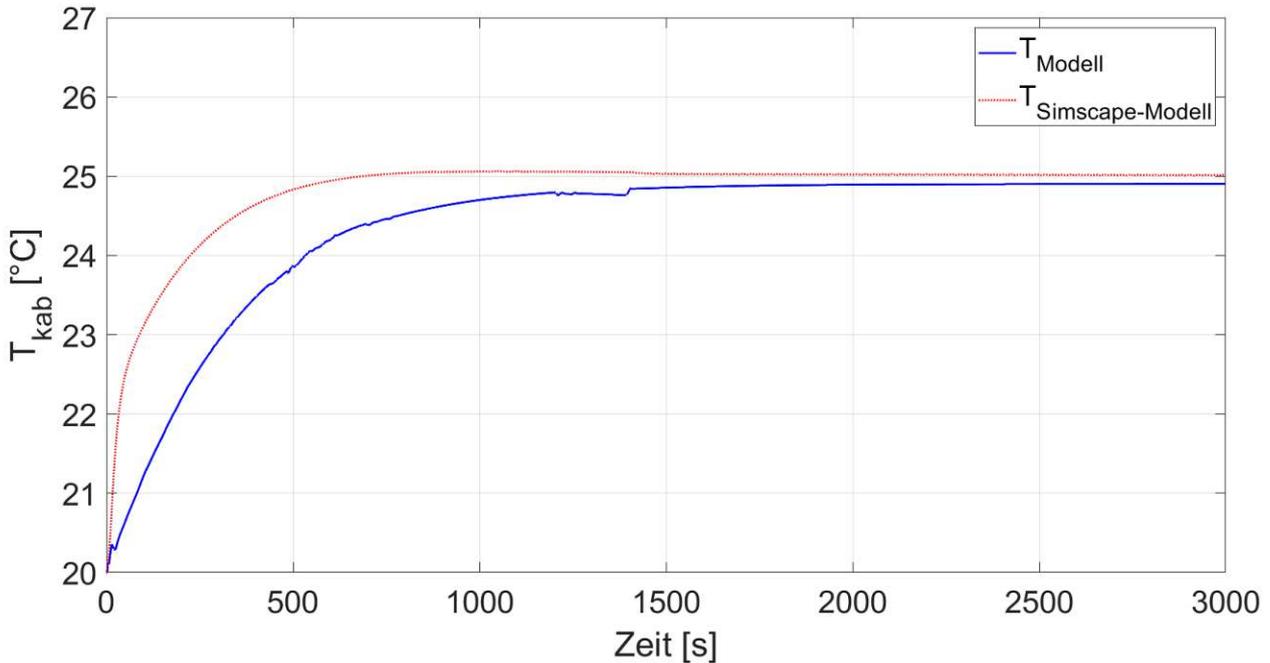


Abbildung 3.8: Vergleich der berechneten Kabinentemperatur des Simscape-Modells und des thermischen Kabinenmodells für einen Heizvorgang auf 25°C

Bei Aufheizen der Kabine um 5°C beläuft sich der RMSE auf 0,66°C. Bei Anpassung der Parameter des Kabinenmodells lag der Hauptfokus auf Erreichen der eingestellten Endtemperaturen von 15°C bzw. 25°C. Aufgrund fehlender Komplexität des Kabinenmodells kann der Verlauf des Simscape-Modells nicht exakt abgebildet werden. Da der RMSE ein Ausdruck des Gesamtfehlers ist, weisen Kühl- und Heizvorgang unterschiedliche RMSE-Werte auf.

In Tabelle 3.2 werden die erlangten Parameter nochmals aufgeschlüsselt.

Tabelle 3.2: Parameter des thermischen Kabinenmodells

Parameter	Wert	Einheit	Referenz
$tm_{kab} = c_{p\ kab} \cdot m_{kab}$	36933,6	J/K	angepasst
k_{kab}	367,4	W/K	angepasst
$tm_{kar} = c_{p\ kar} \cdot m_{kar}$	8307,6	J/K	angepasst
k_{kar}	156,7	W/K	angepasst
η_{ptc}	0,95	-	angenommen*
COP	3,48	-	[28]

*Theoretisch liegt der Wirkungsgrad eines PTC-Heizers, bezogen auf die Umwandlung von elektrischer in thermische Energie, bei 100% [29]. Aufgrund von Verlusten von Heizrohren, Zuleitungen etc. wurde ein Wirkungsgrad von 95% angenommen.

3.3.5 Nebenverbraucher

Die Werte für die Nebenverbraucherleistungen werden größtenteils aus [3] übernommen. Mit Hilfe der Einschaltdauer der Bauteile wird eine konstante Nebenverbraucherleistung (P_{nv}) an die Batterie berechnet. Eine Auswahl der berücksichtigten Nebenverbraucher mit ihrer Einschaltdauer (kurz/lang) sind in Tabelle 3.3 zu finden [3]:

Tabelle 3.3: In der Modellierung berücksichtigte Nebenverbraucher mit Einschaltdauer

Nebenverbraucher	Einschaltdauer
Energiemanagementsystem	lang
Elektrische Heizung (PTC-Heizer)	lang
Fahrgastraumgebläse	lang
Kältemittelkompressor	lang
Kühlmittelpumpe	lang
Kühlergebläse	lang
Laden Bordnetzbatteie	lang
Servolenkung	lang
Steuergeräte	lang
Vakuumpumpen	kurz
Autoradio	lang
Beleuchtung	lang
Fensterheber	kurz
Heckscheibenheizung	kurz
Scheibenwischer	lang
Sitzheizung	kurz

Für die Simulation wurde eine konstante Nebenverbraucherleistung von 500 W herangezogen.

3.3.6 Ladezyklen

Der maximale Ladestrom ist von der Batterietemperatur und dem Ladezustand der Batterie abhängig [3]. Um ein Überschreiten der maximalen Zellspannung zu vermeiden, wird der Ladestrom bei hohen SOC's entsprechend reduziert. Ab einem SOC von etwa 0,8 kann die Batterie nicht mehr mit der maximalen Leistung geladen werden [8]. Bei hohen bzw. niedrigen Temperaturen wird der Ladestrom ebenfalls verringert, um Alterungsprozessen oder einer Beschädigung der Batterie entgegenzuwirken. Daraus ergibt sich ein zweidimensionales Kennfeld für den maximalen Ladestrom in Abhängigkeit des SOC's und der Batterietemperatur. In Abbildung 3.9 ist dieses Kennfeld dargestellt.

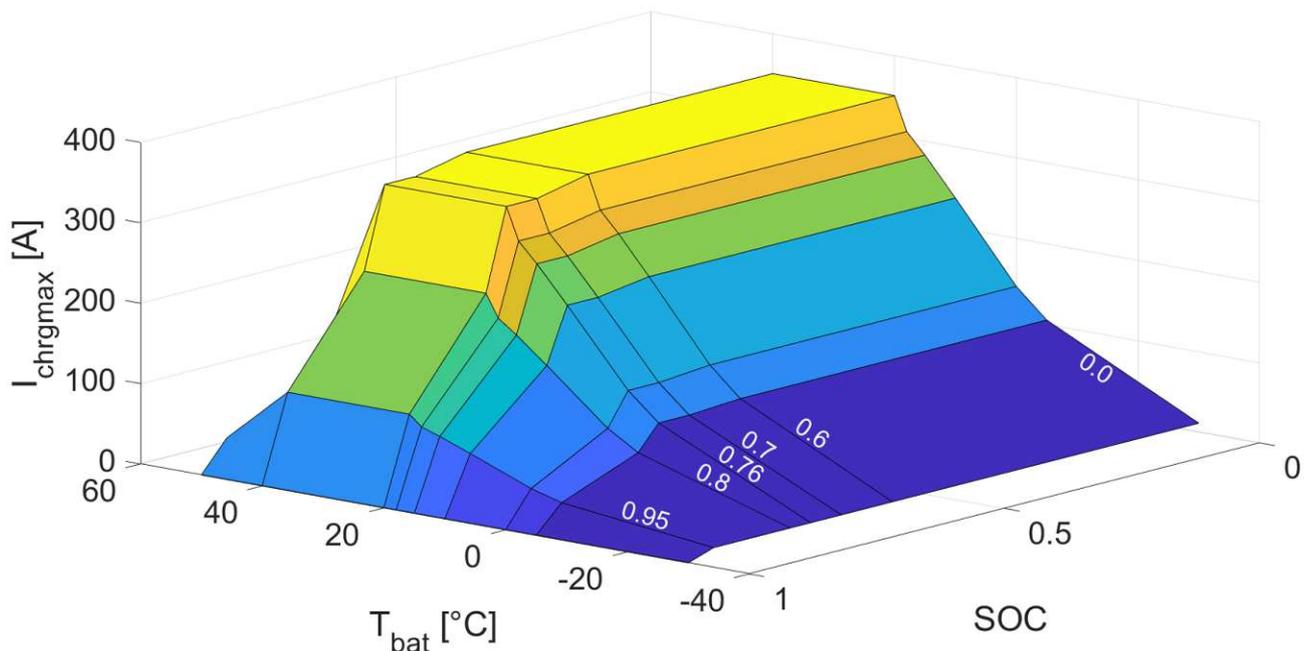


Abbildung 3.9: Maximaler Ladestrom in Abhängigkeit der Batterietemperatur und des SOC's

Das Kennfeld wurde aus Schnelllademessungen am Rollenprüfstand der TU Wien abgeleitet.

Die momentane Ladeleistung (P_{chrg}) an die Batterie kann über das Verhältnis zwischen Batteriespannung (U_{bat}) und maximalen Ladestrom ($I_{chrg\ max}$) berechnet werden.

$$P_{chrg} = U_{bat} \cdot I_{chrg\ max}(SOC, T_{bat}) \quad (3.15)$$

P_{chrg}	Ladeleistung in [W]
U_{bat}	Batteriespannung in [V]
$I_{chrg\ max}$	Maximaler Ladestrom in [A]

3.4 Batteriemodell

Aufgabe des Batteriemodells ist es, batteriespezifische Parameter zu ermitteln. Diese sind der Batteriestrom, die Batteriespannung, der SOC, die Batterietemperatur und der Innenwiderstand der Batterie. Ausgangspunkt für die Berechnung der Parameter ist die momentane Lastleistung an der Batterie.

3.4.1 Elektrisches Batteriemodell

Die Batterie wird durch ein statisches Ersatzschaltbild mit einer Spannungsquelle, einem Batterieinnenwiderstand, sowie einem Verbraucher mit einem variierenden Lastwiderstand modelliert. Das Ersatzschaltbild des Batteriemodells ist in Abbildung 3.10 dargestellt [10]:

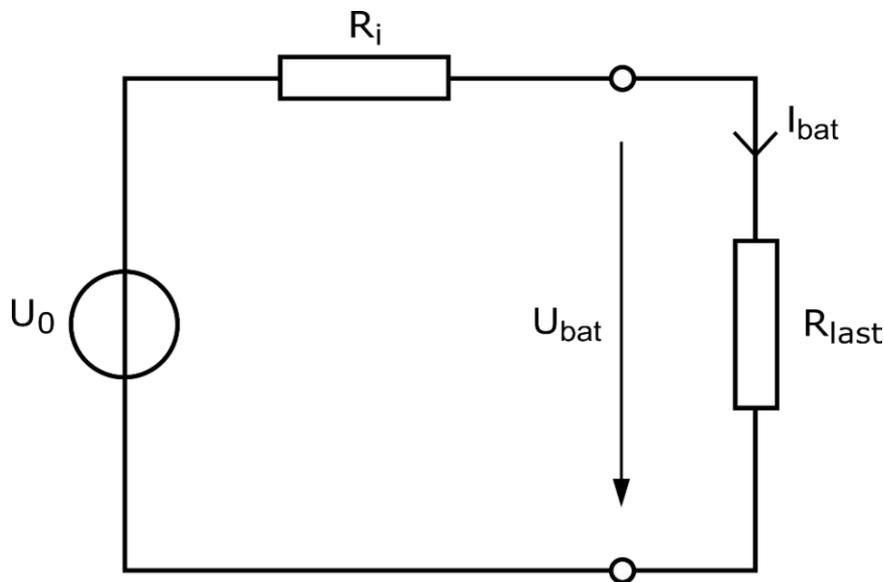


Abbildung 3.10: Elektrisches Modell der Hochvoltbatterie

U_0	Leerlaufspannung in [V]
U_{bat}	Batteriespannung in [V]
I_{bat}	Batteriestrom in [A]
R_i	Batterieinnenwiderstand in [Ω]
R_{last}	Lastwiderstand in [Ω]

Leerlaufspannung U_0

Die Leerlaufspannung U_0 einer Zelle ist hauptsächlich vom gegenwärtigen SOC abhängig [3]. Für die Berechnung der Leerlaufspannung der gesamten Batterie wurden die Werte für eine einzelne Zelle aus [12] entnommen und entsprechend auf die gesamte Batterie hochgerechnet. In Abbildung 3.11 ist der Verlauf der Leerlaufspannung U_0 in Abhängigkeit des SOC's abgebildet.

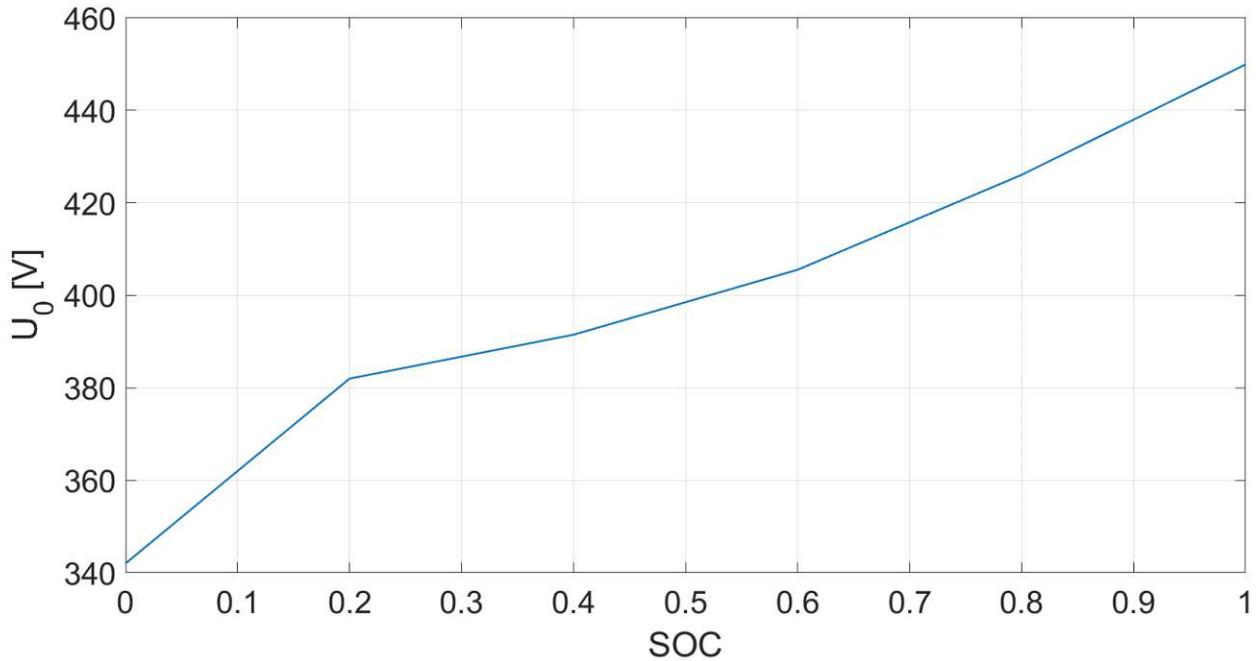


Abbildung 3.11: Verlauf der Leerlaufspannung in Abhängigkeit des SOC's

Innenwiderstand R_i

Der Innenwiderstand ist von der Batterietemperatur, dem SOC und abhängig davon ob ein Laden oder Entladen der Batterie vorliegt [3]. Da die Batterietemperatur den größten Einfluss auf den Innenwiderstand hat, wurde zur Vereinfachung nur diese Abhängigkeit berücksichtigt.

Über die Leerlaufspannung U_0 , den Messwerten der Batteriespannung U_{bat} und dem Batteriestrom I_{bat} kann der Batterieinnenwiderstand nach folgendem Verhältnis berechnet werden.

$$R_i = \frac{U_0 - U_{bat}}{I_{bat}} \quad (3.16)$$

Durch die zeitliche Verknüpfung des Innenwiderstandes mit der gemessenen Batterietemperatur kann daraus eine Kennlinie für die Temperaturabhängigkeit des Innenwiderstandes der Hochvoltbatterie abgeleitet werden. Diese ist in Abbildung 3.12 dargestellt.

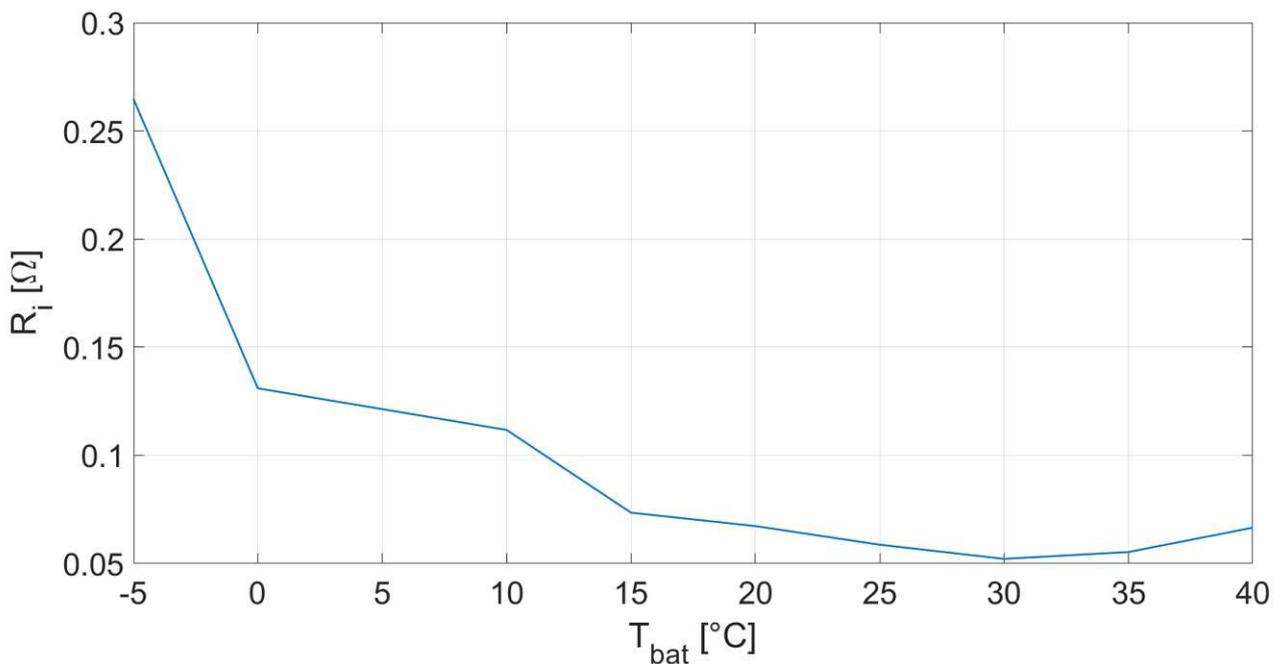


Abbildung 3.12: Verlauf des Innenwiderstands der Hochvoltbatterie in Abhängigkeit der Batterietemperatur

Der Innenwiderstand der einzelnen Batteriezellen würde mit steigender Temperatur stetig abnehmen [3]. Da hier jedoch der Innenwiderstand der gesamten Hochvoltbatterie dargestellt ist, ist eine leichte Zunahme bei 30°C zu erkennen. Zurückzuführen ist dies auf die Zunahme des Innenwiderstandes von Verbindungselementen bei steigender Temperatur.

Lastleistung P_{last}

Die Lastleistung setzt sich aus der Summe aller Leistungsflüsse der Komponenten an die Batterie zusammen, was in Abbildung 3.1 dargestellt ist. Daraus kann Gleichung 3.17 formuliert werden:

$$P_{last} = P_{trak} + P_{mot\ therm} + P_{bat\ therm} + P_{kab} + P_{nv} + (P_{chrg}) \quad (3.17)$$

Die benötigte Lastleistung wird über Anpassung des Batteriestromes (I_{bat}) geregelt [6]. Über die Leerlaufspannung (U_0) und den Innenwiderstand (R_i) kann der Batteriestrom (I_{bat}) in Abhängigkeit der momentanen Lastleistung nach Gleichung 3.18 berechnet werden:

$$I_{bat} = \frac{U_0 - \sqrt{U_0^2 - 4 \cdot R_i \cdot P_{last}}}{2 \cdot R_i} \quad (3.18)$$

Aufgrund des Innenwiderstands der Batterie, resultiert ein Spannungsabfall zwischen der offenen Zellspannung (U_0) und der tatsächlichen Batteriespannung (U_{bat}):

$$U_{bat} = U_0 - I_{bat} \cdot R_i \quad (3.19)$$

Über das Elektrische Modell der Hochvoltbatterie kann schließlich Gleichung 3.20 für die Batterieleistung P_{bat} abgeleitet werden:

$$P_{bat} = U_0 \cdot I_{bat} - I_{bat}^2 \cdot R_i \quad (3.20)$$

Wobei der zweite Term die Verlustleistung der Batterie darstellt, welche sich als Joule'sche Wärme in der Batterie äußert. Dadurch kann nach Gleichung 3.20 die Verlustleistung bzw. die Wärmeentwicklung \dot{Q}_{bat} der Batterie berechnet werden.

$$\dot{Q}_{bat} = I_{bat}^2 \cdot R_i \quad (3.21)$$

Wie zu erkennen, hängt die Verlustleistung quadratisch vom Batteriestrom ab. Durch eine Steigerung der Lastleistung wird der Strom und folglich auch die Verlustleistung erhöht (Gleichung 3.21). Weiters führt ein hoher Innenwiderstand der Batterie höhere Verlustleistungen herbei. Eine hohe Verlustleistung führt zu einem Aufheizen der Batterie, wodurch die Thermalanforderungen der Batterie steigen, was wiederum den Strom innerhalb der Batterie erhöht.

Ein Vergleich zwischen gemessener und berechneter Batterieleistung ist in Abbildung 3.13 angeführt. Der RMSE beläuft sich auf 1,76 kW.

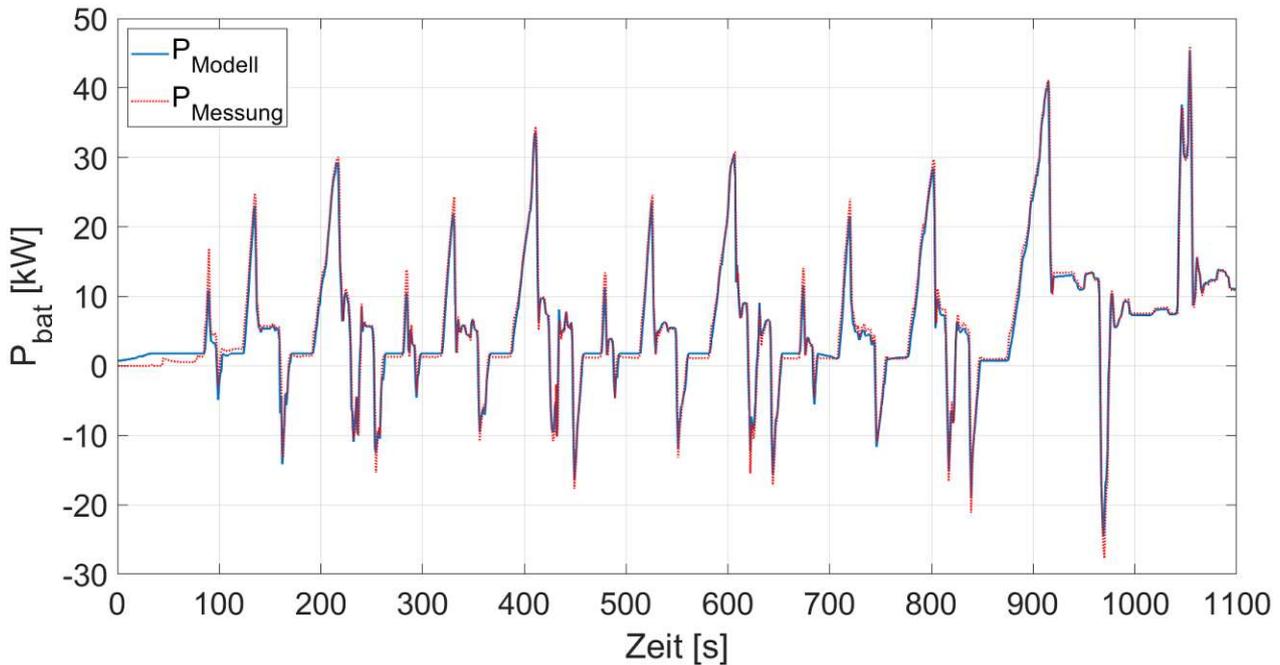


Abbildung 3.13: Gemessene und simulierte elektrische Batterieleistung eines NEFZ-Fahrzyklus

Batteriewirkungsgrad η_{bat}

Der Batteriewirkungsgrad wird über das Verhältnis zwischen dem Gesamtenergieaufwand von Verlust- und Lastleistung eines NEFZ-Fahrzyklus nach Gleichung 3.22 gebildet:

$$\eta_{bat} = 1 - \frac{\int I_{bat}^2 \cdot R_i}{\int P_{last}} \quad (3.22)$$

Zur Vereinfachung wurde ein durchschnittlicher Batteriewirkungsgrad auf verschiedenen Temperaturniveaus ermittelt. Durch den Vergleich des Gesamtenergieaufwandes eines Fahrzyklus entfällt die Abhängigkeit des Batteriewirkungsgrades vom anliegenden Batteriestrom. Dadurch ist der Batteriewirkungsgrad aufgrund des Innenwiderstandes nur mehr von der Temperatur abhängig. Die resultierende Temperaturabhängigkeit des Batteriewirkungsgrad ist in Abbildung 3.14 ersichtlich:

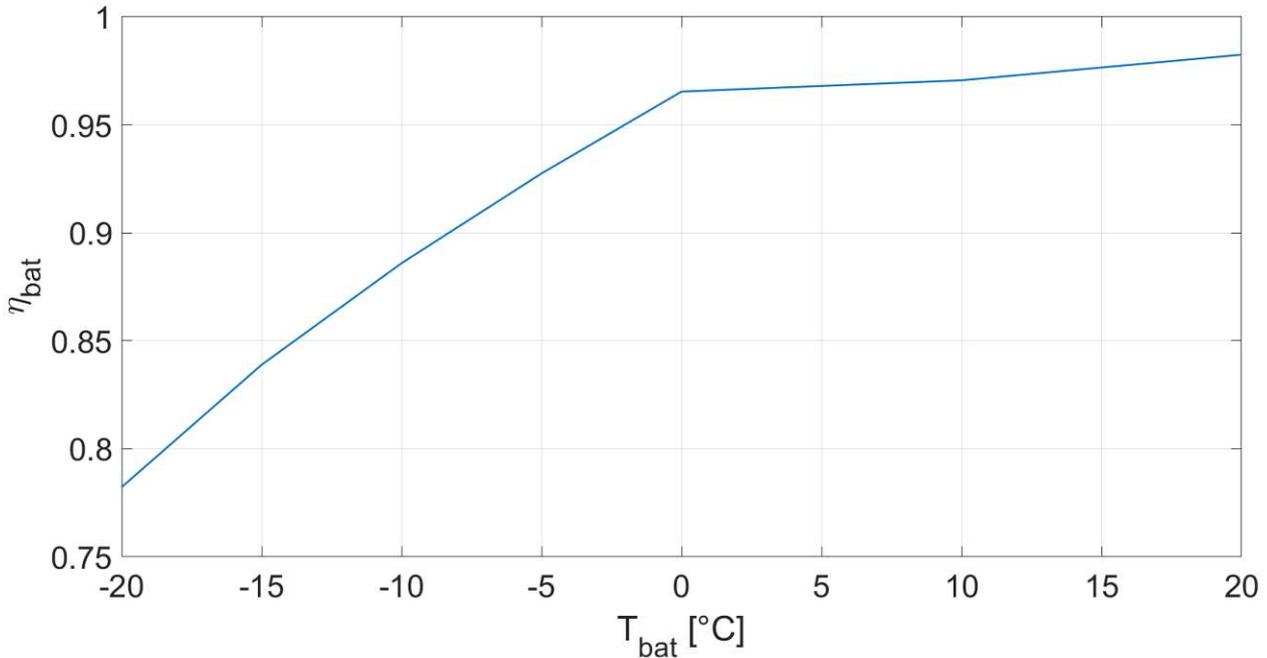


Abbildung 3.14: Verlauf des Batteriewirkungsgrades in Abhängigkeit der Batterietemperatur

SOC

Zur Bestimmung des SOC's wird das Verfahren des Coulomb Counting herangezogen. Hierbei handelt es sich um eine simple Methode der SOC-Bestimmung, wobei sich der gegenwärtige SOC nach folgender Formel berechnet [7]:

$$SOC = SOC_0 - \frac{1}{C_0} \int_{t_0}^t I_{bat} dt \quad (3.23)$$

Je nachdem ob der Strom positiv oder negativ ist, handelt es sich um einen Entlade- oder Ladevorgang. Dadurch steigt oder fällt der SOC. Eine Auflistung der Parameter für das elektrische Batteriemodell sind in Tabelle 3.4 dargestellt.

Tabelle 3.4: Parameter des elektrischen Batteriemodells

Parameter	Wert	Einheit	Referenz
U_0	Abbildung 3.11	V	[12]
C_0	240	Ah	[6]

3.4.2 Parametrierung des elektrischen Batteriemodells

Für die Parametrierung des elektrischen Batteriemodells werden Messwerte des Batteriestroms und der Batteriespannung mit den berechneten Werten des Modells verglichen.

Batteriestrom I_{bat}

Für die Berechnung des Batteriestroms wurde zunächst die Leistung für Traktionsanforderungen eines NEFZ-Fahrzyklus berechnet. Durch Addieren der Nebenverbraucherleistung und der Leistung des Thermalsystems wird schließlich die vorhandene Lastleistung an der Batterie bestimmt. Nach Gleichung 3.18 kann nun der Batteriestrom berechnet werden. Ein Vergleich des berechneten Batteriestroms und des gemessenen Stroms ist in Abbildung 3.15 angeführt. Der RMSE der beiden Ströme beläuft sich auf 3,96 A.

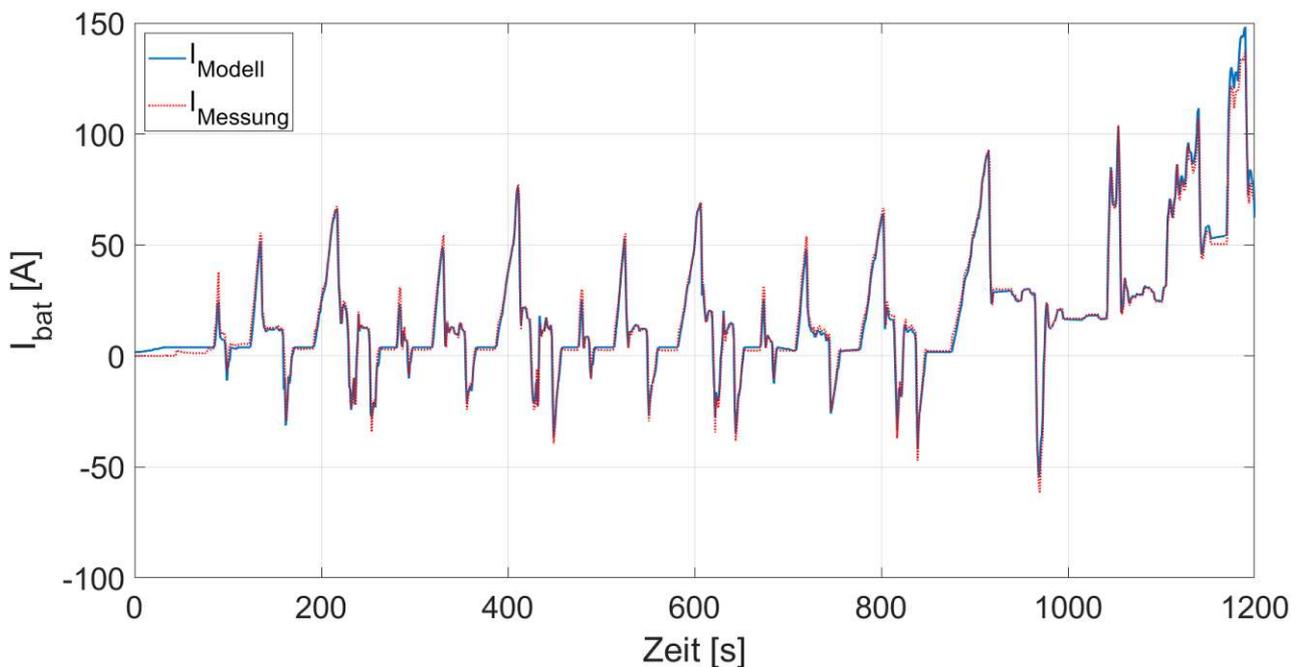


Abbildung 3.15: Gemessener und simulierter Batteriestrom der Hochvoltbatterie eines NEFZ-Fahrzyklus

Batteriespannung U_{bat}

Die Batteriespannung U_{bat} kann nach obiger Gleichung (3.19) berechnet werden. Ein Vergleich der berechneten und der gemessenen Spannung ist in Abbildung 3.16 abgebildet. Der RMSE beläuft sich auf 1,13 V.

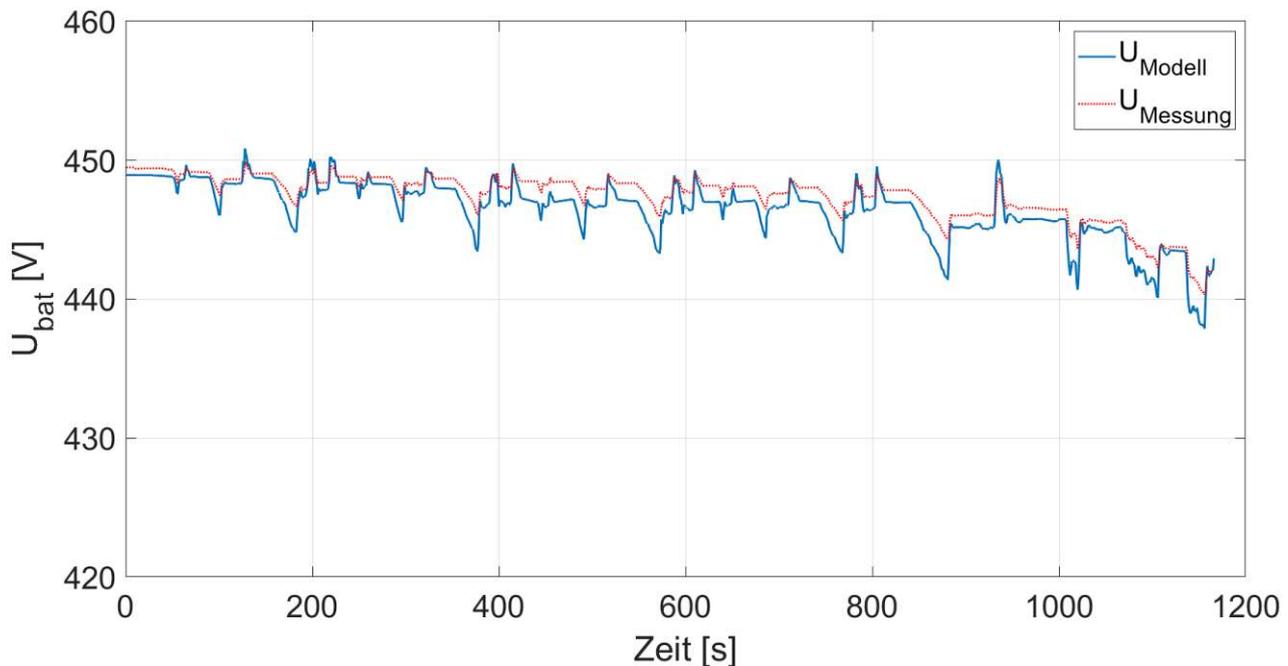


Abbildung 3.16: Gemessene und simulierte Batteriespannung eines NEFZ-Fahrzyklus

3.4.3 Thermisches Batteriemodell

Die Batterie wird als ein homogenes Bauteil mit einer gleichmäßigen Temperaturverteilung angenommen. Dadurch besitzt die gesamte Batterie eine einheitliche Batterietemperatur T_{bat} . Über den Wärmefluss des Thermalmanagementsystems $\dot{Q}_{bat\ therm}$ kann die Batterie entsprechend temperiert werden. Der anliegende Batteriestrom induziert die Verlustwärme \dot{Q}_{bat} innerhalb der Batterie [20]. Der Wärmeaustausch zwischen Batterie und Umgebung wird mit $\dot{Q}_{bat\ amb}$ berücksichtigt. Daraus ergibt sich folgendes thermisches Modell für die Batterie (Abbildung 3.17):

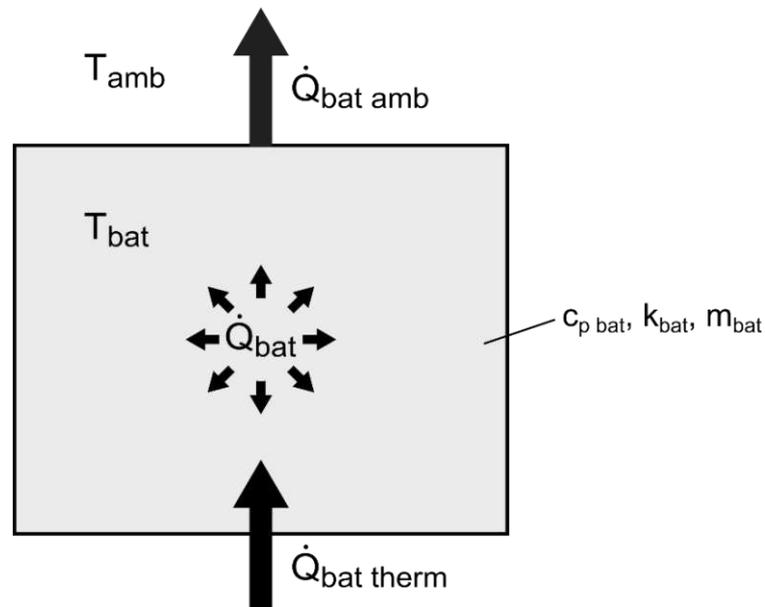


Abbildung 3.17: Thermisches Modell der Hochvoltbatterie

Mittels der kalorischen Zustandsgleichung kann über die Summe der Wärmeflüsse und der thermischen Masse die Batterietemperatur nach Gleichung 3.24 berechnet werden, wobei T_{bat0} die Starttemperatur der Batterie darstellt.

$$T_{bat} = T_{bat0} + \int_{t_0}^t \frac{(\dot{Q}_{bat} + \dot{Q}_{bat\ therm} - \dot{Q}_{bat\ amb}) \cdot dt}{c_{p\ bat} \cdot m_{bat}} \quad (3.24)$$

Die Wärmeströme können noch weiter zerlegt werden. Die Verlustleistung der Batterie \dot{Q}_{bat} kann als Wärmefluss an die Batterie angenommen werden [13]. Folglich kann die Wärmeentwicklung in der Batterie vereinfacht durch Gleichung 3.25 beschrieben werden.

$$\dot{Q}_{bat} = I_{bat}^2 \cdot R_i \quad (3.25)$$

Nach Gleichung 3.25 können somit Verluste in der Batterie durch einen niedrigen Strom oder einen geringen Innenwiderstand verringert werden.

Der Wärmefluss zwischen Batterie und Umgebung wird durch die stationäre Wärmeleitungsgleichung berechnet (Gleichung 3.26):

$$\dot{Q}_{bat\ amb} = k_{bat} \cdot (T_{bat} - T_{amb}) \quad (3.26)$$

Schließlich kann über $\dot{Q}_{bat\ therm}$ die benötigte elektrische Leistung ($P_{bat\ therm}$) für die Batterietemperierung berechnet werden. Analog zum thermischen Kabinenmodell wird der Wärmefluss von zwei PTC-Heizern bzw. dem Kältemittelkompressor bereitgestellt. Nach Gleichung 3.27 kann die elektrische Leistung berechnet werden:

$$P_{bat\ therm} = \begin{cases} \frac{\dot{Q}_{bat\ therm}}{COP}, & \dot{Q}_{bat\ therm} < 0 \\ \frac{\dot{Q}_{bat\ therm}}{\eta_{ptc}}, & \dot{Q}_{bat\ therm} \geq 0 \end{cases} \quad (3.27)$$

3.4.4 Parametrierung des thermischen Batteriemodells

Das Temperaturverhalten der Batterie kann über das Verhältnis zwischen Wärmestrom und resultierender Temperaturänderung bestimmt werden. Hierzu wurde zuerst über die Kühlmitteltemperaturdifferenz zwischen Ein- und Austritt der Batterie verschiedener Heiz- und Kühlmessungen der Wärmestrom an die Batterie ermittelt. Über die gemessene Batterietemperatur kann daraus die Wärmekapazität ($c_{p\ bat}$) der Batterie berechnet werden. Der Wärmeübergangskoeffizient (k_{bat}) wurde zunächst abgeschätzt und anschließend durch Anpassen der Temperaturkurve an die Messdaten ermittelt. Der Verlauf der modellierten und gemessenen Batterietemperatur für einen Heiz- und Kühlfall sind in Abbildung 3.18 bzw. Abbildung 3.19 abgebildet.

Beim Kühlfall beläuft sich der RMSE zwischen gemessener und simulierter Batterietemperatur auf $0,12^{\circ}\text{C}$.

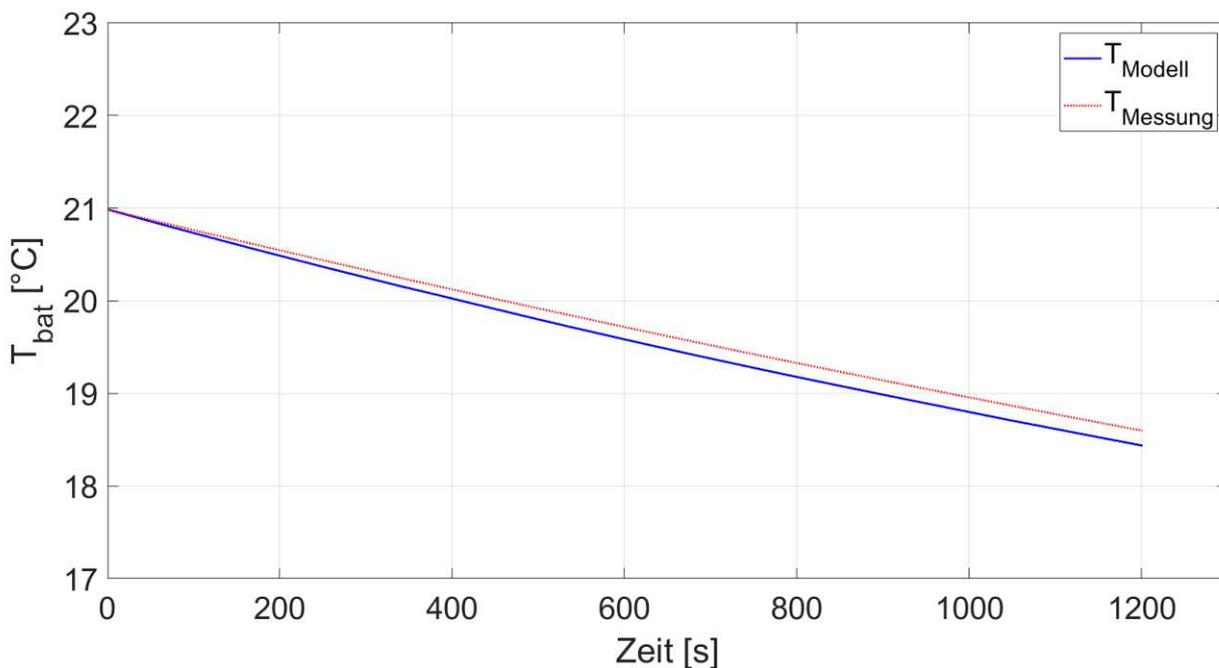


Abbildung 3.18: Batterietemperatur des Modells und der Messung eines Kühlvorgangs der Hochvoltbatterie

Bei Erwärmen der Batterie beträgt der RMSE der Temperaturen $0,08^{\circ}\text{C}$.

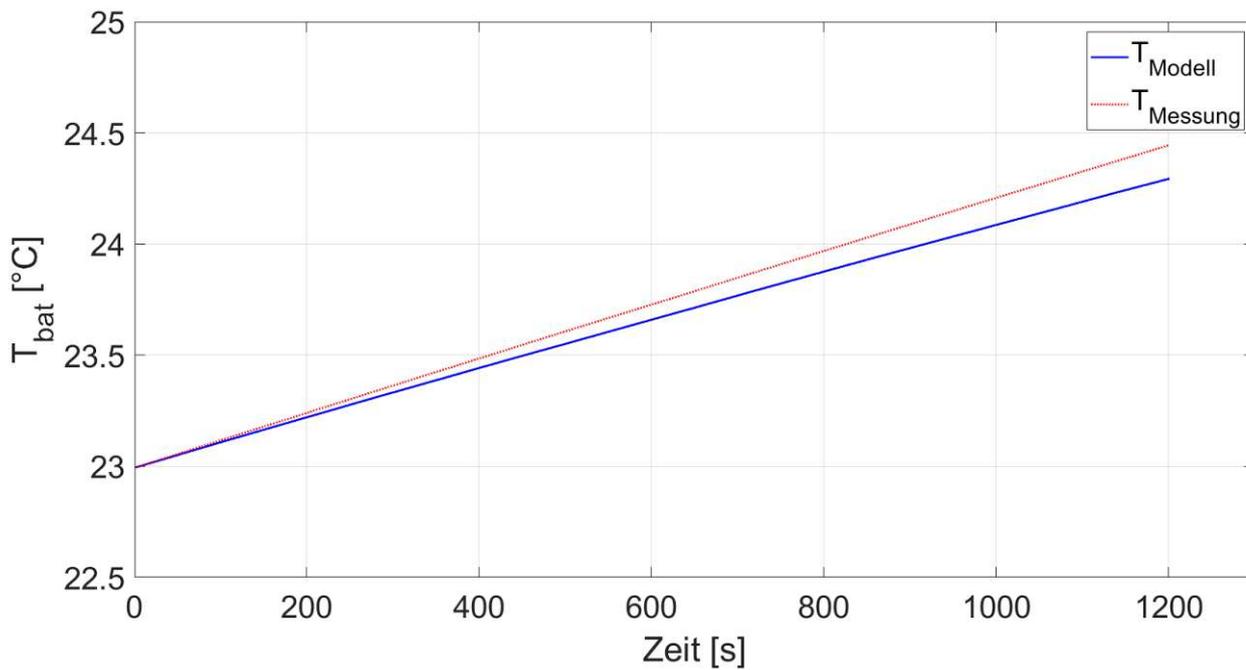


Abbildung 3.19: Batterietemperatur des Modells und der Messung eines Heizvorgangs der Hochvoltbatterie

In Tabelle 3.5 sind die batteriespezifischen Parameter mit ihren Werten nochmals aufgelistet.

Tabelle 3.5: Parameter des thermischen Batteriemodells

Parameter	Wert	Einheit	Referenz
$c_{p\ bat}$	915	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	berechnet
m_{bat}	699	kg	[6]
k_{bat}	51	W/K	angepasst

4 Einsatzszenarienmodellierung

Die Entwicklung von Einsatzszenarien hat das Ziel die verschiedenen Einflussfaktoren auf das Energiemanagement eines Elektroautos zu untersuchen und zu optimieren. Dafür wurde nach speziellen Fahrsituationen gesucht, welche mögliche Optimierungspotentiale des Energiemanagements beherbergen. Nach Auswerten der Literatur wurden schließlich vier Einsatzszenarien zur Modellierung festgelegt:

- Vorkonditionierung der Batterie für einen Schnellladezyklus
- Adaptive Kabinentemperaturregelung
- Direkter Einsatz von Rekuperationsleistung zur Batterietemperierung
- Vermeidung von Batterieverlusten durch Batterietemperierung

All diese Einsatzszenarien bauen auf dem zuvor beschriebenen Gesamtfahrzeugmodell auf. Da es sich bei dem Gesamtfahrzeugmodell um ein rückwärtsgerichtetes Modell handelt, sind alle fahrzyklischen Inputs fix vorgegeben, weshalb im Bereich der Längsdynamik nur wenig Optimierungspotential liegt. Deshalb fokussieren sich die Einsatzszenarien hauptsächlich auf die Steuerung des Thermalmanagements.

Für die Modellierung eines Einsatzszenarios werden zu Beginn eine Zielsetzung und entsprechende Anforderungen an das Modell formuliert. Daraus wird die Problemformulierung abgeleitet, woraus schließlich das Modell gebildet wird. In weiterer Folge werden die Einsatzszenarien über den Optimierungsalgorithmus ausgewertet. Zur Optimierung wird die „DPM-function“, erstellt von [16] verwendet.

Die grundlegende Problemformulierung ist für jedes Einsatzszenario gleich: Über einen oder mehrere Steuervektoren (u), werden die Zustandsvektoren (x_n) derart angepasst, dass die Kosten (C) stets minimiert werden. Die Kosten (C) beschreiben meist einen Zielkonflikt zwischen zwei Kostenfaktoren, z.B. eine geringere Ladezeit auf Kosten einer erhöhten Leistung des Thermalsystems. Über einen Gewichtungsfaktor (a) können diese Kostenfaktoren nach Wunsch gewichtet werden. Um einen sinnvollen Vergleich zwischen Kostenfaktoren unterschiedlicher Einheiten herzustellen, wird jeder Kostenfaktor durch einen Normierungsfaktor (λ_i) entsprechend angepasst, bevor er in die Kostenfunktion aufgenommen wird.

Für die Zustandsvektoren wird ein Anfangswert (x_0), sowie ein Endwert (x_N), welcher am Ende der Simulation erreicht werden muss, angegeben. Der entsprechende Fahrzyklus wird über den Input (W) in die Simulation eingespeist. Weiters können über eine Infeasability Matrix (I) unzulässige Zustände angegeben werden.

4.1 Vorkonditionierung der Batterie für einen Schnellladezyklus

Zielsetzung

Bei diesem Einsatzszenario wird davon ausgegangen, dass der Zeitpunkt eines geplanten Ladestopps bekannt ist. Ziel ist es, die Batterie während der Fahrt optimal vorzukonditionieren, um dadurch die Ladedauer bzw. den Energiebedarf des Thermalsystems zu minimieren. Untersucht werden soll speziell der Zusammenhang zwischen Ladedauer und Energieaufwand des Thermalsystems, sowie die optimale Batterietemperatur bei Start des Schnellladezyklus. Die Auswertung soll bei verschiedenen Umgebungstemperaturen durchgeführt werden.

Anforderungen

- **Erreichen eines SOC von 0,8:** Im Rahmen dieses Einsatzszenarios soll bis auf einen SOC von 0,8 geladen werden. Ab diesem Wert kann der Ladevorgang als abgeschlossen angesehen werden.
- **Maximale Batterietemperatur:** Um Alterungsprozesse in der Batterie zu minimieren, soll eine Temperatur von 35°C nicht überschritten werden.

Problemformulierung

Im Allgemeinen besteht das Einsatzszenario aus zwei Teilen: Teil 1 beschreibt einen 45-minütigen Fahrzyklus, in dem das Fahrzeug Zeit hat die Batterie für den Schnellladezyklus zu konditionieren. Teil 2 bildet den eigentlichen Schnellladezyklus. Insgesamt bildet dies einen 75-minütigen Fahrzyklus, welcher in Abbildung 4.1 abgebildet ist.

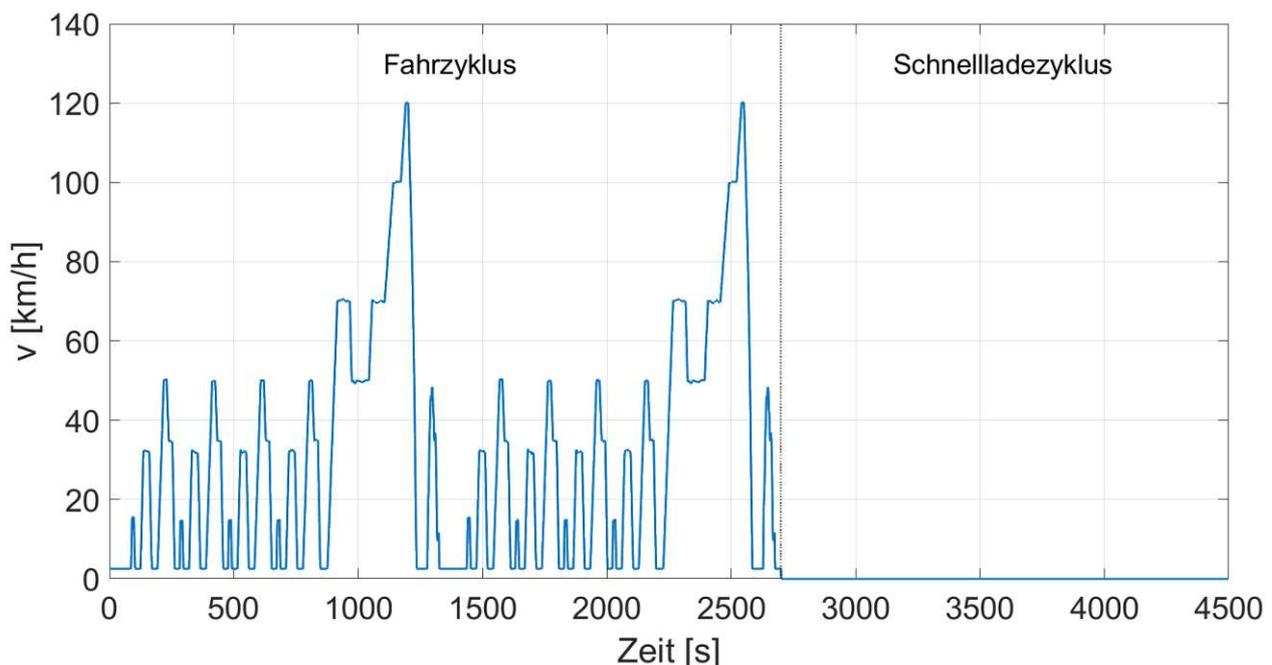


Abbildung 4.1 - Geschwindigkeitsprofil des Fahrzyklus des Szenarios "Vorkonditionierung der Batterie für einen Schnellladezyklus"

Das Modell wird über die zwei Zustandsvektoren x_1 und x_2 beschrieben. Der SOC kann als Zielgröße angesehen werden – wird ein SOC von 0,8 erreicht, ist der Ladevorgang abgeschlossen. Die Batterietemperatur wird neben dem SOC benötigt, um den maximalen Ladestrom zu bestimmen. Daraus ergeben sich die zwei Zustandsvektoren:

$$x_1 = SOC \quad (4.1)$$

$$x_2 = T_{bat} \quad (4.2)$$

Die Regelgröße u_1 entspricht der elektrischen Leistung des Thermalmanagementsystem, welche notwendig ist, um den gewünschten Wärmestrom an die Batterie aufzubringen.

$$u_1 = P_{bat\ therm} \quad (4.3)$$

Über die Kostenfunktion C wird der Steuervektor u_1 für den jeweiligen Fall optimal angepasst.

$$C = \begin{cases} a \cdot \lambda_1 \cdot \Delta SOC + (1 - a) \cdot \lambda_2 \cdot I_{therm}, & I_{chrg} < 0, T_{bat} < 35 \\ (1 - a) \cdot \lambda_2 \cdot I_{therm}, & I_{chrg} \geq 0, T_{bat} < 35 \\ a \cdot \lambda_1 \cdot \Delta SOC + (1 - a) \cdot \lambda_2 \cdot I_{therm} + 1, & I_{chrg} < 0, T_{bat} \geq 35 \\ (1 - a) \cdot \lambda_2 \cdot I_{therm} + 1, & I_{chrg} \geq 0, T_{bat} \geq 35 \end{cases} \quad (4.4)$$

Der erste Term der Kostenfunktion beschreibt die relative Änderung des SOC während des Ladevorgangs. Dieser kommt jedoch nur zu tragen, wenn sich das Fahrzeug in einem Ladevorgang befindet ($I_{chrg} < 0$). Nimmt der SOC zu, ist die relative Änderung negativ, wodurch, aufgrund der Minimierung der Kosten, ein hoher Ladestrom I_{chrg} angestrebt wird. Der Wärmestrom an die Batterie wird über elektrische Leistung bereitgestellt, daraus ergibt sich der benötigte Strom des Thermalmanagementsystems I_{therm} , welcher den zweiten Term der Kostenfunktion darstellt.

Mittels des Gewichtungsfaktors a kann der Zusammenhang zwischen Steigung des SOC (bzw. Ladedauer) und aufgewendetem Strom des Thermalmanagementsystems gewichtet werden. Wird eine Batterietemperatur von 35°C überschritten, wird dies mit einem zusätzlichen Penalty geahndet.

Auswertung der Ergebnisse

Im Zuge der Auswertung dieses Einsatzszenarios wurde der gleiche Fahrzyklus auf verschiedenen Temperaturniveaus (0°C, 10°C, 20°C, 30°C, 35°C) simuliert. Die Batteriestarttemperatur zu Beginn des Einsatzszenarios entspricht stets der Umgebungstemperatur. Die Batterietemperatur hat wesentlichen Einfluss auf die Ladestrategie und somit auf das Thermalmanagement der Batterie. Der anfängliche SOC wurde bei allen Einsatzszenarien auf 0,3 gesetzt.

Auswertung bei Batteriestarttemperatur 0°C

Bei tiefen Temperaturen ist die maximale Ladeleistung der Batterie stark begrenzt. Ein zu hoher Ladestrom würde zu einer Beschädigung der Batterie führen [3]. Daraus folgt, dass die Ladedauer mit sinkender Batterietemperatur zunimmt. Durch aktives Temperieren der Batterie kann dadurch die Ladedauer des Schnellladezyklus beeinflusst werden. Ein hoher Einsatz an elektrischer Leistung für die Batterietemperierung resultiert in einer höheren Batterietemperatur und folglich in einer kürzeren Ladedauer. Nimmt man jedoch eine längere Ladedauer in Kauf, kann Energie für die Batterietemperierung gespart werden. Dieses Verhältnis kann durch den Gewichtungsfaktor α in der Kostenfunktion gesteuert werden.

In Abbildung 4.2 sind die resultierenden Ströme für einen Fahrzyklus mit 45-minütiger (2700s) Vorkonditionierung bei einer Batteriestarttemperatur und Umgebungstemperatur von 0°C und einem Gewichtungsfaktor von 0,0 dargestellt. Die gesamte Dauer des simulierten Einsatzszenarios beläuft sich auf 75 Minuten. Ein niedriger Gewichtungsfaktor bewirkt, dass der eingesetzte Strom des Thermalmanagementsystems (I_{therm}) im Vergleich zum Ladestrom (I_{chrg}) stärker ins Gewicht fällt. Eine lange Ladedauer bei niedrigem Thermaleinsatz resultiert. Vor Beginn des Ladezyklus bei 2700s ist der Verlauf des Stroms für Traktionsanforderungen (I_{trak}) als rote Linie ersichtlich.

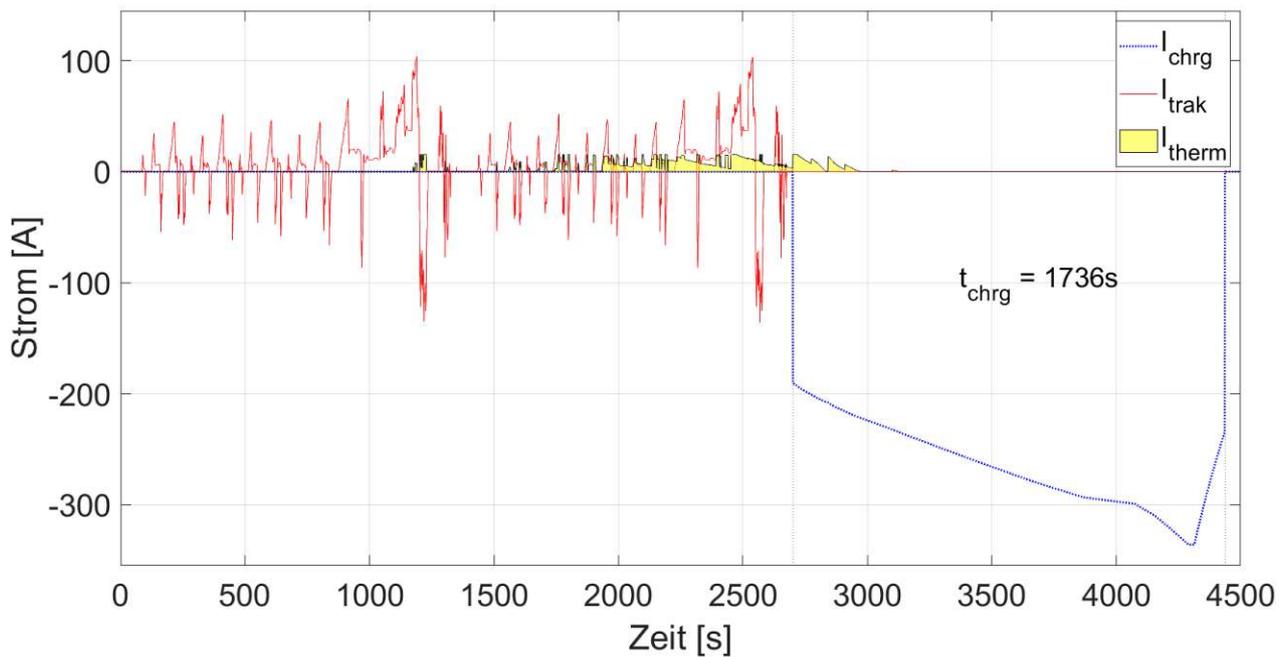


Abbildung 4.2: Ladestrom, Strom für Traktionsanforderungen und Strom des Thermalsystems bei 0°C Umgebungstemperatur und Gewichtungsfaktor 0,0

In Abbildung 4.3 sind der resultierende SOC und die Batterietemperatur dargestellt. Die Batteriestarttemperatur und die Umgebungstemperatur betragen wiederum 0°C.

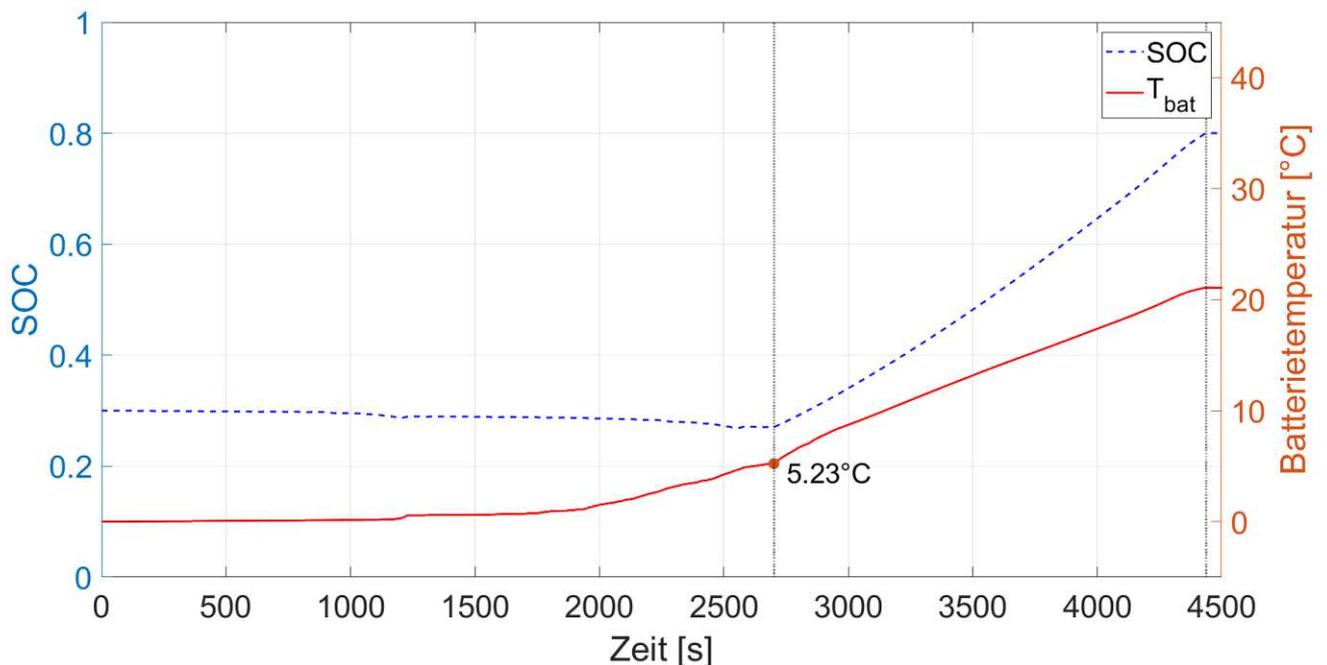


Abbildung 4.3: Verlauf des SOC und der Batterietemperatur bei 0°C Umgebungstemperatur und Gewichtungsfaktor 0,0

Wie aus Abbildung 4.3 zu erkennen, wird die Batterie vom Thermalsystem nur geringfügig geheizt. Die Temperatur nach der Vorkonditionierung beträgt 5,23°C. Zu

Beginn des Schnellladezyklus wird ein Ladestrom von 190A erreicht. Daraus resultiert eine lange Ladedauer von 1736s.

Mit Fortschreiten des Ladezyklus ist eine Steigerung des Ladestromes zu erkennen. Der hohe Ladestrom generiert eine starke Verlustwärme, wodurch sich die Batterie während des Ladevorgangs aufheizt, was wiederum durch den Temperaturanstieg einen höheren Ladestrom mit sich bringt. Gegen Ende des Ladevorgangs muss der Ladestrom aufgrund des steigenden SOC's wiederum gedrosselt werden, um eine Beschädigung der Batterie zu verhindern [8].

Zum Vergleich sind in Abbildung 4.4 die Ergebnisse eines Fahrzyklus mit einem höheren Gewichtungsfaktor von 0,8 dargestellt. Ein hoher Gewichtungsfaktor bezweckt, dass die aufgewendete Leistung des Thermalmanagementsystems nicht so stark gewichtet wird, eine Maximierung des Ladestroms und folglich eine Minimierung der Ladedauer resultiert. Alle anderen Parameter, wie Umgebungstemperatur, Batteriestarttemperatur und der SOC zu Beginn des Zyklus wurden gleich gewählt.

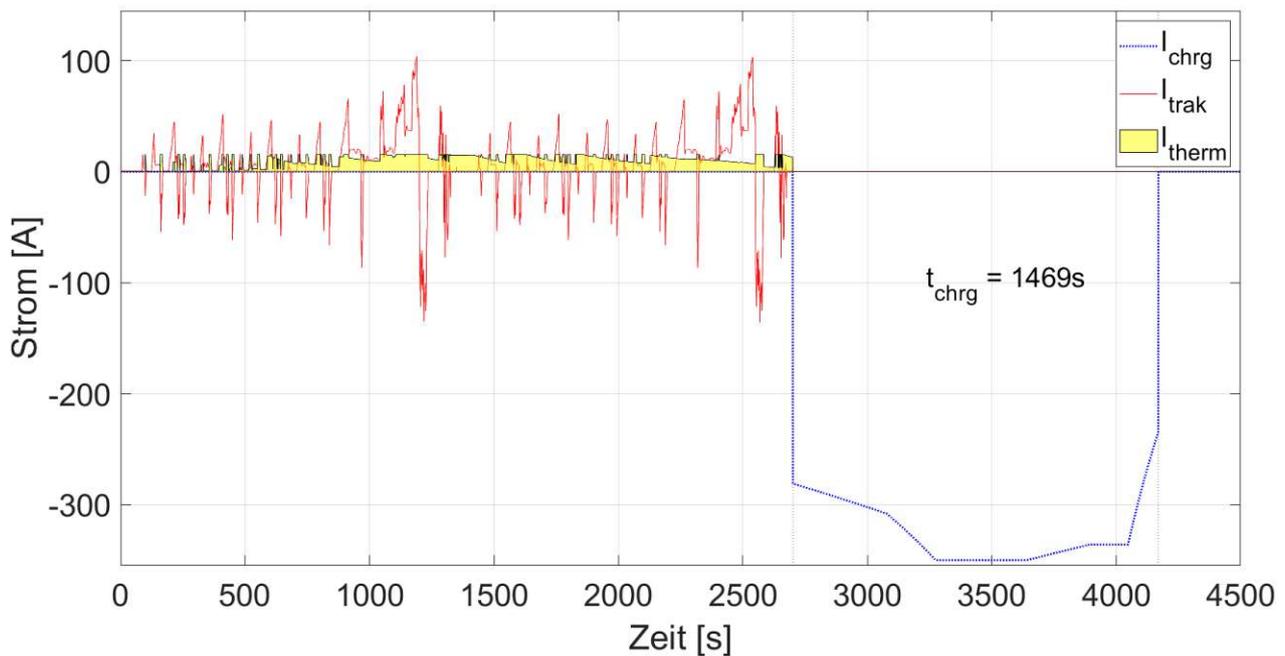


Abbildung 4.4: Ladezyklusdiagramm bei 0°C Umgebungstemperatur und Gewichtungsfaktor 0,8

Abbildung 4.5 zeigt den Verlauf des SOC's und der Batterietemperatur. Wiederum ist die Batterietemperatur zu Beginn des Ladezyklus hervorgehoben.

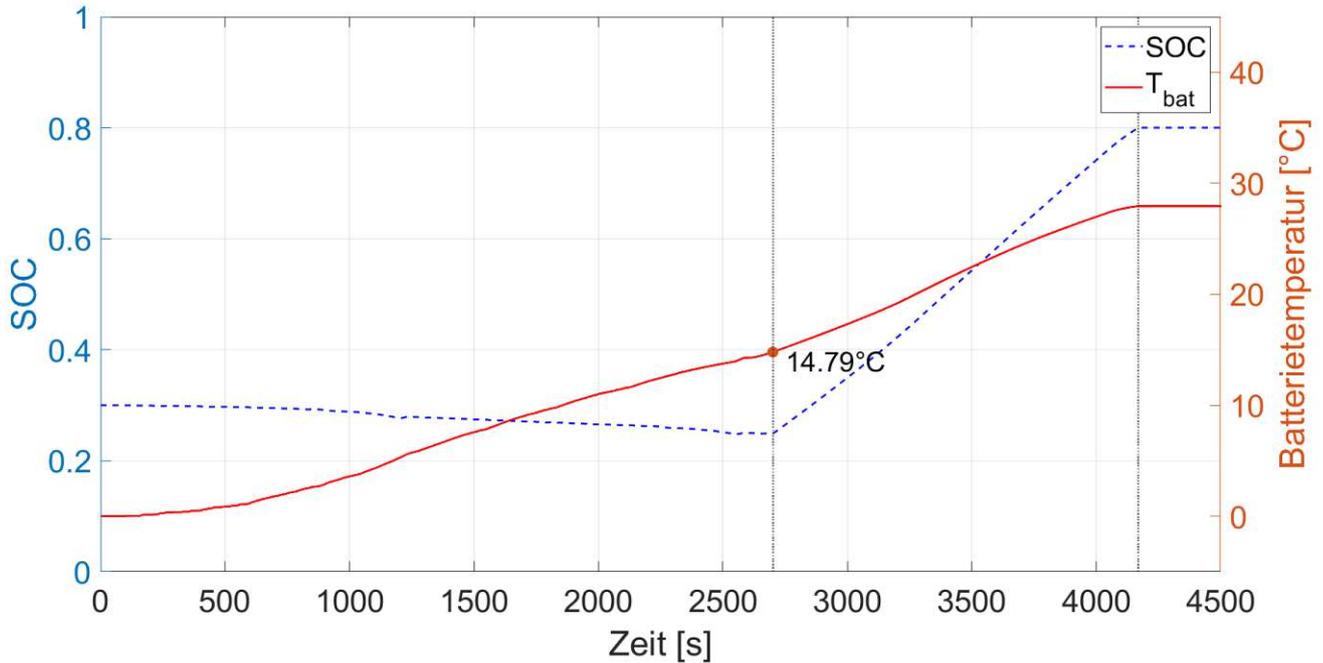


Abbildung 4.5: Verlauf des SOC's und der Batterietemperatur bei 0°C Umgebungstemperatur und Gewichtungsfaktor 0,8

Durch die geringere Gewichtung der Leistung des Thermalmanagementsystems wird die Batterie während des Fahrzyklus auf eine Temperatur von 14,8°C erwärmt. Dadurch wird zu Beginn des Ladezyklus ein Ladestrom von 275A erreicht, woraus eine kürzere Ladedauer von 1469s resultiert. Durch die stärkere Temperierung der Batterie wurde somit eine Verkürzung der Ladedauer um 15,4% erreicht.

Somit ist erkennbar, dass durch aktives Heizen der Batterie die Ladedauer entsprechend verkürzt werden kann. Durch den Vergleich der beiden Zielgrößen Ladedauer und Energieaufwand des Thermalsystems kann über die Variation des Gewichtungsfaktors α das Verhältnis der beiden Ergebnisse anhand einer Pareto-Front veranschaulicht werden. Eine Pareto-Front veranschaulicht optimale Zustände eines Systems, welches von zwei oder mehreren Größen abhängt, die in einem Zielkonflikt zueinander stehen [30]. Durch den Optimierungsalgorithmus stellen die Ergebnisse der Simulation stets eine optimale Lösung des Problems dar. Unter optimaler Lösung ist die Minimierung der Kostenfunktion zu verstehen. Da die Ladedauer die Zeitschritte bis ein SOC von über 0,8 erreicht ist abbildet, kann diese nicht direkt in die Kostenfunktion aufgenommen werden. Über die Veränderung des SOC's zwischen zwei Zeitschritten wird die Ladedauer schließlich indirekt abgebildet. Deshalb bringt ein hoher Gewichtungsfaktor (Ladedauer wird stärker gewichtet), nicht fortlaufend eine geringere Ladedauer, sondern jedlich eine schnelle Veränderung des SOC's mit sich. Deshalb ist in Abbildung 4.6 ein leichter Anstieg der Ladedauer zu erkennen, obwohl der Energieaufwand des Thermalsystems steigt.

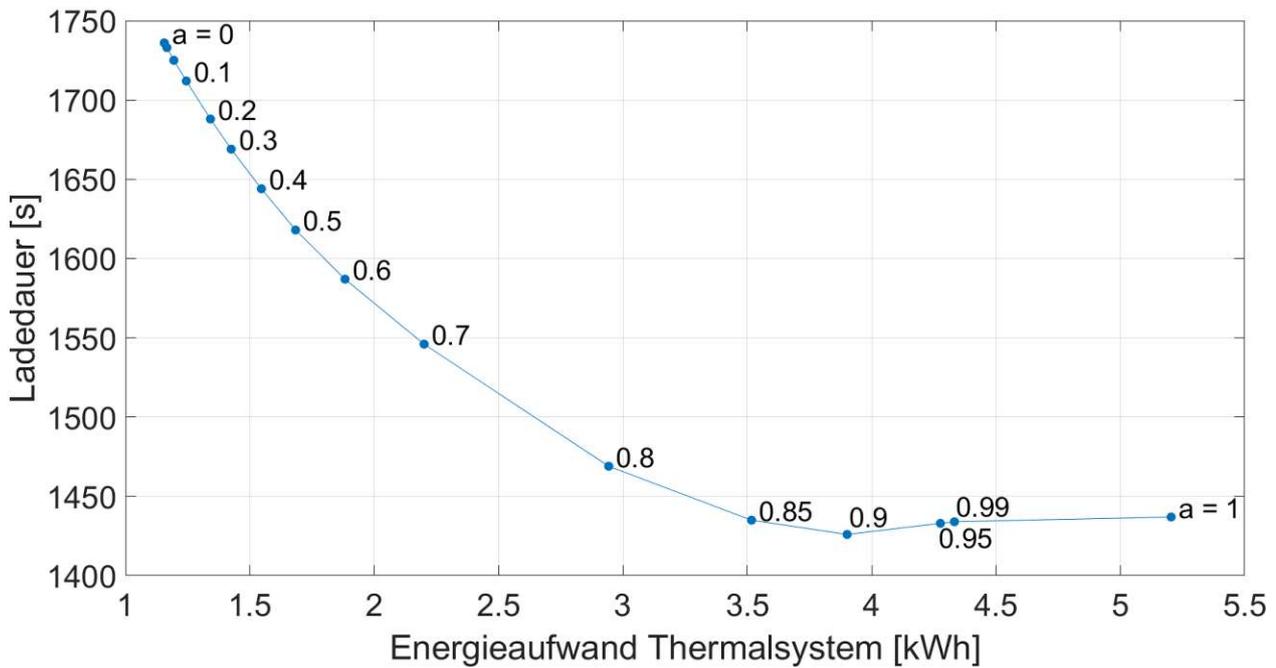


Abbildung 4.6: Pareto-Front der Ladedauer und dem Energieaufwand des Thermalsystems bei 0°C Umgebungstemperatur und Gewichtungsfaktoren von 0 bis 1

Zu erkennen ist, dass mit zunehmenden Energieeinsatz die Ladedauer verkürzt werden kann. Die kürzeste Ladedauer wurde bei einem Gewichtungsfaktor von 0,9 erreicht und beträgt 1426s. Der Energieaufwand des Thermalsystems beläuft sich an diesem Punkt auf 3,9 kWh.

Die Batterietemperatur zu Beginn des Schnellladezyklus hat entscheidenden Einfluss auf den weiteren Ladeverlauf: 1) Der maximale Ladestrom hängt direkt von der Batterietemperatur ab und 2) eine zu hohe Batterietemperatur zu Beginn kann zu einer Überhitzung der Batterie führen. Um die Betriebsgrenzen einzuhalten, muss die Batterie daher während des Ladezyklus aktiv gekühlt werden, was in einer verlängerten Ladedauer und einem hohen Leistungseinsatz resultiert.

In Abbildung 4.7 ist die Ladedauer mit der Batterietemperatur nach der Vorkonditionierung bei Ladebeginn (2700s) abgebildet.

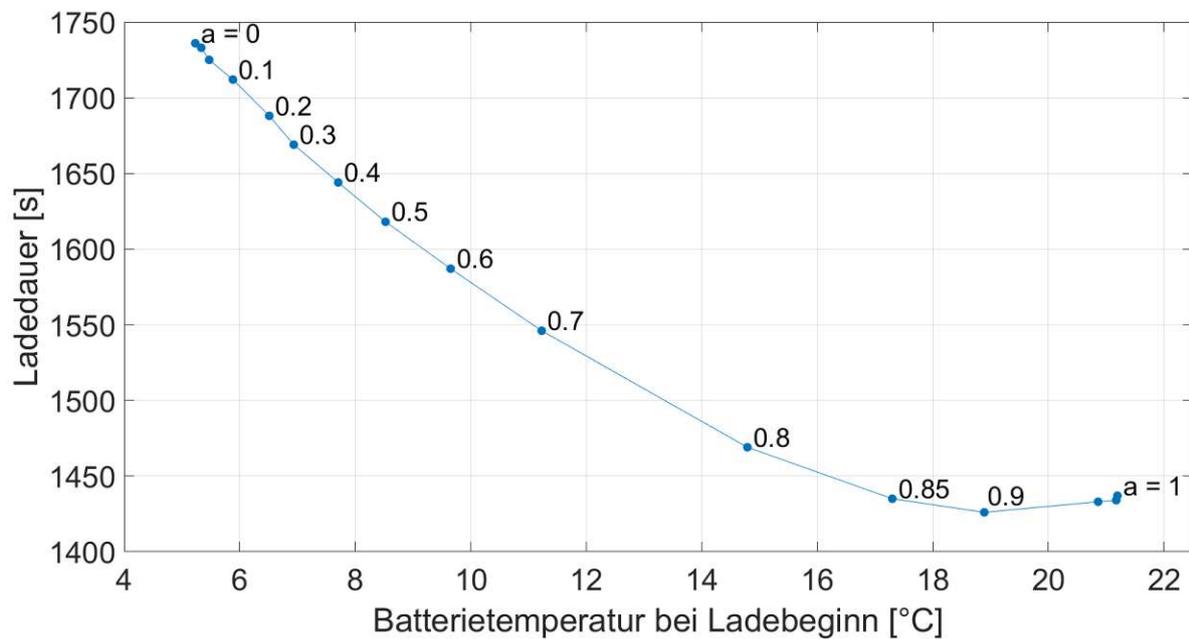


Abbildung 4.7: Pareto-Front der Ladedauer und der Batterietemperatur zu Ladebeginn (2700s) bei 0°C Umgebungstemperatur und Gewichtungsfaktoren von 0 bis 1

Bei einer Batterietemperatur von 18,9°C zu Beginn des Ladezyklus wird die geringste Ladedauer erzielt. Ist die Temperatur niedriger, ist auch der maximale Ladestrom dementsprechend geringer. Wiederum nimmt die Ladedauer bei Gewichtungsfaktoren über 0,9 erneut zu. Dieser Effekt äußert sich bei einer Batteriestarttemperatur von 10°C noch stärker, warum erst in Folgendem genauer darauf eingegangen wird.

Auswertung bei Batteriestarttemperatur 10°C

In Abbildung 4.8 sind die relevanten Ströme für einen Fahrzyklus bei 10°C Batteriestart- und Umgebungstemperatur mit einem Gewichtungsfaktor von 0,0 abgebildet.

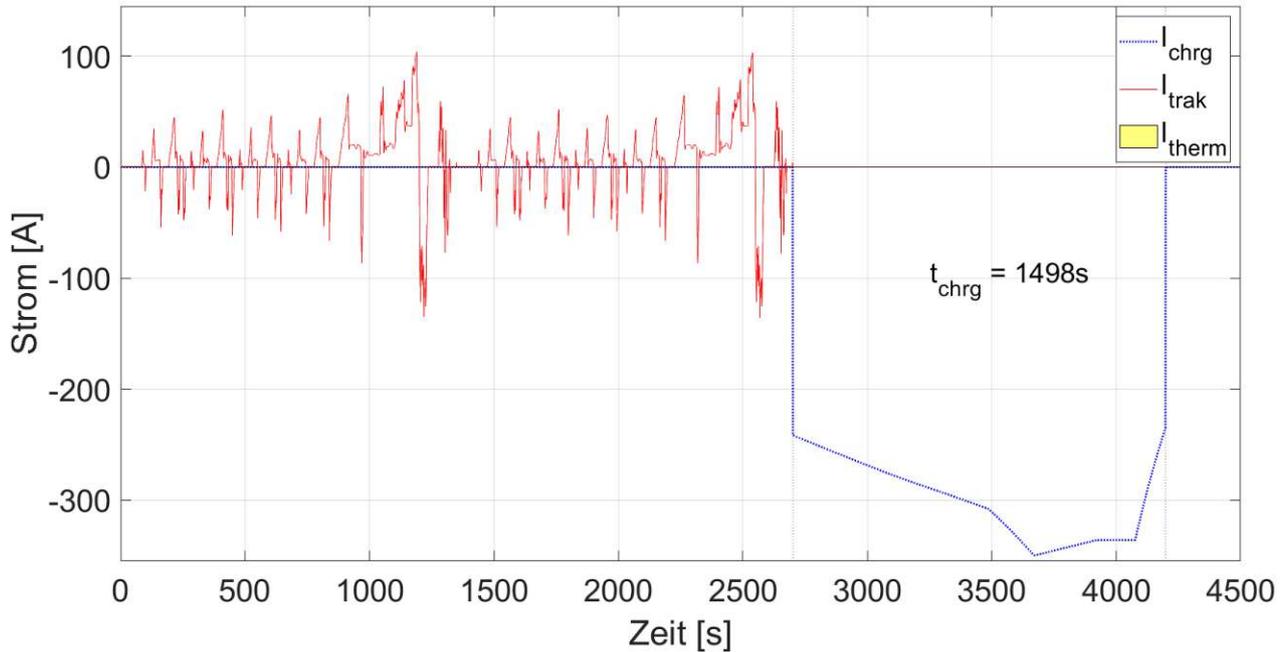


Abbildung 4.8: Ladestrom, Strom für Traktionsanforderungen und Strom des Thermalsystems bei 10°C Umgebungstemperatur und Gewichtungsfaktor 0,0

Zu erkennen ist, dass im Vergleich zum vorherigen Einsatzszenario die Batterie bei einem niedrigen Gewichtungsfaktor aufgrund der starken Gewichtung des Stroms des Thermalsystems nicht vorkonditioniert wird. Der Verlauf des SOCs und der Batterietemperatur sind in Abbildung 4.9 dargestellt.

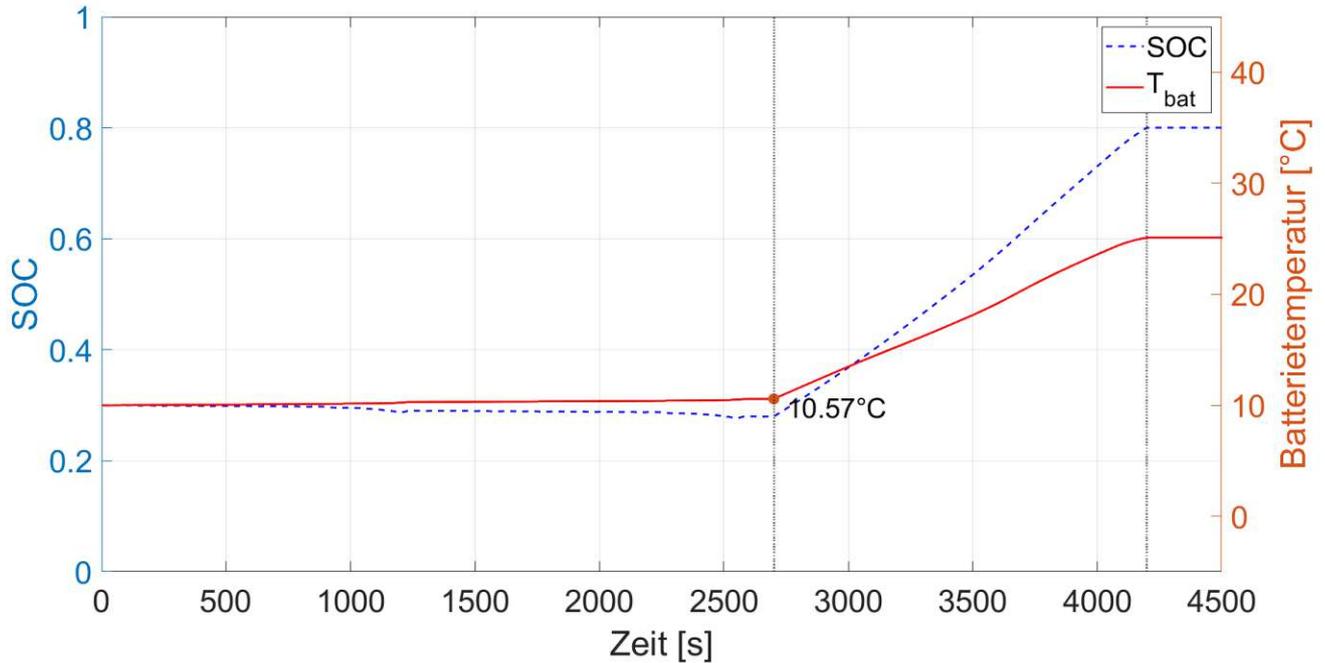


Abbildung 4.9: Verlauf des SOC's und der Batterietemperatur bei 10°C Umgebungstemperatur und Gewichtungsfaktor 0,0

Aufgrund der ausbleibenden Vorkonditionierung steigt die Batterietemperatur nur leicht auf 10,57°C an. Der leichte Temperaturanstieg ist auf die Verlustwärme der Batterie während der Fahrt zurückzuführen. Bei Beginn des Ladezyklus wird ein Ladestrom von 242A erreicht, woraus eine Ladedauer von 1498s resultiert. Wiederum steigt der Ladestrom mit fortschreiten des Ladezyklus bedingt durch die strominduzierte Aufheizung der Batterie.

Wird der Gewichtungsfaktor erhöht, wird der Kostenfaktor der Ladedauer stärker gewichtet, woraus eine Vorkonditionierung der Batterie begünstigt wird. In Abbildung 4.10 sind die Ströme eines Fahrzyklus bei einem Gewichtungsfaktor von 0,8 dargestellt. Alle anderen Parameter des Fahrzyklus blieben unverändert.

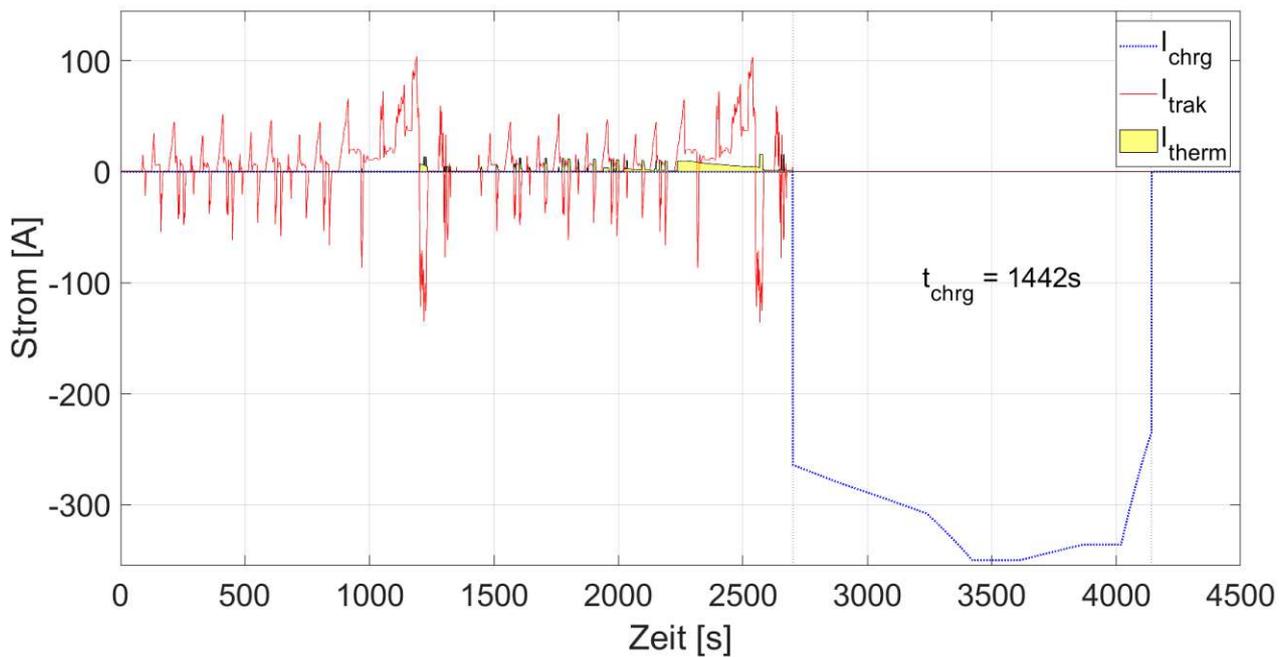


Abbildung 4.10: Ladestrom, Strom für Traktionsanforderungen und Strom des Thermalsystems bei 10°C Umgebungstemperatur und Gewichtungsfaktor 0,8

Mit steigendem Gewichtungsfaktor wird die Batterie schließlich vom Thermalmanagementsystem vorkonditioniert. In Abbildung 4.11 sind der resultierende SOC und der Verlauf der Batterietemperatur dargestellt.

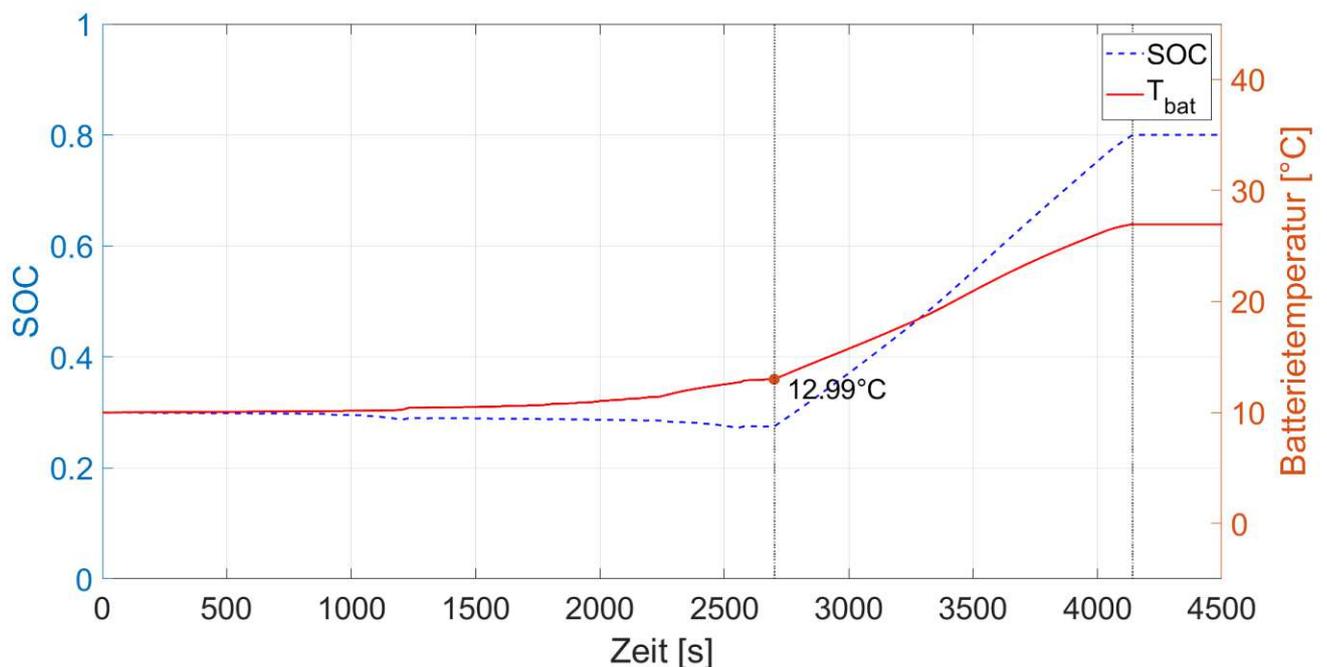


Abbildung 4.11: Verlauf des SOC und der Batterietemperatur bei 10°C Umgebungstemperatur und Gewichtungsfaktor 0,8

Durch Vorkonditionieren der Batterie beträgt die Batterietemperatur zu Beginn des Ladezyklus 13°C , woraus ein erhöhter Ladestroms resultiert. Dieser beträgt nach Ende der Vorkonditionierung 264A . Die Ladedauer konnte dadurch auf 1442s verkürzt werden. Die aufgewendete Energie des Thermalsystems beträgt $0,54\text{ kWh}$.

Wiederum kann der Zielkonflikt zwischen Ladedauer und aufgewendeter Energie des Thermalsystems in einer Pareto-Front veranschaulicht werden. In Abbildung 4.12 ist dieser Zusammenhang dargestellt.

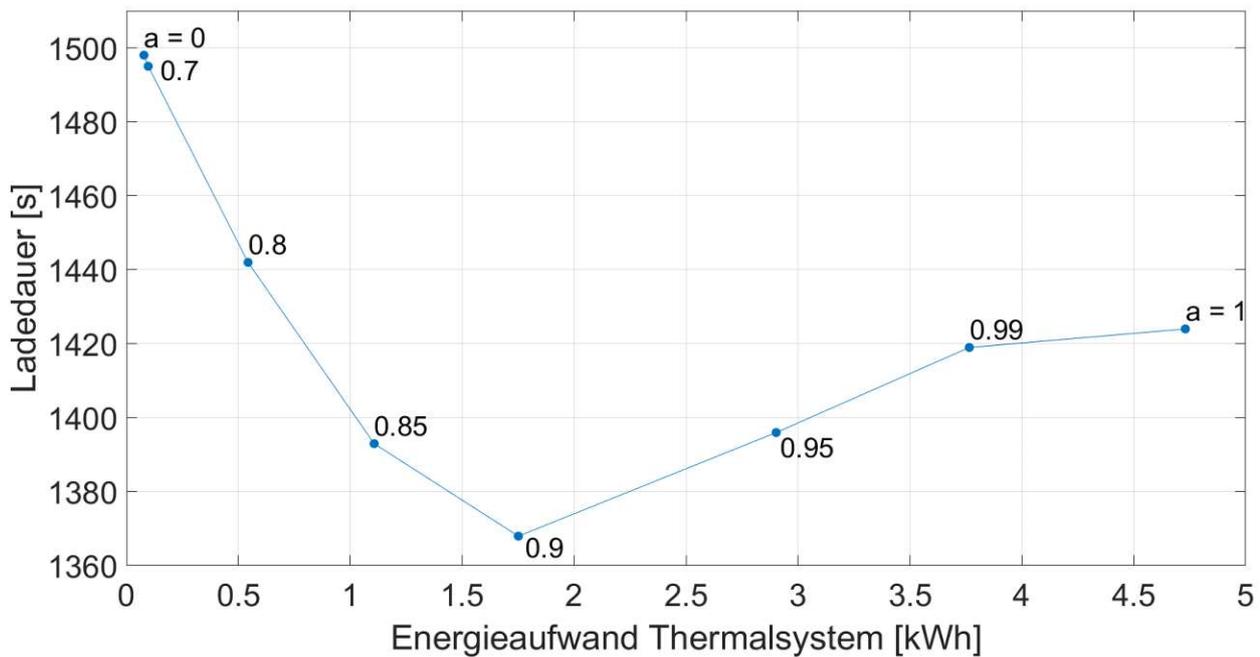


Abbildung 4.12: Pareto-Front der Ladedauer und dem Energieaufwand des Thermalsystems bei 10°C Umgebungstemperatur und Gewichtungsfaktoren von 0 bis 1

Die kürzeste Ladedauer von 1368s wurde bei einem Gewichtungsfaktor von $0,9$ und einem Energieaufwand des Thermalsystems von $1,75\text{ kWh}$ erreicht.

Das Verhältnis zwischen Batteriestarttemperatur und Ladedauer ist in Abbildung 4.13 dargestellt.

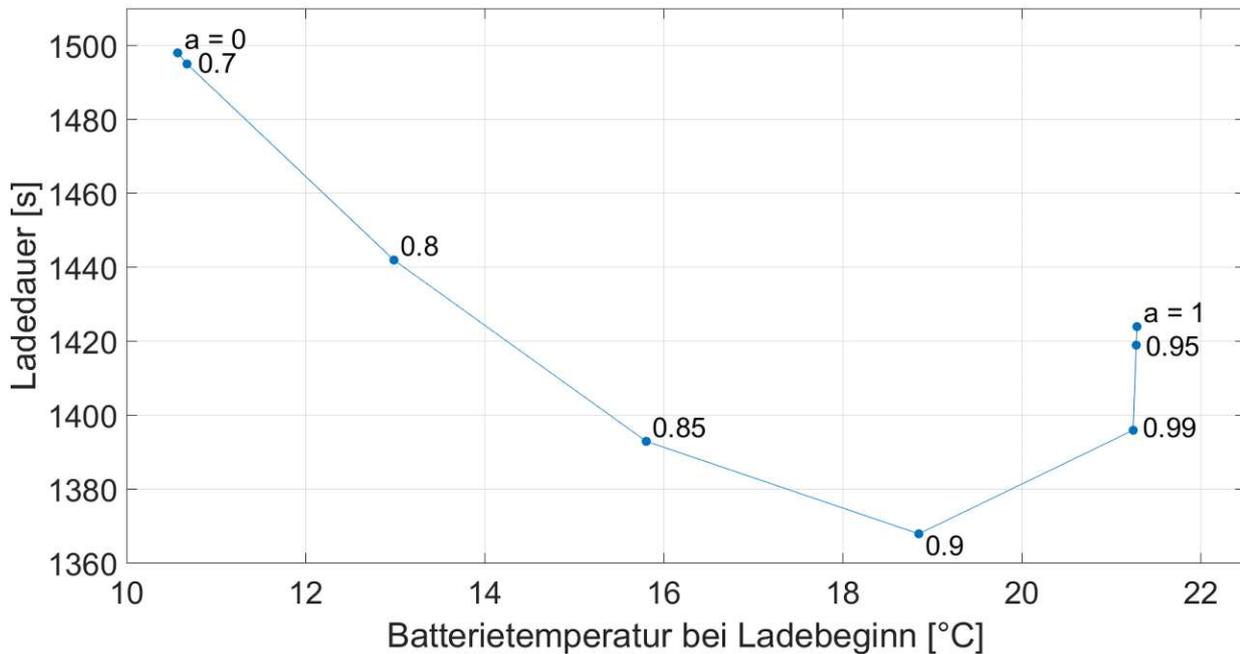


Abbildung 4.13: Pareto-Front der Ladedauer und der Batterietemperatur zu Ladebeginn (2700s) bei 10°C Umgebungstemperatur und Gewichtungsfaktoren von 0 bis 1

Die optimale Batterietemperatur bei Ladebeginn im Sinne der kürzesten Ladedauer beträgt 18,9°C. Ein Ladestrom von 325A zu Beginn des Ladezyklus wird erreicht. In Abbildung 4.12 und Abbildung 4.13 ist erkennbar, dass die Ladedauer mit Gewichtungsfaktoren über dem Optimum von 0,9 erneut ansteigen, obwohl der maximale Ladestrom von 350A zu Beginn des Ladezyklus noch nicht erreicht ist. Der Zusammenhang zwischen Ladedauer und Ladestrom zu Ladebeginn ist in Abbildung 4.14 dargestellt.

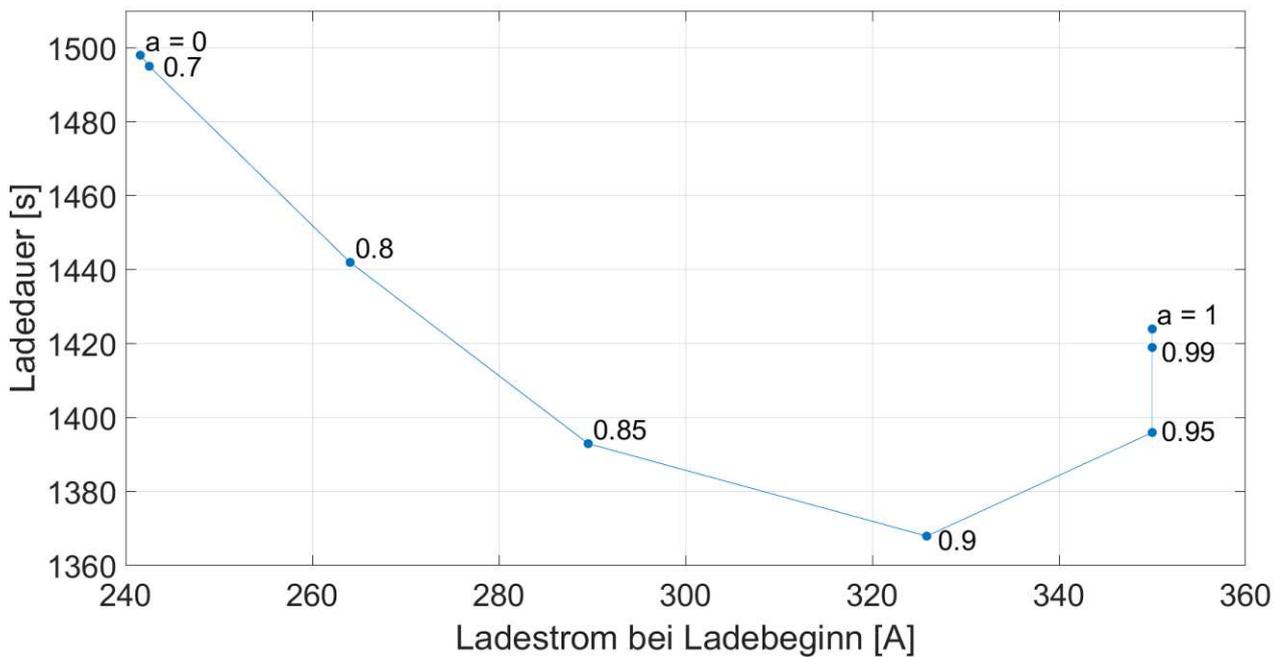


Abbildung 4.14: Pareto-Front der Ladedauer und des Ladestroms zu Ladebeginn (2700s) bei 10°C Umgebungstemperatur und Gewichtungsfaktoren von 0 bis 1

Der Verlauf des Ladestroms ist aufgrund der starken Temperaturabhängigkeit fast ident mit der Batterietemperatur zu Ladebeginn. Will eine möglichst kurze Ladedauer erreicht werden, ist es nicht zielführend den maximalen Ladestrom von 350A gleich zu Ladebeginn anzustreben. Dies ist zuerst kontraintuitiv, jedoch bringt ein hoher Ladestrom zu Beginn auch einen hohen Energieeinsatz des Thermalsystems mit sich. Dieser senkt den SOC während dem Vorkonditionieren, was wiederum während des Ladezyklus wieder aufgeladen werden muss. In Abbildung 4.15 ist dieser Zusammenhang schematisch dargestellt.

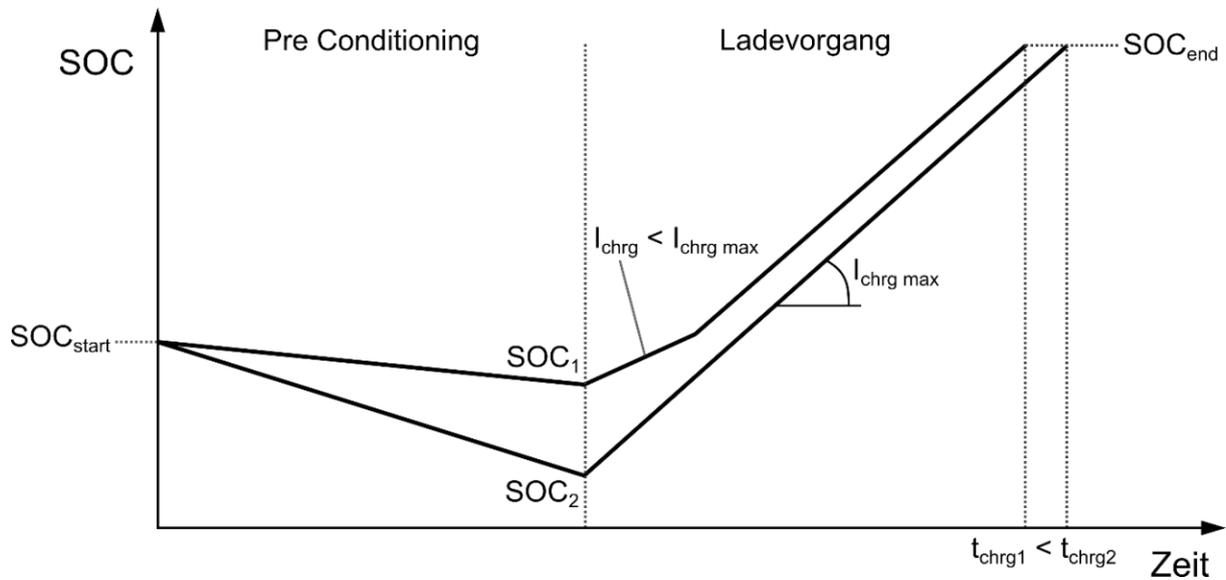


Abbildung 4.15: Vergleich SOC-Verlauf und Ladedauer bei maximalen Ladestrom zu Ladebeginn (2) und Ladestrom unter maximalen Ladestrom (1)

Auswertung bei Batteriestarttemperatur 20°C

Bei einer Batteriestarttemperatur von 20°C ist in keinem der simulierten Fälle eine Temperierung der Batterie notwendig bzw. für den Ladevorgang vorteilhaft. Der Ladestrom befindet sich schon in einem optimalen Bereich, zudem besteht keine Gefahr durch Überhitzung der Batterie. Dadurch ist das Einsatzszenario auf diesem Temperaturniveau unabhängig vom Gewichtungsfaktor a . In Abbildung 4.17 ist zu erkennen, dass auch ohne Batterietemperierung die Batterie schon zu Beginn mit einem maximalen Ladestrom geladen werden kann.

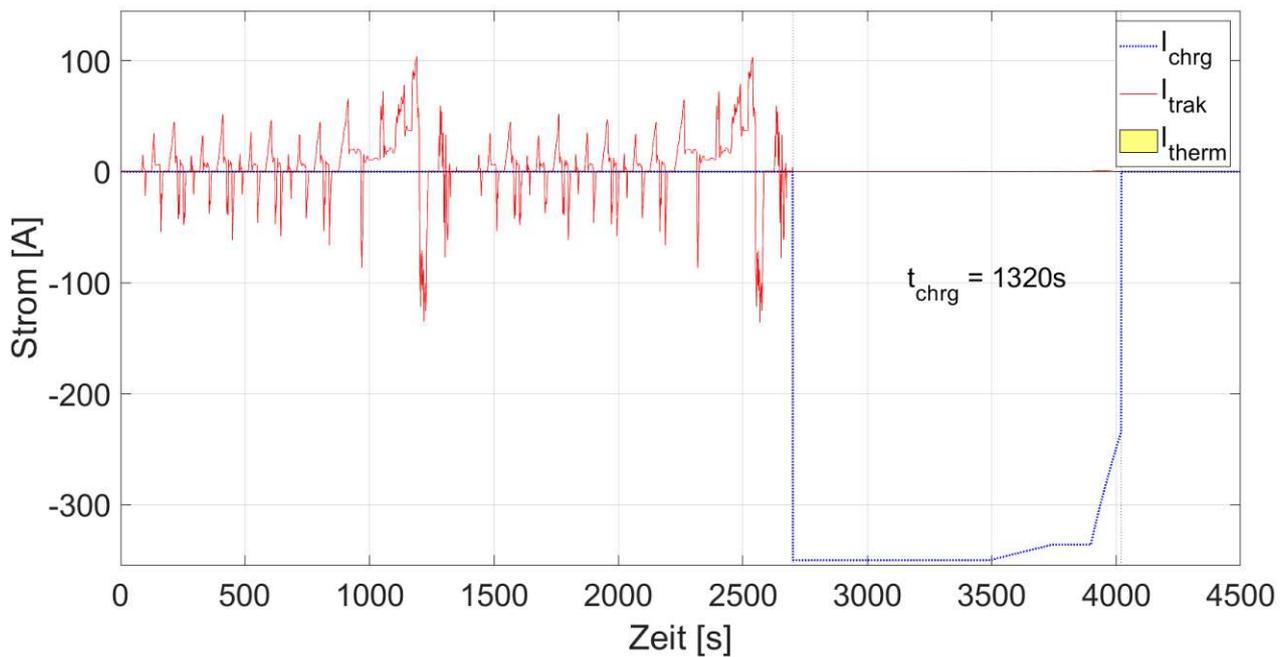


Abbildung 4.17: Ladestrom, Strom für Traktionsanforderungen und Strom des Thermalsystems bei 20°C Umgebungstemperatur

In Abbildung 4.16 sind wiederum der SOC und die Batterietemperatur abgebildet.

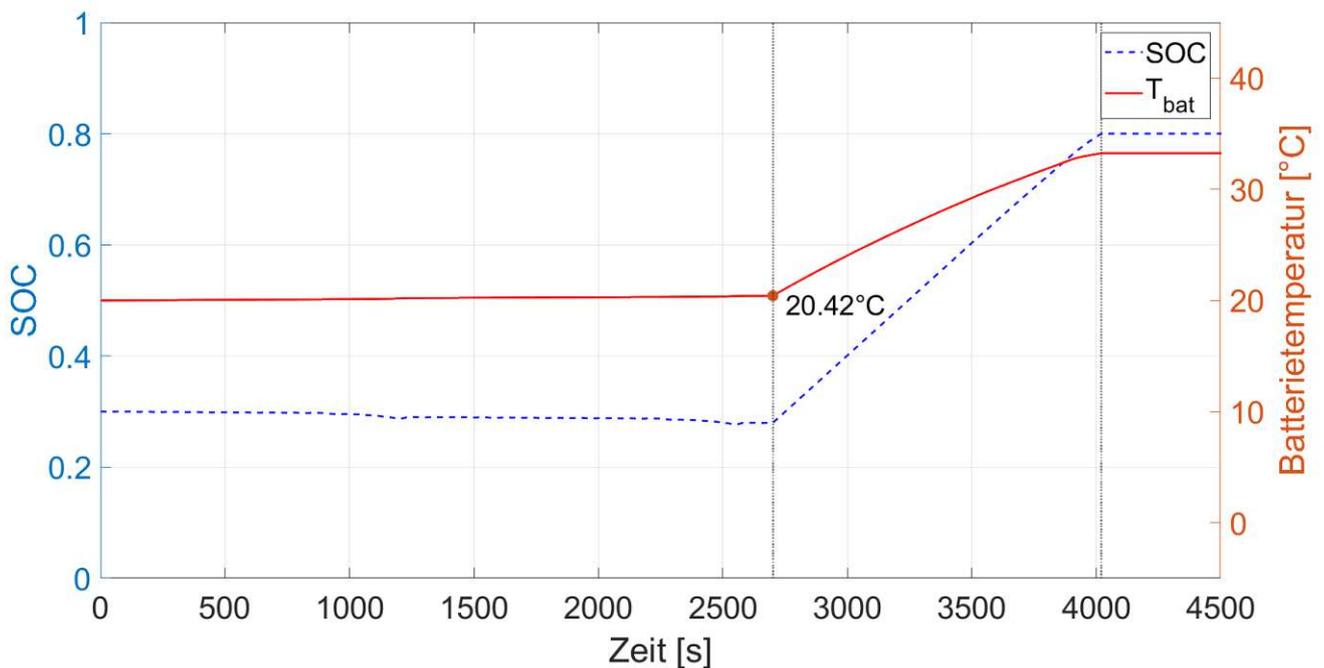


Abbildung 4.16 : Verlauf des SOC und der Batterietemperatur bei 20°C Umgebungstemperatur

Zu erkennen ist, dass die Batterietemperatur aufgrund der Verlustwärme der Batterie während der Fahrt auf 20,42°C leicht erwärmt wird. Zu Ende des Ladezyklus befindet sich die Batterie auch ohne aktive Temperierung knapp unterhalb der maximalen Batterietemperatur von 35°C. Die erzielte Ladedauer beläuft sich auf 1320s.

Auswertung bei Batteriestarttemperatur 30°C

Auch auf diesem Temperaturniveau kann die Batterie ohne Batterietemperierung mit einem maximalen Ladestrom geladen werden. Der maximale Ladestrom kann vom Thermalsystem nicht weiter optimiert werden, da sich dieser temperaturbedingt schon an einem Optimum befindet. Dadurch ist auch dieses Einsatzszenario unabhängig vom Gewichtungsfaktor α , da dieser den Zusammenhang zwischen aufgewendeter Energie zur Batterietemperierung und Ladestrom darstellt.

Dennoch muss die Batterie etwas temperiert werden, um die maximale Batterietemperatur von 35°C nicht zu überschreiten. In Abbildung 4.18 sind die resultierenden Ströme des Fahrzyklus dargestellt.

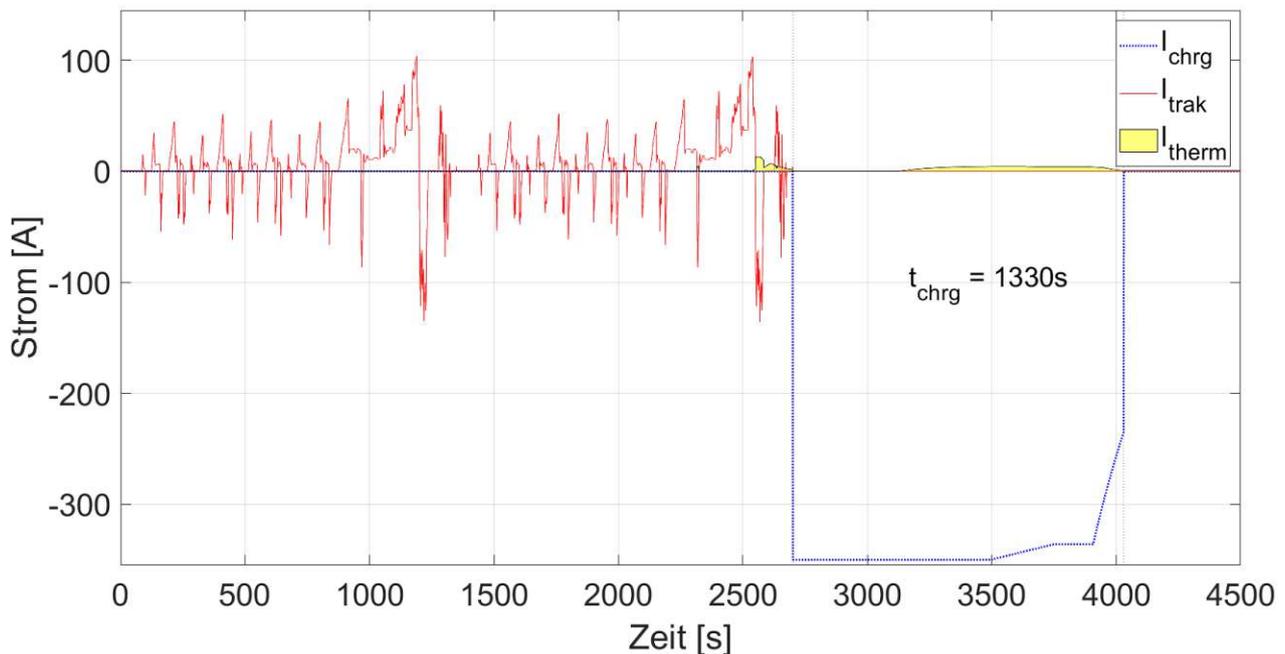


Abbildung 4.18: Ladestrom, Strom für Traktionsanforderungen und Strom des Thermalsystems bei 30°C Umgebungstemperatur

Erkennbar ist, dass schon zu Beginn des Ladezyklus sich der Ladestrom an seinem Optimum von 350A befindet. Der resultierende Temperaturverlauf der Batterie sowie der SOC sind in Abbildung 4.19 ersichtlich.

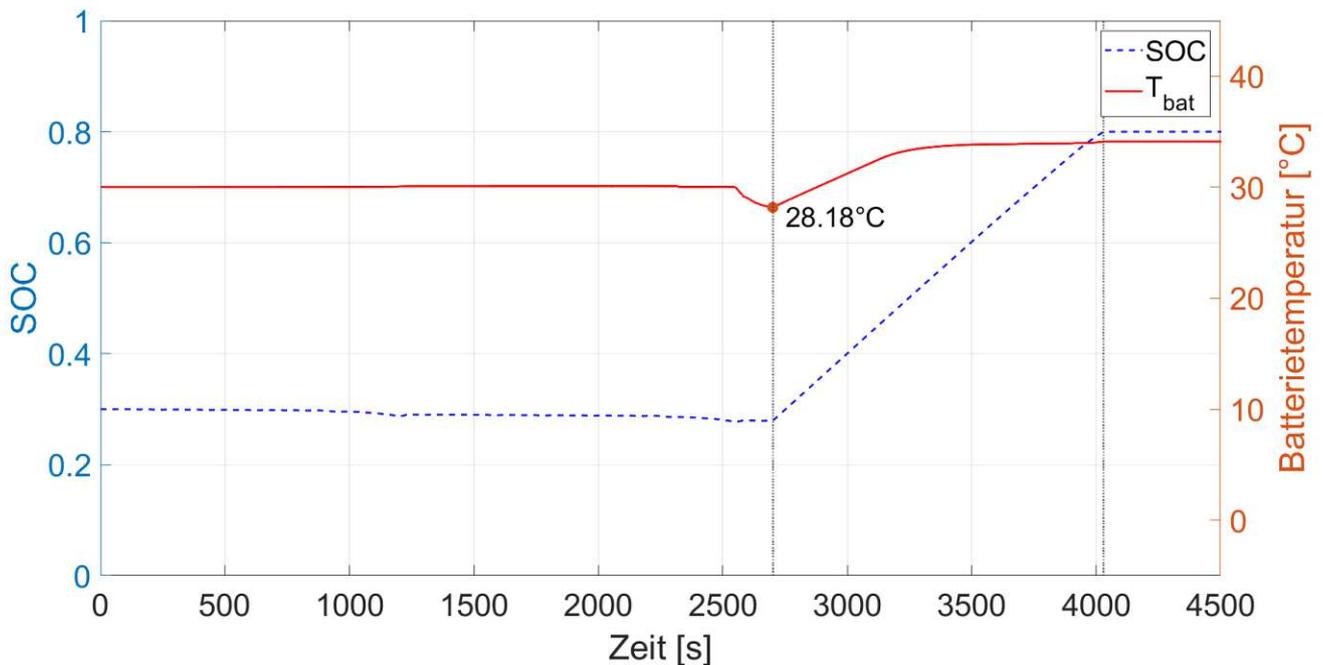


Abbildung 4.19: Verlauf des SOC's und der Batterietemperatur bei 30°C Umgebungstemperatur

Um die maximale Batterietemperatur nicht zu überschreiten, wird die Batterie vom Thermalsystem auf eine Temperatur von 28,2°C vorgekühlt. Zusätzlich wird die Batterie während des Ladevorgangs gekühlt. Eine Ladedauer von 1330s resultiert.

Auswertung bei Batteriestarttemperatur 35°C

Ähnlich wie bei der Auswertung bei einer Batteriestarttemperatur von 30°C, ist auch dieses Einsatzszenario bei 35°C temperaturbedingt unabhängig vom Gewichtungsfaktor. Dennoch muss die Batterie gekühlt werden, um die maximale Batterietemperatur nicht zu überschreiten. In Abbildung 4.20 sind wiederum die Ströme des Fahrzyklus dargestellt.

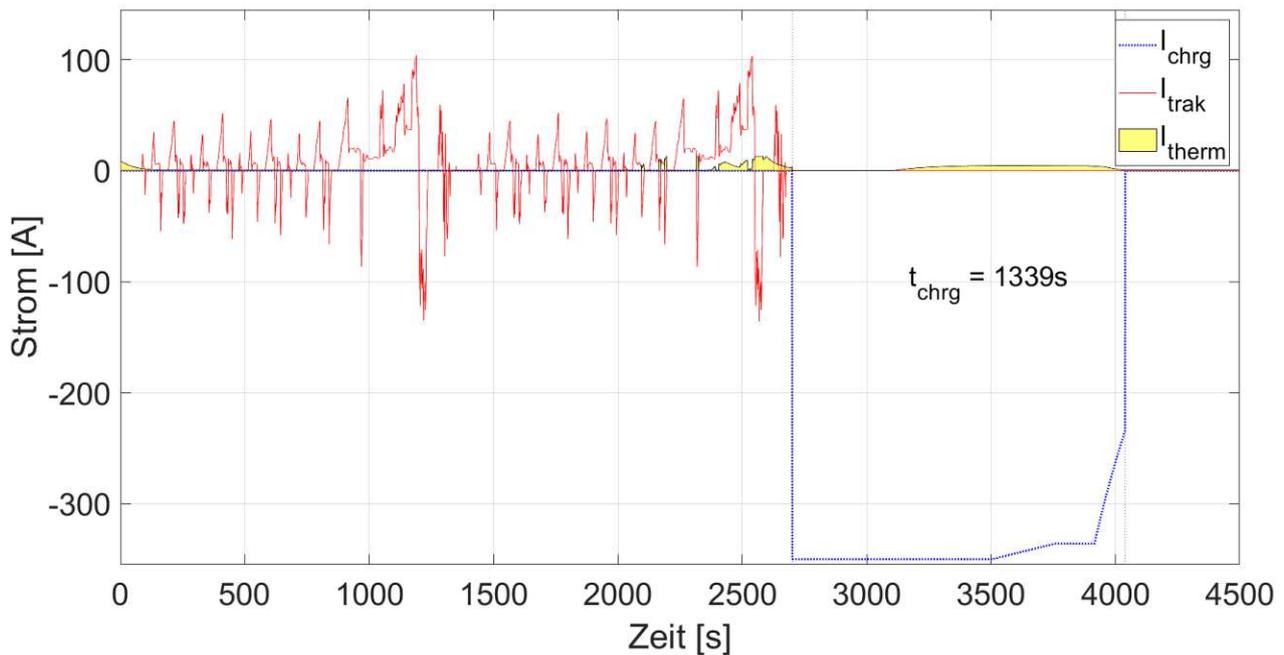


Abbildung 4.20: Ladestrom, Strom für Traktionsanforderungen und Strom des Thermalsystems bei 35°C Umgebungstemperatur

Wie bei den Auswertungen zuvor (20°C, 30°C) befindet sich auch hier der Ladestrom schon zu Beginn an einem temperaturbedingten Optimum, d.h. der Verlauf des Ladestroms ist bei allen drei Auswertungen fast ident. In Abbildung 4.21 ist wiederum der Verlauf der Batterietemperatur und des SOC's abgebildet.

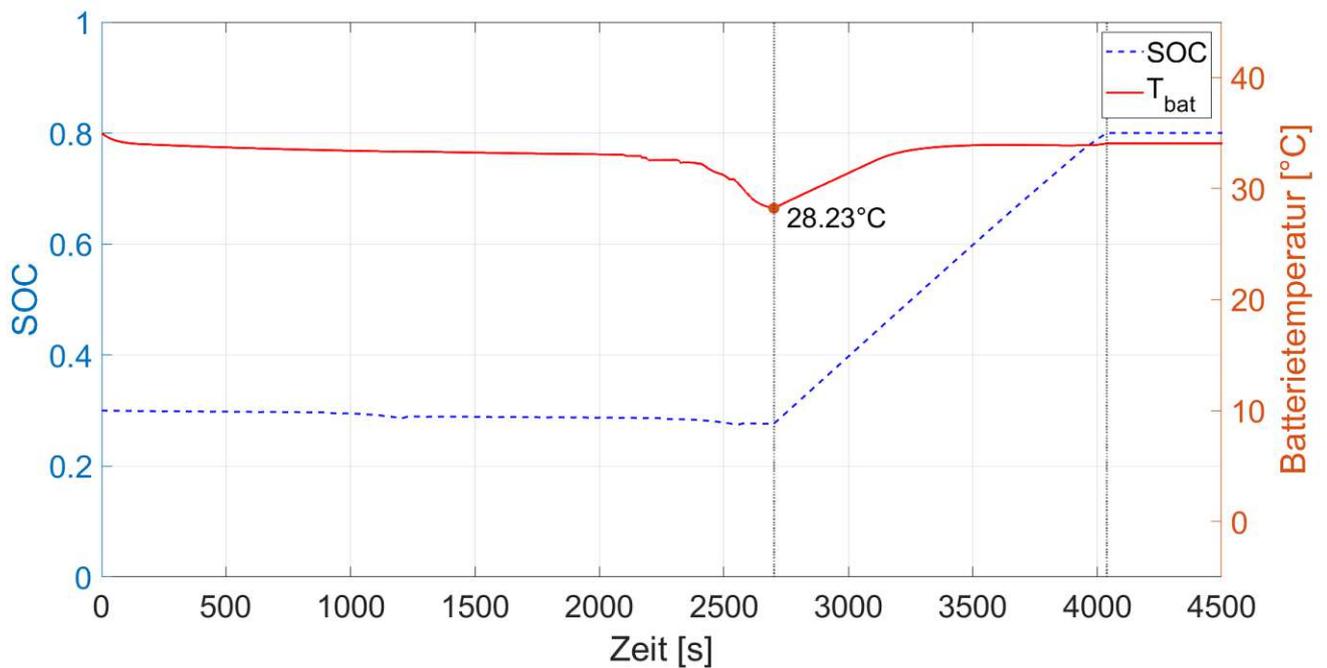


Abbildung 4.21: Verlauf des SOC's und der Batterietemperatur bei 35°C Umgebungstemperatur

Auch hier ist zu erkennen, dass die Batterie kurz vor Ladebeginn vorgekühlt und während des Ladezyklus auf einer Temperatur knapp unter der Maximaltemperatur von 35°C gehalten wird. Eine Temperatur von 28,2°C zu Ladebeginn bei einer Ladedauer von 1339s werden erreicht.

4.2 Adaptive Kabinentemperaturregelung

Zielsetzung

In diesem Einsatzszenario wird die Kabinentemperatur auf eine gewisse Set-Temperatur eingestellt. Diese kann vom Thermalmanagement jedoch über- oder unterschritten werden. Dadurch ergibt sich ein gewisser Toleranzbereich, in dem sich die Kabinentemperatur bewegen kann. Ziel ist es, zu untersuchen, ob durch diese flexible Temperaturregelung Energie für die Kabinentemperierung eingespart werden kann. Weiters soll untersucht werden, ob durch eine zeitliche Verschiebung des Stromes für die Kabinentemperierung Batterieverluste durch Vermeiden von Stromspitzen verringert werden können.

Anforderungen

- **Adaptive Kabinentemperierung:** Die vom Fahrzeuglenker gewählte Set-Temperatur (z.B. 22°C) kann über- oder unterschritten werden. Eine höhere Schwankung der Kabinentemperatur bringt einen größeren Spielraum für potenzielle Energieersparnis mit sich. Dieses Verhältnis zwischen Schwankung und Energieersparnis soll über einen Gewichtungsfaktor einstellbar sein.

Problemformulierung

Die Fahrerkabine wird mittels zwei Temperaturen, der Kabinen- und der Karosserietemperatur, modelliert. Daraus ergeben sich die zwei Zustandsvektoren x_1 und x_2 :

$$x_1 = T_{kab} \quad (4.5)$$

$$x_2 = T_{kar} \quad (4.6)$$

Der benötigte Wärmefluss für die Kabinentemperierung wird über die elektrische Leistung des Thermalmanagementsystems bereitgestellt. Diese bildet den Steuervektor u_1 .

$$u_1 = P_{kab \text{ therm}} \quad (4.7)$$

Die Kostenfunktion C setzt sich wie folgt zusammen:

$$C = a \cdot \lambda_1 \cdot (I_{bat})^2 + (1 - a) \cdot \lambda_2 \cdot |(T_{kab} - T_{set})| \quad (4.8)$$

Der erste Term der Kostenfunktion beinhaltet den Gesamtbatteriestrom I_{bat} . Dieser setzt sich aus den Strömen des Thermalmanagementsystems für die Kabinentemperierung, der Traktionsleistung und etwaige Ströme von Nebenverbrauchern zusammen. Da der aufgewendete Strom des Thermalmanagementsystems ein Teil des Gesamtstromes ist, wird dadurch die aufgewendete Leistung zur Kabinentemperierung berücksichtigt. Durch Quadrieren des Gesamtstromes werden schließlich die Batterieverluste beschrieben.

Der zweite Term beschreibt die Abweichung zwischen der Set-Temperatur und der momentanen Kabinentemperatur. Wiederum können die zwei Terme über den Gewichtungsfaktor a entsprechend gewichtet werden. Die Schwankung der Kabinentemperatur wird im späteren Verlauf als die mittlere absolute Abweichung (MAD) zwischen Kabinentemperatur und Set-Temperatur angegeben. Nach folgender Formel wird die Schwankung berechnet:

$$MAD_{T_{kab}} = \frac{1}{N} \cdot \sum (|T_{kab} - T_{set}|) \quad (4.9)$$

Auswertung der Ergebnisse

Ein gewisser Toleranzbereich ermöglicht es dem Fahrzeug die Kabinentemperatur zu günstigen Zeitpunkten aktiv zu erhöhen, um in Endeffekt Energie für die Kabinentemperierung einzusparen. Weiters wird der aufgewendete Strom vom Thermalmanagementsystem zu lastarmen Zeitpunkten verschoben, um Stromspitzen abzuflachen und folglich Batterieverluste zu verringern. Diese zwei Betriebsstrategien bringen erwartungsgemäß eine Schwankung der Kabinentemperatur mit sich. Wird eine große Schwankung in Kauf genommen, kann mehr Energie bzw. Batterieverluste eingespart werden. Je strikter die Kabinentemperatur an die gewählte Set-Temperatur gebunden wird, desto geringer sind die Ersparnisse. Schließlich liegt es am Befinden des Fahrzeuglenkers, was für eine Schwankung für ihn behaglich ist.

Eine Auswertung erfolgt bei niedrigen (0°C), sowie hohen Umgebungstemperaturen (35°C) mit veränderlichen Gewichtungsfaktoren eines 33-minütigen (2000s) NEFZ- und teilhaften WLTP-Fahrzyklus, dargestellt in Abbildung 3.2. Zuerst erfolgt die Auswertung der Ergebnisse bei niedrigen Umgebungstemperaturen, anschließend folgen die Ergebnisse bei hohen Temperaturen.

Ergebnisse bei Umgebungstemperatur $T_{amb} = 0^{\circ}\text{C}$

In Abbildung 4.22 sind die Ströme und der Verlauf der Kabinentemperatur für einen Fahrzyklus bei 0°C Umgebungstemperatur und einem Gewichtungsfaktor von 0,2 dargestellt. Ein niedriger Gewichtungsfaktor bewirkt, dass die Kabinentemperatur eng an die gewählte Set-Temperatur gebunden ist.

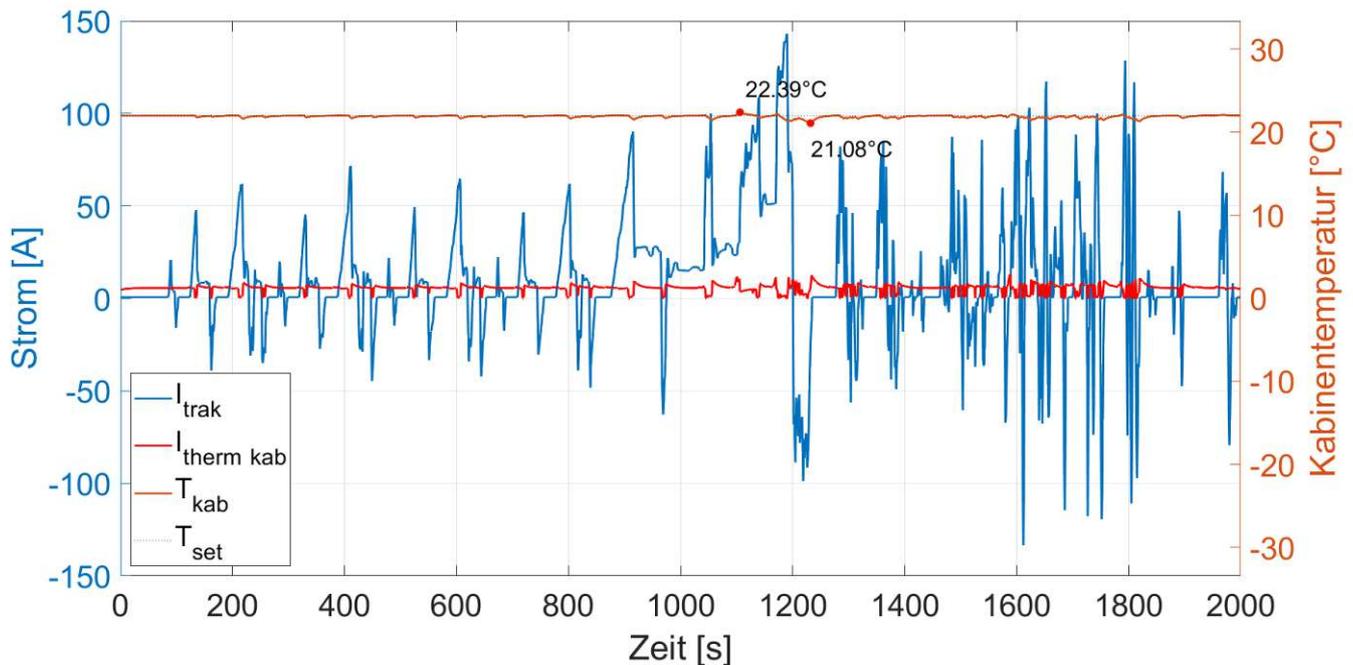


Abbildung 4.22: Strom für Traktionsanforderungen, Strom des Thermalsystems zur Kabinentemperierung und Verlauf der Kabinentemperatur bei einer Set-Temperatur von 22°C , Gewichtungsfaktor 0,2 und Umgebungstemperatur von 0°C

Die minimale und die maximale Kabinentemperatur sind mit einem roten Punkt markiert. Die durchschnittliche Kabinentemperatur beträgt $21,89^{\circ}\text{C}$ bei einer MAD von $0,12^{\circ}\text{C}$. Für den gesamten Fahrzyklus wurde für die Kabinentemperierung eine Energie von $1,323\text{ kWh}$ aufgewendet, die Batterieverluste belaufen sich auf $0,0472\text{ kWh}$.

Zu erkennen ist, dass der Verlauf des Stroms des Thermalsystems ($I_{\text{therm kab}}$) relativ konstant ist, nur bei Stromspitzen des Traktionsstroms (I_{trak}) wird der Strom des Thermalmanagementsystems reduziert.

Wird der Gewichtungsfaktor erhöht, nimmt die Schwankung der Kabinentemperatur entsprechend zu. In Abbildung 4.23 ist der gleiche Fahrzyklus mit einem Gewichtungsfaktor von 0,8 ersichtlich.

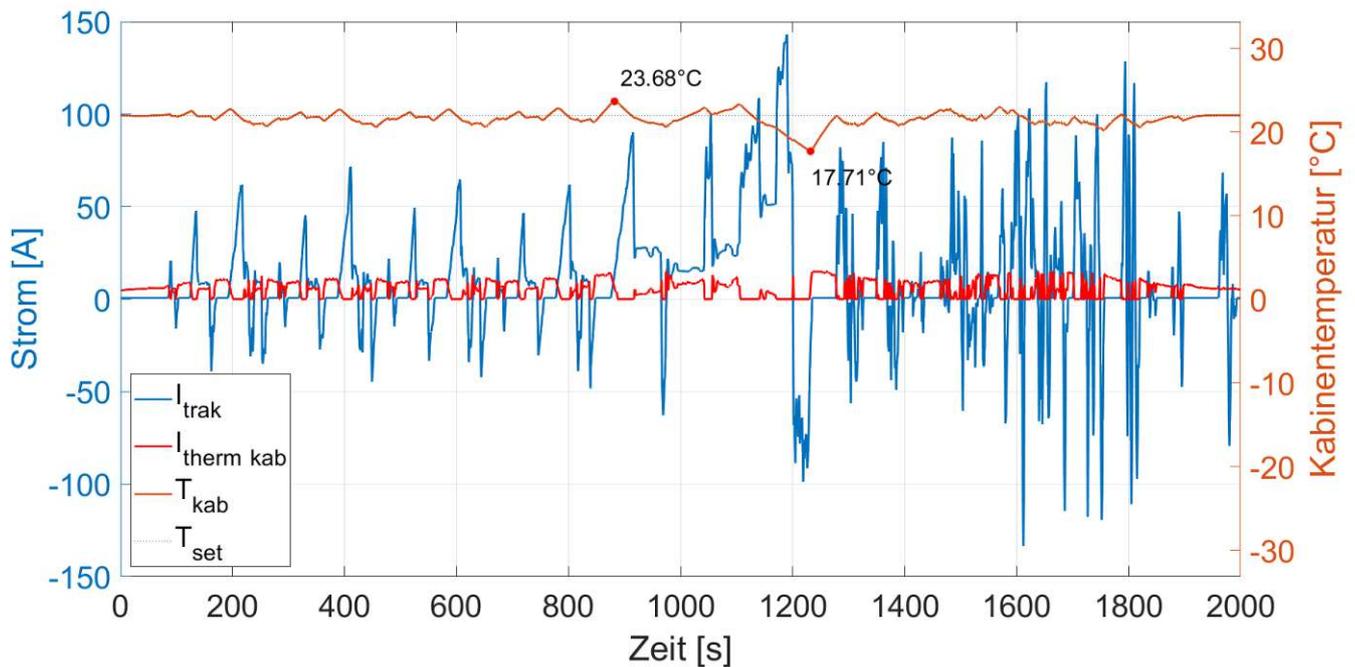


Abbildung 4.23: Strom für Traktionsanforderungen, Strom des Thermalmanagementsystems zur Kabinentemperierung und Verlauf der Kabinentemperatur bei einer Set-Temperatur von 22°C, Gewichtungsfaktor 0,8 und Umgebungstemperatur von 0°C

Erkennbar ist, dass die Schwankung der Kabinentemperatur wie zu erwarten stark zugenommen hat. Folglich verhält sich auch der Strom des Thermalmanagementsystems ($I_{\text{therm kab}}$) dynamischer. Dieser wird verstärkt zu lastarmen Zeitpunkten verschoben. Allerdings allgemein mit einer höheren Stromstärke, um dennoch die benötigte Energie zur Kabinentemperierung zu liefern. Die durchschnittliche Kabinentemperatur beträgt 21,61°C bei einer MAD von 0,62°C. Für die Kabinentemperierung wurde vom Thermalmanagementsystem eine Energie von 1,305 kWh aufgewendet. Die Batterieverluste betragen 0,0447 kWh.

Verglichen mit dem vorherigen Einsatzszenario mit niedrigem Gewichtungsfaktor, nahm die Schwankung der Kabinentemperatur um ein 5-faches zu, jedoch konnten die Batterieverluste 2,5 Wh gesenkt werden. Weiters wurde die aufgewendete Energie zur Kabinentemperierung um 18 Wh verringert, was jedoch weitgehendst auf die geringere Durchschnittstemperatur der Kabine zurückzuführen ist.

Der Zielkonflikt zwischen Temperaturabweichung der Kabinentemperatur ($MAD_{T_{\text{kab}}}$) und den Batterieverlusten kann durch Variieren des Gewichtungsfaktor in einer Pareto-Front veranschaulicht werden. In Abbildung 4.25 ist dieses Verhältnis dargestellt.

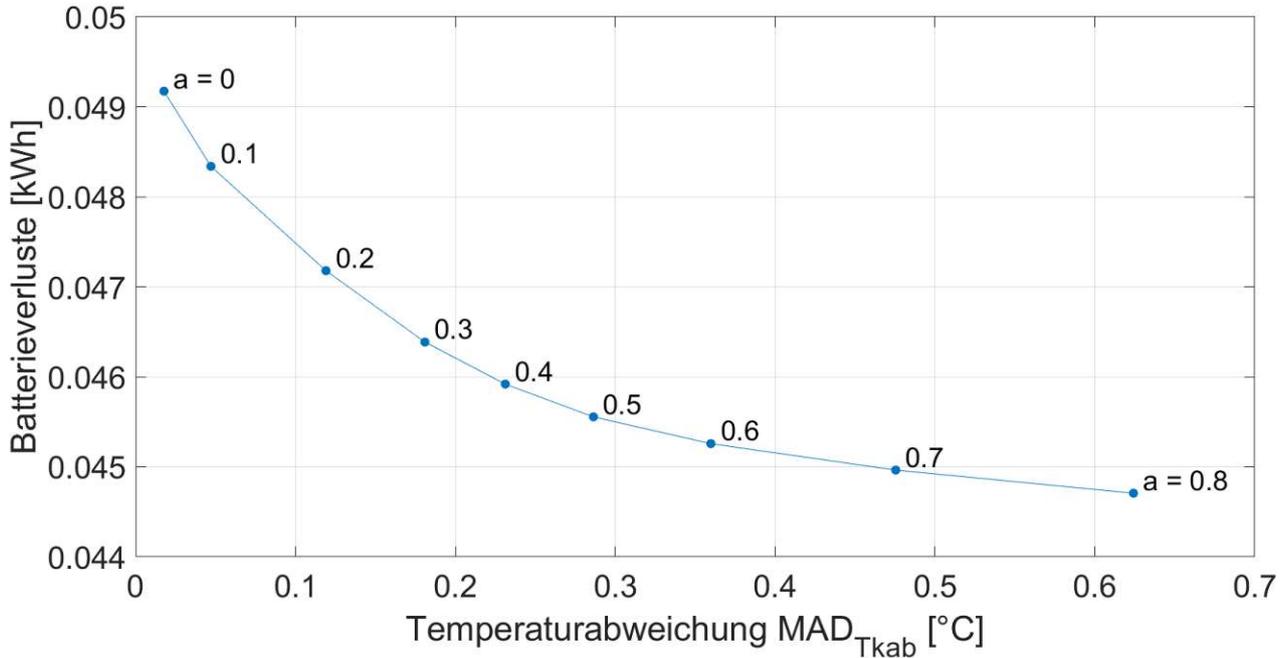


Abbildung 4.25: Pareto-Front der Batterieverluste und der mittleren absoluten Temperaturabweichung ($MAD_{T_{kab}}$) bei 0°C Umgebungstemperatur

Die Energieersparnis zur Kabinentemperierung, sowie das Reduzieren von Batterieverlusten trägt positiv zum SOC bei. Wiederum ergibt sich ein ähnlicher Zielkonflikt zwischen der Temperaturschwankung der Kabine und dem SOC. Durch eine hohe Schwankung kann ein erhöhter SOC am Ende des Fahrzyklus erreicht werden. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 4.24 dargestellt.

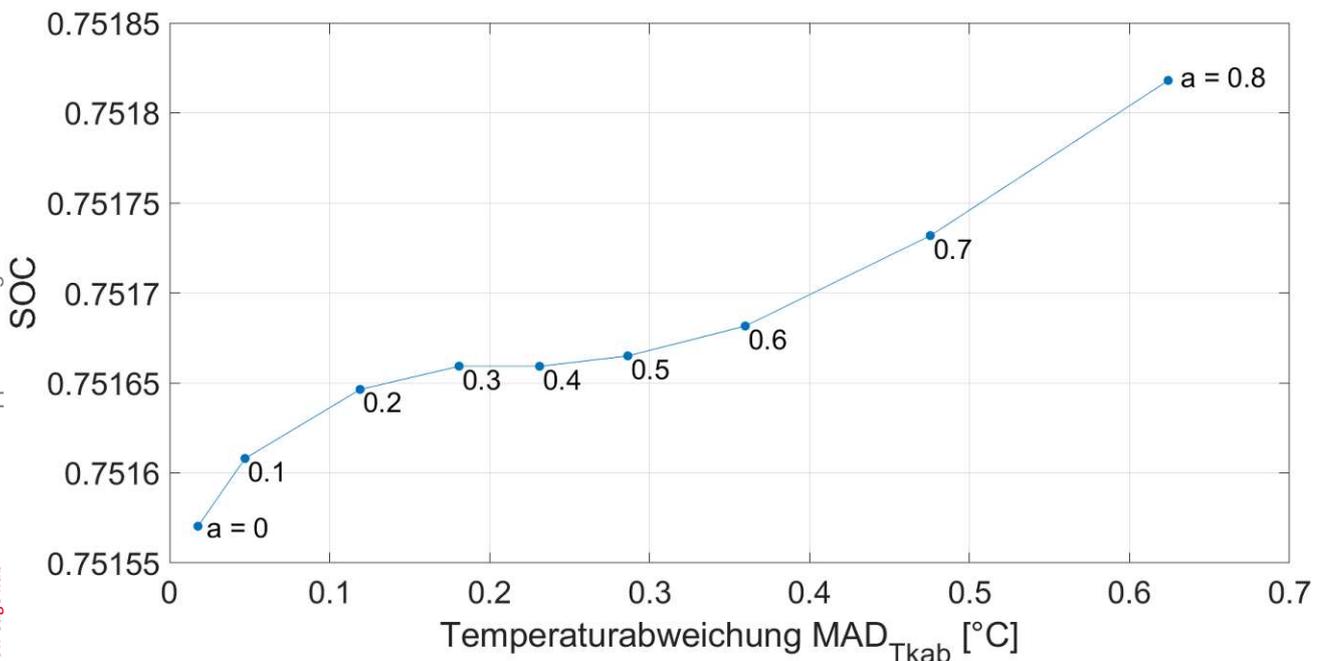


Abbildung 4.24: Verlauf des SOC am Ende des Fahrzyklus in Abhängigkeit der absoluten mittleren Temperaturabweichung ($MAD_{T_{kab}}$) bei 0°C Umgebungstemperatur

Auf den gesamten Fahrzyklus kann der SOC etwas gesteigert werden, eine Verbesserung von 0,033% wurde erzielt. Dies ist jedoch weitestgehend auf die Energieersparnis des Thermalsystems aufgrund der niedrigeren Durchschnittstemperatur der Kabine zurückzuführen, weshalb das Ergebnis vernachlässigbar ist.

Ergebnisse bei Umgebungstemperatur $T_{amb} = 35^{\circ}\text{C}$

Abbildung 4.26 zeigt die relevanten Ströme und den Verlauf der Kabinentemperatur bei einer Umgebungstemperatur von 35°C und einem Gewichtungsfaktor von 0,2. Wiederum bewirkt der niedrige Gewichtungsfaktor, dass die Kabinentemperatur strikt an die Set-Temperatur gebunden ist.

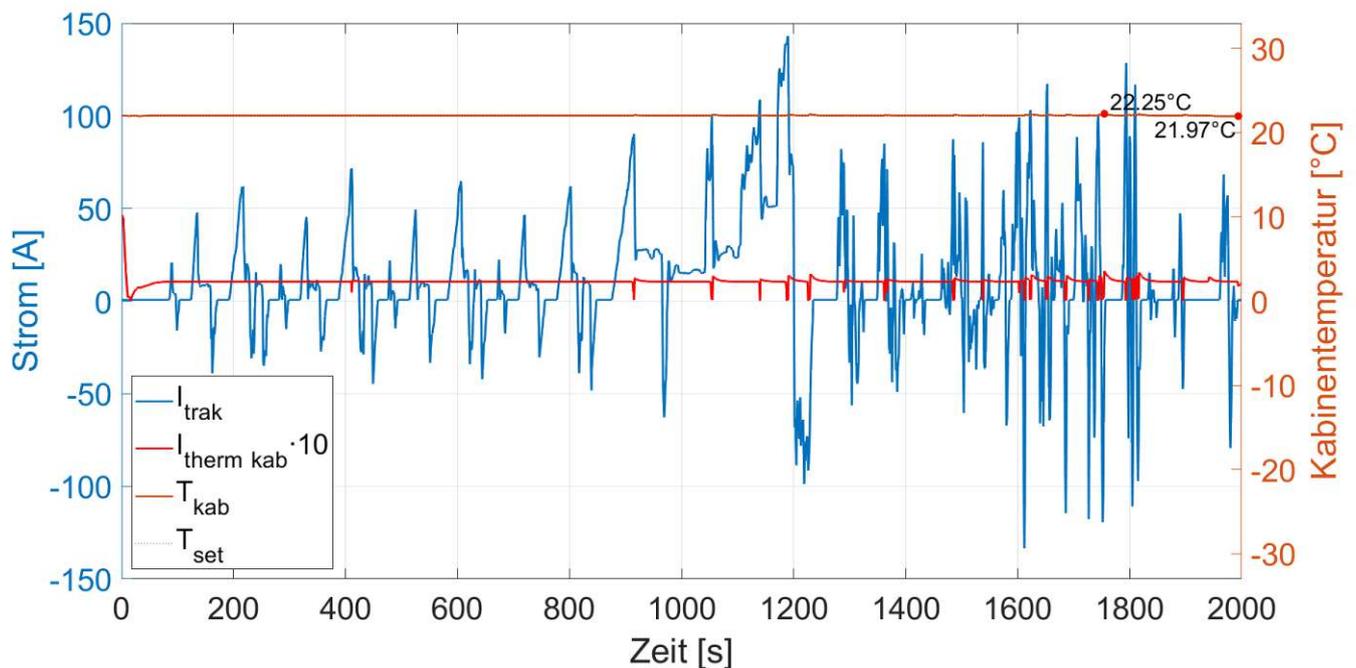


Abbildung 4.26: Strom für Traktionsanforderungen, Strom des Thermalsystems zur Kabinentemperierung $\cdot 10$ und Verlauf der Kabinentemperatur bei einer Set-Temperatur von 22°C , Gewichtungsfaktor 0,2 und Umgebungstemperatur von 35°C

Die durchschnittliche Kabinentemperatur beträgt $22,05^{\circ}\text{C}$ bei einer MAD von $0,05^{\circ}\text{C}$. Die aufgewendete Energie für die Kabinentemperierung beläuft sich auf $0,25\text{ kWh}$, die Batterieverluste betragen $0,0414\text{ kWh}$. Verglichen mit den Ergebnissen bei niedrigen Umgebungstemperaturen, ist die Stromstärke bedeutend niedriger, weshalb diese in dem Diagramm mit einem Faktor 10 dargestellt wird. Zurückzuführen ist die niedrige Stromstärke auf den besseren Wirkungsgrad des Kühlkreislaufs verglichen mit dem Wärmekreislauf basierend auf PTC-Heizer. Weiters ist die Temperaturdifferenz zwischen Kabine und Umgebung niedriger, wodurch ein geringerer Leistungsbedarf zum Temperieren der Kabine besteht.

Bei einem höheren Gewichtungsfaktor nimmt die Schwankung der Kabinentemperatur entsprechend zu. In Abbildung 4.27 sind erneut die Ströme und der Verlauf der Kabinentemperatur abgebildet. Die Umgebungstemperatur beträgt wiederum 35°C , der Gewichtungsfaktor wurde auf 0,8 gesetzt.

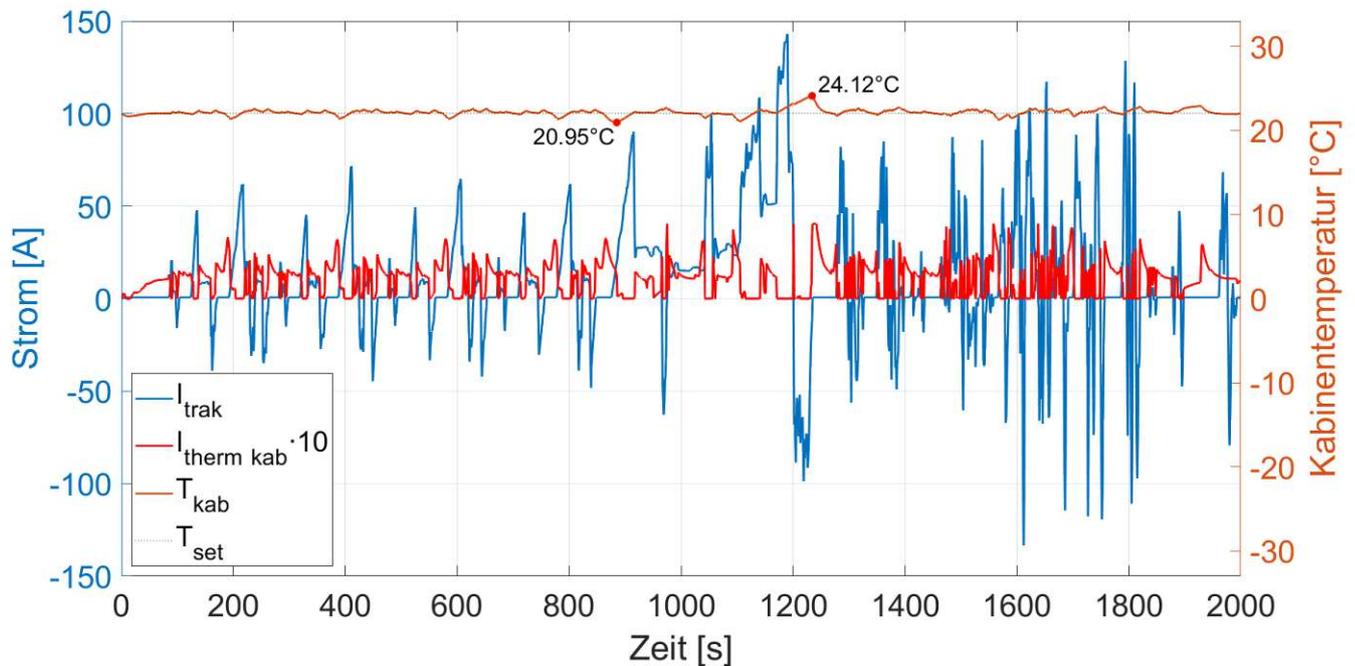


Abbildung 4.27: Strom für Traktionsanforderungen, Strom des Thermalmanagementsystems zur Kabinentemperierung $\cdot 10$ und Verlauf der Kabinentemperatur bei einer Set-Temperatur von 22°C , Gewichtungsfaktor 0,8 und Umgebungstemperatur von 35°C

Erneut wird der Strom des Thermalmanagementsystems zur Kabinentemperierung mit einem Faktor 10 dargestellt. Wie zuvor ist eine geringere Stromstärke, verglichen mit den Ergebnissen bei niedrigen Temperaturen, zu erkennen. Dennoch verhält sich der Strom bei einem höheren Gewichtungsfaktor ähnlich dynamisch, was folglich eine größere Schwankung der Kabinentemperatur mit sich bringt. Die MAD der Kabinentemperatur beträgt $0,29^{\circ}\text{C}$ bei einer durchschnittlichen Kabinentemperatur von $22,16^{\circ}\text{C}$. Der Energieaufwand des Thermalmanagementsystems zur Kabinentemperierung beträgt $0,2461 \text{ kWh}$. Die Batterieverluste betragen $0,0406 \text{ kWh}$.

Verglichen mit dem vorherigen Einsatzszenario mit niedrigem Gewichtungsfaktor nahm die Schwankung der Kabinentemperatur um ein 6-faches zu. Die Batterieverluste konnten dadurch um $0,8 \text{ Wh}$ gesenkt werden. Der Energieaufwand des Thermalmanagementsystems konnte um $3,9 \text{ Wh}$ verringert werden. Wiederum kann der verringerte Energieaufwand des Thermalmanagementsystems auf den geringeren Temperaturunterschied zwischen durchschnittlicher Kabinentemperatur und Umgebungstemperatur bei hohem Gewichtungsfaktor zurückgeführt werden.

Analog zu der vorherigen Auswertung bei niedrigen Temperaturen kann der Zielkonflikt zwischen Kabinentemperaturschwankung ($MAD_{T_{kab}}$) und Batterieverlusten in einer Pareto-Front dargestellt werden (Abbildung 4.28).

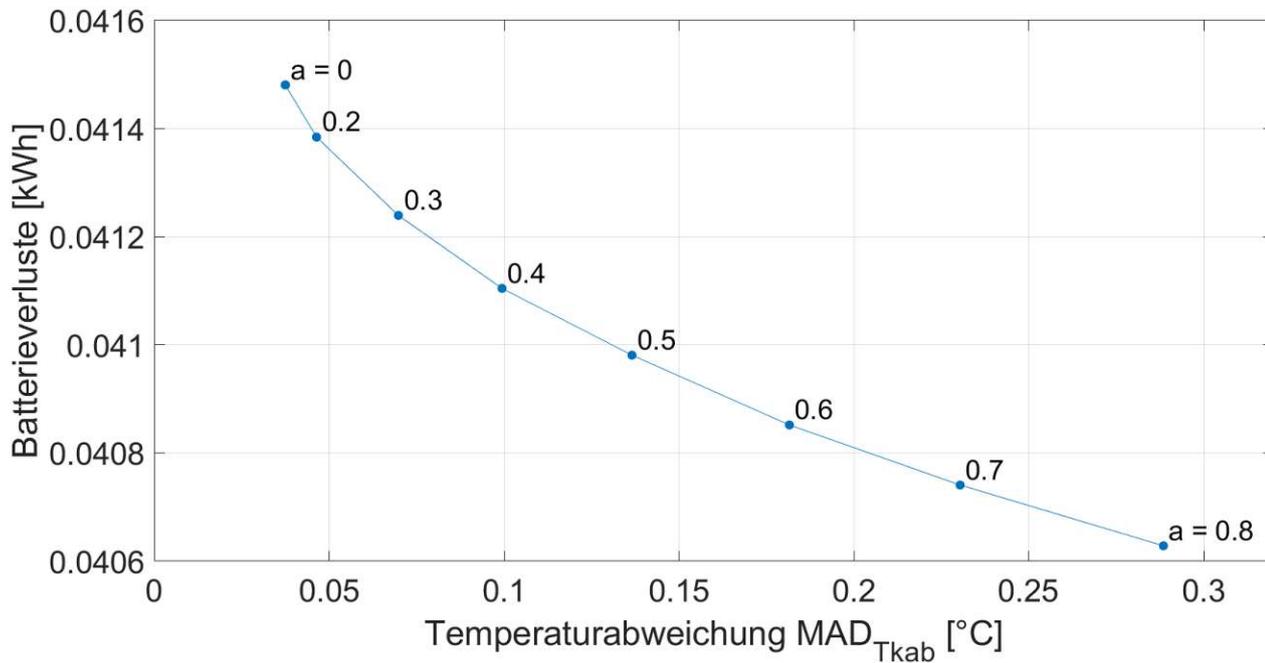


Abbildung 4.28: Pareto-Front der Batterieverluste und der mittleren absoluten Temperaturabweichung ($MAD_{T_{kab}}$) bei 35°C Umgebungstemperatur

Zu erkennen ist, dass mit steigender Temperaturabweichung die Batterieverluste verringert werden können. Ab einem Gewichtungsfaktor von 0,8 nehmen die Schwankungen stark zu, weshalb diese bei der Auswertung nicht betrachtet werden.

Durch das Verringern von Batterieverlusten sowie dem geringeren Energieaufwand zur Kabinentemperierung wird der SOC gesteigert. Der Zusammenhang zwischen SOC am Ende des Fahrzyklus und Schwankung der Kabinentemperatur ($MAD_{T_{kab}}$) ist in Abbildung 4.29 in einer Pareto-Front dargestellt.

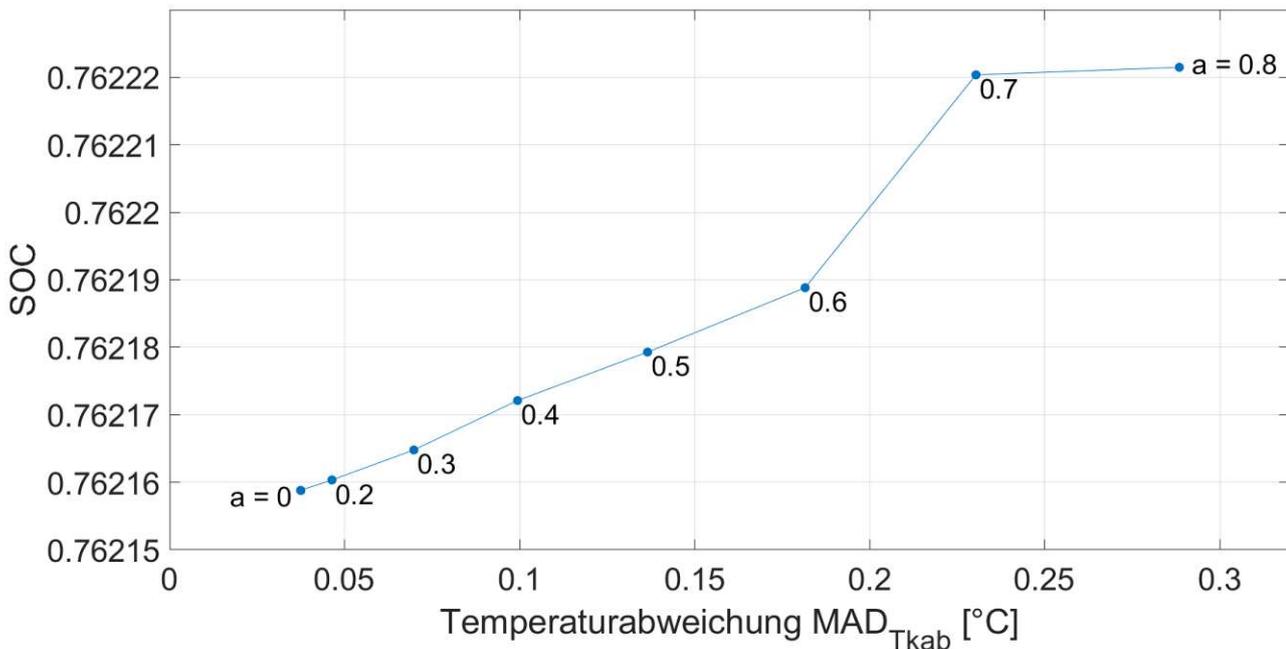


Abbildung 4.29: Verlauf des SOC's am Ende des Fahrzyklus in Abhängigkeit der absoluten mittleren Temperaturabweichung ($MAD_{T_{kab}}$) bei 35°C Umgebungstemperatur

Durch eine gewisse Schwankung der Kabinentemperatur kann der SOC am Ende des 33-minütigen Fahrzyklus um 0,0082% gesteigert werden, was jedoch aufgrund des geringen Werts vernachlässigbar ist.

4.3 Direkter Einsatz von Rekuperationsleistung zur Batterietemperierung

Zielsetzung

Die maximal rekuperierbare Leistung ist stark von der Batterietemperatur abhängig. Im ersten Teil dieses Einsatzszenarios soll untersucht werden, ob durch ein aktives Temperieren der Batterie die maximal rekuperierbare Leistung derart erhöht werden kann, dass im weiteren Verlauf des Fahrzyklus die aufgewendete Leistung zur Batterietemperierung durch die erhöhte rekuperierte Leistung zurückgewonnen werden kann. Maßgebend ist hierbei der SOC - Ziel ist es, diesen am Ende des Fahrzyklus zu maximieren.

Durch einen direkten Einsatz der rekuperierten Leistung für Thermalanforderungen können Lade- und Entladevorgänge der Batterie umgangen werden. Dadurch werden Leistungsverluste aufgrund der Wirkungsgradkette der Batterie vermieden. Wird die rekuperierte Leistung jedoch direkt für Thermalzwecke genutzt, wird die Batterie infolgedessen in diesem Zeitraum nicht geladen. Inwiefern sich diese Direktnutzung der rekuperierten Leistung auf den Gesamtenergiehaushalt des Fahrzeuges auswirkt, soll im zweiten Teil des Einsatzszenarios betrachtet werden. Wiederum gilt es den SOC am Ende des Fahrzyklus zu maximieren.

Anforderungen

- **Direkter Einsatz der recuperierten Leistung:** Die recuperierte Leistung kann entweder direkt für Thermalzwecke oder zum Laden der Batterie verwendet werden. Ein Aufsplitten der recuperierten Leistung ist nicht möglich. Ein Aufsplitten würde den Rechenaufwand deutlich vergrößern, was aufgrund von begrenzter Rechenkapazität nicht realisierbar ist.
- **Maximale Rekuperationsleistung für Thermalanforderungen:** Die direkt eingesetzte recuperierte Leistung soll die Maximalleistung der Thermalbauteile nicht überschreiten. Diese liegt bei 6000W. Liegt die recuperierte Leistung über diesem Wert, wird diese automatisch zum Laden der Batterie verwendet.
- **Maximale Batterietemperatur:** Um Alterungseffekte der Batterie zu minimieren, soll eine Batterietemperatur von 35°C nicht überschritten werden.

Problemformulierung

Generell gilt, dass mit einer höheren Batterietemperatur eine höhere maximal aufnehmbare Rekuperationsleistung einher geht. Daraus lässt sich die Frage formulieren, ob es energetisch sinnvoll ist die Batterie aktiv zu Heizen, um in späterer Folge durch die erhöhte Rekuperationsleistung die aufgewendete Heizleistung zurückzugewinnen. Weiters stellt sich die Frage, inwiefern sich ein direkter Einsatz von Rekuperationsleistung zur Batterietemperierung auf den gesamten Energiehaushalt des Fahrzeugs auswirkt.

Die maximal aufnehmbare Rekuperationsleistung ($P_{rek\ max}$) ist speziell bei tiefen Batterietemperaturen stark begrenzt [12]. Allgemein ist diese abhängig von der Batterietemperatur und dem aktuellen SOC der Batterie (Abbildung 3.5). Daraus ergeben sich die zwei Zustandsvektoren des Modells:

$$x_1 = SOC \quad (4.10)$$

$$x_2 = T_{bat} \quad (4.11)$$

Übersteigt die vorhandene Rekuperationsleistung die maximal aufnehmbare, müssen mechanische Bremsen eingesetzt werden, um die Batterie nicht zu beschädigen [3]. Durch aktives Heizen der Batterie kann die Batterietemperatur angehoben werden und dadurch die maximal aufnehmbare Rekuperationsleistung erhöht werden. Daraus ergibt sich der erste Steuervektor u_1 für die Leistung des Thermalmanagement zum Temperieren der Batterie.

$$u_1 = P_{bat\ therm} \quad (4.12)$$

Der Steuervektor u_1 entnimmt die benötigte elektrische Leistung direkt aus der Batterie, wie es bei einem derzeitigen Elektroauto üblich ist. In Abbildung 4.30 ist der schematische Aufbau des ersten Teils des Einsatzszenarios abgebildet.

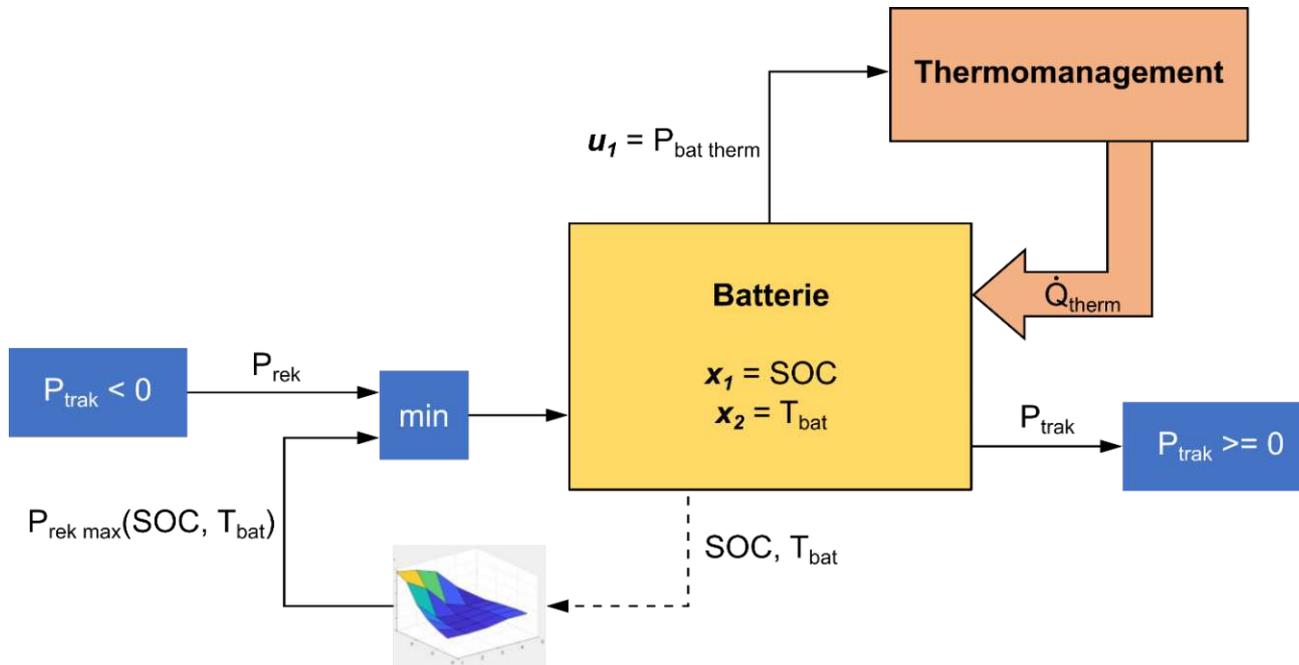


Abbildung 4.30: Aufbau des Szenarios „Direkter Einsatz von Rekuperationsleistung zur Batterietemperierung“ ohne direkten Einsatz der rekuperierten Leistung zur Batterietemperierung

Erweiterung um Entscheidungsvektor u_2 für den direkten Einsatz der rekuperierten Leistung

Nach [4] und [3] sollte die Rekuperationsleistung direkt für Thermalanforderungen oder für die Versorgung von Nebenverbrauchern verwendet werden, damit die nutzbare Leistung nicht über die Wirkungsgradkette der Batterie verringert wird. Für diesen Zweck wird ein zweiter Steuervektor u_2 eingeführt, welcher entscheidet, ob die Rekuperationsleistung zum Laden der Batterie oder direkt für die Batterietemperierung verwendet wird. Ein Aufsplitten der rekuperierten Leistung ist nicht möglich, beim Steuervektor u_2 handelt es sich folglich um einen Entscheidungsvektor.

$$u_2 = 0/1 \quad (4.13)$$

$$0 = P_{rek\ soc} \quad (\text{Laden der Batterie})$$

$$1 = P_{rek\ therm} \quad (\text{Temperieren der Batterie})$$

Mit dieser Erweiterung setzt sich die gesamte elektrische Leistungsanforderung des Thermalmanagementsystems (P_{therm}) an die Batterie aus einer Leistung direkt aus der Batterie ($P_{bat therm} = u_1$) und einer Leistung direkt von der Rekuperationsleistung ($P_{rek therm}$) zusammen. Daraus ergibt sich für die gesamte elektrische Leistung des Thermalmanagementsystems an die Batterie:

$$P_{therm} = P_{bat therm} + P_{rek therm} \quad (4.14)$$

Übersteigt die Rekuperationsleistung die Maximalleistung der Thermalbauteile (6000W) wird die gesamte rekuperierte Leistung automatisch zum Laden der Hochvoltbatterie verwendet ($u_2 = 0 \rightarrow P_{rek} = P_{rek soc}$). Folglich ist $P_{rek therm} = 0$, also kann in diesem Fall die Batterie nur mit Leistung direkt aus der Batterie temperiert werden ($P_{bat therm}$). Das erweiterte Modell ist in Abbildung 4.31 abgebildet:

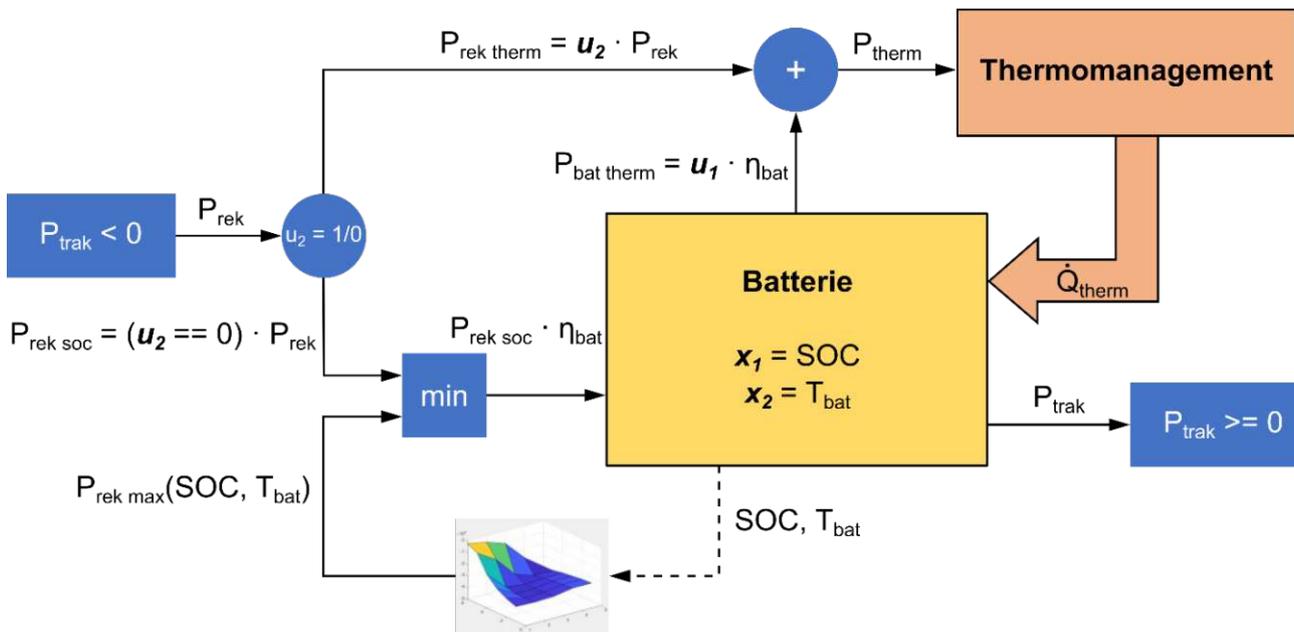


Abbildung 4.31: Aufbau des Szenarios „Direkter Einsatz von Rekuperationsleistung zur Batterietemperierung“ mit der Erweiterung um Entscheidungsvektor u_2 für den direkten Einsatz der rekuperierten Leistung zur Batterietemperierung

Der energetisch günstigste Betriebsfall kann über den SOC ermittelt werden. Dieser bildet die aufgenommene und die entnommene Energie der Batterie ab. Nach folgender Formel kann der SOC berechnet werden:

$$SOC_{n+1} = SOC_n - \left(\frac{I_{trak} + I_{bat therm}}{\eta_{bat}} - I_{rek soc} \cdot \eta_{bat} \right) \cdot \frac{1}{C_0 \cdot 3600} \quad (4.15)$$

Wobei der Batteriewirkungsgrad η_{bat} bei Lade- bzw. Entladevorgängen der Batterie berücksichtigt wurde. Durch einen direkten Einsatz der rekuperierten Leistung (bei $u_2 = 1 \rightarrow P_{rek} = P_{rek\ therm}$) kann der Batteriewirkungsgrad umgangen werden. Der resultierende direkt eingesetzte Strom $I_{rek\ therm}$ beeinflusst somit den SOC nicht, weshalb dieser auch bei der Berechnung des SOC (Gleichung 4.15) nicht vorhanden ist. Aus dem SOC kann schließlich die Kostenfunktion C abgeleitet werden:

$$C = \begin{cases} -SOC, & T_{bat} < 35 \\ -SOC + 1, & T_{bat} \geq 35 \end{cases} \quad (4.16)$$

Der erste Term bildet den negativen SOC ab. Da die Kosten stets minimiert werden, wird dadurch der SOC maximiert. Ein Überschreiten der Batterietemperatur von 35°C (Fall 2) bringt einen zusätzlichen Kostenfaktor mit sich.

Auswertung der Ergebnisse

Im ersten Zuge der Auswertung wird das Einsatzszenario **ohne** den direkten Einsatz der Rekuperationsleistung betrachtet, dargestellt in Abbildung 4.30. Darauf folgend wird das erweiterte Modell mit dem direkten Einsatz der Rekuperationsleistung (Abbildung 4.31) ausgewertet und beide Ergebnisse verglichen.

Für die Auswertung der Einsatzszenarien wurde ein Fahrprofil erstellt, welches mehrere Bergab- und -auffahrten simuliert. Dadurch steht, im Vergleich zu einem genormten Fahrzyklus, welcher meist aus einer Autobahn- oder Stadtfahrt besteht, eine große Menge an rekuperierbarer Leistung zur Verfügung. Für das Fahrprofil wurde mittels Google Earth das Höhenprofil zwischen Damüls und Au in Vorarlberg ermittelt. Aus dem Höhenprofil wurde über einen PID-Regler und der Wahl einer konstanten Zielgeschwindigkeit ein realistisches Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprofil eines menschlichen Fahrers nachgeahmt. Zur Auswertung wurden drei Bergabfahrten und zwei Bergauffahrten aneinandergehängt. Daraus ergibt sich ein Fahrzyklus mit einer Dauer von 46 Minuten. Das Höhenprofil ist in Abbildung 4.32 ersichtlich.

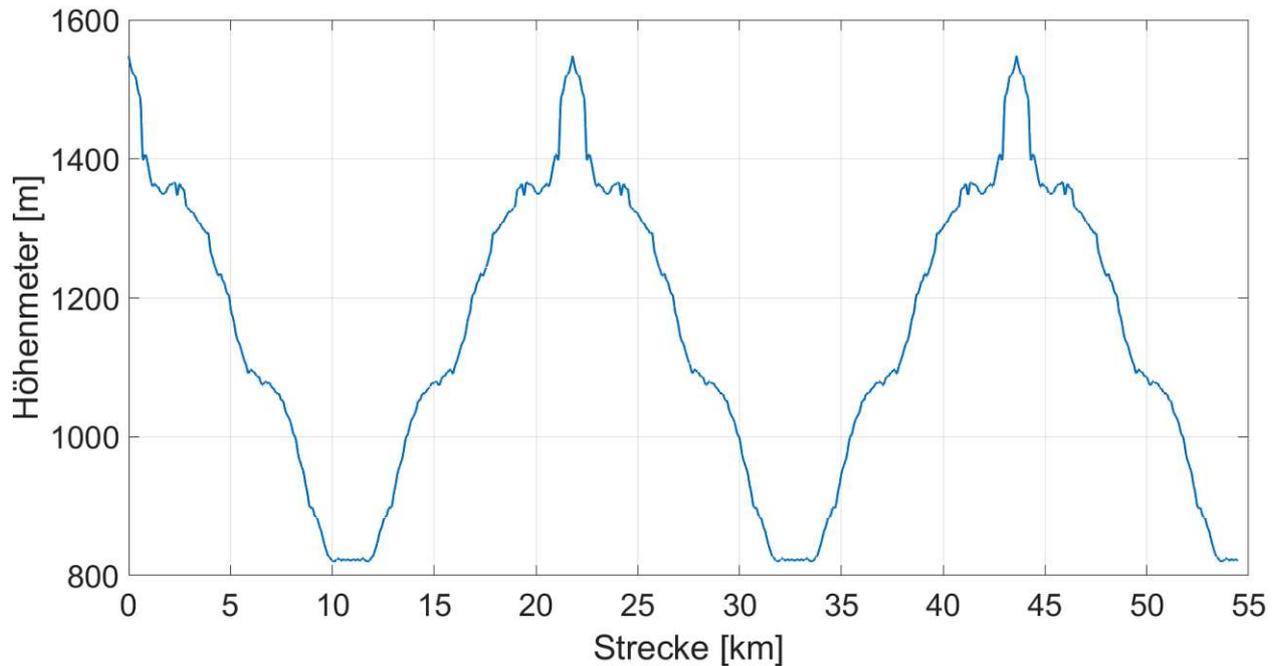


Abbildung 4.32: Höhenprofil des verwendeten Fahrzyklus

Auswertung ohne Erweiterung zum direkten Einsatz der rekuperierten Leistung

Ohne die Erweiterung des Entscheidungsvektors u_2 für den Direkteinsatz der Rekuperationsleistung für Thermalzwecke wird der rekuperierte Strom in allen Situationen zum Laden der Batterie verwendet. Das bedeutet, dass der zweite Steuervektor u_2 während des gesamten Fahrzyklus auf 0 gesetzt ist. Der SOC stellt die Zielgröße des Einsatzszenarios dar, diesen gilt es zu maximieren. Wie eingangs erwähnt, kann über die Leistung des Thermalmanagementsystems ($P_{therm} = u_1$) die Batterietemperatur (T_{bat}) gesteuert werden und dadurch die maximal aufnehmbare Rekuperationsleistung (P_{rekmax}) der Batterie. Allerdings wird dadurch Energie aus der Batterie gezogen, was wiederum den SOC negativ beeinflusst. In Abbildung 4.33 ist ein Fahrzyklus mit allen relevanten Strömen bei -10°C Umgebungstemperatur dargestellt.

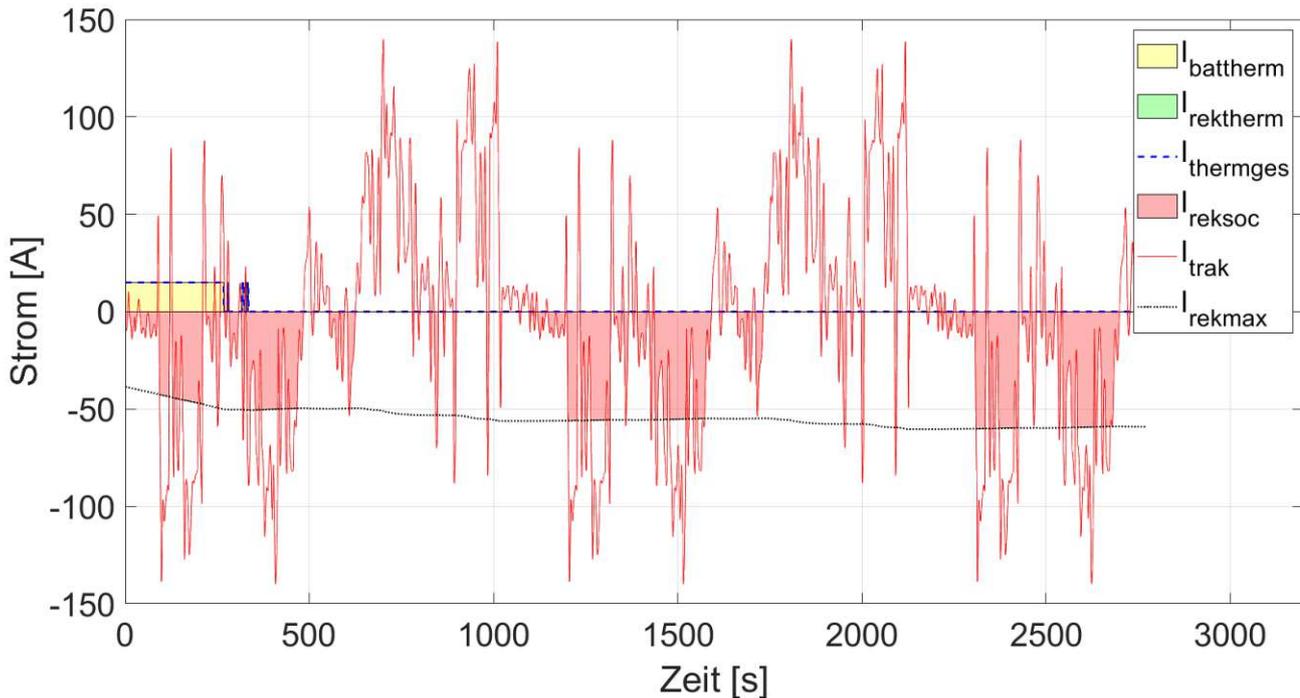


Abbildung 4.33: Verlauf der verschiedenen Ströme mit dem maximal recuperierbaren Strom bei -10°C Umgebungs- und Batteriestarttemperatur ohne Direkteinsatz der recuperierten Leistung

Der Strom I_{trak} spiegelt die aufgebrauchte Leistung der E-Maschinen wider, hier dargestellt als rote Linie. Ist dieser positiv, wird Strom aus der Batterie gezogen. Ist dieser negativ, kann der Strom recuperiert werden.

Der maximal recuperierbare Strom (I_{rekmax}) ist als schwarz gepunktete Linie dargestellt. Dieser stellt die Grenze zum tatsächlich recuperierten Strom (I_{reksoc}) dar. Der tatsächlich recuperierte Strom ist als rote Fläche erkenntlich. Alles unter der schwarz gepunkteten Linie des maximal recuperierbaren Strom (I_{rekmax}) kann nicht recuperiert werden und wird deshalb von den mechanischen Bremsen aufgenommen. Zu erkennen ist, dass ohne direkten Einsatz der Recuperationsleistung der gesamte maximal recuperierbare Strom zum Laden der Batterie verwendet wird.

Der gesamt aufgewendete Strom des Thermalmanagementsystems (I_{therm}) ist als blau gestrichelte Linie dargestellt. Ohne Direkteinsatz der Recuperationsleistung besteht dieser nur aus dem Strom aus der Batterie ($I_{bat\ therm}$ – gelbe Fläche).

Der resultierende SOC und der Verlauf der Batterietemperatur sind in Abbildung 4.34 dargestellt.

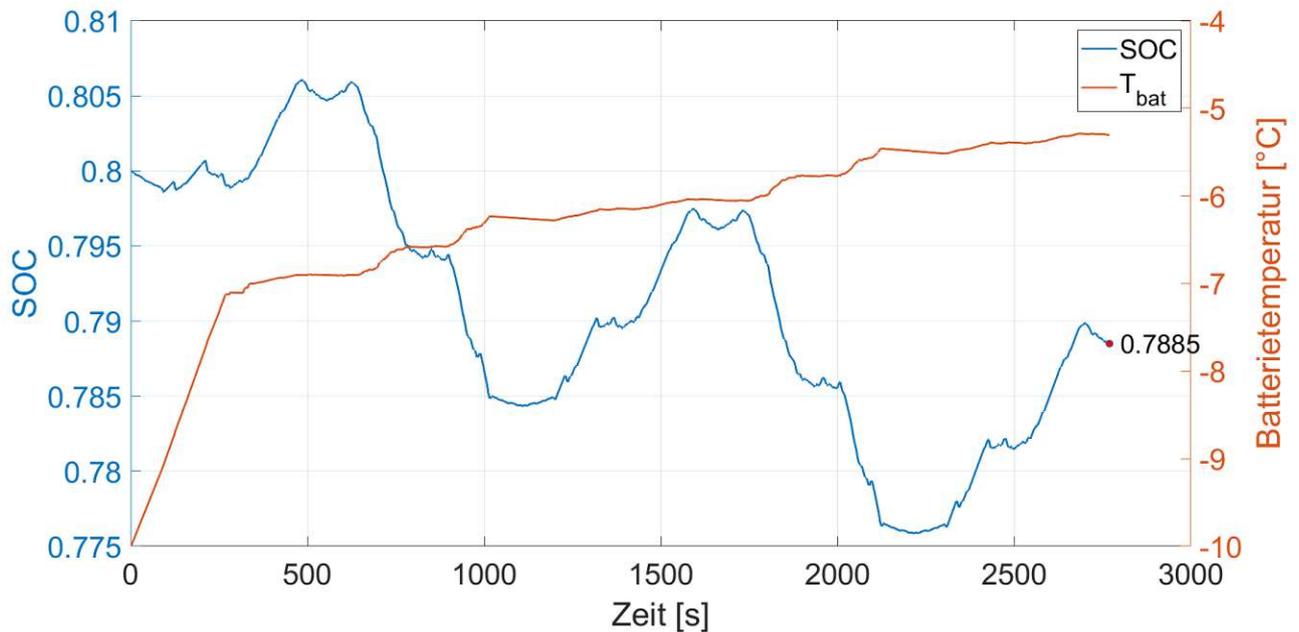


Abbildung 4.34: Verlauf des SOC und der Batterietemperatur ohne Direkteinsatz der rekuperierten Leistung bei -10°C Umgebungs- und Batteriestarttemperatur

Erkennbar ist, dass die Batterie zu Beginn stark erwärmt wird, um die maximale Rekuperationsleistung zu erhöhen. Dadurch zeigt sich, dass eine aktive Erwärmung der Batterie vorteilhaft für den Energiehaushalt des Fahrzeuges ist. Am Ende des Fahrzyklus wird ein SOC von 0,7885 erreicht.

Auswertung mit Erweiterung zum direkten Einsatz der rekuperierten Leistung

Durch die Erweiterung des Direkteinsatzes der rekuperierten Leistung kann über einen zweiten Steuervektor u_2 entschieden werden, ob die Rekuperationsleistung zum Laden der Batterie oder direkt für Thermalzwecke verwendet werden soll. Ziel ist es, die Wirkungsgradkette der Batterie zu umgehen, wodurch Energieverluste verringert und schließlich der SOC am Ende des Fahrzyklus gesteigert werden kann.

Die äußeren Parameter wurden gleich gewählt – es wird der gleiche Fahrzyklus bei einer Umgebungstemperatur von -10°C durchlaufen. In Abbildung 4.35 sind die relevanten Ströme des Fahrzyklus mit Direkteinsatz der Rekuperationsleistung erkennbar.

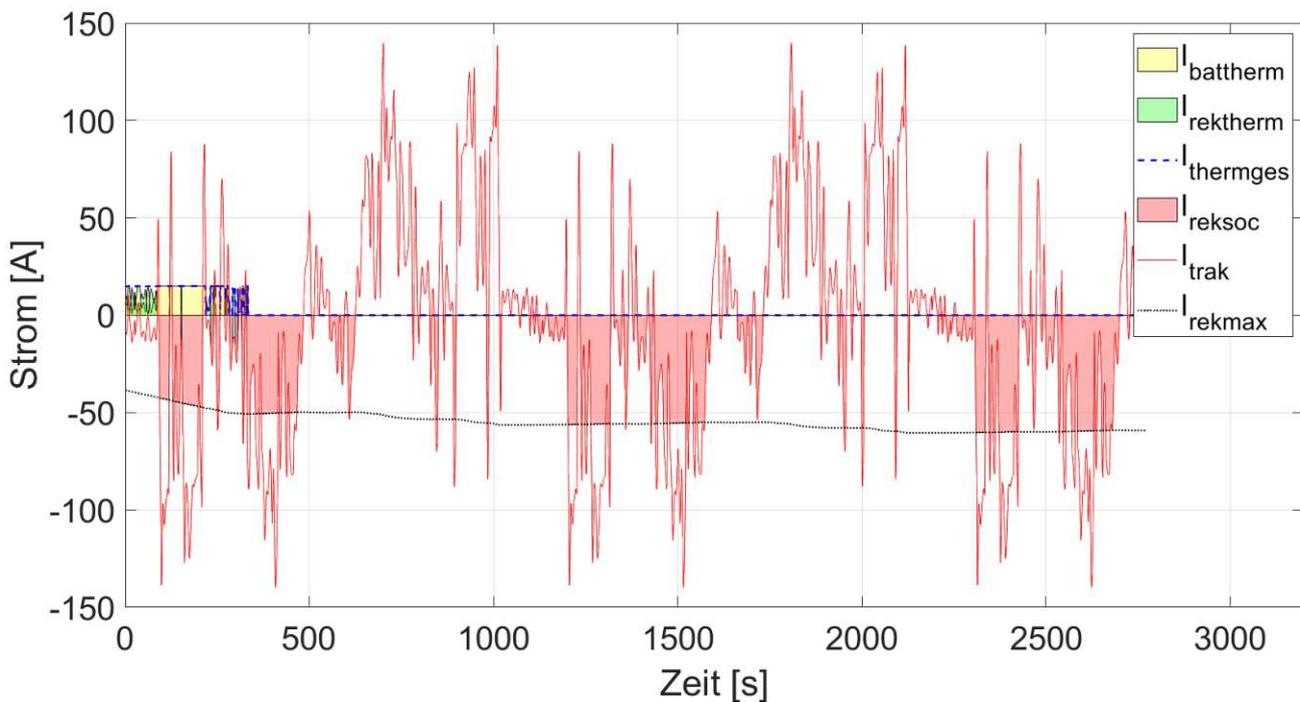


Abbildung 4.35: Verlauf der verschiedenen Ströme mit dem maximal rekuperierbaren Strom bei -10°C Umgebungs- und Batteriestarttemperatur mit Direkteinsatz der rekuperierten Leistung

Wiederum ist zu erkennen, dass die Batterie zu Beginn vom Thermalmanagement ($I_{therm\ ges}$) stark erwärmt wird, um die maximale Rekuperationsleistung ($I_{rek\ max}$) zu erhöhen. Jedoch im Vergleich zum vorherigen Einsatzszenario, setzt sich hier der Strom des Thermalmanagementsystems ($I_{therm\ ges}$) aus einem Strom aus der Batterie ($I_{bat\ therm}$ – gelbe Fläche) und dem direkt eingesetzten rekuperierten Strom für Thermalzwecke ($I_{rek\ therm}$ – grüne Fläche) zusammen. Eine genauere Ansicht der ersten Sekunden dieses Fahrzyklus sind in Abbildung 4.36 dargestellt.

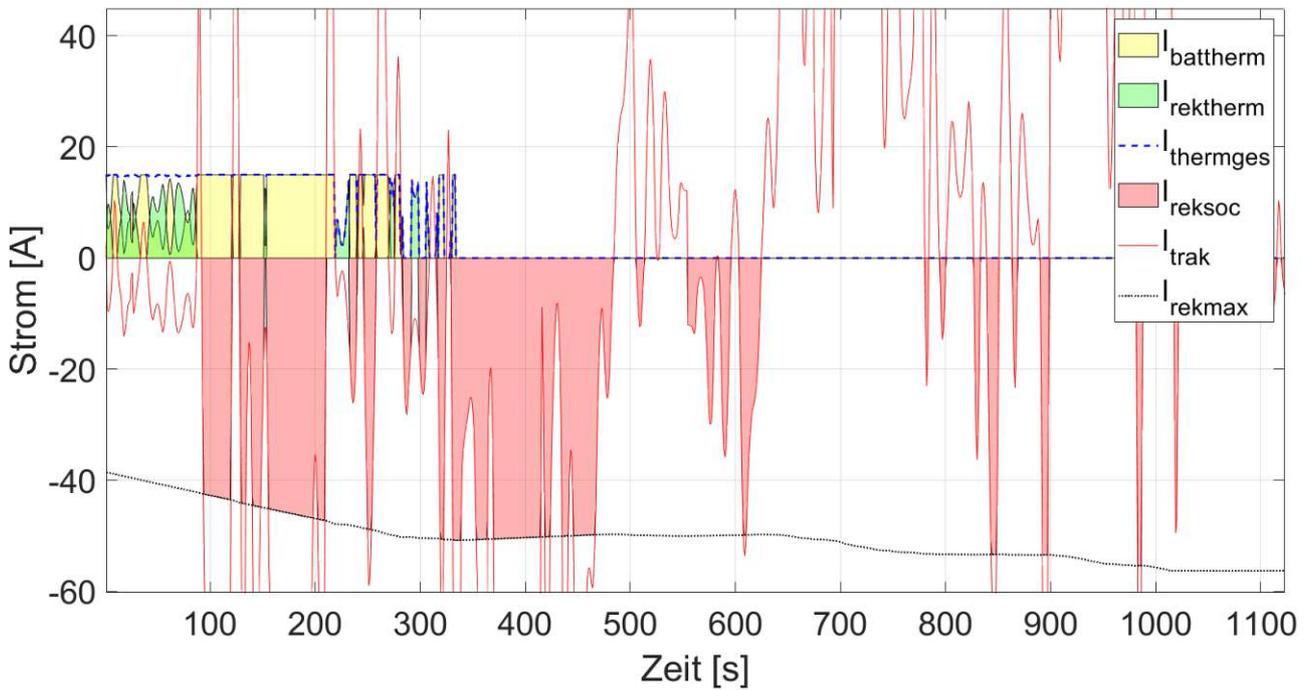


Abbildung 4.36: Detailansicht der Ströme des Thermalsystems aus der Batterie und des direkt eingesetzten Stroms der recuperierten Leistung

Durch den direkten Einsatz des recuperierten Stroms für Thermalanforderungen wird, im Vergleich zum vorherigen Einsatzszenario, nicht mehr der gesamte recuperierte Strom zum Laden der Batterie verwendet. Erkennbar ist dies in Abbildung 4.36 dadurch, dass überall wo der recuperierte Strom als $I_{rek\ therm}$ direkt eingesetzt wird (grüne Fläche), die Batterie nicht geladen wird $\rightarrow I_{rek\ soc} = 0$ (keine rote Fläche). Bei ca. 100 s ist zu erkennen, dass die Batterie vom Thermalsystem zwar weiter erwärmt wird, jedoch mit Strom direkt aus der Batterie ($I_{bat\ therm}$). Dies rührt daher, dass die Rekuperationsleistung die Maximalleistung der Thermalbauteile (6000W) übersteigt, wodurch die recuperierte Leistung bzw. Strom automatisch zum Laden der Batterie verwendet wird.

Der resultierende SOC und die Batterietemperatur sind in Abbildung 4.37 ersichtlich.

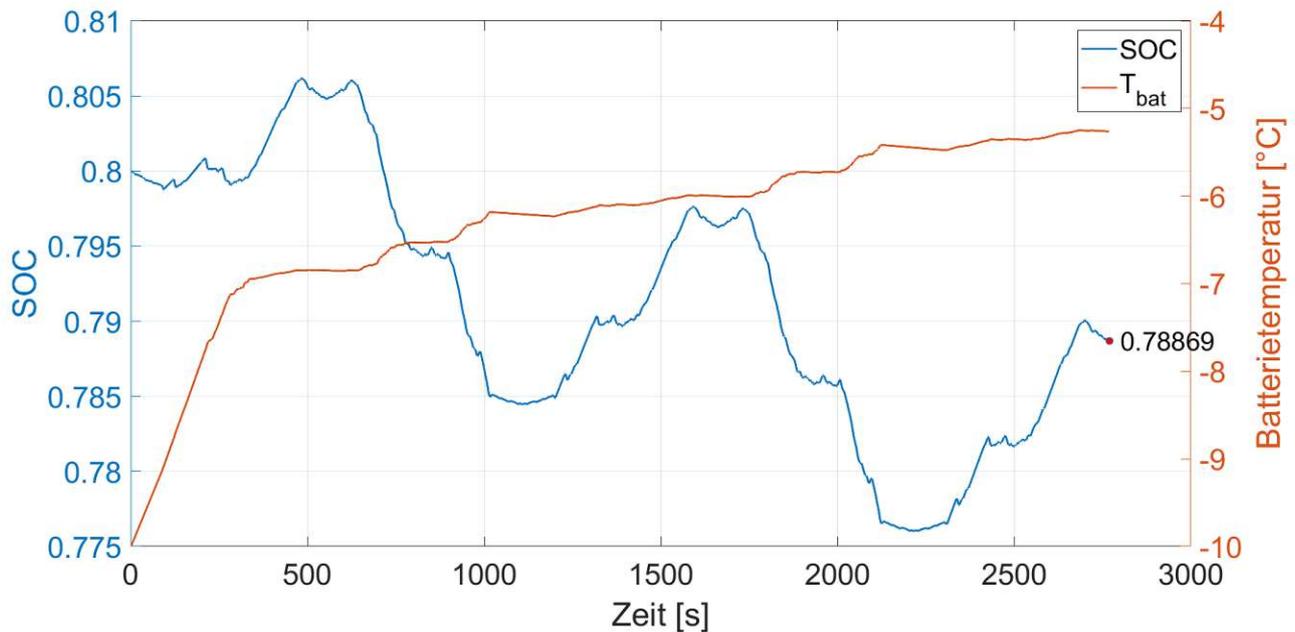


Abbildung 4.37: Verlauf des SOC's und der Batterietemperatur mit Direkteinsatz der rekuperierten Leistung bei -10°C Umgebungs- und Batteriestarttemperatur

Durch den direkten Einsatz von Rekuperationsleistung für Thermalzwecke konnte der SOC am Ende des 46-minütigen Fahrzyklus von 0,7885 auf 0,7887 minimal angehoben werden. Dies entspricht einer Erhöhung von 0,03%.

Auswertung auf verschiedenen Temperaturniveaus

Bei tiefen Temperaturen ist der Batteriewirkungsgrad aufgrund des hohen Innenwiderstands der Batterie nur gering. Weiters wird eine hohe Leistung zur Steigerung der maximalen Rekuperationsleistung benötigt. Ein direkter Einsatz von Rekuperationsleistung stellt sich folglich als rentabel dar. Bei milden Temperaturen arbeitet die Batterie hingegen am effektivsten, zudem kann schon ein Großteil der rekuperierten Leistung auch ohne Temperierung von der Batterie aufgenommen werden. Ein Umgehen bzw. ein Heizen der Batterie wäre energetisch nicht vorteilhaft.

Daher ergibt sich ein bestimmtes Temperaturniveau, ab der sich eine aktive Temperierung der Batterie zur Steigerung der maximal rekuperierbaren Leistung nicht mehr rentiert. Eine Gegenüberstellung des SOC's mit und ohne Direkteinsatz der rekuperierten Leistung auf verschiedenen Temperaturniveaus ist in Tabelle 4.1 ersichtlich.

Tabelle 4.1: Vergleich des SOC's am Ende des Fahrzyklus mit und ohne Direkteinsatz der rekuperierten Leistung bei verschiedenen Umgebungs- bzw. Batteriestarttemperaturen

$T_{bat0} T_{amb}$	SOC ohne Direkteinsatz	SOC mit Direkteinsatz	proz. Änderung
-20°C	0,7669	0,7673	0,048 %
-15°C	0,7769	0,7772	0,025 %
-10°C	0,7885	0,7887	0,024 %
-5°C	0,8003	0,8004	0,01 %
0°C	0,8090	0,8090	0 %

Ab einer Temperatur von 0°C und darüber wird die Batterie nicht mehr aktiv temperiert. Folglich können ab dieser Temperatur keine energetischen Vorteile durch aktives Temperieren der Batterie zur Steigerung der Rekuperationskapazität erreicht werden.

4.4 Vermeidung von Batterieverlusten durch Batterietemperierung

Zielsetzung

Aufgrund der Temperaturabhängigkeit des Batterieinnenwiderstandes, weisen auch die Batterieverluste eine Abhängigkeit von der Temperatur auf. Ziel dieses Einsatzszenarios ist es, zu untersuchen, ob durch aktives Temperieren der Batterie der Innenwiderstand derart gesenkt werden kann, sodass im weiteren Verlauf des Fahrzyklus die aufgewendete Energie des Thermalmanagementsystems durch die verringerten Batterieverluste zurückgewonnen werden kann.

Anforderungen

- **Maximale Batterietemperatur:** Um die Batteriealterung zu minimieren, soll eine Batterietemperatur von 35°C nicht überschritten werden.

Problemformulierung

Im Einsatzszenario „Adaptive Kabinentemperaturregelung“ wurde untersucht, inwiefern Batterieverluste durch Vermeiden von Stromspitzen eingespart werden können. In diesem Einsatzszenario wird ein zweiter Ansatz untersucht, nämlich wie sich Batterieverluste durch eine Senkung des Innenwiderstandes mittels aktiver Batterietemperierung vermeiden lassen.

Das Modell wird über zwei Zustandsvektoren, den SOC und die Batterietemperatur beschrieben.

$$x_1 = SOC \quad (4.17)$$

$$x_2 = T_{bat} \quad (4.18)$$

Der Steuervektor wird von der elektrischen Leistung des Thermalmanagement für die Batterietemperierung gebildet.

$$u_1 = P_{bat\ therm} \quad (4.19)$$

Die Kostenfunktion stellt sich aus den Batterieverlusten (\dot{Q}_{bat}) und der Leistung des Thermalsystems ($P_{bat\ therm}$) zusammen.

$$C = \begin{cases} a \cdot \lambda_1 \cdot \dot{Q}_{bat} + (1 - a) \cdot \lambda_2 \cdot |P_{bat\ therm}|, & T_{bat} < 35 \\ a \cdot \lambda_1 \cdot \dot{Q}_{bat} + (1 - a) \cdot \lambda_2 \cdot |P_{bat\ therm}| + 1, & T_{bat} \geq 35 \end{cases} \quad (4.20)$$

Über den Gewichtungsfaktor a werden die zwei Terme entsprechend gewichtet. Wird eine Batterietemperatur von 35°C überschritten, kommt der zweite Fall zu tragen, ein zusätzlicher Penalty wird zur Kostenfunktion addiert.

Auswertung der Ergebnisse

Im ersten Zuge der Auswertung wird ein 33-minütiger (2000s) NEFZ- und teilhafter WLTP-Fahrzyklus (Abbildung 3.2) bei einer Batteriestarttemperatur und einer Umgebungstemperatur von -10°C durchfahren. Abbildung 4.38 zeigt den Verlauf der ausschlaggebenden Leistungen, der Batterieverluste, sowie der Batterietemperatur bei einem Gewichtungsfaktor von 0,5.

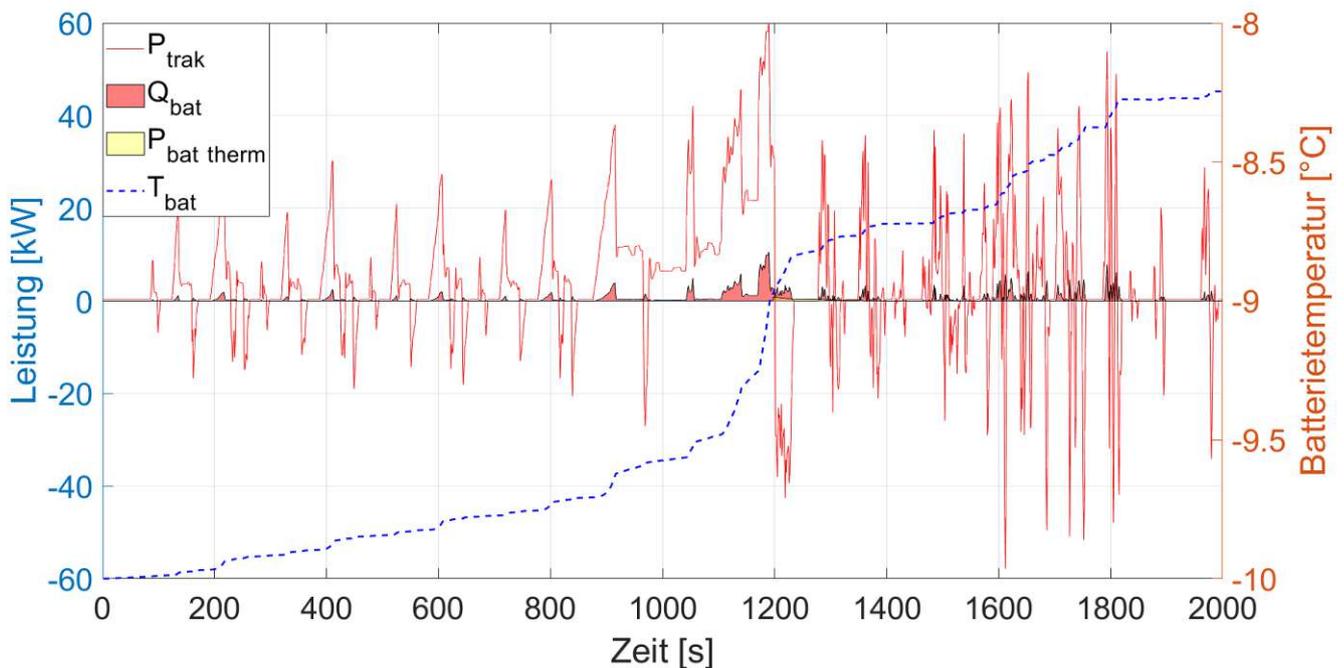


Abbildung 4.38: Verlauf der Leistung für Traktionsanforderungen, der Batterieverluste, der Leistung des Thermalsystems zur Batterietemperierung und der Batterietemperatur bei Gewichtungsfaktor 0,5 eines NEFZ- und teilhaften WLTP-Fahrzyklus

Zu erkennen ist, dass die Batterie vom Thermalmanagement nicht aktiv geheizt wird. Auch bei Variation des Gewichtungsfaktors bleibt ein Temperieren der Batterie aus. Dies lässt vermuten, dass die energetisch optimale Heizstrategie darin besteht, die Batterie gar nicht zu temperieren. Um diese Vermutung zu bestätigen, wird der gleiche Fahrzyklus bei verschiedenen Batteriestarttemperaturen (-10°C , 0°C , 10°C) simuliert. Um die Auswirkung der Batterietemperierung auf die Batterieverluste genauer zu untersuchen, werden auf jedem dieser Temperaturniveaus drei Fälle simuliert:

- Fall 1: Keine Temperierung der Batterie
- Fall 2: Batterie um $+5^{\circ}\text{C}$ erwärmen
- Fall 3: Batterie um $+10^{\circ}\text{C}$ erwärmen

Diese Herangehensweise unterscheidet sich von den vorangegangenen Simulationen, da sich der Steuervektor (in bestimmten Grenzen) nicht mehr gänzlich frei bewegen kann, weil die Batterietemperatur „künstlich“ auf ein höheres Temperaturniveau gehoben wird. Dadurch stellen die Ergebnisse kein energetisches Optimum dar, was jedoch für den Vergleich der optimalen Heizstrategie (keine Temperierung) sinnvoll ist.

Jeder der drei Fälle bringt einen anderen Innenwiderstand und folglich andere Batterieverluste mit sich. Je stärker die Batterie erwärmt wird, desto mehr steigt naturgemäß auch der thermale Energieaufwand. Nach Durchlaufen des Fahrzyklus werden die aufgewendete Energie zur Batterietemperierung und die Batterieverluste eines jeden Falls verglichen. Zur Vereinheitlichung wurde die Umgebungstemperatur mit der Batteriestarttemperatur gleichgesetzt. Im Folgenden werden die Ergebnisse der drei Fälle der verschiedenen Temperaturniveaus genauer betrachtet. In Abbildung 4.39 sind die aufgewendete Energie für die Batterietemperierung ($\sum P_{bat\ therm}$) und die Batterieverluste (Q_{bat}) für die Fälle „keine Temperierung“, „ $+5^{\circ}\text{C}$ Erwärmung“ und „ $+10^{\circ}\text{C}$ Erwärmung“ für die Batteriestarttemperaturen -10°C , 0°C und 10°C dargestellt.

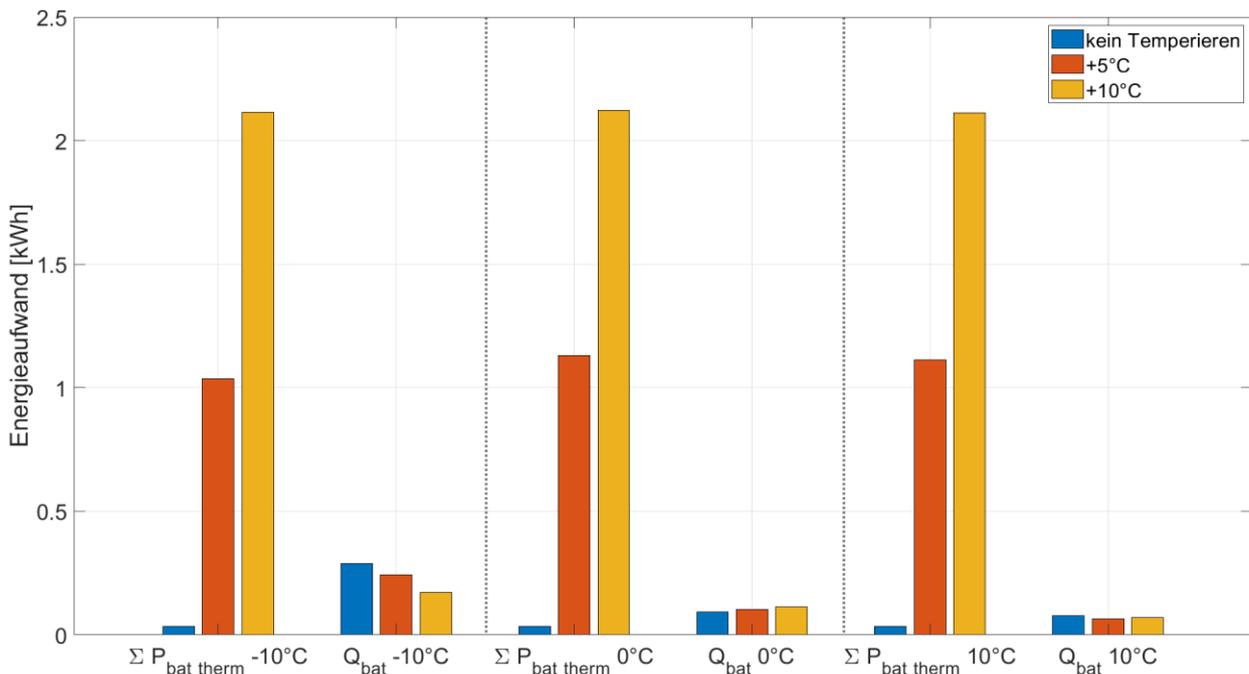


Abbildung 4.39: Vergleich der aufgewendeten Energie zur Batterietemperierung und den Batterieverlusten für die Fälle "keine Temperierung", "Batterie um +5°C erwärmen" und "Batterie um +10°C erwärmen" bei Umgebungstemperaturen -10°C, 0°C und 10°C

Bei einer Batteriestarttemperatur von -10°C ist zu erkennen, dass durch eine aktive Erwärmung der Batterie die Batterieverluste gesenkt werden können.

Zurückzuführen ist dies weitgehendst auf den geringeren Innenwiderstand der Batterie. Dennoch können die gesenkten Batterieverluste die aufgewendete Energie zur Batterietemperierung nicht aufwiegen.

Bei einer Batteriestarttemperatur von 0°C ist sogar eine leichte Steigerung der Batterieverluste zu erkennen. Zwar wird durch den erhöhten Thermaleinsatz der Innenwiderstand der Batterie gesenkt, allerdings steigt dadurch auch der Strom innerhalb der Batterie. Aufgrund der quadratischen Abhängigkeit der Batterieverluste vom anliegenden Strom resultieren daraus erhöhte Verluste. Wiederum übersteigen die Thermalaufwände die eingesparten Batterieverluste um ein Vielfaches.

Bei 10°C Batteriestarttemperatur können die Batterieverluste bei einer Erwärmung um +5°C leicht gesenkt werden. Bei einer stärkeren Erwärmung um +10°C steigen die Batterieverluste wieder leicht an. Erklärt werden kann dies wieder durch die zwei konkurrierenden Prozesse innerhalb der Batterie - der Senkung des Batterieinnenwiderstand und des erhöhten Stromes aufgrund der gestiegenen Thermalanforderungen.

5 Interpretation der Simulationsergebnisse

Im Folgenden werden die erlangten Ergebnisse der verschiedenen Simulationen interpretiert und diskutiert. Dazu werden die Ergebnisse mit den Zielen der Einsatzszenarien verglichen und etwaige Schlussfolgerungen gezogen. Im Anschluss werden daraus Empfehlungen für mögliche Betriebsstrategien abgeleitet.

5.1 Diskussion der Ergebnisse

Vorkonditionierung der Batterie für einen Schnellladezyklus

Zielsetzung: Bei diesem Einsatzszenario wird davon ausgegangen, dass der Zeitpunkt eines geplanten Ladestopps bekannt ist. Ziel ist es, die Batterie während der Fahrt optimal vorzukonditionieren, um dadurch die Ladedauer bzw. den Energiebedarf des Thermalmanagementsystems zu minimieren. Untersucht werden soll speziell der Zusammenhang zwischen Ladedauer und Energieaufwand des Thermalmanagementsystems, sowie die optimale Batterietemperatur bei Start des Schnellladezyklus. Die Auswertung soll bei verschiedenen Umgebungstemperaturen durchgeführt werden.

Der maximal mögliche Ladestrom ist von der gegenwärtigen Temperatur der Batterie und deren Ladezustand abhängig [3]. Speziell bei niedrigen Temperaturen wird der Ladestrom stark begrenzt, um eine Beschädigung der Batterie zu verhindern. Daraus folgt, dass die Ladedauer mit sinkender Batterietemperatur zunimmt.

Die Ergebnisse der Simulation bei niedrigen Umgebungs- bzw. Batteriestarttemperaturen (0°C, 10°C) zeigen, dass durch eine aktive Batterietemperierung die Ladedauer beeinflusst werden kann. Durch den Einsatz elektrischer Leistung des Thermalsystems, kann die Batterietemperatur angehoben werden, woraus ein höherer maximal möglicher Ladestrom und folglich eine verkürzte Ladedauer resultiert.

Über den Gewichtungsfaktor a kann der Zusammenhang zwischen maximalen Ladestrom und dem Energieaufwand des Thermalsystems gewichtet werden. Mit einem hohen Gewichtungsfaktor geht ein hoher Thermaleinsatz und folglich ein hoher Ladestrom einher. Wird der Gewichtungsfaktor niedriger gewählt, wird die Batterie weniger temperiert, ein niedriger Ladestrom ist die Folge.

Die Ergebnisse zeigten, dass es für eine minimale Ladedauer nicht zielführend ist, den maximalen Ladestrom von 350A gleich zu Beginn des Ladezyklus anzustreben. Je höher der Ladestrom, desto größer ist auch die eingesetzte Energie des Thermalsystems. Dieser Mehraufwand senkt jedoch den SOC der Batterie, was wiederum während des Ladezyklus erneut aufgeladen werden muss.

Daher ist es ratsam bei Ladebeginn eine Batterietemperatur knapp unterhalb der Temperatur des maximalen Ladestroms anzustreben. Aufgrund der generierten Wärme während des Ladevorgangs heizt sich die Batterie auf, wodurch der maximale Ladestrom dennoch erreicht wird. Die Gefahr einer Überhitzung der Batterie besteht bei niedrigen Temperaturen nicht.

Die erlangten Ergebnisse für die Temperaturniveaus 0°C und 10°C sind in Tabelle 5.1 und Tabelle 5.2 nochmals ersichtlich, wobei die kürzeste Ladezeit hervorgehoben ist.

Tabelle 5.1: Ergebnisse des Szenarios „Vorkonditionieren der Batterie für einen Schnellladezyklus“ mit verschiedenen Gewichtungsfaktoren bei 0°C Umgebungstemperatur

a	t_{chrg}	$\int P_{\text{therm}}$	T_{bat0}	I_{chrg0}
0	1736 s	1,16 kWh	5,23 °C	190 A
0,5	1618 s	1,68 kWh	8,52 °C	222 A
0,8	1469 s	2,94 kWh	14,79 °C	281 A
0,9	1426 s	3,90 kWh	18,9 °C	327 A
1	1437 s	5,20 kWh	19,43 °C	350 A

Tabelle 5.2: Ergebnisse des Szenarios „Vorkonditionieren der Batterie für einen Schnellladezyklus“ mit verschiedenen Gewichtungsfaktoren bei 10°C Umgebungstemperatur

a	t_{chrg}	$\int P_{\text{therm}}$	T_{bat0}	I_{chrg0}
0	1498 s	0,08 kWh	10,57 °C	242 A
0,5	1498 s	0,08 kWh	10,57 °C	242 A
0,8	1442 s	0,54 kWh	13 °C	264 A
0,9	1368 s	1,75 kWh	18,89 °C	325 A
1	1424 s	4,73 kWh	21,29 °C	350 A

Die Auswertung bei durchschnittlichen Temperaturen (20°C) zeigte, dass in keinem der simulierten Fälle eine Temperierung der Batterie vorteilhaft für den Ladezyklus ist. Der Ladestrom befindet sich temperaturbedingt schon an einem Optimum, zudem besteht keine Gefahr durch Überhitzung der Batterie. Somit ist das Einsatzszenario unabhängig vom Gewichtungsfaktor a . Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.3 dargestellt.

Tabelle 5.3: Ergebnisse des Szenarios „Vorkonditionieren der Batterie für einen Schnellladezyklus“ bei 20°C Umgebungstemperatur

a	t_{chrg}	$\int P_{\text{therm}}$	T_{bat0}	I_{chrg0}
-	1320 s	0,00 kWh	20,43 °C	350 A

Auch bei hohen Temperaturen (30°C, 35°C) befindet sich der Ladestrom schon in einem optimalen Bereich. Dadurch ist die Auswertung auch auf diesem Temperaturniveau unabhängig vom Gewichtungsfaktor a . Dennoch muss die Batterie temperiert werden, um die maximale Batterietemperatur von 35°C nicht zu überschreiten. Bei beiden Temperaturniveaus wird die Batterie kurz vor Ladebeginn leicht abgekühlt und im weiteren Verlauf des Ladezyklus durch leichtes Temperieren auf einer Temperatur knapp unter der maximalen Batterietemperatur von 35°C gehalten.

Eine starke Abkühlung der Batterie vor Ladebeginn würde den Wärmefluss zwischen Batterie und Umgebung verstärken, wodurch die Batterie zusätzlich aufgeheizt werden würde. Dennoch hilft eine geringe Vorkonditionierung den Ladevorgang zu beschleunigen, da die Batterie dadurch während des Ladezyklus weniger temperiert werden muss, was förderlich für den Nettostrom der Batterie ist, da sich Ladestrom und Strom des Thermalsystems nicht überlagern. Dieser Effekt hat jedoch voraussichtlich nur geringfügige Auswirkungen auf die endgültige Ladedauer.

Tabelle 5.4 und Tabelle 5.5 zeigen die Ergebnisse für die Temperaturen 30°C und 35°C.

Tabelle 5.4: Ergebnisse des Szenarios „Vorkonditionieren der Batterie für einen Schnellladezyklus“ bei 30°C Umgebungstemperatur

a	t_{chrg}	$\int P_{\text{therm}}$	T_{bat0}	I_{chrg0}
-	1330 s	0,53 kWh	28,18 °C	350 A

Tabelle 5.5: Ergebnisse des Szenarios „Vorkonditionieren der Batterie für einen Schnellladezyklus“ bei 35°C Umgebungstemperatur

a	t_{chrg}	$\int P_{\text{therm}}$	T_{bat0}	I_{chrg0}
-	1339 s	0,82 kWh	28,23 °C	350 A

Zusammenfassend kann konkludiert werden, dass bei niedrigen Temperaturen die Ladedauer durch die Erhöhung des Ladestroms mittels gezielter Batterietemperierung maßgeblich beeinflusst werden kann. Eine Temperierung bei hohen Umgebungstemperaturen ist aufgrund der maximalen Batterietemperatur notwendig, hat jedoch keinen entscheidenden Einfluss auf die Dauer des Ladevorgangs.

Adaptive Kabinentemperaturregelung

Zielsetzung: In diesem Einsatzszenario wird die Kabinentemperatur auf eine gewisse Set-Temperatur eingestellt. Diese kann vom Thermalmanagement jedoch über- oder unterschritten werden. Dadurch ergibt sich ein gewisser Toleranzbereich, in dem sich die Kabinentemperatur bewegen kann. Ziel ist es, zu untersuchen, ob durch diese flexible Temperaturregelung Energie für die Kabinentemperierung eingespart werden kann. Weiters soll untersucht werden, ob durch eine zeitliche Verschiebung des Stromes für die Kabinentemperierung Batterieverluste durch Vermeiden von Stromspitzen verringert werden können.

Die Ergebnisse der Simulationen zeigen, dass der SOC bei niedrigen Umgebungstemperaturen (0°C) am Ende des 33-minütigen Fahrzyklus leicht gesteigert werden kann. Bei hohen Umgebungstemperaturen (35°C) konnte keine Steigerung festgestellt werden. Dies ist zurückzuführen auf den besseren Wirkungsgrad des Kühlkreislaufes, verglichen mit dem, auf PTC-Heizern basierenden, Heizkreislauf. Weiters ist aufgrund der gewählten Set-Temperatur von 22°C die Temperaturdifferenz zwischen Kabine und Umgebung bei hohen Temperaturen deutlich geringer als bei niedrigen Umgebungstemperaturen.

Der gesteigerte SOC kann weitgehendst darauf zurückgeführt werden, dass die durchschnittliche Kabinentemperatur bei größerer Schwankung generell geringer ausfällt. Dadurch ist auch der Wärmeverlust an die Umgebung etwas geringer, wodurch weniger Leistung zur Kabinentemperierung benötigt wird. Deshalb darf der verringerte Energieaufwand der Kabinentemperierung nicht als Energieersparnis eingestuft werden. Simulationen ergaben, dass die aufgewendete Energie zur Kabinentemperierung bei gleicher durchschnittlicher Temperatur fast ident ist, unabhängig vom gewählten Gewichtungsfaktor und damit von der Schwankung der Kabinentemperatur.

Die eigentliche Energieersparnis wird über die verringerten Batterieverluste erzielt. Durch eine adaptive Temperaturregelung kann die Kabine in Situationen mit einem niedrigen Batteriestrom thermisch aufgeladen werden, wodurch Ströme zu lastarmen Zeitpunkten hin verschoben werden. Dadurch können Stromspitzen abgeflacht werden. Die quadratische Abhängigkeit der Batterieverluste von der Stromstärke bewirkt, dass hohe Ströme tendenziell höhere Verluste verursachen. Dadurch können durch eine Abflachung von Stromspitzen Batterieverluste eingespart werden. Daraus folgt, je höher die Schwankung der Kabinentemperatur ist, desto geringer fallen die Batterieverluste aus.

Allerdings machen die Batterieverluste nur einen geringen Teil der gesamten Leistung der Batterie aus, wodurch sich diese im SOC nicht wirklich bemerkbar machen. Wird die Energieersparnis der Kabinentemperierung bei der SOC-Ermittlung nicht berücksichtigt, sondern nur die eingesparten Batterieverluste, ist keine Steigerung des SOC's erkennbar. Die Energieersparnis ist schlichtweg zu klein. Daraus lässt sich schließen, dass durch eine flexible Temperierung der Kabine energietechnisch nur sehr geringe bis gar keine Vorteile erzielt werden können.

Dennoch kann sich eine Reduktion von Stromspitzen positiv auf die Lebensdauer der Batterie auswirken. Hohe Lade- und Entladeströme bewirken eine Verstärkung der zyklischen Altersprozessen in der Batterie [31]. Durch eine adaptive Kabinentemperierung können diese Alterungsprozesse womöglich verringert werden.

Was weiters angemerkt werden muss, ist, dass aufgrund der Trägheit der Einheiten des Thermalsystems die Steuerung der Kabinentemperatur nicht so präzise wie in der Simulation umsetzbar ist. Ein direkter Energieaustausch zwischen Thermalsystem und Kabine wurde angenommen, was in realen Fahrsituationen nicht realisierbar ist.

Ein kurzer Überblick über die erlangten Ergebnisse ist aus Tabelle 5.6 und Tabelle 5.7 zu entnehmen. Ein niedriger Gewichtungsfaktor bindet die Kabinentemperatur eng an die Set-Temperatur, ein hoher Gewichtungsfaktor lässt eine größere Schwankung zu.

Tabelle 5.6: Ergebnisse des Einsatzszenarios „Adaptive Kabinentemperaturregelung“ bei 0°C Umgebungstemperatur und verschiedenen Gewichtungsfaktoren

a	\bar{T}_{kab}	$MAD_{T_{kab}}$	$\int P_{kab\ therm}$	Q_{bat}	SOC
0,0	22,01 °C	0,02 °C	1,331 kWh	0,0492 kWh	0,7516
0,2	21,89 °C	0,12 °C	1,323 kWh	0,0472 kWh	0,7516
0,5	21,86 °C	0,29 °C	1,321 kWh	0,0456 kWh	0,7517
0,8	21,62 °C	0,62 °C	1,305 kWh	0,0447 kWh	0,7518

Tabelle 5.7: Ergebnisse des Einsatzszenarios „Adaptive Kabinentemperaturregelung“ bei 35°C Umgebungstemperatur und verschiedenen Gewichtungsfaktoren

a	\bar{T}_{kab}	$MAD_{T_{kab}}$	$\int P_{kab\ therm}$	Q_{bat}	SOC
0,0	22,04 °C	0,04 °C	0,249 kWh	0,0415 kWh	0,7622
0,2	22,05 °C	0,05 °C	0,249 kWh	0,0414 kWh	0,7622
0,5	22,13 °C	0,14 °C	0,247 kWh	0,0410 kWh	0,7622
0,8	22,16 °C	0,29 °C	0,243 kWh	0,0406 kWh	0,7622

Direkter Einsatz von Rekuperationsleistung zur Batterietemperierung

Zielsetzung: Die maximal rekuperierbare Leistung ist stark von der Batterietemperatur abhängig. Im ersten Teil dieses Einsatzszenarios soll untersucht werden, ob durch ein aktives Temperieren der Batterie die maximal rekuperierbare Leistung derart erhöht werden kann, dass im weiteren Verlauf des Fahrzyklus die aufgewendete Leistung zur Batterietemperierung durch die erhöhte rekuperierte Leistung zurückgewonnen werden kann. Maßgebend ist hierbei der SOC - Ziel ist es, diesen am Ende des Fahrzyklus zu maximieren.

Durch einen direkten Einsatz der rekuperierten Leistung für Thermalanforderungen können Lade- und Entladevorgänge der Batterie umgangen werden. Dadurch werden Leistungsverluste aufgrund der Wirkungsgradkette der Batterie vermieden. Wird die rekuperierte Leistung jedoch direkt für Thermalzwecke genutzt, wird die Batterie infolgedessen in diesem Zeitraum nicht geladen. Inwiefern sich diese Direktnutzung der rekuperierten Leistung auf den Gesamtenergiehaushalt des Fahrzeuges auswirkt, soll im zweiten Teil des Einsatzszenarios betrachtet werden. Wiederum gilt es den SOC am Ende des Fahrzyklus zu maximieren.

Die Simulationen beider Einsatzszenarien (mit und ohne Direkteinsatz der Rekuperationsleistung) zeigten, dass bei tiefen Temperaturen (-20 bis -5°C) eine aktive Erwärmung der Batterie vorteilhaft für den endgültigen Energiehaushalt des Fahrzeuges ist. Durch ein starkes Aufheizen der Batterie zu Beginn des Fahrzyklus kann die maximal aufnehmbare Rekuperationsleistung so weit gesteigert werden, dass die aufgewendete Leistung zur Batterietemperierung im Laufe des Fahrzyklus zurückgewonnen wird.

Ab einer Temperatur von 0°C stellt sich eine aktive Temperierung der Batterie als nicht mehr vorteilhaft dar. Es ist energetisch günstiger die vorhandene Rekuperationskapazität zu belassen, anstatt diese durch Erwärmen der Batterie zu erhöhen.

Ohne den direkten Einsatz der Rekuperationsleistung wird die gesamte Leistung zur Batterietemperierung aus der Batterie gezogen. Die gesamte Rekuperationsleistung wird zum Laden der Batterie verwendet. Das Temperieren der Batterie stellt somit einen Aufwand an die Batterie dar.

Durch den direkten Einsatz der Rekuperationsleistung, besteht die Möglichkeit diese Leistung direkt für Thermalzwecke zu verwenden und somit die Wirkungsgradkette der Batterie zu umgehen. Dadurch können Batterieverluste eingespart werden, was sich im endgültigen SOC widerspiegelt. Die Ergebnisse mit und ohne Direkteinsatz auf verschiedenen Temperaturniveaus sind in Tabelle 5.8 angeführt.

Tabelle 5.8: Vergleich des SOC's am Ende des Fahrzyklus mit und ohne Direkteinsatz der recuperierten Leistung bei verschiedenen Umgebungs- und Batteriestarttemperaturen

$T_{bat0} T_{amb}$	SOC ohne Direkteinsatz	SOC mit Direkteinsatz	proz. Änderung
-20°C	0,7669	0,7673	0,048 %
-15°C	0,7769	0,7772	0,025 %
-10°C	0,7885	0,7887	0,024 %
-5°C	0,8003	0,8004	0,01 %
0°C	0,8090	0,8090	0 %

Jedoch ist der Nutzen eines direkten Einsatzes der Rekuperationsleistung stark von äußeren Temperaturen sowie der Batterietemperatur selbst abhängig:

Bei sehr tiefen Außentemperaturen wird die Batterie stark temperiert, um möglichst viel Rekuperationsleistung aufzunehmen. Durch die hohen Thermalanforderungen besteht überhaupt schon die Möglichkeit die Rekuperationsleistung direkt einzusetzen. Bei durchschnittlichen Temperaturen um 20°C muss die Batterie nur sehr wenig bis gar nicht temperiert werden, ein Großteil der Rekuperationsleistung kann ohnehin schon recuperiert werden. Dadurch sinkt auch der Nutzen der Betriebsstrategie.

Weiters ist der Batteriewirkungsgrad selbst temperaturabhängig. Bei tiefen bzw. hohen Temperaturen sinkt dieser stark ab. Ein Umgehen der Batterie durch Direktnutzung wird immer rentabler. Bei durchschnittlichen Temperaturen arbeitet die Batterie am effektivsten, der Nutzen durch Umgehen wird geschmälert.

Zudem muss die Maximalleistung der Thermalbauteile berücksichtigt werden. Der Fall, dass eine (relativ) konstante Leistung unter 6000W in einer realen Fahrsituation über einen gewissen Zeitraum anhält, ist relativ gering. Dadurch ist der Nutzen der Betriebsstrategie stark vom Fahrzyklus selbst abhängig. Als Fahrzyklus wurden mehrere Bergauf- und -abfahrten mit optimalen Bedingungen für den direkten Einsatz der Rekuperationsleistung gewählt.

Weiters muss angemerkt werden, dass bei allen Simulationen Alterungseffekte der Batterie vernachlässigt wurden. Eine reale Fahrsituation würde fordern, dass die Batterie erwärmt werden würde, um die Alterung zu minimieren bzw. eine Beschädigung der Batterie zu verhindern. Zudem wurde die Leistungsabgabe der Batterie in der Simulation nicht begrenzt, was im realen Betrieb aufgrund der niedrigen Temperaturen ein weiterer zu berücksichtigender Faktor wäre. Bei der Simulation wurde nur der Zusammenhang zwischen der maximal aufnehmbaren recuperierbaren Leistung und der elektrischen Leistung des Thermalsystems untersucht.

Vermeiden von Batterieverlusten durch Batterietemperierung

Zielsetzung: Aufgrund der Temperaturabhängigkeit des Batterieinnenwiderstandes, weisen auch die Batterieverluste eine Abhängigkeit von der Temperatur auf. Ziel dieses Einsatzszenarios ist es, zu untersuchen, ob durch aktives Temperieren der Batterie der Innenwiderstand derart gesenkt werden kann, sodass im weiteren Verlauf des Fahrzyklus die aufgewendete Energie des Thermalmanagementsystems durch die verringerten Batterieverluste zurückgewonnen werden kann.

Die Auswertung verdeutlicht, dass bei keinem der simulierten Fälle ($T_{amb} = -10^{\circ}\text{C}$, 0°C , 10°C) eine Senkung des Innenwiderstandes durch aktive Erwärmung der Batterie energetisch sinnvoll ist. Die aufzuwendende Energie zur Batterietemperierung ist verglichen mit den eingesparten Batterieverlusten schlichtweg zu groß.

Gezeigt werden konnte dies mittels erzwungenen Temperatursteigerungen der Batterie um $+5$ bzw. $+10^{\circ}\text{C}$. Zwar konnten die Batterieverluste (in einigen Fällen) gesenkt werden, jedoch überstiegen die thermalen Energieaufwände die Einsparnisse stets um ein Vielfaches.

Weiters induziert die Leistung des Thermalsystems einen zusätzlichen Strom innerhalb der Batterie, wodurch, aufgrund der quadratischen Abhängigkeit der Batterieverluste von der Stromstärke, die Batterieverluste in einigen Fällen sogar anstiegen.

Daraus kann geschlussfolgert werden, dass die energetisch optimale Heizstrategie darin besteht, die Batterie nicht zu temperieren. Natürlich ist dies nur auf den direkten Vergleich zwischen Thermalaufwand und eingesparten Batterieverlusten anwendbar.

Werden Batteriealterungsprozesse und Leistungsanforderungen mitberücksichtigt, ist speziell bei tiefen Temperaturen, eine Temperierung der Batterie unausweichlich.

5.2 Empfehlungen für Betriebsstrategien

In diesem Punkt werden aus den erlangten Ergebnissen Betriebsstrategien für das Energiemanagement eines batterieelektrischen Fahrzeugs abgeleitet.

Die Ladedauer eines Schnellladezyklus kann durch entsprechendes Vorkonditionieren der Batterie bei niedrigen Temperaturen verkürzt werden. Durch eine Erwärmung der Batterie steigt der maximal aufnehmbare Ladestrom, wodurch die Ladedauer gesenkt werden kann. Jedoch ist es nicht zielführend, gleich zu Beginn des Ladzyklus den maximalen Ladestrom von 350A anzustreben. Daher ist es ratsam bei Ladebeginn eine Temperatur knapp unterhalb der Temperatur des maximalen Ladestroms anzustreben.

Bei Ladevorgängen bei hohen Temperaturen sollte eine zu niedrige Batterietemperatur zu Ladebeginn vermieden werden, um Wärmeflüsse zwischen Batterie und Umgebung gering zu halten. Eine geringe Vorkonditionierung ist jedoch ratsam, da dadurch Stromüberlagerungen zwischen dem Strom des Thermalmanagement der Batterie und dem Ladestrom vermieden werden können.

Durch eine adaptive Temperaturregelung der Fahrerkabine kann der Energieaufwand des Thermalsystems nicht verringert werden. Die Batterieverluste können durch Stromverlagerungen verringert werden, diese Einsparnisse spielen jedoch in Anbetracht der gesamten Leistungsflüsse an die Batterie nur eine untergeordnete Rolle. Dennoch kann sich eine Reduzierung von Stromspitzen positiv auf die Alterung der Batterie auswirken [31].

Eine aktive Temperierung der Batterie zur Steigerung der maximal rekuperierbaren Leistung kann sich, abhängig vom Fahrzyklus, positiv auf den SOC auswirken. Die aufgewendete Energie zur Batterietemperierung wird durch die erhöhte Rekuperationskapazität zurückgewonnen. Dieser Effekt verstärkt sich mit sinkenden Temperaturen.

Durch einen direkten Einsatz der rekuperierten Leistung für Thermalzwecke kann die Wirkungsgradkette der Batterie umgangen werden, wodurch zusätzlich Energie durch die Vermeidung von Batterieverlusten eingespart werden kann. Jedoch ist diese Betriebsstrategie nur einsetzbar, wenn die rekuperierte Leistung die Maximalleistung der Thermalbauteile nicht übersteigt. Dadurch ist die Betriebsstrategie stark vom vorliegenden Fahrzyklus abhängig. Aufgrund der höheren Thermalanforderungen und des fallenden Batteriewirkungsgrades bei niedrigen Temperaturen, nimmt der Nutzen auch hier mit sinkenden Temperaturen zu.

Eine aktive Erwärmung der Batterie zur Senkung des Batterieinnenwiderstandes, um Batterieverluste einzusparen ist nicht zielführend. Der energetische Aufwand des Thermalsystems übersteigt die eingesparten Batterieverluste in allen simulierten Fällen um ein Vielfaches.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieses Kapitels wird eine Zusammenfassung der Arbeit und ein Ausblick auf zukünftige Forschungsbereiche zur behandelten Thematik angeführt.

6.1 Zusammenfassung

Im Zuge dieser Arbeit wurde das Energiemanagement des Audi e-trons auf Optimierungspotentiale untersucht. Spezieller Fokus wurde auf das Thermalmanagement, Ladezyklen, sowie Rekuperationsszenarien gelegt.

Für die Untersuchung wurde ein Gesamtfahrzeugmodell des Audi e-trons mit speziellem Fokus auf die Längsdynamik und dem Thermalsystem erstellt. Über einen Optimierungsalgorithmus basierend auf dem Prinzip der dynamischen Programmierung, wurde das Gesamtfahrzeugmodell in Form von vier ausgewählten Einsatzszenarien implementiert und ausgewertet. Die vier Einsatzszenarien behandeln die Themen „Vorkonditionierung der Batterie für einen Schnellladezyklus“, „Adaptive Kabinentemperaturregelung“, „Direkter Einsatz von Rekuperationsleistung zur Batterietemperierung“ und „Vermeidung von Batterieverlusten durch Batterietemperierung“.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei niedrigen Temperaturen (0°C, 10°C) die Ladedauer durch Vorkonditionieren der Batterie um 17,9 % bzw. 8,7% reduziert werden konnte. Ein Vorkonditionieren der Batterie auf eine Temperatur knapp unter der des maximalen Ladestroms bringt die kürzeste Ladedauer mit sich. Bei durchschnittlichen Temperaturen (20°C) können durch Temperieren der Batterie keine Vorteile bezüglich der Ladedauer erzielt werden. Hohe Temperaturen (30°C, 35°C) verlangen aufgrund der maximalen Batterietemperatur von 35°C zwar eine Temperierung der Batterie, die Ladedauer kann damit jedoch nicht entscheidend beeinflusst werden.

Durch Einführen einer adaptiven Kabinentemperierung mit einem gewissen Toleranzbereich können Batterieverluste zwar gesenkt werden, diese machen sich jedoch bei Betrachtung des gesamten Energiehaushalts im SOC am Ende des Fahrzyklus nicht bemerkbar. Die aufzuwendende Energie des Thermalsystems zur Kabinentemperierung kann durch eine flexible Kabinentemperatur nicht verringert werden.

Bei tiefen Temperaturen (-20°C bis -5°C) kann sich eine aktive Temperierung der Batterie zur Steigerung der maximal aufnehmbaren rekuperierbaren Leistung positiv auf die gesamte Energiebilanz auswirken. Durch direkten Einsatz der rekuperierten Leistung für Thermalaufgaben konnte der SOC, verglichen mit dem SOC ohne Direkteinsatz zusätzlich um bis zu 0,048% gesteigert werden. Jedoch sind diese Betriebsstrategien nur in ausgewählten Fahrsituationen und bei tiefen Temperaturen sinnvoll anwendbar.

Eine aktive Batterietemperierung zur Senkung der Batterieverluste ist in Anbetracht der hohen Energieanforderungen energetisch gesehen nicht sinnvoll. Der Energieaufwand des Thermalsystems übersteigt die eingesparten Verluste der Batterie um ein Vielfaches.

Zusammenfassend kann konkludiert werden, dass bei den untersuchten Szenarien eine geeignete Strategie zur Batterietemperierung wesentlichen Einfluss auf die Wirksamkeit des Energiemanagements hat. Durch eine Reduzierung von Stromspitzen und der Beeinflussung des Innenwiderstandes können Batterieverluste verringert werden. Dennoch wirken sich Verringerungen von Batterieverlusten nur geringfügig auf den gesamten Energiehaushalt aus. Durch eine gezielte Batterietemperierung kann zudem die Rekuperationskapazität gesteigert werden, was sich merklich auf die Energiebilanz des Fahrzeugs auswirken kann. Wenn es die Fahrsituation zulässt, ist es ratsam Lade- und Entladevorgänge der Batterie durch einen direkten Einsatz der rekuperierten Leistung zu umgehen. Durch eine intelligente Batterietemperierung können auch Ladevorgänge hinsichtlich Ladedauer und Energieaufwand optimiert werden.

6.2 Ausblick

Aufgrund der beschränkten Rechenkapazität wurden die Kühlkreisläufe des Audi e-trons vereinfacht dargestellt. Es wurde von einem direkten Energieaustausch zwischen den Einheiten, unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades bzw. des COPs, ausgegangen. Eine komplexere Modellierung der verschiedenen Kühlkreisläufe und deren Verschaltungen wäre denkbar. Die verschiedenen Umschaltventile könnten mit einem Steuervektor (u) belegt werden und im Sinne der dynamischen Programmierung ausgewertet werden. Ein Beispiel wäre die Batterieabwärme zur Heizung der Fahrerkabine zu verwenden oder umgekehrt die Fahrerkabine als thermischen Speicher für die Batterietemperierung zu betrachten [3]

Des Weiteren wurden bei keinem der Einsatzszenarien Alterungsprozesse in der Batterie berücksichtigt. Die Einsatzszenarien könnten um ein Alterungsmodell erweitert werden, was eine neue Dimension der Auswertung mit sich bringen würde. Dabei könnte untersucht werden, inwiefern sich verschiedene Batterietemperaturen und Stromspitzen auf die Lebensdauer der Batterie auswirken. Durch die Einführung eines Alterungsmodells würde die Batterie anders temperiert werden, was sich wiederum auf verschiedene fahrzeugspezifische Parameter wie Innenwiderstand, Rekuperationskapazität etc. auswirken würde.

Durch eine detailliertere Modellierung von Nebenverbrauchern (Vakuumpumpe für Bremssystem, Kühlwasserpumpe, etc.) und deren Steuerung über verschiedene Steuervektoren, könnten die Auswirkungen von Stromspitzen genauer untersucht werden [13]. Wiederum könnte dieser Ansatz mit einem Alterungsmodell verknüpft

werden. Alle Einsatzszenarien wurden so modelliert, dass verschiedene Parameter wie Umgebungstemperatur, Batteriestarttemperatur, sowie verschiedene Fahrzyklen einfach abgeändert werden können.

7 Literaturverzeichnis

- [1] J. Belz, R. Follmer, J. Hölscher, I. Stieß, G. Sunderer, und B. Birzle-Harder, „Umweltbewusstsein in Deutschland 2020“, Bundesumweltministerium, Dessau-Roßlau, Bevölkerungsumfrage, 2020.
- [2] I. Beyer Bartana und H. Heinfellner, „Faktencheck E-Mobilität“, Klima- und Energiefonds, Wien, 2022. Zugegriffen: 10. Mai 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://faktencheck-energiewende.at/faktencheck/e-mobilitaet/>
- [3] A. Suchanek, „Energiemanagement-Strategien für batterieelektrische Fahrzeuge“, Dissertation, Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), Karlsruhe, 2018.
- [4] M. Auer und S. Krug, „Gesamtfahrzeugsimulation eines batterieelektrischen Fahrzeugs“, Universität Stuttgart, Stuttgart, Abschlussbericht, Sep. 2012.
- [5] M. Al Halabi und A. Al Tarabsheh, „Modelling of Electric Vehicles Using Matlab/Simulink“, *SAE 2020-01-5086*, S. 10, Okt. 2020, doi: 10.4271/2020-01-5086.
- [6] Audi AG, „Selbststudienprogramm 675 Audi e-tron (Typ GE)“. Oktober 2018.
- [7] L. Lu, X. Han, J. Li, J. Hua, und M. Ouyang, „A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles“, *Journal of Power Sources*, Bd. 226, S. 272–288, März 2013, doi: 10.1016/j.jpowsour.2012.10.060.
- [8] A. Tomaszewska *u. a.*, „Lithium-ion battery fast charging: A review“, *eTransportation*, Bd. 1, S. 100011, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.etrans.2019.100011.
- [9] L. Guzzella und A. Sciarretta, *Vehicle Propulsion Systems: Introduction to Modeling and Optimization*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2007. doi: 10.1007/978-3-642-35913-2.
- [10] O. T. Mezger, „Modellierung und Analyse von Lademodellen für Elektroautos aus energiewirtschaftlicher und Fahrzeugnutzer-Sicht“, Dissertation, Technische Universität München, München, 2013.
- [11] R. Korthauer, Hrsg., *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2013. doi: 10.1007/978-3-642-30653-2.
- [12] LG Chem, Hrsg., „Datenblatt LG Zelle e63“. 26. Februar 2018.
- [13] M. A. Roscher, W. Leidholdt, und J. Trepte, „High efficiency energy management in BEV applications“, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Bd. 37, Nr. 1, S. 126–130, Mai 2012, doi: 10.1016/j.ijepes.2011.10.022.
- [14] R. Barnitt, A. Brooker, L. Ramroth, J. Rugh, und K. Smith, „Analysis of Off-Board Powered Thermal Preconditioning in Electric Drive Vehicles“, gehalten auf der 25th

World Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition, Shenzhen, China: National Renewable Energy Laboratory, NREL, Dez. 2020, S. 10.

[15] M. Steinstraeter, T. Heinrich, und M. Lienkamp, „Effect of low temperature on electric vehicle range“, *World Electric Vehicle Journal*, Bd. 12, Nr. 3, 2021, doi: 10.3390/wevj12030115.

[16] O. Sundstrom und L. Guzzella, „A generic dynamic programming Matlab function“, in *IEEE International Conference on Control Applications*, St. Petersburg, Russia: IEEE, Juli 2009, S. 1625–1630. doi: 10.1109/CCA.2009.5281131.

[17] A. Schmitt und J. Verstege, „Multikriterielle Optimierung auf Basis von Evolutionsstrategien zur Bereitstellung von Systemdienstleistungen“, *VDI-Berichte*, Bd. 1627, S. S. 225-234, Jan. 2001.

[18] Q. Wang, B. Jiang, B. Li, und Y. Yan, „A critical review of thermal management models and solutions of lithium-ion batteries for the development of pure electric vehicles“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Bd. 64, S. 106–128, Okt. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.05.033.

[19] L. Dormann, K. Sann-Ferro, P. Heiningen, und J. Mähliß, „Kompendium: Li-Ionen-Batterien“, VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V., Frankfurt am Main, Okt. 2021.

[20] D. Galatro, M. Al-Zareer, C. Da Silva, D. Romero, und C. Amon, „Thermal behavior of lithium-ion batteries: Aging, heat generation, thermal management and failure“, *Frontiers in Heat and Mass Transfer*, Bd. 14, Mai 2020, doi: 10.5098/hmt.14.17.

[21] S. Ma u. a., „Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: A review“, *Progress in Natural Science: Materials International*, Bd. 28, S. 653–666, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.pnsc.2018.11.002.

[22] T. Weustenfeld, „Heiz- und Kühlkonzept für ein batterieelektrisches Fahrzeug basierend auf Sekundärkreisläufen“, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Braunschweig, 2017.

[23] U. Maniak, „Dynamisches Programmieren“, in *Wasserwirtschaft: Einführung in die Bewertung wasserwirtschaftlicher Vorhaben*, in VDI-Buch. ISBN: 978-3-642-59510-3: Springer Berlin, Heidelberg, 2000, S. 219-225.

[24] S. Philippi, K. Ahmed, und J. Ratajczyk, „Dynamische Programmierung“, HTW Aalen, Aalen, Jan. 2017. Zugegriffen: 3. November 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://docplayer.org/57368889-Dynamische-programmierung.html>

- [25] J. Larminie und J. Lowry, *Electric vehicle technology explained*, Second edition. Chichester, West Sussex, United Kingdom: Wiley, a John Wiley & Sons, Ltd., Publication, 2012.
- [26] G. Previati, G. Mastinu, und M. Gobbi, „Thermal Management of Electrified Vehicles—A Review“, *Energies*, Bd. 15, S. 1326, Feb. 2022, doi: 10.3390/en15041326.
- [27] „TLK Energy: Dichte von Luft“, *TLK Energy*, 2023. <https://tlk-energy.de/tools/dichte-luft> (zugegriffen 15. März 2023).
- [28] K. Li u. a., „Investigation on the performance and characteristics of a heat pump system for electric vehicles under extreme temperature conditions“, *Case Studies in Thermal Engineering*, Bd. 27, Okt. 2021, doi: 10.1016/j.csite.2021.101308.
- [29] M. Konz, N. Lemke, S. Fösterling, und M. Eghtessad, „Spezifische Anforderungen an das Heiz-Klimasystem elektromotorisch angetriebener Fahrzeuge“, *FAT-Schriftenreihe*, Mai 2011.
- [30] M. Holzer und B. Knerr, „Pareto Front generation for a tradeoff between area and timing“, in *Austrochip 2006 Tagungsband*, Graz, Okt. 2006, S. 131–134. [Online]. Verfügbar unter: <http://hdl.handle.net/20.500.12708/69217>
- [31] F. Widmer, A. Ritter, P. Duhr, und C. H. Onder, „Battery lifetime extension through optimal design and control of traction and heating systems in hybrid drivetrains“, *eTransportation*, Bd. 14, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.etrans.2022.100196.