
BACHELORARBEIT

Herr
Tong Yu

**Entwicklung eines
thermischen
Simulationsmodells für Li-
Ionen-Zellen**

Mittweida, 2020

Fakultät EIT

BACHELORARBEIT

Entwicklung eines thermischen Simulationsmodells für Li- Ionen-Zellen

Autor:
Tong Yu

Studiengang:
**Elektro- und Informationstechnik
(Doppelabschluss)**

Seminargruppe:
EI16wA2-BC

Erstprüfer:
Prof. Dr.-Ing. Lutz Rauchfuß

Zweitprüfer:
Dipl.-Ing. Jan Roloff

Einreichung:
Mittweida, 14. August 2020

Verteidigung/Bewertung:
Mittweida, 2020

Faculty EIT

BACHELOR THESIS

Development of a thermal simulation model for Li-ion cells

author:

Tong Yu

course of studies:

**Electrical engineering and information
technology (double degree)**

seminar group:

EI16wA2-BC

first examiner:

Prof. Dr.-Ing. Lutz Rauchfuß

second examiner:

Dipl.-Ing. Jan Roloff

submission:

Mittweida, 14. August 2020

defence/ evaluation:

Mittweida, 2020

Bibliografische Beschreibung:

Yu Tong:

Entwicklung eines thermischen Simulationsmodells für Li-Ionen-Zellen, 37
Seiten, 29 Abbildung, Hochschule Mittweida, University of Applied Sciences,
Fakultät EIT. Bachelor, 2020

Referat:

Ziel dieser Arbeit ist, ein thermisches Modell für Li-Ionen-Zellen zu entwickeln.
Außerdem die Entwicklung des thermischen Modells hat noch Testszenario und
praktische Nutzenanwendung, um die Gültigkeit des Modells zu prüfen.

Bacheloraufgabe für Yu Tong

Mittweida, 15.04.2020

Thema: Entwicklung eines thermischen Simulationsmodells für Li-Ionen-Zellen

Die Anwendung von Akku-Geräten ist mannigfaltig und setzt sich aufgrund des fehlenden Kabels weiter durch. Der Überwachung der Zelle kommt dabei eine große Bedeutung zu, weil damit in entscheidendem Maße die Lebensdauer der Zelle beeinflusst wird. Speziell die Temperatur hat entscheidenden Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Li-Ionen-Zelle und die Lebensdauer. Diese Aufgabe beschäftigt sich mit Wärmeentwicklung in den Zellen hervorgerufen vom Stromfluss.

Arbeitspakete:

1. Inbetriebnahme des Batterie-Modells von Herr Bu Naiqi mit einer Kapazität von 3500mAh in PORTUNUS
 - Stimulation des Batteriemodells mit der externen Stromquelle I1.1 zur Erzeugung von Lade- und Entladeströmen zur Erzeugung von Verlustleistung als Quelle der Erwärmung von Zellen
2. Entwicklung eines Temperaturmodells in PORTUNUS zur Nachbildung des Erwärmungsverlaufes ϑ [K] (nach dem Einkörpermodell)
 - Parametrierung des Einkörpermodells:
 - o mit dem Wärmeabgabevermögen A [W/K]
 - o der Verlustleistung P_v [W]
 - o der Umgebungstemperatur ϑ_0 [K] und
 - o der Enderwärmung ϑ_{end} [K] mit Hilfe des maximalen Entladestromes der Zelle
 - Entladung \rightarrow exotherme chemische Reaktion \rightarrow Temperatur steigt
 - Ladung \rightarrow schwach endotherme chemische Reaktion \rightarrow Temperatur sinkt
 - Berechnung der Verlustleistung über dem internen Widerstand R_i unabhängig von der Stromrichtung \rightarrow Temperatur steigt an
 - Überlagerung der Erwärmungsverläufe aus der Verlustleistungsberechnung am R_i und der exothermen oder endothermen chemischen Reaktion beim Entladen oder Laden
3. Entwicklung von Testszenarien für die thermische Untersuchung von Zellen
 - Entladung \rightarrow ständiger Wechsel zwischen Laden und Entladen (Quelle I1.1), dabei soll der SOC sinken bis zum Erreichen der Entladeschlussspannung ($U_{00}=2,5V$)
 - Ladung \rightarrow ständiger Wechsel zwischen Laden und Entladen (Quelle I1.1), dabei soll der SOC steigen bis zum Erreichen der Ladeschlussspannung ($U_{00}=4,2V$)
 - Geringer Stromfluss \rightarrow Temperatur nähert sich der Umgebungstemperatur $T=20^\circ C$ oder $\vartheta=0$ Kelvin

Hochschulbetreuer:

Prof. Dr.-Ing. Lutz Rauchfuß

Inhalt

Inhalt I

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
1 Einleitung.....	1
1.1 <i>Die Wichtigkeit der Temperaturüberwachung</i>	1
1.2 <i>Inhalte und Struktur der Bachelorarbeit</i>	2
2 Modell der Li-Ionen-Zellen	4
2.1 <i>Laden und Entladen der Li-Ionen-Zellen.....</i>	4
2.1.1 <i>Aufbau der Zellen</i>	4
2.1.2 <i>Der Vorgang des Ladens und Entladens</i>	4
2.2 <i>Häufig verwendete Li-Ionen-Zellen-Modelle</i>	5
2.2.1 <i>Rint-Modell.....</i>	6
2.2.2 <i>Thevenin-Modell.....</i>	6
2.2.3 <i>Ersatzschaltbild</i>	7
2.2.4 <i>PNGV-Modell</i>	8
2.2.5 <i>Andere Modelle</i>	8
3 Thermisches Modell.....	9
3.1 <i>Berechnung des thermischen Vorgangs.....</i>	9
3.2 <i>PWM.....</i>	11
3.3 <i>PT1-Glied.....</i>	12
3.3.1 <i>Mit Block darzustellen</i>	12
3.3.2 <i>Mit Programm ohne Exp-Funktion darzustellen</i>	14
3.4 <i>Vollständiges thermisches Modell in der PORTUNUS.....</i>	15
4 Testszenario für die thermische Untersuchung von Zellen	17
4.1 <i>Theorie.....</i>	17
4.2 <i>Mein Modell.....</i>	17
4.3 <i>Thermischer Vorgang des Entladens.....</i>	18

4.4	<i>Thermischer Vorgang des Ladens</i>	19
5	Eine praktische Nutzenanwendung	21
5.1	<i>WLTP.....</i>	21
5.2	<i>Die Geschwindigkeit und der Strom</i>	22
5.3	<i>Regulieren die Temperatur der Nutzenanwendung.....</i>	24
6	Zusammenfassung	28
Literatur		29
Selbstständigkeitserklärung		31

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 :Explosionen des Note 7	1
Abbildung 2:Explosionen des Tesla.....	1
Abbildung 3:Aufbau der Zelle	4
Abbildung 4:Laden bei 1C	5
Abbildung 5:Entladen bei 1C	5
Abbildung 6:Rint-Modell	6
Abbildung 7:Thevenin-Modell	7
Abbildung 8:Verwendetes Ersatzschaltbild	7
Abbildung 9:PNGV-Modell.....	8
Abbildung 10:Die Kurve der Erwärmung.....	10
Abbildung 11:Die Kurve der Abkühlung	10
Abbildung 12:Entladung und Abkühlung.....	11
Abbildung 13:PWM in der PORTUNUS	11
Abbildung 14:Parameter der PWM.....	11
Abbildung 15:Die Kurve der PWM.....	12
Abbildung 16:PT1-Glied-Modell.....	13
Abbildung 17:Die Kurve des PT1-Glied-Modells.....	13
Abbildung 18:Erwärmung und Abkühlung mit PT1-Glied	14
Abbildung 19:Erwärmung und Abkühlung mit PT1-Glied	14
Abbildung 20:Nomtemperatur erreichen	14

Abbildung 21:Kurve des Entladens	18
Abbildung 22:Vorgang des Ladens ohne geringen Strom	19
Abbildung 23:Vorgang des Ladens mit geringem Strom.....	20
Abbildung 24:Zellestrom von der WLTP	22
Abbildung 25:Der Strom im Vollzyklusbild	23
Abbildung 26:Die Temperatur für den ersten Zyklus	24
Abbildung 27:Höhepunkt der Temperatur.....	24
Abbildung 28:Vermessung der höchsten Temperatur.....	25
Abbildung 29:Das Diagramm der praktischen Nutzenanwendung.....	26

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:Eigenschaft der Spannung und Strom	18
Tabelle 2:Bedingungen der WLTP.....	21
Tabelle 3: WLTC-Klasse-3-Testzyklus.....	22

Abkürzungsverzeichnis

μC	<i>Microcontroller</i>
C_p	<i>Polarisationskapazität</i>
DC	<i>Direct Current</i>
K_p	<i>Koeffizient des PTI-Reglers</i>
LZI	Lineares zeitinvariantes System
P_v	<i>Verlustleistung</i>
PWM	Pulsdauermodulation
R_p	<i>Polarisationswiderstand</i>
SOC	<i>State of Charge</i>
U_{00}	Ruhspannung von Lithium-Ionen-Batterien
U_{kl}	<i>Klemmenspannung</i>
U_{oc}	<i>Ideale Spannungsquelle</i>
WLTP	<i>Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure</i>
ϑ_0	<i>Anfängliche Erwärmung</i>
ϑ_{end}	<i>Schließliche Erwärmung</i>

1 Einleitung

Die Entwicklung der Technik auf den Gebieten des Elektroautos und der intelligenten Geräte verbessert unsere Leben in den letzten Jahren. Um ihre Sicherheit und Leistung kümmern die Menschen sich sehr, beide Punkte sind eng mit der Energiequelle der Zellen verbunden. Instabile Zellen dienen den immer leistungsfähigeren Prozessoren nicht genug und es sogar geschieht gefährlichen Situationen wie thermisches Durchgehen.

1.1 Die Wichtigkeit der Temperaturüberwachung

Die Geräte, die bessere Wärmemanagement haben aufbauen, werden automatisch Maßnahmen ergreifen, z. B. das Drehzahl des Radiators erhöhen, einige Funktionen oder direkt das System deaktivieren. Wenn die Wärmemanagement nicht ausgezeichnet ist, wird zum thermischen Durchgehen führen. Die Veränderung, wenn die Temperatur steigt, erhöht die Temperatur weiter, schließlich brennt die Zelle oder explodiert. Die zwei bekannten Ereignisse sind Samsung Galaxy Note 7 Ereignis und Tesla Ereignis.



Abbildung 1 :Explosionen des Note 7

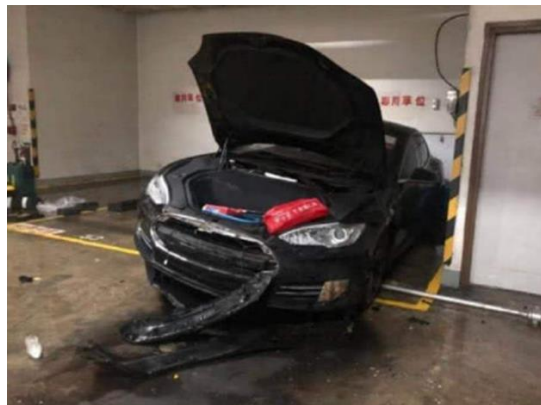


Abbildung 2:Explosionen des Tesla

Dies zeigt die Wichtigkeit, die Temperatur der Zelle zu beobachten und steuern.

1.2 Inhalte und Struktur der Bachelorarbeit

Im zweiten Kapitel wird die Methode des Ladens und Entladens der Zellen erläutert und einige bekannte Zelle-Modelle aufgelistet.

Im dritten Kapitel wird die Formel und das Bild des thermischen Modells sowie die Verwendung von PWM und PT1-Regler beschrieben.

Im vierten Kapitel wird ein Testszenario des thermischen Modells beschrieben.

Im fünften Kapitel wird die praktische Anwendung des thermischen Modells beschrieben.

2 Modell der Li-Ionen-Zellen

Meine Aufgabe verwendet die Simulation, um der Vorgang der Li-Ionen-Zellen darzustellen. Eine geeignete Simulation kann es den Menschen leichter machen zu verstehen, wie die Maschinen funktionieren, welche Teile oder welche Daten Fehler haben. Und mit Simulation können die Benutzer die Zeit sparen. Der Aufbau eines genauen Modells ist die Prämisse der Simulation.

2.1 Laden und Entladen der Li-Ionen-Zellen

2.1.1 Aufbau der Zellen

Normalweise besteht eine Lithium-Ionen-Zelle aus einer Graphit-Elektrode (negativ) und einer Lithium-Metalloxyd-Elektrode (positiv). Die Ladungsträger sind die Lithium-Ionen. Sie haben eine geringe Größe und eine hohe Beweglichkeit. Sie lagern sich beim Laden der Zelle zwischen den Molekülschichten des Graphits ab. Beim Entladen wandern die Lithium-Ionen zurück zur Lithium-Metalloxyd-Elektrode. [1]

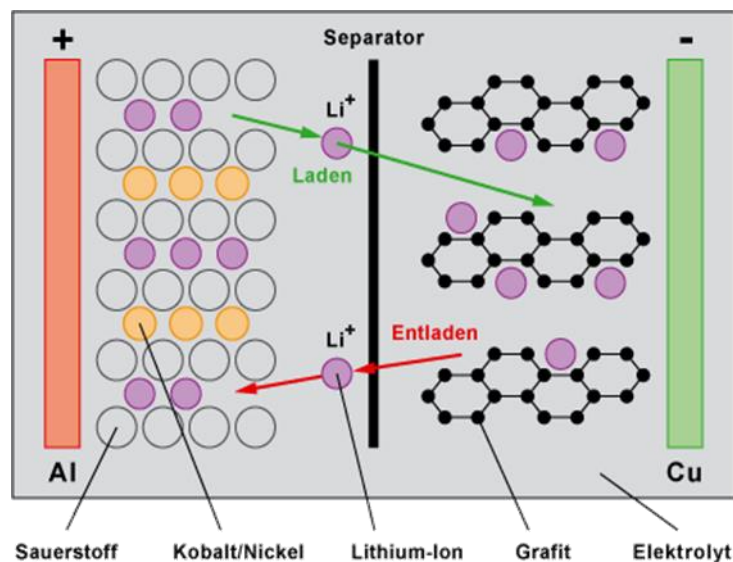


Abbildung 3:Aufbau der Zelle

2.1.2 Der Vorgang des Ladens und Entladens

Unabhängig von dem Typ von der Zelle kann die Ladeverfahren in den folgenden Stufen erfolgen: Konstantstrom-Ladeverfahren, Konstantspannungs-Ladeverfahren und Endeverfahren. Die Zelle soll zuerst mit einem konstanten Strom laden, zu gleicher Zeit

wird die Spannung von der anfänglichen Spannung schnell bis Ladeschlussspannung steigen. Dann wird die Ladeschlussspannung konstant halten und den Ladestrom allmählich zurückgehen. Die Zeit, zu der die Zelle verwendet wird, ist nämlich Entladevorgang. Das Strom wird konstant halten, und die Spannung reduziert von der Ladeschlussspannung auf minimalen Wert. Nun soll das Strom als 0A sein wird, andernfalls wird die Zelle irreversibel beschädigt.

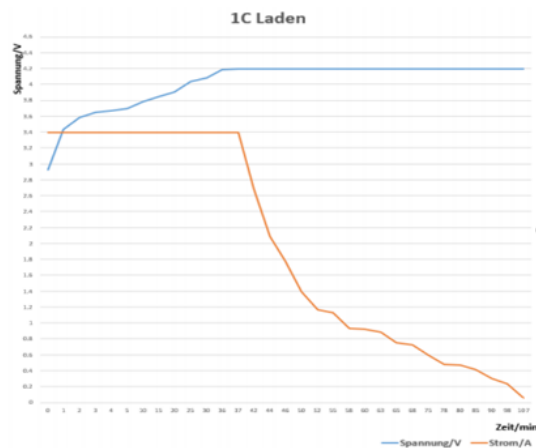


Abbildung 4:Laden bei 1C

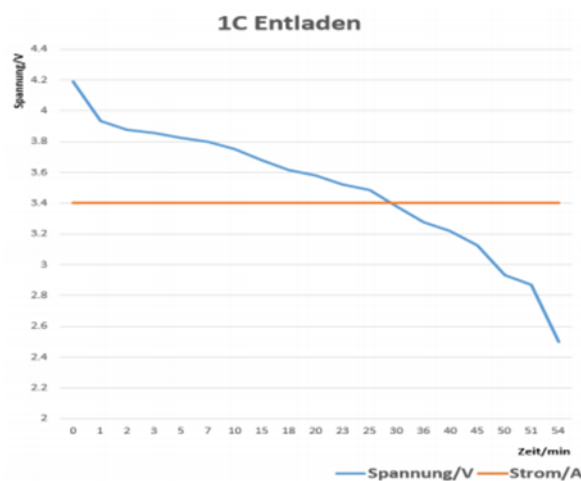


Abbildung 5:Entladen bei 1C

Die Daten in die beiden Diagramme sind von Herrn. Zhang Gufei. [2]

2.2 Häufig verwendete Li-Ionen-Zellen-Modelle

Mit der Entwicklung der Zellentechnologie gibt es viele Arten von Zellen-Modellen. Verschiedene Modelle haben ihre eigenen Eigenschaften und verschiedene Anwendungsbereich. Häufig verwendete Li-Ionen-Zellen-Modelle sind Elektrochemisches-Modell, Thermodynamisches-Modell und Ersatzschaltbild-Modell usw. In dieser Bachelorarbeit entscheide ich mich für Ersatzschaltbild-Modell. Das Ersatzschaltbild-Modell muss keine

Analyse der elektrochemischen Reaktion innerhalb der Zellen haben. Es wird von der Leerlaufspannung, dem DC-Innenwiderstand und dem Polarisationswiderstand der Schaltung die Eigenschaften der Zellen charakterisieren.

Bekannte Ersatzschaltbild-Modelle und ihre Eigenschaften:

2.2.1 Rint-Modell

Rint-Modell nennt man auch Innenwiderstand-Modell. Es enthält die ideale Spannungsquelle U_{OC} und den Innenwiderstand R_i . Weil das Modell die Polarisations-eigenschaften der Zellen nicht berücksichtigt, ist die Genauigkeit des Modells gering.

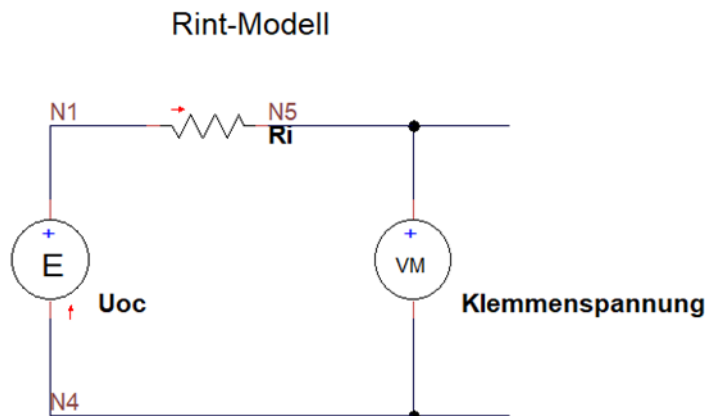


Abbildung 6:Rint-Modell

In diesem Modell: $U_{kl} = U_{oc} - (R_i * I)$

2.2.2 Thevenin-Modell

Thevenin-Modell fügt Berücksichtigung der Polarisation auf der Grundlage von Rint-Modell, in dem U_{oc} ist die ideale Spannungsquelle, R_i ist der ohmsche Innenwiderstand, R_p ist der Polarisationswiderstand und C_p ist der Polarisationskapazität

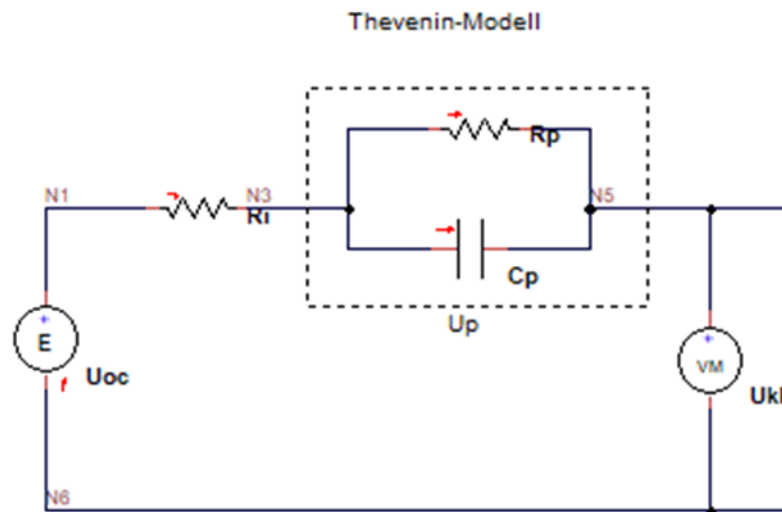


Abbildung 7: Thevenin-Modell

In diesem Modell: $U_{OC} = U_{Kl} - (R_i * I) - U_p$

2.2.3 Ersatzschaltbild

In der Praxis wird die Polarisation in zwei Teile unterteilt: Differenzpolarisation und elektrochemische Polarisation. Von den Ursachen der Polarisation sind unterschiedlich, so dass die Zeitkonstante auch unterschiedlich sind. Die bestimmten Daten habe ich im Labor wegen verschiedener unwiderstehlicher Faktoren nicht gemessen, deshalb benutze Daten von Herr Bu Naiqi. [3]

Auf der Grundlage des Thevenin-Modells wird die in dieser Bachelorarbeit verwendete Ersatzschaltbild:

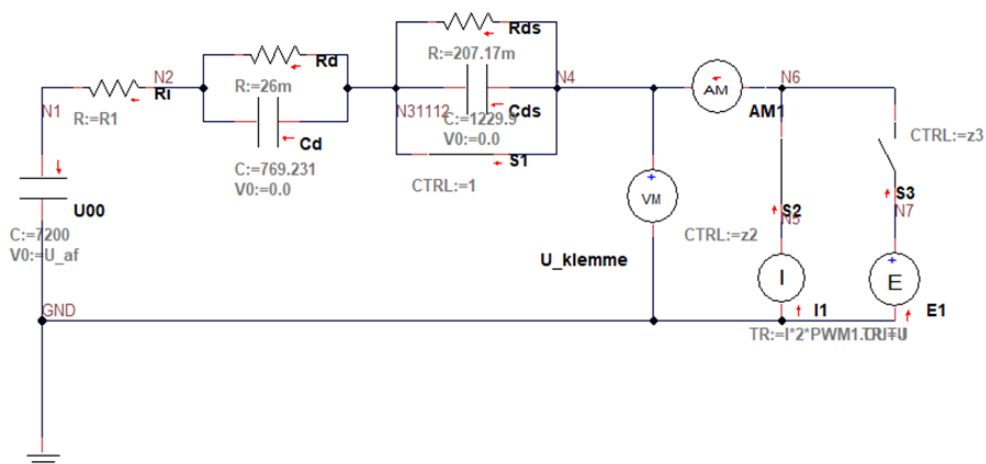


Abbildung 8: Verwendetes Ersatzschaltbild

In diesem Modell:

Für Ladevorgang: $U_{00} = U_{Kl} - U_{Ri} - U_D$

Für Entladevorgang: $U_{00} = U_{Kl} + U_{Ri} + U_{DS} + U_D$

Weil es im Ladevorgang keine Doppelschicht hat, wird das Ersatzschaltbild mit einem Schalter(S1) hinzugefügt. Wenn die Zelle lädt, wird es als 0 sein; wenn die Zelle entlädt, wird es als 1 sein.

2.2.4 PNGV-Modell

Das PNGV-Modell berücksichtigt auf Basis von Thevenin-Modell die Auswirkungen des Laststrom.

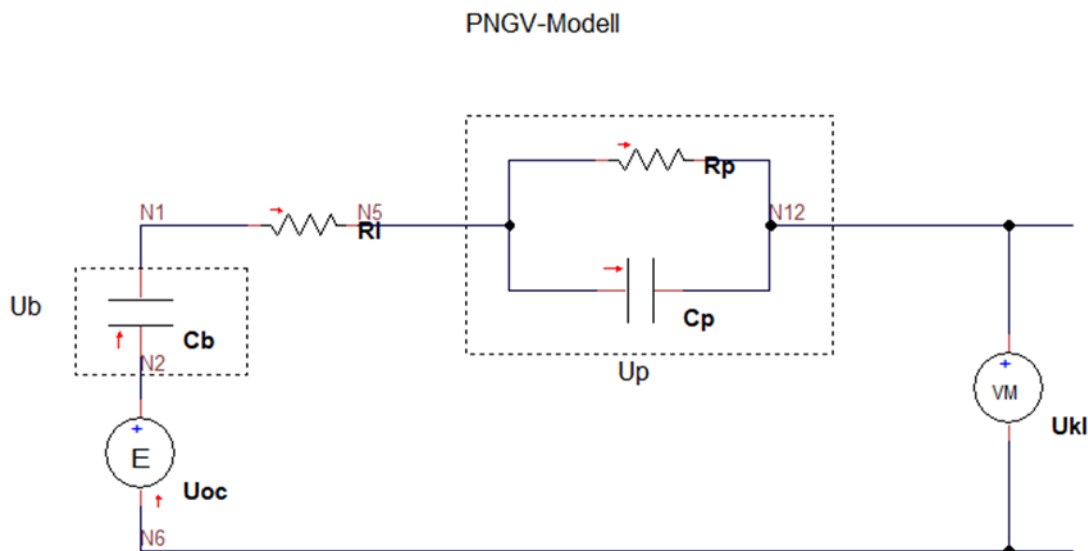


Abbildung 9:PNGV-Modell

In diesem Modell: $U_{Kl} = U_{OC} - (R_i * I) - U_p - U_b$

2.2.5 Andere Modelle

Zusätzlich zu den oben genannten Modellen haben die Forscher weitere Modelle vorgeschlagen. Z.B Gassing-Modell und verbessertes PNGV-Modell. Diese Arbeit soll hier nicht wiederholt werden.

3 Thermisches Modell

Die Verlustleistung wird in der Schaltung durch das Vorhandensein von Innenwiderstand erzeugt. Es wird in Form von Wärme abgegeben und die Temperatur erhöht. Durch die Messung oder Berechnung der Wärme kann der Anwender den Arbeitszustand der Maschine kennen. Wenn die Temperatur nicht normal in der Zeit ist, kann rechtzeitige Maßnahme ergriffen werden. Daher soll die Temperatur empfindlich, schnell und genau beobachten.

3.1 Berechnung des thermischen Vorgangs

Der vollständige thermische Vorgang soll Wärmespeichern und Wärmeabgeben umfassen.

Wärmespeichern:

$$Q_s = cm\Delta T = C\Delta T$$

Mit: Qs: Die Wärme, die das System gespeichert;
 c: spezifische Wärmekapazität;
 m: Masse des Systems;
 C: Wärmekapazität;
 ΔT: Temperaturdifferenz.

Wärmeabgaben:

$$Q_a = \alpha * S * T * \Delta t = A * T * \Delta t$$

Mit: Qa: die Wärme, die das System;
 α: Wärmeübergangskoeffizient;
 S: Oberfläche;
 A: Wärmeabgabevermögen;
 Δt: Zeitdifferenz.

Damit kann man die vollständige Gleichung entwickeln:

erzeugte Wärme = abgegebene Wärme + gespeicherte Wärme [4]

$$P_v * \Delta t = A * \vartheta * \Delta t + C * \Delta \vartheta \quad (1.)$$

Mit: ϑ : Erwärmung;
Pv: Verlustleistung.

Durch Berechnung der DGL (1) können wir folgendes Resultat nehmen:

$$\vartheta = \vartheta_{end} * \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) + \vartheta_0 * e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2.)$$

Wenn wir die Gleichung (2) in der Software PORTUNUS einschreiben:

```
1. double A=0.00289; //Konstante
2. double Theta=0;
3. double Theta0=0,
4. double tau=300; //Erfahrungenwert
5. double I=3.4;
6. double Ri=10m;
7. double Pv=0;
8. Pv=I*I*Ri;
9. Theta=Pv/A*(1-exp(-t/tau))+Theta0*exp(-t/tau);
```

Zeile 1-7 sind Deklaration und Zeile 8-9 sind Wertzuweisung.

Mit den Werten der ϑ_{end} und ϑ_0 ist es offensichtlich, dass das Verhalten exotherm sein soll:

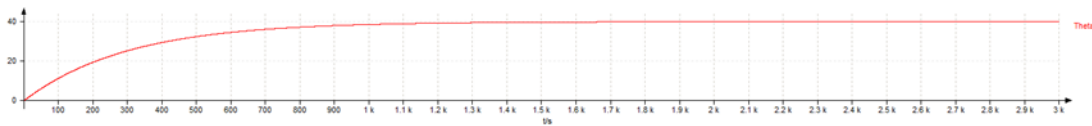


Abbildung 10: Die Kurve der Erwärmung

Die ende Erwärmung wurde als 40k angenommen, weil dieser Wert entspricht meinem Zelle-Modell. Wenn die Kurve der Abkühlung, die von 40k auf 0k reduziert, bekommen möchten, soll die Werte der ϑ_{end} und ϑ_0 geändert werden:

```
1. double A=0.00289; //Konstante
2. double Theta=0;
3. double Theta0=40,
4. double tau=300; //Erfahrungenwert
5. double I=0;
6. double Ri=10m;
7. double Pv=0;
8. Pv=I*I*Ri;
9. Theta=Pv/A*(1-exp(-t/tau))+Theta0*exp(-t/tau);
```

Jetzt ist das Diagramm:

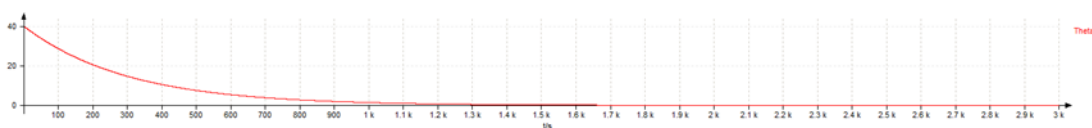


Abbildung 11: Die Kurve der Abkühlung

Durch die Analyse die beiden Diagramme können wir sehen, dass die Temperaturänderungen am Anfang schnell, dann langsam sind. Schließlich liegt es nahe am Stabilisierungswert.

Bei den Zellen ist die Entladung der Prozess der Verwendung, an dem eine große Menge an Wärme abgegeben wird. Wenn die SOC 0 ist, beginnt die Batterie unter natürlichen Bedingungen abzukühlen:

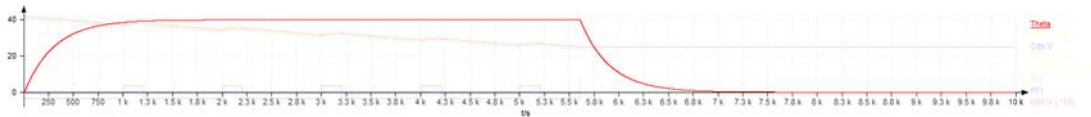


Abbildung 12:Entladung und Abkühlung

Das oben simuliert eine Zelle kontinuierlicher Betrieb und Abkühlung. Um die thermische Änderung besser zu beobachten, wir möchten die Zelle Entladung und Abkühlung abwechseln lassen. Darum soll das Strom mit negativem Wert und 0 abwechseln, die Methode finden wir im folgenden Inhalt können.

Darüber wurden keine Stromänderungen während des Ladevorgang betrachtet, bis das thermische Modell getestet ist.

3.2 PWM

Die PWM ist eine Modulationsart, bei der eine technische Größe zwischen zwei Werten wechselt. Dabei wird bei konstanter Frequenz der Tastgrad eines Rechteckpulses moduliert, also die Dauer der ihn bildenden Impulse. [7]



Abbildung 13:PWM in der PORTUNUS

Parameter	Anzeige/Ausgaben	Kommentar
Periodendauer [s]	<input type="text" value="1"/>	
Relative Einschaltdauer [/]	<input type="text" value="0.5"/>	
Verzögerung [s]	<input type="text" value="0"/>	
Phasenlage [°]	<input type="text" value="0"/>	

Abbildung 14:Parameter der PWM

Das Diagramm deren Ausgang ist folgend:

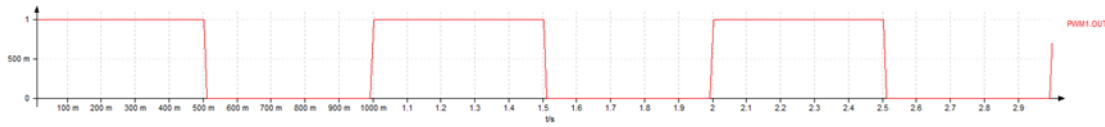


Abbildung 15: Die Kurve der PWM

Aus dem Diagramm oben kann man sehen, wenn die Periodendauer gleich 1s, die relative Einschaltdauer gleich 0,5 und die Verzögerung gleich 0 ist, wechselt die Kurve alle 0,5s zwischen 1 und 0. Im Idealfall sollte es keine Verzögerung für diese Änderung geben, aber auf diesem Diagramm gibt es eine 10ms-Verzögerung in jeder Änderung. Dies liegt daran, dass man die Schrittweite beim Simulieren festlegen muss. Wenn man genauere Ergebnisse oder kleinere zufällige Abweichung wünscht, kann man die Schrittweite reduziert, aber gleichzeitig wird die Laufzeit erhöht.

3.3 PT1-Glied

Als PT1-Glied bezeichnet man ein LZI-Übertragungsglied in der Regelungstechnik, welches ein proportionales Übertragungsverhalten mit Verzögerung 1. Ordnung aufweist. [5]

3.3.1 Mit Block darzustellen

Wir haben im Kurs Regelungstechnik [6] gelernt, die Differentialgleichung des PT1-Gliedes ist:

$$\tau * \frac{dx_a(t)}{dt} + x_a(t) = K_p * x_e(t)$$

Zuerst wird die Gleichung durch Laplace-Transformation transformiert:

$$\tau * p * (x_a(p) - x_{a(t)}(0)) + x_a(p) = K_p * x_e(p)$$

Dann wird es mit $x_{a(t)}(0) = 0$ vereinfacht:

$$(\tau * p + 1) * x_a(p) = K_p * x_e(p)$$

Mit $G(p) = \frac{x_a(p)}{x_e(p)}$ ist die Übertragungsfunktion:

$$G(p) = \frac{K_p}{(\tau * p + 1)} = K_p * \frac{\frac{1}{\tau}}{p + \frac{1}{\tau}} \quad (3.)$$

Die Übertragungsfunktion mit Laplace-Inversionstransformation ist:

$$h(t) = K_p * \left(1 - e^{-\frac{1}{\tau} * t}\right) = K_p * \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (4.)$$

In diesem Modell ist $K_p = \vartheta_{end} = \frac{P_v}{A}$.

Ein Vergleich von (2) und (4) kann es gefunden werden, wenn ϑ_0 gleich 0 ist, kann (2) durch (4) ersetzt werden. Die PORTUNUS bietet Block, so dass wir ein PT1-Glied-Modell erstellen können:

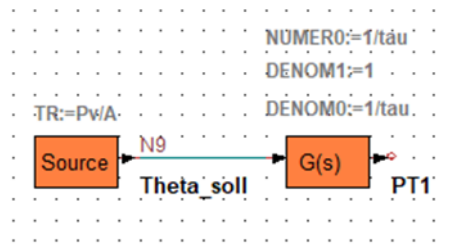


Abbildung 16:PT1-Glied-Modell

Folgendes ist dessen Diagramm:

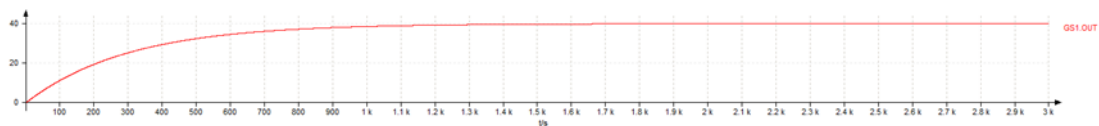


Abbildung 17:Die Kurve des PT1-Glied-Modells

Das Diagramm oben zeigt es, das thermische Verfahren der Erwärmung simuliert zu werden. Gilt dieses Modell also auch für die Abkühlung, das heißt, wenn ϑ_0 nicht gleich 0 ist? Für PT1-Glied gibt es einen Prozess-zwischen Zeitbereich und Frequenzbereich wechseln, d. h. den Prozess der Laplace-Transformation und Laplace-Inversionstransformation. Wenn der Eingang als 1 ist, ist im Frequenzbereich als $\frac{1}{p}$, kombiniert mit (3) und L-Inversionstransformation, um (2) zu erhalten. Wenn der Eingang als 0 ist, soll die Ausgabe mit Transformation als $e^{-\frac{t}{\tau}}$. Daher glauben wir, dass PT1-Glied-Modell die thermische Gleichung perfekt ersetzen und damit die Komplexität der Programmierung reduzieren kann.

Folgendes Diagramm ist die Kurve der Erwärmung und Abkühlung mit PT1-Glied:

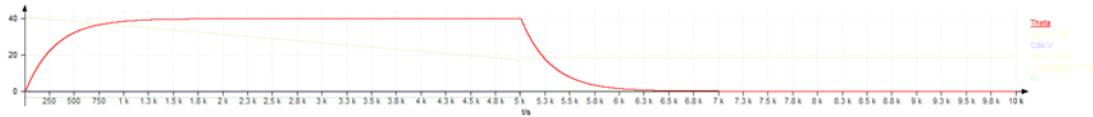


Abbildung 18: Erwärmung und Abkühlung mit PT1-Glied

Um die Änderung der Temperaturänderung besser zu beobachten, wurde die Periodendauer der PWM auf 1000s abgesenkt:

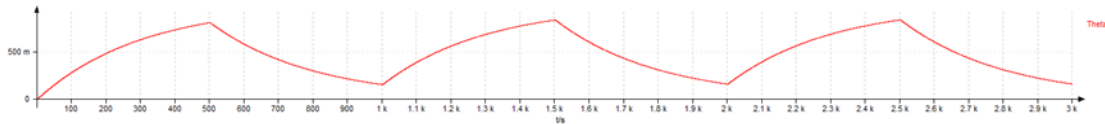


Abbildung 19: Erwärmung und Abkühlung mit PT1-Glied

Wie wir im Abkühlungsverhalten sehen können, sinkt die Temperatur nicht auf 0, weil bei der Periodendauer von 1000s in einem kurzen Zeitraum die Temperatur nicht auf einen stabilen Wert ansteigen, d. h. die Kühlung beginnt nicht mit der Nenntemperatur. Dies bewirkt, dass die Rate des Rückgangs geringer als Erhöhung ist. So dass die Periodendauer genug ist, dass die Zelle schließlich die Nenntemperatur erreichen wird:

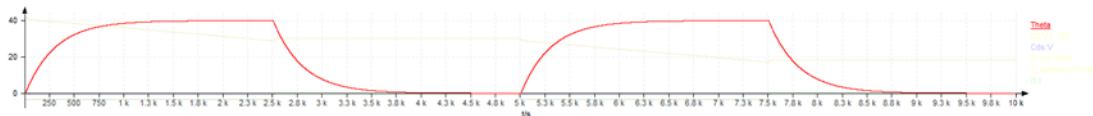


Abbildung 20: Nenntemperatur erreichen

3.3.2 Mit Programm ohne Exp-Funktion darzustellen

Es ist bequem und intuitiv, die Funktion des PT1-Gliedes über Block zu implementieren, oder mit (2) direkt im PORTUNUS programmieren. Aber dieses Modell soll im μC realisieren, dadurch entsteht ein Problem, dass der μC wahrscheinlich keine exp-Funktion hat. Um die Anwendbarkeit dieses Modells zu verbessern, ist es notwendig, das PT1-Glied in eine Form ohne exp-Funktion zu ändern und dann im PORTUNUS neu zu programmieren.

Wie die Beschreibung in 3.3.1 zeigt, was zu beachten ist die Veränderung zwischen Übertragungsfunktion und Übergangsfunktion. In diesem Modell ist die Übertragungsfunktion:

$$\vartheta(p) = \vartheta_{end} * \frac{\frac{1}{\tau}}{p + \frac{1}{\tau}} = 40k * \frac{\frac{1}{\tau}}{p + \frac{1}{\tau}}$$

Eingang $x(t) = 1(t)$ durch Laplace-Transformation ist $x(p) = \frac{1}{p}$, damit ist Ausgang $\vartheta(p) = 40k * \frac{\frac{1}{\tau}}{p*(p+\frac{1}{\tau})}$. Der Ausgang durch Laplace-Inversionstransformation ist $\vartheta = 40k * (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$, mit $\vartheta_{end} = 40k$.

Betrachten wir zuerst die primitivste exp-Funktion: e^x , wir können die Erweiterung der Funktion verwenden:

$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots$$

Dadurch mit (2) (denken wir ϑ_0 an 0) können wir folgende Gleichung bekommen:

$$\vartheta = \vartheta_{end} * \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) = \vartheta_{end} * \left(1 - \left(1 - \frac{t}{\tau} - \left(\frac{1}{2!}\right) * \left(\frac{t}{\tau}\right)^2 - \dots\right)\right) \approx \vartheta_{end} * \left(\frac{t}{\tau}\right) \quad (5.)$$

Mit $t \ll \tau$

Daher scheint sich die Änderung in der kurzen Zeit linear. Basierend auf dieser könne wir die Gleichung oben verwenden, indem wir das gesamte Bild in kleine Kurven unterteilen. Nehmen wir den Endwert der vorherigen Kurve als Anfangswert der nächsten Kurve, und das resultierende Ergebnis wurde addiert, um den aktuellen Temperaturwert abzubekommen.

```
1. double PT1=0;
2. double PT1_alt=0;
3. double Theta_vor=0;
```

Ich stelle PT1 als der Wert der letzten Ausgabe, PT1_alt als der Wert der sogenannte Endwert und Theta_vor als der Wert des Nennwertes der Temperatur ein. Am Anfang soll Theta_vor = ϑ_{end} -PT1_alt sein. Weil die Voraussetzung für die Einrichtung von (5) ist $t \ll \tau$, nehmen wir t als Schrittweite h an. Der letzte Ausgang PT1 ist der Wert der Temperatur, die wir brauchen. Das Programm in der PORTUNUS:

```
1. Theta_vor=Pv/A-PT1_alt;
2. PT1=1/tau*h*Theta_vor+PT1_alt;
3. PT1_alt=PT1;
4. Theta=PT1;
```

Zurück zum Anfang, dort denken wir ϑ_0 an 0, d. h. wir haben nur einen Erwärmung-Teil davon in Betracht gezogen. Wenn der Vorgang der Zelle Abkühlung ist, Theta_vor wurde auf 0 ändern. Darüber liegt eine Beschreibung auf der Seite 12.

3.4 Vollständiges thermisches Modell in der PORTUNUS

Deklaration:

```

1. double Theta=0;
2. double Pv=0;
3. double A=0.00289;
4. double tau=300;
5. double I=-3.4;
6. double R1=10m;
7. double U=4.2;
8. double U1=3.5;
9. double Per=1k; //Periode
10. //PT1
11. double PT1=0;
12. double PT1_alt=0;
13. double Theta_vor=0;

```

Wertzuweisung:

```

1. Pv=AM1.I*AM1.I*R1; // I1.I ist der aktuelle Strom
2.
3. if (U_klemme.V<=2.5&&Theta<Pv/A) I=0;
4. if (U_klemme.V==2.5&&Theta==Pv/A) I=0; //entfernt eine Situation, wenn U_klemmer
   ist 2,5 und Theta ist 40
5.
6. Theta_vor=Pv/A*PWM1.OUT-PT1_alt;// PT1.(wenn t<<tau,Theta*(1-exp(-
   t/tau))=Theta*(t/tau))
7. PT1=1/tau*h*Theta_vor+PT1_alt;
8. PT1_alt=PT1;
9. Theta=PT1;

```

Es kann aus der Formel $\vartheta = \frac{I \cdot I \cdot R_i}{A} * \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) - \vartheta_0 * e^{-\frac{t}{\tau}}$ gesehen werden, dass I (Strom in der Leitung), Ri (Innenwiderstand), ϑ_0 (Erwärmung am Anfang) Parameter sind. Für A(Wärmeabgabevermögen), wenn die Erwärmung der Li-Ionen-Zelle stabil ist, wird die Abgegebene Wärme stabil auch sein, d. h. die Verlustleistung verwandelt ganz in gespeicherte Wärme: $P_v = A * \vartheta_{end} \rightarrow A = \frac{I \cdot I \cdot R_i}{\vartheta_{end}}$. Weil die Werte des Stroms,

Innenwiderstand und Erwärmung am Ende stabil sein werden, wird A also berechnet. Die Werte des Stroms und des Innenwiderstand soll echtzeitig messen, um die Erwärmung zu berechnen. Für ϑ_0 , wenn der Strom einer Zelle stabil ist, d. h. keine Änderung zwischen positiven und negativen Wert, wird es einfach am Anfang gemessen.

4 Testszenario für die thermische Untersuchung von Zellen

Ein geeignetes Testszenario für die thermische Untersuchung von Zellen sollte die Beziehung zwischen Temperatur und Zelleparametern genau ausdrücken.

4.1 Theorie

Zuerst, nach unserem Allgemeinwissen können die Zelle sich bei der Arbeit erwärmen, egal, ob es sich um das Laden oder Entladen handelt. Was ist also das Prinzip dieses Phänomens?

Nehmen wir als Beispiel Haushaltgeräte. Die Haushaltgeräte im Standby-Zustand haben sehr kleinen Stromverbrauchs, so dass der Entladungsstrom ist auch sehr klein. Obwohl theoretisch Wärme abgegeben wird, kann diese ignoriert werden, weil nach der thermischen Formel die Temperatur zu niedrig ist.

In der Arbeit von Haushaltgeräten wird die Zelle mit konstantem Strom entladen, so ist es nicht schwer zu sehen, die Temperatur wird allmählich bis zur Nenntemperatur steigen. Nach der Wärme-Abgabe-Formel können wir auch wissen, dass die abgegebene Wärme mit steigender Temperatur steigen wird. Wenn die Temperatur gleich Nennwert ist, ist Erwärmung gleich 0k. Nach diesem Punkt speichert die Zelle nicht mehr die Wärme, sondern gibt alles ab.

Schauen wir uns das Laden an. Denn Li-Ionen-Zellen nutzen den Lademodus mit ersten Konstantstrom und dann Konstantspannung, das Strom wird nach dem Punkt, der Spannung Abschlussspannung erreicht, reduziert. Daher zeigt die Temperatur die Eigenschaften des Anstiegens zuerst und dann fallen.

4.2 Mein Modell

Mein Modell ist das Ersatzschaltbild einer normalen Li-Ionen-Zelle, deren Eigenschaft der Spannung und Strom sind:

Strom[A]

Spannung[V]

Laden	$\leq 3,4$	$\geq 2,4$
Entladen	3,4	$\leq 4,2$

Tabelle 1: Eigenschaft der Spannung und Strom

Um die Parameter und Temperaturänderungen der Zelle bei der Arbeit zu visualisieren, wurden beide Vorgänge im PORTUNUS simuliert. Ich entscheide mich für Entladungsverhalten zuerst, weil die Änderungen bei Entladung einfacher als es bei Laden.

4.3 Thermischer Vorgang des Entladens

Ein vollständiger Entladungsverhalten sollte es sein: das SOC von 100% auf 0% reduziert, d. h. die Temperatur wird zuerst ansteigen; dann natürlich fällt, wenn das SOC 0% erreicht:

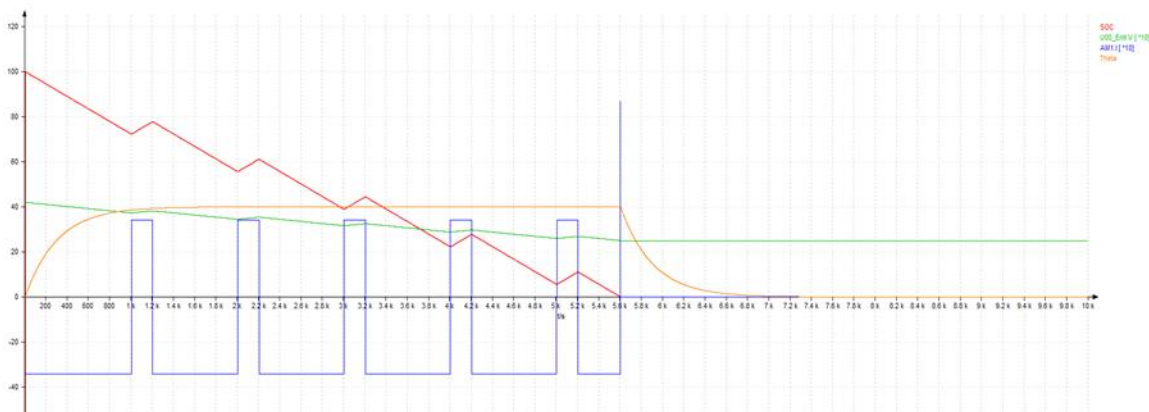


Abbildung 21: Kurve des Entladens

Zuerst können wir sehen, dass der Strom in der Abbildung nicht konstant $-3,4A$, weil ich simulierte, was wahrscheinlich im Leben passieren wird, d. h. die Zelle hat für eine Zeit gearbeitet und dann lädt. Dann bis SOC ist gleich 0%. An diesem Punkt wird der Strom auf 0 ändern und die Temperatur beginnt natürlich zu fallen.

Das Programm ist:

```

1. SOC=100*(U00_Entl.Q-(2.5*U00_Entl.C))/(1.7*U00_Entl.C);
2.   PWM=PWM2.OUT;
3.   if (PWM2.OUT==0)//Entladen
4.     {
5.       U=2.5;z2=1;z3=0;
6.       if (U00_Entl.V<=2.5&&Theta<Pv/A) {I=0;z2=0;z3=1;}
7.       if (U00_Entl.V==2.5&&Theta==Pv/A) {I=0;z2=0;z3=1;} //entfernt eine Situation, wenn U_klemmer ist 2,5 und Theta ist 40

```

```

8.
9.   }
10.  if (PWM2.OUT==1)//Laden
11.  {
12.      U=4.2;z2=1;z3=0;
13.      if(U00_Ent1.V>=4.2) {I=0;z2=1;z3=1;}
14.  }
    
```

Anderes Programm in Bezug auf Temperatur und PT1 wird hier nicht wiederholt.

Im Entladevorgang wurde PWM verwendet, um den Strom zu steuern. Weil originale PWM einfach 1 und 0 als Output kann, wenn den Ladestrom 3,4A und Entladestrom -3,4A will, soll den Wert des Quellenstrom eingestellt werden. Meine Meinung ist es, das PWM-Signal in doppelt so viel wie 3,4 zu verwandeln, d. h. $I*2*PWM$, und jetzt ist der Ausgang von PWM 6,8 und 0. Dann es soll nach unter 3,4 verschieben, so dass wir den Strom 3,4A und -3,4A nehmen. Der Wert in Stromquelle ist deshalb $I*2*PWM-I$. Wir müssen außerdem die Entladezeit größer als die Ladezeit lassen, damit das SOC sinken kann. Ich entscheide mich, den Relative Einschaltdauer als 0,2 und den Periodendauer als 1ks einzustellen, so dass die Ladezeit in einem Zyklus 200s und die Entladezeit 800s ist. Da die PWM mit Ausgang 1 beginnt, müssen wir sie verzögern, um diesen Teil des Ladens zu entfernen, da es die Nennspannung der Zelle überschreitet. Dann wurde 200s, wie die Ladezeit im Zyklus, gewählt.

4.4 Thermischer Vorgang des Ladens

Der Vorgang des Ladens ist ein bisschen komplizierter als Entladen, weil es gibt mehr zu beachten. Auf der einen Seite, wenn die Spannung auf 4,2V erreicht, die Stromquelle soll aus dem Strom getrennt wird. Auf der anderen Seite, wenn SOC in der Nähe von 100 ist, müssen einen geringen Strom zu Laden, so dass das SOC vollständig 100 erreicht.

In diesem Verfahren wurde auch PWM verwendet, um die Stromquelle zu steuern. Die Einstellung darin ist im Gegenteil von der PWM des Entladen.

Werfen wir einen Blick auf die Situation, die geringe Strom nicht hinzuzufügen:

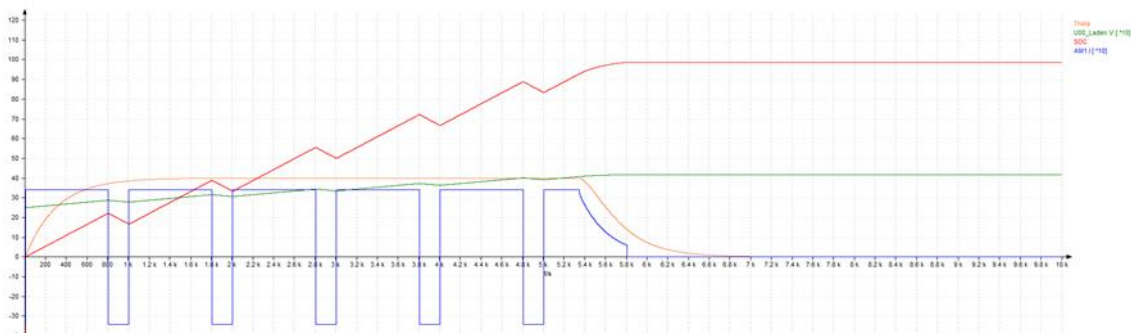


Abbildung 22:Vorgang des Ladens ohne geringen Strom

Wie wir sehen können, wie die Theorie ist, nimmt der Strom in der Endphase ab und die Temperatur dabei sinkt. Aber durch die Überwachung von SOC, fand ich, dass das SOC blieb am Ende bei 98,65. Dies liegt daran, dass die Spannung der Zelle immer höher wird, je kleiner die Spannungsdifferenz mit der Ladespannung und je kleiner der Strom, der geladen werden kann. Deswegen entschied ich mich einen geringen Strom von 0,1A in der Endphase hinzuzufügen, bis das SOC auf 100 ansteigt:

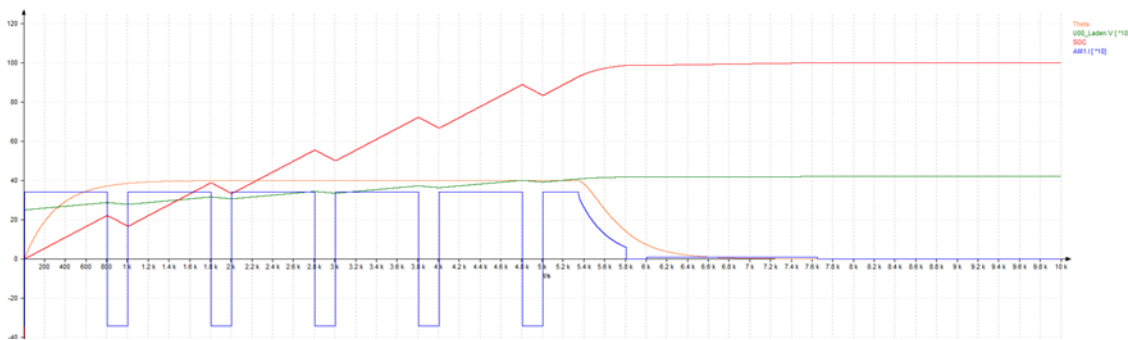


Abbildung 23: Vorgang des Ladens mit geringem Strom

Um es zu bestimmen, ob einen geringen Strom benutzt werden soll, wurden zwei Werte SOC1 und SOC2 im Programm gestellt, die SOC-Werte für die Laden und Entladen. In der Endphase muss nur es bestimmt werden, ob die beiden Werte identisch sind, um zu wissen, ob den geringen Strom erforderlich ist.

Das Programm dabei ist:

```

1. SOC=100*(U00_Laden.Q-(2.5*U00_Laden.C))/(1.7*U00_Laden.C);
2. if(SOC1==SOC2&&SOC>80) //wenn die Endeschlussspannung 4.2 ist, mit geringem Strom
3. {
4.     if (SOC<=100)I=0.1;
5.     else I=0;
6. }
7. else
8. { PWM=PWM1.OUT;
9.     if (PWM1.OUT==0)//Entladen
10.    {
11.        U=2.5;z2=1;z3=0;SOC1=SOC;
12.        if (U00_Laden.V<=2.5&&Theta<Pv/A) {I=0;z2=0;z3=1;}
13.        if (U00_Laden.V==2.5&&Theta==Pv/A) {I=0;z2=0;z3=1;} //entfernt eine Situation, wenn U_klemmer ist 2,5 und Theta ist 40
14.    }
15.    if (PWM1.OUT==1)//Laden
16.    {
17.        U=4.2;z2=1;z3=0;SOC2=SOC;
18.        if(U_klemme.V>=4.2) {I=0;z2=1;z3=1;}
19.    }
20. }

```

Wie aus den beiden obigen Simulationen hervorgeht, entspricht dieses thermische Modell dem thermischen Verhalten in der Theorie.

5 Eine praktische Nutzenanwendung

Ein praktisches Beispiel ist das Heizen von Zelle in Elektrofahrzeugen. Die aktuellen Daten beziehen sich auf die Geschwindigkeit des Autos und die Beschleunigung des Autos, die ich später behandeln werde. Die Geschwindigkeitsdaten basieren auf der WLTP, die WLTP auch einen Zyklus bietet.

5.1 WLTP

Die Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure ist ein von Experten aus der Europäischen Union, Japan und Indien und nach den Richtlinien des World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations der Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (UNECE) entwickeltes, neues Messverfahren zur Bestimmung der Abgasemissionen (Schadstoff- und CO₂-Emissionen) und des Kraftstoff-/Stromverbrauchs von Kraftfahrzeugen.[8]

Im Testverfahren sind zahlreiche Bedingungen definiert:

Messwert	WLTP(WLTC)
Starttemperatur 25 °C	Kaltstart
Zykluszeit	1800 s
Zykluslänge	23.250 m
Geschwindigkeit mittel	46,6 km/h
Höchstgeschwindigkeit	131 km/h
Antriebsleistung mittel	11 kW
Antriebsleistung maximal	42 kW

Tabelle 2:Bedingungen der WLTP

In dieser Arbeit wurde den Zyklus der Klasse.3 Fahrzeug verwendet:

	Low	Medium	High	Extra High	Total
Dauer, s	589	433	455	323	1800
Stillstandsdauer, s	156	48	31	7	242
Distanz, m	3.095	4.756	7.158	8.254	23.262
Stoppanteil, %	26,5	11,1	6,8	2,2	13,4
Höchstgeschwindigkeit, km/h	56,5	76,6	97,4	131,3	
Maximale Beschleunigung, m/s ²	1,5	1,6	1,6	1,0	

Tabelle 3: WLTC-Klasse-3-Testzyklus

5.2 Die Geschwindigkeit und der Strom

Denn in der WLTP wird die Geschwindigkeit einmal pro Sekunde aufgezeichnet, und schließlich wurden 1800 Werte exportiert. Wir verwenden eine 2D-lookup-Table, um diese Werte in PORTUNUS einzugeben, x ist die Zeit und f(x) ist die entsprechende Geschwindigkeit. Daten über das Verhältnis zwischen Geschwindigkeit, Beschleunigung und Strom stammen von meinem Betreuer:



Geschwindigkeit: $V = \text{WLTP.OUT}$

Beschleunigung: $a = dv/dt$

Abbildung 24: Zellestrom von der WLTP

Das Eingangssignal ist 2D-Lookup-Tabel der Geschwindigkeit. Der erste P-Regler funktioniert, um die Geschwindigkeitseinheit von Kilometer pro Stunde in Meter pro Sekunde umzuwandeln. So ist seine Verstärkung auf 1000/3600 eingestellt. Dann erscheinen zwei Zweige, der untere Zweig mit dem D-Regler, um die Geschwindigkeit zu differenzieren, um die Beschleunigung des entsprechenden Moments zu erhalten. Dann gehen die oberen und unteren Zweige durch P-Regler und erhalten unterschiedliche Verhältnisse. Die beide Werte addieren schließlich, um den Wert des Stroms abzubekommen.

Werfen wir einen Blick auf die Ausgabe oben, den Strom, und ein Vollzyklusbild wurde aufgenommen:

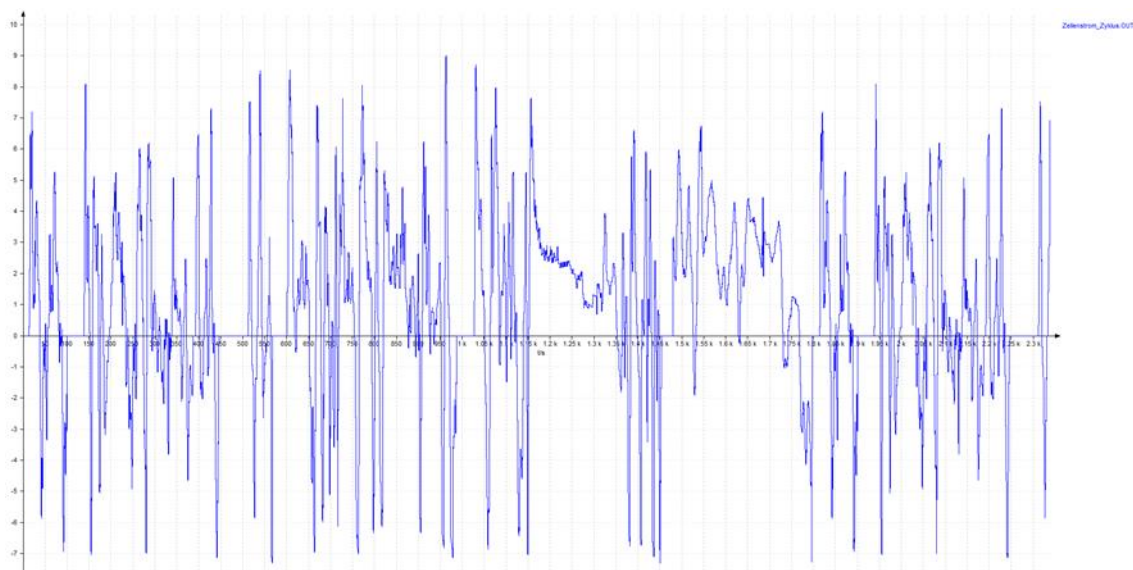


Abbildung 25: Der Strom im Vollzyklusbild

Wir können sehen, dass der Strom schnell schwankt und teilweise positiv, teilweise negativ ist. Li-Ionen-Zellen in allgemeinen Haushaltsgeräten sind mit konstantem Strom, wenn sie entladen, aber sie sind etwas anders, wenn sie in Elektrofahrzeugen verwendet werden. In den tatsächlichen Straßenverhältnissen gibt es eine Vielzahl von komplexen Situationen, wird es häufig drücken oder bremsen.

Die relevanten Informationen wurden überprüft, um es zu wissen, dass der positive Sprung die Leistung des Motors oder Antriebsstrangs darstellt und der negative Sprung die Leistung vom Motor oder der Bremse zurückgewonnene Leistung darstellt. Mit anderen Worten, wir können einfach davon ausgehen, dass der positive Teil dieses Diagramms der Entladevorgang der Zelle ist, sondern der Ladevorgang. In der Simulation müssen wir also den Ausgabewert des Blocks auf die gegenteilige Zahl bringen, damit der Entladestrom negativ ist und der Ladestrom positiv ist.

Nachdem den neuesten Ausgang in der Stromquelle eingegeben wurde, entscheide ich mich für die Temperaturkurve für den ersten Zyklus:

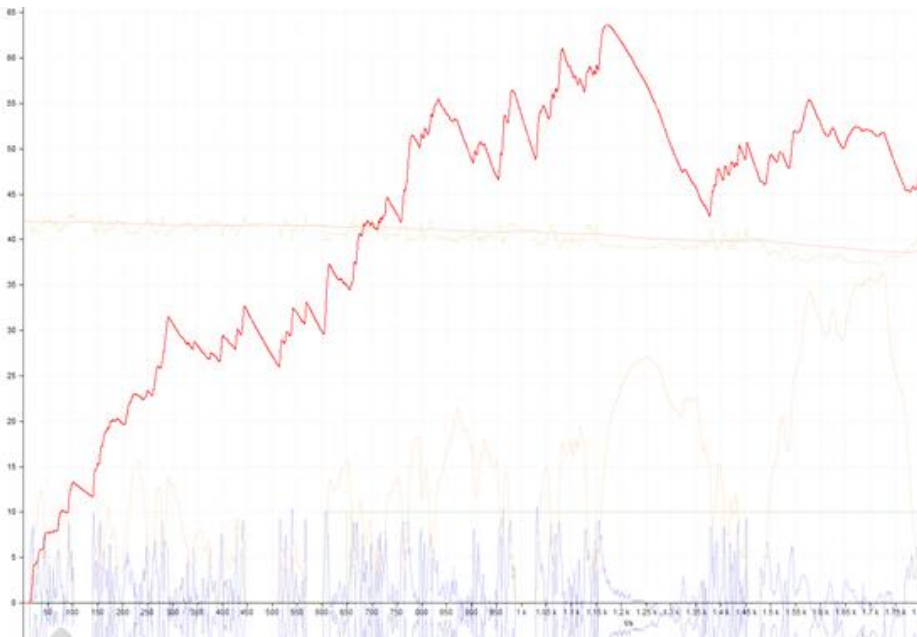


Abbildung 26: Die Temperatur für den ersten Zyklus

Wir können sehen, dass die maximale Temperatur die Nenntemperatur meines Modells um 40k überschritten hat. Dies liegt daran, dass die Zelle eines Elektrofahrzeugs nicht mit den in dieser Arbeit verwendeten Zelleparametern identisch ist, so dass die Temperatur etwas höher aushalten kann. Um zu meinem Modell zu passen, muss die maximale Temperatur um 40k halten.

5.3 Regulieren die Temperatur der Nutzenanwendung

Zuerst müssen wir wissen, wann die Temperatur unter den ursprünglichen Bedingungen ihren Höhepunkt erreichen wurde:



Abbildung 27: Höhepunkt der Temperatur

Wie man sieht, erreicht die Temperatur einen Höhepunkt von etwa 4,8 ks, der dritte Zyklus. Da die Temperatur positiv mit dem Strom zusammenhängt, erfordert die Anpassung der Temperatur den Wert des Stroms. Aus dem Block oben können wir die Beziehung zwischen Strom und Geschwindigkeit, Beschleunigung wie folgt erhalten:

$$I_{\text{Fahrzeug}} = 0,1 * V + 6,4 * \frac{dV}{dt} \quad (6.)$$

Zuerst wurde „Navigation“ in der PORTUNUS verwendet, um die höchste Temperatur zu lesen:

x1 = 4.7701k	y1 = 64.552409	y1' = -40.690521m
x2 = 9k	y2 = 48.465288	y2' = -154.88429m
dx = 4.2299k	dy = -18.087121	dy' = -114.19377m

Abbildung 28: Vermessung der höchsten Temperatur

Im Diagramm ist x1 die Zeit und y1 die höchste Temperatur ist. Die maximale Temperatur, die wir brauchen, ist 40k, das ist $\frac{40}{64,552409} * \text{Theta}_{\text{Fahrzeug}}$. Daher ist die Beziehung zwischen dem gesuchten Strom und dem Strom des Fahrzeugs ist:

$$\frac{I_{ges}^2}{I_{\text{Fahrzeug}}^2} = \frac{40}{64,552409} \rightarrow I_{ges} = 0,7871794874 * I_{\text{Fahrzeug}} \quad (7.)$$

Verbinden (6) und (7):

$$I_{ges} = 0,07871794874 * V + 5,03794872 * \frac{dV}{dt}$$

Das Diagramm zeigt, dass die Temperaturkurve tatsächlich die gleiche ist wie wir erwartet haben, mit einem maximalen Wert von etwa 40k. Einerseits zeigt es, dass unser thermisches Modell und unser Li-Ionen-Zelle-Modell eine praktikable Lösung sind, andererseits lassen wir intuitiv sehen, dass Temperaturänderungen in der eigentlichen Anwendung extrem komplex sein können.

Darüber hinaus können wir durch das Lösen von Gleichung (6) festlegen, dass $\frac{6,4}{0,1}$ die Zeitkonstante ist, so dass wir durch die Änderung des Geschwindigkeit- und Beschleunigungskoeffizienten die Änderung Rate der Temperatur kontrollieren.

Eine „35k-Warnsignal“ wurde auch hinzugefügt, wenn die Temperatur über 35k wird ein Signal geben, so dass BMS kann rechtzeitig reagieren.

Das Programm ist:

Deklaration:

```
1. double SOC=0;
2. double Theta=0;
3. double Pv=0;
```

```

4. double A=0.00289;
5. double tau=300;
6. double I=0;
7. double I_ist=0;
8. double R1=10m;
9. double z2=0;
10. double z3=0;
11. double Theta_Warnung=0;
12. double U=0;
13. //////////////////////////////////PT1////////////////////////////////
14. double PT1=0;
15. double PT1_alt=0;
16. double Theta_vor=0;

```

Wertzuweisung:

```

1. Pv=AM1.I*AM1.I*R1;
2. //////////////////////////////////PT1////////////////////////////////
3. Theta_vor=Pv/A-PT1_alt;
4. PT1_alt=PT1;
5. Theta=PT1;
6. SOC=100*(U00.Q-(2.5*U00.C))/(1.7*U00.C);z2=1;
7.
8. if (SOC>0) I=-Zellenstrom_Zyklus.OUT; else {I=0;}
9.
10. if(Theta>=35) Theta_Warnung=1; else Theta_Warnung=0;

```

Und das Diagramm dabei:

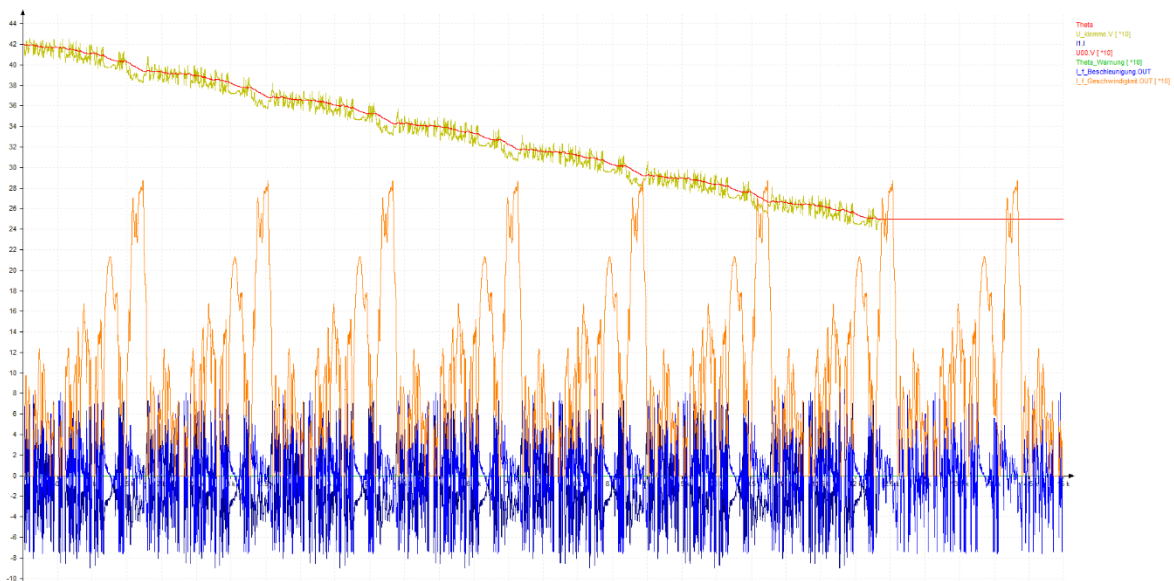


Abbildung 29:Das Diagramm der praktischen Nutzenanwendung

6 Zusammenfassung

Aus einige Gründe erfolgt die gesamte Arbeit dieser Bachelorarbeit über Simulationssoftware PORTUNUS, d. h. keine Daten vom Labor mit Simulationsergebnisse zu vergleichen, sondern nur durch Online-Suche, um die vergleichen Daten zu erhalten. Und aufgrund der Beschränkung der Schrittweite in der Simulation wird der Schrittweite länger eingestellt, was zu einigen Fehlern mit der tatsächlichen Situation führen kann, aber das Gesamtbild wird als korrekt überprüft.

Da die Hauptaufgabe dieser Bachelorarbeit darin besteht, ein thermisches Modell zu entwerfen, liegt der Schwerpunkt auf dem Aufbau und Test von thermischen Modellen, so dass die Modelldaten von Li-Ionen-Zelle eine gewisse zufällige Abweichung haben, wie z. B. der interne Widerstand von Li-Ionen-Zelle sollte in der Praxis geändert werden, geht aber in dieser Arbeit davon aus, dass es sich um einen Konstante handelt.

Im Allgemeinen ist das in dieser Bachelorarbeit aufgebautes thermisches Modell machbar, und es kann die Temperatur der Li-Ionen-Zelle schnell und genau berechnen. Und weil das Programm verbessert wurde, macht es seine Kompatibilität mit μC besser.

Literatur

- [1] Lithium-Ionen-Akkus <https://www.elektronik-kompodium.de/sites/bau/0810281.htm>
- [2] Zhang Zhang, Gufei: Entwicklung einer Methode zur Parametrierung des Ersatzschaltbildes der eine Li-Ionen-Zelle, 2020
- [3] Bu Bu, Naiqi: Entwicklung eines Simulationsmodells zur Abbildung des dynamischen Verhaltens einer Li-Ionen-Zelle, 2020
- [4] At Rauchfuß, Lutz: Grundlagen der elektrischen Antriebstechnik, 2010
- [5] PT1-Glied Wikipedia: <https://de.wikipedia.org/wiki/PT1-Glied>
- [6] PT1-Glied Rauchfuß, Lutz: Grundlagen der Regelungstechnik, 2011
- [7] PWM (Pulsdauermodulation) Wikipedia: <https://de.wikipedia.org/wiki/Pulsdauermodulation>
- [8] WLTP Wikipedia: https://de.wikipedia.org/wiki/Worldwide_harmonized_Light_vehicles_Test_Procedure

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mittweida, 14. August 2020