



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorthesis

Alexander Priven

Erfassung, Prüfstandserprobung und Bewertung
von Lade- und Lastprofilen bei elektrischen
Stadtbussen zur Optimierung der
Batterielebensdauer

Alexander Priven
Erfassung, Prüfstandserprobung und Bewertung
von Lade- und Lastprofilen bei elektrischen
Stadtbussen zur Optimierung der
Batterielebensdauer

Bachelorthesis eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang Informations- und Elektrotechnik
am Department Informations- und Elektrotechnik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer : Prof. Dr.-Ing. Karl-Ragmar Riemschneider
Zweitgutachter : Prof. Dr. Robert Heß

Abgegeben am 25. April 2016

Alexander Priven

Thema der Bachelorthesis

Erfassung, Prüfstandserprobung und Bewertung von Lade- und Lastprofilen bei elektrischen Stadtbussen zur Optimierung der Batterielebensdauer

Stichworte

Lithium-Ionen-Batterien, LiFePO₄, Lebensdauer der Batterie, Hybridkonzepte, Digatron Zykliersystem, Batterie-Test-System, Innovationslinie 109 der Hamburger Hochbahn, Alterungsbeschleunigung der Batterien, EIS-Messung, Zyklierexperiment

Kurzzusammenfassung

In Rahmen der Forschungsprojekte BATSEN und BEEDeL werden Lithiumbatterien in Wasserstoff-Elektro-Hybridbussen und Diesel-Elektro-Hybridbussen bei Betriebsbedingungen untersucht und analysiert. Aus dem Linienbusbetrieb sollen für die Elektrobusse typische Betriebsprofile erfasst und diese experimentell auf LiFePO₄ - Zellen angewendet werden. Dabei soll der Batteriealterungsprozess mittels erhöhter Temperatur beschleunigt werden.

Alexander Priven

Title of the paper

Data capturing, bench test and evaluation of charge and discharge profiles of electrical city buses to optimize battery lifetime

Keywords

Lithium-ion batteries, LiFePO₄ cells, battery lifetime, Digatron cycle equipment, battery test system, Hamburger Hochbahn innovation bus route 109, battery accelerated aging, electrochemical impedance spectroscopy, cycling experiment

Abstract

In the scope of the research projects BATSEN and BEEDeL, the charge-discharge behaviour of lithium batteries in hydrogen-electric hybrid buses as well as diesel-electric hybrid buses is investigated and analysed. Typical operation profiles are captured from regular urban bus services to be experimentally applied to LiFePO₄ cells. The aging process has to be speed up by elevated temperatures.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich zunächst bei all denjenigen bedanken, die mich während der Bachelorarbeit unterstützt und motiviert haben und dadurch zum Gelingen dieser Bachelorarbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Riemschneider sowohl für die Möglichkeit zur Anfertigung, aber auch für die fachliche Unterstützung und Betreuung dieser Arbeit.

Weiterhin bedanke ich mich bei Prof. Heß für seine Arbeit als Zweitprüfer und Herrn Müller welcher in zahlreichen Stunden Korrektur gelesen hat.

Gleichermaßen bedanke ich mich bei Herrn Dipl.-Phys. Valentin Roscher, B. Eng. Sergej Pereguda, M. Eng. Nico Sassano und B. Eng. Oliver Schmidt für die verlässliche fachliche Unterstützung.

Abschließend danke ich meinen Eltern, meiner Schwester und meiner Freundin Ljuba Gaisinski für die Unterstützung während des gesamten Studiums.

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung	8
1.1. Motivation	8
1.2. Vorarbeiten im Projekt	9
1.3. Aufgabenstellung	9
2. Grundlagen und Voruntersuchung	11
2.1. Definitionen	11
2.2. Übersicht über die Lithium-Ionen-Batterie	13
2.2.1. Aufbau einer Lithium-Ionen-Zelle	14
2.2.2. Lebensdauer der Batterien	16
2.3. Definitionen und Klassifizierung der Hybridkonzepte	18
2.3.1. Serieller Hybridantrieb	18
2.3.2. Paralleler Hybridantrieb	20
2.4. Digatron Zykliersystem	22
2.4.1. Zellentester MCT 200-06-4 ME	22
2.4.2. Battery Manager 4	24
2.4.3. Batterie-Test-System BTS-600 Programme	25
3. Analyse der Rahmenbedingungen	27
3.1. Aufnahme und Auswertung von Fahrdaten und elektrischen Größen	27
3.1.1. Auswertung von Daten aus dem Linienbusbetrieb	28
3.1.2. Erfassung von Daten aus dem Busbetrieb mit dem Fahrdatenlogger	31
3.2. Konzeption und Messplanung der Zyklierexperimente	35
3.2.1. Ein Umrechnungsmodell auf eine kleinere Batterie	35
3.2.2. Pantographenströme	41
3.3. Beschleunigung des Alterungsprozesses der Testzellen	45
4. Realisierung	49
4.1. Sicherheitskonzept für die Testzellen	49
4.2. Konzipierung des Messplans	50
4.3. Durchführung des Zyklierexperimentes mit dem Batterieprüfstand	51
4.3.1. Testzellenzyklisierung mit der Battery Manager Workstation	51

4.3.1.1. Zyklrierprogramm für die Testzelle BAT01	51
4.3.1.2. Zyklrierprogramm für die Testzelle BAT02	55
4.3.1.3. Zyklrierprogramm für die Testzelle BAT03	56
4.3.1.4. Zyklrierprogramm für die Testzelle BAT04	57
4.3.1.5. Zusammenfassung für die Zyklrierung aller vier Testzellen	58
4.3.2. Kapazitätsmessung mit der Battery Manager Workstation	60
4.3.3. Erstellung einer Sollwerttabelle mit Fahrströmen aus dem Solaris Urbino 18,75 Hybridbus für das Digatron-Zyklriersystem	62
4.4. EIS-Messung zur Bestimmung des SOH vor dem Experiment	64
5. Auswertung	66
5.1. Überschlagsrechnung der modellierten Batterie	66
5.2. Temperaturverläufe	69
5.3. Kapazitätsmessungen	72
5.4. Beschreibung des Kapazitätsverlustes	74
5.5. Kapazitätsverlust der Testzellen in Abhängigkeit von Lade-Entlade-Batterievollzyklen	77
5.6. Elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS)	79
5.7. Analyse der Messergebnisse	80
6. Fazit	81
6.1. Zusammenfassung	81
6.2. Ausblick	82
Tabellenverzeichnis	83
Abbildungsverzeichnis	84
Literaturverzeichnis	86
A. Aufgabenstellung	90
B. Datenblätter	93
B.1. Datenblatt: Testzelle A123 ANR26650M1-b	94
C. Programmablaufplan (PAP)	96
C.1. Programmablaufplan der Kapazitätsmessung	97
C.2. Programmablaufplan der Zyklrierung	98
D. Tabellen	99
D.1. Überschlagsrechnung modellierte Batterie (120kWh)	100
D.2. Überschlagsrechnung modellierte Batterie (60kWh)	101
D.3. Überschlagsrechnung modellierte Batterie (40kWh)	102

D.4. Überslagsrechnung modellierte Batterie (30kWh)	103
D.5. Vollständige Messergebnisse der Kapazitätsmessung	104
E. Elektrochemische Impedanzspektroskopie	106
E.1. Testzelle BAT01 vor und nach den mehrwöchigen Belastungen	107
E.2. Testzelle BAT02 vor und nach den mehrwöchigen Belastungen	108
E.3. Testzelle BAT03 vor und nach den mehrwöchigen Belastungen	109
E.4. Testzelle BAT04 vor und nach den mehrwöchigen Belastungen	110
E.5. Testzelle BAT01, vollständige Messergebnisse	111
E.6. Testzelle BAT02, vollständige Messergebnisse	112
E.7. Testzelle BAT03, vollständige Messergebnisse	113
E.8. Testzelle BAT04, vollständige Messergebnisse	114
F. Schaltbilder	115
F.1. Prinzip-Schaltbild Solaris Urbino 18,75	116
G. Matlab-Quellcode	117
G.1. Busdaten_V_a_I_U_ueberZeit_Diagramm.m	117
G.2. GPS_Logger.m	118
G.3. Bus_VS_GPS.m	119
G.4. Vorbereitung_Digatron_V03.m	120
G.5. Auswertung_Kapazitaetsverlust.m	122
H. Abkürzungsverzeichnis	125
	126

1. Einführung

1.1. Motivation

„Elektromobilität - das ist die Chance, unabhängig vom Öl zu werden. Es ist auch die Chance für große Ballungsgebiete - und das ist in den asiatischen Schwellenländern wie in vielen anderen Ländern der Welt natürlich von besonderer Bedeutung-, in großen Ballungsgebieten weniger Emissionen schädlicher Art zu haben.“

Angela Merkel, Bundeskanzlerin, Mai 2011

Um die Abhängigkeit von Ölimporten einerseits und die Emission von Schadstoffen besonders in Städten andererseits zu reduzieren, bietet sich die Erforschung und Einführung von Elektrofahrzeugen an. Die Bundesregierung erwartet im Jahre 2020 ca. eine Million zugelassene Elektrofahrzeuge in Deutschland, 40 Mal mehr als im Jahr 2014. Die Plug-in-Hybride sind ebenso als Elektroautos anerkannt. Sie besitzen einen Verbrennungsmotor und einen Elektromotor. Der Strom für den E-Motor wird von der extern ladbaren Batterie zur Verfügung gestellt [5].

Zur Elektromobilität zählen neben E-Autos auch Elektro-Fahrräder (über zwei Millionen in Deutschland), Elektrobusse (mehrere Projekte bundesweit [11], [12], [2]) und inzwischen sogar Flugzeug-Prototypen. Interessant ist hierbei, dass durch den elektrifizierten Schienenverkehr bereits nahezu 70 % des öffentlichen Verkehrs elektrisch erfolgt [5].

Der Einsatz von Elektromobilität im öffentlichen Personenverkehr und in kommerziellen Bereichen ist verglichen mit Privatfahrzeugen besonders interessant, da die Einsparungen bei Emission und Treibstoffverbrauch bei hohen Fahrleistungen gegenüber dem erhöhten Anschaffungspreis stärker wirken. Aus diesem Grund zielen viele aktuelle Förderprojekte insbesondere auf die Einführung von Elektrobussen im städtischen Personennahverkehr ab.

1.2. Vorarbeiten im Projekt

In der Arbeitsgruppe BATSEN werden Batteriesensoren entwickelt, die den aktuellen Einzelzellzustand besonders gut bestimmen können. Ausgehend von diesem Wissen wurde das Projekt BEEDeL zusammen mit der Hamburger Hochbahn und dem Fraunhofer Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI begonnen. Es soll die Einführung von Elektrobussen in Hamburg begleiten und den Ausbau vorbereiten. Insbesondere ist es ein Ziel, die Auslegung von Busbatterien und die Platzierung von Ladestellen mit Hilfe von Simulationen zu optimieren.

In dieser Arbeit wurde auf umfangreiches Vorwissen, Vorarbeiten und Geräte zurückgegriffen. Insbesondere sind die Abschlussarbeiten von Herrn Oliver Schmidt [34] für die Betrachtung von Busfahrzyklen sowie Herrn Nico Sassano [33] für die Elektrochemische Impedanzspektroskopie an Batteriezellen zu nennen. Es wurde außerdem auf einen Datenlogger zurückgegriffen, der von Herrn Felix Groth für das Projekt [23] entwickelt wurde.

1.3. Aufgabenstellung

Diese Arbeit nimmt sich das Ziel die Erfassung, Prüfstandserprobung und Bewertung von Lade- und Lastprofilen bei elektrischen Stadtbussen zur Optimierung der Batterielebensdauer zu untersuchen.

Vor dem Hintergrund dieser Fragestellung werden zunächst typische Betriebsprofile für Elektrobusse erfasst und aufbereitet, um diese anschließend für Langzeittests an Batteriezellen zu implementieren. Die Daten werden mit Hilfe eines Datenloggers während Busfahrten aufgenommen.

Die Zellzyklisierung nutzt einen neuen Zyklisierungsprüfstand, der bislang in den Forschungsgruppen BATSEN und BEEDeL keine Anwendung fand und in dieser Arbeit zum ersten Mal eingesetzt wurde. Daher stellt die vorliegende Arbeit einen ganzheitlichen Ansatz der Konfiguration und der Arbeitsweise des Prüfstandes dar.

Im zweiten Kapitel dieser Arbeit werden zunächst die Grundlagen der Batterietechnologie, die verwendeten Geräte vorgestellt und ersten Voruntersuchungen darlegt. Das dritte Kapitel konzentriert sich dabei auf die Analyse der Rahmenbedingungen. Nachfolgend werden das entwickelte Messkonzept und die Messsoftware im vierten Kapitel erläutert. Das fünfte Kapitel stellt die erfassten Messwerte dar, um anschließend eine Diskussion, Analyse und die Einordnung der erzielten Werte zu ermöglichen.

Diese Arbeit schließt mit einem Fazit ab, welches die wichtigsten Ergebnisse der Untersuchung zusammenfasst und einen Ausblick für die mögliche Weiterentwicklung dieser Untersuchung gibt. Der Anhang enthält unter anderem die ursprüngliche Aufgabenstellung, Datenblätter, Quellcodes und Messergebnisse.

2. Grundlagen und Voruntersuchung

2.1. Definitionen

In diesem Kapitel sind zunächst einige grundlegenden Begriffe definiert, die in dieser Bachelorarbeit verwendet werden.

C-Rate beschreibt einen Lade- und Entladevorgang einer Batterie und bezieht sich auf den Lade- und Entladestrom [6]. Um die Batterie in einer Stunde voll aufzuladen wird eine Laderate von "1C" benötigt.

DOD - "Depth of Discharge" ist auch als Entladungstiefe bekannt und steht für das Gegenteil des Ladezustandes (SOC). Die Lebensdauer der Batteriezelle und somit die maximal erreichbaren Vollzyklen hängen von der maximalen DOD ab [6].

EIS-Messung bzw. Elektrochemische Impedanzspektroskopie ist ein Messverfahren um den Innenwiderstand der Zelle zu ermitteln [33].

Energiespeicher ist ein energietechnisches Element, welches drei folgende Prozesse durchführen kann:

- Speichern von Energie (Laden)
- Halten der gespeicherten Energie
- Abgabe der gespeicherten Energie (Entladen)

Das wiederholte Speichern der elektrischen Energie erfolgt in sogenannten Akkumulatoren, die im Folgenden als Batterien bezeichnet werden [30].

EOL - "End of Life" bezeichnet das Lebensdauerende einer Batterie. Das EOL hängt stark von der Anwendung ab. So tritt beispielsweise das Lebensdauerende für ortsfeste Zellen und Batterien nach Teil 4 der DIN43539 bei SOH = 80 % [7].

Die **Kalenderlebensdauer** auch kalendarische Alterung genannt, ist die maximale Lagerzeit der Batterie ohne zyklische Belastung, bevor die Kapazität unter einer bestimmten Grenze sinkt [17].

Die **Ladegruppe** ist eine Kombination aus einem Verbrennungsmotor und einem Generator. Hier wird die Energie für den Fahrmotor und zum Nachladen der Batterie erzeugt [32].

Die **Nennkapazität** ist ein Parameter der Batterien und wird in Amperestunden (Ah) oder in Kilowattstunden (kWh) gemessen. Sie bezeichnet die Energiemenge, die innerhalb eines bestimmten Zeitraums durch den Entladestrom bis zur Entladeschlußspannung entnommen werden kann [9].

Rack ist ein regalartiges Gestell zur Unterbringung von Komponenten einer Anlage [3].

Rekuperation ist ein Verfahren, um die kinetische Energie über Generatorbetrieb eines Hybrid- oder Elektrofahrzeuges in elektrische Energie umzuwandeln und in der Batterie zu speichern [32].

SOC - "State Of Charge" beschreibt einen Ladezustand der Batterie oder einer Batteriezelle. Der Ladezustand wird in Prozent eingegeben. Bei einer voll geladenen Batterie ist der SOC = 100 % , bei einer vollständig entladenen Batterie ist der SOC = 0 % [6].

SOH - "State of Health", wird als auch Gesundheitszustand bezeichnet. Er beschreibt den Alterungszustand einer Batterie, oft als maximal nutzbare Restkapazität, die im Laufe der Batterienutzung abnimmt. [6].

Solid Electrolyte Interphase (SEI) ist eine passive Schicht, die sich mit der Zeit zwischen der Graphitanode und dem Elektrolyten bildet. Als Folge erhöht sich der Innenwiderstand der Batteriezelle. Die SEI-Bildung findet während der ersten Ladezyklen statt. Die Lithium-Ionen Batterie Funktion ist ohne einer SEI-Schicht nicht möglich, da es bei einem permanenten Kontakt zwischen dem Elektrolyt und der Graphitschicht zu einer schnellen Schädigung des Graphites kommen würde [30].

Ein **Vollzyklus** ist erreicht wenn die Batterie einmal komplett aufgeladen und entladen wurde [1].

Die **Zykluslebensdauer** hängt mit der Vollzyklenzahl zusammen und beschreibt den irreversiblen Kapazitätsverlust einer Batterie auf Grund der Verwendung [17].

Ein **Zyklus** ist ein Kreislauf regelmäßig wiederkehrender Dinge oder Ereignisse.

2.2. Übersicht über die Lithium-Ionen-Batterie

In den folgenden Abschnitten wird zuerst eine theoretische Übersicht über die Lithium-Ionen-Batterien dargelegt. Diese wiederaufladbare Batterietechnologie wurde bereits Anfang der neunziger Jahre in elektronischen Geräten genutzt. Heutzutage ist der Batterie-Weltmarkt für mobile Geräte und Elektrofahrzeuge komplett von der Lithium-Ionen-Batterietechnologie erobert worden. Dies lässt sich anhand des in Abbildung 2.1 dargestellten Ragone - Diagrammes erklären. Hier werden unterschiedliche Zelltechnologien miteinander verglichen, indem die Leistungsdichte in W/kg zusammen mit der Energiedichte in Wh/kg aufgetragen wird.

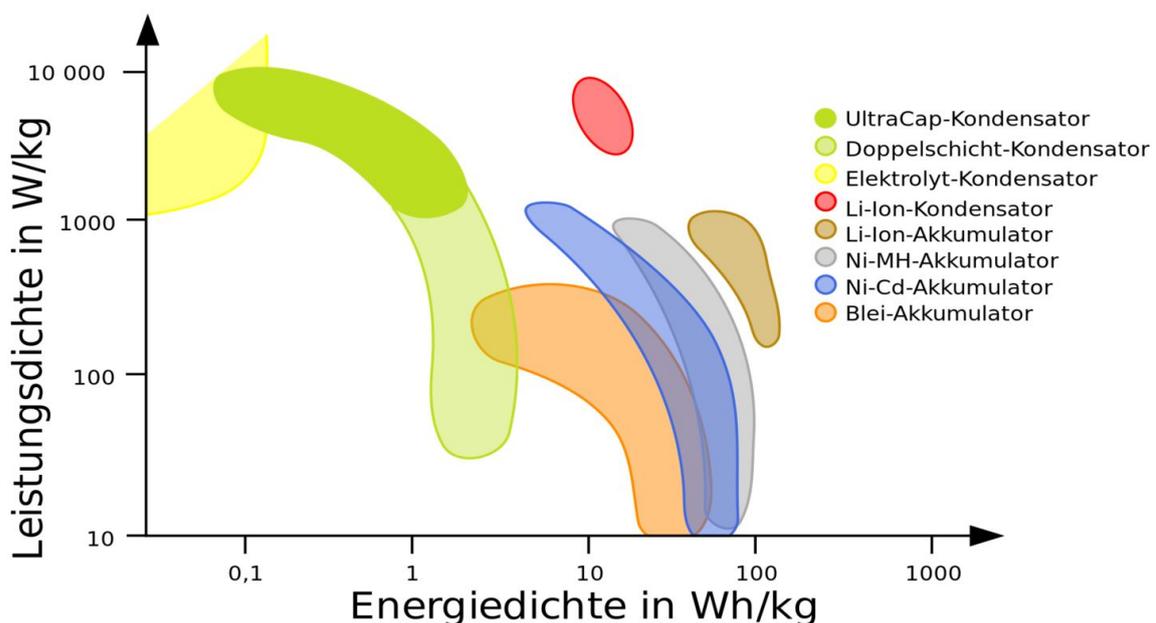


Abbildung 2.1.: Vergleich zwischen unterschiedlichen Energiespeichertechnologien im Ragone-Diagramm. Entnommen aus [31]

Aus dem Diagramm ist deutlich zu erkennen, dass die Lithium-Ionen-Batterien im Vergleich zu anderen Technologien, die höchste Energiedichte besitzen. Es existieren auch weitere Erfolg versprechende Technologien, wie zum Beispiel die Lithium-Luft-Batterien, diese sind jedoch noch nicht für die Serienproduktion geeignet [36].

2.2.1. Aufbau einer Lithium-Ionen-Zelle

Batterien sind Energiespeicher, die elektrische Energie speichern und diese wieder abgeben können. Im Gegensatz zu den Superkondensatoren können Batterien die Energie mehrere Monate, sogar Jahre speichern [4].

Die Lithium-Ionen-Zelle bestehen aus einer Reihe von unterschiedlichen Zellchemien. Dabei setzen sich die Lithium-Zellen aus einer negativen- und einer positiven Elektrode, einem Separator und dem Elektrolyten zusammen. Ein Modell der Lithium-Ionen-Zelle ist in Abbildung 2.2 dargestellt.

Während einer Entladung fungiert die negative Elektrode als Quelle für die Lithium-Ionen [30]. Diese besteht aus Lithium, das beispielsweise in Graphit, Silizium oder Titan eingelagert wurde [19]. Die positive Elektrode erfüllt den Zweck einer Senke [30]. Je nach Typ der Batterie besteht die positive Elektrode aus einer Lithium-Verbindung mit Mangan, Kobalt, Nickel, Titan oder Eisen. Folglich entstehen Lithium-Metall-Oxide wie LiMn_2O_4 , LiCoO_2 , LiNiO_2 oder LiFePO_4 (Lithium-Eisen-Phosphat) [19].

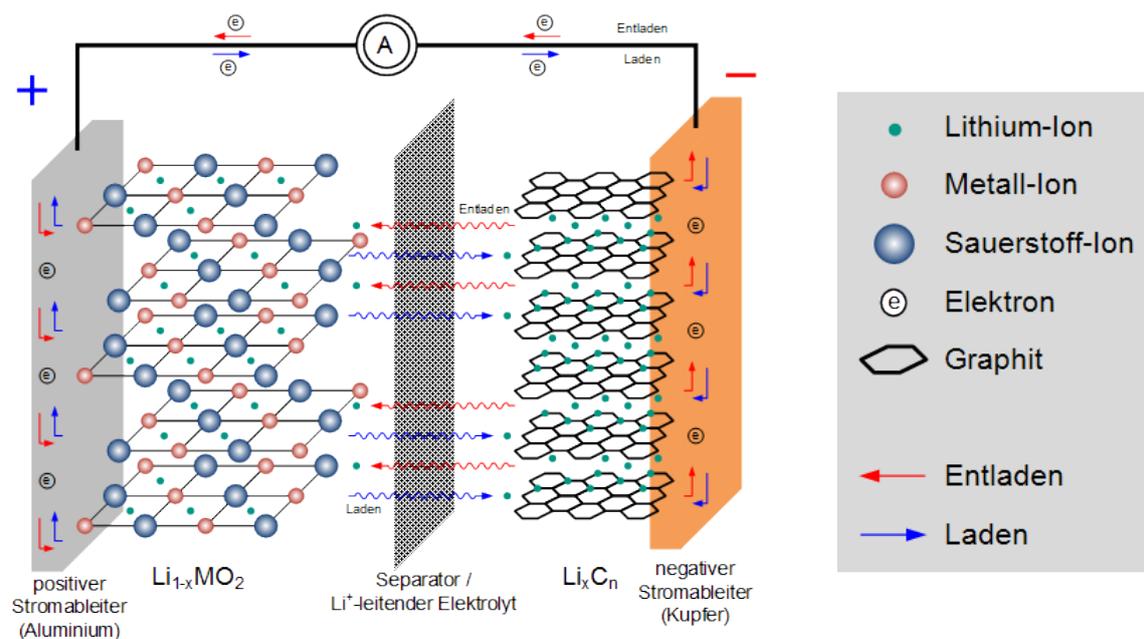


Abbildung 2.2.: Modell der Lithium-Ionen-Batterien. Entnommen aus [15]

Die Elektrodenmaterialien haben einen großen Einfluss auf die Eigenschaften der Lithium-Ionen-Batterien, zum Beispiel ist die Nennspannung von einer Lithium-Ionen Zelle stark von der Anordnung der chemischen Elemente abhängig und liegt bei etwa 3,6 V [8].

Schließlich übernimmt der Elektrolyt den Transport der elektrischen Ladung zwischen zwei Elektroden. Der Elektrolyt ist ein ionenleitfähiges und wasserfreies Lösungsmittel, welches sich zwischen den beiden Elektroden befindet. Wird eine Lithium-Zelle mit elektrischer Energie aufgeladen, läuft somit ein chemischer Vorgang ab, der als Folge eine Einlagerung bzw. Auslagerung von Lithium-Ionen in den Elektroden bewirkt. Die freigewordenen Lithium-Ionen wandern dabei beim Ladevorgang von der positiven zu der negativen Elektrode und bei einem Entladevorgang in die umgekehrte Richtung [30].

Der Separator ist eine Lithium-Ionen-durchlässige Membran, welche die beiden Elektroden elektrisch isoliert, dabei aber die Ionen passieren lässt. Es werden mikroporöse Polymerseparatoren verwendet. Es ist auch möglich unverwobene Vlies-Separatoren (Nonwovens) einzubauen. In der Regel werden in den Lithium-Ionen-Zellen unverwobene Vliese nicht direkt als Separatoren, sondern als Unterstruktur für Polymergelelektrolyte verwendet. Da bei der geforderten Separatordicke von ca. $25\ \mu\text{m}$ noch keine vollkommen geschlossenen Schichten erreicht werden können [25]. Eine Variante setzt sich aus einer Sandwich-Schichtung von Polyethylen (PE, innen) und Polypropylen (PP, außen) zusammen. Diese Zusammensetzung bietet eine Shut-down-Funktion, welche bei einer Temperaturerhöhung (PE: ca. $135\ ^\circ\text{C}$, PP: ca. $160\ ^\circ\text{C}$) den Separator erweicht lässt. Dabei schließen sich die Poren und der Stromfluss wird damit gestoppt [18].

2.2.2. Lebensdauer der Batterien

In einer Lithium-Ionen-Batterie finden nicht nur gewünschte, sondern auch unerwünschte Reaktionen statt, wobei die Struktur der Zellen verändert wird. Dies führt zu einer Zellenalterung mit Abnahme der Nutzkapazität und der Leistungsfähigkeit. Das Alterungsverhalten hängt von verschiedenen Faktoren ab. Einen entscheidenden Einfluss haben dabei der Zellentyp, die Umgebungsbedingungen sowie die Nutzungsbedingungen.

Die Lebensdauer der Batterien wird in Kalender- und Zykluslebensdauer angegeben.

Unter der Kalenderlebensdauer ist die maximale Lagerzeit ohne Betrachtung der zyklischen Belastung zu verstehen. Diese Art von der Lebensdauer wird durch eine Elektrolytzersetzung, sogenannte Solid Electrolyte Interphase (SEI) beeinflusst. Dieser Prozess führt zur Erhöhung des Innenwiderstandes und somit zu einem nicht wiederherstellbaren Kapazitätsverlust. Für die kalendarische Alterung ist der State Of Charge (SOC) und die Temperatur während der Lagerung ausschlaggebend. Um die Kalenderlebensdauer zu erhöhen, sollten die Batteriezellen bei einer niedrigen Temperatur und einem mittleren Ladezustand gelagert werden [17].

Unter der Zykluslebensdauer ist die maximale Zyklenzahl ohne Betrachtung der kalendarischen Alterung zu verstehen. Hier ist die Zahl der Lade- und Entladezyklen entscheidend. Die Zykluslebensdauer hängt von den Materialien, dem kapazitätsmäßigen Ausgleich zwischen Anode und Kathode, dem unterschiedlich schnellen Altern und von den Betriebsbedingungen ab. Folgend gestaltet es sich schwierig, eine konkrete Zykluslebensdauer festzulegen. Ursächlich für die Schädigung der Zellen während der Zyklisierung sind meistens die regelmäßigen Volumenänderungen, die zur Zerrüttung der Elektrodenstruktur und damit zu einer Verringerung der zur Verfügung stehenden aktiven Elektrodenfläche führen. [17].

In Abbildung 2.3 ist ein Vergleich der unterschiedlichen Batterietechnologien mit dem Durchsatz der Nennkapazität dargestellt, der von der Entladetiefe abhängt.

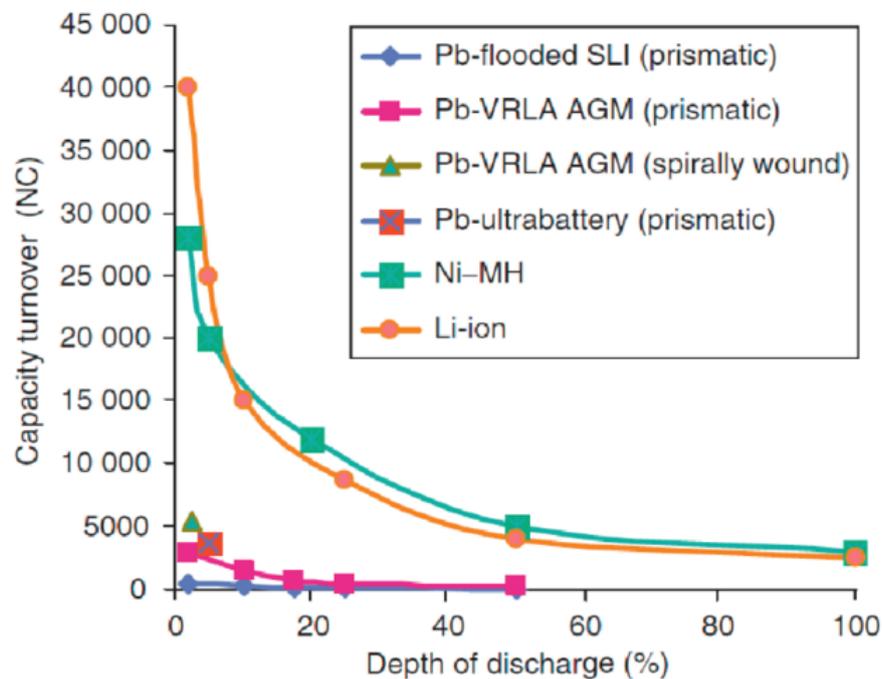


Abbildung 2.3.: Entladetiefe vs. Durchsatz der Nennkapazität für unterschiedliche Batterietechnologien. Entnommen aus [21]

Das Diagramm zeigt, dass Lithium-Ionen-Batterien und die Nickel-Metallhydrid-Batterien die höchste Zyklenlebensdauer zur Verfügung stellen. Erwähnenswert ist auch, dass die geringfügige Volumenänderung der Aktivmassen bei kleineren Entladetiefen zu einer deutlichen Erhöhung der Lebensdauer führt [17].

Um die vom Anwender geforderte Lebensdauer (zum Beispiel EV: ca. 10 Jahre) zu erreichen, werden Temperatur- und SOC-Grenzen festgelegt. Um diese Betriebsbedingungen einhalten zu können, müssen die Batteriekapazitäten überdimensioniert werden [17].

2.3. Definitionen und Klassifizierung der Hybridkonzepte

In der Literatur und Praxis existieren mehrere Hybridkonzepte, wobei die Seriell- und Parallel-Hybridantriebe von besonderer Bedeutung sind. Diese Arten von Antrieben sind entsprechend ihrer Grundstruktur, der Kombination von Verbrennungskraftmaschine (VKM), E-Maschine, Generator und Getriebe eingeteilt [32]. Im Folgenden werden die Seriell- und Parallel-Hybridantriebe kurz erläutert.

Die Messfahrt für vorliegende Bachelorarbeit wurde mit einem Solaris Urbino 18,75 Brennstoffzellenhybridbus mit einem parallelen Antrieb realisiert. Die Aufnahme und Auswertung von Fahrdaten wird in Kapitel 3.1 Aufnahme und Auswertung von Fahrdaten und elektrischen Größen näher erläutert.

2.3.1. Serieller Hybridantrieb

Der serielle Hybridantrieb ist eine "Reihenschaltung" der Energiewandler. Der Aufbau eines seriellen Hybrides setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen. Dazu zählt ein Verbrennungsmotor, der direkt mit einem E-Motor, der als Generator fungiert verbunden ist. Auf die Antriebsräder wirkt ein zweiter Elektromotor, welcher sowohl für den Antrieb als auch für die Rekuperation zuständig ist. Verbunden sind diese beiden Elektromotoren über einen Zwischenkreis. Des Weiteren gehört zu dem Aufbau eine Hochleistungsbatterie, die von dem Verbrennungsmotor und dem Generator erzeugte elektrische Energie speichert. Dies ermöglicht eine rein elektrische Fahrt. Außerdem wird bei einer Bremsung über den zweiten Motor, der nun generatorisch fungiert, Bremsenergie zurückgewonnen und in die Batterie gespeichert. Dieser Vorgang wird als Rekuperation bezeichnet. Die serielle Anordnung eines Hybridantriebes ist in Abbildung 2.4 dargestellt. Für einen serielle Hybridantrieb sind noch weitere Konfigurationen möglich, zum Beispiel ein Tandemantrieb (mit zwei Elektromotoren für eine Achse) oder Radnabenmotoren (mit einer E-Maschine für jedes Rad) [32].

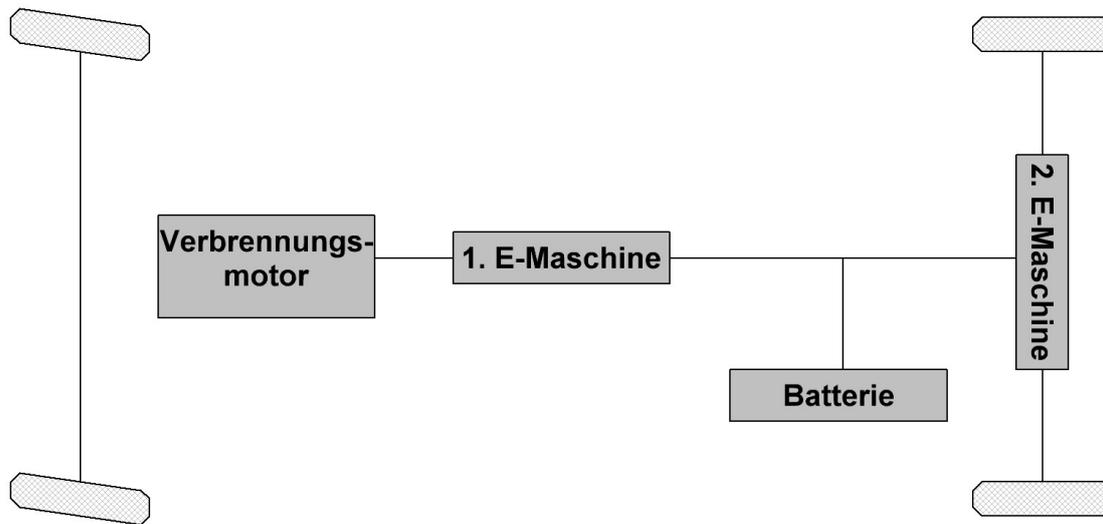


Abbildung 2.4.: Ein-Motor-System, serielle Anordnung eines Hybridantriebes. Eigene Darstellung in Anlehnung an [32].

Der Hauptvorteil des Seriellhybridantriebes liegt darin, dass die Ladegruppe unabhängig vom Radantrieb geregelt werden kann. Dank dieser Regelung bestehen folgende Möglichkeiten für die Emissionsverminderung:

- Verzögerter Start der Ladegruppe bietet die Möglichkeit den Verbrennungsmotor und die Abgasnachbehandlung auf den Start vorzubereiten.
- Motor- und Katalysatorvorwärmung sind möglich.
- Es können emissionsoptimierte Startstrategien und Abschaltstrategien angewandt werden.
- Aufgrund der vielen Positionierungsmöglichkeiten der Ladegruppe kommen neue Fahrzeugkonzepte in Frage [32].

Der bedeutendste Nachteil des Seriellhybridantriebes ist die doppelte Energiewandlung. Dadurch entstehen lange "Reaktionszeiten". Ein weiterer Nachteil ist die begrenzte Leistungsfähigkeit der Batterie in vielen Praxisanwendungen. Im Vergleich zu parallelen Hybriden muss hier ein stärkerer Verbrennungsmotor eingebaut werden, was zu mehr Emissionen und höherem Spitzenverbrauch führt [13].

2.3.2. Paralleler Hybridantrieb

Eine wesentliche Eigenschaft der Parallel-Hybride ist, dass Elektromotor und der Verbrennungsmotor abkuppelbar sind und es die Möglichkeit besteht, das Fahrzeug rein elektrisch, konventionell oder gemischt zu betreiben. Diese Maßnahme ist auf den parallelen Aufbau des elektrischen Zweigs und einen direkten mechanischen Durchtrieb vom Verbrennungsmotor bis zu den Antriebsrädern zurückzuführen [32].

Bei einem rein elektrischen Betrieb ist der Verbrennungsmotor deaktiviert. Das Fahrzeug wird lediglich von dem Elektromotor angetrieben. In diesem Betriebsmodus wird die elektrische Energie für den Elektromotor und die Leistungselektronik aus der Batterie zur Verfügung gestellt [10].

Während einer konventionellen Fahrt wird das Fahrzeug, so gut wie ohne Wirkungsgradverluste, nur vom Verbrennungsmotor angetrieben. Der Elektromotor und entsprechende Komponenten dafür sind während dieser Phase ausgeschaltet. In einem günstigen Verbrauchspunkt wird der Verbrennungsmotor mit hohen Drehmomenten belastet und somit durch die E-Maschine im Generatorbetrieb elektrische Energie für die Batteriespeicherung erzeugt [10].

Weiterhin ist eine weitere Option des Antriebes möglich. In diesem Betriebsmodus fährt das Fahrzeug gleichzeitig mit Verbrennungsmotor und Elektromotor. Der Verbrennungsmotor wird hier mit voller Leistung betrieben und der Elektromotor erhöht das Antriebsdrehmoment [10].

Um die elektrische Energie für die Hochleistungsbatterie aus der Bewegungsenergie zu gewinnen, wird das Fahrzeug durch die elektrische Maschine gebremst. Im Falle der Rekupe-ration öffnet sich die automatische Trennkupplung, um Bremsmomente des Verbrennungsmotors zu vermeiden [10].

Der Aufbau eines Parallelhybrid-Antriebsstrangs ist in Abbildung 2.5 dargestellt und setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen. Dazu gehört ein Verbrennungsmotor, der durch eine automatisierte Trennkupplung mit der Elektromaschine verbunden ist. Zu den Hauptkomponenten eines Parallelhybrid-Antriebes gehört das Getriebe und eine Hochleistungsbatterie, die Energie für die Leistungselektronik und für den Elektromotor zur Verfügung stellt [10].

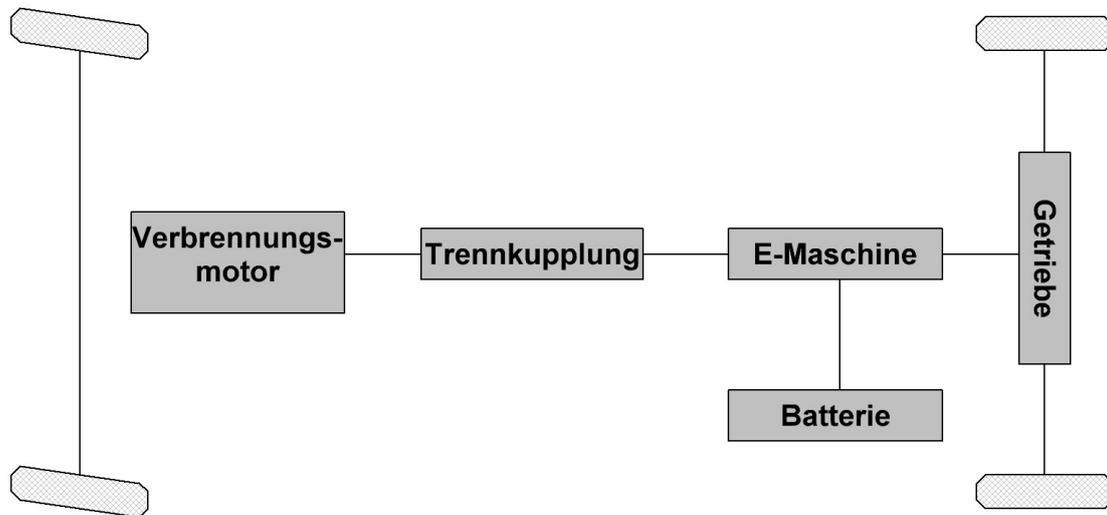


Abbildung 2.5.: Parallele Anordnung eines Hybridantriebes mit Momentenaddition. Eigene Darstellung in Anlehnung an [32]

Für einen Parallelhybridantrieb spricht, dass eine elektrische Maschine nach Belieben als Fahrmotor oder als Generator eingesetzt werden kann. Des Weiteren lässt sich die Verbrennungskraftmaschine (VKM) und die angeschlossenen elektrischen Komponenten besser auslegen bzw. dimensionieren. Dabei kommen zwei Dimensionierungsarten in Betracht. Zum einen können die elektrischen Komponenten klein gewählt und die VKM groß dimensioniert werden. Die elektrischen Komponenten sind in Folge für den städtischen Betrieb und die VKM für die Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeuges ausgelegt. Zum anderen lassen sich die Komponenten auch umgekehrt dimensionieren. Weiterhin kann mittels eines Parallelhybridantriebes ein bestmögliches Ergebnis für einen geringeren Kraftstoffverbrauch erzielt werden. Dies ist auf die optimalen Wirkungsgrade, die bei höheren Geschwindigkeiten erzielt werden und den daraus resultierenden Wegfall der elektrischen Umwandlungsverluste zurückzuführen [10].

Ein Nachteil im Hinblick auf die Abgasemission und den Energieverbrauch ist, dass der VKM nicht mehr stationär und somit nicht unabhängig vom Radantrieb arbeiten kann [10].

2.4. Digatron Zykliersystem

2.4.1. Zellentester MCT 200-06-4 ME

Mit dem Test- und Formationssystem der Firma Digatron Power Electronics GmbH ist es möglich, unterschiedliche Experimente für alle möglichen Arten von Batterien durchzuführen. Ebenfalls werden Test- und Simulationssysteme für andere Arten elektrischer Energiespeicherung wie zum Beispiel Brennstoffzellen, Superkondensatoren oder Hybridantriebe gefertigt. Die Firma Digatron beschäftigt sich mit der Entwicklung, Fertigung und Kundenbetreuung von Zykliersystemen in Deutschland, China, der Vereinigten Staaten und Indien.

Das Zykliersystem MCT 200-06-4 ME ist in Abbildung 2.6 dargestellt und ist für die Zyklierung von modernen Zelltechnologien, wie zum Beispiel Lithium-Ionen, NiCd oder NiMH ausgelegt. Es besteht nicht nur die Möglichkeit einzelne Zellen zu zyklieren, sondern auch die Batteriepacks, die aus Parallel oder in Reihe geschalteten Zellen aufgebaut sind.



Abbildung 2.6.: Zyklierungstestsystem MCT 200-06-4 ME

Die Geräte werden nach individuellen Kundenwünschen entwickelt und gebaut. Jedes System verfügt über unterschiedliche Anzahl von Kanälen, auch Kreisen genannt. Alle Kreise werden von einer gemeinsamen Stromversorgung gespeist. Es können bis zu zehn Racks in einem Gehäuse eingebaut werden. Auf jedem Rack können 4 bis 16 Kanäle installiert werden. Die Kommunikation zwischen den Modulen, Testsystemen und Host-Computern erfolgt über einen Ethernet-Hub. Es werden zusätzliche Optionen, wie zum Beispiel zusätzliche Eingangskanäle, Smart-Batterie-Busse, eine Schnittstelle zur bestehenden Klimakammern usw. in Kombination mit der No-Limits BTS-600-Software der Firma Digatron angeboten [24].

In dieser Bachelorarbeit wurde ein Zyklisierungstestsystem MCT 200-06-4 ME Multiple Cell Tester 4x200A/0-6V für die Testzellen der Firma Digatron Power Electronics GmbH verwendet. Folgende Tabelle 2.1 zeigt technische Daten des Zyklisierungstestsystems (MCT 200-06-4 ME).

Tabelle 2.1.: Technische Daten des Zyklisierungstestsystems MCT 200-06-4 ME

Technische Daten, Kreis	Werte
Anzahl der Kreise	4
PC - Interface	BTS600
Ladestrom min.	0,20A
Ladestrom max.	200A
Entladestrom min.	0,20A
Entladestrom max.	200A
Ladespannung min.	0,00V
Ladespannung max.	6,00V
Entladespannung min.	0,00V
Entladespannung max.	6,00V
Genauigkeit in % vom Endwert	± 0,1%
Messrate	10ms
Schutzart	IP20
Netzanschlussspannung L1,L2,L3	400V
Kühlung	Lüfter

Für die Temperaturmessung wurde vom Team BATSEN jeder Kreis des Systems mit den AD590 Temperatursensoren nachgerüstet. Der AD590 besitzt zwei integrierte Anschlüsse und erzeugt einen Ausgangsstrom, der proportional zur absoluten Temperatur ist ($1 \mu\text{A/K}$). Bei einer Temperatur von 298,2 K (25°C) fließt am Ausgang Strom von 298,2 ($1 \mu\text{A}$). Die Temperaturgrenzen für den Fühler liegen zwischen -55°C und 150°C . Die Informationen zu dem AD590 wurden aus dem Datenblatt entnommen [14]. Nach dem Einbau wurden die

Messfehler der Sensoren mit einer separaten Messung festgestellt. In der Tabelle 2.2 ist die Messabweichung der Temperatursensoren für jeden Kreis festgehalten.

Tabelle 2.2.: Messabweichung der Temperatursensoren

Kreis	Toleranz in °C
1	+1,4
2	-2,3
3	+0,6
4	+0,3

2.4.2. Battery Manager 4

Der Battery Manager 4 (BM 4) ist ein modulares, datenbankbasiertes Managementsystem, das Daten der Batteriezyklierungsprozessen verwaltet und steuert.

BM4 besteht aus vier Software-Komponenten:

- BM Workstation
- BM Server Manager
- BM Communication Server
- BM Datenbank

Workstation

Die BM Workstation bietet eine Benutzeroberfläche und dient zur Beobachtung und Steuerung von Mess- und Steuerkreisen. Die BM Workstation bietet die Möglichkeit, die Messergebnisse grafisch auszuwerten. Hier werden Zyklrierprogramme erstellt und bedient [16].

Server Manager

Der Server Manager dient der Datenkoordination und Datenaufbereitung zwischen einzelnen Communication Servern und den Datenbanken [16].

Communication Server

Diese eigenständige Anwendung übernimmt die Kommunikation und den Datenaustausch zwischen physikalischen Kreisen des Zyklriergerätes. Es ist möglich, mehrere Communication Server für ein System zu installieren [16].

Datenbanken

Der Battery Manager wird in Kombination mit einem SQL-Server verwendet. Die Datenbankstruktur ist in eine Kreis-Datenbank und eine Benutzer-Datenbank aufgeteilt.

Die Tabellen mit Informationen über die vorhandenen physikalischen Kreise, den Communication Servern, Programme, Batterien und den Namen der Experimente gehören zur Kreis-Datenbank [16].

In der Benutzer-Datenbank sind Daten über Benutzer und Benutzergruppen gespeichert. Die Benutzer-Datenbank ist immer mit einem Passwort geschützt [16].

Um die Ausführungsgeschwindigkeit des Battery Managers nicht zu verlangsamen, ist eine regelmäßige Pflege der Datenbanken wichtig. Es ist notwendig, die Datenbankverbindungen aufzulösen und die Datenbank zu komprimieren. Weiterhin sind auch regelmäßige Datenbank-Backups notwendig, um die Daten zu sichern. Im Ergebnis sind alle Daten archiviert und stehen jeder Zeit zur Verfügung. Der Battery Manager bietet einige automatische Scripts für die Datenbankpflege, die bei Bedarf aktiviert werden können [16].

2.4.3. Batterie-Test-System BTS-600 Programme

Das Batterie-Test-System BTS-600 ist in der Battery Manager Workstation Benutzeroberfläche integriert und bietet Möglichkeiten für die Prüfung, Analyse, Auswertung und Zyklisierung von Batterien im Labor. Der Programmeditor dient der Prüfprogrammerstellung. Der Aufbau des Programmeditors ist in Abbildung 2.7 dargestellt.

Schritt	Label	Operator	Sollwert	Limit	Aktion	Registrierung
1						
2						

Abbildung 2.7.: Aufbau des Programmeditors bei dem Batterie-Test-System BTS-600

1. **Schritt - Spalte** ist für den automatischen Programmschritt - der Nummerierung notwendig.
2. **Label - Spalte** hier wird ein Name für den Sprungziel bei der Programmdurchführung eingetragen.
3. **Operator - Spalte** dient der Eingabe des Operators für den Prüfschritt, der durchgeführt werden soll. Falls die Operatoren noch nicht bekannt sind, besteht die Möglichkeit alle verfügbare Operatoren in Listenformat mit einem Mausklick anzuzeigen. Ebenfalls

kann in dieser Spalte der Prozedurname eingetragen werden. Für große Prüfprogramme bietet BTS-600 die Möglichkeit, mehrere Prüfschritte zu einem Befehl zusammenzufassen, dieser Schritt wird als Prozedur bezeichnet.

- 4. Sollwert - Spalte** enthält die Vorgaben für die Regelung. Ein Sollwert besteht in der Regel aus einem Zahlenwert und der dazugehörigen Einheit. Als Beispiel für Operator LAD (Laden) ist als Sollwert ein Strom von zum Beispiel 5 A eingetragen werden. Die meisten Operatoren sind nur mit Sollwerten verwendbar.
- 5. Limit - Spalte** ist für die Prüfschrittbeendigung verantwortlich. Der Prüfschritt wird beendet, hier die eingetragene Grenze erreicht wird.
- 6. Aktion - Spalte** ist für die Schrittbeendigung zuständig. Hier legt der Programmierer fest, wie der Prüfschritt beendet werden soll. Sobald in derselben Zeile eingetragene Grenze erreicht ist, wird die eingetragene Aktion ausgeführt. Diese Spalte übernimmt die gezielte Programmablaufsteuerung. Hier kann ein Sprungbefehl, Prozeduraufruf oder Stop/Unterbrechung eingetragen werden. Wenn diese Spalte frei bleibt, wird der nächste Prüfschritt durchgeführt.
- 6. Registrierung - Spalte** übernimmt die Steuerung der Messwertspeicherung. Hier werden nicht nur physikalische und logische Messwerte für die Messung festgelegt, sondern auch der Abtastfrequenz für die Messgröße [16].

3. Analyse der Rahmenbedingungen

3.1. Aufnahme und Auswertung von Fahrdaten und elektrischen Größen

Um ein Zyklersystem für Batteriezellen möglichst genau programmieren zu können, wurde eine Messfahrt mit dem Solaris Urbino 18,75 Hybridbus (Abbildung 3.1) gemacht. Die Messungen wurden auf Innovationslinie 109 in Hamburg durchgeführt. Diese Fahrstrecke ist eine der schönsten Buslinien Hamburgs und sogar die erste Innovationslinie Europas. Hier testet die Hochbahn verschiedene innovative Antriebstechnologien. Die Linie 109 ist 9,3 Kilometer lang und verläuft von Alsterdorf über Winterhude bis in die Hamburger Innenstadt.



Abbildung 3.1.: Batteriebus Solaris Urbino 18,75

Während der Fahrt wurden die Messdaten mit einer speziellen Software aufgezeichnet. Der Messaufbau ist in Abbildung 3.2 zu sehen. Es wurden 308 Messungen mit einer Abtastfrequenz von 14 Hz durchgeführt und Ströme, Spannungen, Temperatur und andere physikalische und binäre Werte registriert.



Abbildung 3.2.: Messaufbau im Batteriebus Solaris Urbino 18,75

3.1.1. Auswertung von Daten aus dem Linienbusbetrieb

Nach der Messfahrt wurden die Daten mit Matlab ausgewertet und in die Variable `BusDaten_all` als mehrdimensionaler Vektor gespeichert. In der Abbildung 3.3 sind die Geschwindigkeits-, Beschleunigungs-, Strom- und Spannungsdiagramme der durchgeführten Messfahrt dargestellt.

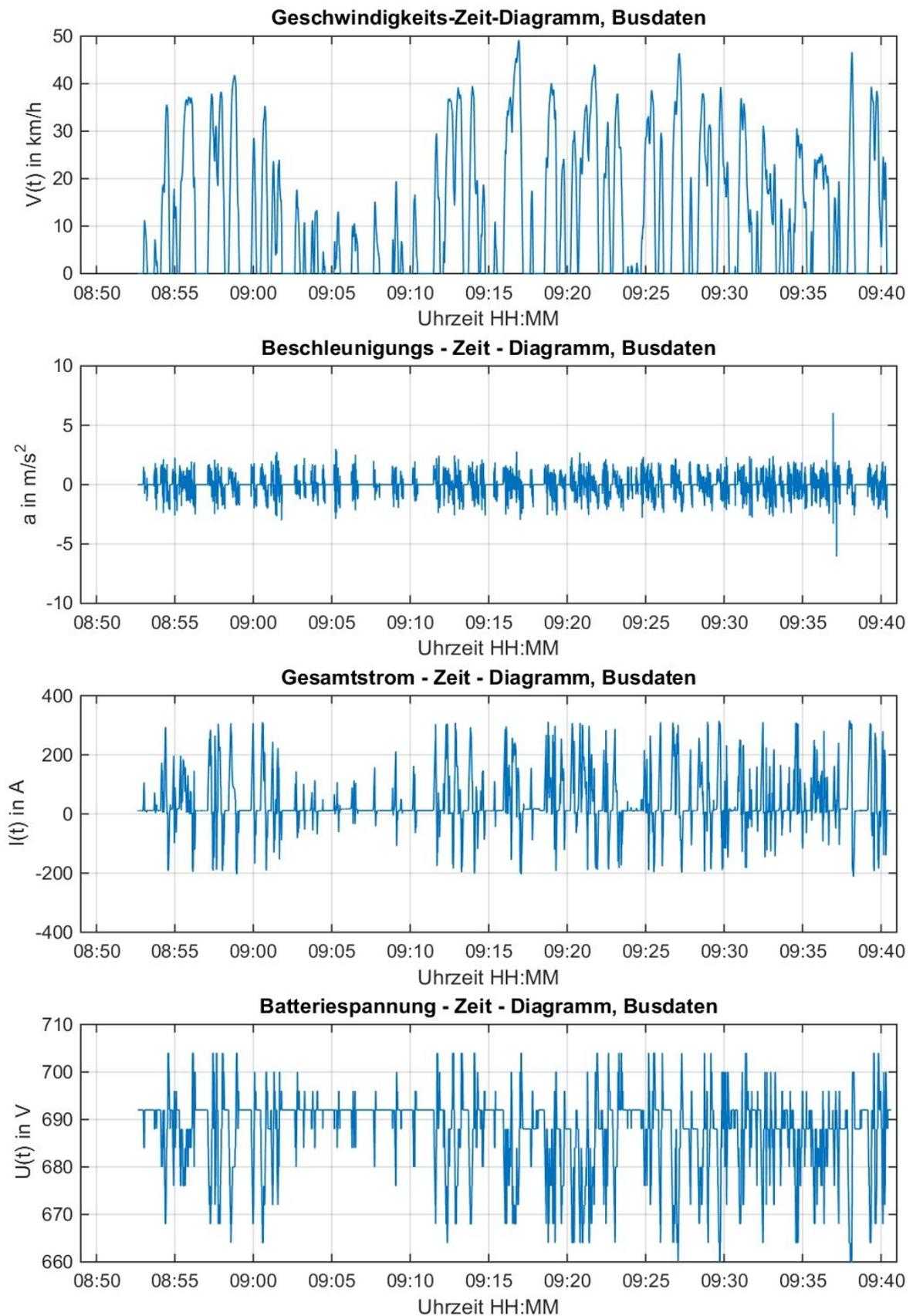


Abbildung 3.3.: Darstellung der Messergebnisse nach der Messfahrt

Ein Vektor, der die Zeitangaben über die durchgeführte Messfahrt beinhaltet, wurde in dem Format `datetime` registriert. Zwecks eines besseren Überblicks wurden die Zeiten anschließend in das Format `datetime` konvertiert. Hierfür wurde eine Matlab-Funktion `datetime()` verwendet.

Der erste Subplot $f = V(t)$, in Abbildung 3.3 zeigt, dass die Messfahrt um ca. 8:53 Uhr gestartet und um 9:41 Uhr beendet wurde. Weiterhin sind zeitgenaue Geschwindigkeiten sowie Halte- und Ampelpausen abzulesen.

Im zweiten Subplot $f = a(t)$, in Abbildung 3.3 ist um ca. 09:37 Uhr ein Sprung zu erkennen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass um diese Uhrzeit eine Notbremsung durchgeführt wurde, um einen Verkehrsunfall mit einem Fahrradfahrer zu verhindern.

Für den dritten Subplot $f = I(t)$, in Abbildung 3.3 sind Berechnungen des gesamten Batteriestromes (I_{ges}) notwendig, da während der Messfahrt die Batteriepacks von den Wasserstoffzellen stets parallel aufgeladen wurden. Aufgrund dessen konnten die Daten aus dem Vektor `BusDaten_all` nicht verwendet werden.

Laut dem Prinzipschaltbild sind die Brennstoffzelle, die Batteriepacks und der Fahrmotor parallel angeschlossen. Das Prinzipschaltbild für den Solaris Urbino 18,75 wurde in Absprache mit den FFG Fahrzeugwerkstätten Falkenried GmbH entworfen und in Anhang F.1 dargestellt.

Folgende Berechnung wurde für den gesamten Batteriestrom aufgestellt:

$$I_{ges}(i) = \frac{PBATIST(i) + PFCIST(i)}{BAT_U(i)} \quad (3.1)$$

Die Messwerte `PBATIST`, `PFCIST` und `BAT_U` wurden aus dem Vektor `BusDaten_all` entnommen und bedeuten:

- `PBATIST` $\hat{=}$ Batterieleistung von dem Solarisbus Urbino 18,75
- `PFCIST` $\hat{=}$ Leistung der Wasserstoffzelle
- `BAT_U` $\hat{=}$ Batteriespannung
- `(i)` $\hat{=}$ ein Laufindex (Anzahl von Messwerten)

Die gesamten Messwerte für den Vektor `BusDaten_all` wurden mit einer Frequenz von 14Hz aufgenommen. Da die Fahrt ca. 45 Minuten dauerte, sind 37 800 Berechnungen von I_{ges} notwendig, da:

$$i_{length} = (45 \cdot 60)sek \cdot 14sek^{-1} = 37800$$

Zwecks zielführenden Berechnungen von I_{ges} wurde ein Matlab - Skript geschrieben und ausgeführt.

3.1.2. Erfassung von Daten aus dem Busbetrieb mit dem Fahrdatenlogger

Weiterhin wurden GPS-Daten während der Messfahrt mit einem Datenlogger aufgenommen. Die Aufnahmen dieser Daten erfolgten mittels Datenlogger für Elektrobusse mit Mikrocontrollersteuerung, Inertialmesssystem sowie GPS- und GSM-Modulen aus der Bachelorarbeit Groth [23]. Zur Veranschaulichung zeigt die Abbildung 3.4 einen Datenlogger.



Abbildung 3.4.: GPS und GSM Datenlogger.

Der Datenlogger wurde im Rahmen des Forschungsprojektes BATSEN zur Aufzeichnung von Positions- und Bewegungsdaten in Elektro- und Hybridbussen entwickelt. Die Entwürfe und Fertigung der neuen Hardware- und Softwaremodule entwickelte der ehemalige Bachelorand vom BATSEN-Team Herr Felix Attila Groth. Mit Hilfe von weiteren Komponenten wurde ein neues System realisiert. Durch die Überprüfung der Eignung des Messkonzeptes und durch die Testfahrten haben sich die erwarteten Auswirkungen bestätigt [23].

Nach der Messfahrt mit dem Solaris Urbino 18,75 wurden die Daten mit Matlab ausgewertet. Zunächst erfolgte die Auswertung der GPS-Koordinaten und anschließend die Nachbildung dieser mit Hilfe der Webseite www.hamsternmap.com/quickmap.php. Die vollständige Route ist in der Abbildung 3.5 zu sehen. Links im Bild sind die GPS-Daten zu erkennen.

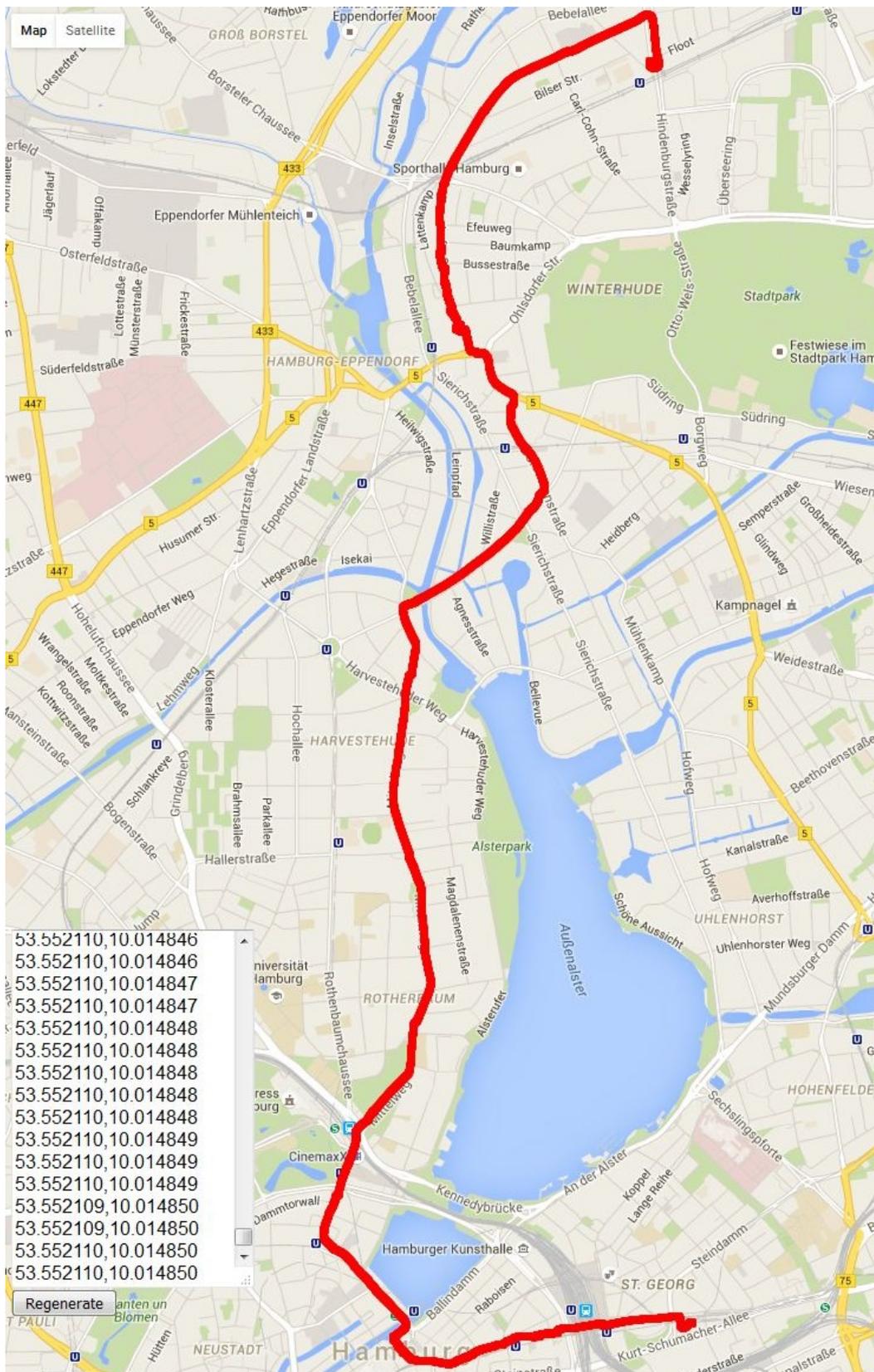


Abbildung 3.5.: Messfahrtroute von der Haltestelle U-Alsterdorf zu der Haltestelle ZOB-Hauptbahnhof mit Solaris Urbino 18,75.

Um diese Route nachbilden zu können, wurden die GPS Koordinaten aus dem Datenlogger gelesen und in eine Textdatei umgewandelt.

Die GPS Koordinaten bestehen aus drei Komponenten. Die erste Komponente ist der Breitengrad. Mit Hilfe des Breitengrads wird die Nord-Süd Position eines Punktes bestimmt. Die zweite Komponente bildet den Längengrad. Durch den Längengrad wird die Ost-West Position eines Punktes bestimmt. Zur Bestimmung einer kompletten und exakten GPS Position ist eine weitere dritte Komponente, die Höhe, notwendig [22].

Allerdings sind für die Darstellung der Route auf der Webseite www.hamstermap.com/quickmap.php nur zwei Koordinaten in dem dezimalen Koordinatensystem notwendig. Diese Plattform schließt die Komponente der Höhe aus.

Geschwindigkeitsvergleich zwischen Solaris Urbino 18,75 und Datenlogger

Mit dem Datenlogger wurde die Geschwindigkeit registriert. In der Abbildung 3.6 sind die Messdaten aus dem Datenlogger und Solaris Urbino 17,85 in einem Plot dargestellt.

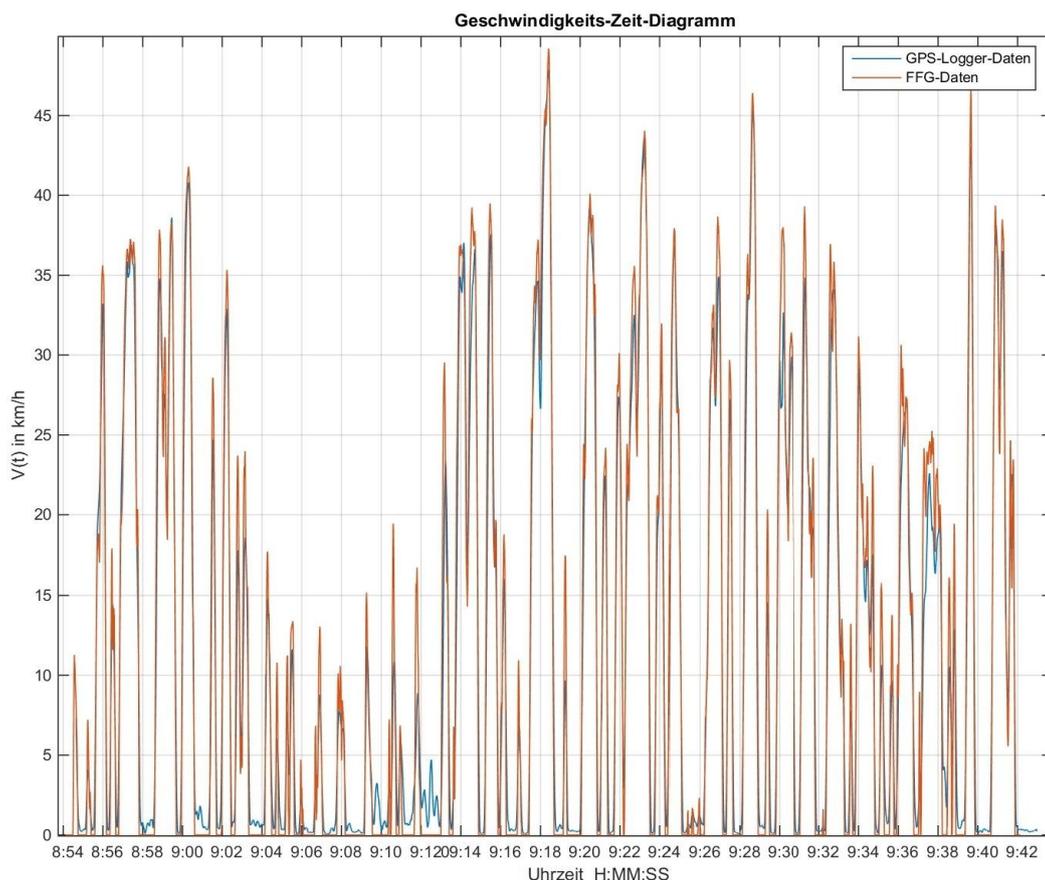


Abbildung 3.6.: Geschwindigkeitsmessung Datenlogger und Solaris Urbino 18,75

Um die Abtastraten der Messdaten der Solaris-Software und des Datenloggers anzugleichen, wurde zuerst eine Zeitsynchronisierung zwischen dem Datenlogger und den Solaris Zeitdaten durchgeführt. Die Zeiten wurden in das `datetime`-Format transformiert und der Vektor mit Datenloggerzeiten um 1 Stunde und 95 Sekunden geändert. Der Datenlogger besitzt zwei separate GNSS-Empfänger. Die Daten wurden mit einer Frequenz von 10 Hz registriert und auf der microSD-Karte gesichert. Für jeden Empfänger wurden die Daten separat in zwei verschiedenen Vektoren gespeichert. Nach der Auswertung von beiden Vektoren, `speed1.mat` und `speed2.mat` wurde festgestellt, dass der Vektor `speed2.mat` weniger Messfehler aufweist. Somit wurden die Geschwindigkeiten des zweiten GNSS-Empfängers und die Solarisgeschwindigkeitdaten für diese Arbeit in Betracht genommen. Es ist zu erkennen, dass beide Kurven in Abbildung 3.6 fast identischen Verlauf aufzeigen.

Die Abweichungen auf einige $\frac{km}{h}$ sind im Stand und an manchen Spitzen zu erkennen. Die Ursachen für die Ungenauigkeiten liegen an den Messfehlern von dem GNSS-Empfängerdaten vom Datenlogger. Eine genauere Beschreibung von Messfehlern wurde in der Bachelorthesis von Herrn Felix Groth [23], im Kapitel 7 Erprobung und Erfassung von Messdaten detailliert beschrieben.

3.2. Konzeption und Messplanung der Zyklierexperimente

3.2.1. Ein Umrechnungsmodell auf eine kleinere Batterie

Aus Kostengründen ist es nicht möglich, die Simulation mit den im Elektrobus verbauten Batteriezellen durchzuführen. Um verlässliche und anwendungsgerechte Messergebnisse zu erhalten, ist es notwendig, die Tests auf Zellen durchzuführen, die chemisch den gleichen Aufbau besitzen. Dabei stehen zum Beispiel Lithium-Eisenphosphatzellen vom Typ ANR26650M1b mit einer Nennkapazität von 2,5 Ah und einer Nennspannung von 3,3 V des Herstellers A123 zur Verfügung. Das vorhandene Zykliersystem ermöglicht eine gleichzeitige Vermessung von Parametern von bis zu vier Zellen.

Auf Grundlage der erfassten Messdaten während der Messfahrt auf der Linie 109 wurden alle vier Zellen unter gleichen Umgebungsbedingungen zyklert. Dabei unterscheiden sich die Lade- bzw. Entladeströme, um somit vier modellierte Batteriekapazitäten mit ihrer C-Rate repräsentieren zu können.

Die Tabelle 3.1 zeigt potenziell einsetzbare Batteriekapazitäten. Als Grundlage wurde die Gesamtkapazität des originalen Batteriepacks des Solaris Urbino 18,75 von 120 kWh eingesetzt.

Die Strombelastung ist durch den Fahrzyklus gegeben und sind unabhängig von der Auslegung der Batterie. Das unterschiedliche Gewicht für größere Batteriepacks geht nicht in die Berechnungen ein, zudem sind die Messdaten während einer Messfahrt ohne Fahrgäste aufgenommen worden.

In dieser Arbeit soll die Lebenserwartung von kleinen und großen Batteriepacks abgeschätzt werden. Für kleinere Packs liegt bei gleichem Strom eine hohe relative Belastung (C-Rate) vor, bei großen Packs eine kleinere relative Belastung. Es wurde mit Batteriepacks von 120 kWh, 60 kWh, 40 kWh und 30 kWh gerechnet, wobei eine Steigung der C-Rate um die Faktoren 2, 3 und 4 gegenüber des größten Batteriepacks vorlag.

Tabelle 3.1.: Potenziell einsetzbare Batteriekapazitäten auf der Linie 109

Testzellen	Nennkapazität	Modellierte Batterien mit Energiegehalt von
BAT01	2,5 Ah	120 kWh
BAT02	2,5 Ah	60 kWh
BAT03	2,5 Ah	40 kWh
BAT04	2,5 Ah	30 kWh

Die Batterie mit 120 kWh ist im original Solaris Hybridbus verbaut.

Um die Lade- bzw. Entladeströme der modellierten Batteriekapazitäten auf die zur Verfügung stehenden Testzellen anzupassen, wurde zuerst die Solaris-Batteriekapazität berechnet:

$$C = \frac{E}{U} \quad (3.2)$$

Bezogen auf den Solarisbus ergibt sich folgende Batteriekapazität:

$$C_{Nenn,Solaris} = \frac{E_{Batt,Solaris}}{U_{Nenn,Solaris}} = \frac{120 \text{ kWh}}{660 \text{ V}} = 181,82 \text{ Ah} \quad (3.3)$$

Um die Berechnungen auf unterschiedliche Batterien beziehen zu können, wurde der gemessene Stromverlauf auf C-Raten umgerechnet. Die C-Rate ist die Normierung des Stromes auf die Speicherkapazität. Die Werte der C-Rate wurden in Abbildung 3.7 mit der Gleichung 3.4 berechnet

$$C_{Rate}(i) = \frac{I_{ges}(i)}{C_{Nenn,Solaris}} \quad (3.4)$$

$I_{ges}(i)$ ist ein Lade- oder Entladestrom, der der Batterie während der Fahrt entzogen oder zugefügt wurde. Dieser Strom wurde im Kapitel 3.1.1 Auswertung von Daten aus dem Lini-
enbusbetrieb beschrieben und mit der Formel 3.1 auf der Seite 30 berechnet.

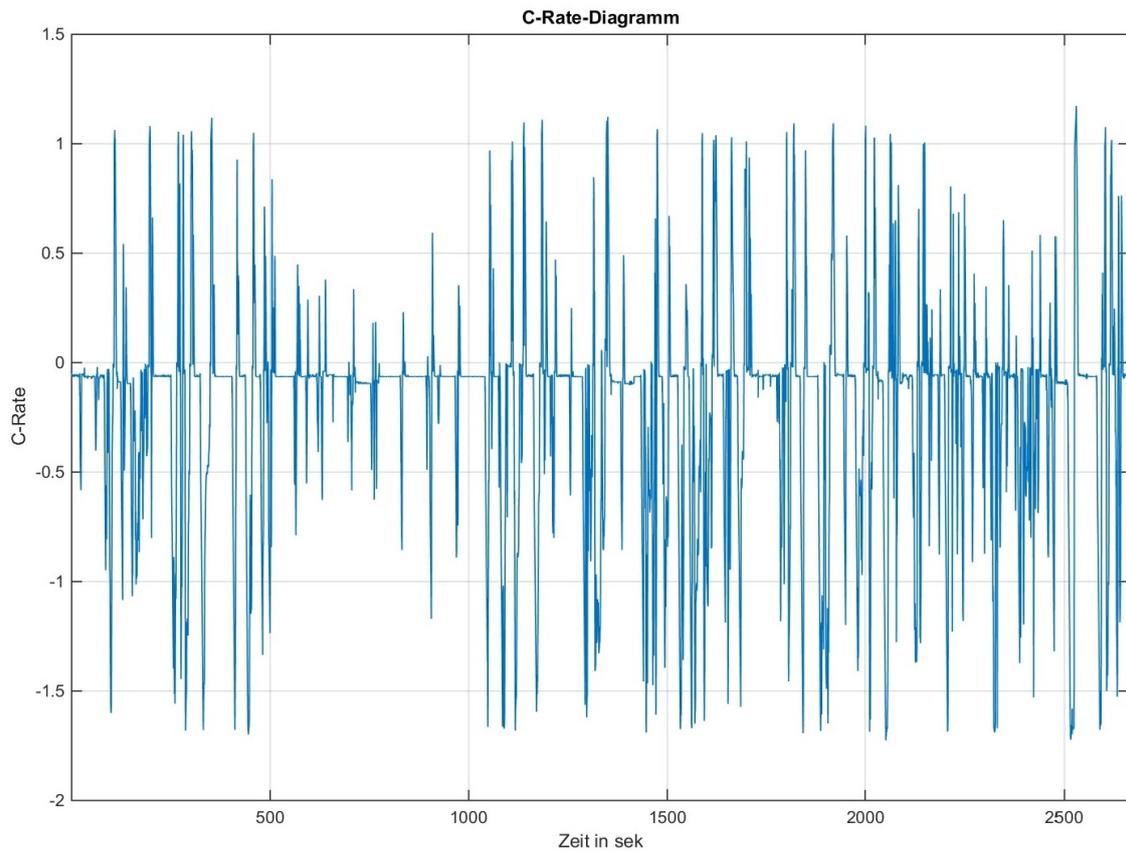


Abbildung 3.7.: Fahrzyklus von der Endhaltestele U-Alsterdorf zum zentralen Omnibusbahnhof (ZOB) Hamburg. Darstellung als Fahrstrom, normiert in C-Raten der Fahrbatterie.

In Abbildung 3.7 ist ein Fahrzyklus der Innovationslinie 109 in normierten C-Raten zu sehen. Die charakteristischen Merkmale der Abbildung sind die positiven und negativen Stromwerte. Zum Beschleunigen des Elektrobusses wird der Batterie Energie entzogen, was sich in negativen Spitzen der C-Rate widerspiegelt. Der negative Offset erklärt sich durch weitere elektrische Verbraucher wie Heizung, Klimageräte oder Licht, welche von der gleichen Batterie versorgt werden. Die positiven Spitzen der C-Rate spiegeln die Rekuperation wieder. Dabei wird die Bremsenergie zurückgewonnen und der Batterie wieder zugeführt.

Mit den normierten C-Raten ist es möglich, die Busfahrt mit unterschiedlichen modellierten Batteriekapazitäten zu simulieren und entsprechende Testzyklen für den Batterieteste zu programmieren.

Um die benötigte Ladung zu bestimmen, wurde die Fläche unter der C-Rate-Kennlinie mit Matlab berechnet. Nach einer Fahrt von der Endhaltestele U-Alsterdorf bis zum zentralen

Omnibusbahnhof (ZOB) Hamburg werde somit 18,612 kWh von 120 kWh Batterieenergiegehalt verbraucht. Abbildung 3.8 zeigt, dass dies einer Kapazität von 15,51 % der gesamten Nennkapazität der Batterie entspricht.

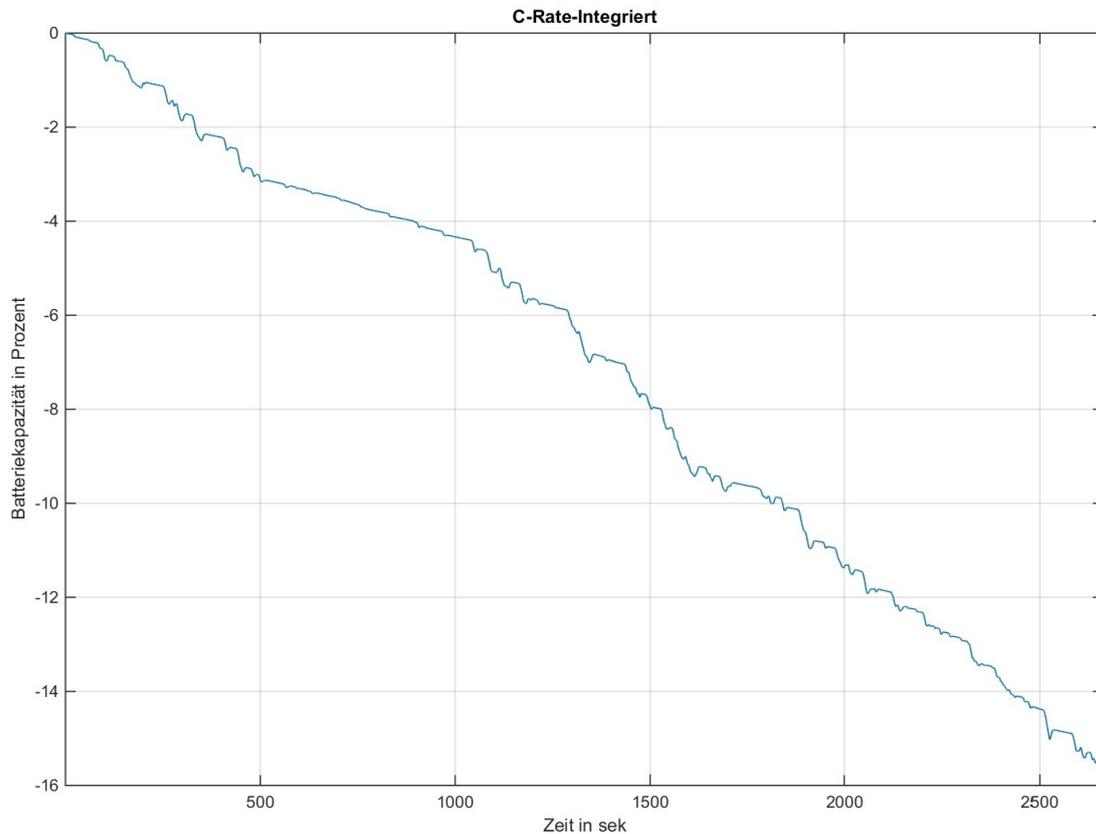


Abbildung 3.8.: Kapazitätsdifferenz nach einer Fahrt von U-Alsterdorf zum ZOB.

Der Lade bzw. Entladestrom wird bestimmt, indem die normierte C-Rate mit einem Faktor A und der Nennkapazität der Testzellen multipliziert wird.

$$I_{BAT0X}(i) = A_X \cdot C_{Rate}(i) \cdot C_{Nenn} \quad (3.5)$$

Die Daten wurden in einem Solaris-Bus mit einer Batteriekapazität von 120 kWh aufgenommen, daher wird der Faktor A folgendermaßen berechnet:

Der Faktor A ergibt sich aus:

$$A_x = \frac{E_{Batt,Solaris}}{E_{BAT0X,modelliert}} \quad (3.6)$$

Für die BAT01 gilt mit Gleichung 3.5 und Gleichung 3.6:

$$I_{BAT01}(i) = A_1 \cdot C_{Rate}(i) \cdot C_{Nenn} \quad (3.7)$$

$$\text{mit: } A_1 = \frac{E_{Batt,Solaris}}{E_{BAT01,modelliert}} = \frac{120 \text{ kWh}}{120 \text{ kWh}} = 1 \quad (3.8)$$

Für die BAT02 gilt mit Gleichung 3.5 und Gleichung 3.6:

$$I_{BAT02}(i) = A_2 \cdot C_{Rate}(i) \cdot C_{Nenn} \quad (3.9)$$

$$\text{mit: } A_2 = \frac{E_{Batt,Solaris}}{E_{BAT02,modelliert}} = \frac{120 \text{ kWh}}{60 \text{ kWh}} = 2 \quad (3.10)$$

Für die BAT03 gilt mit Gleichung 3.5 und Gleichung 3.6:

$$I_{BAT03}(i) = A_3 \cdot C_{Rate}(i) \cdot C_{Nenn} \quad (3.11)$$

$$\text{mit: } A_3 = \frac{E_{Batt,Solaris}}{E_{BAT03,modelliert}} = \frac{120 \text{ kWh}}{40 \text{ kWh}} = 3 \quad (3.12)$$

Für die BAT04 gilt mit Gleichung 3.5 und Gleichung 3.6:

$$I_{BAT04}(i) = A_4 \cdot C_{Rate}(i) \cdot C_{Nenn} \quad (3.13)$$

$$\text{mit: } A_4 = \frac{E_{Batt,Solaris}}{E_{BAT04,modelliert}} = \frac{120 \text{ kWh}}{30 \text{ kWh}} = 4 \quad (3.14)$$

Die Stromverläufe der Testzellen für eine Fahrt von U-Alsterdorf bis zum ZOB sind in Abbildung 3.9 dargestellt.

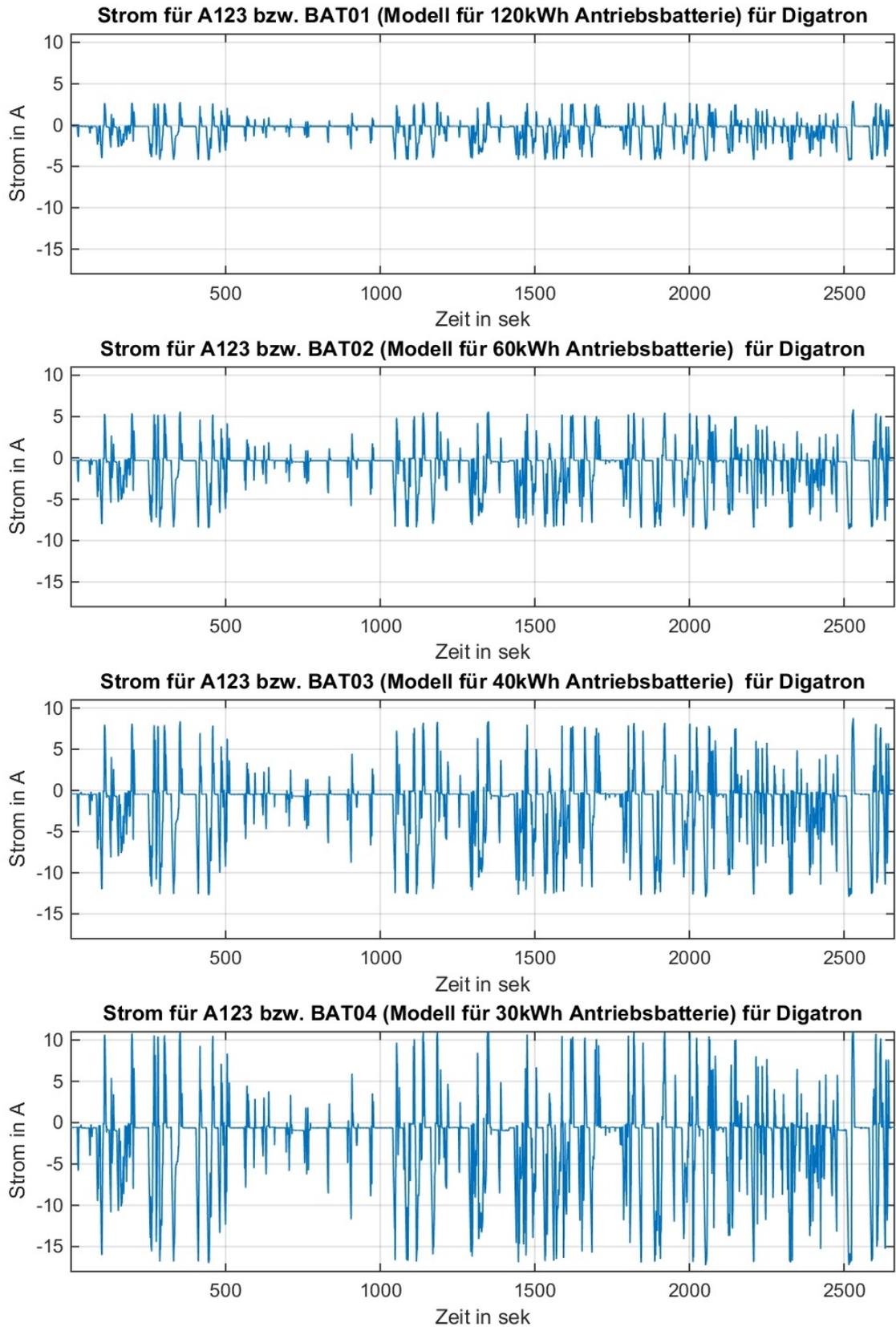


Abbildung 3.9.: Stromverläufe der Testzellen für eine Fahrt von U-Alsterdorf bis zum ZOB

3.2.2. Pantographenströme

Es wird angenommen, dass der Bus zehn Fahrten am Tag durchführt. Der Bus verlässt morgens das Busdepot mit voller Batterie. Nach einer Fahrt werden die Batterien an den Endhaltestellen über einen Pantographen aufgeladen. Die Ladezeit beträgt dabei 6 Minuten. Die Stromstärke während des Ladevorgangs hängt von der Batteriekapazität der Zellen ab, die im Bus verbaut sind. Es wurde angenommen, dass am Ende des Tagesbetriebs mindestens 20 % von der gesamten Batteriekapazität zur Verfügung stehen. Dazu wurde die benötigte Energie errechnet, die an jeder Endhaltestelle zugeführt werden muss. Die Ergebnisse wurden anschließend auf die Testzellen überführt.

Um den Ladestrom einer Testzelle zu bestimmen wird der Entladegrad berechnet. Die Grundlage der Berechnung ist der Energieverbrauch von 15,51 % der gesamten Batteriekapazität.

Für die Testzellen BAT01 bis BAT04 wurde der Energiegehalt mit Gleichung 3.2 berechnet. Die benötigten Daten wurden dem Datenblatt der High Power Lithium Ion Cell ANR26650M1b entnommen. Dieses Datenblatt ist dem Anhang B.1 zu entnehmen.

$$E_{\text{Testzelle},\text{BAT01}} = E_{\text{Testzelle},\text{BAT02}} = E_{\text{Testzelle},\text{BAT03}} = E_{\text{Testzelle},\text{BAT04}} =$$

$$C_{\text{Testzelle}} \cdot U_{\text{Nenn},\text{Testzelle}} = 2,5 \text{ Ah} \cdot 3,3 \text{ V} = 8,25 \text{ Wh} \quad (3.15)$$

Um den Ladestrom für die Testzelle BAT01 bzw. modellierte Batterie mit 120 kWh zu bestimmen wird zuerst der Entlade- und Nachladegrad berechnet.

Für die Testzelle BAT01 gilt:

$$C_{\text{Fahrt},\text{BAT01}} = C_{\text{Testzelle},\text{BAT01}} \cdot \text{Entladegrade} = 2,5 \text{ Ah} \cdot \frac{15,51\%}{100\%} = 388 \text{ mAh} \quad (3.16)$$

Für die Testzelle BAT01, die im Labor eingesetzt wird heißt das, dass während jeder Fahrt 388 mAh entzogen werden.

$$C_{\text{Nachlade},\text{BAT01}} = C_{\text{Testzelle},\text{BAT01}} \cdot \text{Nachladegrade} = 2,5 \text{ Ah} \cdot \frac{8,51\%}{100\%} = 213 \text{ mAh} \quad (3.17)$$

Für die im Labor eingesetzte Testzelle BAT01 gilt, dass während jeder Pantographenladung 213 mAh innerhalb von 6 Minuten zugefügt werden.

Für den Energiegehalt der Testzelle BAT01 gilt:

$$E_{Fahrt,BAT01} = E_{Testzelle,BAT01} \cdot Entladegrade = 8,25Wh \cdot \frac{15,51\%}{100\%} = 1,28Wh \quad (3.18)$$

Für die Testzelle BAT01, die im Labor eingesetzt wird heißt das, dass nach jeder Fahrt 1,28 Wh entzogen werden.

$$E_{Nachlade,BAT01} = E_{Testzelle,BAT01} \cdot Nachladegrade = 8,25Wh \cdot \frac{8,51\%}{100\%} = 0,702Wh \quad (3.19)$$

Für die Testzelle BAT01, die im Labor eingesetzt wird heißt das, dass nach jeder Ladung am Pantographen 0,702 Wh zugefügt werden.

Für die modellierte Batterie mit 120kWh Energiegehalt gilt:

$$C_{Fahrt,mod120kWh} = C_{mod,BAT01} \cdot Entladegrade = 181,818Ah \cdot \frac{15,51\%}{100\%} = 28,2Ah \quad (3.20)$$

Für die modellierte Batterie mit 120 kWh Energiegehalt heißt das, dass nach jeder Fahrt 28,2 Ah entzogen werden.

$$C_{Nachlade,mod120kWh} = C_{mod,BAT01} \cdot Nachladegrade = 181,818Ah \cdot \frac{8,51\%}{100\%} = 15,47Ah \quad (3.21)$$

Die modellierte Batterie soll in 6 Minuten 15,473 Ah aufnehmen.

Um den Überblick über den Energiegehalt der Testzelle BAT01 und der modellierten Batterie zu verbessern wurde der Entlade- und Nachladegrad in der üblichen Einheit Watt Stunden für jeden Fahrtzyklus errechnet.

Für den Energiegehalt der modellierten Batteriekapazitäten gilt:

$$E_{Fahrt,mod120kWh} = E_{mod,BAT01} \cdot Entladegrade = 120kWh \cdot \frac{15,51\%}{100\%} = 18,612kWh \quad (3.22)$$

$$E_{\text{Nachlade,mod120kWh}} = E_{\text{mod,BAT01}} \cdot \text{Nachladegrade} = 120 \text{ kWh} \cdot \frac{8,51\%}{100\%} = 10,212 \text{ kWh} \quad (3.23)$$

Die modellierte Batterie soll in 6 Minuten 10,212 kWh aufnehmen.

Der Pantograph-Nachladegrad wurde mit Hilfe einer Tabelle in Microsoft Excel ermittelt. Die Überschlagsrechnung der modellierten Batterie für 120 kWh ist im Anhang D.1 zu sehen. Die Restkapazität der Testzelle BAT01 am Ende des Tagesbetriebs beträgt 537 mAh. Für die modellierte Batterie beträgt die Restkapazität 288,2 Ah. Der Restenergiegehalt für die Testzelle BAT01 beträgt 1,773 Wh und für die modellierte Batterie 25,788 kWh. Das entspricht 21,49 % der gesamten Batteriekapazität bzw. des Energiegehalts.

Bezogen auf die verfügbare Ladezeit $t_{\text{Pantograph}} = 6 \text{ min} = 0,1 \text{ h}$ ergibt sich folgender Ladestrom $I_{\text{Pantograph}}$:

$$I_{\text{Pantograph}}(\text{für 6 min}) = \frac{E_{\text{Nachlade}}}{t_{\text{Pantograph}}} \quad (3.24)$$

Für die BAT01 gilt mit der Gleichung 3.24:

$$I_{\text{Pantograph,BAT01}}(\text{für 6 min}) = \frac{E_{\text{Nachlade,BAT01}}}{t_{\text{Pantograph}}} = \frac{0,213 \text{ Ah}}{0,1 \text{ h}} = 2,13 \text{ A} \quad (3.25)$$

Für die modellierte Batterie mit 120 kWh gilt mit der Gleichung 3.24:

$$I_{\text{Pantograph,mod120kWh}}(\text{für 6 min}) = \frac{E_{\text{Nachlade,mod120kWh}}}{t_{\text{Pantograph}}} = \frac{15,472 \text{ Ah}}{0,1 \text{ h}} = 154,73 \text{ A} \quad (3.26)$$

Um den Tageszyklus zu realisieren, wird somit eine konstante Stromstärke von 2,13 A für die Testzelle BAT01 im Batterielabor und 154,73 A für die modellierte Batterie an den Endhaltestellen benötigt. Diese Stromstärken müssen 6 Minuten lang verfügbar sein, um die geforderte Restkapazität von 20 % am Ende des Tagesbetriebs gewährleisten zu können.

Die Pantographenströme für weitere Testzellen und modellierte Batterien

Die Pantographenströme für die Testzellen BAT02, BAT03 und BAT04 wurden identisch der Testzelle BAT01 ausgerechnet. Die dazugehörigen Tabellen sind im Anhang D.2, D.3 und D.4 zu sehen.

Die Tabelle 3.2 gibt einen besseren Überblick über die Pantographenströme in Ampere, Restkapazitäten am Ende des Betriebstages in Ah und den Restenergiegehalt am Ende des Betriebstages in Wh für alle vier Testzellen.

Tabelle 3.2.: Pantographenströme, Restkapazität und Restenergiegehalt für die Testzellen am Ende des Betriebstages

Testzellen	Pantographenstrom	Restkapazität	Restenergiegehalt
BAT01	2,128 A	0,537 Ah	1,773 Wh
BAT02	6,450 A	0,550 Ah	1,815 Wh
BAT03	10,750 A	0,543 Ah	1,790 Wh
BAT04	15,075 A	0,558 Ah	1,840 Wh

Die Tabelle 3.3 gibt einen besseren Überblick über die Pantographenströme, Restkapazitäten am Ende des Betriebstages in Ah und den Restenergiegehalt am Ende des Betriebstages in kWh für die vier modellierten Batterien.

Tabelle 3.3.: Pantographenströme, Restkapazität und Restenergiegehalt für die modellierten Batterien am Ende des Betriebstages

Testzellen	Pantographenstrom	Restkapazität	Restenergiegehalt
120 kWh	154,727 A	39,076 Ah	25,90 kWh
60 kWh	234,545 A	20,000 Ah	13,20 kWh
40 kWh	260,606 A	13,152 Ah	8,68 kWh
30 kWh	274,091 A	10,136 Ah	6,69 kWh

3.3. Beschleunigung des Alterungsprozesses der Testzellen

Um die bedeutsamen alterungsbedingten Veränderungen an den Testzellen im zeitlichen Rahmen der Bachelorarbeit betrachten zu können, wurde eine notwendige Beschleunigung des Alterungsprozesses der Testzellen vorgenommen. Die Literaturrecherche ergab dafür eine Möglichkeit, dieses durch die Erhöhung der Betriebstemperatur zu erreichen. In Bezug auf Forschungsergebnisse der Forschungsgruppen aus Newcastle (Großbritannien) [28] und aus Aachen (Deutschland) [27] ist eine temperaturbedingte Verkürzung der kalendarischen Lebensdauer der Versuchszellen ca. um Faktor 5,75 (Calendar Life Shortening Factor CLSF) zu erwarten.

Das Team aus Aachen hat Experimente über die kalendarische Lebensdauer der Batteriezellen durchgeführt. Im Testverlauf wurden die Testzellen für mindestens ein Jahr unter verschiedenen Temperaturen und unterschiedlichen Ladezuständen (State Of Charge SOC) gelagert. Die Messergebnisse sind in Abbildung 3.10 dargestellt.

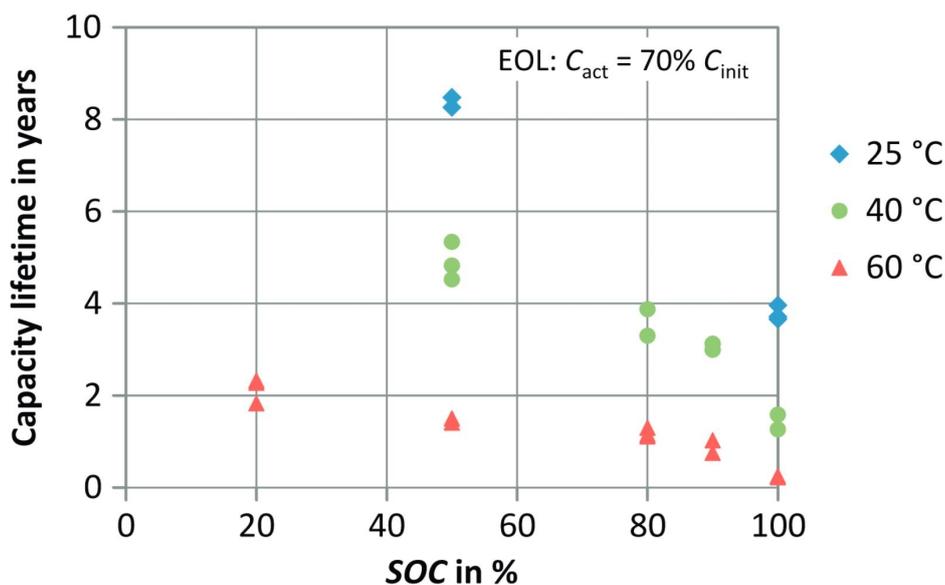


Abbildung 3.10.: Einfluss der Temperatur auf die kalendarische Lebensdauer [27].

In Abbildung 3.10 ist der Einfluss der Betriebstemperatur und des Ladezustandes auf den Alterungszustand (State Of Health, SOH) der Lithium-Ionen-Zellen zu sehen. Bei einem Ladezustand SOC von 50 % ergibt sich eine noch zu Verfügung stehende Nutzkapazität (C_{act}) von 70 % bei 60 °C nach 1.7 Jahren und bei 25 °C nach 8,2 Jahren. Das Diagramm legt nahe,

dass ein Temperaturanstieg von 10°C die Geschwindigkeit des Alterungsprozesses verdoppelt ($\text{CLSF}(\Delta T = 10\text{ K})$). Dies passt als grobe Abschätzung für die Arrhenius-Gleichung, die für viele biologische und chemische Prozesse eine Verdoppelung Reaktionsgeschwindigkeit pro 10°C postuliert.

Basierend auf den Forschungsergebnissen aus Aachen hat die Forschungsgruppe aus Newcastle die praktischen Werte für Koeffizienten der umgeformten Arrhenius-Gleichung 3.27 definiert:

$$\frac{dC}{dt} = A \cdot e^{kT} \quad (3.27)$$

$$k = 0,05 \quad , \quad A = 3,7 \cdot 10^{-11}$$

Damit besteht die Möglichkeit, die kalendarische Alterungsgeschwindigkeit und den Alterungsbeschleunigungsfaktor CLSF zu berechnen.

Für die Betriebstemperatur von 20°C gilt:

$$\frac{dC}{dt} = A \cdot e^{kT} = 3,7 \cdot 10^{-11} \cdot e^{0,05 \cdot (273+20)\text{ K}} = 8,52 \cdot 10^{-5} \quad (3.28)$$

Für die Betriebstemperatur von 55°C gilt:

$$\frac{dC}{dt} = A \cdot e^{kT} = 3,7 \cdot 10^{-11} \cdot e^{0,05 \cdot (273+55)\text{ K}} = 1,712 \cdot 10^{-3} \quad (3.29)$$

Der kalendarische Alterungsbeschleunigungsfaktor CLSF für die 55°C ist auf 20°C bezogen und mit Berechnungen 3.28 und 3.29 mit Gleichung 3.30 berechnet.

$$\text{CLSF}(55^\circ\text{C}) = \frac{dC/dt(20^\circ\text{C})}{dC/dt(55^\circ\text{C})} = \frac{8,52 \cdot 10^{-5}}{1,712 \cdot 10^{-3}} = 5,75 \quad (3.30)$$

Die Ergebnisse für die andere Betriebstemperaturen sind in der Tabelle 3.4 dargestellt und in Abbildung 3.11 als Diagramm gezeigt.

Tabelle 3.4.: Die berechneten Daten aus der Arrhenius-Gleichung des Forschungsteams aus Newcastle [28]

°C	dC/dt	CLSF
20	$0,852 \cdot 10^{-4}$	1
25	$1,094 \cdot 10^{-4}$	1,28
30	$1,405 \cdot 10^{-4}$	1,64
35	$1,804 \cdot 10^{-4}$	2,12
40	$2,317 \cdot 10^{-4}$	2,72
45	$2,975 \cdot 10^{-4}$	3,49
50	$3,820 \cdot 10^{-4}$	4,48
55	$4,905 \cdot 10^{-4}$	5,75
60	$6,298 \cdot 10^{-4}$	7,39

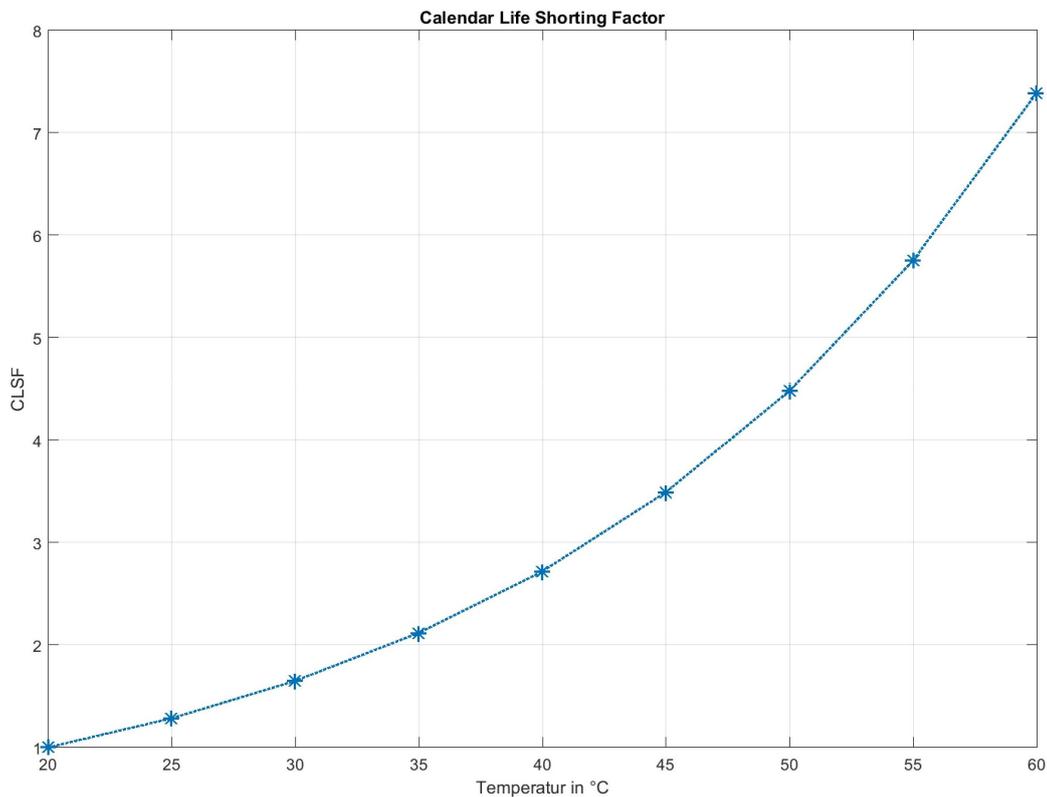


Abbildung 3.11.: Kalendarischer Alterungsfaktor CLSF nach der Arrhenius-Gleichung

Wegen der im Kapitel 2.2.2 Lebensdauer der Batterien dargelegten vielfältigen Alterungseinflüsse ist es leider nicht möglich, eine hinreichend genaue Herleitung des Verhaltens aus chemischen und physikalischen Grundgleichungen abzuleiten.

Im Hinblick auf die vorliegende Arbeit ist jedoch nach Gleichung 3.30 ein kalendarischer Alterungsbeschleunigungsfaktor von mindestens 5,75 zu erwarten. Als Grundlage dient dabei die im Datenblatt der Testzellen angegebene Betriebstemperatur von 55 °C. Da die Testzellen nicht nur temperaturbedingten Alterungseinflüssen unterliegen, ist möglicherweise mit einem erhöhten Beschleunigungsfaktor zu rechnen.

4. Realisierung

4.1. Sicherheitskonzept für die Testzellen

Für die vier Testzellen wurden gleiche und konstante Bedingungen geschaffen, um die Anzahl der Messfehler zu verringern. Dafür wurden aus einem Kupferblech acht identische Halterungen für die Testzellen angefertigt und auf einer nicht leitenden Platte befestigt. In Abbildung 4.1 ist die Batteriehalterung für die Testzellen in einer Skizze dargestellt.

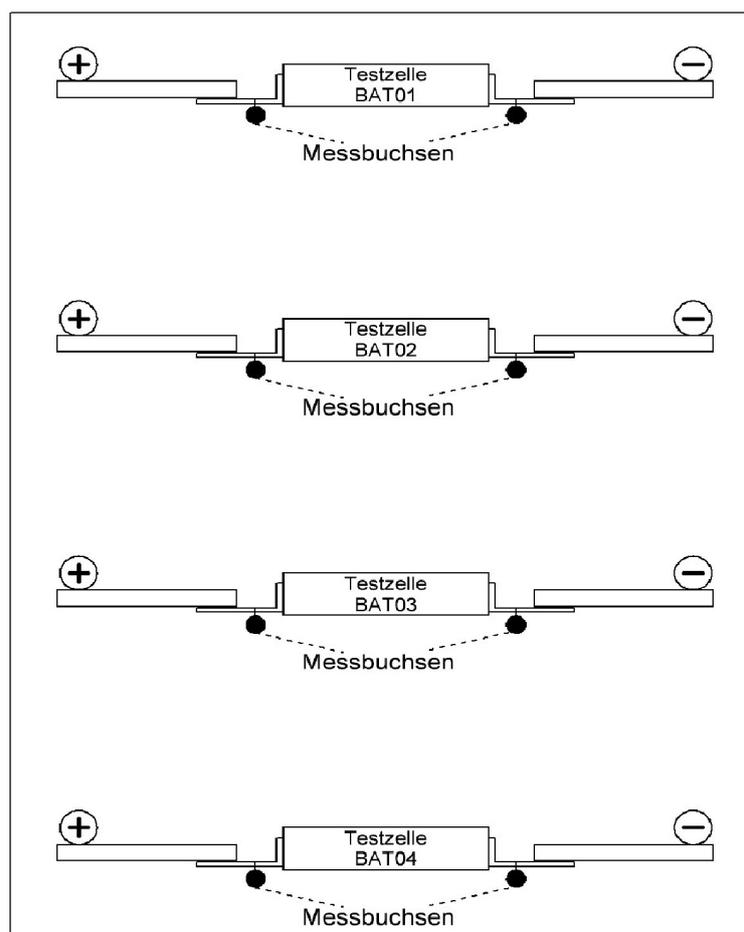


Abbildung 4.1.: Skizze der Halterung für die Testzellen BAT01 bis BAT04

Zudem wurden Messbuchsen für die Elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS-Messung) an allen Polen der Testzelle angelötet um die Messungenauigkeiten zu minimieren. Der Aufbau wurde in einer Blechkiste fixiert, um beispielsweise Elektrolytausfluss oder im schlimmsten Fall einen Brand auf diesen Behälter zu begrenzen.

4.2. Konzipierung des Messplans

Zur Beschleunigung der Zellalterung, wurden die Testzellen über mehrere Wochen bei einer erhöhten Temperatur von 55 °C zyklert. Um den Alterungsprozess beobachten und untersuchen zu können, wurden wöchentlich regelmäßige Messungen der Parameter der Testzellen durchgeführt. Im Rahmen dieser Messungen wurde die aktuelle Kapazität anhand der Methoden integrativer Ladungsbestimmung und der elektrochemischen Impedanzspektroskopie festgestellt. Die beiden Messvorgänge fanden bei einer Umgebungstemperatur von 25 °C statt, da diese Temperatur nach ISO12405- und IEC626600-Norm festgelegt wurde. Zudem beziehen sich die Batterie-Herstellerangaben auf diese Temperatur.

Um die Zellen einer schnellen Temperaturänderung zu unterziehen, wurde der Temperaturschrank zunächst auf 25 °C herunter gekühlt. Die Kühlung von 55 °C auf 25 °C erfolgte zweistufig in 30 Minuten-Abständen. In der ersten Stufe wurde die Umgebungstemperatur jeweils auf 10 °C und in der zweiten Stufe auf 25 °C eingestellt.

Die eigentliche Zyklierung wurde jeweils für mehrere Wochen geplant. Der Zyklervorgang musste solange wiederholt werden, bis die Alterungsmessungen eindeutige Resultate zeigen. Da die Zyklertemperatur erhöht wurde, waren bedeutsame Kapazitätsverluste nach wenigen Wochen zu erwarten. Es wurde entschieden, das Programm solange fortzuführen, bis Verluste im zweistelligen Prozentbereich vorliegen.

Es wurde zwischen einem Tageszyklus und einem Wochenzyklus unterschieden. Das Testprogramm sieht einen siebentägigen Wochenzyklus vor, der wiederum aus 14 simulierten Tageszyklen besteht.

Ein Tageszyklus entspricht zehn Fahrten von der Haltestelle U-Alsterdorf bis zur Endhaltestelle ZOB. Eine Fahrt dauert ca. 45 Minuten. Alle zehn Fahrten dauern also sieben Stunden und 30 Minuten. Die Pausen zwischen den Fahrten dauern jeweils sieben Minuten. Insgesamt sind es neun Pausen, die einer Gesamtzeit von einer Stunde und drei Minuten entsprechen. Am Ende des Tageszyklus wird der Bus im Busdepot abgestellt. Dort wird die Batterie im schonenden Betrieb, zum Beispiel mit einer maximalen Stromstärke, die 1C entspricht im CCCV - Modus vollständig aufgeladen. Die Ladezeit kann bis zu einer Stunde betragen. Um die Effizienz der Ausnutzung der festgelegten Gesamttestzeit zu steigern, ist entschieden worden, die Ruhezeit zwischen zwei Tageszyklen auf 2 Stunden zu verkürzen. Diese Ruhephase wird für die Stabilisierung der Batterieparameter als ausreichend angesehen.

Die Gesamtdauer des wöchentlichen Testprogrammablaufs wird wie folgt berechnet:

$$(45 \text{ min} \cdot 10) + (7 \text{ min} \cdot 9) + 60 \text{ min} + 120 \text{ min} = 693 \text{ min} \quad (4.1)$$

Das entspricht ca. 11 Stunden und 33 Minuten. Es ist also möglich, zwei volle Tagesfahrzyklen innerhalb eines Zeitraum von 24 Stunden zu simulieren.

4.3. Durchführung des Zyklrierexperimentes mit dem Batterieprüfstand

4.3.1. Testzellenzyklrierung mit der Battery Manager Workstation

Die Batterie-Alterungsmessungen finden einmal in der Woche statt. Zwischen zwei geplanten Alterungsmessungen können 140 Fahrten simuliert werden, da zwei Betriebstageszyklen je 11 Stunden und 33 Minuten an einem Tag durchgeführt werden können. Hierfür wurden Zyklrier - Steuerungsskripte für die Battery Manager Workstation für die Testzellen mit 140 Fahrten erstellt. Der Programmablaufplan (PAP) der Software ist dem Anhang C.2 zu entnehmen.

Der Batterie Manager 4 verwendet für die Speicherung der Messwerte das Programm SQL Server Express (reduzierter Funktionsumfang) der Firma Microsoft. Diese Softwareversion beinhaltet nur 10 Gb Speicher pro Datenbank. Daher ergaben sich zu Beginn der Zyklrierung kleinere Probleme mit der Datenspeicherung. Somit wurden geplante wöchentliche Zyklrierung gezielt nach 3 Tagen unterbrochen, um die vorhandenen Messwerte zu archivieren und somit Platz für neue Werte zu schaffen, da der SQL-Server bei größeren Datenmengen instabil wurde. Aus diesen Gründen weicht die Anzahl der Fahrten in den ersten drei Wochen von den restlichen Wochen ab. Das Problem wurde mit einer neuen Installation von SQL Server Standard (Vollversion) gelöst. Ab der dritten Messwoche (entsprechend ab der 361. Fahrt) wurden die Zyklrierprozesse und die Messungen in äquidistanten Abständen durchgeführt.

4.3.1.1. Zyklrierprogramm für die Testzelle BAT01

In diesem Kapitel wird das Zyklrierungsprogramm BAT01_10x14_120kWh_6 für die Testzelle BAT01 erläutert. Die Übersicht des Programms für die Testzelle BAT01 ist in der Abbildung 4.2 zu sehen.

Programm: BAT01_10x14_120kWh_6 Nummer: 00039

Berechnung Speichern & Ende Speichern Speichern unter... Schritt überspringen Abbruch Zeige Hauptprogr.

Schritt	Label	Operator	Sollwert	Limit	Aktion	Registrierung
1		SET		> 3.61 V < 2.49 V > 70 C	STO STO STO	STANDARD
2		LAD	3.6 V 2.5 A	< 0.05 A		0.1 sec
3		SET	Ah = 0 Wh = 0			
4		BEG				
5		BEG				
6		TABELLE	TAB7			
7	Pantogr.	LAD	3.6 V 2.13 A	6 min		0.1 sec
8		PAU		1 min		0.1 sec
9		ZYK	9 *			
10		TABELLE	TAB7			
11		PAU		1 min		0.1 sec
12	Depot	LAD	3.6 V 2.5 A	< 0.05 A		0.1 sec
13		PAU		2 h		0.1 sec
14		ZYK	14 *			
15		STO				
16						

Abbildung 4.2.: Das Zyklierungsprogramm BAT01_10x14_120kWh_6 für die Testzelle BAT01 mit der Battery Manager Workstation

Das Programm BAT01_10x14_120kWh_6 wurde für die Testzelle BAT01 erstellt und besteht aus 15 Schritten.

1. Schritt:

Im ersten Schritt des Programms wird der SET-Operator ausgeführt und somit die Rahmenbedingungen der Testzellenzyklierung definiert. Insgesamt wurden drei Grenzen für die Notausschaltung des Zykliegerätes festgelegt.

Die Ausgänge des Gerätes werden dabei abgeschaltet, wenn die Testzellenspannung von 3,61 V überschritten oder 2,49 V unterschritten wird. Die obere Grenze von 3,61 V sichert die Überwachung der Testzellen gegen eine Überladung. Die unterste Grenze von 2,49 V dient als Schutzmechanismus gegen Tiefentladung der Testzelle. Eine Überladung oder Tiefentladung führen zu irreversiblen Schädigung und Kapazitätsverlusten einer Testzelle. Die Temperatur, als Schutzmechanismus gegen Überhitzung, stellt den dritten kritischen Parameter während einer Testzellenzyklierung dar. Im Falle einer Temperaturüberschreitung könnten sich die Testzellen weiterhin unkontrolliert aufheizen und in Brand geraten. Sofern wird in diesen Fällen das Programm gestoppt und die stromführende Leitungen des jeweiligen Kanals zugleich abgeschaltet.

Weiterhin ist im ersten Schritt notwendig, die Messgrößen festzulegen. Hierzu bietet die Batterie Manager Workstation sieben Registrierformate an. Dabei ist es möglich, individuelle Registrierformate zu erstellen. Bei der in dieser Arbeit durchgeführten Zyklisierung wurde das Standard-Format gewählt, da die benötigten Parameter in diesem bereits enthalten sind. Dabei werden vom Standard-Format nicht nur physikalische sondern auch logische Messwerte registriert. Folglich umfasst jede Messung Angaben über die Messgrößen wie zum Beispiel Spannung in Volt (V), Strom in Ampere (A), Temperatur in Grad Celsius ($^{\circ}\text{C}$), Kapazität in Ampere-Stunden (Ah) und Energie in Watt-Stunden (Wh).

2. Schritt:

In der Regel verlässt der Bus das Busdepot mit einer voll geladenen Batterie, daher wurden die Testzellen voll aufgeladen, um den Tageszyklus zu beginnen. Dies ermöglicht der Lade-Operator `LAD` im zweiten Schritt der Testzellenzyklisierung. Mit dem Sollwert des Ladestromes und der Ladespannung wird geladen, bis der Ladestrom das Limit von 50 mA unterschreitet. Der Ladezyklus beruht auf dem Constant Current Constant Voltage-Verfahren (CCCV-Verfahren), wobei der Ladestrom konstant 2,5 A beträgt bis die Ladeschlussspannung erreicht ist.

Im Anschluss wird mit konstanter Spannung geladen. Die Ladespannung darf 3,6 V nicht überschreiten. Der Ladeschritt wird beendet wenn der Ladestrom die minimale Grenze von 50 mA passiert. In der Spalte Registrierung wurde 0,1 sec eingetragen, um die Messwerte zehnmal pro Sekunde zu registrieren. Hier wurde die Grenze des Zykliegeräts von 10 Hz erreicht.

3. Schritt:

Hier wird erneut ein `SET` - Operator ausgeführt, wobei die logischen Kanäle "Ah" und "Wh" mit dem Wert 0 initialisiert werden. Dies dient der besseren Übersicht bei der grafischen Darstellung.

4. Schritt:

Hier wurde die erste Schleife mit dem `BEG` - Operator gestartet. Der Operator `BEG` ist ein Zyklusanzug - Operator. So wurde der Anfang eines Zyklus definiert. Diese Schleife ist für die Tageszyklen zuständig. Das Ende dieser Schleife wurde mit dem `ZYK` - Operator in Schritt 14 programmiert.

5. Schritt:

Die zweite Schleife startet mit dem Operator `BEG`. Diese Schleife ist für die Fahrzyklen zuständig. Der Abbruch für die zweite Schleife wurde mit dem `ZYK` - Operator in Schritt 9 programmiert.

6. Schritt:

Hier wurde ein Fahrzyklus mit dem `TABELLE` - Operator ausgeführt. Dieser Operator

führt die Schritte, die in der Textdatei TAB7 stehen, aus. TAB7 ist die Sollwertdatei die vorher erstellt wurde. Bei der Registrierung wurde keine Registrierungshäufigkeit eingetragen, da jede Zeile automatisch registriert wird. Wie die TAB7.txt erstellt wurde ist im Kapitel 4.3.3 Erstellung einer Sollwerttabelle mit Fahrströmen aus dem Solaris Urbino 18,75 Hybridbus für das Digatron-Zykliersystem auf der Seite 62 beschrieben.

7. Schritt:

Mit diesem Schritt wurde eine Pantographenladung simuliert. Für jede modellierte Batterie ist die Stromstärke unterschiedlich stark. Der Ladestrom für die Testzelle BAT01, der durch den Pantographen fließt, beträgt 2,13 A. Die Beschreibung und Berechnung der Stromstärke ist im Kapitel 3.2.2 Pantographenströme erklärt. Die Tabelle 3.2 auf der Seite 44 fasst Stromstärke für den Pantographen zusammen.

8. Schritt:

Es wurde ein Pause-Operator PAU verwendet. Als Grenze wurde eine Minute gewählt. Auch hier wurden zehnmal pro Sekunde die Daten aufgenommen.

9. Schritt:

Hier wurde die erste Schleife nach Erreichen der vorgegebenen Durchläufe beendet. Insgesamt wurden neun Fahrzyklen programmiert. Dafür ist ein Zyklusende-Operator ZYK zuständig. Da der Bus nach dem zehnten Fahrzyklus ohne Pantographenladung direkt ins Depot fährt, wurde die zehnte Fahrt außerhalb der Fahrzyklusschleife eingegeben.

10. Schritt:

In diesem Schritt wurde der letzte, zehnte Fahrzyklus programmiert.

11. Schritt:

In diesem Schritt ist eine Pause im Ablauf des Zykluses umgesetzt.

12. Schritt:

Der Ladezyklus im Busdepot wurde simuliert. Die Batterie wird schonend mit 1C aufgeladen.

13. Schritt:

Nach der Busdepotaufladung kommt eine Ruhepause.

14. Schritt:

Hier wurde die zweite Tageszyklusschleife mit dem Zyklusende-Operator ZYK beendet. Bei Sollwert wurde 14* eingetragen, was zur Folge hat, dass die Tageszyklusschleife 14-mal wiederholt wird.

15. Schritt:

Den Ablauf beendet ein Stop-Operator STO. Hier wird das Prüfprogramm beendet.

4.3.1.2. Zyklrierprogramm für die Testzelle BAT02

Schritt	Label	Operator	Sollwert	Limit	Aktion	Registrierung
1		SET		> 3.61 V < 2.49 V > 70 C	STO STO STO	STANDARD
2		LAD	3.6 V 2.5 A	< 0.05 A		0.1 sec
3		SET	Ah = 0 Wh = 0			
4		BEG				
5		BEG				
6		TABELLE	TAB7 2 Factor_I			
7	Pantogr.	LAD	3.6 V 6.45 A	6 min		0.1 sec
8		PAU		1 min		0.1 sec
9		ZYK	9 *			
10		TABELLE	TAB7 2 Factor_I			
11		PAU		1 min		0.1 sec
12	Depot	LAD	3.6 V 2.5 A	< 0.05 A		0.1 sec
13		PAU		2 h		0.1 sec
14		ZYK	14 *			
15		STO				
16						

Abbildung 4.3.: Das Zyklrierungsprogramm BAT02_10x14_60kWh_6 für die Testzelle BAT02 mit der Battery Manager Workstation

Der Programmablauf ist identisch mit dem der Testzelle BAT01. Der Unterschied liegt in den Tabellenwerten und dem Pantographenstrom.

Die Battery Manager Workstation bietet mehrere Möglichkeiten Werte einer bestehenden Tabelle zu bearbeiten. Da mit Hilfe der Testzelle BAT02 ein Energiegehalt von 60 kWh simuliert werden soll, müssen die Lade- und Entladeströme in der Sollwertdatei TAB7.txt um den Faktor 2 angepasst werden.

Der Pantographenstrom für die Testzelle BAT02 (60 kWh) wurde im Kapitel 3.2.2 Pantographenströme berechnet und beträgt 6,45 A.

4.3.1.3. Zyklrierprogramm für die Testzelle BAT03

Das Programm BAT03_10x14_40kWh_6 für die Testzelle BAT03 ist in Abbildung 4.4 Zyklrierprogramm für die Testzelle BAT03 zu sehen.

Schritt	Label	Operator	Sollwert	Limit	Aktion	Registrierung
1		SET		> 3.61 V < 2.49 V > 70 C	STO STO STO	STANDARD
2		LAD	3.6 V 2.5 A	< 0.05 A		0.1 sec
3		SET	Ah = 0 Wh = 0			
4		BEG				
5		BEG				
6		TABELLE	TAB7 3 Factor_I			
7	Pantogr.	LAD	3.6 V 10.75 A	6 min		0.1 sec
8		PAU		1 min		0.1 sec
9		ZYK	9 *			
10		TABELLE	TAB7 3 Factor_I			
11		PAU		1 min		0.1 sec
12	Depot	LAD	3.6 V 2.5 A	< 0.05 A		0.1 sec
13		PAU		2 h		0.1 sec
14		ZYK	14 *			
15		STO				
16						

Abbildung 4.4.: Das Zyklrierungsprogramm BAT03_10x14_40kWh_6 für die Testzelle BAT03 mit der Battery Manager Workstation

Auch hier wurde der Programmablauf im Wesentlichen nicht geändert. Die Ströme, die in der Sollwerttabelle TAB7.txt eingetragen wurden, sind mit dem Faktor 3 multipliziert worden, da der Energiegehalt der Testzelle BAT03 ein Drittel des Energiegehalts von BAT01 darstellen soll.

Der Pantographen-Strom für die Testzelle BAT03 wurde im Kapitel 3.2.2 Pantographenströme berechnet und beträgt 10,75 A.

4.3.1.4. Zyklrierprogramm für die Testzelle BAT04

Das Programm für die Testzelle BAT04 BAT04_10x14_30kWh_6 ist im Abbildung 4.5 Zyklrierprogramm für die Testzelle BAT04 dargestellt.

Schritt	Label	Operator	Sollwert	Limit	Aktion	Registrierung
1		SET		> 3.61 V < 2.49 V > 70 C	STO STO STO	STANDARD
2		LAD	3.6 V 2.5 A	< 0.05 A		0.1 sec
3		SET	Ah = 0 Wh = 0			
4		BEG				
5		BEG				
6		TABELLE	TAB7 4 Factor_I			
7	Pantogr.	LAD	3.6 V 15.1 A	6 min		0.1 sec
8		PAU		1 min		0.1 sec
9		ZYK	9 *			
10		TABELLE	TAB7 4 Factor_I			
11		PAU		1 min		0.1 sec
12	Depot	LAD	3.6 V 2.5 A	< 0.05 A		0.1 sec
13		PAU		2 h		0.1 sec
14		ZYK	14 *			
15		STO				
16						

Abbildung 4.5.: Das Zyklrierungsprogramm BAT04_10x14_40kWh_6 für die Testzelle BAT04 mit der Battery Manager Workstation

Die Ströme, die in der Sollwerttabelle TAB7 .txt eingetragen wurden, sind mit dem Faktor 4 multipliziert worden, da der Energiegehalt der Testzelle BAT04 ein Viertel des Energiegehalts von BAT01 darstellen soll. Der Pantographenstrom für die Testzelle BAT04 wurde im Kapitel 3.2.2 Pantographenströme berechnet und beträgt 15,1 A.

4.3.1.5. Zusammenfassung für die Zyklisierung aller vier Testzellen

In der Abbildung 4.6 ist der Strom für ein Tageszyklus aller vier Testzellen dargestellt. Dabei sind zehn vollständige Fahrten zu erkennen (rot). Zwischen jeder Fahrt wird eine Pantographenladung durchgeführt (blau). Am Ende des Tageszyklus folgt eine volle Aufladung mit dem CCCV-Verfahren im Busdepot (grün). Anschließend ist eine Pause bis zum nächsten Einsatz zu sehen (grün).

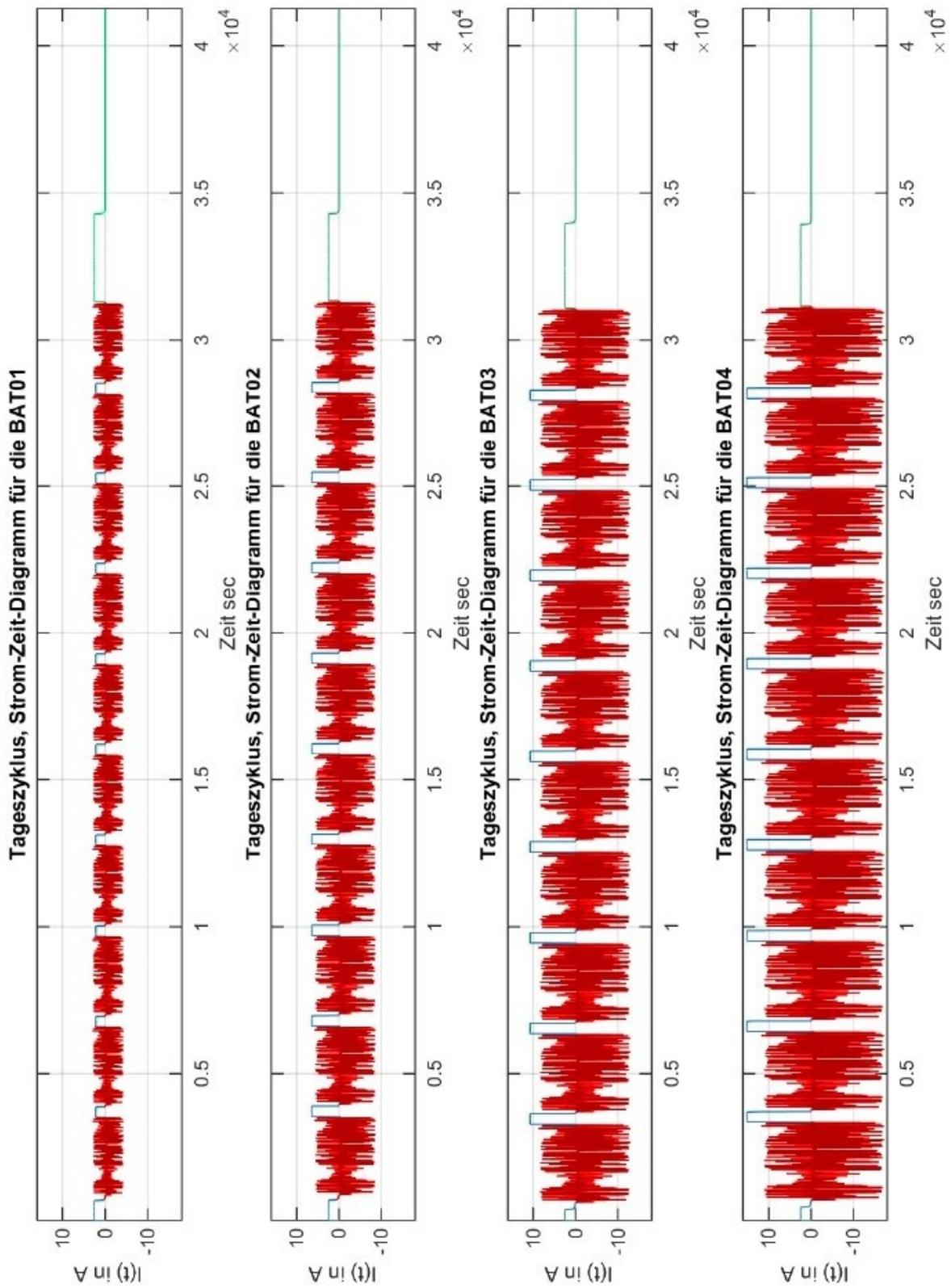
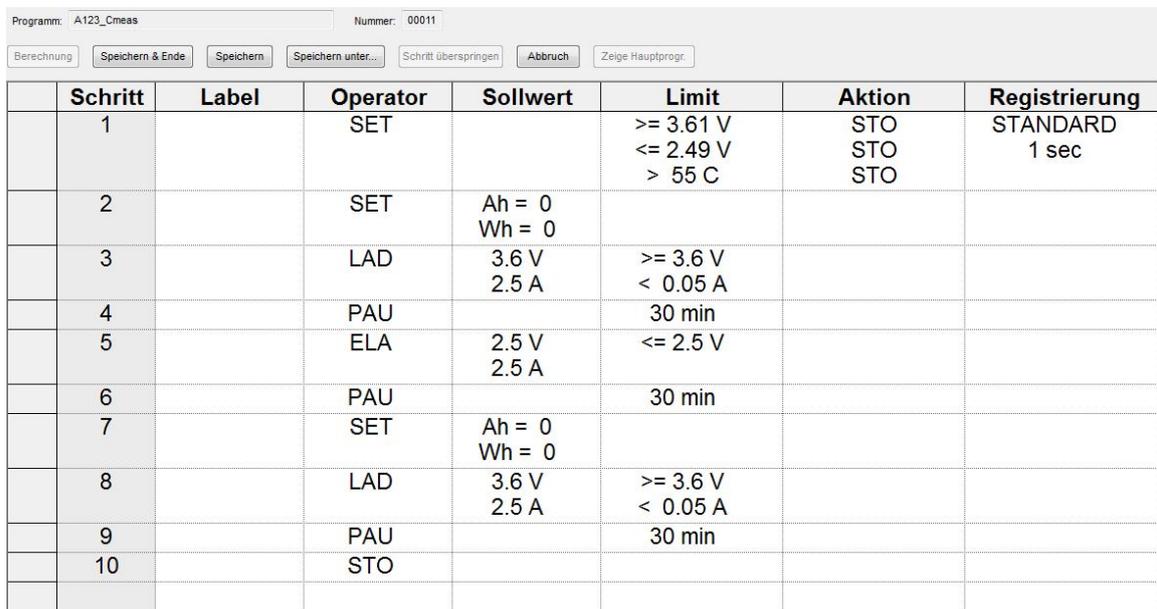


Abbildung 4.6.: Tageszyklus für BAT01 bis BAT04 in A

4.3.2. Kapazitätsmessung mit der Battery Manager Workstation

Da der Messplan zeitlich optimiert ist, werden in einer Woche zwei Wochenzyklen simuliert. Dabei enthält jeder Wochenzyklus sieben Tageszyklen mit jeweils zehn Fahrten. Zur Bestimmung der Zellalterung dienen Kapazitäts- und EIS-Messungen, die einmal in der Woche stattfinden. Bezogen auf den Wochenzyklus des Busses entspricht dies einer Alterungsmessung nach 140 Fahrten. Der Programmablaufplan (PAP) der Software ist dem Anhang C.1 zu entnehmen. Eine Kapazitätsmessung wird in zehn Schritten durchgeführt. Das Kapazitätsmessprogramm für die Testzellen ist in Abbildung 4.7 zu sehen.



The screenshot shows the software interface for the Battery Manager Workstation. At the top, there are fields for 'Programm: A123_Cmeas' and 'Nummer: 00011'. Below these are several buttons: 'Berechnung', 'Speichern & Ende', 'Speichern', 'Speichern unter...', 'Schritt überspringen', 'Abbruch', and 'Zeige Hauptprogr.'. The main part of the interface is a table with 8 columns: 'Schritt', 'Label', 'Operator', 'Sollwert', 'Limit', 'Aktion', and 'Registrierung'. The table contains 10 rows of data, representing the steps of the capacity measurement process.

Schritt	Label	Operator	Sollwert	Limit	Aktion	Registrierung
1		SET		>= 3.61 V <= 2.49 V > 55 C	STO STO STO	STANDARD 1 sec
2		SET	Ah = 0 Wh = 0			
3		LAD	3.6 V 2.5 A	>= 3.6 V < 0.05 A		
4		PAU		30 min		
5		ELA	2.5 V 2.5 A	<= 2.5 V		
6		PAU		30 min		
7		SET	Ah = 0 Wh = 0			
8		LAD	3.6 V 2.5 A	>= 3.6 V < 0.05 A		
9		PAU		30 min		
10		STO				

Abbildung 4.7.: Kapazitätsmessung mit der Battery Manager Workstation

1. Schritt:

Es wird ein SET - Operator ausgeführt. Mit einem SET - Operator wurden zuerst die Grenzen definiert. In dem Messprogramm A123_Cmeas wurden drei Grenzen für die Notausschaltung des Digatron Zykliergerätes festgelegt. Um irreversible Schädigungen und Kapazitätsverluste der Testzellen zu vermeiden, wurden die maximale Ladespannung auf 3,61 V, die minimale Entaltespannung auf 2,49 V und die höchste Temperatur auf 55 °C festgelegt.

Die Registrierung findet im STANDARD - Format Verwendung. Bei jeder Kapazitätsmessung wurden Spannung in Volt (V), Strom in Ampere (A), Temperatur in Grad Celsius (°C), Kapazität in Amperestunden (Ah) und Energie in Wattstunden (Wh) einmal pro Sekunde, also mit 1 Hz registriert.

2. Schritt:

An dieser Stelle wird ein weiterer SET - Operator ausgeführt. Die logischen Kanäle "Ah" und "Wh" werden auf null gesetzt, um bei der grafischen Darstellung eine bessere Übersicht zu erhalten.

3. Schritt:

Hier wird der LAD - Operator ausgeführt. Damit der fünfte Schritt ELA (Entlade-Operator) korrekt durchläuft und die Zelle komplett aufgeladen wird, wurde die Zelle, wie vom Hersteller empfohlen, mit 1C schonend aufgeladen. Die Aufladung ist im CC-CV - Betrieb mit einem konstanten Strom von 2,5 A realisiert. Am Ende des Ladevorganges geht der Ladezyklus in den CV - Betrieb über, um auf die maximale Kapazität der Zelle zu laden. Laut Datenblatt ist die Zelle bei 3,6 Volt vollständig aufgeladen. Ein Ladezyklus dauert laut Hersteller ca. 60 Minuten. Der Ladeprozess wird beendet, wenn die Batteriezellenladespannung 3,6 Volt beträgt und der Ladestrom weniger als 0,05 A beträgt. Diese Grenzwerte wurden in Spalte "Limit" festgelegt.

4. Schritt:

Es wird ein PAU - Operator ausgeführt. Da es nicht möglich ist, direkt nach der Aufladung die größtmögliche Energie zu entnehmen, wurde eine Pause von 30 Minuten vorgesehen. Diese Pausenzeit wird benötigt, um den Kern der Zelle abkühlen und interne chemische Prozesse zur Ruhe kommen zu lassen. Die Dauer einer Pause wurde ebenfalls in der Spalte "Limit" festgelegt. Die elektrische Energie wird hierbei komplett abgeschaltet und nur die Messdaten mit einer Frequenz von 1 Hz erfasst.

5. Schritt:

Nach der Pause wurde der ELA - Operator ausgeführt. Hier wurde die Testzelle im schonenden Betrieb mit 2,5 A bis 2,5 V entladen. Als Abbruchbedingung wurde in der Spalte "Limit" die Grenze von 2,5 V gewählt.

6. Schritt:

Nach der Entladung ist aus dem gleichen Grund wie in Schritt 4 eine Pause programmiert worden.

7. Schritt:

Der SET - Operator in diesem Schritt hat die gleiche Aufgabe wie im Schritt zwei. Es werden die "Ah" und "Wh" Kanäle auf null gesetzt, um den nächsten Ladeschritt besser darstellen zu können.

8. Schritt:

Hier wurde die Testzelle erneut vollständig aufgeladen, um die Differenz zur vorhergehenden Kapazitätsmessung festzustellen. Die daraus ermittelten Kapazitätsdifferenzen in den Wochenzyklen bilden eine Grundlage zur Bewertung der Zellalterung.

9. Schritt:

Anschließend folgt eine Pause um die Testzellen für die nächsten Messungen vorzubereiten.

10. Schritt:

Hier wird die Kapazitätsmessung beendet.

4.3.3. Erstellung einer Sollwerttabelle mit Fahrströmen aus dem Solaris Urbino 18,75 Hybridbus für das Digatron-Zykliersystem

Die Sollwerttabelle beinhaltet die bearbeiteten Fahrströme, die während der Messfahrt mit dem Solaris Urbino 18,75 Hybridbus aufgenommen wurden. Das Zykliegerät leistet maximale Stromänderungen von 100 ms pro Kanal. Zur Bearbeitung gehört die Konvertierung der mit 14 Hz aufgenommenen Fahrströme auf Ströme mit 10 Hz. Matlab stellt dafür die Funktion "resample()" zur Verfügung.

Es ist möglich, eine Sollwerttabelle mit einem Texteditor manuell zu erstellen. Da jedoch ein sehr großer Datenbestand vorliegt, wurde die Tabelle TAB7.txt Zeile für Zeile mit Matlab erstellt. In Abbildung 4.8 ist ein Ausschnitt aus dem Matlab-Quellcode zu sehen.

```
125 %% TXT FÜR DIGATRON
126 % X;Y;Z;U;
127 % X = Schrittdauer in sec, min oder h
128 % Y = Strom in A
129 % Z = Leistung in W
130 % U = Spannung in V
131
132 fileID = fopen('TAB7.txt','w');
133
134 for i=1:length(C_A123)
135     if C_A123(i) <= 0
136         fprintf(fileID,'0.1sec;%0.3f;;2.5;\r\n',C_A123(i));
137     else
138         fprintf(fileID,'0.1sec;%0.3f;;3.6;\r\n',C_A123(i));
139     end
140 end
141
142 fclose(fileID);
```

Abbildung 4.8.: Matlabausschnitt, Erstellung einer Sollwerttabelle mit Fahrströmen für das Zykliersystem Digatron

Mit der Funktion "`fopen()`" kann eine Datei für den binären Schreibzugriff geöffnet werden. Anschließend dient eine `for`-Schleife dazu, mit jedem Durchlauf eine Zeile in die Textdatei zu schreiben. Um die Anzahl der Schleifendurchläufe und damit auch die Anzahl der Zeilen festzulegen, bestimmt die "`length()`" -Funktion die Anzahl der Werte. Am Zeilenanfang ist die Dauer des Zyklerschrittes zu finden. Diese beträgt 0,1 Sekunden, um die maximale Leistungsfähigkeit des Zykliergerätes zu nutzen.

Der Fahrzyklus gibt die Stromwerte für jeden Zyklerschritt mit unterschiedlichen Vorzeichen vor. Dabei bestimmt das Vorzeichen der Ströme, ob die Testzellen geladen oder entladen werden sollen. Um das CCCV-Verfahren realisieren zu können, wurde eine `if-else` Abfrage in eine `for`-Schleife eingefasst. Wenn die Schleife durchlaufen wird, stellt die Abfrage das Vorzeichen des laufenden Stromwertes fest. Das Vorzeichen bestimmt anschließend die Spannungsgrenze der Testzelle während des Zyklerschrittes. Im Datenblatt der Testzellen gibt der Hersteller eine Lade- und Entladeschlussspannung vor. Die maximale Spannungsgrenze im Ladevorgang beträgt 3,6 V. Im Entladevorgang beträgt die minimale Spannungsgrenze hingegen 2,5 V. Die "`fprintf()`" -Funktion dient zum Schreiben der Textdatei `TAB7.txt`. Nachdem die `for`-Schleife durchlaufen ist, wird die geschriebene Datei mit der "`fclose()`" - Funktion geschlossen.

4.4. EIS-Messung zur Bestimmung des SOH vor dem Experiment

Neben der Kapazitätsmessung wurde die Elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS) mit einem Impedanzspektrum-Analysator TrueEIS der Firma Fuelcon Systems AG wöchentlich durchgeführt.

Durch diese Messung ist es möglich, die Eigenschaften der Batteriezellen in Abhängigkeit der Frequenz zu ermitteln.

Eine der wichtigsten Eigenschaften der Batteriezelle ist der Innenwiderstand, der durch die EIS-Messung ermittelt werden kann. Bei dieser Messung wird ein sinusförmiger Wechselstrom zur Anregung auf die Batteriezelle aufgeprägt. Die daraus resultierende Wechselspannung wird dabei gemessen und die komplexe Impedanz berechnet. Da der Innenwiderstand der Batteriezelle sehr stark frequenzabhängig ist, wird diese Messung bei mehreren Anregungsfrequenzen wiederholt. Aus den dabei errechneten Impedanzwerten entsteht ein Impedanzspektrum wie in Abbildung 4.9 gezeigt wird [33].

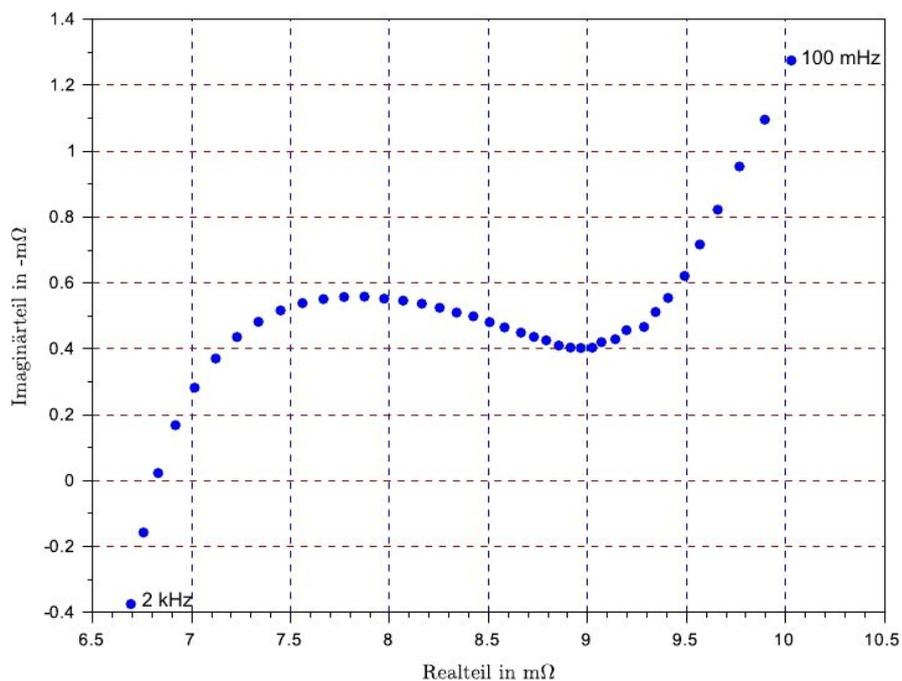


Abbildung 4.9.: Elektrochemische Impedanzspektroskopie für die Testzelle BAT01.

Mit der Messung des Impedanzspektrums ist es im Grunde möglich den Ladezustand (State Of Charge, SOC), den Alterungszustand (State Of Health, SOH) und den Funktionszustand (State Of Function, SOF) der Batteriezelle zu bestimmen [20], da sich während der Alterung

einer Batteriezelle verschiedene Schichten an den Elektroden und Stromableitern bilden, die zu einer Erhöhung des Realteils der komplexen Impedanz führen [33].

Die Messungen, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, beschränkten sich lediglich auf die Bestimmung des Alterungszustandes der gemessenen Zellen. Bekannt ist, dass sich bei der Alterung der Innenwiderstand der gemessenen Zelle erhöht, was im Impedanzspektrum durch charakteristische Verschiebungen sichtbar wird [26].

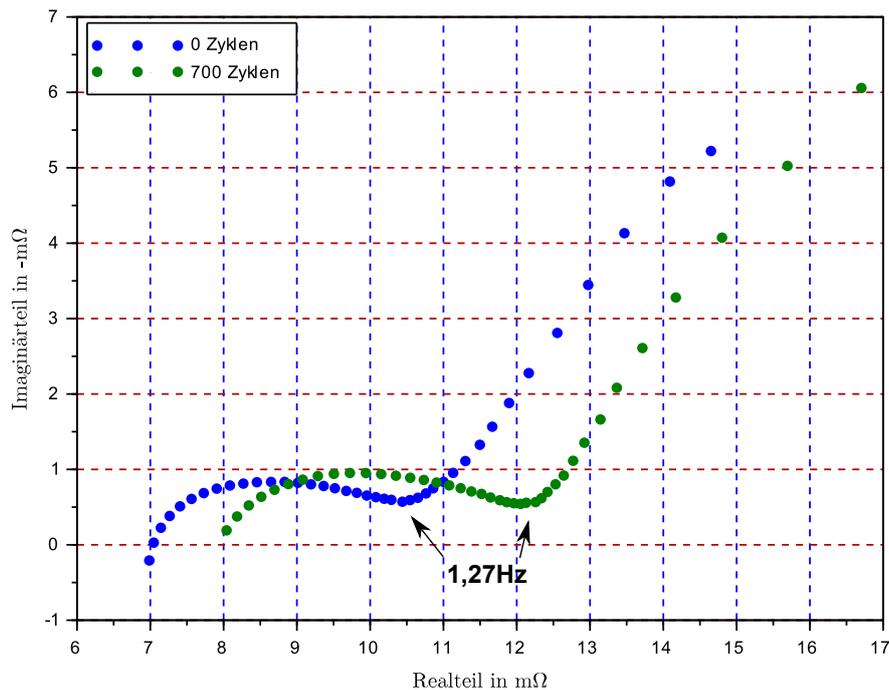


Abbildung 4.10.: Künstliche Alterung einer LiFePO_4 Zelle bei zwei verschiedenen Alterungszuständen. Entnommen aus [33].

In Abbildung 4.10 sind zwei Impedanzspektren einer Batterie in unterschiedlichen Alterungsstufen dargestellt. Zu sehen ist, dass das Impedanzspektrum der Batteriezelle nach 700 Zyklen nach rechts verschoben ist. Dies bedeutet, dass sich der Realteil des komplexen Innenwiderstandes mit zunehmender Alterung erhöht hat. Besonders gut lässt sich diese Alterung im Bereich des 1 Hz Frequenzpunktes feststellen, da hier die Änderung des Realteils der Impedanz am größten ist [33] [35].

Durch diese Methode soll auch die Alterung, der in dieser Arbeit gemessenen Batteriezellen, ermittelt werden. Die Messung wurde an 40 Messpunkten im Bereich zwischen 100 mHz und 2 kHz durchgeführt. Jeder Punkt stellt einer den Real- und Imaginärteil der Impedanz der Testzelle bei einer definierte Anregefrequenz dar.

5. Auswertung

Der ordnungsgemäße Ablauf der Batteriezyklierungsprozesse wurde mehrmals am Tag mit Hilfe des Programms TeamViewer überwacht. Die Steuersoftware Batterie Manager 4 speichert alle Messdaten in einer internen Datenbank und bietet die Möglichkeit, die Messergebnisse im csv-Format zu exportieren. Dadurch stehen die Daten zur Auswertung auf der Festplatte bereit.

5.1. Überschlagsrechnung der modellierten Batterie

In Abbildung 5.1 auf der Seite 68 ist der Kapazitätsverbrauch für alle vier Testzellen über einen Tageszyklus in Ah dargestellt. Die Markierungen zeigen jeweils die Kapazitätsreduzierung am Tagesende und sind in folgender Tabelle 5.1 unter der dritten Zeile aufgeführt. Am Anfang wurden die Testzellen zuerst vollgeladen, dieses ist im Kapitel 4.3.1.1 Zyklierungsprogramm für die Testzelle BAT01 ab Seite 51 beschrieben. Wenn die Testzellen vollgeladen sind, beginnt der Tageszyklus und die logischen Kanäle "Ah" und "Wh" mit dem Wert 0 werden initialisiert. Das erklärt der Grafikverlauf am Anfang.

Tabelle 5.1.: Anfangszustände der einzelnen Testzellen und Zustand nach dem ersten vollen Tageszyklus. Die Werte sind der Nennkapazität der Zellen gegenübergestellt und weichen nur geringfügig ab.

	BAT01	BAT02	BAT03	BAT04
1. Anfangskapazität $C_{\text{theoretisch}}$	2,5 Ah	2,5 Ah	2,5 Ah	2,5 Ah
2. Anfangskapazität $C_{\text{praktisch}}$(1C-Rate)	2,409 Ah	2,400 Ah	2,406 Ah	2,393 Ah
3. Kapazitätsverbrauch am Tageszyklus	1,985 Ah	1,979 Ah	1,963 Ah	1,935 Ah
4. $C_{\text{Rest,theoretisch}}$ (nach Tageszyklus)	0,515 Ah	0,521 Ah	0,537 Ah	0,565 Ah
5. $C_{\text{Rest,praktisch}}$ (nach Tageszyklus)	0,424 Ah	0,421 Ah	0,443 Ah	0,458 Ah
6. $C_{\text{Rest,theoretisch}}$	20,60 %	20,84 %	21,48 %	22,60 %
7. $C_{\text{Rest,praktisch}}$ (nach Tageszyklus)	17,60 %	17,54 %	18,41 %	19,14 %
8. $C_{\text{Rest,theoretisch}}$ (Überschlagsrechnung)	21,49 %	22,00 %	21,70 %	22,30 %
9. Abweichung zur Überschlagsrechnung	-0,89 %	-1,16 %	-0,22 %	+0,30 %
10. Abweichung zur Theorie	-3,89 %	-4,46 %	-3,29 %	3,16 %

Die realen Anfangskapazitäten der Testzellen weichen von den theoretisch angenommenen Anfangskapazitäten für die Überschlagsrechnung ab. Dadurch entstehen Abweichungen zu den theoretisch berechneten Werten, die in Anhang D.1, D.2, D.3 und D.4 zu finden sind.

Für die festgestellten Abweichungen können mehrere Gründe benannt werden.

1. Bei der Berechnung wurden die theoretischen Nennkapazitäten nach Herstellerangabe verwendet. Die tatsächlichen Nennkapazitätswerte zeigen geringfügige Abweichungen von den angenommenen 2.5 Ah.
2. Die Betriebstemperatur der Testzellen hat einen relevanten Einfluss auf die zur Verfügung stehenden Zellkapazität.
3. Bei wechselnden Lade- und Entladeströmen ist die tatsächliche Kapazität der Zellen höher oder niedriger als die Nennkapazität

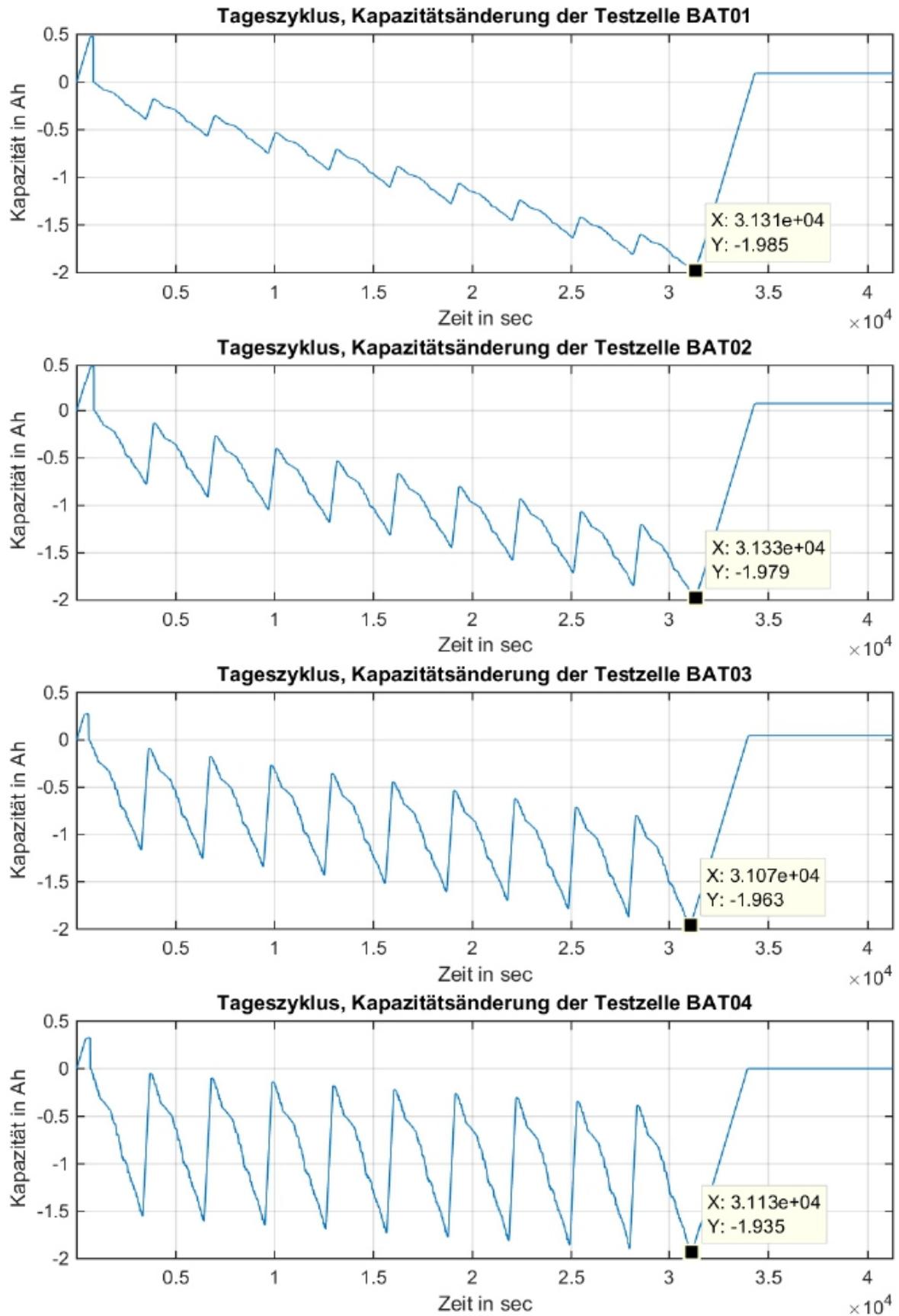


Abbildung 5.1.: Abtastwerte nach dem Tageszyklus in Ah für die vier Testzellen

5.2. Temperaturverläufe

In der Abbildung 5.2 ist ein Wochenzyklus mit 140 Fahrten und die zugehörigen Temperaturverläufe für die vier Testzellen dargestellt.

Die Testzelle BAT01 erfährt die geringsten Temperaturänderungen. Da der Pantographenstrom und die Batterieströme während der Fahrt sehr gering sind, findet die größte Temperaturänderung im Depot statt. Sie beträgt ca. 1 °C.

Bei den Testzellen BAT02, BAT03 und BAT04 sind die Pantographenströme während der Fahrt erheblich größer als die Batterieströme und Aufladeströme im Busdepot. Daher sind die Temperaturänderungen während der Pantographenladung stärker ausgeprägt. Die Temperaturänderung bei der Testzelle BAT04 steigt während der Pantographenladung mit 6C kurzzeitig bis auf 62 °C an.

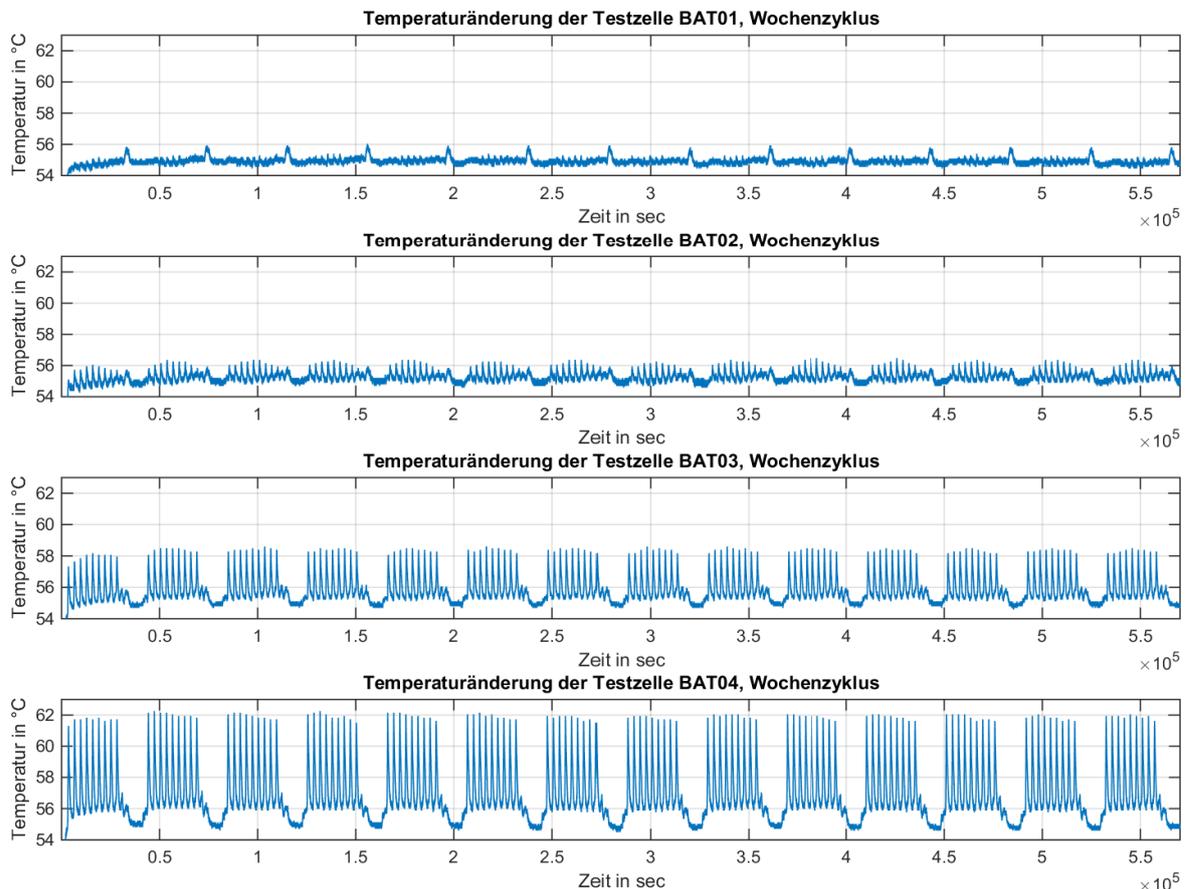


Abbildung 5.2.: Temperaturverläufe eines Wochenzyklus, als genauer Ausschnitt ist ein Tageszyklus in Abbildung 5.3 dargestellt

Für einen Wochenzyklus wurde ein Temperaturmittelwert, für jede Testzelle berechnet und in der Tabelle 5.2 zusammengefasst.

Tabelle 5.2.: Mittelwert der Temperaturen für einen Wochenzyklus

Testzelle	Mittelwert der Temperaturen
BAT01	55,09 °C
BAT02	55,24 °C
BAT03	55,76 °C
BAT04	56,74 °C

In der Abbildung 5.3 ist ein Ausschnitt des Temperatur- und Stromverlaufs aus dem Tageszyklus der Testzelle BAT04 dargestellt.

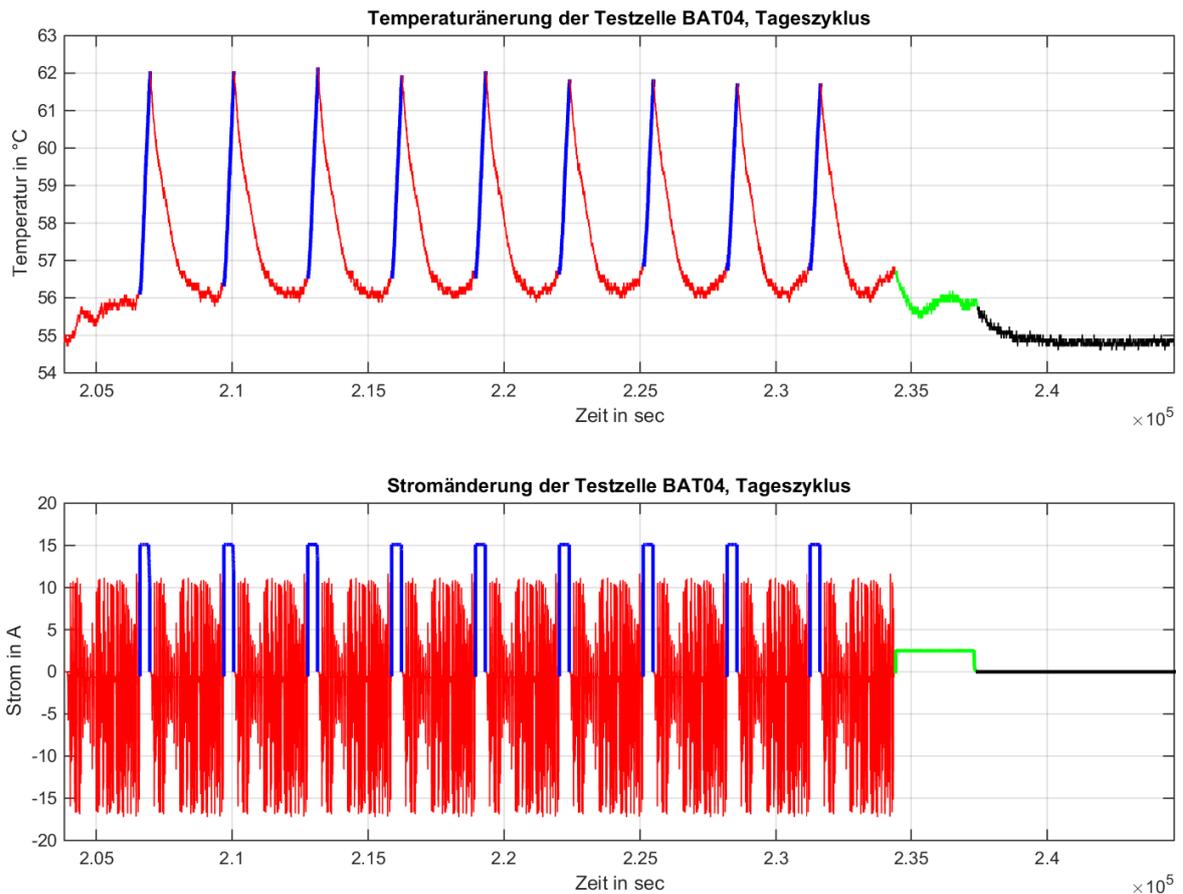


Abbildung 5.3.: Temperatur- und Stromabtwerte eines Tageszyklus für die Testzelle BAT04. Obwohl die Ströme während der Fahrt teilweise größer sind als die Pantographenströme, sorgen die vielen, kurzen Ruhepausen dafür, dass es zu keiner deutlichen Erwärmung kommt.

Der Tageszyklus wurde in vier Bereiche farbig unterteilt.

Die rote Farbe stellt die Batterieströme und Temperaturänderung während der Fahrt zwischen U-Alsterdorf und ZOB Hamburg dar.

Die blaue Farbe bildet die Pantographenladung und den dazugehörigen Temperaturanstieg ab.

Die grüne Farbe bildet die Batterieaufladung im Busdepot und die zugehörige Temperaturänderung ab.

In schwarz ist die Pausenzeit im Busdepot dargestellt, wobei zu erkennen ist, dass sich die Temperatur erst nach ca. einer Stunde auf ihren ursprünglichen Wert von 55°C einpendelt.

5.3. Kapazitätsmessungen

Die Kapazitätsmessungen der Testzellen wurden wöchentlich durchgeführt und die Kapazitätsänderungen in der Tabelle 5.3 festgehalten und in der Abbildung 5.4 dargestellt. Detaillierte Werte zu jeder Messung ist dem Anhang D.5 auf der Seite 104 und 105 zu entnehmen.

Tabelle 5.3.: Kapazitätsverlust der Testzellen über den Messzeitraum

Fahrten	BAT01 (120kWh)		BAT02 (60kWh)		BAT03 (40kWh)		BAT04 (30kWh)	
	[Ah]	[%]	[Ah]	[%]	[Ah]	[%]	[Ah]	[%]
140	2,409	0,00	2,400	0,00	2,406	0,00	2,393	0,00
240	2,405	-0,17	2,399	-0,04	2,394	-0,50	2,371	-0,92
360	2,385	-1,00	2,379	-0,88	2,369	-1,55	2,340	-2,24
500	2,371	-1,58	2,368	-1,33	2,351	-2,29	2,315	-3,26
640	2,357	-2,16	2,353	-1,96	2,331	-3,12	2,290	-4,30
780	2,344	-2,70	2,340	-2,50	2,313	-3,87	2,267	-5,27
920	2,332	-3,20	2,325	-3,12	2,294	-4,66	2,244	-6,23
1060	2,317	-3,82	2,313	-3,60	2,277	-5,36	2,222	-7,15
1200	2,305	-4,32	2,300	-4,17	2,259	-6,11	2,197	-8,19
1340	2,294	-4,77	2,291	-4,54	2,243	-6,77	2,176	-9,07
1480	2,281	-5,31	2,276	-5,17	2,225	-7,52	2,151	10,11
1620	2,271	-5,73	2,269	-5,46	2,212	-8,06	2,129	-11,03
1760	2,260	-6,19	2,257	-5,96	2,197	-8,69	2,103	-12,12
1900	2,248	-6,68	2,247	-6,38	2,182	-9,31	2,078	-13,16
2040	2,236	-7,18	2,239	-6,71	2,166	-9,98	2,049	-14,38

Aus der Tabelle 5.3 und der Abbildung 5.4 ist zu erkennen, dass alle Testzellen unterschiedliche Kapazitätsmenge verloren haben. Der unterschiedliche Kapazitätsverlust ist auf die unterschiedlich starken Pantographenladungen, die Batterieströme während der Fahrt und die Temperatur zurückzuführen.

Zum Beginn des Experiments sind unterschiedliche Steigungen festzustellen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei der Herstellung die Batteriezellen unterschiedlich formatiert wurden. Nach einer gewissen Anzahl von Zyklen ist ein konstanter Kapazitätsverlust zu erkennen.

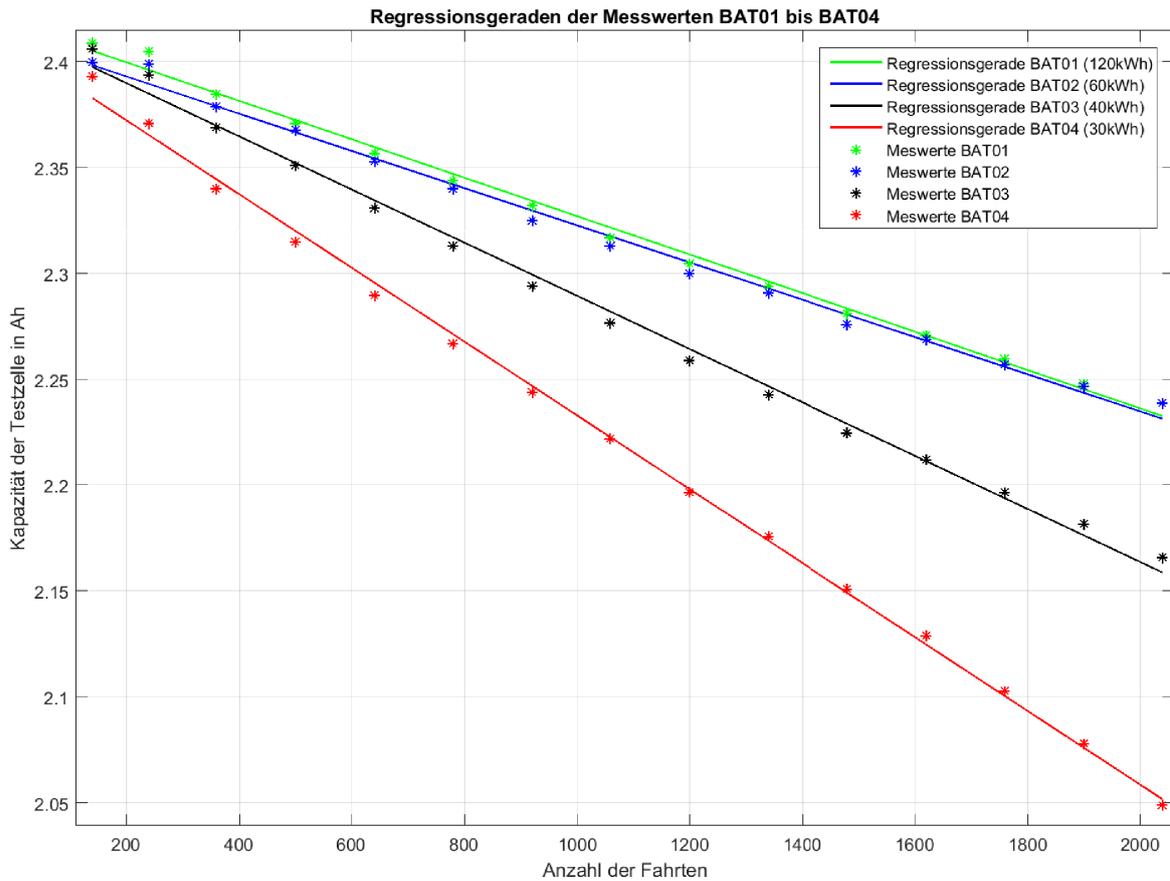


Abbildung 5.4.: Verbleibende Kapazität der Testzellen in Ah

In der ersten Messwoche wurden 140 Fahrten simuliert, in der zweiten 100, in der dritten 120. Ab Messwoche drei wurden konstant 140 Fahrten pro Woche nachgebildet. Unabhängig davon wurden die Zellkapazitätsmessungen und die EIS-Messungen einmal pro Woche durchgeführt.

In der Tabelle 5.3 sind die Kapazitätsverluste für alle vier Testzellen in Prozent zusammengefasst und in der Abbildung 5.5 dargestellt.

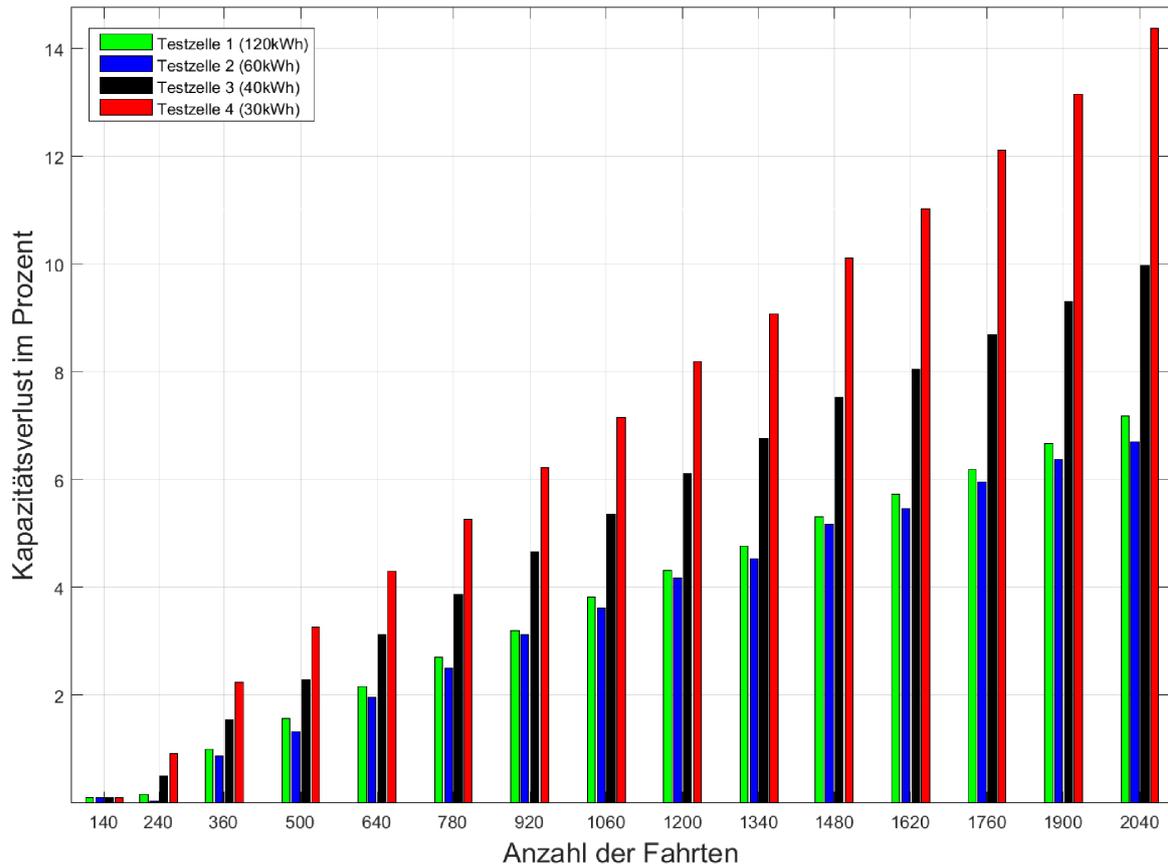


Abbildung 5.5.: Kapazitätsverlust der Testzellen in Prozent

5.4. Beschreibung des Kapazitätsverlustes

Die Prüfung verschiedener Batteriekapazitäten kann wegen des hohen Aufwands nur für wenige ausgewählte Werte erfolgen. Um eine Abschätzung für andere Werte liefern zu können, kann aus den Messwerten eine Gleichung abgeleitet werden, die den Verlauf der experimentell ermittelten Ergebnisse beschreibt. Aus dieser Gleichung kann dann das Verhalten bei den jeweils nicht experimentell ermittelten Kapazitäten abgeschätzt werden.

Um die Abhängigkeit der Geschwindigkeit des Kapazitätsverlustes von der verwendeten Batteriekapazität mathematisch beschreiben zu können, wurden verschiedene Funktionen als Annäherung an die gemessenen Steigungen geprüft. Hier kamen eine lineare Funktion, eine quadratische Funktion, eine Polynomfunktion 3. Grades, eine Exponentialfunktion, eine Potenzfunktion und eine inverse Funktion in Frage. Für alle Funktionen wurde der MATLAB-Kurvenfitter `cftool` verwendet. In der Tabelle 5.4 sind die erhaltenen Koeffizienten a , b , c

und d und das Bestimmtheitsmaß R^2 angegeben und in der Abbildung 5.6 die Datenpunkte zusammen mit allen Annäherungsfunktionen dargestellt.

Das Bestimmtheitsmaß R^2 beschreibt die Qualität der linearen Approximation, aber nicht, ob das Modell richtig spezifiziert wurde. Es kann nicht kleiner als null und nicht größer als eins werden ($0 \leq R^2 \leq 1$). Je größer der Gütemaßwert R^2 ist, desto besser ist die Modellanpassung.

Als Beispiel hat die Funktion $f_3(x)$, bezogen auf die Messdaten, ein Bestimmtheitsmaß von 1 (was die ideale Approximation bedeuten sollte), dabei zeigt aber der Kurvenverlauf zwischen 60 kWh und 120 kWh untypisches Batteriealterungsverhalten. Einen unrealistischen Verlauf besitzt auch die Funktion $f_2(x)$. Obwohl die beiden Funktionen einen guten R^2 -Wert haben, sind sie nicht als Modellbeschreibung geeignet, da ihr Verlauf vermutlich nicht einem realen Verhalten entspricht.

Tabelle 5.4.: Mathematische Beschreibung des Kapazitätsverlustes

Funktionen	Koeffizienten				R^2
	a	b	c	d	
$f_1(x) = a \cdot x + b$	$-7,002 \cdot 10^{-4}$	0,166	—	—	0,531
$f_2(x) = ax^2 + bx + c$	$3,124 \cdot 10^{-5}$	-0,006	0,3075	—	0,984
$f_3(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d$	$-6,615 \cdot 10^{-7}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	-0,014	0,455	1
$f_4(x) = a \cdot e^{bx}$	0,1882	-0,008	—	—	0,607
$f_5(x) = ax^b + c$	2236	-2,986	0,088	—	0,978
$f_6(x) = a/x + b$	3,35	0,05224	—	—	0,8662

Die Funktionen $f_1(x)$ und $f_4(x)$ sind auch nicht gut geeignet zur Beschreibung des Zusammenfassungen, da die Abweichung von den Messwerten hoch und damit der R^2 -Wert niedrig ist, verglichen beispielsweise mit $f_5(x)$. Die Funktion $f_2(x)$ ist für die Beschreibung der Datenverteilung ebenfalls nicht geeignet, da der Kurvenverlauf unrealistisch erscheint.

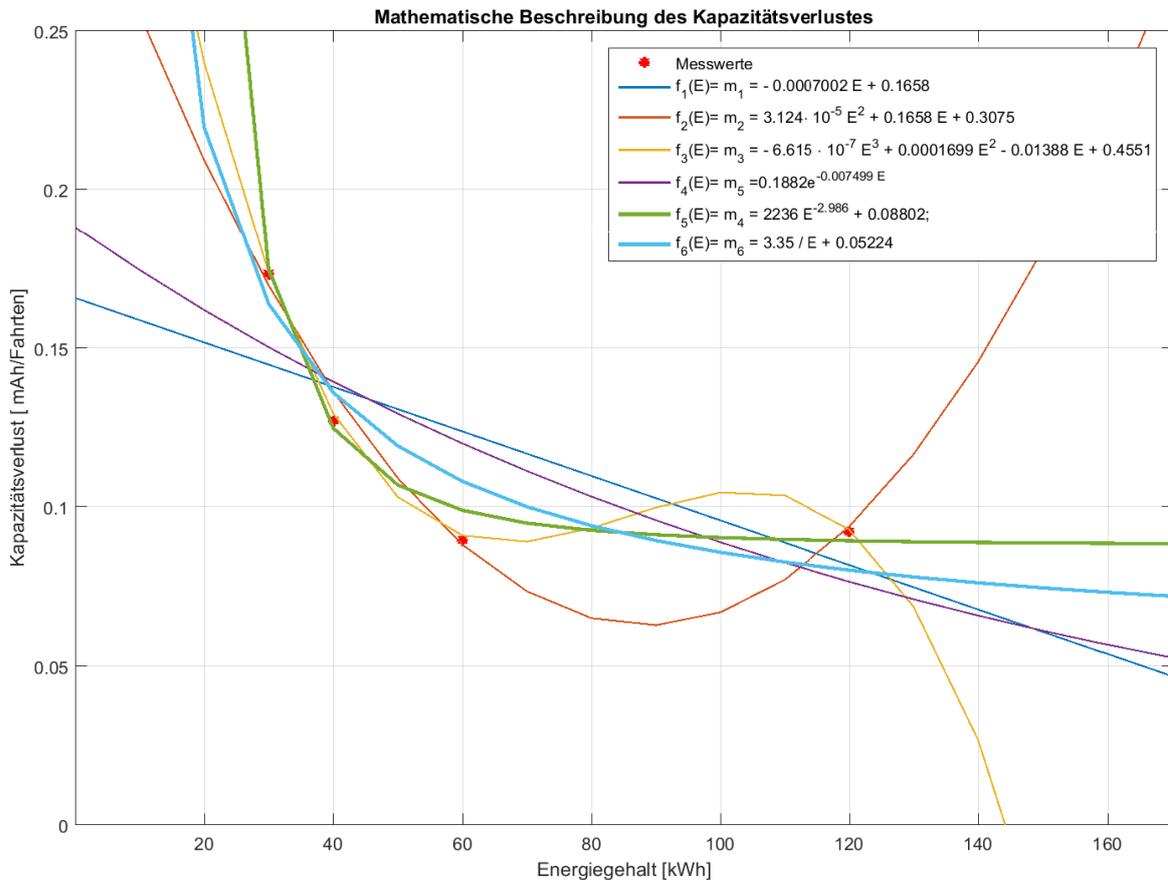


Abbildung 5.6.: Approximation der funktionalen Abhängigkeit der Batteriealterung von deren Nennkapazität. Dabei ist m die Steigung der Alterung und E ist der Nennenergiegehalt der Batteriesystems.

Die Abhängigkeit des Batteriealterungsverlaufs von der Nennkapazität der Batterie kann mit der Funktion $f_5(x)$ am besten modelliert werden. Der Kurvenverlauf dieser Annäherungsfunktion entspricht für den bekannten Bereich dem Alterungsverhalten der Testzellen. Das entsprechende Bestimmtheitsmaß hat einen Wert von 0,978, d.h. die 97,8% des Kapazitätsverlustes der jeweiligen Batterie im Test kann mit deren Anfangskapazität erklärt werden.

An der Stelle ist Folgendes zu beachten: Da der Zeitbedarf für einen kompletten Prüfvorgang ungefähr dem zeitlichen Rahmen der vorliegenden Bachelorarbeit entspricht und die Anzahl der zur Verfügung stehenden Messkanäle des Zyklersystems auf vier begrenzt ist, ist die Anzahl der erhaltenen Messwerten nur bedingt für die verlässliche statistische Analyse ausreichend.

5.5. Kapazitätsverlust der Testzellen in Abhängigkeit von Lade-Entlade-Batterievollzyklen

In Abbildung 5.7 ist der gemessene Kapazitätsverlust für alle vier Testzellen über die durchgeführten Batterievollzyklen dargestellt. Betrachtet über die Vollzyklenzahl, altert die Testzelle BAT01 schneller als die Testzellen BAT02, BAT03 und BAT04, was zunächst nicht erwartet wurde. Der Grund dafür ist wahrscheinlich, dass ein Vollzyklus bei der BAT01 mehr Zeit benötigt als bei anderen Testzellen. Hierdurch wird die kalendarischen Alterung dominieren. Da verglichen mit Testzelle BAT04 nur ca. ein Viertel der Batterievollzyklen Energie umgesetzt wurde, zeigt die zyklische Alterung weniger Auswirkung auf die Testzelle BAT01. Hier ist außerdem zu bedenken, dass nicht abschließend geklärt werden kann, ob die erhöhte Zelltemperatur sich vorrangig auf die kalendarische Alterung auswirkt, oder ob die Zelle auch weniger Zyklen aushält.

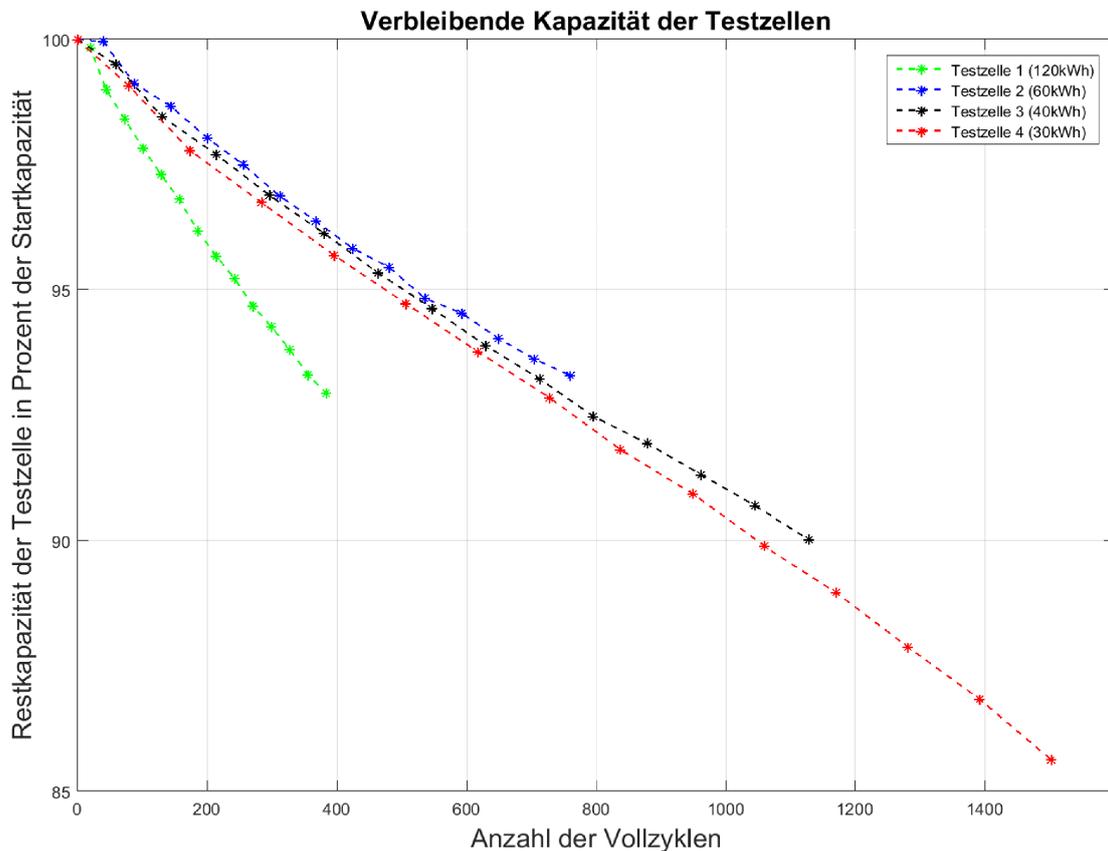


Abbildung 5.7.: Kapazitätsverlust der Testzellen in Prozent in Abhängigkeit der Lade-Entlade-Batterievollzyklen. Zu erkennen ist, dass der Verlust linear mit der Zahl der Vollzyklen läuft. Die Testzelle BAT01 altert bezogen auf die Vollzyklen schneller als andere Testzellen.

Es wurden auch zusätzlich als Vergleich zu den eigenen Messungen, die Ergebnisse der Zellenmessungen aus der Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. [29] verglichen. Im Rahmen des Projekts Analysezentrum für Elektromobilität (AZE) wurden die Batteriezellen bei einer Temperatur von 20 °C und 40 °C und Stromstärken mit 0,5C und 3C zyklert und die Alterungsverläufe analysiert. Es wurde eine ähnliche Tendenz festgestellt.

5.6. Elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS)

Die Elektrochemische Impedanzspektroskopie wurde einmal in der Woche wie geplant durchgeführt. In Abbildung 5.8 ist das erste und das letzte Impedanzspektrum der Testzelle BAT04 dargestellt. Zwischen diesen zwei Messungen liegen 204 Tageszyklen bzw. 2040 Fahrten. Zu sehen ist, dass das Impedanzspektrum der Testzelle nach mehrwöchigen Belastungen sich nach rechts verschoben hat. Dies bedeutet, dass sich der Realteil des komplexen Innenwiderstandes mit zunehmender Alterung erhöht hat.

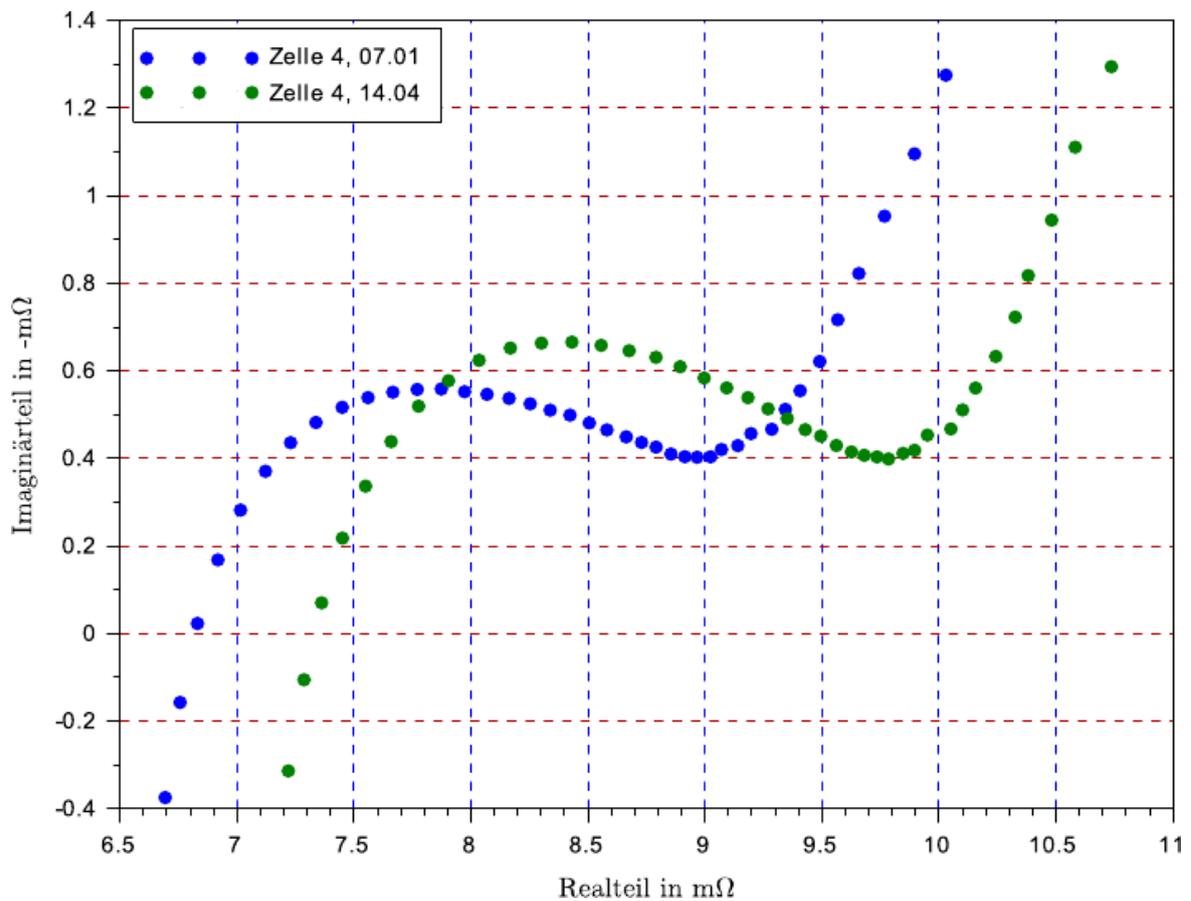


Abbildung 5.8.: Die Elektrochemische Impedanzspektroskopie der Testzelle BAT04 vor und nach den mehrwöchigen Belastungen

Weitere EIS-Messergebnisse für die Testzelle BAT01 bis BAT04 sind dem Anhang E, Elektrochemische Impedanzspektroskopie ab Seite 106 zu entnehmen.

5.7. Analyse der Messergebnisse

Die Testzelle BAT04 wurde mit dem größten Strom belastet. Als Ergebnis ist hier der größte Kapazitätsverlust unter den vier Zellen zu erkennen. Außerdem wurden an dieser Zelle die größten Temperaturanstiege gemessen.

Es kann nicht im Rahmen dieser Arbeit sichergestellt werden, dass die, im Vergleich mit den anderen Zellen, stark beschleunigte Alterung der am stärksten belasteten Zelle ausschließlich auf den höheren Strom zurückzuführen ist. Ein anderer Grund wäre beispielsweise die um bis zu 7 Grad höhere Zellaußentemperatur der Testzelle BAT04.

Die EIS-Messungen zeigen für die einzelnen Zellen eine klare Tendenz der Erhöhung des Realteils des Innenwiderstandes über den Messzeitraum. Eine besonders starke Änderung für die am stärksten belastete Zelle wurde bisher jedoch nicht beobachtet.

Obwohl die Testzelle BAT02 im Vergleich zu BAT01 mit stärkerem Lade- und Entladestrom belastet wurde, altern beide Testzellen bezogen auf die Zahl der gefahrenen Tageszyklen beinahe gleichmäßig. Es liegt darin, dass die Unterschiede des Zyklierstromes für beide Testzellen offensichtlich keine große Auswirkung auf die Alterung der Testzellen haben.

Zu den Messergebnissen ist festzuhalten, dass getroffene Aussagen wegen der geringen Stichprobengröße exemplarisch zu sehen sind. Zudem erfolgte der Anfangszustand der Zellen lediglich über eine Bestimmung der Anfangskapazität und der komplexen Impedanz. Unterschiede aufgrund der Vorgeschichte, unterschiedlicher Formatiervorgänge und andere zellindividuelle Einflüsse gehen in die Messungen als unbekannte Störgrößen ein. Da keine Chargennummer bekannt ist, kann auch keine Aussage zu kleinen Unterschieden in Zellchemie und Fertigung gemacht werden. Trotzdem sind die Ergebnisse schlüssig und können als Basis für weitere Untersuchungen verwendet werden.

6. Fazit

6.1. Zusammenfassung

Im Messzeitraum wurde ein linearer Kapazitätsverlust beobachtet. In der Literatur und in vorhergehenden Arbeiten der Arbeitsgruppe BATSEN wurde ab ca. 80 % verbleibender Kapazität eine stark beschleunigte Kapazitätsminderung beobachtet, die voraussichtlich in den auf den Abschluss der Arbeit folgenden Wochen eintreten sollte.

Der Kapazitätsverlust ist wie erwartet für die kleinste simulierte und damit am stärksten belastete Batterie am schnellsten vorangeschritten. Der Verlust beträgt für diese Zelle 14,38 %, während die auf 120 kWh Gesamtbatteriegröße ausgelegte Testzelle nur 7,18 % Kapazität verloren hat.

Wird der Kapazitätsverlust allerdings auf die Zahl der tatsächlich umgesetzten Lade-Entlade-Vollzyklen gerechnet, wandelt sich das Bild und die 120-kWh-Batterie verliert am schnellsten Kapazität. Dies ist sehr wahrscheinlich durch die sehr geringe Zyklenzahl und C-Raten dominierende kalendarische Alterung bedingt.

Aus der Perspektive der Kostenoptimierung würde sich aus den Ergebnissen dieser Arbeit eine Empfehlung für die zweitgrößte Batterie ergeben. Allerdings müssen hier noch die eventuell nicht linear mit der Batteriekapazität steigenden Batteriekosten und die Kosten für den Ersatz der Batterie einbezogen werden.

Aus dem fortlaufenden Kapazitätsverlust der Zelle ergeben sich weiterführende Fragen für die Auslegung der Pantographenströme. Um die vorgegebene Grenze von 20 % der Tagesrestkapazität nicht zu verletzen, muss der Pantographenstrom im Grunde ständig neu berechnet werden. Zudem nimmt die Belastung über die Lebensdauer der Batterie zu, da die C-Rate, bezogen auf die Restkapazität, mit abnehmender Restkapazität zunimmt. Diesen Entwicklungen muss entweder durch Anpassung der Parameter über die Batterielebensdauer oder durch eine Überdimensionierung der Batterie, zum Beispiel um 25 % entgegengewirkt werden. Eine Überdimensionierung um 25 % bedeutet dann, dass bei 20 % Kapazitätsverlust gerade die Auslegekapazität vorliegen würde. Ist dieser Fall erreicht, muss entschieden werden, ob eine Weiterverwendung im Busbetrieb, eine Aufwertung durch Ersatz besonders

geschädigter Zellen, eine Anschlussverwendung, beispielsweise im stationären Betrieb oder eine Verschrottung in Betracht gezogen werden sollte.

6.2. Ausblick

Für einen Testbetrieb sollen im Busbetrieb in Zukunft auch Batterien auf Lithium-Titanat-Basis eingesetzt werden, die bei geringerer Energiedichte laut Literatur wesentlich bessere Zyklenfestigkeit und Alterungsverhalten aufweisen. Diese sollten im Rahmen einer nachfolgenden Arbeit ebenso getestet werden. Sowie die Untersuchung des Tieftemperaturverhalten von den Batterien, dies war im zeitlichen Rahmen dieser Arbeit nicht mehr möglich.

Der entwickelte Tageszyklus sieht eine Restladung bei Anfahrt des Depots von 20% vor. Um ausreichend Spielraum auch bei unvorhergesehenen Umwegen, Verkehrsbehinderungen unter anderem sicherzustellen, könnte der Zyklus so modifiziert werden, dass noch mindestens 50% Restladung verbleiben.

Die Temperaturmessung fand bisher an der Seite der Batterie statt. Eine bessere Kopplung mit der tatsächlichen Innentemperatur der Zelle ist an den Batteriepolen zu erwarten. Dies sollte in späteren Messungen berücksichtigt werden.

Über den Messzeitraum wurden nur vier Zellen getestet. Für eine treffendere Statistik sollten jeweils mehrere Zellen bei gleichen Umgebungsbedingungen zyklisiert und weitere Batteriekapazitäten simuliert werden. Hierbei sollte auch eine tiefergehende Behandlung der beschleunigten Alterung erfolgen, beispielsweise über Messungen bei verschiedenen Temperaturen, regelmäßigen Messungen an einer ruhenden Zelle über den Messzeitraum und über umfangreichere theoretische Behandlung und Literaturarbeit.

Tabellenverzeichnis

2.1. Technische Daten des Zyklisierungstestsystems MCT 200-06-4 ME	23
2.2. Messabweichung der Temperatursensoren	24
3.1. Potenziell einsetzbare Batteriekapazitäten auf der Linie 109	35
3.2. Pantographenströme, Restkapazität und Restenergiegehalt für die Testzellen am Ende des Betriebstages	44
3.3. Pantographenströme, Restkapazität und Restenergiegehalt für die modellier- ten Batterien am Ende des Betriebstages	44
3.4. Die berechneten Daten aus der Arrhenius-Gleichung des Forschungsteams aus Newcastle [28]	47
5.1. Anfangszustände der einzelnen Testzellen	67
5.2. Mittelwert der Temperaturen für einen Wochenzyklus	70
5.3. Kapazitätsverlust der Testzellen über den Messzeitraum	72
5.4. Mathematische Beschreibung des Kapazitätsverlustes	75

Abbildungsverzeichnis

2.1. Vergleich zwischen unterschiedlichen Energiespeichertechnologien im Ragone-Diagramm. Entnommen aus [31]	13
2.2. Modell der Lithium-Ionen-Batterien. Entnommen aus [15]	14
2.3. Entladetiefe vs. Durchsatz der Nennkapazität für unterschiedliche Batterietechnologien. Entnommen aus [21]	17
2.4. Ein-Motor-System, serielle Anordnung eines Hybridantriebes. Eigene Darstellung in Anlehnung an [32].	19
2.5. Parallele Anordnung eines Hybridantriebes mit Momentenaddition. Eigene Darstellung in Anlehnung an [32]	21
2.6. Zyklertestsystem MCT 200-06-4 ME	22
2.7. Aufbau des Programmeditors bei dem Batterie-Test-System BTS-600	25
3.1. Batteriebus Solaris Urbino 18,75	27
3.2. Messaufbau im Batteriebus Solaris Urbino 18,75	28
3.3. Darstellung der Messergebnisse nach der Messfahrt	29
3.4. GPS und GSM Datenlogger.	31
3.5. Messfahrtroute von der Haltestelle U-Alsterdorf zu der Haltestelle ZOB-Hauptbahnhof mit Solaris Urbino 18,75.	32
3.6. Geschwindigkeitsmessung Datenlogger und Solaris Urbino 18,75	33
3.7. Fahrzyklus von der Endhaltestelle U-Alsterdorf zum zentralen Omnibusbahnhof (ZOB) Hamburg. Darstellung als Fahrstrom, normiert in C-Raten der Batterie.	37
3.8. Kapazitätsdifferenz nach einer Fahrt von U-Alsterdorf zum ZOB.	38
3.9. Stromverläufe der Testzellen für eine Fahrt von U-Alsterdorf bis zum ZOB	40
3.10. Einfluss der Temperatur auf die kalendarische Lebensdauer [27].	45
3.11. Kalendarischer Alterungsfaktor CLSF nach der Arrhenius-Gleichung	47
4.1. Skizze der Halterung für die Testzellen BAT01 bis BAT04	49
4.2. Das Zyklierungsprogramm BAT01_10x14_120kWh_6 für die Testzelle BAT01 mit der Battery Manager Workstation	52
4.3. Das Zyklierungsprogramm BAT02_10x14_60kWh_6 für die Testzelle BAT02 mit der Battery Manager Workstation	55

4.4. Das Zyklierungsprogramm BAT03_10x14_40kWh_6 für die Testzelle BAT03 mit der Battery Manager Workstation	56
4.5. Das Zyklierungsprogramm BAT04_10x14_40kWh_6 für die Testzelle BAT04 mit der Battery Manager Workstation	57
4.6. Tageszyklus für BAT01 bis BAT04 in A	59
4.7. Kapazitätsmessung mit der Battery Manager Workstation	60
4.8. Matlaausschnitt, Erstellung einer Sollwerttabelle mit Fahrströmen für das Zykliersystem Digatron	62
4.9. Elektrochemische Impedanzspektroskopie für die Testzelle BAT01.	64
4.10. Künstliche Alterung einer LiFePO ₄ Zelle bei zwei verschiedenen Alterungszuständen. Entnommen aus [33].	65
5.1. Abtastwerte nach dem Tageszyklus in Ah für die vier Testzellen	68
5.2. Temperaturverläufe eines Wochenzyklus	69
5.3. Temperatur- und Stromabtastwerte eines Tageszyklus für die Testzelle BAT04	71
5.4. Verbleibende Kapazität der Testzellen in Ah	73
5.5. Kapazitätsverlust der Testzellen in Prozent	74
5.6. Approximation der funktionalen Abhängigkeit der Batteriealterung von deren Nennkapazität	76
5.7. Kapazitätsverlust der Testzellen in Prozent in Abhängigkeit der Lade-Entlade-Batterievollzyklen	77
5.8. Die Elektrochemische Impedanzspektroskopie der Testzelle BAT04 vor und nach den mehrwöchigen Belastungen	79

Literaturverzeichnis

- [1] : *Batteriezyklen-einfach erklärt.* – URL <http://patona.de/ratgeber/batteriezyklen-einfach-erklart>. – Zugriffsdatum: 09.04.2016
- [2] : *DELFIN Förderprojekte zu Elektromobilität.* – URL <http://www.elektromobilitaet-dienstleistungen.de/wp-content/uploads/2014/08/DELFIN-F%C3%B6rderprojekte-Elektromobilit%C3%A4t-Version-1.0.pdf>. – Zugriffsdatum: 12.04.2016
- [3] : *Duden Online-Wörterbuch.* – URL <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/Nennkapazitaet-rating.html>. – Zugriffsdatum: 11.04.2016
- [4] : *Elektrolyte für Batterien.* – URL <http://www.iolitec.de/Energie-Cleantech/batterie-elektrolyte.html>. – Zugriffsdatum: 4.02.2016
- [5] : *Elektromobilität.* – URL <https://www.vcd.org/themen/elektromobilitaet/#c1432>. – Zugriffsdatum: 12.02.2016
- [6] : *Elektromotive Engineering Consulting.* – URL http://www.electromotive.eu/?page_id=14. – Zugriffsdatum: 09.04.2016
- [7] : *Kompendium: Li-Ionen-Batterien.* – URL <https://www.dke.de/de/std/Informationssicherheit/imSmartGrid/Documents/Kompendium%20Li-Ionen-Batterien.pdf>. – Zugriffsdatum: 09.04.2016
- [8] : *Lithium-Ionen-Akkus.* – URL <http://www.elektronik-kompendium.de/sites/bau/0810281.htm>. – Zugriffsdatum: 5.02.2016
- [9] : *Online-Lexikon für Informationstechnologie.* – URL <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/Nennkapazitaet-rating.html>. – Zugriffsdatum: 11.04.2016
- [10] : *Parallel-Hybrid.* – URL <http://www.hybrid-autos.info/Technik/Hybrid-Varianten/parallel-hybrid.html>. – Zugriffsdatum: 28.03.2016

- [11] : *Projektübersicht 2015/16. Hybrid- und Elektrobus-Projekte in Deutschland.* – URL https://www.now-gmbh.de/content/5-service/4-publikationen/1-begleitforschung/now_projektuebersicht_bus_web.pdf. – Zugriffsdatum: 12.04.2016
- [12] : *Projekte der Modellregionen Elektromobilität.* – URL <https://www.now-gmbh.de/de/modellregionen-elektromobilitaet/projektfinder/suche:elektrobus>. – Zugriffsdatum: 12.04.2016
- [13] : *Serieller Hybride.* – URL <http://www.im-auto.de/hybridantrieb/strukturvarianten/serieller-hybride.html>. – Zugriffsdatum: 28.03.2016
- [14] : *Webseite - Analog Devices.* – URL <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD590.pdf>. – Zugriffsdatum: 01.03.2016
- [15] ANDRE, Loges: *Thermisches Design von Lithium-Ionen Batteriezellen für Hybrid- und Elektrofahrzeuge.* – URL https://www.tvt.kit.edu/21_984.php. – Zugriffsdatum: 5.02.2016
- [16] DIGATRON, GmbH: *Battery Manager 4. Handbuch (Version 4.9.35)*
- [17] ECKHARD, Fahlbusch: *Batterien als Energiespeicher: Beispiele, Strategien, Lösungen.* DIN Deutsches Institut für Normung e.V, 2015. – 223–225 S. – ISBN 978-3-410-24478-3
- [18] ECKHARD, Fahlbusch: *Batterien als Energiespeicher: Beispiele, Strategien, Lösungen.* DIN Deutsches Institut für Normung e.V, 2015. – 200, 213 S. – ISBN 978-3-410-24478-3
- [19] EDGAR, Schoop: *Stationäre Batterie-Anlagen.* HUSS-MEDIEN GmbH, Verlag Technik, 2013. – 56–FF S. – ISBN 978-3-341-01610-7
- [20] FUELCON, AG: *TrueData-EIS - Impedance spectrum analyzer (Seite 4).* 03.2008. – URL <http://www.fuelcon.com/cms/index.php?id=541&L=1>. – Zugriffsdatum: 2.03.2016
- [21] GARCHE, Jürgen ; DYER, Chris K. ; MOSELEY, Patrick T. ; OGUMI, Zempachi ; RAND, David A. ; SCROSATI, Bruno: *Encyclopedia of electrochemical power sources.* Newnes, 2013. – 283 S
- [22] GPSKOORDINATEN.DE: *Was sind GPS Koordinaten?.* – URL <http://www.gpskoordinaten.de/gps-koordinatensystem>. – Zugriffsdatum: 17.02.2016

- [23] GROTH, Felix A.: *Datenlogger für Elektrobusse mit Mikrocontrollersteuerung, Inertialmesssystem sowie GPS- und GSM-Modulen*, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Bachelorthesis, 2015
- [24] HTTP://WWW.DIGATRON.COM/: *MULTIPLE CELL TESTER*. – URL <http://www.digatron.com/de/secondary-cells-packs/mct-lithium-cell-tester/>. – Zugriffsdatum: 29.02.2016
- [25] KAMAYA, Noriaki ; HOMMA, Kenji ; YAMAKAWA, Yuichiro ; HIRAYAMA, Masaaki ; KANNO, Ryoji ; YONEMURA, Masao ; KAMIYAMA, Takashi ; KATO, Yuki ; HAMA, Shigenori ; KAWAMOTO, Koji u. a.: A lithium superionic conductor. In: *Nature materials* 10 (2011), S. 682–686
- [26] KIEL, Martin: *Impedanzspektroskopie an Batterien unter besonderer Berücksichtigung von Batteriesensoren für den Feldeinsatz*, RWTH Aachen, Dissertation, Juni 2013
- [27] LACEY, Gillian ; JIANG, Tianxiang ; PUTRUS, Ghanim ; KOTTER, Richard: The effect of cycling on the state of health of the electric vehicle battery. In: *Power Engineering Conference (UPEC), 2013 48th International Universities' IEEE (Veranst.)*, 2013, S. 1–7
- [28] LUNZ, Benedikt ; YAN, Zexiong ; GERSCHLER, Jochen B. ; SAUER, Dirk U.: Influence of plug-in hybrid electric vehicle charging strategies on charging and battery degradation costs. In: *Energy Policy* 46 (2012), S. 511 – 519. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421512003175>. – ISSN 0301-4215
- [29] MEZGER, Tomas ; NOBIS, Philipp: *Batteriemessungen im Rahmen des Projekts AZE*. 11.2012. – URL https://www.ffe.de/download/article/262/20121112_Endbericht_Batteriemessung_AZE.pdf. – Zugriffsdatum: 31.03.2016
- [30] MICHAEL, Sterner ; INGO, Stadler: *Energiespeicher*. Springer Vieweg, 2014. – 26, 248–251 S. – ISBN 978-3-642-37379-4
- [31] MovGP0: *Energiespeicher3*. – URL <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=29528477>. – Zugriffsdatum: 4.02.2016
- [32] PETER, Hofmann: *Hybridfahrzeuge. Ein alternatives Antriebssystem für die Zukunft*. Springer Wien, 2014. – ISBN 978-3-7091-1779-8
- [33] SASSANO, Nico: *Entwicklung eines Messsystems zur funksynchronisierten elektrochemischen Impedanzspektroskopie an Batterie-Zellen*, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Masterthesis, Okt 2015

-
- [34] SCHMIDT, Oliver A.: *Auslegung und Erprobung eines Lithiumbatterie-Prüfstands für typische Lade- und Lastprofile von Elektrobussen*, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Bachelorthesis, 2015
- [35] THOMAS, Tille: *Automobil-Sensorik*. Springer, 2016. – ISBN 978-3-662-48943-7
- [36] THORSTEN, Baumhöfer: *Statische Betrachtung experimenteller Alterungsuntersuchungen an Lithium-Ionen Batterien*. Univ. Prof. Dr. ir. Dr.h.c.Rik.W. De Doncker, 2015. – ISBN 978-3-8440-3423-3

A. Aufgabenstellung



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Department Informations- und Elektrotechnik
Prof. Dr.-Ing. Karl-Ragmar Riemschneider

26. Januar 2016

Bachelorarbeit: Alexander Priven

Erfassung, Prüfstandserprobung und Bewertung von Lade- und Lastprofilen bei elektrischen Stadtbussen zur Optimierung der Batterielebensdauer

Motivation

In der Forschungsgruppe Batteriesensoren (BATSEN) an der HAW Hamburg werden Lithiumbatterien in verschiedenen Einsatzbereichen untersucht. Sie sollen auf einem Laborprüfstand mit gespeicherten Lade- und Lastverläufen zyklisiert werden, welche typischen Profilen der Anwendung entsprechen. Im Falle von Elektro- und Hybridbussen besteht aktuelles Forschungsinteresse, weil noch wenig über spezifischen Betriebsprofile und die entsprechenden Batteriebelastungen bekannt ist. Ziel ist Kriterien für einen batterieschonenden Busbetrieb zu entwickeln.

Aufgabe

Herr Priven erhält die Aufgabe, für Elektrobusse typische Betriebsprofil zu erfassen und diese experimentell auf Batteriezellen anzuwenden. Dabei werden an den Batteriezellen Lade- und Entladevorgänge mit hohen Lade- und Entladeraten (C-Raten) durchgeführt. Beim Zyklierbetrieb sind Messwerte wie Zellspannung, Strom und Temperatur aufzuzeichnen. Im Fokus der praktischen Untersuchungen sollen Lithium-Eisenphosphatzellen (LiFePO_4) stehen. Hierbei ist der Aspekt des Temperatureinflusses auf die Batterien mit Hilfe eines gesteuerten Temperaturschranke zu betrachten.

Gliederung

Die Aufgabe der Bachelorarbeit gliedert sich wie folgt:

1) Analyse der Rahmenbedingungen und Vorarbeiten

- Einarbeitung durch Recherche und Literatur in die Thematik
- Einarbeitung in das Batterietestsystem
- Technische Daten und Betriebsabläufe von Elektrobussen

2) Aufnahme von Fahrdaten und elektrischen Größen

- Erfassung von Daten aus dem Busbetrieb mit dem vorhandenen Fahrdatenlogger (Momentanstrom, GPS-Positionsdaten u.a.)
- Verifizierung, Fehlerkompensation, Darstellung der Datensätze
- Auswahl, Vereinfachung von Fahrdatensätzen

3) Konzeption und Messplanung der Zyklierexperimente

- Entwicklung eines Umrechnungsmodells auf kleinere Batterien bzw. Einzelzellen, zur Abbildung von Bus-Antriebsbatterien verschiedener Kapazität
- Entwicklung eines Schnellalterungskonzepts durch Temperatur-Erhöhung
- Umsetzung/Vereinfachung von der Fahrdatensätze in Zykliersteuerdaten mit Zwischenladung und Depotladung
- Aufstellen eines Messplans, Programmierung/Einrichtung des Testsystems
- Optional nachrangig: Untersuchung Tieftemperaturverhalten

4) Durchführung der Zyklierexperimente mit den Batterieprüfstand

- Installation am Zykliersystem und geschützte Montage der Zellen im Temperaturschrank
- Einrichtung und Auswertung über Datenbankfunktionen
- Durchführung und laufende Überwachung der Versuchsreihe(n)
- Direkte und laufende Vorprüfung der Versuchsdaten
- Ggf. Korrektur /Anpassung Messplanung
- Begleitende periodische Messung des Elektrochemischen Impedanzspektrums (wöchentlich)
- Periodischer Vollzyklus zur Bestimmung der verbleibenden Kapazität (SOH)

5) Auswertung Zyklierexperimente

- Darstellung des Langzeitverhaltens und Plausibilitätsprüfungen
- Darstellung ausgewählter Details
- Vergleiche der Versuchsreihen und bewertende Diskussion der Ergebnisse hinsichtlich der Batteriealterung
- Ableitung von Abschätzungen und Handlungsrichtlinien

6) Zusammenfassung und Fazit

- Bewertung der Experiments als Beitrag für die Projektzielstellung
- Erfassung von Fortführungsvorschlägen
- Formulierung von Vorschlägen für den batterieschonenden Betrieb aus Anwendersicht

Dokumentation

Die Vorarbeiten und die kommerziellen Unterlagen sind zielgerichtet zu recherchieren. Die gewählte Lösungen sind gut nachvollziehbar zu dokumentieren. Die gesetzten Rahmenbedingungen und wesentlichen Entwurfsentscheidungen sollen beschrieben werden. Die Ergebnisse sind systematisch zu erfassen und anschaulich-grafisch auszuwerten.

B. Datenblätter

B.1. Datenblatt: Testzelle A123 ANR26650M1-b

+ Nanophosphate® High Power Lithium Ion Cell ANR26650M1-B



A123's high-performance Nanophosphate® lithium iron phosphate (LiFePO4) battery technology delivers high power and energy density combined with excellent safety performance and extensive life cycling in a lighter weight, more compact package. Our cells have low capacity loss and impedance growth over time as well as high usable energy over a wide state of charge (SOC) range, allowing our systems to meet end-of-life power and energy requirements with minimal pack oversizing.



APPLICATIONS

COMMERCIAL SOLUTIONS

Advanced lead acid replacement batteries for:

- + Datacenter UPS
- + Telecom backup
- + IT backup
- + Autonomously guided vehicles (AGVs)
- + Industrial robotics and material handling equipment
- + Medical devices

GOVERNMENT SOLUTIONS

- + Military vehicles
- + Military power grids
- + Soldier power
- + Directed energy

GRID SOLUTIONS

Versatile, flexible and proven storage solutions for the grid:

- + Frequency regulation
- + Renewables integration
- + Reserve capacity
- + Transmission and distribution

TRANSPORTATION SOLUTIONS

Hybrid, plug-in hybrid and electric vehicle battery systems for:

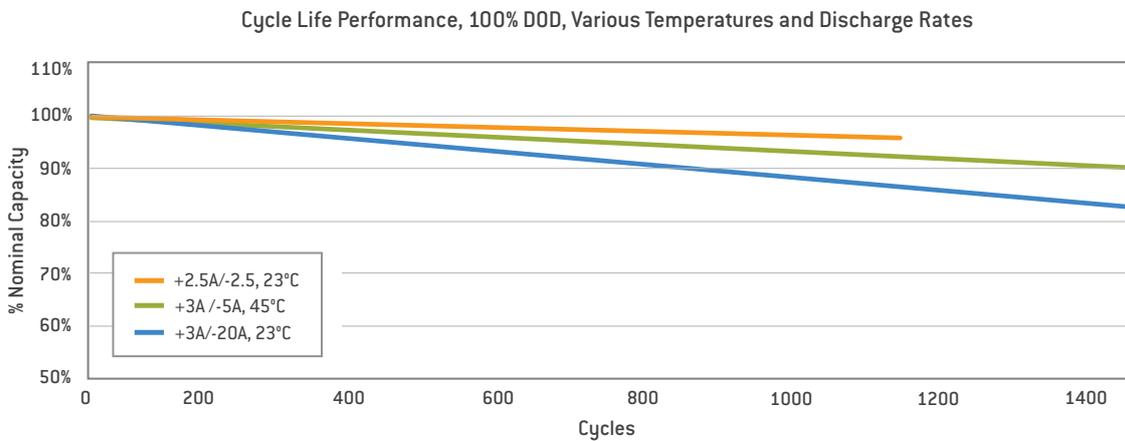
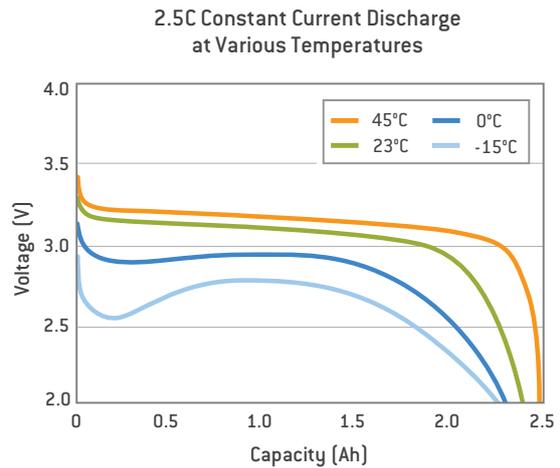
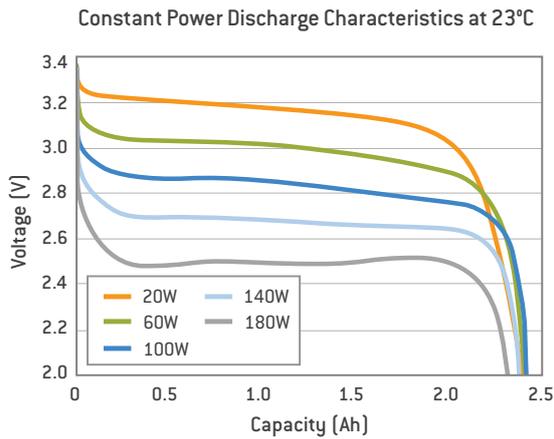
- + Commercial vehicles
- + Off-highway vehicles
- + Passenger vehicles

ANR26650M1-B TECHNICAL DATA

Cell Dimensions	ø26 x 65 mm
Cell Weight	76g
Cell Capacity (nominal/minimum) (0.5C Rate)	2.5/2.4 Ah
Voltage (nominal)	3.3V
Internal Impedance (1kHz AC typical)	6mΩ
Power*	2600 W/kg
Recommended Standard Charge Method	2.5A to 3.6V CCCV, 60 min
Recommended Fast Charge Method to 80% SOC	10A to 3.6V CC, 12 min
Maximum Continuous Discharge	50A
Maximum Pulse Discharge (10 seconds)	120A
Cycle Life at 20A Discharge, 100% DOD	>1,000 cycles
Operating Temperature	-30°C to 55°C
Storage Temperature	-40°C to 60°C

* ~200W as measured by A123 modified HPPC Method @ 23°C, 50% SOC, 10 second discharge

**+ Nanophosphate[®] High Power Lithium Ion Cell
ANR26650M1-B**



This document represents typical data. Performance may vary depending on use conditions and application. A123 Systems makes no warranty explicit or implied with this data sheet. Contents subject to change without notice.

CORPORATE HEADQUARTERS

A123 Systems, Inc.
200 West Street
Waltham, MA 02451

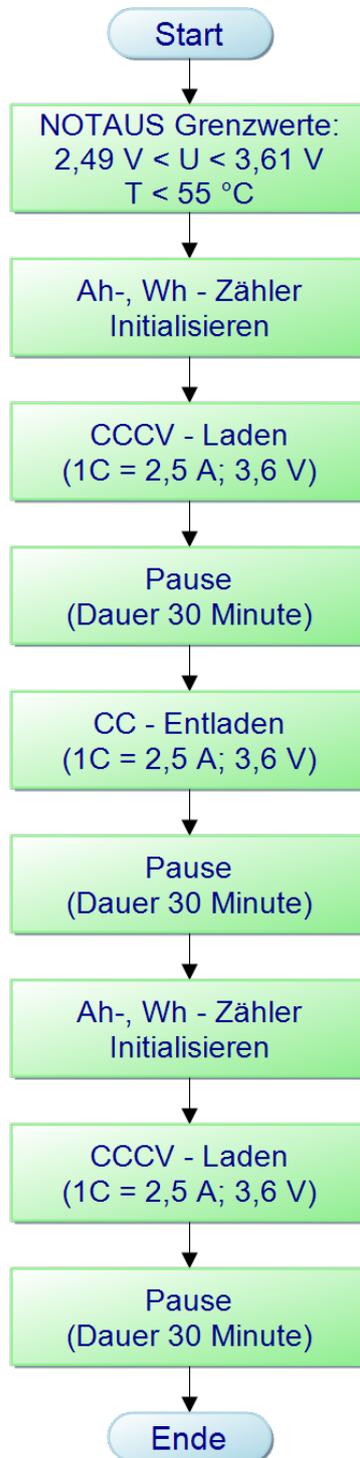
www.a123systems.com



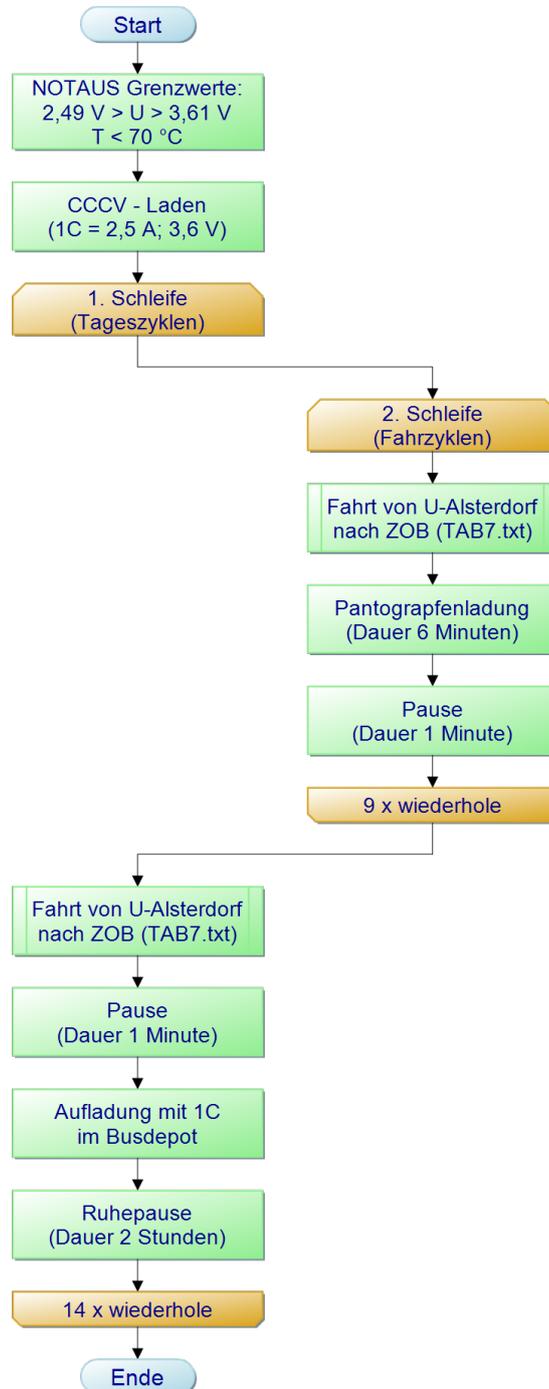
©2012 A123 Systems, Inc. All rights reserved.
MD100113-02

C. Programmablaufplan (PAP)

C.1. Programmablaufplan der Kapazitätsmessung



C.2. Programmablaufplan der Zyklisierung



D. Tabellen

D.1. Übersichtsrechnung modellierte Batterie (120kWh)

Beschreibung:	Einheiten:	Werte:
Energiegehalt modellierte Batterie	E_mod,BAT01	120 kWh
Nennkapazität modellierte Batterie	C_mod,BAT01	181,818 Ah
Verbrauch eines Umlaufs in kWh	E_verbr	18,612 kWh
Verbrauch eines Umlaufs in Ah	C_verbr	28,20 Ah
Energiegehalt der Testzelle	E_Testzelle,BAT01	8,25 Wh
Nennkapazität der Testzelle	C_Testzelle,BAT01	2,5 Ah
Pantograph Nachladegrad		8,51%
Fahrt Entladegrad (aus Fahrdaten)		15,51%

	Lade/Entlade Wert für die Testzelle [Ah]	Bilanz beim Ankommen bzw. Laden für die Testzelle [Ah]	Lade/Entlade Wert für die Testzelle [Wh]	Bilanz beim Ankommen bzw. Laden für die Testzelle [Wh]
1. Fahrt	-0,388	2,112	-1,280	6,970
1. Lade	0,213	2,325	0,702	7,673
2. Fahrt	-0,388	1,937	-1,280	6,393
2. Lade	0,213	2,150	0,702	7,095
3. Fahrt	-0,388	1,762	-1,280	5,815
3. Lade	0,213	1,975	0,702	6,518
4. Fahrt	-0,388	1,587	-1,280	5,238
4. Lade	0,213	1,800	0,702	5,940
5. Fahrt	-0,388	1,412	-1,280	4,660
5. Lade	0,213	1,625	0,702	5,363
6. Fahrt	-0,388	1,237	-1,280	4,083
6. Lade	0,213	1,450	0,702	4,785
7. Fahrt	-0,388	1,062	-1,280	3,505
7. Lade	0,213	1,275	0,702	4,208
8. Fahrt	-0,388	0,887	-1,280	2,928
8. Lade	0,213	1,100	0,702	3,630
9. Fahrt	-0,388	0,712	-1,280	2,350
9. Lade	0,213	0,925	0,702	3,053
10. Fahrt	-0,388	0,537	-1,280	1,773

	Lade/Entlade Wert für die Modellierte Batterie [Ah]	Bilanz beim Ankommen/Laden für die modellierte Batterie [Ah]	Lade/Entlade Wert für die Modellierte Batterie [kWh]	Bilanz beim Ankommen/Laden für die modellierte Batterie [kWh]
1. Fahrt	-28,200	153,618	-18,612	101,388
1. Lade	15,473	169,091	10,212	111,600
2. Fahrt	-28,200	140,891	-18,612	92,988
2. Lade	15,473	156,364	10,212	103,200
3. Fahrt	-28,200	128,164	-18,612	84,588
3. Lade	15,473	143,636	10,212	94,800
4. Fahrt	-28,200	115,436	-18,612	76,188
4. Lade	15,473	130,909	10,212	86,400
5. Fahrt	-28,200	102,709	-18,612	67,788
5. Lade	15,473	118,182	10,212	78,000
6. Fahrt	-28,200	89,982	-18,612	59,388
6. Lade	15,473	105,455	10,212	69,600
7. Fahrt	-28,200	77,255	-18,612	50,988
7. Lade	15,473	92,727	10,212	61,200
8. Fahrt	-28,200	64,527	-18,612	42,588
8. Lade	15,473	80,000	10,212	52,800
9. Fahrt	-28,200	51,800	-18,612	34,188
9. Lade	15,473	67,273	10,212	44,400
10. Fahrt	-28,200	39,073	-18,612	25,788

Restkapazität bzw. Energiegehalt der Testzelle am Ende des Tages:	0,537 Ah	21,49%
	1,773 Wh	21,49%

Restkapazität bzw. Energiegehalt Der mod. Batt. am Ende des Tages:	39,073 Ah	21,49%
	25,788 kWh	21,49%

Stromwert für Pantograph für die Testzelle:	2,128 A
Stromwert für Pantograph für die modellierte Batterie:	154,727 A

D.2. Übersichtsrechnung modellierte Batterie (60kWh)

Beschreibung:	Einheiten:	Werte:
Energiegehalt modellierte Batterie	E_mod,BAT02	60 kWh
Nennkapazität modellierte Batterie	C_mod,BAT02	90,909 Ah
Verbrauch eines Umlaufs in kWh	E_verbr	18,612 kWh
Verbrauch eines Umlaufs in Ah	C_verbr	28,20 Ah
Energiegehalt der Testzelle	E_Testzelle,BAT02	8,25 Wh
Nennkapazität der Testzelle	C_Testzelle,BAT02	2,5 Ah
Pantograph Nachladegrad		25,80%
Fahrt Entladegrad (aus Fahrdaten)		31,02%

	Lade/Entlade Wert für die Testzelle [Ah]	Bilanz beim Ankommen bzw. Laden für die Testzelle [Ah]	Lade/Entlade Wert für die Testzelle [Wh]	Bilanz beim Ankommen bzw. Laden für die Testzelle [Wh]
1. Fahrt	-0,776	1,725	-2,559	5,691
1. Lade	0,645	2,370	2,129	7,819
2. Fahrt	-0,776	1,594	-2,559	5,260
2. Lade	0,645	2,239	2,129	7,389
3. Fahrt	-0,776	1,464	-2,559	4,830
3. Lade	0,645	2,109	2,129	6,958
4. Fahrt	-0,776	1,333	-2,559	4,399
4. Lade	0,645	1,978	2,129	6,527
5. Fahrt	-0,776	1,203	-2,559	3,968
5. Lade	0,645	1,848	2,129	6,097
6. Fahrt	-0,776	1,072	-2,559	3,538
6. Lade	0,645	1,717	2,129	5,666
7. Fahrt	-0,776	0,942	-2,559	3,107
7. Lade	0,645	1,587	2,129	5,235
8. Fahrt	-0,776	0,811	-2,559	2,676
8. Lade	0,645	1,456	2,129	4,805
9. Fahrt	-0,776	0,681	-2,559	2,246
9. Lade	0,645	1,326	2,129	4,374
10. Fahrt	-0,776	0,550	-2,559	1,815

	Lade/Entlade Wert für die Modellierte Batterie [Ah]	Bilanz beim Ankommen/Laden für die modellierte Batterie [Ah]	Lade/Entlade Wert für die Modellierte Batterie [kWh]	Bilanz beim Ankommen/Laden für die modellierte Batterie [kWh]
1. Fahrt	-28,200	62,709	-18,612	41,388
1. Lade	23,455	86,164	15,480	56,868
2. Fahrt	-28,200	57,964	-18,612	38,256
2. Lade	23,455	81,418	15,480	53,736
3. Fahrt	-28,200	53,218	-18,612	35,124
3. Lade	23,455	76,673	15,480	50,604
4. Fahrt	-28,200	48,473	-18,612	31,992
4. Lade	23,455	71,927	15,480	47,472
5. Fahrt	-28,200	43,727	-18,612	28,860
5. Lade	23,455	67,182	15,480	44,340
6. Fahrt	-28,200	38,982	-18,612	25,728
6. Lade	23,455	62,436	15,480	41,208
7. Fahrt	-28,200	34,236	-18,612	22,596
7. Lade	23,455	57,691	15,480	38,076
8. Fahrt	-28,200	29,491	-18,612	19,464
8. Lade	23,455	52,945	15,480	34,944
9. Fahrt	-28,200	24,745	-18,612	16,332
9. Lade	23,455	48,200	15,480	31,812
10. Fahrt	-28,200	20,000	-18,612	13,200

Restkapazität bzw. Energiegehalt der Testzelle am Ende des Tages	0,550 Ah	22,00%
	1,815 Wh	22,00%

Restkapazität bzw. Energiegehalt Der mod. Batt. am Ende des Tages:	20,000 Ah	22,00%
	13,200 kWh	22,00%

Stromwert für Pantograph für die Testzelle:	6,450 A
Stromwert für Pantograph für die modellierte Batterie	234,545 A

D.3. Übersichtsrechnung modellierte Batterie (40kWh)

Beschreibung:	Einheiten:	Werte:
Energiegehalt modellierte Batterie	E_mod,BAT03	40 kWh
Nennkapazität modellierte Batterie	C_mod,BAT03	60,606 Ah
Verbrauch eines Umlaufs in kWh	E_verbr	18,612 kWh
Verbrauch eines Umlaufs in Ah	C_verbr	28,20 Ah
Energiegehalt der Testzelle	E_Testzelle,BAT03	8,25 Wh
Nennkapazität der Testzelle	C_Testzelle,BAT03	2,5 Ah
Pantograph Nachladegrad		43,00%
Fahrt Entladegrad (aus Fahrdaten)		46,53%

	Lade/Entlade Wert für die Testzelle [Ah]	Bilanz beim Ankommen bzw. Laden für die Testzelle [Ah]	Lade/Entlade Wert für die Testzelle [Wh]	Bilanz beim Ankommen bzw. Laden für die Testzelle [Wh]
1. Fahrt	-1,163	1,337	-3,839	4,411
1. Lade	1,075	2,412	3,548	7,959
2. Fahrt	-1,163	1,249	-3,839	4,120
2. Lade	1,075	2,324	3,548	7,668
3. Fahrt	-1,163	1,160	-3,839	3,829
3. Lade	1,075	2,235	3,548	7,376
4. Fahrt	-1,163	1,072	-3,839	3,538
4. Lade	1,075	2,147	3,548	7,085
5. Fahrt	-1,163	0,984	-3,839	3,246
5. Lade	1,075	2,059	3,548	6,794
6. Fahrt	-1,163	0,896	-3,839	2,955
6. Lade	1,075	1,971	3,548	6,503
7. Fahrt	-1,163	0,807	-3,839	2,664
7. Lade	1,075	1,882	3,548	6,211
8. Fahrt	-1,163	0,719	-3,839	2,373
8. Lade	1,075	1,794	3,548	5,920
9. Fahrt	-1,163	0,631	-3,839	2,081
9. Lade	1,075	1,706	3,548	5,629
10. Fahrt	-1,163	0,543	-3,839	1,790

	Lade/Entlade Wert für die Modellierte Batterie [Ah]	Bilanz beim Ankommen/Laden für die modellierte Batterie [Ah]	Lade/Entlade Wert für die Modellierte Batterie [kWh]	Bilanz beim Ankommen/Laden für die modellierte Batterie [kWh]
1. Fahrt	-28,200	32,406	-18,612	21,388
1. Lade	26,061	58,467	17,200	38,588
2. Fahrt	-28,200	30,267	-18,612	19,976
2. Lade	26,061	56,327	17,200	37,176
3. Fahrt	-28,200	28,127	-18,612	18,564
3. Lade	26,061	54,188	17,200	35,764
4. Fahrt	-28,200	25,988	-18,612	17,152
4. Lade	26,061	52,048	17,200	34,352
5. Fahrt	-28,200	23,848	-18,612	15,740
5. Lade	26,061	49,909	17,200	32,940
6. Fahrt	-28,200	21,709	-18,612	14,328
6. Lade	26,061	47,770	17,200	31,528
7. Fahrt	-28,200	19,570	-18,612	12,916
7. Lade	26,061	45,630	17,200	30,116
8. Fahrt	-28,200	17,430	-18,612	11,504
8. Lade	26,061	43,491	17,200	28,704
9. Fahrt	-28,200	15,291	-18,612	10,092
9. Lade	26,061	41,352	17,200	27,292
10. Fahrt	-28,200	13,152	-18,612	8,680

Restkapazität bzw. Energiegehalt der Testzelle am Ende des Tages	0,543 Ah	21,70%
	1,790 Wh	21,70%

Restkapazität bzw. Energiegehalt Der mod. Batt. am Ende des Tages:	13,152 Ah	21,70%
	8,680 kWh	21,70%

Stromwert für Pantograph für die Testzelle:	10,750 A
Stromwert für Pantograph für die modellierte Batterie	260,606 A

D.4. Übersichtsrechnung modellierte Batterie (30kWh)

Beschreibung:	Einheiten:	Werte:
Energiegehalt modellierte Batterie	E_mod,BAT04	30 kWh
Nennkapazität modellierte Batterie	C_mod,BAT04	45,455 Ah
Verbrauch eines Umlaufs in kWh	E_verbr	18,612 kWh
Verbrauch eines Umlaufs in Ah	C_verbr	28,20 Ah
Energiegehalt der Testzelle	E_Testzelle,BAT04	8,25 Wh
Nennkapazität der Testzelle	C_Testzelle,BAT04	2,5 Ah
Pantograph Nachladegrad		60,30%
Fahrt Entladegrad (aus Fahrdaten)		62,04%

	Lade/Entlade Wert für die Testzelle [Ah]	Bilanz beim Ankommen bzw. Laden für die Testzelle [Ah]	Lade/Entlade Wert für die Testzelle [Wh]	Bilanz beim Ankommen bzw. Laden für die Testzelle [Wh]
1. Fahrt	-1,551	0,949	-5,118	3,132
1. Lade	1,508	2,457	4,975	8,106
2. Fahrt	-1,551	0,906	-5,118	2,988
2. Lade	1,508	2,413	4,975	7,963
3. Fahrt	-1,551	0,862	-5,118	2,845
3. Lade	1,508	2,370	4,975	7,819
4. Fahrt	-1,551	0,819	-5,118	2,701
4. Lade	1,508	2,326	4,975	7,676
5. Fahrt	-1,551	0,775	-5,118	2,558
5. Lade	1,508	2,283	4,975	7,532
6. Fahrt	-1,551	0,732	-5,118	2,414
6. Lade	1,508	2,239	4,975	7,389
7. Fahrt	-1,551	0,688	-5,118	2,270
7. Lade	1,508	2,196	4,975	7,245
8. Fahrt	-1,551	0,645	-5,118	2,127
8. Lade	1,508	2,152	4,975	7,102
9. Fahrt	-1,551	0,601	-5,118	1,983
9. Lade	1,508	2,109	4,975	6,958
10. Fahrt	-1,551	0,558	-5,118	1,840

	Lade/Entlade Wert für die Modellierte Batterie [Ah]	Bilanz beim Ankommen/Laden für die modellierte Batterie [Ah]	Lade/Entlade Wert für die Modellierte Batterie [kWh]	Bilanz beim Ankommen/Laden für die modellierte Batterie [kWh]
1. Fahrt	-28,200	17,255	-18,612	11,388
1. Lade	27,409	44,664	18,090	29,478
2. Fahrt	-28,200	16,464	-18,612	10,866
2. Lade	27,409	43,873	18,090	28,956
3. Fahrt	-28,200	15,673	-18,612	10,344
3. Lade	27,409	43,082	18,090	28,434
4. Fahrt	-28,200	14,882	-18,612	9,822
4. Lade	27,409	42,291	18,090	27,912
5. Fahrt	-28,200	14,091	-18,612	9,300
5. Lade	27,409	41,500	18,090	27,390
6. Fahrt	-28,200	13,300	-18,612	8,778
6. Lade	27,409	40,709	18,090	26,868
7. Fahrt	-28,200	12,509	-18,612	8,256
7. Lade	27,409	39,918	18,090	26,346
8. Fahrt	-28,200	11,718	-18,612	7,734
8. Lade	27,409	39,127	18,090	25,824
9. Fahrt	-28,200	10,927	-18,612	7,212
9. Lade	27,409	38,336	18,090	25,302
10. Fahrt	-28,200	10,136	-18,612	6,690

Restkapazität bzw. Energiegehalt der Testzelle am Ende des Tages	0,558 Ah	22,30%
	1,840 Wh	22,30%

Restkapazität bzw. Energiegehalt Der mod. Batt. am Ende des Tages:	10,136 Ah	22,30%
	6,690 kWh	22,30%

Stromwert für Pantograph für die Testzelle:	15,075 A
Stromwert für Pantograph für die modellierte Batterie	274,091 A

D.5. Vollständige Messergebnisse der Kapazitätsmessung

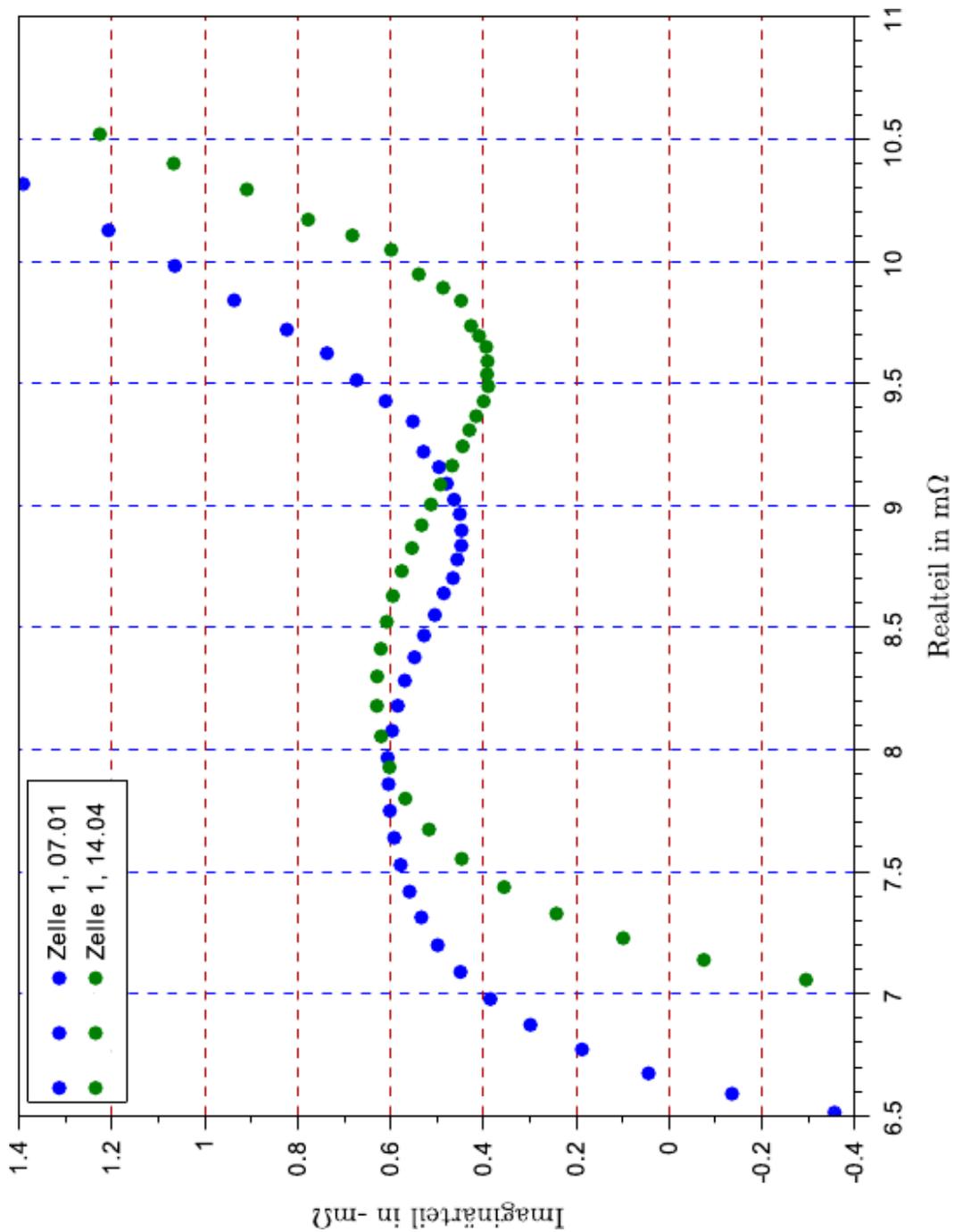
Fahrten	Zellen	Kapazität [Ah]	Kapazitätsverlust wöchentlich [Ah]	Kapazitätsverlust Gesamt [Ah]	Kapazitätsverlust wöchentlich [%]	Kapazitätsverlust Gesamt [%]
	BAT01	2,409	0,000	0,000	0,00%	0,00%
	BAT02	2,400	0,000	0,000	0,00%	0,00%
	BAT03	2,406	0,000	0,000	0,00%	0,00%
	BAT04	2,393	0,000	0,000	0,00%	0,00%
240	BAT01	2,405	-0,004	-0,004	-0,17%	-0,17%
	BAT02	2,399	-0,001	-0,001	-0,04%	-0,04%
	BAT03	2,394	-0,012	-0,012	-0,50%	-0,50%
	BAT04	2,371	-0,022	-0,022	-0,92%	-0,92%
360	BAT01	2,385	-0,020	-0,024	-0,83%	-1,00%
	BAT02	2,379	-0,020	-0,021	-0,83%	-0,87%
	BAT03	2,369	-0,025	-0,037	-1,04%	-1,54%
	BAT04	2,340	-0,031	-0,053	-1,31%	-2,21%
500	BAT01	2,371	-0,014	-0,038	-0,59%	-1,58%
	BAT02	2,368	-0,011	-0,032	-0,46%	-1,33%
	BAT03	2,351	-0,018	-0,055	-0,76%	-2,29%
	BAT04	2,315	-0,025	-0,078	-1,07%	-3,26%
640	BAT01	2,357	-0,014	-0,052	-0,59%	-2,16%
	BAT02	2,353	-0,015	-0,047	-0,63%	-1,96%
	BAT03	2,331	-0,020	-0,075	-0,85%	-3,12%
	BAT04	2,290	-0,025	-0,103	-1,08%	-4,30%
780	BAT01	2,344	-0,013	-0,065	-0,55%	-2,70%
	BAT02	2,340	-0,013	-0,060	-0,55%	-2,50%
	BAT03	2,313	-0,018	-0,093	-0,77%	-3,87%
	BAT04	2,267	-0,023	-0,126	-1,00%	-5,27%
920	BAT01	2,332	-0,012	-0,077	-0,51%	-3,20%
	BAT02	2,325	-0,015	-0,075	-0,64%	-3,12%
	BAT03	2,294	-0,019	-0,112	-0,82%	-4,66%
	BAT04	2,244	-0,023	-0,149	-1,01%	-6,23%
1060	BAT01	2,317	-0,015	-0,092	-0,64%	-3,82%
	BAT02	2,313	-0,012	-0,087	-0,52%	-3,62%
	BAT03	2,277	-0,017	-0,129	-0,74%	-5,36%
	BAT04	2,222	-0,022	-0,171	-0,98%	-7,15%

Vollständige Messergebnisse der Kapazitätsmessung, Fortführung

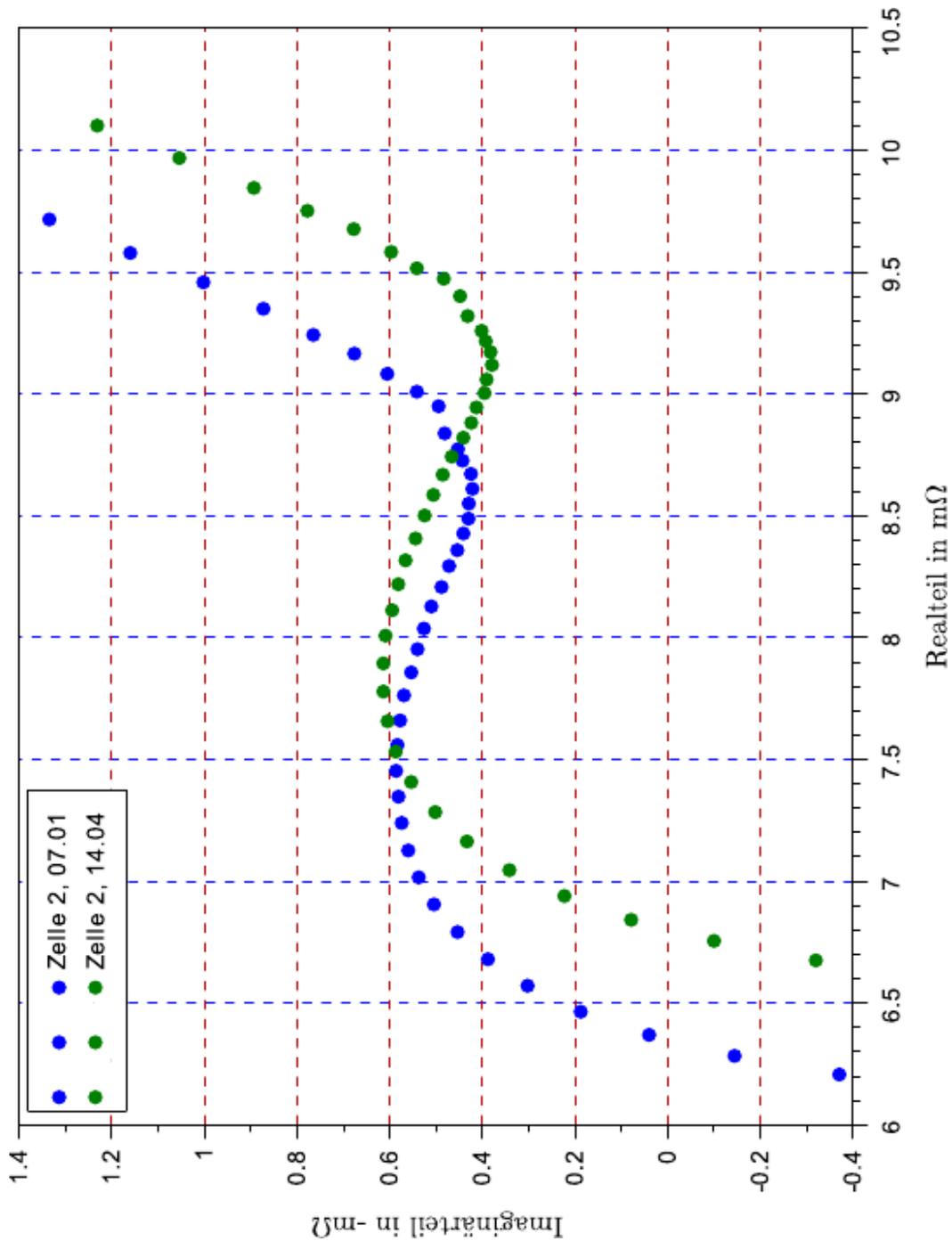
Fahrten	Zellen	Kapazität [Ah]	Kapazitätsverlust wöchentlich [Ah]	Kapazitätsverlust Gesamt [Ah]	Kapazitätsverlust wöchentlich [%]	Kapazitätsverlust Gesamt [%]
1200	BAT01	2,305	-0,012	-0,104	-0,52%	-4,32%
	BAT02	2,300	-0,013	-0,100	-0,56%	-4,17%
	BAT03	2,259	-0,018	-0,147	-0,79%	-6,11%
	BAT04	2,197	-0,025	-0,196	-1,13%	-8,19%
1340	BAT01	2,294	-0,011	-0,115	-0,48%	-4,77%
	BAT02	2,291	-0,009	-0,109	-0,39%	-4,54%
	BAT03	2,243	-0,016	-0,163	-0,71%	-6,77%
	BAT04	2,176	-0,021	-0,217	-0,96%	-9,07%
1480	BAT01	2,281	-0,013	-0,128	-0,57%	-5,31%
	BAT02	2,276	-0,015	-0,124	-0,65%	-5,17%
	BAT03	2,225	-0,018	-0,181	-0,80%	-7,52%
	BAT04	2,151	-0,025	-0,242	-1,15%	-10,11%
1620	BAT01	2,271	-0,010	-0,138	-0,44%	-5,73%
	BAT02	2,269	-0,007	-0,131	-0,31%	-5,46%
	BAT03	2,212	-0,013	-0,194	-0,58%	-8,06%
	BAT04	2,129	-0,022	-0,264	-1,02%	-11,03%
1760	BAT01	2,260	-0,011	-0,149	-0,48%	-6,19%
	BAT02	2,257	-0,012	-0,143	-0,53%	-5,96%
	BAT03	2,197	-0,015	-0,209	-0,68%	-8,69%
	BAT04	2,103	-0,026	-0,290	-1,22%	-12,12%
1900	BAT01	2,248	-0,012	-0,161	-0,53%	-6,68%
	BAT02	2,247	-0,010	-0,153	-0,44%	-6,38%
	BAT03	2,182	-0,015	-0,224	-0,68%	-9,31%
	BAT04	2,078	-0,025	-0,315	-1,19%	-13,16%
2040	BAT01	2,236	-0,012	-0,173	-0,53%	-7,18%
	BAT02	2,239	-0,008	-0,161	-0,36%	-6,71%
	BAT03	2,166	-0,016	-0,240	-0,73%	-9,98%
	BAT04	2,049	-0,029	-0,344	-1,40%	-14,38%

E. Elektrochemische Impedanzspektroskopie

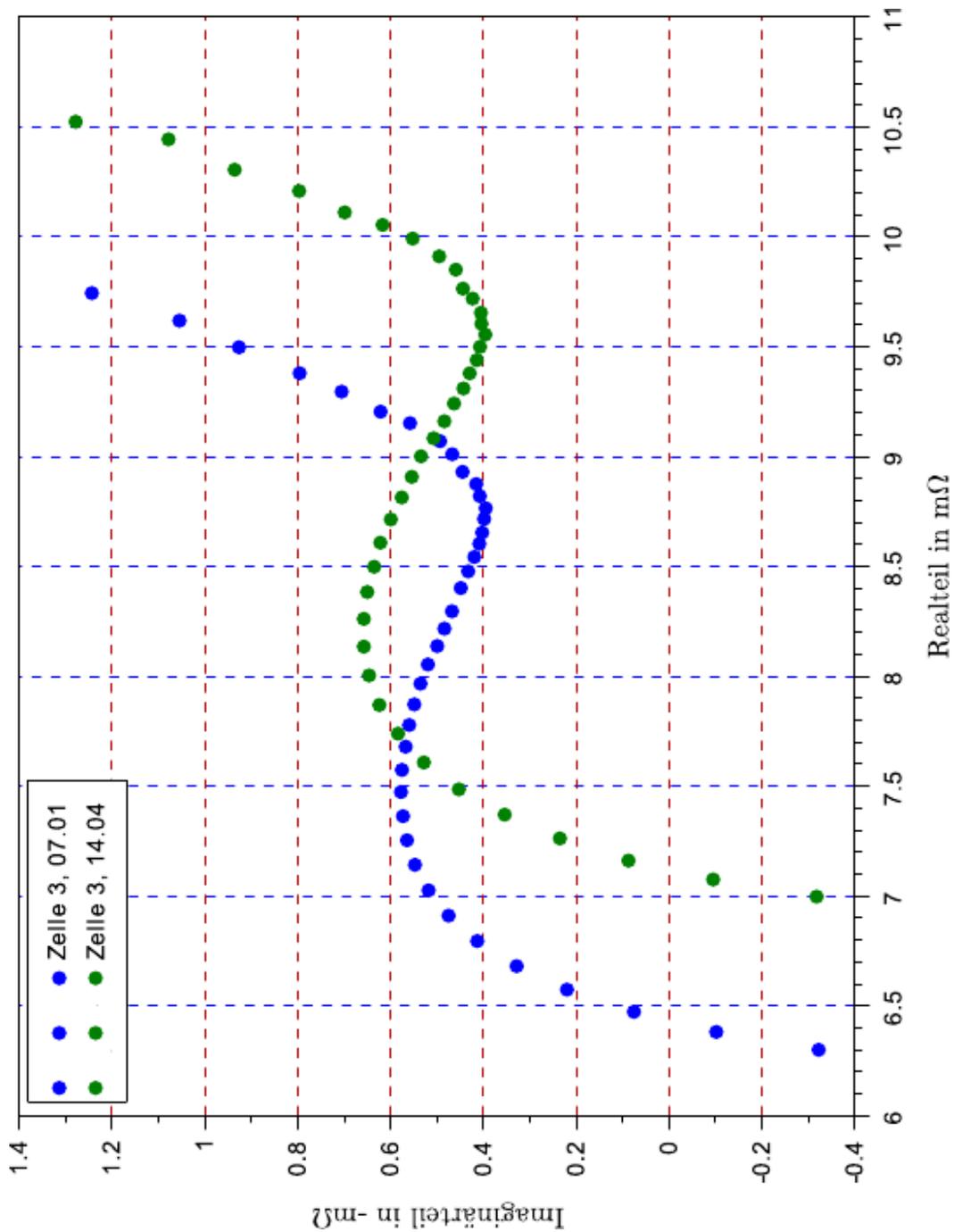
E.1. Testzelle BAT01 vor und nach den mehrwöchigen Belastungen



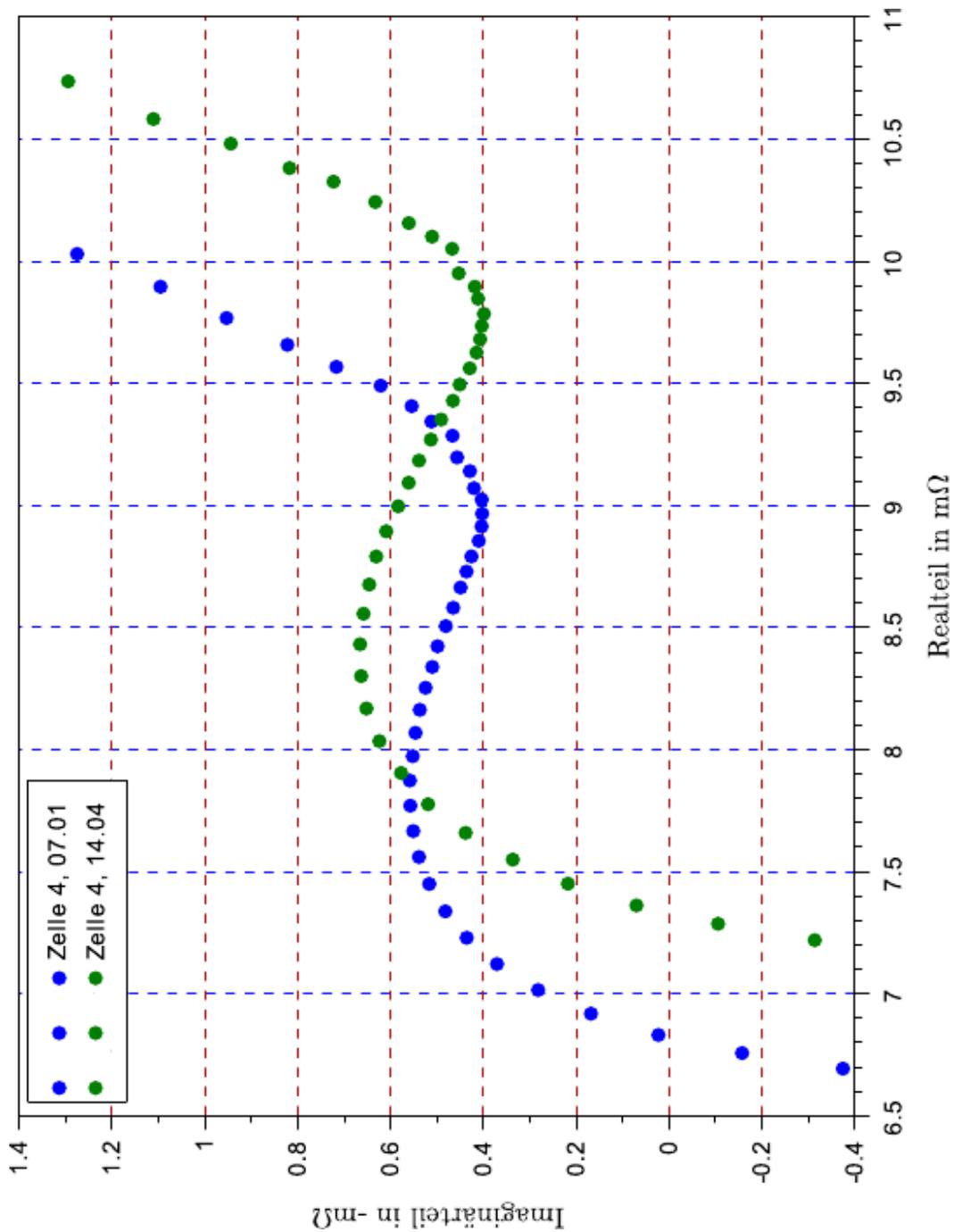
E.2. Testzelle BAT02 vor und nach den mehrwöchigen Belastungen



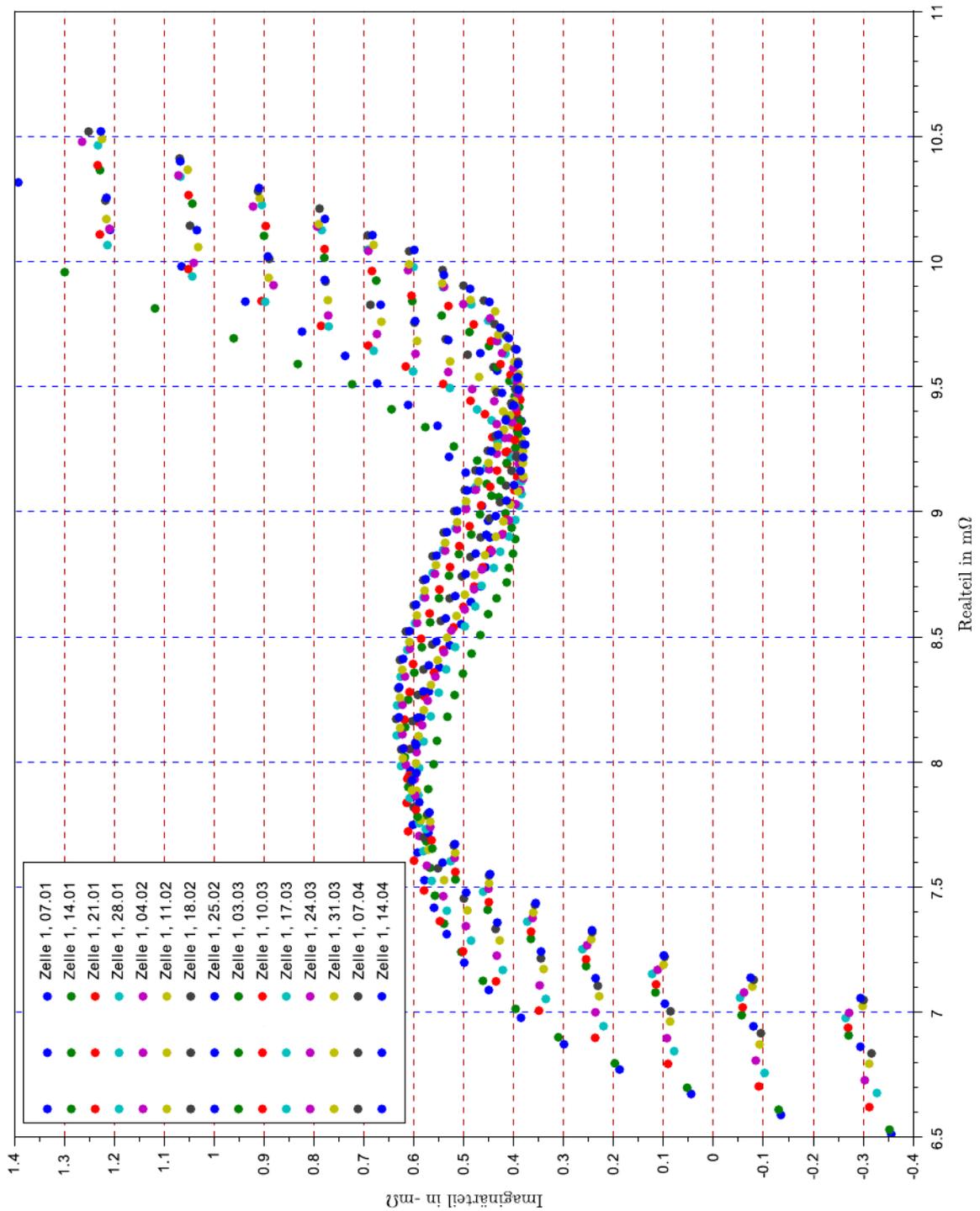
E.3. Testzelle BAT03 vor und nach den mehrwöchigen Belastungen



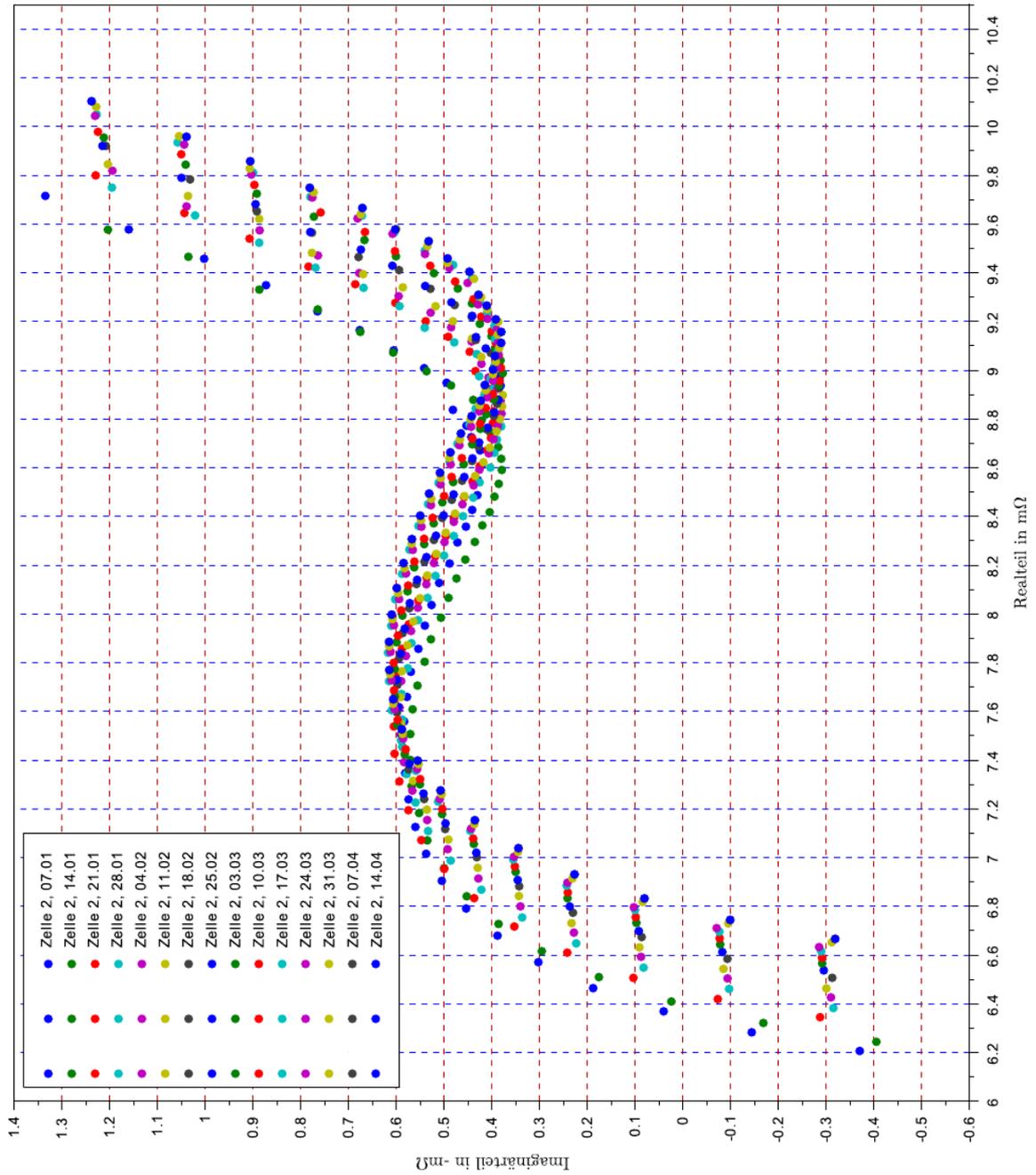
E.4. Testzelle BAT04 vor und nach den mehrwöchigen Belastungen



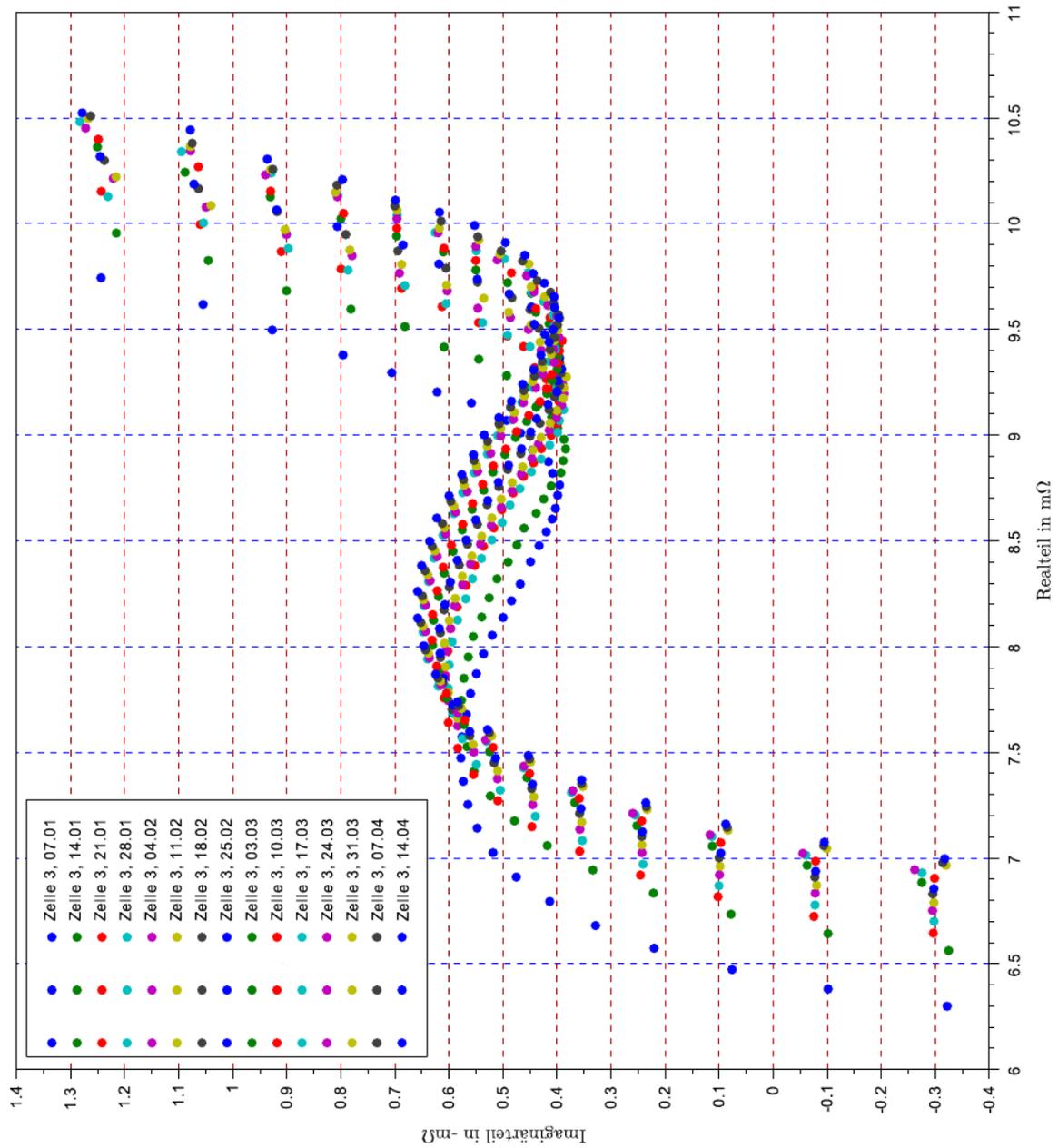
E.5. Testzelle BAT01, vollständige Messergebnisse



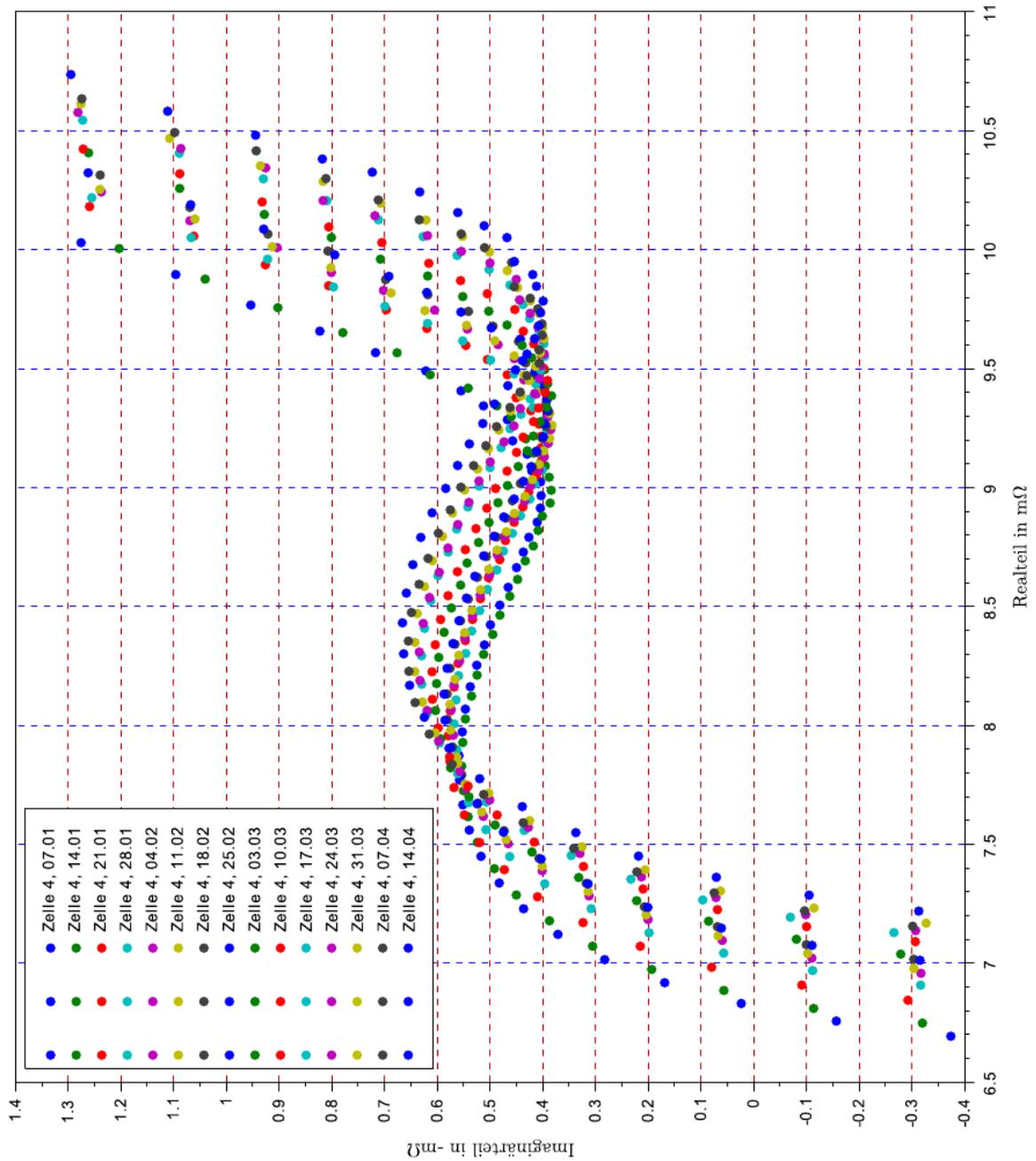
E.6. Testzelle BAT02, vollständige Messergebnisse



E.7. Testzelle BAT03, vollständige Messergebnisse

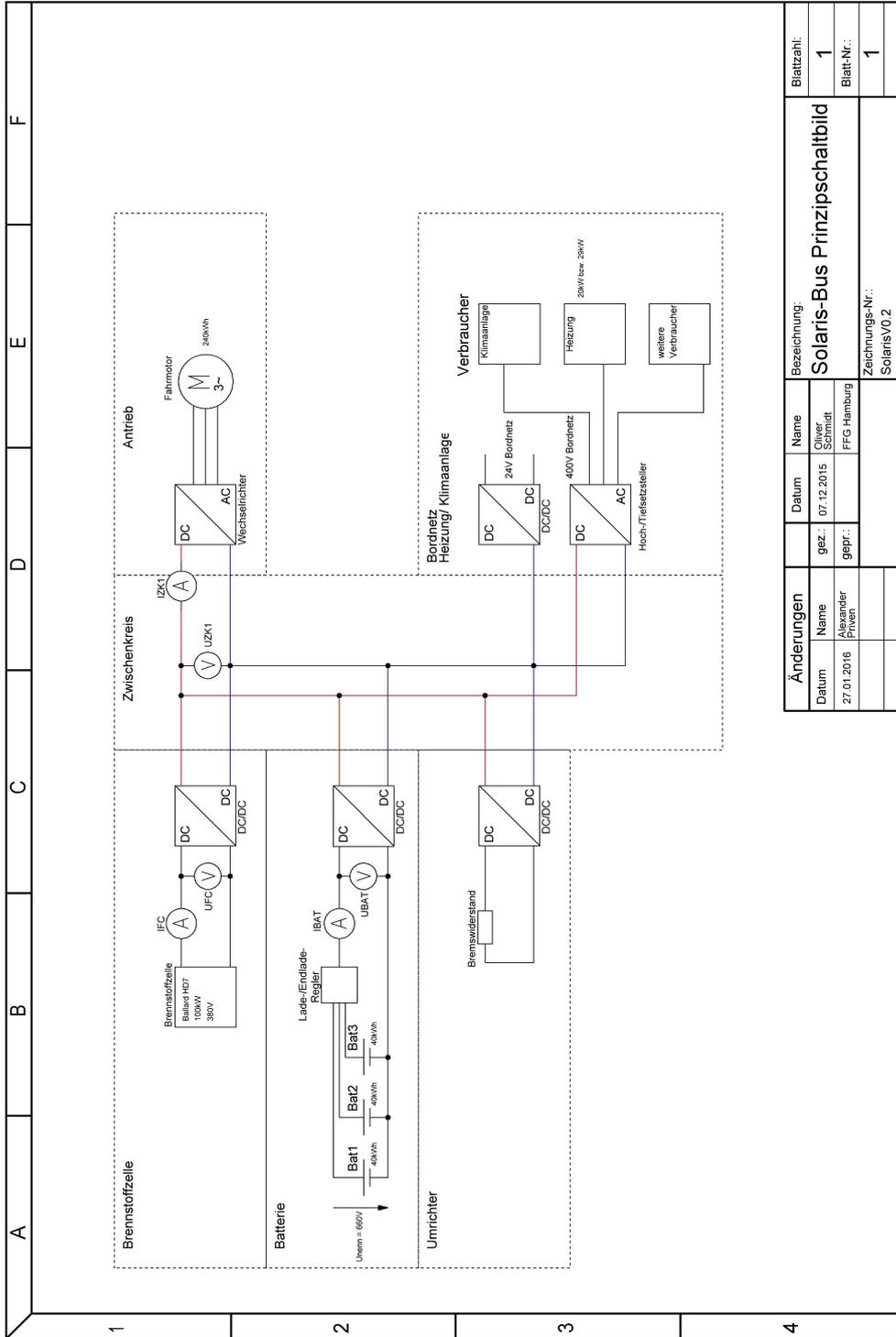


E.8. Testzelle BAT04, vollständige Messergebnisse



F. Schaltbilder

F.1. Prinzip-Schaltbild Solaris Urbino 18,75



Änderungen		Name	Datum	Bezeichnung:	Blattzahl:
Datum	Name	gez.:	07.12.2015	Solaris-Bus Prinzipschaltbild	1
27.01.2016	Alexander Pflüger	gepr.:	FFG Hamburg		
				Zeichnungs-Nr.:	1
				SolarisV0.2	

G. Matlab-Quellcode

G.1. Busdaten_V_a_I_U_ueberZeit_Diagramm.m

MATLAB-Skript G.1: Matlab-Quellcode Busdatenauswertung

```
1 %%% Geschwindigkeit ,Batteriespannung ,Batteriestrom aus SOLARIS Daten einlesen
2 % dafür wird 'ersteMessung.txt' benötigt.
3 % C:\Users\Alex\Desktop\Testfahrt_SOLARIS\Unbearbeitet\Busdaten\HAW_Messfahrt
4
5 [FileName,PathName] = uigetfile('*.txt'); %GUI um Datei auszuwählen
6 fileAndPath=[PathName FileName]; %Zusammensetzen von Pfad und Filename
7 BusDaten_all=dlmread(fileAndPath, '|'); % Alle Zeilen/Spalten einlesen mit Trennung '|'
8
9 BusSpeed = BusDaten_all(:,304); % Spalte 304 = Geschwindigkeit in km/h
10 BusBeschleunigung = diff(BusSpeed)*12*1000/3600; % Berechnung der Beschleunigung aus der Geschwindigkeit *12 Werte pro Sek 1000/3600
    Umrechnung von km/h in m/s
11 BusBeschleunigung(end+1)=0; % Plus ein Eintrag für Beschleunigung für den Plot
12 Zeiten = BusDaten_all(:,307); % Spalte 307 = Zeiten in String-Format
13 BAT_U = BusDaten_all(:,219); % Spalte 219 = BatterieSpannung [V]
14 BAT_I = BusDaten_all(:,218); % Spalte 219 = BatterieStrom [A]
15 PBATIST = BusDaten_all(:,249);
16 PFCIST = BusDaten_all(:,254);
17
18 ZeitStempel = datetime(Zeiten, 'ConvertFrom', 'datenum'); % Konvertieren ('ConvertFrom') von datenum zu datetime
19 ZeitStempel = ZeitStempel-seconds(90); %% Zeitsynchronisierung mit GPSLogger -1min30sek
20
21 %%% Iges ausrechnen
22 Iges = (PBATIST + PFCIST) ./BAT_U*1000;
23 figure(12)
24 plot(ZeitStempel, Iges*-1)
25 title('Iges-Diagramm, Busdaten')
26 xlabel('Uhrzeit HH:MM:SS')
27 ylabel('Iges in A')
28 grid on
29
30 %%% Diagramm plotten (1.Geschwindigkeit, 2.Beschleunigung,3 Batteriestrom, 4.Batterie Spannung)
31 figure(4)
32 subPlot(1)=subplot(4,1,1); % Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm
33 plot(ZeitStempel, BusSpeed)
34 title('Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm, Busdaten')
35 xlabel('Uhrzeit HH:MM')
36 ylabel('V(t) in km/h')
37 grid on
38
39 subPlot(2)=subplot(4,1,2); % Beschleunigungs-Zeit-Diagramm
40 plot(ZeitStempel, BusBeschleunigung)
41 title('Beschleunigungs - Zeit - Diagramm, Busdaten')
42 xlabel('Uhrzeit HH:MM')
43 ylabel('a in m/s^2')
44 grid on
45
46 % title('Beschleunigungs - Zeit - Diagramm, Busdaten')
47
48 subPlot(3)=subplot(4,1,3); % Batteriestrom-Zeit-Diagramm
49 plot(ZeitStempel, Iges)
50 title('Gesamtstrom - Zeit - Diagramm, Busdaten')
51 xlabel('Uhrzeit HH:MM')
52 ylabel('I(t) in A')
53 grid on;
54
55 subPlot(4)=subplot(4,1,4); % Batteriespannung-Zeit-Diagramm
56 plot(ZeitStempel, BAT_U)
57 title('Batteriespannung - Zeit - Diagramm, Busdaten')
58 xlabel('Uhrzeit HH:MM')
```

```

60     ylabel('U(t) in V')
61     grid on;
62
63
64
65     linkaxes(subPlot, 'x'); % um gleichzeitig alle 4 Plots zu vergrößern (X-Achse)
66
67
68     %% Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm plotten
69     %figure(1)
70     %hold on
71     % plot(ZeitStempel,BusSpeed)
72     % title('Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm Busdaten')
73     % xlabel('Uhrzeit HH:MM:SS')
74     % ylabel('V in km/h')
75
76     %ZeitStempel-hours(1)
77     %% Batterie Strom und Spannung über Zeit zusammen plotten
78     %figure(3)
79     %[hAx, hLine1, hLine2] = plotyy(ZeitStempel, BAT_I, ZeitStempel, BAT_U);
80     % title('I(t) und U(t) - Diagramm, Busdaten');
81     % xlabel('Uhrzeit HH:MM:SS');
82     % ylabel(hAx(1), 'Strom in A');
83     % ylabel(hAx(2), 'Spannung in V');
84     % grid on;

```

G.2. GPS_Logger.m

MATLAB-Skript G.2: Matlab-Quellcode Datenloggerdatenauswertung von Breitengrad und Längengrad

```

1  %% Einlesen
2
3  [file ,path]=uigetfile('*.mat');% Zum importieren der Messdaten Pfad angeben
4  liste = dir([path '*.mat']);
5
6  for i = 1:length(liste)
7      load([path, liste(i).name]);
8  end
9
10 % Zeiten , bzw Breitengrad und Längengrad bearbeiten
11
12 LAT1 = lat1/1e7;
13 LON1 = lon1/1e7;
14
15 LAT2 = lat2/1e7;
16 LON2 = lon2/1e7;
17
18
19 %% Koordinaten (Breitengrad und Längengrad)
20 % für " http://www.darrinward.com/lat-long/ " bearbeiten.
21 fileID = fopen('Koordinaten1.txt','w');
22 for i=1:length(LAT1)
23     fprintf(fileID, '%f,%f\n',LAT1(i),LON1(i));
24 end
25 fclose(fileID);
26
27
28 %% Koordinaten (Breitengrad und Längengrad)
29 % für " http://www.darrinward.com/lat-long/ " bearbeiten.
30 fileID = fopen('Koordinaten2.txt','w');
31 for i=1:length(LAT1)
32     fprintf(fileID, '%f,%f\n',LAT2(i),LON2(i));
33 end
34 fclose(fileID);

```

G.3. Bus_VS_GPS.m

MATLAB-Skript G.3: Matlab-Quellcode Vergleich zwischen Datenlogger und Busdaten

```

1 %% BUSDATEN mit GPSDATEN Vergleichen
2
3 % Busdaten Einlesen:
4 [FileName,PathName] = uigetfile('*.txt'); %GUI um Datei auszuwählen
5 fileAndPath=[PathName FileName]; %Zusammensetzen von Pfad und Filename
6 BusDaten_all=dlmread(fileAndPath, '|'); % Alle Zeilen/Spalten einlesen mit Trennung '|'
7
8 BusSpeed = BusDaten_all(:,304); % Spalte 304 = Geschwindigkeit in km/h
9 BusBeschleunigung = diff(BusSpeed)*12*1000/3600; % Berechnung der Beschleunigung aus der Geschwindigkeit *12 Werte pro Sek 1000/3600
10 % Umrechnung von km/h in m/s
11 BusBeschleunigung(end+1)=0; % Plus ein Eintrag für Beschleunigung für den Plot
12 Zeiten = BusDaten_all(:,307); % Spalte 307 = Zeiten in String-Format
13
14 % Buszeiten bearbeiten
15 ZeitStempel_BUS = datetime(Zeiten, 'ConvertFrom', 'datenum'); % Konvertieren ('ConvertFrom') von datenum zu datetime
16 ZeitStempel_BUS = ZeitStempel_BUS + years(1900)-hours(18); % Datum aktualisieren/ korrigieren
17
18 %% GPS Daten Einlesen:
19 % dafür wird '*.mat' benötigt.
20 %C:\Users\Alex\Desktop\Testfahrt_SOLARIS\Unbearbeitet\GPS_Logger\Messfahrt_02\1
21 [file ,path]=uigetfile('*.mat');% Zum importieren der Messdaten Pfad angeben
22 liste = dir([path '*.mat']);
23
24 for i = 1:length(liste)
25     load([path, liste(i).name]);
26 end
27
28
29 ZeitStempel_GPS = datetime; % 'datetime' Variable LÖSCHEN, da diese Name
30 clear('datetime') % exsetriert als Funktion in Matlab exsetriert.
31 temp = ZeitStempel_GPS(:,2)'; % Anfangszeit wird hier zwischengespeichert
32 time2(1)=[]; % time2 und speed1 werden auf gleicher Anzahl der Elementen gebracht
33 speed2(1) = []; % speed2 ist hat weniger Ausreißer
34 %speed1(1) = [];
35 ZeitStempel_GPS = (datetime(year(1), temp(1), temp(2), temp(3), temp(4), ...
36     temp(5))+seconds(time2/1000)); % Vektor für die Zeit-Achse mit äquidistanten Stellen ( aus time2 )
37
38 ZeitStempel_GPS = ZeitStempel_GPS + hours(1) + seconds(95); % Zeitsynchronisation zwischen Bus und GPS Daten
39
40
41 %%
42
43 figure(1)
44 plot(ZeitStempel_GPS, (speed2*0.0036)) % GPS-Daten-Plot.
45 hold on
46 plot(ZeitStempel_BUS, BusSpeed) % BUS - Daten-Plot
47 grid on
48 title('Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm')
49 xlabel('Uhrzeit HH:MM:SS')
50 ylabel('V(t) in km/h')
51 legend('GPS-Logger-Daten', 'FFG-Daten')
52 hold off
53
54 %% Plott mit Glättung
55 yi = smooth((speed2*0.0036),80,'moving'); % 100 mittelwert über 100 werten
56 figure(80)
57 plot(ZeitStempel_GPS, yi)
58 hold on
59 plot(ZeitStempel_BUS, BusSpeed) % BUS - Daten-Plot
60 grid on
61 title('Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm')
62 xlabel('Uhrzeit HH:MM:SS')
63 ylabel('V(t) in km/h')
64 legend('GPS-Logger-Daten', 'FFG-Daten')
65
66 hold off

```

G.4. Vorbereitung_Digatron_V03.m

MATLAB-Skript G.4: Matlab-Quellcode Vorbereitung_Digatron_V03.m

```

1 % FÜR DIGATRON TABELLE!
2 [FileName,PathName] = uigetfile('*.txt'); %GUI um Datei auszuwählen
3 fileAndPath=[PathName FileName]; %Zusammensetzen von Pfad und Filename
4 BusDaten_all=dlmread(fileAndPath, '|'); % Alle Zeilen/Spalten einlesen mit Trennung '|'
5 %%
6 Zeiten = BusDaten_all(:,307); % Spalte 307 = Zeiten in String-Format
7 BAT_I = (BusDaten_all(:,218)); % Spalte 219 = BatterieStrom [A];
8 BusSpeed = BusDaten_all(:,304); % Spalte 304 = Geschwindigkeit in km/h
9 BAT_U = BusDaten_all(:,219);
10 ZeitStempel = datetime(Zeiten, 'ConvertFrom', 'datenum'); % Konvertieren ('ConvertFrom') von datenum zu datetime
11
12 IZK1 = BusDaten_all(:,238);
13 IZKHTS2 = BusDaten_all(:,240);
14 IFC = BusDaten_all(:,232);
15 UFC = BusDaten_all(:,276);
16
17 PBATIST = BusDaten_all(:,249);
18 PFCIST = BusDaten_all(:,254);
19 %% Iges ausrechnen
20 Iges = (PBATIST + PFCIST) ./BAT_U*1000;
21 figure(12)
22 plot(ZeitStempel, Iges*-1)
23 title('Iges-Diagramm, Busdaten')
24 xlabel('Uhrzeit HH:MM:SS')
25 ylabel('Iges in A')
26 grid on
27
28 downsample_Iges = resample(Iges, 10, 14); % aus 14
29 downsample_Iges = downsample_Iges *(-1); % *(-1) wegen Stromrichtung, Digatron und Daten müssen identisch sein
30
31 zeit01 = 1:1:(length(downsample_Iges));
32 zeit01 = zeit01.* 0.1;
33
34 %% in Stromwerte C umrechnen
35 E = 120000; % Nennleistung Solarisbatterie 120 in kWh
36 U = 660; % Nennspannung Solarisbatterie 660 in V
37 Cnen = E/U; % Nennkapazität in Ah
38
39 for i=1:length(downsample_Iges)
40 C_normiert(i) = downsample_Iges(i) / Cnen; % [1/h] = [A]/[Ah]
41 end
42
43 figure(13) % C normiert
44 plot(zeit01, C_normiert)
45 title('C-Rate-Diagramm')
46 xlabel('Zeit in sek')
47 ylabel('C-Rate')
48 grid on
49 xlim([zeit01(01) zeit01(end)])
50
51 C_Integral = cumtrapz(C_normiert)/36000; % Integrieren um benötigte Ladung rauszubekommen
52
53 figure(14)
54 plot(zeit01, C_Integral*100)
55 title('C-Rate-Integriert')
56 xlabel('Zeit in sek')
57 ylabel('Batteriekapazität in Prozent')
58 %ylabel('Ladung Q in Ah')
59 grid on
60 xlim([zeit01(01) zeit01(end)])
61
62 Q_1Fahrt= C_Integral(end); % *100% = Ah für 1 Fahrt
63
64
65
66 %% Nennkapazität von A123 ANR26650M1B = 2,5Ah
67 C_A123 = C_normiert.*2.5;
68
69 figure(15)
70 plot(zeit01, C_A123)
71 title('Strom für A123, Digatron')
72 xlabel('Zeit in sek')
73 ylabel('Strom in A')
74 grid on
75 xlim([zeit01(01) zeit01(end)])
76
77 %% Nennkapazität von A123 ANR26650M1B = 2,5Ah
78 C_A123_BAT01 = C_normiert.*(2.5*1);
79 C_A123_BAT02 = C_normiert.*(2.5*2);

```

```

80 C_A123_BAT03 = C_normiert.*(2.5*3);
81 C_A123_BAT04 = C_normiert.*(2.5*4);
82
83 figure(16)
84 plot(zeit01 ,C_A123_BAT01)
85     title('Strom für A123 bzw. BAT01, Digatron')
86     xlabel('Zeit in sek')
87     ylabel('Strom in A')
88     grid on
89     xlim([zeit01(01) zeit01(end)])
90
91
92 figure(16)
93 subplot(1)=subplot(4,1,1); % Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm
94 plot(zeit01 , C_A123_BAT01)
95     title('Strom für A123 bzw. BAT01 (Modell für 120kWh Antriebsbatterie) für Digatron')
96     xlabel('Zeit in sek')
97     ylabel('Strom in A')
98     grid on
99     ylim([-18 11])
100 subplot(2)=subplot(4,1,2); % Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm
101 plot(zeit01 , C_A123_BAT02)
102     title('Strom für A123 bzw. BAT02 (Modell für 60kWh Antriebsbatterie) für Digatron')
103     xlabel('Zeit in sek')
104     ylabel('Strom in A')
105     grid on
106     ylim([-18 11])
107 subplot(3)=subplot(4,1,3); % Beschleunigungs-Zeit-Diagramm
108 plot(zeit01 , C_A123_BAT03)
109     title('Strom für A123 bzw. BAT03 (Modell für 40kWh Antriebsbatterie) für Digatron')
110     xlabel('Zeit in sek')
111     ylabel('Strom in A')
112     grid on
113     ylim([-18 11])
114 subplot(4)=subplot(4,1,4); % Beschleunigungs-Zeit-Diagramm
115 plot(zeit01 , C_A123_BAT04)
116     title('Strom für A123 bzw. BAT04 (Modell für 30kWh Antriebsbatterie) für Digatron')
117     xlabel('Zeit in sek')
118     ylabel('Strom in A')
119     grid on
120     ylim([-18 11])
121 linkaxes(subPlot, 'x'); % um gleichzeitig alle 4 Plots zu vergrößern (X-Achse)
122 xlim([zeit01(01) zeit01(end)])
123
124
125 %% TXT FÜR DIGATRON
126 % X:Y:Z:U;
127 % X = Schrittdauer in sec, min oder h
128 % Y = Strom in A
129 % Z = Leistung in W
130 % U = Spannung in V
131
132 fileID = fopen('TAB7.txt','w');
133
134 for i=1:length(C_A123)
135     if C_A123(i) <= 0
136         fprintf(fileID, '0.1sec;%0.3f;;2.5;\r\n',C_A123(i));
137     else
138         fprintf(fileID, '0.1sec;%0.3f;;3.6;\r\n',C_A123(i));
139     end
140 end
141
142 fclose(fileID);

```

G.5. Auswertung_Kapazitaetsverlust.m

MATLAB-Skript G.5: Matlab-Quellcode Auswertung_Kapazitaetsverlust.m

```

1 %% Kapazitätsverlust [Ah]
2
3 Fahrten = [140 240 360 500 640 780 920 1060 1200 1340 1480 1620 1760 1900 2040];
4 BAT01 = [2.409 2.405 2.385 2.371 2.357 2.344 2.332 2.317 2.305 2.294 2.281 2.271 2.26 2.248 2.239];
5 BAT02 = [2.4 2.399 2.379 2.368 2.353 2.34 2.325 2.313 2.3 2.291 2.276 2.269 2.257 2.247 2.239];
6 BAT03 = [2.406 2.394 2.369 2.351 2.331 2.313 2.294 2.277 2.259 2.243 2.225 2.212 2.197 2.182 2.166];
7 BAT04 = [2.393 2.371 2.34 2.315 2.29 2.267 2.244 2.222 2.197 2.176 2.151 2.129 2.103 2.078 2.049];
8
9
10 figure(1)
11 plot(Fahrten, BAT01, 'g-*', 'LineWidth', 1)
12 hold on
13 plot(Fahrten, BAT02, 'b-*', 'LineWidth', 1)
14 plot(Fahrten, BAT03, 'k-*', 'LineWidth', 1)
15 plot(Fahrten, BAT04, 'r-*', 'LineWidth', 1)
16 title('Verbleibende Kapazität der Testzellen', 'FontSize', 16)
17 xlabel('Anzahl der Fahrten', 'FontSize', 16)
18 ylabel('Kapazität der Testzelle in Ah', 'FontSize', 16)
19 grid on
20 hold off
21 legend('Testzelle 1 (120kWh)', 'Testzelle 2 (60kWh)', 'Testzelle 3 (40kWh)', 'Testzelle 4 (30kWh)')
22 %% Regression
23 [r1, m1, b1] = regression(Fahrten, BAT01);
24 Reg_BAT01=m1*Fahrten+b1;
25
26 [r2, m2, b2] = regression(Fahrten, BAT02);
27 Reg_BAT02=m2*Fahrten+b2;
28
29 [r3, m3, b3] = regression(Fahrten, BAT03);
30 Reg_BAT03=m3*Fahrten+b3;
31
32 [r4, m4, b4] = regression(Fahrten, BAT04);
33 Reg_BAT04=m4*Fahrten+b4;
34
35 figure(11)
36 plot(Fahrten, Reg_BAT01, 'g', 'LineWidth', 1)
37 hold on
38 plot(Fahrten, Reg_BAT02, 'b', 'LineWidth', 1)
39 plot(Fahrten, Reg_BAT03, 'k', 'LineWidth', 1)
40 plot(Fahrten, Reg_BAT04, 'r', 'LineWidth', 1)
41
42 plot(Fahrten, BAT01, 'g*', 'LineWidth', 1)
43 plot(Fahrten, BAT02, 'b*', 'LineWidth', 1)
44 plot(Fahrten, BAT03, 'k*', 'LineWidth', 1)
45 plot(Fahrten, BAT04, 'r*', 'LineWidth', 1)
46 title('Regressionsgeraden der Messwerten BAT01 bis BAT04', 'FontSize', 16)
47 xlabel('Anzahl der Fahrten', 'FontSize', 16)
48 ylabel('Kapazität der Testzelle in Ah', 'FontSize', 16)
49 grid on
50 hold off
51 legend('Regressionsgerade BAT01 (120kWh)', 'Regressionsgerade BAT02 (60kWh)', 'Regressionsgerade BAT03 (40kWh)', 'Regressionsgerade BAT04 (30kWh)', 'Meswerte BAT01', 'Meswerte BAT02', 'Meswerte BAT03', 'Meswerte BAT04')
52
53 %% Kapazitätsverlust [%]
54 BAT01_inPR = [0.1; 0.17; 1; 1.58; 2.16; 2.7; 3.2; 3.82; 4.32; 4.77; 5.31; 5.73; 6.19; 6.68; 7.18];
55 BAT02_inPR = [0.1; 0.04; 0.88; 1.33; 1.96; 2.5; 3.12; 3.62; 4.17; 4.54; 5.17; 5.46; 5.96; 6.38; 6.71];
56 BAT03_inPR = [0.1; 0.50; 1.55; 2.29; 3.12; 3.87; 4.66; 5.36; 6.11; 6.77; 7.52; 8.06; 8.69; 9.31; 9.98];
57 BAT04_inPR = [0.1; 0.92; 2.24; 3.26; 4.30; 5.27; 6.23; 7.15; 8.19; 9.07; 10.11; 11.03; 12.12; 13.16; 14.38];
58
59 Verlust = ([BAT01_inPR, BAT02_inPR, BAT03_inPR, BAT04_inPR]);
60
61 figure(2)
62 h=bar(Fahrten, Verlust, 'group');
63 set(h(1), 'FaceColor', 'g');
64 set(h(2), 'FaceColor', 'b');
65 set(h(3), 'FaceColor', 'k');
66 set(h(4), 'FaceColor', 'r');
67
68 grid on
69 %title('')
70 xlabel('Anzahl der Fahrten', 'FontSize', 16)
71 ylabel('Kapazitätsverlust im Prozent', 'FontSize', 16)
72 legend('Testzelle 1 (120kWh)', 'Testzelle 2 (60kWh)', 'Testzelle 3 (40kWh)', 'Testzelle 4 (30kWh)')
73
74 %% Restkapazität der Testzellen. Normiert nach Vollzyklen
75 figure(3)
76 plot((Fahrten-140)/140*28.29, BAT01/BAT01(1)*100, 'g-*', 'LineWidth', 1)
77 hold on
78 plot((Fahrten-140)/140*56.03, BAT02/BAT02(1)*100, 'b-*', 'LineWidth', 1)

```

```

79 plot((Fahrten-140)/140*83.17,BAT03/BAT03(1)*100,'k--*', 'LineWidth',1)
80 plot((Fahrten-140)/140*110.74,BAT04/BAT04(1)*100,'r--*', 'LineWidth',1)
81 title('Verbleibende Kapazität der Testzellen', 'FontSize',16)
82 xlabel('Anzahl der Vollzyklen', 'FontSize',16)
83 ylabel('Restkapazität der Testzelle in Prozent der Startkapazität', 'FontSize',16)
84 grid on
85 hold off
86 legend('Testzelle 1 (120kWh)', 'Testzelle 2 (60kWh)', 'Testzelle 3 (40kWh)', 'Testzelle 4 (30kWh)')
87
88 %% Approximation
89 m = [m1 m2 m3 m4];
90 E = [120 60 40 30];
91 schritt = 0:1:120;
92
93 a= 0.6276199543;
94 b= 0.9362845512;
95 c= 0.0799;
96 x= 0:10:120;
97 %y=x;
98 for i=1:length(x)
99     y(i)=a*b^x(i)+c;
100 end
101
102 absm=abs(m)*1000 % Einheit für die Steigung = [mAh/Fahrt]
103 figure(2)
104 plot(E, absm, 'r--*', 'LineWidth',2)
105 hold on;
106 plot(x,y)
107 xlabel('Energiegehalt der Batterien in kWh')
108 ylabel('Steigung (entnommen aus Alterungsmessungen)')
109 grid on
110 legend('Steigung', 'f(E,m) = 0.6276 \cdot 0.9363^{E} + 0.0799')
111 hold off
112
113
114 cftool(E, absm)
115
116
117
118
119 %%
120 a1= -0.0007002;
121 b1= 0.1658 ;
122 x = 0:10:170;
123 for i=1:length(x)
124     Polynom1GR(i) = a1*x(i) + b1;
125 end
126
127
128 a2 = 3.124e-05;
129 b2 = -0.00553;
130 c2 = 0.3075;
131 for i=1:length(x)
132     Polynom2GR(i) = a2*x(i)^2 + b2*x(i) + c2;
133 end
134
135
136 a3 = -6.615e-07;
137 b3 = 0.0001699;
138 c3 = -0.01388;
139 d3 = 0.4551;
140 for i=1:length(x)
141     Polynom3GR(i) = a3*x(i)^3 + b3*x(i)^2 + c3*x(i) + d3;
142 end
143
144
145 a4 = 2236;
146 b4 = -2.986;
147 c4 = 0.08802;
148 for i=1:length(x)
149     Pot_Funk(i) = a4*x(i)^b4+c4;
150 end
151
152
153 a5 = 0.1882;
154 b5 = -0.007499;
155 for i=1:length(x)
156     Expon_Funk(i) = a5*exp(b5*x(i));
157 end
158
159
160 a6 = 3.35;
161 b6 = 0.05224;
162 for i=1:length(x)
163     ab6(i) = a6/x(i)+b6;

```

```
164 end
165
166 %%
167 figure(21)
168 plot(E, absm, 'r *', 'LineWidth', 2)
169 hold on;
170 plot(x, Polynom1GR, 'LineWidth', 1)
171 plot(x, Polynom2GR, 'LineWidth', 1)
172 plot(x, Polynom3GR, 'LineWidth', 1)
173 plot(x, Expon_Funk, 'LineWidth', 1)
174 plot(x, Pot_Funk, 'LineWidth', 2)
175 plot(x, ab6, 'LineWidth', 2)
176 xlim([0.05 x(end)])
177 ylim([0 0.25])
178 title('Mathematische Beschreibung des Kapazitätsverlustes')
179 ylabel('Kapazitätsverlust [ mAh/Fahrten]')
180 xlabel('Energiegehalt [kWh]')
181 grid on
182
183
184 legend('Messwerte', 'f_1(E)= m_1 = - 0.0007002 E + 0.1658', ...
185 'f_2(E)= m_2 = 3.124\cdot 10^{-5} E^2 + 0.1658 E + 0.3075', ...
186 'f_3(E)= m_3 = - 6.615 \cdot 10^{-7} E^3 + 0.0001699 E^2 - 0.01388 E + 0.4551', ...
187 'f_4(E)= m_5 = 0.1882e^{-0.007499 E}', ...
188 'f_5(E)= m_4 = 2236 E^{-2.986} + 0.08802;', ...
189 'f_6(E)= m_6 = 3.35 / E + 0.05224')
190 hold off
```

H. Abkürzungsverzeichnis

BATSEN	.....	Drahtlose Zellsensoren für Fahrzeugbatterien
BEEDeL	.....	Bewertung des Einsatzes von Elektrobussen mit Dezentraler Ladeinfrastruktur in Metropolen am Beispiel der HOCHBAHN
BEG	.....	Zyklusbeginn (Digatron - Befehl)
BM	.....	Battery Manager
BTS	.....	Das Batterie-Test-System
C_{act}	.....	Nutzkapazität
$C_{mod,BAT0x}$	.....	Nennkapazität modellierte Batterie
C_{Nenn}	.....	Nennkapazität
$C_{Testzelle,BAT0x}$	.....	Nennkapazität der Testzelle
CCCV	.....	Constant Current Constant Voltage (Strom-Spannung-Ladeverfahren)
CLSF	.....	Calendar Life Shortening Factor
DOD	.....	"Depth of Discharge" (Entladladungstiefe)
$E_{mod,BAT0x}$	.....	Energiegehalt modellierte Batterie
$E_{Testzelle,BAT0x}$	.....	Energiegehalt der Testzelle
EIS	.....	Elektrochemische Impedanzspektroskopie
ELA	.....	Entladen (Digatron - Befehl)
EOL	.....	"End of Life" (Lebensende)
FFG	.....	Fahrzeugwerkstätten Falkenried GmbH
GNSS	.....	Globale Navigationssatellitensysteme
I_{ges}	.....	Gesamtstrom der Zelle
IVI	.....	Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme
LAD	.....	Laden (Digatron - Befehl)
$LiFePO_4$	.....	Lithium-Eisenphosphat
MCT	.....	Multiple Cell Tester
PAP	.....	Prorgammablaufplan
PAU	.....	Pause (Digatron - Befehl)
PE	.....	Polyethylen

PP	Polypropylen
R _i	Innenwiderstand
SEI	Solid Electrolyte Interface
SET	Setzen (Digatron - Befehl)
SOC	"State Of Charge" (Ladezustand der Batterie)
SOH	" State of Health" (Allgemeinzustand der Batterie)
SQL	Structured Query Language
STO	Stopp (Digatron - Befehl)
VRM	Verbrennungskraftmaschine
ZOB	Zentralen Omnibusbahnhof
ZYK	Zyklusende (Digatron - Befehl)

Versicherung über die Selbstständigkeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit im Sinne der Prüfungsordnung nach §16(5) APSO-TI-BM ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen habe ich unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Hamburg, 25. April 2016

Ort, Datum

Unterschrift