



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorthesis

Simon Cornelius Jochen Buhrow

Batterie-Management in medizinischen Geräten

Simon Cornelius Jochen Buhrow
Batterie-Management in medizinischen Geräten

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.-Ing. Lutz Leutelt

Abgegeben am 27. Februar 2015

Simon Cornelius Jochen Buhrow

Thema der Bachelorthesis

Batterie-Management in medizinischen Geräten

Stichworte

Batterie-Management-System, Gas Gauge, LiFePO₄, Akku, Beatmungsgeräte

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit umfasst die Entwicklung eines Batterie-Management-Systems für ein Beatmungsgerät der Firma Dräger. Neben der theoretischen Entwicklung soll dies in Form eines Demonstrators aufgebaut werden.

Simon Cornelius Jochen Buhrow

Title of the paper

Battery-Management in medical devices

Keywords

Battery-Management-System, Gas Gauge, LiFePO₄, Battery, Ventilation device

Abstract

Inside this report the development of an Battery-Management-System for a Ventilation device of the company Dräger is done. A demonstrator is built to verify the function.

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	6
Abbildungsverzeichnis	7
1. Einführung	8
1.1. Aufbau	9
1.2. Definition und Grundbegriffe	10
2. Produktanforderungen	11
2.1. Technische Anforderungen	11
2.2. Anforderungen durch Akku	12
2.2.1. Elektrisches Verhalten von LiFePO4-Akkus	13
2.2.2. Betrieb	15
2.2.3. Alterung	17
2.2.4. Akkublock	17
2.2.5. Zelldynamiken	19
2.3. Anforderungen durch Kunden	20
2.4. Anforderungen durch Normen	22
3. Analyse	23
3.1. Sicherheitsfunktionen	23
3.2. Elektrisches Management	24
3.2.1. Lade-Management	25
3.2.2. Energie- und thermisches Management	26
3.2.3. Balancing	27
3.3. Analysefunktionen	28
3.3.1. Ladezustand (SOC)	29
3.3.2. Verbleibende Laufzeit (TTE)	34
3.3.3. Batteriezustand (SOH)	34
3.3.4. Verbleibende Lebenszeit (RUL)	35
3.4. Kommunikation	36

4. Architektur	37
4.1. Allgemeine Architektur	37
4.2. Vergleich vorhandener integrierter Schaltungen	40
4.3. Konkrete Systemarchitektur	44
5. Realisierung	45
5.1. Funktionsumfang	46
5.2. Akku - und Chipwahl	46
5.3. Aufbau	47
5.3.1. Software	48
5.3.2. Konfigurationen	48
5.4. Ergebnisse	50
6. Schluss	59
Literaturverzeichnis	60
A. Anhang	62
A.1. Zustandsdiagramm	63
A.2. Lernzyklus	64
A.3. Halbzyklen-Szenario	65
A.4. Weiterer Anhang	65

Tabellenverzeichnis

2.1. Spannungen bei Serienschaltung	18
4.1. Vergleich verschiedener Monitoringchips	41
4.2. Vergleich verschiedener Gas Gauge-ICs	42
5.1. Time-To-Empty-Vorhersagefehler	56

Abbildungsverzeichnis

1.1. 8s3p-Akkublock bestehend aus 18650-Zellen	10
2.1. Entladekurve einer LiFePO4-Zelle	13
2.2. IR-Modell einer Batterie	14
2.3. Hysterese zwischen Lade- und Entladekurve eines LiFePO4-Akkus	14
2.4. Innenwiderstand in Abhängigkeit vom SOC	15
3.1. CCCV-Ladekurve	26
3.2. Schaltkreis für ein passives Balancing	27
3.3. SOC Definitionen	29
3.4. Memoryeffekt bei LiFePO4-Akkus	31
4.1. Architekturbausteine eines Batterie-Management-Systems	38
4.2. Architektur eines BMS für medizinische Geräte	44
5.1. Demonstratoraufbau	45
5.2. Blockschaltbild Demonstrator	48
5.3. Passives Balancing beim Laden	51
5.4. Zellspannungen beim Entladeende	52
5.5. TTE-Abschätzungen und tatsächliche Laufzeit	54
5.6. Zeitabweichung der unterschiedlichen TTE-Abschätzungen	54
5.7. Zeitabweichung der TTE@P-Vorhersage	55
5.8. Histogramme der Time-To-Empty-Fehler	56
5.9. SOC Abschätzung	57
A.1. Zustandsdiagramm der Lade-/Entladeroutine	63
A.2. Flussdiagramm Lernzyklus	64
A.3. SOC-Verlauf bei den gefahrenen Halbzyklen	65

1. Einführung

Der heutige Alltag ist kaum mehr ohne die Verwendung von Akkus zu meistern. Aufgrund der Fortschritte auf dem Gebiet der Akkutechnologien ist es mittlerweile selbstverständlich, dass man Smartphones und Laptops unterwegs benutzen kann und diese dabei ein handliches Format besitzen. Die mobile Nutzung von Geräten wird auch bei der medizinischen Behandlung gefordert. Neben verschiedenen handlichen Messgeräten ist dies auch für Beatmungsgeräte von besonderem Interesse. Es ermöglicht Patienten, welche auf eine künstliche Beatmung angewiesen sind, ohne weitere Komplikationen innerhalb des Krankenhauses zu mobilisieren. Dies kann zum einen bei Umzügen von einer Station auf eine andere von Vorteil sein oder auch das Hinführen von Patienten zu nicht mobilen Messgeräten wie Röntgenröhren o.ä. deutlich erleichtern. Zudem gibt es einige Trends bei den Behandlungsmethoden, bei denen Patienten sich so früh wie möglich bewegen sollen. So ermöglichen mobile Beatmungsgeräte den Patienten Geh-Einheiten durchzuführen, noch während sie in einem Stadium sind, in dem unterstützende Beatmung erforderlich ist.

Mobile Beatmungsgeräte existieren schon seit längerem. Diese waren anfangs allerdings rein pneumatisch und boten nicht den vollen Komfort heutiger elektronischer Beatmungsgeräte. Die bisher verbreiteten Akkutypen Blei und Nickel-Metallhydrid (NiMH) können aufgrund ihrer geringen Energiedichte nur bedingt die Forderungen durch die mobilen medizinischen Geräte erfüllen. Dennoch wurden und werden sie viel im Bereich der medizinischen Geräte eingesetzt. Grund dafür ist die hohe Sicherheit und die jahrzehntelange Bewährung dieser Technologien, welche auf dem Gebiet der Patientenversorgung von besonders hoher Bedeutung ist!

Durch die steigende Verbreitung von Elektromotoren in Autos, hat die Forschung und Entwicklung von neuen Akkutechnologien einen weiteren Antrieb bekommen. Im Gegensatz zu den verwendeten Akkus in Laptops u.ä. ist hier die Forderung nach deutlich mehr Energie und vor allem hohen Strömen eine große Herausforderung. Die verschiedenen auf Lithium-Ionen (Li-Ionen) basierenden Akkutechnologien, welche teilweise bereits sehr erfolgreich in Laptops und anderen mobilen Kleingeräten verwendet werden, können dabei die Forderung nach dem erhöhten Energiegehalt durchaus erfüllen. Das Problem dabei ist allerdings, dass sie nicht für hohe Ströme geeignet sind, was sie für den Automobilmarkt weniger attraktiv macht. Ein weiteres Problem ist das Risiko des thermischen Durchgehens, d.h. der Selbstentzündung, welches diese Akkuchemien für medizinische Geräte unbrauchbar macht.

Eine in den letzten Jahren auf industrieller Ebene aufkommende Variante der Li-Ionen-Akkus

ist der Lithium-Eisenphosphat Akku (LiFePO₄). Er besitzt zwar eine etwas geringere Energiedichte als andere Li-Ionen-Akkus, kann dafür hohe Ströme liefern und gilt als eigensicher, d.h. ein thermisches Durchgehen ist bei üblichen Umgebungseinflüssen ausgeschlossen. Vor allem aufgrund der zuletzt genannten Eigenschaft ist es sinnvoll LiFePO₄-Akkus in medizinische Geräte einzubauen.

Allen Li-Ionen-Akkus gemeinsam ist ihre Sensibilität in Bezug auf das Laden und Entladen. Werden die Akkus dabei falsch behandelt, verlieren sie schnell an nutzbarer Kapazität, dies wiederum führt dazu, dass sie das Gerät nur noch kurzfristig mit der notwendigen Leistung versorgen können. Von daher ist eine entsprechende Überwachung bzw. Steuerung der Lade- und Entladevorgänge notwendig. Ein Batterie-Management-System (BMS) übernimmt diese Aufgabe und hat die Maximierung der nutzbaren Kapazität, Energie und Akku-Lebensdauer als Ziel [9]. Zudem sorgt es für den sicheren Betrieb des Akkus und informiert den Nutzer über den aktuellen Zustand des Akkus. In dieser Arbeit sollen die für ein Beatmungsgerät der Firma Dräger relevanten Daten und Anforderungen an ein BMS für LiFePO₄-Akkus erörtert werden. Anhand dieser soll anschließend ein Konzept entwickelt und eine mögliche Umsetzung aufgebaut werden. Neben den allgemeinen Anforderungen sollen dabei auch die zusätzlichen Anforderungen durch den Gebrauch in lebenserhaltenden Geräten berücksichtigt werden.

1.1. Aufbau

Im folgenden Abschnitt werden einige Begrifflichkeiten zum Thema Akkumulatoren und BMS geklärt, die für ein klares Verständnis des Textes hilfreich sind. Anschließend sollen im Kapitel 2 die Anforderungen an das BMS zusammengestellt und erläutert werden. Dabei werden wichtige Eigenschaften und Verhaltensweisen von LiFePO₄-Akku aufgezeigt (interne Anforderungen) und die externen Anforderungen durch den Einsatz in Beatmungsgeräten sowie den damit verbundenen Normen erläutert.

Aus diesen Anforderungen sollen im folgenden Kapitel 3 konkrete Funktionen abgeleitet und allgemeine technische Umsetzungen aufgezeigt werden. Die wichtigsten Algorithmen, die bei der Umsetzung eingesetzt werden können, sollen beschrieben und in Hinblick auf deren Eignung für medizinische Geräte bewertet werden.

Hieraus ergeben sich mögliche Architekturen, auf die in Kapitel 4 eingegangen wird. Außerdem sollen marktübliche integrierte Schaltkreise verglichen und qualitativ beurteilt werden. Aus dem erarbeiteten Konzept für ein BMS wird in Kapitel 5 eine mögliche Umsetzung realisiert und dessen Funktionalität bewertet werden.

1.2. Definition und Grundbegriffe

Der Begriff „Batterie“ wird im alltäglichen Sprachgebrauch vor allem für handelsübliche 1,5V-Alkali-Mangan-Zellen und ähnliche Batterietypen verwendet. Dabei beschreibt das Wort in seiner eigentlichen Bedeutung eine Zusammenschaltung mehrerer Zellen. Um hier für das Lesen der Arbeit Klarheiten zu schaffen, sollen einige Begriffe zu diesem Thema erläutert werden:

Akku-/Batteriezelle ist eine einzelne sekundäre Batteriezelle, welche somit wiederaufladbar ist. Eine häufig verwendete Bauform hierfür ist die zylindrische 18650-Zelle [14].

Akku-/Batterieblock ist die Zusammenschaltung mehrerer Zellen zu einem Block. Die Verschaltung wird dabei als x s- y p-Zellenschaltung angegeben. Dabei entspricht x der Anzahl der in Reihe geschalteten Zellen und y der parallel geschalteten Zellen (s. Abb. 1.1).

Akku bzw. Batterie werden in dieser Arbeit als gleichwertige Bezeichnungen behandelt und stehen für eine oder mehrere zusammengeschaltete Zellen (Block) im Allgemeinen.

Akku-/Batterieeinheit und Batteriesystem beschreiben die Einheit von einem Akkublock und dessen elektrische Beschaltung, welche normalerweise in einem Gehäuse untergebracht sind.

Akku-/Batterietyp ist ein konkretes Modell eines Herstellers. Zellen desselben Typs bestehen aus derselben Akkuchemie und besitzen die gleichen nominellen Herstellerangaben.

C-Rate gibt den Batteriestrom an. Eine 1C-Rate erhält man, indem man die Nennkapazität durch eine Stunde teilt. Andere Ströme werden in Bezug auf die 1C-Rate mit entsprechendem Faktor angegeben (Bsp.: Bei einer 30Ah-Batterie entspricht eine 1C-Rate einem Strom von 30A und eine C/2-Rate einem Strom von 15A) [14].



Abbildung 1.1.: 8s3p-Akkublock bestehend aus 18650-Zellen

2. Produktanforderungen

Für die Nutzung eines geeigneten Akkublocks müssen die technischen Anforderungen durch das Gerät bekannt sein, welche im folgenden Abschnitt aufgeführt werden.

Die in Kapitel 1 genannten Ziele der Maximierung der nutzbaren Energie und der Lebenszeit eines Akkus durch ein BMS können nur erfüllt werden, wenn das Verhalten und die speziellen Eigenschaften von LiFePO₄-Akkus berücksichtigt werden. Diese sollen im Abschnitt 2.2 behandelt werden. Zudem soll der Nutzer des batteriebetriebenen Gerätes, in diesem Fall Krankenhauspersonal, über den Zustand des Akkus informiert werden und muss in der Lage sein, entsprechend handeln zu können, ohne dass der Fokus auf den Patienten verloren geht. Die sich hieraus ergebenden Anforderungen sowie die betreffenden Normen werden in den letzteren Abschnitten dieses Kapitels erläutert.

2.1. Technische Anforderungen

Im Folgenden wird sich diese Arbeit auf Akkus für den Einsatz im Gerät „Evita Infinity V500“ (kurz: V500) der Firma Dräger beziehen. Die V500 stellt eines von mehreren Beatmungsgeräten im Portfolio der Lübecker Medizintechnikfirma dar. Viele im Laufe dieser Arbeit gestellten Überlegungen werden sich dabei problemlos auf andere medizinische und vor allem lebenserhaltene Geräte übertragen lassen.

Die technischen Eckdaten der V500 bzw. die drägerinternen Anforderungen an einen entsprechenden Akku sind folgende:

- Spannung: 18-30V
- Strom: bis 10A
- Betriebsdauer mit einer vollen Batterie: ca. 6 Stunden
- sich daraus ergebende Kapazität: 30Ah
- sich daraus ergebende Energie: 720Wh
- Temperaturbereich: 10 - 55°C
- ein Serviceintervall soll nicht kürzer als alle 2 Jahre sein

Das Gerät verbraucht im Normalbetrieb eine konstante Leistung von ca. 100-120W, sodass sich der Strom in Abhängigkeit von der Batteriespannung einstellt.

Die Forderung nach den Serviceintervallzeiten hat zur Folge, dass der Kunde in der Lage sein muss, alle üblichen anfallenden Aufgaben selbstständig in der Zwischenzeit bewältigen zu können. Hieraus ergeben sich wiederum Forderungen durch den Kunden, welche im Abschnitt 2.3 dargestellt werden. Weitere Aspekte, die bei der Zusammenstellung des Akkublocks berücksichtigt werden müssen, werden am Ende des Abschnitts 2.2 dargestellt.

Im Vergleich zu anderen technischen Anwendungen, ist ein entsprechender Akku spannungsmäßig mit Akkus für den Pedelec/E-Bike-Segment vergleichbar, die geforderten Energie von 720Wh ist allerdings deutlich höher als die eines üblichen Pedelec-Akkus und ist eher mit der einer großen, d.h. energiereichen, Starterbatterie für Autos zu vergleichen.

2.2. Anforderungen durch Akku

Zur Zeit werden bei der Firma Dräger in vielen Geräten Bleiakkus verwendet. Ein großer Vorteil dieser Akkuchemie besteht darin, dass sie schon seit Jahrzehnten verbreitet ist. Sowohl bei der Herstellung als auch bei der Nutzung kann man daher auf entsprechend großes Wissen zurückgreifen, sodass ein sicherer Einsatz gewährleistet werden kann. Zudem reagieren sie nicht besonders sensibel auf Überladung [4].

Die LiFePO₄-Akkutechnologie ist erst seit einigen Jahren auf industrieller Ebene verbreitet. Im Vergleich zu den bewährten Bleiakkus bringen sie einige entscheidenden Vorteile, weshalb damit zu rechnen ist, dass in Zukunft vermehrt LiFePO₄-Akkus in medizinischen Geräten verwendet werden. Sie besitzen mit 3,3V eine höhere Nennspannung und eine größere Energiedichte [16], sodass sich entweder Platz und Gewicht einsparen lassen oder das Gerät entsprechend länger betrieben werden kann. Des weiteren bieten sie eine höhere Zyklenfestigkeit, einen höheren Wirkungsgrad [10] und haben ein sehr gutes Hochstromverhalten [3], wodurch auch ein schnelleres Laden des Akkus möglich ist. Zur Zeit sind die Anschaffungskosten der LiFePO₄-Akkus noch um den Faktor 2-3 über denen der Blei-Akkus. Allerdings ist aufgrund steigender Massenproduktion mit weiter sinkenden Preisen zu rechnen. Außerdem können sie durch ihre höhere Langlebigkeit einen niedrigeren "total cost of ownership"(TCO) darstellen [10].

Wie bereits erwähnt, zeigt jede Akkuchemie eigene Charakteristika auf, welche ein BMS kennen bzw. berücksichtigen muss. Diese Eigenschaften sollen im Folgenden näher erläutert werden. Dabei sollen in dieser Arbeit die für die Entwicklung eines BMS relevanten Verhaltensweisen erläutert werden, ohne auf die dahinter stehenden chemischen Prozesse näher einzugehen. Eine detaillierte Darstellung dieser Prozesse befindet sich u.a. in [18].

2.2.1. Elektrisches Verhalten von LiFePO4-Akkus

Jede Akkuchemie besitzt eine charakteristische Form der Spannungskurve. Ein typisches Merkmal von LiFePO4-Akkus ist, dass sie über einen weiten Bereich einen sehr flachen Spannungsverlauf aufzeigen (s. Abb. 2.1). Die Leerlaufspannung der Batterie (engl. Open Circuit Voltage, kurz: OCV) ist eine Funktion des Ladezustandes und der Temperatur der Batterie und lässt sich als $OCV = f(SOC, T)$ beschreiben [3]. Dabei gibt SOC (State-of-Charge) die enthaltene chemische Kapazität in Bezug auf den vollgeladenen Zustand an [18]. Die hier in chemischer Form vorhandene Kapazität kann mit der eines Kondensators verglichen werden. Dabei entspricht die chemische Gesamtkapazität derjenigen Kapazität, welche - bei Betrieb innerhalb der vom Hersteller angegebenen Minimal- und Maximalspannung und sehr niedrigem Entladestrom (ca. C/20-Rate) - einer vollgeladenen Batterie entnommen werden kann [3].

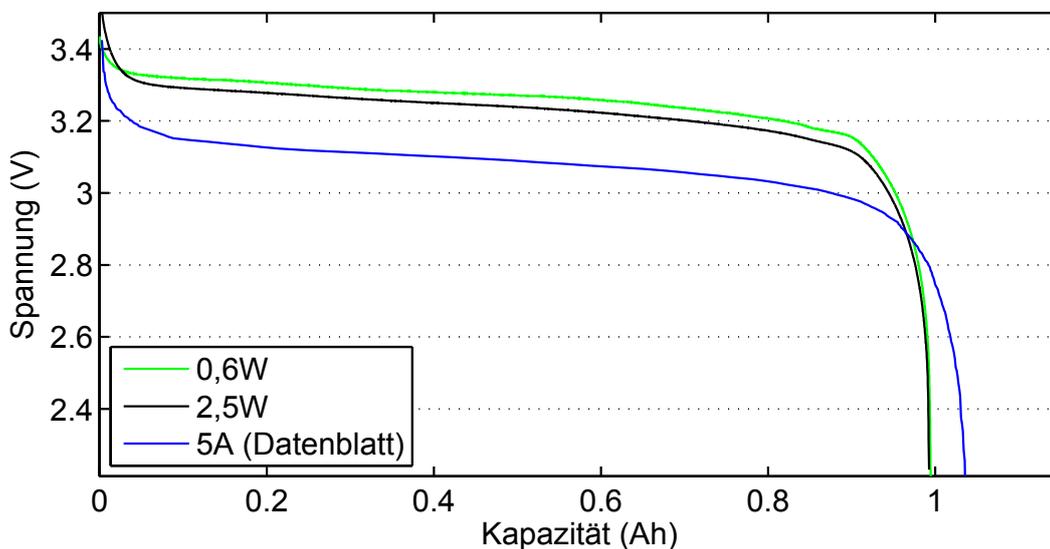


Abbildung 2.1.: Entladekurve einer 1,1Ah LiFePO4-Zelle (grün, schwarz: bei konstanter Lastleistung gemessene Kurven; blau: bei konstantem Entladestrom [1])

Analog zum Ladezustand (SOC) lässt sich der Entladezustand (engl. Depth-of-Discharge, kurz: DOD) definieren, welcher die entnommene Kapazität in Bezug auf den vollgeladenen Zustand angibt und definiert ist als $DOD = 1 - SOC$ [3].

Die von der Anwendung tatsächlich nutzbare Kapazität ist üblicherweise geringer als die chemische. Dies lässt sich mit Hilfe eines entsprechenden Ersatzschaltbildes (ESB) nachvollziehen. Das einfachste Modell für einen Akku ist das einer idealen Spannungsquelle mit einem Innenwiderstand R_i in Serie (IR-Modell, s. Abb. 2.2). Die Gleichstromeigenschaften lassen sich hiermit bereits gut erklären.

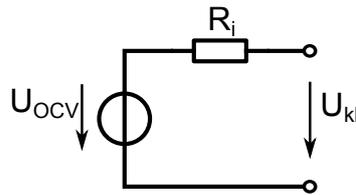


Abbildung 2.2.: IR-Modell einer Batterie

Die sich tatsächlich einstellende Klemmenspannung U_{kl} lässt sich dabei vereinfacht, ohne Berücksichtigung vom eigentlichen dynamischen Verhalten, wie folgt ausdrücken:

$U_{kl} = U_{ocv} - I \cdot R_i$ [3]. Bei höheren Entladeströmen sinkt somit die an den Batterieklemmen vorhandene Spannung, da über dem Innenwiderstand eine größere Spannung abfällt. Der IR_i -Spannungsabfall führt dazu, dass die Abbruchspannung an den Klemmen erreicht werden kann, noch bevor die Batterie entleert ist und somit die nutzbare Kapazität verringert wird. Während beim Entladen eine Klemmenspannung anliegt, die niedriger ist, als die Leerlaufspannung, so liegt beim Laden entsprechend eine höhere Klemmenspannung an (s. Abb. 2.3). Die Leerlaufspannungskurve liegt somit zwischen der Entlade- und der Ladekurve.

Der Innenwiderstand der Batterie befindet sich im Milliohmereich und hängt neben der Akkuchemie auch von der Temperatur, dem SOC und dem Alter des Akkus ab. Somit verändert sich der IR_i -Spannungsabfall auch in Abhängigkeit von den genannten Parametern. Der Innenwiderstand steigt bei sinkender Temperatur aufgrund der langsamer ablaufenden chemischen Reaktionen innerhalb der Akkuzelle. Daher kann bei Temperaturen unter 10°C

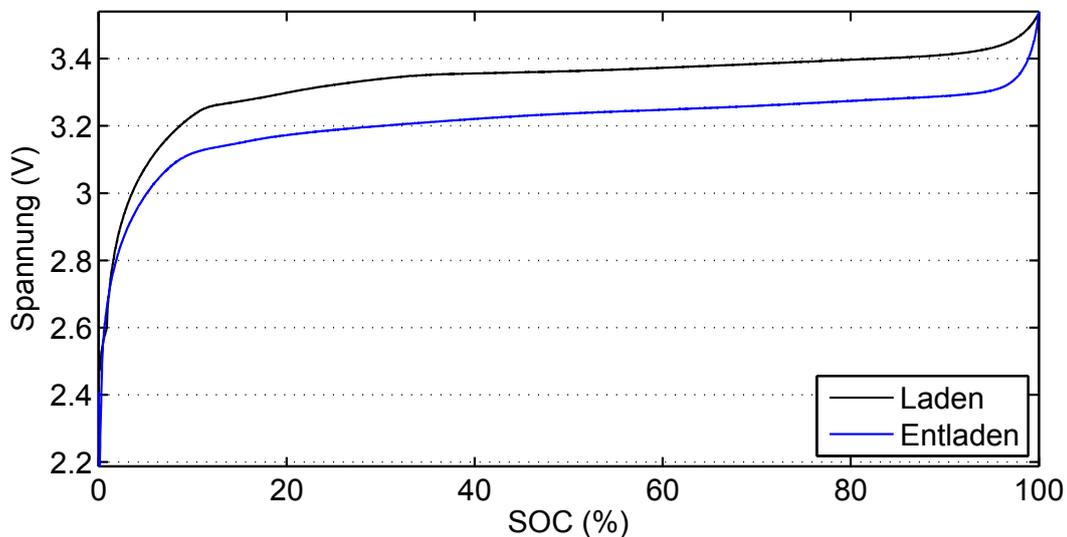


Abbildung 2.3.: Hysterese zwischen Lade- und Entladekurve eines LiFePO4-Akkus

einem Akku deutlich weniger Energie entnommen werden, als bei gleichem SOC und höherer Temperatur. Der Zusammenhang zwischen SOC und dem Innenwiderstand ist in Abb. 2.4 dargestellt. Der starke Spannungseinbruch gegen Ende der Entladekurve lässt sich mit dem steigenden Innenwiderstand bei niedrigem SOC erklären.

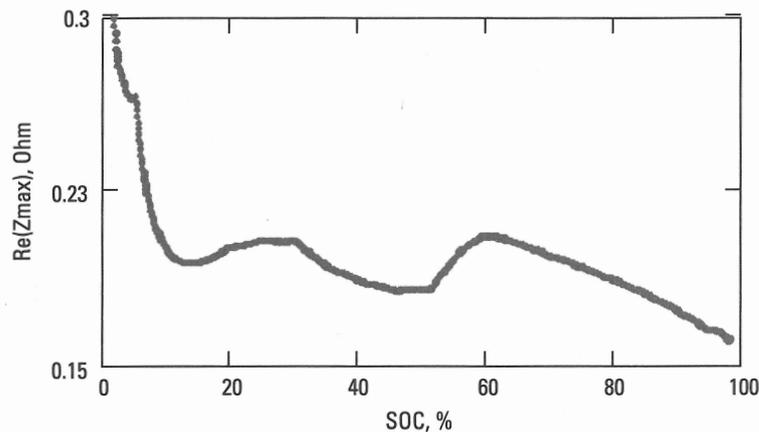


Abbildung 2.4.: Innenwiderstand in Abhängigkeit vom SOC [3, S.149]

Eine weitere entscheidende Eigenschaft von Akkus ist deren Selbstentladung. So verlieren Akkus auch bei Nichtbenutzung durch innere chemische Reaktionen langsam an Ladungen. Die Selbstentladerate von LiFePO₄-Akkus ist mit 1-2%/Monat sehr gering [7]. Mit höheren Temperaturen und höherem Alter nimmt die Selbstentladerate zu [3]. Um die Rate möglichst gering zu halten und den Akku zu schonen, wird vorgeschlagen, den Akku bei einem Ladezustand von ca. 50% SOC und etwas unter Raumtemperatur zu lagern [3].

2.2.2. Betrieb

Li-Ionen-Akkus weisen eine hohe Sensibilität gegenüber der Temperatur, zu hohen Strömen, sowie Lade- und Entladeschlussspannungen auf. Dies erfordert entsprechende begrenzen- de Maßnahmen. Die genauen Werte sind den jeweiligen Herstellerangaben zu entnehmen. Dennoch lassen sich Richtwerte für LiFePO₄-Akkus im Allgemeinen angeben. Diese sollen im Folgenden näher behandelt werden.

LiFePO₄-Akkus können über einen weiteren Temperaturbereich als die bisher verbreiteten Li-Ionen-Akkus verwendet werden. Die zulässige Betriebstemperatur ist teilweise mit -30°C - 60°C angegeben [1]. Damit erfüllen sie die von Dräger gestellten Anforderungen bzgl. des Temperaturbereiches. Trotz des weiten Bereiches bei den negativen Temperaturen ist - wie bereits erwähnt - die Leistungsentnahme bei diesen Temperaturen weniger effizient als bei

Raumtemperatur. Ein Überschreiten der angegebenen Maximaltemperatur sollte vermieden werden, um irreversible chemische Seitenreaktionen zu verhindern. Vor allem die chemische Gesamtkapazität kann hierdurch abnehmen. Extrem hohe Temperaturen ($> 400^{\circ}\text{C}$) können zu einem thermischen Durchgehen führen [3], dass zu einem Selbstentzünden des Akkublocks führen kann. Im Normalbetrieb sind diese Temperaturen allerdings nicht zu erwarten.

Ein Überladen, d.h. ein Laden bei zu hoher Spannung, kann im Extremfall ebenfalls zu einem thermischen Durchgehen führen und ist somit zu verhindern. Die Ladeschlussspannung ist für LiFePO₄-Akkus normalerweise mit 3,6V angegeben. LiFePO₄-Akkus können auch bis 4,0V geladen werden, ohne dass dies ein Sicherheitsrisiko darstellt. Der Gewinn an gespeicherter Energie ist aufgrund des schnellen Anstiegs der Spannung gegen Ende der Ladekurve sehr gering, sodass es sich nicht lohnt, den Akku über 3,6V aufzuladen [3]. Hinzukommt, dass ein langes Anliegen von Spannungen von 3,6V und größer zu steigenden irreversiblen Reaktionen innerhalb der Batterie führen, sodass der Ladevorgang nicht länger als notwendig sein sollte.

Ein Tiefentladen bei dem die Batteriespannung unter die im Datenblatt angegebene Minimalspannung fällt, führt ebenfalls zu einer schnelleren Degradation, d.h. Lebenszeitverkürzung, der Batterie und ist daher ebenfalls zu vermeiden. Im Extremfall kann dies bei Li-Ionen-Akkus zu einem späteren Zeitpunkt zu kleinen inneren Kurzschlüssen und dies wiederum zu einem thermischen Durchgehen führen [3]. Ob dies auch für LiFePO₄-Akkus gültig ist, konnte leider nicht festgestellt werden. Ein kurzzeitiges Fallen ($< 1\text{s}$) der Batteriespannung unter den unteren Grenzwert, z.B. aufgrund von Strompeaks, ist dabei nicht schädlich und sollte somit auch nicht zu einem Abschalten des Akkus führen [3].

Zu hohe Ströme sind ebenfalls schädlich für den Akku und können ein Sicherheitsrisiko darstellen. Daher sollten die zulässigen Ströme auf das vom Hersteller angegebene Maximum begrenzt werden (bei LiFePO₄ teilweise bis zu 30A). Vor allem Kurzschlussströme müssen innerhalb von Mikrosekunden erkannt und unterbrochen werden, da es sonst zu sehr hohen Temperaturen und damit einem thermischen Durchgehen des Akkus kommt [3]. Kurzschlüsse, die block- oder zellintern erfolgen, können durch die externe Beschaltung des Akkublocks (BMS) nicht verhindert bzw. unterbrochen werden. Hier liegt es beim Hersteller, die Akkuzellen und -blocks entsprechend sorgfältig zu produzieren.

Die genannten Grenzwerte gelten für alle Zellen eines Akkublocks, sodass die Spannung für jede in Reihe geschalteten Zelle begrenzt und damit gemessen werden muss, um einen sicheren und langlebigen Betrieb sicherzustellen.

2.2.3. Alterung

Neben den erwähnten Situationen lassen sich noch weitere Ursachen für eine Degradation bzw. Alterung eines Akkus bestimmen. Die Alterung eines Akkus bedeutet die Verminderung der für den Nutzer verfügbaren Kapazität bzw. Energie der Batterie.

Diese Degradation an verfügbarer Kapazität hat bei LiFePO₄-Batterien vor allem eine Ursache: der Verlust an chemischer Kapazität. Das Ansteigen des Innenwiderstandes, welches bei anderen Li-Ionen-Akkus eine weitere Ursache darstellt, ist bei LiFePO₄-Akkus vernachlässigbar klein [5].

Der Verlust an chemischer Kapazität kann wiederum in zwei verschiedene Ursachen unterteilt werden: die kalendarische Alterung sowie die zyklische Alterung. Beide Reaktionen laufen in Abhängigkeit von der Temperatur entsprechend schneller bzw. langsamer ab. Hohe Temperaturen sowie Temperaturunterschiede zwischen den einzelnen Zellen sollten daher vermieden werden, um ein möglichst langsames und gleichmäßiges Altern des Akkus zu gewährleisten.

Die kalendarische Alterung ist unabhängig von der Nutzung und bestimmt die maximale Lebensdauer eines Akkus. Allgemein für Li-Ionen Batterien ist diese Dauer mit ca. 5 Jahren angegeben [14], ein genauerer Wert für LiFePO₄ konnte nicht festgestellt werden. Mit zunehmender Lebenszeit nimmt die chemische Kapazität aufgrund von Verlusten an freien Lithium-Ionen ab [7]. Diese entstehen bei ablaufenden parasitären Nebenreaktionen und können nicht verhindert werden. Sie lassen sich allerdings verlangsamen, indem hohe Temperaturen sowie lange Lagerungen bei niedrigem SOC vermieden werden.

Die zyklische Alterung geschieht aufgrund der Benutzung des Akkus. Hier kommt es ebenfalls vorrangig zu einem Verlust an aktivem Lithium. Durch das Laden und Entladen verändern die Bestandteile des Akkus ihr Volumen. Durch diese Volumenarbeit entsteht eine mechanische Belastung an den Elektroden, die zu einem Verlust an aktivem Material führt [5]. Da die Volumenarbeit von der Entladetiefe abhängig ist, kann ein Verhindern von zu hohen DOD-Werten die Lebenszeit einer Batterie verlängern. Dieser Effekt ist bei LiFePO₄-Akkus geringer als bei den meisten anderen Li-Ionen-Akkus [14], weshalb LiFePO₄-Akkus teilweise mit einer Lebenszeit von 1000 Zyklen und mehr bei 100% DOD angegeben werden [1]. Das Begrenzen der Entladetiefe bringt somit einen Gewinn an Lebenszeit. Dieser ist bei LiFePO₄-Akkus allerdings relativ gering, sodass dies bei der Auslegung des Akkublocks eine eher untergeordnete Rolle einnimmt.

2.2.4. Akkublock

Die Nennspannung von 3,3V reicht für viele Anwendungen, wie auch die V500, nicht aus. Eine Erhöhung der Spannung lässt sich durch eine Reihenschaltung von mehreren Zellen erreichen. Hierdurch erhöht sich entsprechend auch die Energie, welche durch den Akkublock

gespeichert werden kann. Die Kapazität und somit die Fähigkeit über einen langen Zeitraum einen hohen Strom zu liefern, bleibt bei der Reihenschaltung unverändert. Für einen Kapazitätsgewinn werden mehrere Zellen parallel geschaltet. Diese verhalten sich nach außen hin wie eine Zelle mit höherer Kapazität. Dabei bildet die Gesamtkapazität die Summe aller Einzelkapazitäten.

Für die Auslegung eines Akkublocks, welcher die in Abs. 2.1 genannten technischen Anforderungen erfüllt, sollen anhand eines konkreten Akkus einige notwendigen Überlegungen beispielhaft aufgezeigt werden. Hierfür wird der Akku APR18650M1A genommen. Der Akku ist mit einer nominellen Kapazität von 1,1Ah und einem zulässigen Spannungsbereich von 2-3,6V angegeben. Der maximale dauerhafte Entladestrom beträgt 30A. Die Entladekurve ist in Abb. 2.1 zu sehen.

Bereits eine einzelne Zelle kann den geforderten Maximalstrom von 10A liefern. Allerdings könnte sie dies aufgrund der niedrigen Kapazität nur für eine sehr kurze Zeit von ca. $1,1Ah/10A = 0,11h$. Daher ist es notwendig, mehrere Zellen parallel zu schalten. Für die geforderten 30Ah für die V500 führt dies zu einer Parallelschaltung von mindestens 28 Zellen (= 30,8Ah). Um die für die V500 notwendigen 18-30V gewährleisten zu können, kommen vor allem zwei Serienschaltungen in Frage, die in Tab. 2.1 dargestellt sind.

Tabelle 2.1.: Spannungen bei Serienschaltung

<i>Anzahl an Zellen in Serie</i>	<i>Entladeschlussspannung</i>	<i>Ladeschlussspannung</i>
8s	16V	28,8V
9s	18V	32,4V

Da zum Betreiben des Gerätes eine Minimalspannung von 18V erforderlich ist, würden bei einer Reihenschaltung von 8 Zellen, diese bei homogenen Zellzuständen (s. nächsten Abschnitt) nicht unter 2,25V entladen werden. Das bedeutet, dass eine Entladetiefe von 100% nicht erreicht wird, was eine hohe Langlebigkeit begünstigt. Wie man der Entladekurve (s. Abb. 2.1) entnehmen kann, ist die wegen der höheren Abbruchspannung weniger verfügbare Energie kleiner als 1% der Gesamtkapazität und die 8s-Schaltung somit eine sinnvolle Wahl (s. hierzu auch Abb. 5.4).

Bei einer 9s Schaltung könnten die Zellen komplett auf 2V/Zelle entladen werden. Da bei voller Ladung die Blockspannung allerdings über 30V steigt, ist hier ebenfalls die volle Nutzung der Kapazität nicht möglich. Mit Blick auf die verlangsamte Alterung und der niedrigeren Kosten einer 8s-Schaltung, ist die 9s-Schaltung somit eine weniger sinnvolle Wahl. Eine Ausnahme stellt das in [2] aufgezeigte Konzept einer redundanten Zellenwahl. Bei dem dort beschriebenen Aufbau, wird gemäß eines Algorithmus jeweils eine Zelle abgeschaltet. Dies kann zum einen die im nächsten Abschnitt beschriebenen Ungleichheiten zwischen den einzelnen Zellen ausgleichen und bietet aufgrund der Redundanz ein besonders niedriges Ausfallrisiko.

2.2.5. Zelldynamiken

Nachdem aufgezeigt wurde, dass für den Betrieb einer V500 ein Akkublock mit einer 8s28p-Zellenschaltung geeignet ist, sollen nun die aus der Zusammenschaltung mehrerer Zellen resultierenden Dynamiken beleuchtet werden.

Bei der Zusammenstellung eines Akkublocks sollten immer nur Akkuzellen desselben Typs, d.h. desselben Herstellers und derselben Sorte, verwendet werden [14]. Hierdurch werden Effekte, welche aufgrund von Unterschieden zwischen den Zellen auftreten, deutlich verringert. Dennoch gibt es aufgrund von Herstellungstoleranzen auch bei Zellen desselben Typs Ungleichheiten, welche die Nutzung des Akkublocks beeinträchtigen können.

Es lassen sich vor allem drei Arten von Ungleichgewichten benennen [3] [18]: SOC-Ungleichgewicht, verschiedene Kapazitäten und unterschiedliche Innenwiderstände. Für in Serie geschaltete Zellen lässt sich Folgendes feststellen:

Unterschiedliche Ladezustände (SOC) bzw. Leerlaufspannungen kommen zum einen aufgrund von Ungenauigkeiten bei der Zusammenstellung des Akkublocks beim Hersteller zustande. Üblicherweise lädt der Hersteller alle Zellen auf denselben Ladezustand (üblich sind SOC = 50%) und verwendet entsprechend der tatsächlichen Leerlaufspannung möglichst ähnliche Zellen für denselben Batterieblock. Aufgrund der sehr flachen Spannungskurve von LiFePO₄-Akkus können hier Messungenauigkeiten im unteren einstelligen Millivoltbereich bereits zu signifikanten Abweichungen des tatsächlichen SOC kommen. Des Weiteren kommt es im Laufe der Zeit durch unterschiedliche Selbstentladungsraten der einzelnen Zellen ebenfalls zu unterschiedlichen Ladezuständen. Die Selbstentladungsrate wird dabei zum einen ebenfalls durch Herstellungstoleranzen und zum anderen durch unterschiedliche Zelltemperaturen beeinflusst. Verschiedene Ladezustände führen dazu, dass eine Zelle einen der Grenzwerte (Über- oder Unterspannung) früher erreicht als andere Zellen, sodass der Lade- bzw. Entladevorgang beendet wird, noch bevor alle Zellen den vollgeladenen bzw. leeren Zustand erreicht haben. Dies führt zu einer geringeren möglichen Nutzung der enthaltenen Energie. Die unterschiedlichen SOC lassen sich durch Ladungsausgleich, welcher von einer externen Beschaltung, gesteuert wird, beheben [3]. Ein solches Ladungsausgleichssystem wird häufig Balancingsystem genannt.

Die Kapazität einer Zelle kann ebenfalls von der nominell angegebenen Kapazität abweichen. Aufgrund der unterschiedlichen Kapazitäten ändert sich der SOC der einzelnen Zellen unterschiedlich schnell, obwohl derselbe Lade- bzw. Entladestrom fließt. Dies führt ebenfalls, wie oben beschrieben, zu einer geringeren Nutzung der vorhandenen Kapazität, da eine einzelne Zelle das Beenden des Ladens- bzw. Entladens auslöst. Die Kapazität ist bauartbedingt und lässt sich im Nachhinein nicht mehr ändern. Die Auswirkung auf die unterschiedlichen Ladezustände lässt sich hingegen durch Ladungsausgleich vermindern [18].

Ungleichheiten bei den Innenwiderständen führen zu unterschiedlichen Klemmenspannungen bei gleichem Stromfluss und Ladezustand. Dies führt ebenfalls zu einer geringeren Leistungsabgabe der Batterie aufgrund des Auslösens einer Abbruchbedingung durch eine Zelle.

Da der Spannungsabfall über dem Innenwiderstand erst bei hohen Strömen entscheidend ist, ist dies für das später in Abschnitt 3.2 vorgestellte Ladeverfahren unerheblich, da hier gegen Ende des Ladevorgangs ein geringer Strom fließt. Die Widerstandsunterschiede sind somit vor allem beim Entladen von Bedeutung. Ein Entgegenwirken dieses Effekts durch äußere Beschaltung ist nicht möglich [18].

Bei einer Parallelschaltung kommt es zu einem automatischen Ladungsausgleich zwischen den Zellen. Die Spannung bzw. die Leerlaufspannung und damit auch der Ladezustand gleichen sich immer auf dieselbe Höhe an. Ungleichheiten bei der Kapazität bzw. beim Innenwiderstand haben daher nur auf den Strom Einfluss, welcher durch die einzelnen Zellen fließt. Durch Zellen mit höherer Kapazität bzw. niedrigerem Innenwiderstand fließt dabei ein höherer Strom als durch die anderen Zellen. Hierauf kann durch eine externe Beschaltung kein Einfluss genommen werden. Damit keine Zelle aufgrund zu großer Ungleichheiten durch zu große Ströme belastet wird, müssen Akkus mit möglichst geringen Toleranzen in einem Block verbaut werden.

2.3. Anforderungen durch Kunden

Durch den Einsatz in Krankenhäusern entstehen für medizinische Geräte wie die V500 besondere Ansprüche. Dies bedeutet, dass auch die Batterieeinheit entsprechende Anforderungen erfüllen muss. Drei der Priorität nach geordnete Aspekte sind dabei entscheidend: 1. Die Geräte sind für den Patienten meistens lebensnotwendig. Ein unvorhergesehener Ausfall des Gerätes ist nicht akzeptabel und unter allen Umständen zu verhindern! 2. Krankenhauspersonal muss ohne besondere technischen Kenntnisse mit dem Gerät umgehen können und entsprechend des Akkuzustandes handeln können. Im Fokus muss immer der Patient sein, nicht die Wartung des Gerätes! 3. Durch den Akku sollen möglichst geringe Gesamtkosten entstehen.

Hieraus lassen sich detailliertere Anforderungen ableiten:

- Informationen über den Akku müssen einfach und klar gehalten werden. Verbleibende Akkulaufzeit sollte quantitativ in Stunden und Minuten angegeben werden.
- Informationen müssen verlässlich sein und dürfen keine falsche Genauigkeit vortäuschen
- Informationen über den Akku sollten so genau wie möglich sein (als Richtwert gilt mind. 20% beim SOC).
- Der Betrieb des Gerätes hat absolute Priorität. D.h. Betrieb geht vor Akkugesundheit.

- Eine deutliche Alarmierung wenige Minuten vor dem Ausfall des Gerätes aufgrund von leerer Batterie muss erfolgen. Auch nach einem evtl. Ausfall muss das Personal alarmiert werden (die hierfür notwendige Stromzufuhr muss über einen Ersatzakku oder Goldcap gesichert sein).
- Der Akku ist ein Verschleißteil, welches vom Personal während des Betriebes leicht auswechselbar sein muss.
- Außer dem ggf. notwendigen Auswechseln des Akkus sollte kein weiterer Pflegeaufwand für das Krankenhauspersonal entstehen.
- Um niedrige Gesamtkosten (TCO) zu verursachen, soll der Akku möglichst lange halten und muss dementsprechend durch das BMS geschützt werden.

Für diese aus der Sicht des Kunden formulierten Forderungen lassen sich einige daraus resultierende technische Anforderungen benennen:

Für das Krankenhauspersonal sollte bei einem Akkuwechsel außer dem Verbinden der entsprechenden Stecker und dem Platzieren des Akkus kein weiterer Aufwand notwendig sein. Der Wechsel des Akkus muss vom Gerät selbstständig erkannt werden. Dies erfordert zugleich eine notwendige Identifikation des Akkus und des Akkutyps. Damit der Akku vom Gerät richtig behandelt und in Betrieb genommen werden kann, müssen neben der Akkuchemie evtl. weitere Informationen, welche für eine Ladezustands- und Kapazitätsbestimmung notwendig sind, in der Akkueinheit gespeichert sein. Das Gerät muss diese ohne Eingaben des Personals selbstständig auslesen bzw. bestimmen und ausgeben können.

Abbruchbedingungen während der Entladung, wie die Abbruchspannung, müssen mit Fokus auf den Betrieb des Gerätes und nicht auf die Akkupflege ausgelegt werden! Ein plötzliches Öffnen des Stromkreises aufgrund kurzer Spannungs- oder Stromspitzen oder -einbrüche darf nicht erfolgen, sodass die hierfür relevanten Schwellwerte und Zeiten großzügig ausgelegt werden müssen, auch wenn dies auf Kosten der Langlebigkeit des Akkus geht.

2.4. Anforderungen durch Normen

Für medizinische Geräte gibt es aufgrund der möglichen schweren Folgen bei Ausfällen oder Fehlfunktionen einige Normen, die erfüllt werden müssen. Für den Batteriebetrieb eines Beatmungsgerät durch eine Li-Ionen-Batterie sind im wesentlichen drei Normen zu beachten: IEC60601 [11], IEC62133 [12] und ISO80601-2 [13]. Aus den Inhalten gehen folgende Forderungen hervor:

- Die Zellspannung einer jeden Zelle muss überwacht werden und ggf. zum Beenden des Ladevorgangs führen [12].
- Die Begrenzung des maximalen Ladestroms soll redundant ausgelegt sein [11].
- Hochpriorisierter Alarm muss spätestens fünf Minuten vor Ausfall des Gerätes erfolgen [13] (Ein entsprechender Alarm müsste fünf Minuten plus Messungenauigkeit vorher erfolgen!).
- Der Akkublock muss mit einer Schutzschaltung versehen sein [12].
- Personal muss über den Batteriezustand und den Betrieb des Gerätes (Netz- oder Batteriebetrieb) informiert werden [11].
- Bei einem Wechsel von Netz- auf Akkubetrieb muss ein Infosignal erfolgen [13].
- Eine qualitative Anzeige der verbleibenden Kapazität oder Betriebszeit ist erforderlich [13].

Diese Forderungen decken sich somit größtenteils mit den bereits in den Abschnitten 2.2 und 2.3 erarbeiteten. Weitere Forderungen in den Normen, wie z.B. das vorgeschriebene Risikomanagement (IEC60601), werden in dieser Arbeit nicht behandelt, da sie bei dem Konzeptentwurf eines BMS nicht von Bedeutung sind.

3. Analyse

Der Begriff „Batterie-Management-System“ (BMS) ist in der Literatur nicht einheitlich definiert. Je nach Autor sind in einem BMS unterschiedlich viele Funktionen inbegriffen. Dies gilt ebenfalls für Hersteller von Batteriesystemen. Die in der Einführung genannten Aufgaben eines BMS (Maximierung der Sicherheit, der nutzbaren Kapazität bzw. Energie und der Akku-Lebensdauer) können viele der mit BMS angebotenen Batteriesysteme nur teilweise bewältigen.

Für medizinische Geräte ergeben sich gemäß dem Kapitel 2 notwendige Funktionen, aus denen sich ein geeignetes BMS zusammensetzt. In Anlehnung an [14] lässt sich das BMS in drei Bereiche unterteilen: Die Sicherheitsfunktionen, das elektrische Management und die Analysefunktionen. Außerdem muss es die gewonnenen Daten dem Gerät mitteilen, sodass eine Kommunikationsschnittstelle erforderlich ist. In diesem Kapitel sollen die Funktionen analysiert, sowie die üblichen Umsetzungen in Hardware bzw. Algorithmen beschrieben werden. Eine genaue Untersuchung der vorhandenen Lösungen, welche als integrierte Schaltungen erhältlich sind, erfolgt im anschließenden Kapitel 4.

3.1. Sicherheitsfunktionen

Die Sicherheitsfunktionen bestehen aus der Temperatur-, Spannungs- und Strombegrenzung. Sie sind aufgrund der Sensibilität des Akkus gegenüber diesen Größen notwendig (s. Abs. 2.2). Die Grenzwerte hierfür sind vor allem chemie- und zum Teil herstellerabhängig. Für einen Akkutyp können sie entsprechend der Herstellerangaben ermittelt und festgesetzt werden. Typischerweise sind Grenzwerte der Sicherheitsfunktionen unabhängig vom individuellen Akkublock und dessen Zustand. Sie lassen sich wie folgt zusammenfassen.

Temperaturbegrenzung: Vor allem bei zu hohen Temperaturen ($>100^{\circ}\text{C}$) besteht ein Sicherheitsrisiko. Sie können bei hohen Strömen auftreten. Ein Auftrennen des Stromkreises oder eine Reduzierung des Stroms kann zu einer Abkühlung des Akkus führen. Zu niedrige Temperaturen kommen im Krankeneinsatz normalerweise nicht vor. Daher ist eine thermische Sicherung in Reihe zum Akku bereits völlig ausreichend.

Soll die Temperatur genauer bestimmt werden, kommen meist NTCs/PTCs zum Einsatz. Eine Genauigkeit von 3-5°C ist bereits ausreichend.

Spannungsbegrenzung: Die für den Akku schädliche Überspannung, welche ebenfalls ein Sicherheitsrisiko darstellt, entsteht durch Anlegen einer zu hohen Spannung. Der Stromkreis sollte in einem solchen Fall unterbrochen werden (wobei einzelne Spannungsspitzen kein Auslöser sein sollten!). Eine zu niedrige Spannung ist vor allem für die Lebenszeit eines Akkus schädlich. Sie kommt bei entsprechender Auslegung des Akkublocks (s. Abs. 2.2.4) während des Betriebs nur bei zu großen Zellungleichheiten vor. Ein entsprechender Schwellwert sollte aufgrund der Priorität des Betriebs möglichst niedrig ausgelegt werden. Des Weiteren kann es durch den Energieverbrauch des BMS während Leerlaufphasen zu einer Tiefentladung kommen. Diese sollte allerdings durch selbstständiges Abschalten der entsprechenden Energieverbraucher verhindert werden. Für die Spannungsbegrenzungen müssen alle Zellspannungen überwacht werden. Dies geschieht meist mit fest eingestellten Komparatoren. Um Komponenten zu sparen, werden über Multiplexer die Zellspannungen der Reihe nach abgegriffen.

Strombegrenzung: Der Strom muss nur nach oben hin begrenzt werden. Außer kurzen Stromspitzen, welche beim Einschalten von Komponenten auftreten können, treten zu hohe Ströme nur im Fehlerfall (typisch: Kurzschluss) auf. Daher ist dies so schnell wie möglich (Mikrosekundenbereich, [3]) durch Auftrennen des Stromkreises zu unterbinden. Hierfür sind MOSFETs in Reihe zur Batterie eine einfache und günstige Umsetzung. Zur Messung des Stromes, welche häufig eher für das elektrische Management interessant ist, werden zumeist kleine Shuntwiderstände (ein- bis zweistelliger Milliohm-Bereich) eingesetzt. Über diesen wird die Spannung gemessen und daraus der Strom ermittelt. Für einen redundanten Schutz kommen noch häufig Sicherungen zum Einsatz, die allerdings etwas träger reagieren.

3.2. Elektrisches Management

Die unter elektrisches Management fallenden Funktionen reagieren gegenüber denen der Sicherheit nicht auf statische Schwellwerte, sondern entsprechend des Zustandes der Batterie. Hierzu gehören die Steuerung des Ladevorgangs, evtl. anfallende Maßnahmen während des Entladens (Energiemanagement) und der Ladungsausgleich zwischen den einzelnen Zellen (Balancing).

3.2.1. Lade-Management

Beim Laden der Batterie werden normalerweise zwei Ziele verfolgt: Das Laden soll möglichst schnell und möglichst akkuschonend ablaufen. Der maximale Ladestrom hängt dabei zum einen vom Akkutyp und zum anderen von der Temperatur ab. Bei niedrigen Temperaturen ($<10^{\circ}\text{C}$) sollte nur noch ein geringer Ladestrom verwendet werden, da es sonst zu Schäden innerhalb der Akkuzellen kommen kann [6]. Beim Einsatz im Krankenhaus sind Temperaturen kleiner 15°C nicht zu erwarten, sodass dies vernachlässigt werden kann. Des Weiteren wird empfohlen, den Ladevorgang frühestens bei einer Entladetiefe von 5% einzusetzen, da sonst das häufige Anliegen der vollen Ladespannung die Lebenszeit des Akkus verringern kann [3].

Das am häufigsten empfohlene Ladeverfahren ist die IUa-Ladung (engl. constant current constant voltage, CCCV) [14]. Ein typischer Strom- und Spannungsverlauf ist in Abb. 3.1 zu sehen. Es besteht aus drei Phasen: Der Vorladephase (precharge), der Konstantstromphase (CC) und der Konstantspannungsphase (CV). Während der Vorladephase wird ein geringer Strom (typ. $1/10$ der CC-Phase) zum Laden verwendet [3]. Dies dient der Erkennung von defekten Akkus und minimiert das Risiko, einen tiefentladenen Akku durch einen zu hohen Ladestrom zu schädigen. Steigt die Spannung des Akkus innerhalb einer vorgegebenen Zeit nicht über den Schwellwert, so wird der Akku als defekt erkannt und der Ladevorgang abgebrochen (z.B.: LiFePO₄-Akku muss nach 30min über 2,6-2,9V Zellspannung aufweisen) [3]. Reagiert die Batterie normal, so wird beim Erreichen des Schwellwertes der höhere Ladestrom der CC-Phase verwendet. Erreicht die Batterie die Ladeschlussspannung, verringert sich der Strom. In dieser CV-Phase wird die Ladespannung weiterhin konstant angelegt, bis der Strom unter einen vorher definierten Ladeschlussstrom (typ. $1/8 - 1/30$ der CC-Phase) fällt [14]. Dann wird die Batterie als vollgeladen angenommen und der Ladevorgang beendet. Normalerweise wird für jede Phase neben den Spannungsschwellwerten eine Maximalzeit festgesetzt, welche zu einem Abbruch des Ladevorgangs führt. Dies ist eine zusätzliche Sicherheitsmaßnahme, um bei einem abnormalen Verhalten der Batterie das Laden nicht fortzuführen [3].

Wie bereits in Abs. 2.2.1 erwähnt, haben LiFePO₄-Akkus ein sehr gutes Hochstromverhalten. Daher lassen sie sich theoretisch sehr schnell laden. Da das Netzteil der V500 eine Ladeleistung von ca. 100W hat (was bei der mittleren Spannung einer 8s-Serienschaltung von $8 \cdot 3,3\text{V} = 26,4\text{V}$ einem Strom kleiner 4A entspricht), ist hier das Netzteil und nicht der Akku die begrenzende Komponente.

Für die Anwendung dieses Ladeverfahrens kann ein Netzgerät, welches automatisch zwischen CC- und CV-Betrieb umschaltet, verwendet werden. Die zusätzliche Strombegrenzung in der Vorladephase kann dabei mit einem in Serie schaltbaren Widerstand realisiert werden. Für eine komfortablere Umsetzung ist ein programmierbares Netz-/Ladegerät notwendig.

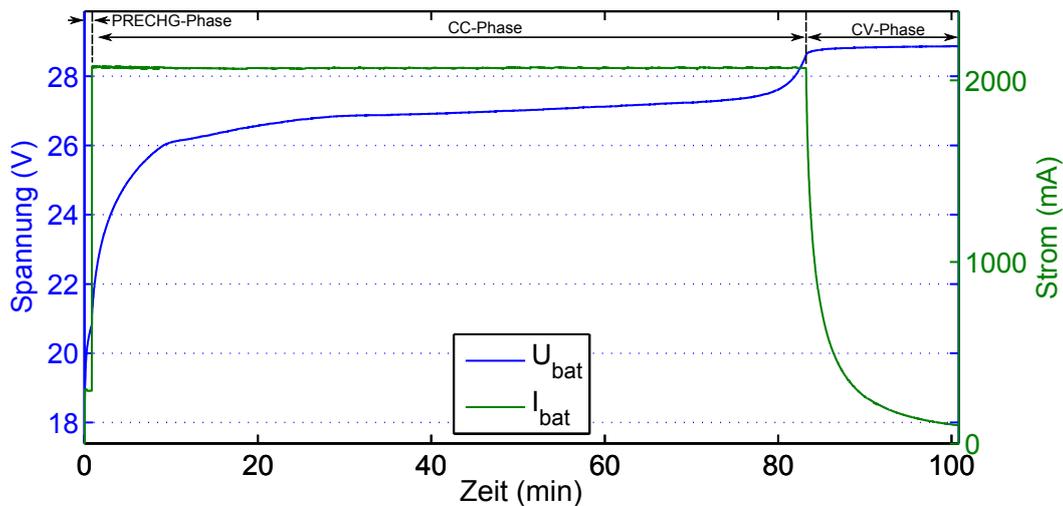


Abbildung 3.1.: CCCV-Ladekurve eines 8s3p-Akkublocks (Nennkapazität 3,3Ah)

3.2.2. Energie- und thermisches Management

Energiemanagement: Ist für die Maximierung der Laufzeit im Akkubetrieb zuständig und kommt während des Entladens zum Einsatz [14]. Hierfür wird bei niedrigen Ladezuständen der Strom durch das BMS begrenzt. Dies ist für medizinische Geräte so nicht praktikabel. Eine mögliche Verringerung der Leistungsaufnahme (Displayhelligkeit reduzieren etc.) muss vom Gerät selber geprüft und gesteuert werden und ist nicht Aufgabe des BMS. Das in dieser Arbeit entwickelte BMS wird daher kein solches Energiemanagement beinhalten, da es für den vorgesehenen Einsatzbereich nicht sinnvoll ist.

Thermisches Management: Ist für die Regulierung der Temperatur zuständig. Dabei sollen die Zelltemperaturen innerhalb des Arbeitsbereiches ($<60^{\circ}\text{C}$) und die Temperaturunterschiede zwischen den Zellen möglichst gering gehalten werden (vgl. Abs. 2.2.5) [18]. Während des Ladens kann die Maximaltemperatur über den Ladestrom reguliert werden. Die Begrenzung des Entladestroms könnte dies ebenfalls bewerkstelligen, ist allerdings bei medizinischen Geräten nur sehr gering bis gar nicht möglich. Eine weitere Möglichkeit bietet der Einbau von Lüftern oder anderen Kühlungssystemen um den Akkublock herum. Da die Notwendigkeit vor allem von dem Aufbau des Gehäuses abhängig ist und somit von der Konstruktion, wird dies in dieser Arbeit nicht weiter behandelt. Es kann davon ausgegangen werden, dass ein solches thermisches Management für die V500 aufgrund der geringen Ströme ($<C/6$ -Rate) nicht notwendig ist.

3.2.3. Balancing

Das Angleichen von Zellladezuständen wird auch Balancing genannt. Dabei soll den Auswirkungen aufgrund von Inhomogenitäten zwischen den Zellen eines Akkublocks entgegengewirkt werden. Dies führt zu einer besseren Nutzung der in der Batterie vorhandenen Energie (s. Abs. 2.2.5).

Beim Balancing lassen sich zunächst zwei Ansätze unterscheiden: Das passive und das aktive Balancing. Beim passiven Balancing werden Zellen mit höherem Ladezustand über zugeschaltete Widerstände entladen, sodass sich die Ladezustände aller Zellen angleichen [18]. Die überschüssige Ladung wird dabei in Wärme umgewandelt. Dementsprechend ist dieses Verfahren höchst ineffizient und kann bei schlechtem Aufbau der Batterieeinheit zu einer Erhöhung der Akkutemperatur führen. Außerdem ist das passive Balancing nur während der Ladephase sinnvoll. Da für die Umsetzung neben der ohnehin notwendigen Spannungsmessung bereits ein MOSFET und ein Widerstand pro Zelle ausreichen, ist der Hardwareaufwand sehr gering (s. Abb. 3.2). Der Algorithmus ist zudem einfach, sodass die geringen Kosten ein großer Vorteil des passiven Balancings sind.

Höhere Kosten entstehen in der Regel beim aktiven Balancing. Unter diesem Begriff versteht man das Umladen der überschüssigen Ladungen von Zellen mit höherem Ladezustand zu Zellen mit niedrigerem Ladezustand [18]. Für die Umsetzung gibt es verschiedene Varianten, bei denen jeweils Sperrwandler, Kondensatoren oder Induktivitäten eingesetzt werden - häufig auch in Kombination miteinander [18]. Das aktive Balancing ist während des Lade- und Entladevorgangs möglich und erreicht einen hohen Wirkungsgrad [3]. Es ist besonders vorteilhaft bei energiereichen Systemen oder Anwendungen, bei denen nicht absehbar ist, wann der Akku wieder geladen werden kann. Ein Nachteil gegenüber dem passiven Balancing ist der bereits erwähnte höhere Entwicklungs- und Materialaufwand.

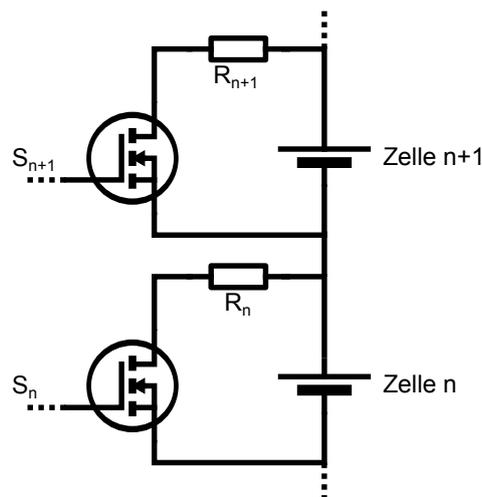


Abbildung 3.2.: Schaltkreis für ein passives Balancing

Unabhängig von der Art des Balancings ist auch die zugrundeliegende Messgröße entscheidend. So kann der jeweilige Balancingalgorithmus sich auf die Zellspannungen oder die Zell-SOCs beziehen. Das Balancing auf Grundlage der Zell-SOCs ist an sich das bessere Verfahren, da der Zweck des Balancings gerade im Ausgleich des Zell-SOCs besteht. Dies bedeutet allerdings, dass der SOC für jede einzelne Zelle bestimmt werden muss. Hierfür ist ein größerer Aufwand notwendig (vgl. Abs. 3.3.1), sodass häufig die Zellspannung als Messgröße dient. Dies kann wiederum im ungünstigen Fall dazu führen, dass durch das Balancing die unterschiedlichen Ladezustände vergrößert werden [3]. Eine Zelle kann einen niedrigeren SOC und gleichzeitig einen höheren Innenwiderstand als eine andere haben. Ist der Stromfluss ausreichend groß, wird während des Ladens an der Zelle mit dem geringeren SOC dennoch eine höhere Spannung anliegen und dieser Zelle evtl. durch das Balancing Ladung entnommen. Für das Entladen kann eine ähnliche Situation entstehen, wenn die Zelle mit geringerem SOC auch einen deutlich geringeren Innenwiderstand als die andere Zelle hat. Da die Toleranzen bei den Innenwiderständen häufig größer sind, als bei den Zell-SOCs [3], ist das Auftreten solcher Situationen durchaus möglich. Daher ist es sinnvoll spannungsbezogenes Balancing während des Ladens erst gegen Ende, d.h. in der CV-Phase, einzusetzen. Während dieser Phase fließt nur noch ein geringer Strom, sodass Spannungsunterschiede aufgrund der verschiedenen Innenwiderstände deutlich geringer sind. Für das aktive Balancing während des Entladens ist es ebenfalls sinnvoll, dieses erst gegen Ende durchzuführen. Hier sind die Spannungsunterschiede zwischen verschiedenen Ladezuständen deutlich größer (s. Abb. 2.1), sodass diese die Unterschiede durch den IR-Spannungsabfall überwiegen [3].

Bei der Wahl eines geeigneten Balancing-Systems ist neben den Kosten und dem Wirkungsgrad noch die Schnelligkeit entscheidend. Wie gezeigt wurde, ist das Zeitfenster in dem Balancing sinnvoll ist sehr begrenzt. Das Balancing-System muss für geeignet hohe Ströme ausgelegt werden, um eine hohe Zellgleichheit zu erreichen. Ein genauer Wert hierfür ist von der Gesamtkapazität, dem Akkutypen, dessen Herstellungstoleranzen und der gewählten C-Rate, bei welcher der Ladevorgang beendet wird, abhängig und können im Vorfeld nur geschätzt werden.

3.3. Analysefunktionen

In den vorhergehenden Abschnitten ging es vor allem um die richtige Beschaltung und Handhabung des Akkus. Die vorgestellten Funktionen laufen dabei im Hintergrund ab. Der Benutzer des Gerätes bekommt im Idealfall hiervon nichts mit. Von besonderem Interesse des Benutzers sind hauptsächlich Informationen über den Akkuzustand und die verbleibende Laufzeit. Hierfür gibt es verschiedene Werte und Methoden. Die für das bedienende Personal bzw. Servicetechniker wichtigsten vier Werte werden in den nächsten Abschnitten näher

erläutert. In der Literatur und einige Chiphersteller benennen teilweise noch weitere Größen. Diese sind jedoch eher bei der Entwicklung von Interesse und werden hier nicht weiter behandelt.

3.3.1. Ladezustand (SOC)

Der wohl am häufigsten diskutierte Wert ist der Ladezustand, welcher vorrangig als State-of-Charge (SOC) bezeichnet wird. Physikalisch gesehen, gibt der SOC die Menge der in der Batterie verbleibenden aktiven Masse an. Aus technischer Sicht entspricht dies der enthaltenen Ladungsmenge [18]. Der SOC kann dabei in Einheiten von Kapazität (Ah) oder in Einheiten von Energie (Wh) angegeben werden [3]. Für Konstantleistungsanwendungen wie der V500 ist die Angabe in Energie sinnvoller. Da sie über die chemietypische Spannungs-kurve der Batterie mit der Kapazität zusammenhängt, ist es unerheblich, wenn im Folgenden bei der Beschreibung der Methoden der sonst in der Literatur häufiger auftauchende Begriff der Kapazität verwendet wird. Mathematisch lässt sich der SOC wie folgt definieren [3]: $SOC = (E_{useable} - E_{used}) \cdot 100 / E_{useable}$.

Der SOC wird somit in Prozent in Bezug auf die vollgeladene Batterie angegeben. Hierbei gibt es allerdings keine einheitliche Definition, was als vollgeladener (SOC = 100%) und was als entleerter Zustand (SOC = 0%) angesehen wird. In Anlehnung an [15] lassen sich die drei in Abb. 3.3 gezeigten Definitionen benennen.

Neben der Definition des chemischen SOC's (vgl. Abs. 2.2.1) kommen noch zwei weitere Definitionen hinzu. Dies ist sinnvoll, da der chemische SOC sich auf die komplett in der Batterie enthaltene Ladungsmenge bezieht. Bei vielen Anwendungen tritt der entleerte Zustand hingegen nie auf. So fällt bei der V500 und einer 8s-Schaltung im Normalfall die Zellspannung nicht unter 2,25V. Um diesem Fall Rechnung zu tragen, ist die Definition des spezifi-

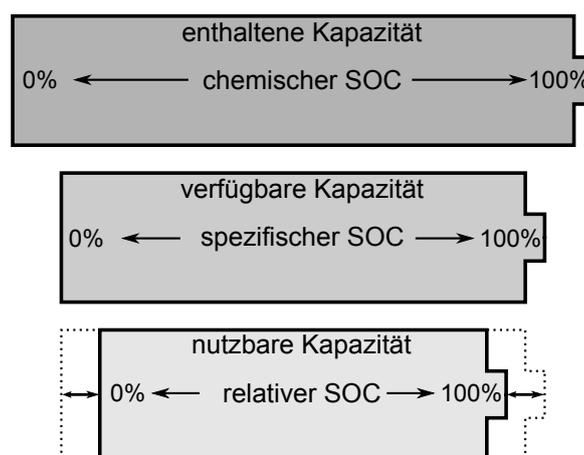


Abbildung 3.3.: SOC Definitionen

schen SOC's nützlich. Hierbei wird der bei der Mindestspannung des Gerätes vorhandene Ladezustand als 0% definiert. Der vollgeladene Zustand wird auf die beim Ladeschluss gemessene Ladungsmenge bezogen. Bei dem in Abs. 3.2 vorgestellten CCCV-Ladeverfahren wird bei dem Unterschreiten eines bestimmten Ladestroms das Laden beendet. Hierbei entsteht eine Differenz zur tatsächlich möglichen Ladungsmenge. Des Weiteren wird hierdurch die mit dem Altern sinkende Kapazität berücksichtigt. Der spezifische SOC gibt somit den Ladezustand für ein konkretes Akkupack in einem konkreten Gerät an und bezieht sich auf die verfügbare Kapazität.

Die für den Anwender nutzbare Kapazität wird durch den relativen SOC (rSOC) angegeben [3]. Der rSOC berücksichtigt die Tatsache, dass sich die Klemmenspannung entsprechend dem Entladestrom einstellt und bei hohen Strömen die Gerätemindestspannung ggf. deutlich früher erreicht wird (s. Abb. 2.1). Die tatsächlich nutzbare Kapazität ist daher häufig geringer als die verfügbare Kapazität. Zu beachten ist beim rSOC, dass dieser durch Senkung des Entladestroms zunächst größer wird, da bei geringerem Strom mehr Kapazität genutzt werden kann.

Da sich die drei Definitionen nur in ihren Bezugspunkten unterscheiden, ist immer die Bestimmung des chemischen SOC's notwendig. Dieser lässt sich allerdings nicht direkt zerstörungsfrei messen. Neben einigen in Laboren durchführbaren Methoden zur genaueren SOC-Abschätzung, gibt es auch für den Einsatz im Gerät verschiedene Ansätze. Sie beziehen sich auf eine oder mehrere der einfach zu messenden Größen Spannung, Strom und Temperatur und leiten hiervon den SOC ab. Die wichtigsten sollen hier vorgestellt werden.

Voltage Method

Die Grundidee hierbei ist die Relation zwischen SOC und der Leerlaufspannung (OCV) zu nutzen. Dabei ist die OCV eine Funktion des SOC's und der Temperatur $OCV = f(SOC, T)$ (s. Abs. 2.2.1). Da diese Beziehung vor allem chemieabhängig ist und sich kaum über die Lebenszeit einer Batterie ändert, ist es ein durchaus sinnvoller Ansatz [6]. Das Problem ergibt sich allerdings im realen Einsatz. Die tatsächliche Leerlaufspannung stellt sich in LiFePO₄-Batterien erst nach einigen Stunden der Ruhephase ein [6]. Da der SOC vor allem während des Betriebs von Interesse ist, wird die OCV von der tatsächlichen Klemmenspannung während des Betriebs abgeleitet. Diese ist allerdings eine Funktion mehrerer Parameter und lässt sie sich in Ergänzung zu Abs. 2.2.1 wie folgt schreiben: $U_{kl} = f(OCV, I, R_i, hist.)$. I entspricht dabei dem Strom, R_i ist der Innenwiderstand der Batterie und 'hist.' die Vorgeschichte. Während OCV die Größe ist, welche durch U_{kl} bestimmt werden soll und der Strom gut messbar ist, stellen die beiden letzteren Parameter eine deutlich größere Herausforderung dar. Der Innenwiderstand ist wiederum (wie in Abs. 2.2.1 gezeigt) eine Funktion des SOC's, der Temperatur und im geringen Maße des Alters. Die Abhängigkeit der Klemmenspannung von der nahen Vorgeschichte wurde in [17] für LiFePO₄-Akkus gezeigt und ist in Abb. 3.4 dar-

gestellt. Ist die Ladeschlussspannung eines Zyklus niedriger als die Maximalladespannung, so weist die Spannungskurve der folgenden Zyklen zwischen jener Ladeschlussspannung und der Maximalladespannung einen erhöhten Spannungsverlauf auf. Der Effekt nimmt mit weiteren Zyklen ab. Hinzu kommt, dass LiFePO₄-Akkus eine sehr flache Entladekurve besitzen (vgl. Abb. 2.1), sodass Messfehler im einstelligen Millivoltbereich bereits zu signifikanten Fehlern bei der SOC-Bestimmung führen können. Die Bestimmung des SOC über die OCV ist somit recht komplex. Die direkte Bestimmung der OCV ist hingegen aufgrund der notwendigen Wartezeit nicht sehr praktikabel und als alleinige Bestimmungsmethode für den Einsatz in medizinischen Produkten nicht geeignet.

Als Hardware kann ein Analog-Digital-Konverter (ADC) eingesetzt werden. Die Genauigkeit sollte im Bereich kleiner gleich 1 mV sein. Für eine ausreichende Auflösung mit einem Auflösungsfehler derselben Größe ist somit bei einem Akkublock bis 30V eine effektive Auflösung von 15Bit notwendig.

Die Bestimmung des SOC jeder einzelnen Zelle ist mit dieser Methode ebenfalls möglich und kann die Genauigkeit der Abschätzung erhöhen. Das Prinzip ist dasselbe, jedoch erhöht sich der Aufwand, da alle Zellspannungen gemessen werden müssen. Der Hardwareaufwand ist je nach BMS nicht viel größer, da für die Sicherheitsfunktionen bereits die einzelnen Zellspannungen abgegriffen werden müssen. Hingegen steigt der Rechenaufwand deutlich, sodass häufig die Bestimmung des SOC über die Blockspannung vorgezogen wird.

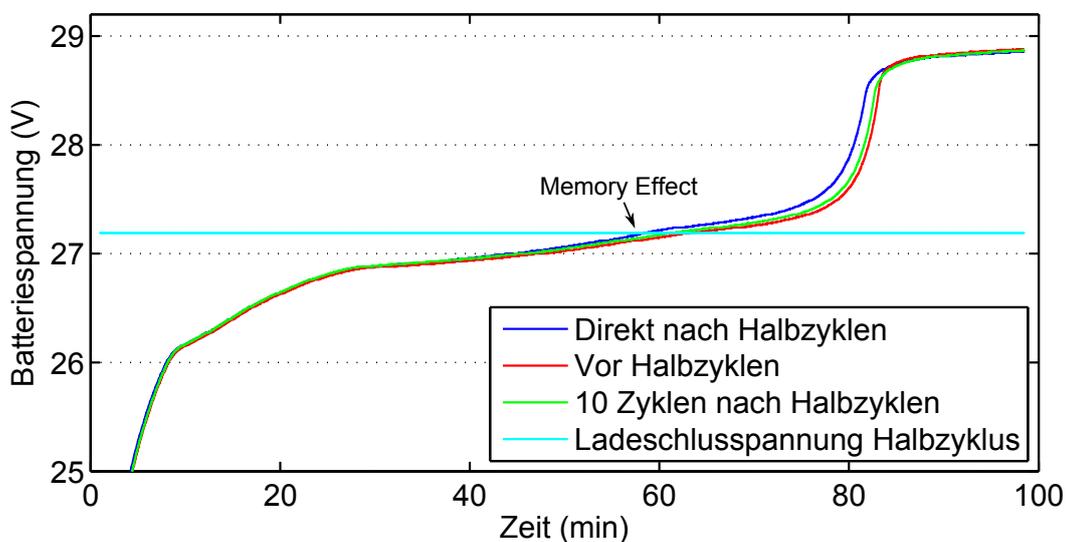


Abbildung 3.4.: Memoryeffekt bei LiFePO₄-Akkus (hier: 8s3p-Schaltung; die Spannungskurve weist ab der Ladeschlussspannung des vorherigen Zyklus eine erhöhte Spannung auf)

Coloumb Counting

Dieses bilanzierende Verfahren wird auch als Current Integration bezeichnet. Der Strom, welcher sowohl in, als auch aus der Batterie fließt, wird dabei mitgezählt bzw. über die Zeit integriert. Der SOC lässt sich über die Funktion

$$SOC = SOC_0 - \frac{1}{C} \int_{t_0}^t I(\tau) d\tau \quad (3.1)$$

[15] bestimmen. SOC_0 gibt dabei den SOC zum Zeitpunkt t_0 an. Hierbei treten jedoch einige Probleme auf: Zum einen muss der Anfangs SOC_0 bekannt sein, damit von dort an der SOC richtig angegeben werden kann [6]. Des weiteren kommt es durch Messungenauigkeiten zu einem akkumulierten Fehler, welcher mit der Zeit größer wird. Hinzu kommt, dass die Effizienz der Batterie nicht bei 100% liegt, sodass nicht alle eingespeisten Ladungen der Batterie entnehmbar sind. Die Selbstentladungsrate kann zudem nicht gemessen werden [3].

Das Coloumb Counting stellt eine einfache und solide Methode für die SOC-Abschätzung dar, welche einen sehr geringen Entwicklungsaufwand erfordert. Es ist als solches allerdings bei langem Einsatz unzureichend. Für die Verbesserung des Algorithmus kann die Effizienz der Batterie gemessen und in Form eines Faktors mit in die Gleichung aufgenommen werden. Um den akkumulierten Messfehler zu verkleinern, werden häufig die Zustände „vollgeladen“ und „leer“ der Batterie zur Fehlerkorrektur genutzt [3]. Das komplette Entladen des Akkus ist bei medizinischen Geräten nicht gewünscht und daher nicht zu erwarten. Die Fehlerkorrektur bei Vollladung hat die Schwierigkeit, dass sie die mit dem Alter der Batterie abnehmende Kapazität berücksichtigen muss (dessen Bestimmung je nach Methode auch eine entleerte Batterie benötigt). Eine Verbesserung bringt das Verwenden weiterer Ladezustände als Korrekturpunkte [3]. Die Einführung von sehr vielen Korrekturpunkten führt zu einer Kombination aus der Voltage Method und dem Coloumb Counting (s. unten). Die möglichen Verbesserungen erhöhen jedoch den notwendigen Entwicklungsaufwand des Algorithmus.

Für die Umsetzung des Coloumb Countings wird häufig ein Shunt in Serie zur Batterie geschaltet über dem die abfallende Spannung zur Strombestimmung gemessen wird. Zu berücksichtigen ist, dass normalerweise die Stromversorgung des BMS hierdurch nicht erfasst wird.

Voltage Method + Coloumb Counting

Beide genannten Methoden sind einfach zu handhaben, besitzen allerdings Nachteile, welche sich durch die Kombination beider Methoden deutlich verringern lassen. So bildet das Coloumb Counting die Grundlage der SOC-Schätzung. Die Voltage Method kommt bei der

Bestimmung des Anfangs SOC's und der Fehlerkorrektur zum Einsatz. Neben dem akkumulierten Fehler lässt sich auch die Abweichung aufgrund der Selbstentladungsrate und der nicht gemessenen Stromversorgung des BMS ausgleichen. Dabei wird die OCV in den Ruhephasen gemessen und die komplexere Bestimmung der OCV über die Spannung während des Betriebs ausgelassen.

Bei Beatmungsgeräten ist aufgrund von langen Phasen der Netzversorgung oder teilweiser Nichtnutzung mit auftretenden längeren Ruhephasen für die Batterie zu rechnen. Somit stellt diese Methode eine geeignete Variante dar. Vorteilhaft sind dabei vor allem der geringe Hard- und Softwareaufwand.

Impedance Tracking

Das Impedance Tracking ist ein von der Firma Texas Instruments patentiertes Verfahren. Es bezieht sich nicht nur auf die Bestimmung des SOC, sondern auch auf die des State-of-Health (s.unten) und andere Parameter. Im wesentlichen beruht es auf der oben genannten Kombination aus der Voltage Method und dem Coloumb Counting. Zusätzlich wird die Gesamtkapazität der Batterie auch ohne einen kompletten Lade-Entlade-Zyklus bestimmt. Diese wird über den zwischen zwei Ruhephasen, d.h. zwei OCV-Messungen, geflossenen Strom gemäß der Gleichung $Q_{max} = Q_{pass} / (SOC2 - SOC1)$ bestimmt. Ein weiterer Zusatz stellt ein Temperaturmodell dar, welches verwendet wird, um die zukünftige Impedanz und somit die verbleibende Laufzeit besser vorherzusagen [3].

Fertige Integrierte Schaltkreise, welche den Algorithmus beinhalten, sind käuflich zu erwerben und bieten somit einen geringen Entwicklungsaufwand.

Weitere Verfahren

Es gibt noch weitere Methoden zur SOC-Abschätzung. Bei den modellbasierten Verfahren werden elektrische oder elektrochemische Modelle für die Batterie entwickelt, welche mithilfe der Eingangsgrößen Strom, Spannung und Temperatur eine SOC-Abschätzung liefern. Zu nennen sind noch Methoden, welche künstliche neuronale Netzwerke für eine Bestimmung einsetzen. Diese Methoden haben den Nachteil, dass sie einen deutlich höheren empirischen Aufwand bei der Entwicklung und teilweise einen größeren Rechenaufwand zur Laufzeit erfordern [6].

3.3.2. Verbleibende Laufzeit (TTE)

Die verbleibende Laufzeit (engl.: time to empty, kurz: TTE) ist die absolute Form des rSOC und wird in Stunden und Minuten angegeben. Gibt der rSOC den Ladezustand in Bezug auf die verfügbare Kapazität bzw. Energie an, so gibt die TTE die unter den aktuellen Bedingungen zu erwartende Restlaufzeit an. Dass eine quantitative Angabe wünschenswert ist, wurde bereits in Abs. 2.3 erwähnt. Ein kurzes Beispiel soll dies verdeutlichen: Angenommen ein Gerät wird von einer Konstantstromanwendung bei einer 1C-Rate entladen. Dann beträgt der rSOC fünf Minuten bevor die Gerätemindestspannung erreicht wird $5\text{min}/1\text{h} = 8,3\%$. Erfordert das Gerät allerdings eine 10C-Rate, so beträgt der rSOC fünf Minuten bevor das Gerät ausgeht $5\text{min}/0,1\text{h} = 83\%$. Eine qualitative Anzeige muss somit je nach Gerät, dessen Betriebsart und verbautem Akku interpretiert werden. Für Krankenhauspersonal, welches an einem Arbeitstag mehrere verschiedenen akkubetriebene Geräte bedienen muss, ist dies eine unkomfortable Situation.

Für eine gute Vorhersage der TTE ist eine möglichst genaue Abschätzung des zukünftigen Energieverbrauchs notwendig. Eine Möglichkeit hierfür ist die bisher vom Gerät durchschnittlich verbrauchte Energie als Vorhersagewert zu nehmen.

Wird der TTE angegeben, so ist die SOC-Anzeige dennoch weiterhin interessant, da über sie deutlich wird, wann der Akku vollgeladen ist.

3.3.3. Batteriezustand (SOH)

Bei der Angabe des Batteriezustandes, dem State-of-Health (SOH), gibt es ebenfalls keine einheitliche Definition. Grundsätzlich wird der Zusammenhang zwischen gebrauchter bzw. gealterter und einer neuen Batterie in Prozent dargestellt.

Der SOH kann in Bezug auf die Kapazität oder auf den Innenwiderstand angegeben werden [8]. Die Kapazitätsschätzung ist für das BMS dieser Arbeit vorzuziehen. Grund hierfür ist, dass bei LiFePO₄-Akkus der Verlust an aktiver Masse und damit an Kapazität der dominante Alterungsmechanismus ist (s. Abs. 2.2.3). Ein SOH von 100% entspricht dabei der chemischen Gesamtkapazität einer neuen Batterie bei Raumtemperatur. Sinkt die Gesamtkapazität unter ähnlichen Bedingungen unter einen gesetzten Schwellwert, so gilt die Batterie als unbrauchbar und muss gewechselt werden [3]. Ein solcher Schwellenwert muss je nach Akkutyp und Anwendung ermittelt werden. In der Automobilindustrie wird häufig ein SOH von 80% als Gebrauchsende definiert.

Der SOH muss dem Personal nicht ständig bekannt sein. Da das Gebrauchsende das Überschreiten des Schwellwertes und nicht das Versagen der Batterie bedeutet, ist dies im Normalfall kein sensibler Wert. Eine Information an das Personal, wenn der Akku sein Gebrauchsende erreicht hat, ist daher ausreichend.

Methoden

Für die SOH-Bestimmung gibt es verschiedene Methoden. Eine einfache Methode ist das Fahren von einem vollen Lade-Entladezyklus [6]. Hier kann über das oben erwähnte Coulomb Counting die aktuelle Gesamtkapazität ermittelt werden. Dies ist aufgrund des nicht erwünschten Entladezustandes während des Betriebs nicht machbar. Denkbar wäre, einen Modus im Gerät zu implementieren, welcher vom Personal bei Nicht-Nutzung des Gerätes aufgerufen werden kann, welcher automatisch einen vollen Lade-Entladezyklus fährt. Da ein gutes BMS eine falsche Benutzung des Akkus und damit ein schnelles Verschlechtern des SOHs verhindert, ist ein solcher Lernzyklus nur in zumutbaren Zeitabständen (einige Wochen) notwendig.

Eine weitere einfach zu implementierende Methode ist das Zählverfahren [6]. Hierbei werden Größen wie die Temperatur, Zyklenzahl oder aufsummierte Ladeströme über die Lebenszeit der Batterie mitgezählt und anhand dieser der aktuelle Batteriezustand bestimmt. Der Nachteil dieser wie auch weiterer Methoden (s. hierzu [6]) ist, dass der Aufwand in der Entwicklung größer und zeitaufwändiger ist, da im Vorfeld genügend empirische Daten für eine gute Bestimmung des SOH gewonnen werden müssen.

3.3.4. Verbleibende Lebenszeit (RUL)

Die absolute Form vom SOH ist die verbleibende Lebenszeit (engl. remaining useful life, kurz: RUL). Sie gibt entweder in einer Zeiteinheit (sinnvoll sind Monate) oder in Anzahl an Zyklen die restliche Zeit bis zum Erreichen des Gebrauchendes der Batterie an [6]. Als Grundlage hierfür dient der SOH. Für eine gute Abschätzung des RUL ist die Kenntnis des Batterieverhaltens über die gesamte Gebrauchszeit notwendig. Dies erfordert einen sehr hohen Messaufwand.

Eine Angabe des RULs ist für den Kunden wünschenswert, allerdings nicht notwendig. Für Servicetechniker gilt das gleiche. Sie können anhand des SOHs entscheiden, ob ein Batteriewechsel erforderlich ist, sodass auf eine Implementierung eines RUL-Algorithmus evtl. aus Kostengründen verzichtet werden kann.

3.4. Kommunikation

Die vom BMS gewonnenen Daten über den Akku müssen teilweise an das Gerät weitergegeben werden (z.B. um SOC auf einem Display anzeigen zu können). Hierfür ist es erforderlich, dass das BMS eine Kommunikationsschnittstelle besitzt. Im Laptopbereich hat sich hierfür das einheitliche Smart Battery System (SBS) durchgesetzt [14]. Für ein BMS in medizinischen Geräten ist eine individuelle Lösung denkbar.

Häufig verwendete Schnittstellen sind CAN-Bus, SPI und I2C. Die Wahl einer geeigneten Schnittstelle hängt zu einem großen Teil davon ab, in wie weit das BMS akku- oder geräte-seitig verbaut ist. Nähere Betrachtungen hierzu folgen im nächsten Kapitel.

Unabhängig hiervon muss die Batterie auf jeden Fall identifizierbar sein. Das Batteriesystem muss daher einen auslesbaren Speicher mit rudimentären Daten wie Seriennummer und Akkuchemie besitzen. Ein EEPROM mit passender Schnittstelle ist für diesen Zweck ausreichend.

4. Architektur

Die in Kapitel 3 zusammengestellten Funktionen für ein BMS in medizinischen Geräten können auf unterschiedliche Art implementiert werden. Neben den aufgezeigten möglichen Umsetzungen in Hardware bzw. gebräuchlichen Algorithmen ist auch die Systemarchitektur von Bedeutung. Die einzelnen Funktionen lassen sich zu Funktionseinheiten bzw. integrierten Schaltungen (engl.: integrated circuit, kurz: IC) zusammenfassen und können zum Teil wahlweise akku- oder geräteseitig verbaut werden. Daher sollen in diesem Kapitel die Funktionseinheiten benannt und erhältliche ICs verglichen werden. Aus den Ergebnissen wird anschließend eine geeignete konkrete Systemarchitektur abgeleitet.

4.1. Allgemeine Architektur

Auf Grundlage der in Kapitel 3 erarbeiteten Funktionen lassen sich die in Abb. 4.1 dargestellten Funktionseinheiten zusammenstellen. Diese werden im Folgenden erläutert.

Sicherheit 1 (S1): Unter dem Baustein Sicherheit 1 sind diejenigen Funktionen zusammengefasst, die vor allem das thermische Durchgehen des Akkus verhindern. Hierzu gehört das Verhindern von Überspannungen an jeder einzelnen Zelle, von zu hohen Strömen, sowie von zu hohen Temperaturen. Diese Funktionen müssen in der Lage sein, den Stromkreis selbstständig zu unterbrechen. Da für die Begrenzung des Stroms und der Temperatur normalerweise Sicherungen eingesetzt werden, lassen sich diese Funktionen nicht zusammen in einem IC unterbringen. Die Überwachungsschaltung der Zellspannung steuert üblicherweise einen MOSFET in Reihe zur Batterie und kann so eine zu hohe Ladespannung abklemmen. Die Sicherheit 1-Funktionen sind für den Schutz vor größeren Schäden (ggf. Personenschäden) notwendig und sind unbedingt im Akkugehäuse mit unterzubringen. Eine Kommunikation zu anderen Funktionseinheiten ist meistens nicht gegeben.

Sicherheit 2 (S2): Diese Funktionseinheit beschreibt weitere Sicherheitsfunktionen, die vor allem zum Schutz des Akkus dienen und ggf. eine Fehlfunktion feststellen. Hierzu zählt das Verhindern einer Tiefentladung und eine Stromüberwachung. Auf zu hohe Ströme sollte schneller als die Sicherung reagiert werden und innerhalb von einigen

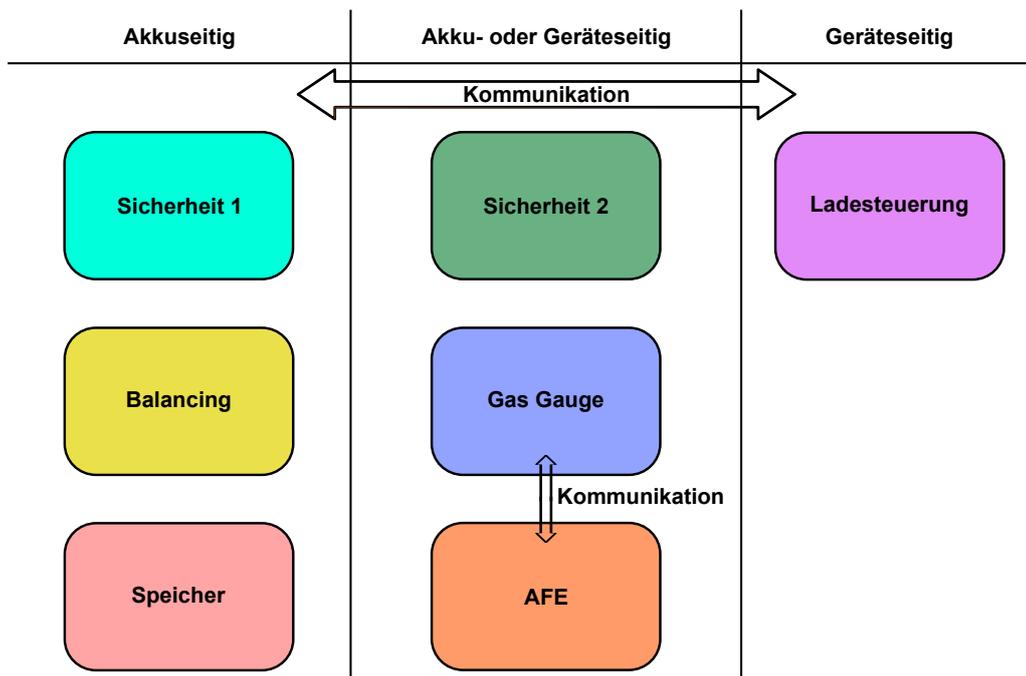


Abbildung 4.1.: Architekturbausteine eines Batterie-Management-Systems

Mikrosekunden entsprechend gehandelt werden. Das Überschreiten sollte weiter kommuniziert werden. Ein autonomes Öffnen des Stromkreises ist denkbar.

Balancing: Die Balancingeinheit vereint die Hardware, die für das Balancing zuständig ist. Bei komplexen Varianten ist zudem ein Algorithmus in Software notwendig, welcher unabhängig von der Hardware akku- oder geräteseitig untergebracht werden kann. Die Hardware wird bei größeren Akkus - wie für die V500 notwendig - akkuseitig verbaut.

Speicher: Ein Datenspeicher, wie in Abs. 3.4 erwähnt, muss akkuseitig verbaut sein.

Analog Front End (AFE): Im Unterschied zu den Sicherheitsfunktionen, welche gewöhnlich das Über- bzw. Unterschreiten eines Schwellwertes detektieren, dient das AFE zur genauen Messung und anschließenden Digitalisierung des Stroms, der Temperatur und der Spannung. Je nach Anwendung werden dabei alle Zellspannungen oder nur die Gesamtspannung des Akkublocks gemessen. Das AFE muss nicht zwingend im Batteriegehäuse mit untergebracht sein. Ein geräteseitiges Verbauen ist allerdings nur dann sinnvoll, wenn das Gas Gauge ebenfalls geräteseitig verbaut ist.

Ladesteuerung: Für das Laden des Akkus sind ein Netzteil und eine Ladesteuerung notwendig. Das Netzteil ist dabei nicht Teil des BMS, die Ladesteuerung bzw. der Ladealgorithmus schon. Dieser wird normalerweise geräteseitig im Host untergebracht, da

er z.T. vom verbauten Netzteil abhängig ist. Da sowohl die Ladesteuerung, als auch der S1-Baustein das Laden beenden bzw. unterbrechen können, ist die nach Norm (s. Abs. 2.4) geforderte Redundanz erfüllt.

Gas Gauge: In Anlehnung an die Füllstandsanzeige bei Gastanks, werden die Algorithmen zur Bestimmung des Lade- und Batteriezustands unter dem Begriff Gas Gauge zusammengefasst. Die benötigten Daten werden vom AFE geliefert und die gewonnenen Ergebnisse an das Gerät weiter kommuniziert. Die Recheneinheit, auf der dieser Algorithmus ausgeführt wird, kann akku- oder geräteseitig verbaut werden.

Kommunikation: Die Daten der einzelnen Bausteine müssen kommuniziert werden. Je nach Architektur müssen bestimmte Daten akkuseitig, geräteseitig oder zwischen Akku und Gerät ausgetauscht werden. Hierfür sind verschiedene Kommunikationsarten möglich. Wichtig hierbei ist, dass Potentialunterschiede entstehen können und ggf. durch entsprechende Kopplungen umgangen werden müssen, um eine einwandfreie Kommunikation zu gewährleisten.

Bei der Konstruktion einer geeigneten Architektur ist zu entscheiden, ob die Funktionen im Akkugehäuse oder im Gerät untergebracht werden sollen. Eine Vorauswahl ist in Abb. 4.1 bereits zu sehen und bei den jeweiligen Bausteinen erläutert worden. Die in der mittleren Spalte platzierten Bausteine sind an keine Seite gebunden. Bei der Entscheidung für eine sinnvolle Zuordnung für die V500 sind folgende Faktoren zu berücksichtigen:

- *Kosten:* Akkuseitig verbaute Komponenten führen zu einer höheren Stückzahl und somit erhöhten Kosten, als geräteseitig verbaute.
- *Distanz:* Ist der Akkublock nicht direkt bei der Geräteelektronik verbaut, kann dies zu langen Leitungen führen, was wiederum zu einer erhöhten Störanfälligkeit oder erhöhtem Aufwand zur Behebung der Anfälligkeit führt. Besonders betroffen sind analoge Signale.
- *Stecker-/Kabelaufwand:* Je mehr analoge Bausteine geräteseitig verbaut sind, desto mehr Kabelaufwand entsteht. Dies führt zu mehr Aufwand beim Einbau eines Akkus, welcher vom Personal selbstständig vorgenommen werden können soll.
- *Kompatibilität:* Soll der gleiche Akku auch in anderen Geräten verbaut werden, führt das akkuseitige Verbauen von Komponenten zu einer einfacheren Handhabung der Kompatibilität. Dies gilt ebenfalls für einen möglichen zukünftigen Wechsel des Akkutypen oder der Akkuchemie: Müssen im Gerät keine akkutypenabhängigen Werte verarbeitet werden, ist ein Wechsel einfacher zu vollziehen.
- *Stromverbrauch:* Akkuseitig verbaute Hardware muss so ausgelegt sein, dass der Akku während längerer Lagerzeit nicht signifikant entladen wird. Hierzu dient zum einen ein niedriger Stromverbrauch als solches als auch ein mögliches Abschalten (komplett

oder Sleep-modus) einzelner Komponenten. Die Grenze für den maximalen Stromverbrauch hängt von der Größe des Akkus und den voraussichtlichen Lagerzeiten ab. Benötigt eine Komponente zu viel Strom, muss sie andernfalls geräteseitig eingebaut werden.

Bei der V500 wird der Akku in einem Fach verbaut, welches von der sonstigen Geräteelektronik ausgelagert ist, was zu Leitungslängen von ca. 1m führt. Da medizinische Geräte zudem nicht sehr preissensibel sind und eine hohe Kompatibilität angestrebt wird, ist es sinnvoll, die Bausteine Sicherheit 2, Analog-Front-End und Gas Gauge akkuseitig zu verbauen. Die Voraussetzung hierfür ist, dass der Stromverbrauch dieser Bausteine nicht zu hoch für die zu erwartenden Lagerzeiten ist.

4.2. Vergleich vorhandener integrierter Schaltungen

Durch die seit Jahren vorhandene Verwendung von Li-Ionen-Akkus im Konsumerbereich gibt es bereits eine große Anzahl an integrierten Schaltungen, welche eine oder mehrere der oben genannten Funktionen platz- und energiesparend erfüllen. Da die meisten Anwendungen wie Laptop o.ä. mit geringen Spannungen auskommen und daher nicht mehr als vier Zellen in Reihe benötigen, sind viele der vorhandenen ICs auf diese Akkugrößen hin ausgelegt. Einige dieser ICs lassen sich kaskadieren (engl. stackable), um auch für größere Serienschaltungen angewendet werden zu können. Ein Nachteil dieser Variante ist, dass damit auch der Stromverbrauch steigt. In den folgenden Absätzen sollen für eine 8s-Schaltung ausgelegte Chips auf deren Eignung untersucht werden. Aufgrund der Vielzahl und des theoretisch höheren Stromverbrauchs, wird auf kaskadierbare Chips nicht näher eingegangen. Sie können u.U. dennoch eine gute Alternative sein.

Analog ICs

Die umfangreichsten Analogchips sind die Monitoringchips, welche die Zellspannungen und die Temperatur überwachen. Je nach Modell besitzen sie noch weitere Funktionen. In Tab. 4.1 sind vier mögliche ICs gegenübergestellt.

Angaben zur Genauigkeit wurden nicht mit in die Tabelle aufgenommen, da sie sich je nach Hersteller auf verschiedene Größen beziehen und daher nicht direkt vergleichbar sind. Der Stromverbrauch ist ebenfalls schwer zu vergleichen, da die Chips unterschiedlich in Stromsparmodi umschalten. Bei Bedarf müssten diese beiden Parameter genauer untersucht werden. Als S1-Funktion wird hier die Messung der Zellspannungen und das autonome Auftrennen des Stromkreises bezeichnet. Die Sicherungen der S1-Funktion müssen extern hinzugeschaltet werden.

Tabelle 4.1.: Vergleich verschiedener Monitoringchips (+: ja, -: nein)

	bq77PL900	bq77910A	MAX14920	ISL94203
FET-Steuerung (S1)	+	+	-	+
min OV-Threshold (S1)	4,1V	2,8V	4,7V	0V
min UV-Threshold (S2)	1,4V	1,4V	1,4V	0V
Overcurrent (S2)	+	+	-	+
Balancing	Treiber	intern	Treiber	Treiber
Kom. zu Host	I2C + analog	-	SPI	I2C
Anzahl der Zellen	10	10	12	8
Funktionsumfang	S1+S2	S1+S2	(S2)	S1+S2
	+Balancer+AFE	+Balancer	+Balancer+AFE	+Balancer+AFE
Hersteller	Texas Instruments	Texas Instruments	Maxim	Intersil
Preis /unit 1k	2,95\$	3,2\$	5,6\$	2,19\$

Der bq77PL900 von Texas Instruments und der MAX14920 von der Firma Maxim sind für LiFePO₄-Akkus weniger geeignet. Laut der Datenblätter kann der Grenzwert für die Überspannung (OV) nur auf Werte von mindestens 4,1V eingestellt werden. Dies ist für LiFePO₄-Akkus zu hoch. Der Texas Instruments-Chip bq77910A und der Intersil-Chip ISL94203 eignen sich beide gut für einen Akku der V500. Der bq77910A ist mehr auf autonomes Handeln hin optimiert und beinhaltet interne FETs für ein passives Balancingsystem. Der ISL94203 bietet hingegen bei der Konfiguration mehr Freiheiten und beinhaltet die Funktion eines AFEs. Zudem kann der Intersil-Chip als Treiber für ein Balancingsystem genutzt werden, beinhaltet allerdings keine internen FETs.

Nicht mit in der Tabelle aufgeführt ist der LTC6804 der Firma Linear Technology. Er vereint die zwei Funktionsblöcke AFE und Balancing und ist daher mit den aufgeführten nicht direkt vergleichbar. In Kombination mit weiterer Hardware für S1- und S2-Funktionen stellt dieser Chip eine mögliche Alternative dar.

Für die Erfüllung der S1-Spannungsfunktion werden für die Überwachung der Zellspannungen von einigen Herstellern sogenannte Second-Safety-Chips angeboten. Dies sind kostengünstige ICs (typisch: < 1\$/chip), die einen Komparator mit festem Schwellwert besitzen. Zum Zeitpunkt der Recherche (Nov. 2014) wurden Chips mit Schwellwerten kleiner 4V, wie sie für LiFePO₄-Akkus sinnvoll sind, nur von der Firma Texas Instruments angeboten (Bsp. bq771612).

Integrierte Schaltungen für ein aktives Balancing werden nur vom Hersteller Linear Technology angeboten. Der LTC3300 z.B. ist allerdings für eine 6s-Schaltung ausgelegt und müsste kaskadiert werden.

Gas Gauge ICs

Integrierte Schaltungen für die Schätzung der Analysewerte, wie sie in Abs. 3.3 beschrieben sind, werden ebenfalls vorrangig für Schaltungen mit maximal vier Zellen angeboten. Für die 8s-Schaltung sind die beiden in Tab. 4.2 dargestellten Chips verfügbar.

Tabelle 4.2.: Vergleich verschiedener Gas Gauge-ICs (+: ja, -: nein)

	bq34z100	DS2788
Algorithmus	Impedance Tracking™	FuelPack™
Art des Algorithmus	Coloumb Counting + OCV + Temp. + Widerstand	Coloumb Counter + OCV + Temp.look up
LiFePO4-Parameter für Bleiakkus geeignet	+	-
Spannungsmessung	+	+
Anzahl Zellen	bis 65V	keine Grenze
Temperatursensor	+	+
Strommessung	+	+
Kommunikation	I2C/HDQ	1-Wire Bus
Speicher	+	+
Autokalibrierung	+	+
Funktionsumfang	AFE+GasGauge+Speicher	AFE+GasGauge+Speicher
Hersteller	Texas Instruments	Maxim
Preis/Stück	\$2.36	\$4.14

Beide Chips beinhalten bereits ein AFE und arbeiten somit unabhängig. Sie verfügen außerdem über einen internen Speicher, welcher zu Teilen vom Nutzer frei genutzt werden kann. Somit beinhalten die Chips den für die Identifikation notwendigen Speicherbaustein. Die in den Datenblättern angegebenen Genauigkeiten sind hier ebenfalls auf verschiedene Größen bezogen und lassen sich somit nicht miteinander vergleichen. Die Leistungsfähigkeit der Analyse-ICs wird vor allem von dem implementierten Algorithmus bestimmt. Beide Algorithmen bauen dabei vor allem auf der in Abs. 3.3 aufgeführten Methode „Voltage Method + Coloumb Counting“ auf. Der Maxim-Chip DS2788 benutzt zusätzlich eine look-up-Tabelle für verschiedene Temperaturen. Beim bq34z100 der Firma Texas Instruments kommen die bereits erwähnten Gesamtkapazitäts- und Widerstandsberechnungen des Impedance Tracking-Algorithmus hinzu (s. Abs. 3.3.1). Beide Chips sind gemäß ihren Funktionen für den Einsatz in der V500 geeignet. Das Konzept des Impedance Tracking ist dabei etwas umfassender (s. Tab. 4.2). Zudem berechnet er bereits Werte wie TTE, was den Entwicklungsaufwand weiter verringert.

Der Einsatz von fertigen Gas Gauge-Chips kann der Firma Dräger großen Aufwand bei der Entwicklung eines eigenen Algorithmus ersparen. Diesen selber zu entwickeln kann wiederum den Vorteil bringen, dass bei evtl. Schwierigkeiten schneller reagiert werden kann und derselbe Baustein auch für andere Akkuchemien ausgelegt werden könnte. Für diese Variante gibt es von der Firma Freescale den MM9Z1_638. Dies ist ein Mikrocontroller mit einer

Peripherie, welche für den Einsatz als Gas Gauge optimiert ist. So lassen sich problemlos bis zu 8 Zellspannungen, Strom und Temperatur messen. Der MM9Z1_638 entspricht somit ebenfalls einem Gas Gauge mit integriertem AFE und ist für den Einsatz von eigenen Algorithmen geeignet. Eine weitere Möglichkeit der Umsetzung einer Eigenentwicklung bietet der Monitoringchip ISL94203 (s. Tab. 4.1). Zusammen mit einem Mikroprozessor, welcher über I2C kommunizieren kann, und einem Speicherbaustein können auch so alle notwendigen Funktionen abgedeckt werden.

Die beiden Varianten der Selbstentwicklung bringen noch einen weiteren Vorteil: Da hier dem Gas Gauge grundsätzlich alle Zellspannungen vorliegen, ist eine Bestimmung der Zell-SOCs, wie in 3.3.1 beschrieben, möglich. Die in Tab. 4.2 vorgestellten Chips arbeiten jeweils mit der Gesamtspannung des Akkublocks.

4.3. Konkrete Systemarchitektur

Die zwei vorgestellten Gas Gauge-ICs besitzen dieselben Funktionen. Sie lassen sich gut mit den oben genannten Monitoringchips kombinieren. In beiden Gas Gauge-ICs ist bereits ein AFE integriert. Daher ist die AFE-Funktion der Monitoringchips nicht notwendig. Somit ergibt sich bei der Verwendung der Gas Gauge-ICs die in Abb. 4.2 dargestellte Architektur. Die Aufteilung der Funktionseinheiten auf die ICs kann für andere Lösungen variieren. So unterscheidet sich z.B. die mit dem Monitoringchip ISL94203 vorgestellte Lösung der Eigenentwicklung darin, dass das AFE im Monitoringchip integriert ist und eine Kommunikation zwischen dem Gas Gauge-IC und dem Monitoringchip besteht.

Wie bereits diskutiert wurde, ist ein Einbau aller Komponenten außer der Ladesteuerung in das Batteriesystem im Fall der V500 sinnvoll.

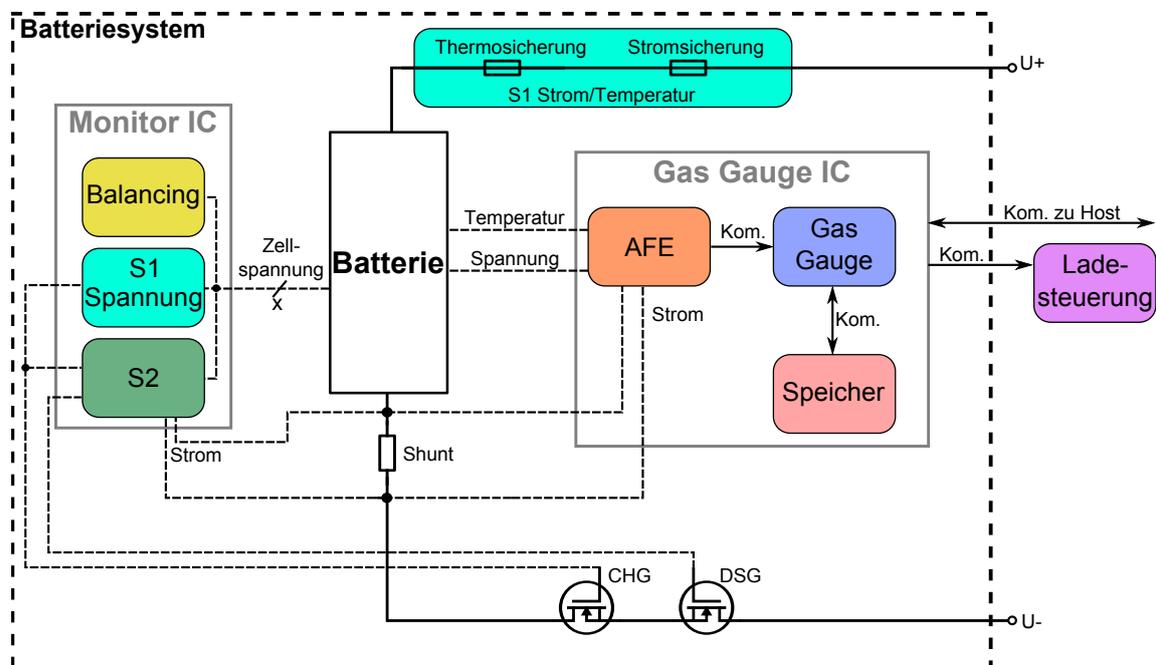


Abbildung 4.2.: Architektur eines BMS für medizinische Geräte in Anlehnung an [3]

5. Realisierung

Die in Kapitel 4 erarbeitete Architektur wurde in einer möglichen Variante als Demonstrator umgesetzt (s. Abb. 5.1) und auf deren Eignung hin überprüft. Zunächst wird der genauere Funktionsumfang beschrieben und anschließend der Aufbau dargestellt. Zum Schluss dieses Kapitels werden die gewonnenen Ergebnisse ausgewertet.

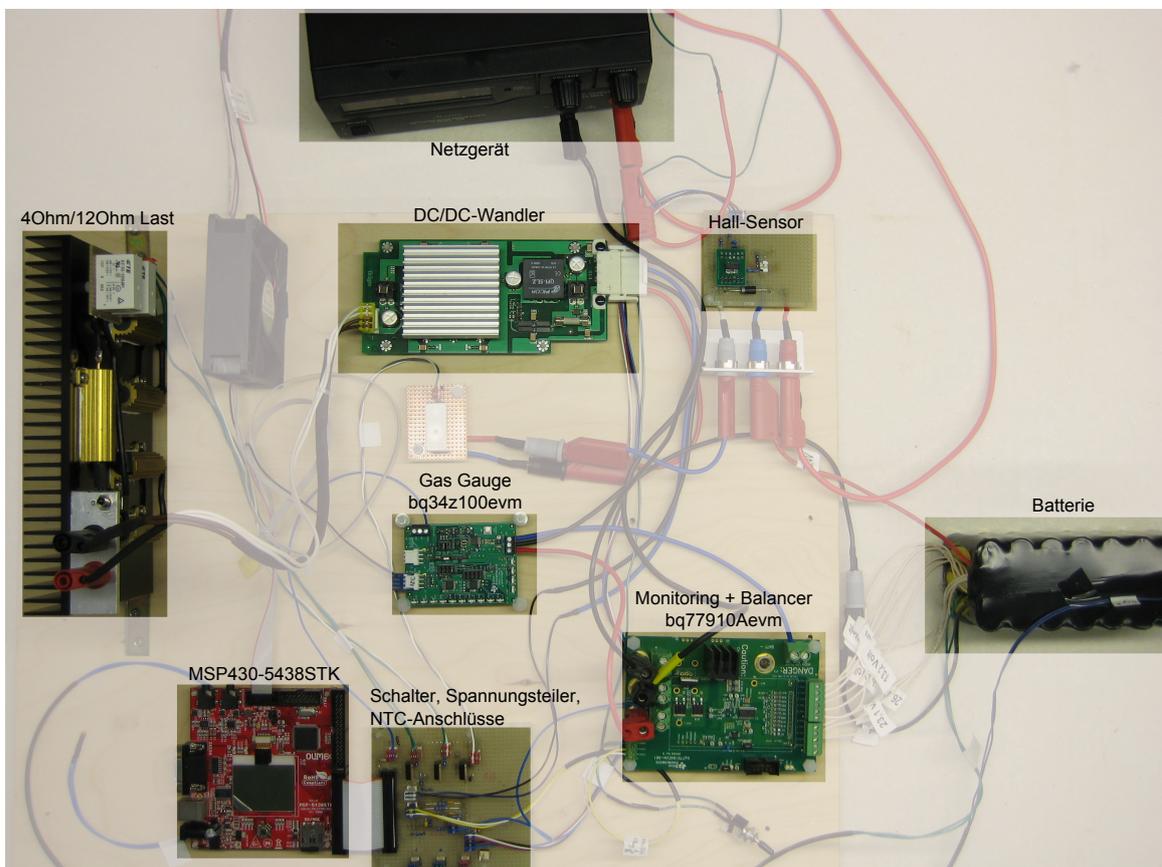


Abbildung 5.1.: Demonstratoraufbau

5.1. Funktionsumfang

Der Aufbau soll ein komplettes BMS enthalten, welches die zusammengetragenen Funktionen erfüllt und eine mögliche Kommunikationsstruktur aufweist. Zudem muss eine Batterie über eine einstellbare Steuerung geladen und entladen werden können. Die Abschätzungen für SOC und TTE sollen gewonnen und auf deren Genauigkeit hin überprüft werden. Die ebenfalls in dieser Arbeit geforderten Analysewerte SOH und RUL können aufgrund des begrenzten Zeitumfangs nicht sinnvoll bewertet werden, sodass im weiteren Verlauf hierauf nicht näher eingegangen wird.

Für die Überprüfung der Werte ist ein Aufzeichnen der Messdaten notwendig. So müssen die Messgrößen Strom, Spannung und Temperatur, sowie die Schätzungen von SOC und TTE mitgeloggt werden, um anschließend ausgewertet werden zu können.

5.2. Akku - und Chipwahl

Für den Aufbau wurde ein aus APR18650M1A-LiFePO₄-Zellen der Firma A123 aufgebauter Akkublock verwendet (s. Abb. 1.1). Die Zellen besitzen die in Abb. 2.1 gezeigte Entladekurve und eine Nennkapazität von 1,1Ah. Für die Zusammensetzung wurde eine 8s3p-Schaltung gewählt. Diese entspricht spannungsmäßig der benötigten 8s28p-Schaltung. Die Kapazität hingegen ist mit 3,3Ah kleiner als gefordert. Dies bringt den Vorteil, dass der Akkublock schneller geladen und entladen werden kann, sodass mehr Zyklen innerhalb des Zeitfensters dieser Arbeit durchgeführt werden können. Die Ergebnisse lassen sich dabei größtenteils auf die tatsächliche 8s28p-Schaltung übertragen.

Als Gas Gauge wurde der bq34z100 der Firma Texas Instruments gewählt. Er bietet in der Theorie leichte Vorteile gegenüber dem Maxim-IC (s. Abs. 4.2). Die Abschätzungen für SOC und TTE werden bereits komplett von dem Algorithmus abgedeckt, wobei dem Datenblatt nicht zu entnehmen ist, welche SOC-Definition benutzt wird (vgl. Abs. 3.3.1). Aus [3] lässt sich schließen, dass die rSOC-Definition verwendet wird. Im IC integriert ist ein Speicher, der unter anderem eine programmierbare Seriennummer enthält, sodass eine eindeutige Identifikation möglich ist. Die Entwicklung eines eigenen kompletten Algorithmus wäre zu zeitaufwändig für diese Arbeit, sodass eine fertige Lösung vorgezogen wurde.

Als Monitoringchip wurde der bq77910A der Firma Texas Instruments gewählt. Da er kein eigenes AFE besitzt, ist er eine passende Ergänzung zum verwendeten Gas Gauge-IC. Neben den Sicherheitsfunktionen bietet der Chip bereits integrierte FETs für ein passives Balancing mit Entladeströmen bis 50mA. Es lassen sich die Sicherheitsschwellwerte und der Schwellwert, ab dem das Balancing starten soll, einstellen. Der Balancingalgorithmus ist laut Datenblatt ein einfach gehaltener, welcher bei Erreichen der Schwellspannung die Zelle mit

der höchsten Spannung für 7,5min entlädt. Für den Aufbau wurden die Evaluationsboards bq34z100EVM und bq77910AEVM verwendet.

Für die Steuerung der Lade- und Entladezyklen, sowie das Mitloggen der Daten wurde das MSP430F5438-STK-Board der Firma Olimex eingesetzt. Das Board übernimmt somit die Funktion des Geräts bzw. Hosts. Es besitzt einen MSP430F5438 Mikrocontroller (μC), welcher die notwendigen Kommunikationsarten unterstützt. Der 12-Bit ADC bietet eine gute redundante Messmöglichkeit, um so einen sicheren Messaufbau zu gewährleisten. Des Weiteren enthält das Board bereits einen SD-Karteneinschub und ein LCD-Display, welche das Mitloggen und Anzeigen der Daten ermöglichen.

5.3. Aufbau

Mit den drei ausgewählten Chips und dem Akkublock sind die wichtigsten Komponenten bereits vorhanden. Abb. 5.2 zeigt das Blockschaltbild vom kompletten Aufbau (vgl. Abb. 5.1). Die weiteren Komponenten sind folgende:

- *Last*: Für den Entladevorgang können zwei verschiedene Lasten gewählt werden. Ein DCDC-Wandler sorgt dafür, dass die Last eine konstante Leistung der Batterie entnimmt. Es können Entladelasten von ca. 60W und 180W eingestellt werden.
- *Ladegerät*: Das Ladegerät schaltet automatisch zwischen CC- und CV-Betrieb um und kann über RS232 vom Host aus gesteuert werden. Für den CC-Betrieb wurde ein Ladestrom von 2A gewählt. Der Ladeschlussstrom wurde auf 0,1A gesetzt.
- *Messungen*: Redundante Messungen, welche für die Fehlerfindung im Messaufbau, sowie eine bessere Interpretation der Daten hilfreich sind, wurden hinzugefügt. Neben einem Hallsensor zur Strommessung, wurden NTC-Widerstände zur Temperaturmessung verwendet.
- *Mitloggen*: Zum Mitloggen der Daten werden diese über eine SPI-Schnittstelle auf einer SD-Karte mitgeschrieben.

Auf die Verwendung von Strom- und thermischen Sicherungen wurde bei dem Aufbau verzichtet. Sie sind einfach handhabbare Bauteile, die im normalen Betrieb keinen signifikanten Einfluss auf das Verhalten des BMS haben, sodass ein Einbau für die Tests nicht erforderlich ist.

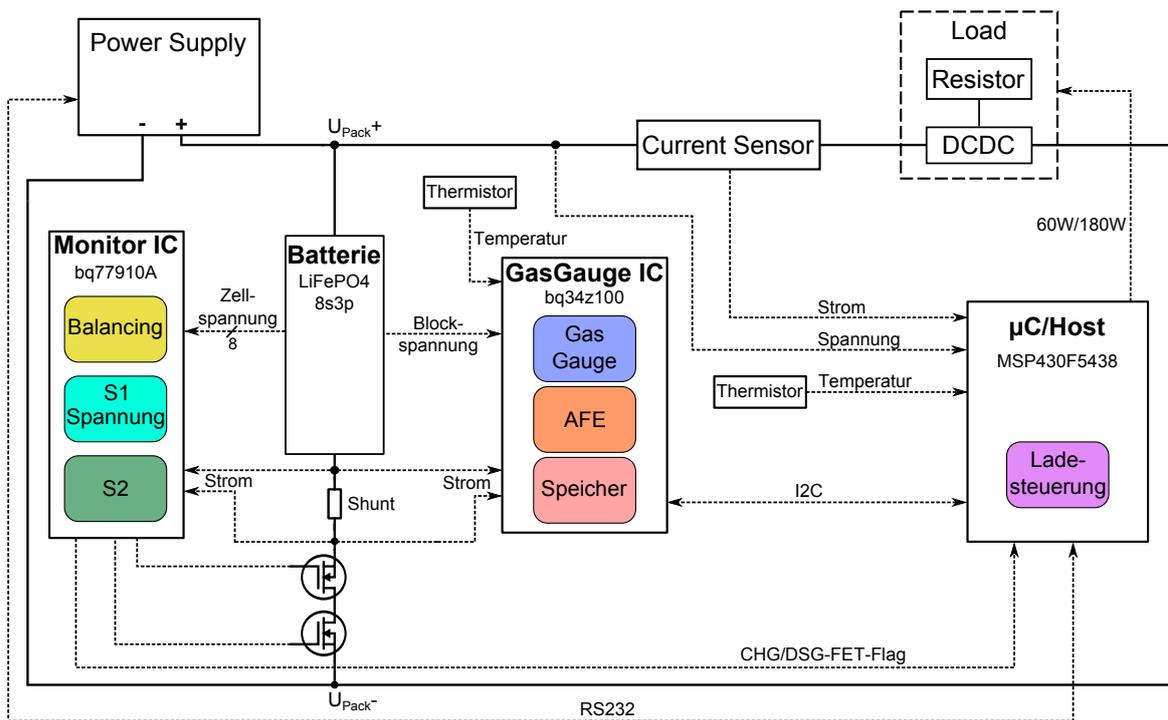


Abbildung 5.2.: Blockschaltbild Demonstrator

5.3.1. Software

Für die Steuerung der Lade- und Entladezyklen wurde ein Zustandsautomat entwickelt, der die Durchführung verschiedener Szenarien ermöglicht (s. Anhang A.1). Die entwickelte Software enthält zudem Lese- und Schreibroutinen, welche das Speichern der vom Gas Gauge gewonnenen Daten steuern.

Zusätzlich zu der Software, welche auf dem Mikrocontroller benutzt wird, wurden Matlabskripte geschrieben, mit denen die mitgeloggten Daten anschließend ausgewertet und visualisiert wurden. Die so erhaltenen Ergebnisse sind weiter unten aufgeführt.

5.3.2. Konfigurationen

Bevor das BMS in Betrieb genommen werden konnte, mussten der Gas Gauge- und der Monitoringchip zunächst noch für die Anwendung konfiguriert werden.

Monitoringchip bq77910A

Der bq77910A lässt sich via I2C programmieren. Der Programmierablauf kann dem Datenblatt entnommen werden.

- Schwellwert Überspannung: 3,8V/Zelle; der Schwellwert ist so gewählt, dass er einen hohen Grad an Sicherheit bietet. Im Normalbetrieb sollte er nie ausgelöst werden. Das eigentliche Abbruchkriterium für den Ladevorgang ist der Strom.
- Schwellwert Unterspannung: 2V/Zelle; entspricht dem im Datenblatt des Akkus angegebenen Wert. Da der Entladevorgang nach dem Spannungskriterium beendet wird, kann bei Entladung die Funktion ausgelöst werden. Der für die Laststeuerung zuständige μC misst nur die Gesamtspannung, sodass durch Ungleichheiten, einzelne Zellspannungen den Schwellwert unterschreiten können.
- Schwellwert Balancing: Der Wert wurde auf 3,6V/Zelle eingestellt und entspricht damit der Maximalspannung aus dem Akkudatenblatt. Das Balancing wird dementsprechend erst kurz vor dem Beenden des Ladevorgangs (in der CV-Phase) gestartet (vgl. Abs. 3.2.3).

Die Schwellwerte für die Ströme wurden großzügig ausgelegt und werden hier nicht weiter betrachtet. Für den Einsatz in einer Serienproduktion müssten diese genauer bestimmt werden.

Ergänzend zu der Registerkonfiguration musste die auf dem Evaluationsboard vorhandene externe Beschaltung des Chips ebenfalls noch für den Betrieb mit 8 Zellen in Serie konfiguriert werden. Die hierfür notwendigen Änderungen sind der Dokumentation des Evaluationsboards entnommen. Für das passive Balancingsystem wurden 47Ohm-Widerstände eingesetzt (vgl. Abb. 3.2). Zusammen mit den ON-Widerständen der integrierten FETs ergibt sich bei 3,6V ein Balancingstrom von ca. 50mA.

Gas Gauge-Chip bq34z100

Der bq34z100 lässt sich mit Hilfe des EV2300-Interfaces und der bqeval-Software vom Hersteller konfigurieren. Folgende Werte wurden eingegeben:

- Load mode: 1, da Konstantleistungslast (führt dazu, dass der SOC in Bezug auf die Energie angegeben wird)
- Design Capacity: 3300mAh
- Number of series Cells: 8

- Cell Terminate Voltage: 2300mV/Zelle (nachdem erste Durchläufe zeigten, dass bereits bei 18-18,4V Blockspannung der bq77910A aufgrund von Tiefentladung anspringt, wurde der Wert entsprechend auf 2300mV/Zelle gesetzt)
- Cell Chemistry: 0404 (entspricht den APR18650M1A-Zellen)

Zudem wurde die Kalibrierung gemäß der bqeal-Software durchgeführt. Die komplette Konfigurationsdatei ist dem Anhang zu entnehmen ([A.4](#)).

Es stellte sich heraus, dass der Stromverbrauch des BMS in längeren Ruhephasen von einigen Stunden zu einer signifikanten Entladung der Batterie führte. Daher wurden weitere Veränderungen zur Stromoptimierung auf beiden Boards vorgenommen, welche keinen Einfluss auf die genutzten Funktionen haben (s. Anhang [A.4](#)).

5.4. Ergebnisse

Bewertung des Monitoringchips

Der Monitoringchip bq77910A beinhaltet Sicherheits- und Balancingfunktionen. Die Sicherheitsfunktionen wurden außerhalb des Aufbaus überprüft. Dabei wurden mit Hilfe von Widerständen und einer Spannungsquelle verschiedene Zellspannungen imitiert. So konnte das Erkennen der Schwellspannungen und die Reaktionszeiten überprüft werden. Bei diesen Tests konnten keine negativen Auffälligkeiten festgestellt werden. Der Chip reagierte entsprechend der eingestellten Konfigurationen.

Zur Überprüfung der Balancingfunktion wurden für einige Vollzyklen (Zyklen, bei denen die Batterie jeweils komplett geladen und entladen wird) alle Zellspannungen mit Hilfe eines weiteren Spannungsmessgerätes aufgezeichnet. Wie in [Abs. 3.2.3](#) dargestellt wurde, ist das passive Balancing auf Grundlage von Spannungen nur gegen Ende des Ladens sinnvoll. Der Entladevorgang wurde dennoch ebenfalls untersucht, um eine evtl. Notwendigkeit eines aktiven Balancings diskutieren zu können.

In [Abb. 5.3](#) ist zu sehen, dass das Balancing einsetzt und funktioniert. Während der CC-Phase sind die Zellspannungen eng beieinander, was auf eine geringe Toleranz der Innenwiderstände schließen lässt. Signifikante Spannungsunterschiede sind erst in der CV-Phase, d.h. gegen Ende des Ladevorgangs, zu erkennen.

Für die Bewertung des Balancingsystems lassen sich folgende Punkte feststellen: Bei dem eingestellten Ladeschlussstrom (100mA) ist ein Ladungsausgleich notwendig, um ein Ansteigen einiger Zellspannungen auf deutlich über 3,6V zu verhindern. Somit ist es möglich den Akku bis zum Ladeschlussstrom zu laden, ohne dass eine Zelle eine schädliche Überspannung aufweist. Der Zweck des Balancings zu einer Erhöhung der speicherbaren und nutzbaren Energie ist somit erfüllt. Anhand der Spannungskurven lässt sich zusätzlich sehen, dass

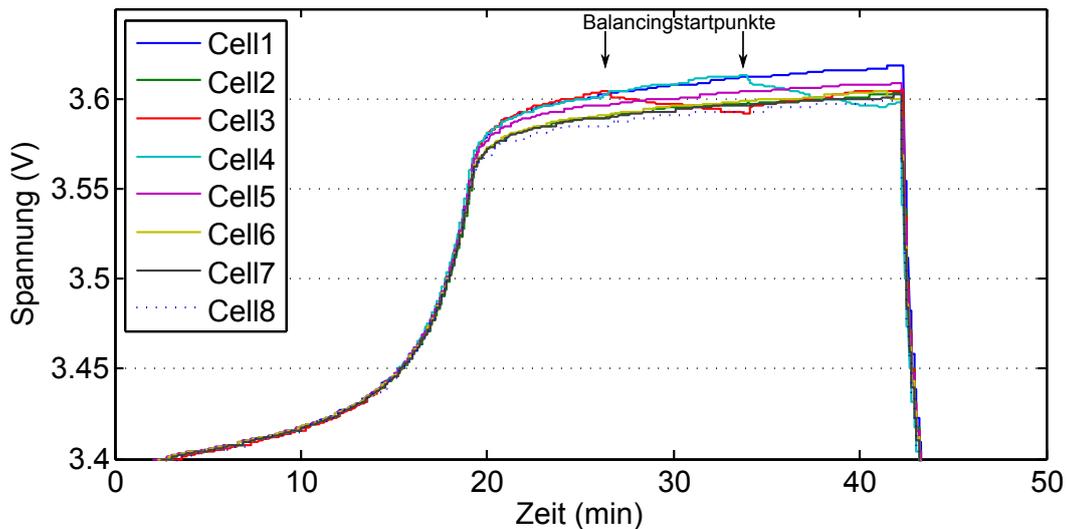


Abbildung 5.3.: Passives Balancing beim Laden

ein Balancingschwellwert von 3,6V eine geeignete Wahl ist. Eine Spannung von ca. 3,57V wäre optimal. Da sich dieser beim bq77910A nur in 0,1V-Schritten einstellen lässt, kann der Chip diese Aufgabe nicht besser erfüllen. Zudem könnte das Balancing von mehreren Zellen gleichzeitig einen weiteren Gewinn bringen, welches ebenfalls nicht vom bq77910A unterstützt wird. Der Balancingstrom von ca. 50mA ist für diese Anwendung und den vorhandenen Algorithmus gut geeignet. Dies lässt sich daran erkennen, dass die Zellspannung der Zelle, welcher Ladungen entnommen werden, sich am Ende der Balancingzeit knapp unter der zweitniedrigsten Zellspannung befindet. Für den realen Einsatz in der V500 ergibt sich folgende Schätzung: Für einen Akku der V500, welcher mit 30Ah eine 10-fache Kapazität von dem Testakku besitzt und mit einem ca. doppelt so hohen Strom geladen wird (ca. 4A in der CC-Phase und Ladeschlussstrom von 200mA), entspricht die Laderate 1/5 der hier verwendeten C-Rate. Um durch den Ladungsausgleich dieselbe SOC-Änderung zu erreichen, muss über den gleichen Zeitraum ein 10-facher Strom fließen. Die Spannung und der Ladestrom können in dem Balancingzeitfenster als linear angenommen werden. Aufgrund der geringeren C-Rate verlängert sich die Zeit um das 5-fache, sodass der Balancingstrom für den vorhandenen Algorithmus ca. doppelt so groß (100mA) ausgelegt werden müsste. In diesem Fall könnten die internen Balancing-FETs des bq77910A nur zur Steuerung extern zugeschalteter FETs eingesetzt werden.

Gemäß den Messungen stellt der Chip insgesamt eine geeignete Wahl dar. Die Funktionen werden als solche erfüllt. Beim Balancing zeigt sich allerdings, dass mit entsprechenden Verbesserungen ein optimiertes Verhalten möglich ist. Hierdurch könnten die Zellzustände noch besser angepasst und somit eine bessere Nutzung des Akkus gewährleistet werden.

In Bezug auf den möglichen Nutzen eines aktiven Balancings kann Folgendes festgestellt werden: Gegen Ende des Entladevorgangs, d.h. bei niedrigen Ladezuständen, gehen die Zellspannungen ebenfalls deutlich auseinander. Die in Abb. 5.4 eingezeichnete Abschätzung des zeitlichen Unterschiedes zwischen bester und schlechtester Zelle beträgt 25s. Durch ein aktives Balancing würden Ladungen von den besseren Zellen den schlechteren Zellen zugeführt werden, sodass sich die Zellspannungen angleichen würden. Somit könnten ca. 12,5s Betriebszeit gewonnen werden. Im Vergleich zu den höheren Kosten, die ein aktives Balancing mit sich bringt, ist für die gegebene Konstellation ein solches nicht empfehlenswert. Für den realen Fall der V500, die ca. 120W umsetzt und einen Akku mit einer 8s28p-Schaltung hat, beträgt die Leistung ca. 0,5W/Zelle. Dies entspricht in etwa einem fünftel der Leistung der Zellen des hier verwendeten Akkublocks und 60W Entladeleistung. Der Zeitgewinn liegt damit bei ca. 1min. Abb. 2.1 zeigt, dass sich die Entladekurve für unterschiedliche Entladeleistungen im Bereich kleiner gleich 2,5W/Zelle kaum verändert, sodass hierdurch kein weiterer Zeitgewinn zu erwarten ist.

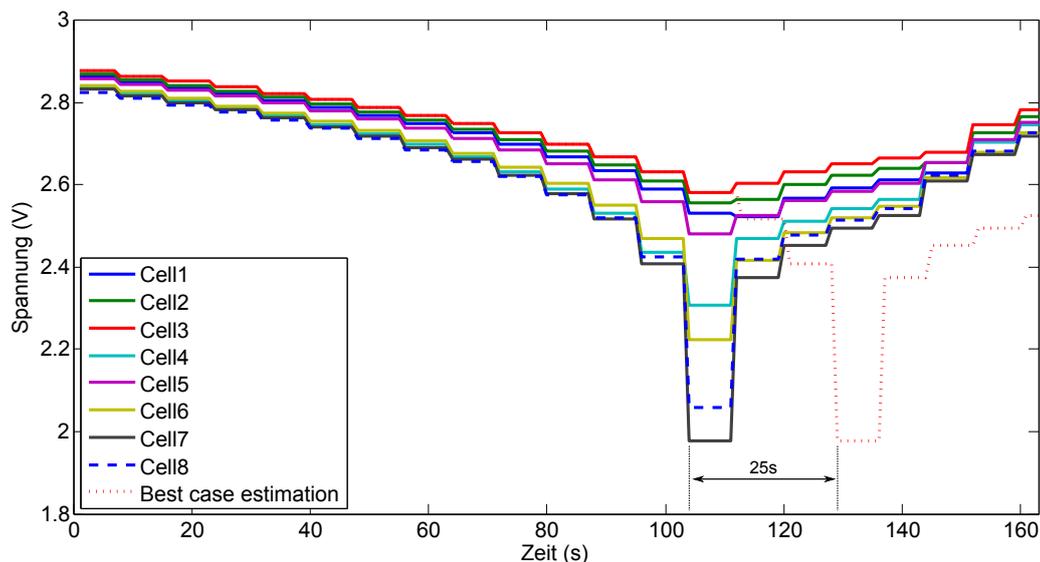


Abbildung 5.4.: Zellspannungen beim Entladeende mit einer Entladeleistung von ca. 60W

Bewertung des Gas Gauge-Chips

Für die Beurteilung des Gas Gauge-Chips wurde die Genauigkeit der SOC- und TTE-Abschätzungen untersucht. Dabei ist der TTE-Wert aufgrund seiner quantitativen Aussage einfacher zu beurteilen. Da er auf Basis des SOC getroffen wird und somit diesen Wert mit einschließt, wird bei den Vorhersagen während der Entladung auf den TTE-Wert eingegangen. Die SOC-Angabe ist während des Ladens für den Kunden vor allem für die Anzeige des

vollgeladenen Zustandes interessant, sodass auf diesen ebenfalls eingegangen wird. Zunächst wurde der Chip wie in Abs. 5.3 beschrieben konfiguriert. Bei Vollzyklen mit einer konstanten Lastleistung während des Entladevorgangs ist ein linearer Verlauf der Zustandsabschätzungen zu erwarten. Die Werte zeigten allerdings bei ersten Testzyklen signifikante Sprünge. Zudem waren die Vorhersagen gegen Ende eines Entladevorgangs über 10min bzw. 15% zu hoch. Für eine Verbesserung der Abschätzungen können sogenannte Lernzyklen gefahren werden. Dies sind vom Hersteller vorgegebene Zyklen (Flussdiagramm s. A.2), die besonders gut geeignet sind, damit das Gas Gauge verbesserte Parameter für den Algorithmus gewinnen kann. Die so erhaltenen Parameter können auf anderen bq34z100-Chips implementiert werden, sodass hier keine weiteren Lernzyklen erforderlich sind. Nach Durchlaufen der Lernzyklen konnten deutlich bessere Ergebnisse erzielt werden, welche im Folgenden diskutiert werden.

Es wurden drei verschiedene Szenarien durchlaufen. Die Grundlast betrug dabei 60W. Die Umgebungstemperatur befand sich bei allen Tests im Bereich 20-23°C. Das erste Szenario ist der bereits erwähnte Vollzyklus, bei dem zehn Lade- und Entladevorgänge hintereinander - d.h. ohne Ruhephasen - gefahren werden. Zusätzlich wurden Halbzyklen gefahren. Dabei wird die Batterie über acht Zyklen jeweils im Bereich von ca. 30% - 70% SOC ge- und entladen (vgl. Anhang A.3). Die für das Gas Gauge besonders hilfreichen Zustände „voll“ und „leer“, werden somit für einige Zyklen nicht erreicht. Bei einem abschließenden Vollzyklus lässt sich die Genauigkeit der TTE-Vorhersagen beurteilen. Das dritte Szenario besteht wie das erste aus zehn Vollzyklen. Nur wird hier bei einem SOC von ca. 50% die Last von 60W auf 180W erhöht. Dieses Szenario wird im Folgenden Realzyklus-Szenario genannt.

Der bq34z100-Chip bietet zwei verschiedene TTE-Vorhersagen an: TTE (TTE_0) und TTE bei konstanter Leistung ($TTE@P$). Im Datenblatt ist für den TTE_0 -Wert angegeben, dass dieser eine Vorhersage auf Grundlage der aktuellen Entladerate angibt. $TTE@P$ gibt die Vorhersage auf Grundlage der aktuellen Entladeleistung an und sollte somit der geeignetere Wert sein. Unklar ist, weshalb beide Werte angeboten werden, das Gas Gauge dennoch für den Konstantleistungsbetrieb eingestellt werden muss. Neben der Bewertung der Genauigkeit als solches wurden die Ergebnisse noch mit einem einfachen Coloumb Counting-Algorithmus verglichen. Hierfür wurde anhand der aufgezeichneten Daten der Strom integriert und bei komplett entleerter Batterie dieser genullt. Mit Hilfe der Formel

$$TTE_{CC}(t) = t \cdot \frac{\sum_{n=0}^t I(n)}{I(t)} \quad t, n \in N \quad (5.1)$$

kann für jeden Zeitpunkt t (in s) rückwirkend eine einfache Vorhersage für die restliche Betriebslaufzeit gemacht werden, so wie sie auch bei Einsatz des Algorithmus zur Laufzeit vorhanden wäre. Hierbei wird der Konstantleistungsbetrieb nicht berücksichtigt.

Die in Abb. 5.5 gezeigten Kurven zeigen beispielhaft die TTE-Vorhersagen während eines Entladevorgangs bei einem Vollzyklus. Die Vorhersagen des Gas Gauges verlaufen weitestgehend parallel mit einem Offset von 3-4 Minuten zu der tatsächlichen Zeit.

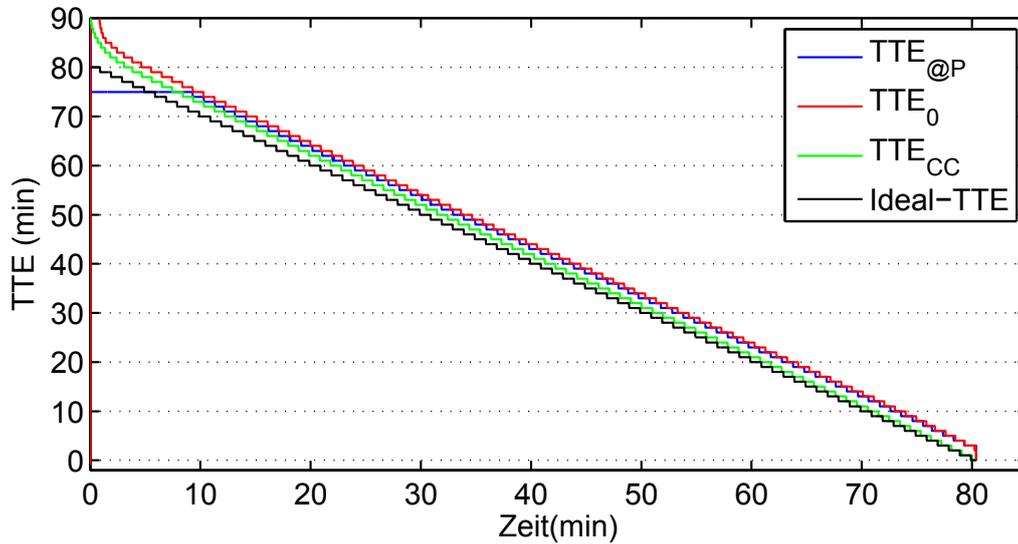


Abbildung 5.5.: TTE-Abschätzungen und tatsächliche Laufzeit (Ideal-TTE) während eines Entladevorgangs bei Vollzyklen (TTE_0 , $TTE_{@P}$: Impedance Tracking; TTE_{CC} : Coloumb Counting)

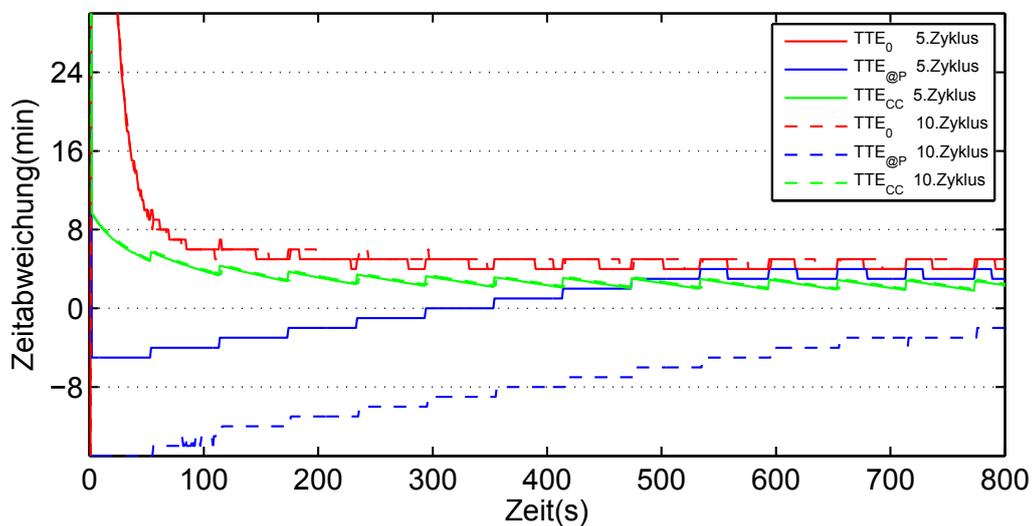


Abbildung 5.6.: Zeitabweichung der unterschiedlichen TTE-Abschätzungen am Anfang der Entladephase für zwei verschiedene Vollzyklen (Zeitabweichung = TTE-Abschätzung - Ideal-TTE; TTE_0 , $TTE_{@P}$: Impedance Tracking; TTE_{CC} : Coloumb Counting)

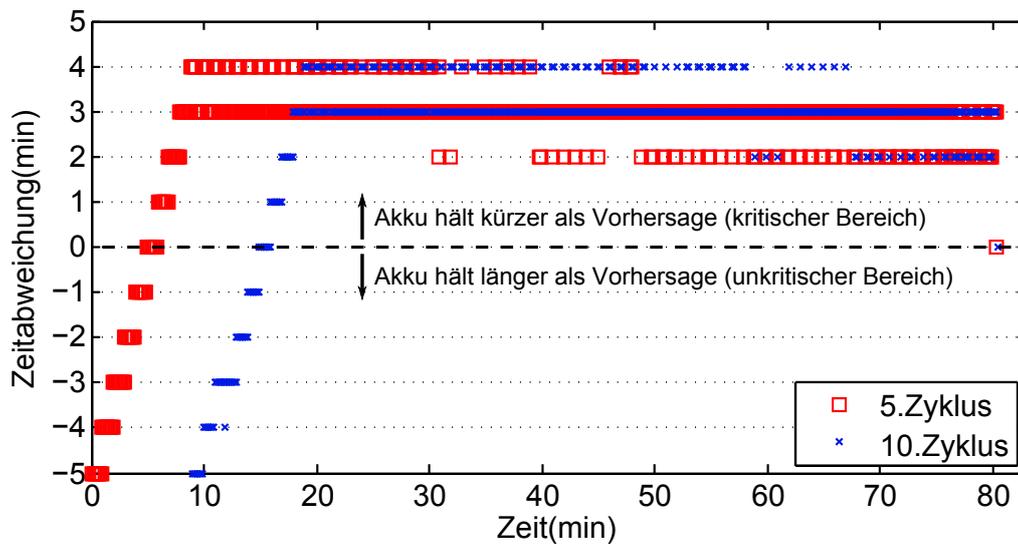


Abbildung 5.7.: Zeitabweichung der TTE@P-Vorhersage für zwei verschiedene Vollzyklen (Zeitabweichung = TTE-Abschätzung - Ideal-TTE)

Es fällt auf, dass die Vorhersage des TTE@P zum Anfang des Entladevorgangs spät reagiert, bis die Vorhersage korrigiert wird. Dieses Einschwingverhalten ist in Abb. 5.6 noch einmal für zwei Zyklen zu sehen. Dabei lässt sich genau wie in Abb. 5.7 erkennen, dass die Vorhersagen des Gas Gauges mit zunehmender Zyklenzahl ohne zwischenzeitliche Ruhephasen schlechter werden. Das Einschwingverhalten der TTE@P-Angabe ist zunächst deutlich besser als die der TTE₀-Angabe, verschlechtert sich allerdings mit steigender Zyklenzahl. Ein Vergleich der verschiedenen Einschwingzeiten aller drei Szenarien ist in Tab. 5.1 zu sehen. Es zeigt sich dabei, dass je nach Szenario und Zyklenzahl der TTE₀-Wert besser bzw. schlechter als der TTE@P-Wert ist. Einige Male braucht es über zwei Minuten, bis der TTE@P-Wert von der tatsächlichen Laufzeit weniger als 8 Minuten (entspricht 10% der Entladezeit bei Vollzyklen) abweicht. Wünschenswert sind Werte unter 10s sodass dem Benutzer kurz nach dem Starten des Entladevorgangs bereits verlässliche Informationen zur Verfügung stehen.

Nach der anfänglichen Einschwingzeit bleiben die Werte innerhalb der 8 Minuten-Grenze und geben gute Vorhersagen ab. Wie bereits in Abb. 5.5 zu sehen ist, nähern sich die Werte dem Idealwert während des Entladevorganges weiter an und geben somit verlässliche Informationen. Hierbei ist der TTE@P-Wert meistens leicht besser als der TTE₀-Wert. Der Vorhersagefehler ist für die verschiedenen Szenarien jeweils für die letzten 30 Minuten bzw. bei dem Realzyklus-Szenario für die Zeit ab dem Ladewechsel (ca. 10min) in Abb. 5.8 dargestellt.

Tabelle 5.1.: Time-To-Empty-Vorhersagefehler (Zeiten in s bis Betrag des Time-To-Empty-Vorhersagefehlers kleiner als 8min)

Vollzyklen			Realzyklen			Halbzyklen		
TTE ₀	TTE@P	TTE _{CC}	TTE ₀	TTE@P	TTE _{CC}	TTE ₀	TTE@P	TTE _{CC}
62	3	11	10	0	0	43	766	1
69	2	12	11	0	0	47	1173	6
69	2	12	10	1	1			
71	2	13	10	0	0			
70	2	12	10	0	0			
69	2	13	10	0	0			
70	115	13	9	0	0			
69	235	13	11	0	0			
68	355	13	11	0	0			
68	416	13	10	0	0			

Die maximalen Fehler betragen dabei vier Minuten zu viel bzw. eine Minute zu wenig. Bei der Anzeige der Informationen ist der positive Maximalfehler von besonderem Interesse. Im Zweifelsfall sollte die angezeigte Akkulaufzeit eher zu klein, als zu groß sein. So muss dies z.B. bei dem nach Norm geforderten Alarm fünf Minuten vor Laufzeitende berücksichtigt werden. Auf Grundlage der hier dargestellten Daten würde man somit den Alarm spätestens bei einem TTE@P-Wert von neun Minuten einsetzen lassen, um die fünf Minuten wirklich einzuhalten. Bei einer tatsächlichen Umsetzung ist es sinnvoll zudem noch einen weiteren Sicherheitspuffer von einigen Minuten hinzuzufügen. Die für den Alarm zu berücksichtigen Toleranzzeiten sollten gleich bei jedem angezeigten TTE-Wert mit eingerechnet werden, sodass hier der Alarm weiterhin bei einem angezeigten TTE von fünf Minuten auslöst. Zusammenfassend lässt sich für die TTE-Vorhersagen des verwendeten Gas Gauge-ICs

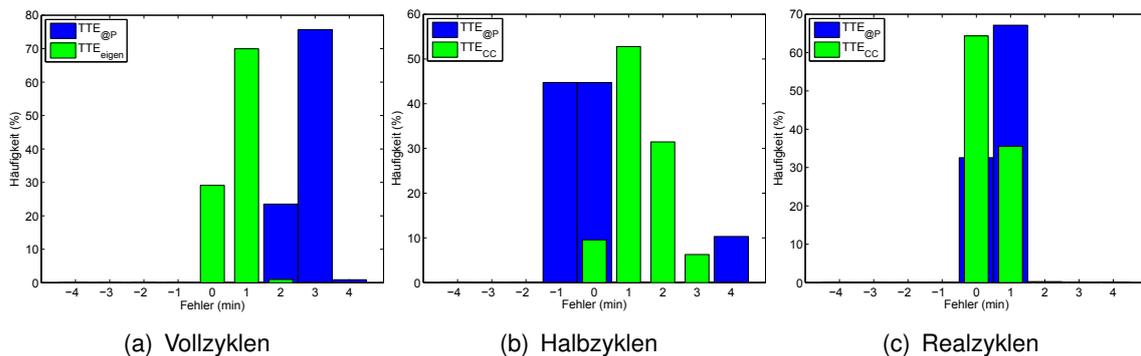


Abbildung 5.8.: Histogramme der Time-To-Empty-Fehler (TTE-Abschätzung - Ideal-TTE) über die letzten 30min bzw. bei Realzyklen ab Lastwechsel

sagen, dass nach dem Einpendeln gute und brauchbare Ergebnisse erzielt werden. Auch bei dem Ausbleiben von Vollzyklen und bei vorgenommenen Lastwechseln, erreicht die Vorhersage eine gute Qualität. Eine direkte Weitergabe der Gas Gauge-Werte an die Anzeige ist allerdings so nicht möglich. Grund hierfür sind die diskutierten Einschwingzeiten des ansonsten besseren TTE@P-Wertes und die nötige Berücksichtigung der Toleranzen. Die Daten müssen somit noch weiter verarbeitet werden.

Wie den Abb. 5.5 - 5.8 und Tab. 5.1 zu entnehmen ist, bildet die Vorhersage aufgrund eines einfachen Coloumb Counting-Algorithmus (TTE_{CC}), welcher weder mit zuvor eingegeben Parametern arbeitet, noch die Konstantleistungslast berücksichtigt, ebenfalls durchweg sehr gute Ergebnisse. Aufgrund der flachen Spannungskurve der LiFePO4-Akkus können - trotz der Annahme einer Konstantstromanwendung (s. Gl. 5.1) - gute Vorhersagen erzielt werden. In den meisten Fällen sind die Ergebnisse sogar besser als die des Gas Gauges. Dies ist nicht eindeutig nachvollziehbar, da für die Integration die gemessenen Stromwerte vom Gas Gauge selbst verwendet wurden. Die Ursache hierfür kann eine nicht optimale Konfiguration des Gas Gauges oder der Algorithmus als solches sein.

Die SOC-Abschätzungen während des Ladevorgangs verlaufen im wesentlichen wie die in Abb. 5.9 dargestellte. Die Gas Gauge Angabe steigt bei den Vollzyklen in etwa 15 Minuten vor Ladeschluss auf 100% SOC. In dieser Zeit werden weitere 0,07Ah - 0,11Ah von der Batterie aufgenommen. Dies entspricht 2-3% der Nennkapazität und damit auch gleichzeitig der Abweichung vom eigentlichen SOC-Wert. Die Information, dass die Batterie vollgeladen ist, sollte daher in Abhängigkeit vom Ladestrom und nicht vom SOC-Wert geschehen.

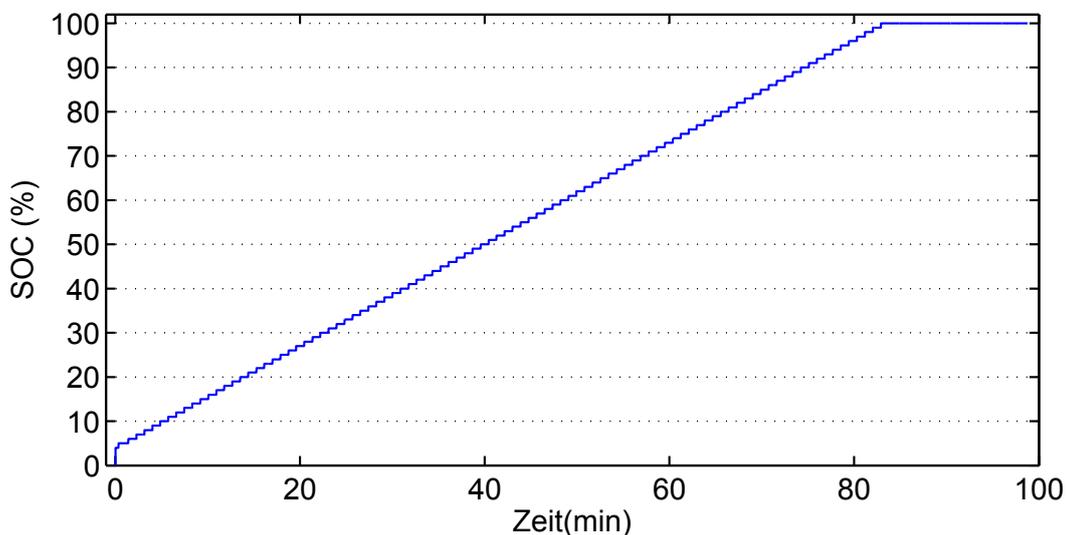


Abbildung 5.9.: SOC Abschätzung

Die durchgeführten Tests zeigen, dass das Gas Gauge gemäß der gewonnenen Daten für einen Einsatz in einem BMS für medizinische Geräte geeignet ist. Für eine bessere Beurteilung der Eignung, sowie der Bestimmung der Maximalfehler und der daraus resultierenden Verarbeitung der Vorhersagewerte sind noch weitere Tests notwendig. Zum einen muss eine größere Datenmenge als solches geschaffen werden, zum anderen müssen weitere Aspekte genauer untersucht werden: Hierzu zählt der Einfluss der Temperatur, des Alters, verschiedener Benutzungsprofile, wie auch der Test mit mehreren Akkus desselben Typs, um den Einfluss der Herstellungstoleranzen zu bestimmen. Diese Tests müssen zudem mit einem einsatzfähigen 8s28p-Akku durchgeführt werden. Weiterhin sollten die TTE-Werte mit dem simplen Coloumb Counting-Algorithmus verglichen werden, um die angenommene Notwendigkeit eines komplexeren Algorithmus beurteilen zu können. Sowohl mit fortschreitender Alterung der Batterie, als auch bei der Veränderung der bisher unveränderten Temperatur sollte ein komplexerer Algorithmus, welcher diese Parameter berücksichtigt, bessere Ergebnisse erzielen.

Bewertung der Realisierung

Mit Hilfe des Aufbaus konnten sowohl die ICs in Betrieb genommen, als auch die Architektur umgesetzt und getestet werden. Der dabei implementierte Zustandsautomat erlaubt es verschiedene Szenarien zu fahren und kann ebenfalls für andere ICs eingesetzt werden. Die Architektur und die verwendeten ICs sind für den Einsatz in medizinischen Geräten geeignet und können die geforderten Sicherheits-, Management-, Analyse- und Kommunikationsfunktionen erfüllen. Da der eingesetzte Monitoringchip bq77910A mittlerweile vom Hersteller abgekündigt wurde, muss für eine Umsetzung ein anderer Chip ausgewählt werden. Hierfür bietet sich zur Zeit der ISL94203 an. Mit diesem ließe sich der Balancingalgorithmus wie beschrieben verbessern.

Für weitere Tests bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen sollte der Temperaturfühler des bq34z100 direkt am Akkublock platziert werden. Zudem stellte sich das Mitschreiben auf SD-Karte als einfache Lösung heraus. Für die weiteren Langzeittests ist ein Mitloggen der Daten, welches die Überprüfung der Daten in Echtzeit erlaubt, allerdings sinnvoller.

6. Schluss

In dieser Arbeit wurde ein Batterie-Management-Systemkonzept für das Beatmungsgerät Evita Infinity V500 der Firma Dräger erstellt und in Tests erprobt. Dabei wurden sowohl die Anforderungen, welche sich durch die Verwendung von LiFePO₄-Akkus ergeben, als auch die speziell durch den Einsatz im Krankenhaus auftretenden Erfordernisse erarbeitet und dargestellt. Die Hauptaspekte hierbei sind die Zuverlässigkeit der Informationen über den Lade- bzw. Batteriezustand und die einfache Handhabung für das Personal. Hieraus konnten die notwendigen Funktionen für das BMS abgeleitet und beschrieben werden. Für die Zusammenstellung der Funktionen wurde eine Architektur entwickelt, deren Funktionalität durch einen Aufbau bestätigt werden konnte. Der Aufbau stellt dabei eine mögliche Umsetzung dar und erlaubte eine erste Beurteilung der verwendeten ICs. Gemäß den Ergebnissen sind die ICs bq34z100 (Gas Gauge) und bq77910A (Monitoringchip) für das entwickelte BMS geeignet. Dennoch konnten einige Schwächen beim Balancing und bei der Angabe der Betriebslaufzeit (TTE) aufgezeigt werden, welche entweder die Verwendung anderer Lösungen oder eine noch zu entwickelnde Verarbeitung der Daten bedeuten kann.

Für die weitere Entwicklung eines BMS ist es notwendig, noch weitere Tests durchzuführen. Zum einen müssen für die behandelten Aspekte statistisch relevante Datenmengen gewonnen werden, um gesicherte Aussagen treffen zu können. Zum anderen konnten einige Themen aus Zeitgründen nicht behandelt werden. So wurde der Temperaturaspekt in dieser Arbeit nicht näher untersucht. Hierunter fällt zum einen die genauere Beurteilung der Notwendigkeit eines thermischen Managements, sowie die Untersuchung der Genauigkeit der Gas Gauge-Abschätzungen bei sich ändernden Umgebungstemperaturen. Die Alterungseffekte von LiFePO₄-Akkus und die damit verbundenen SOH- und RUL-Abschätzungen konnten ebenfalls nur in der Theorie behandelt werden. Eine genauere Bestimmung der Veränderungen sowohl aufgrund der kalendarischen, als auch der zyklischen Alterung, sowie deren Auswirkungen auf die SOC-Abschätzung stehen noch aus.

In dieser Arbeit wurden somit die relevanten Aspekte für die Entwicklung eines einsatzfähigen BMS für medizinische Geräte dargestellt. Sowohl bei den Herstellern, als auch in der Literatur gibt es bis heute nur vereinzelt Lösungen, welche speziell für den Einsatz mit LiFePO₄-Zellen geeignet sind. Durch das gesteigerte Interesse der Automobil- wie auch der Energiebranche für diese Akkuchemie, sind hier in naher Zukunft weitere Veröffentlichungen und Lösungen zu erwarten.

Literaturverzeichnis

- [A123 2009] A123: *High Power Lithium Ion APR18650M1A Datasheet*. 2009. – URL <http://www.a123systems.com/lifepo4-battery-cell.htm>
- [Abba u. a. 2011] ABBA, Andrea ; MANENTI, Antonio ; MERATI, Alessandro ; SAVARESI, Sergio M. ; GERACI, Angelo: A New BMS Architecture Based on Cell Redundancy. In: *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS* 58 (2011), S. 43149–4322
- [Barsukov und Qian 2013] BARSUKOV, Yevgen ; QIAN, Jinrong: *Battery Power Management for Portable Devices*. Artech House, 2013. – ISBN 1-60807-491-9
- [batteryuniversity 2015] BATTERYUNIVERSITY: *Secondary batteries*. Batteryuniversity. 2015. – URL http://batteryuniversity.com/learn/article/secondary_batteries. – besucht am 12.01.2015
- [Finamorel u. a. 2010] FINAMOREL, Peter ; LIU, Ping ; WANG, John ; HICKS-GARNER, Jocelyn ; SHERMAN, Elena ; SOUKIAZIAN, Souren ; VERBRUGGE, Mark ; TATARIA, Harshad ; MUSSER, James: Aging Mechanisms of LiFePO₄ Batteries Deduced by Electrochemical and Structural Analyses. In: *Journal of The Electrochemical Society* 157 (2010), S. 499–507
- [Fleischer u. a. 2014] FLEISCHER, Christian ; SAUER, Dirk U. ; WAAG, Wladislaw: Critical review of the methods for monitoring of lithium-ion batteries in electric and hybrid vehicles. In: *Journal of Power Sources* 258 (2014)
- [Gandiaga u. a. 2014] GANDIAGA, I. ; SARASKETA-ZABALA, E. ; RODRIGUEZ-MARTINEZ, L.M. ; VILLARREAL, I.: Calendar ageing analysis of a LiFePO₄/graphite cell with dynamic model validations: Towards realistic lifetime predictions. In: *Journal of Power Sources* 272 (2014), S. 45–57
- [Han u. a. 2013] HAN, Xuebing ; LU, Languang ; LI, Jianqiu ; HUA, Jianfeng ; OUYANG, Minggao: A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles. In: *Journal of Power Sources* 226 (2013), S. 272–288
- [Hartley u. a. 2011] HARTLEY, Tom T. ; HUSAIN, Iqbal ; YARLAGADDA, Sriram: A Battery Management System using an Active Charge Equalization Technique based on a DC/DC Converter Topology. In: *IEEE* (2011), S. 1188–1195

- [Hölter 2014] HÖLTER, M.: *TechDay Batterie- und Lademanagement*. Benning. 2014
- [IEC60601 2012] IEC60601: *IEC60601-1: Medical electrical equipment - Part 1 General requirements for basic safety and essential performance*. International Electrotechnical Commission (IEC). 2012
- [IEC62133 2012] IEC62133: *IEC 62133: Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes - Safety requirements for portable sealed secondary cells, and for batteries made from them, for use in portable applications*. International Electrotechnical Commission (IEC). 2012
- [ISO80601 2011] ISO80601: *ISO 80601-2-12: Medical electrical equipment - Part 2-12 Particular requirements for basic safety and essential performance of critical care ventilators*. International Organization for Standardization (ISO). 2011
- [Jossen und Weydanz 2006] JOSSEN, Andreas ; WEYDANZ, Wolfgang: *Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen*. Reichardt Verlag, 2006. – ISBN 978-3-939359-11-1
- [Lindner und Niedermayr 2014] LINDNER, D. ; NIEDERMAYR, F.: Report for Workpackage 6. In: *Akku4Future* (2014)
- [Maehliss 2013] MAEHLISS, J.: *Lithium-Ionen-Batterien-Gefahrenpotential und Umgang*. Batteryuniversity. 2013
- [Novak u. a. 2013] NOVAK, Petr ; SASAKI, Tsuyoshi ; UKYO, Yoshio: Memory effect in a lithium-ion battery. In: *nature materials* (2013)
- [Rahn und Wang 2013] RAHN, Christopher D. ; WANG, Chao-Yang: *Battery Systems Engineering*. Wiley, 2013. – ISBN 978-1-119-97950-0

A. Anhang

A.1. Zustandsdiagramm

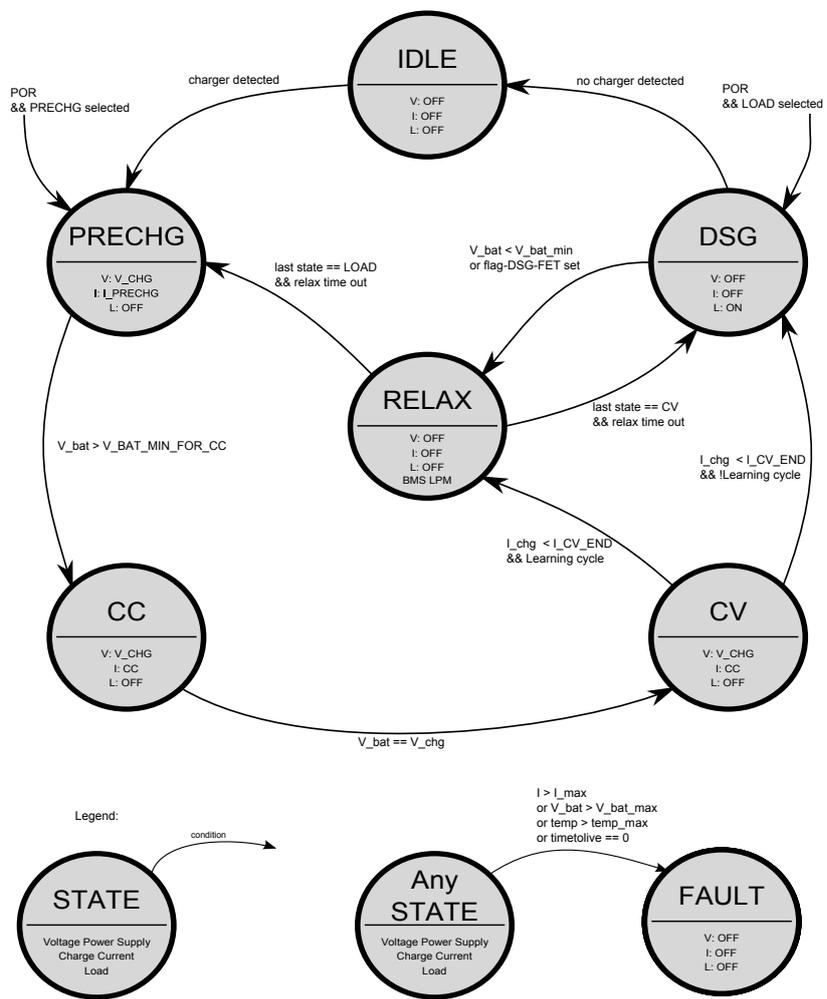


Abbildung A.1.: Zustandsdiagramm der Lade-/Entladeroutine

A.2. Lernzyklus

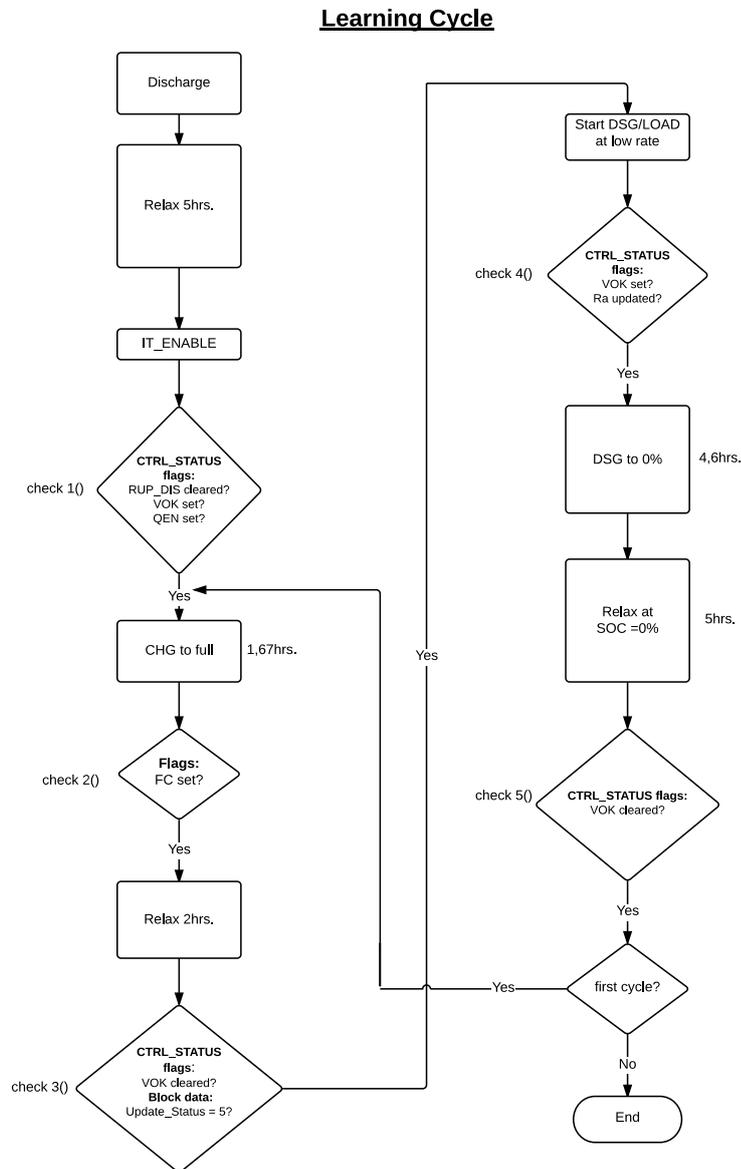


Abbildung A.2.: Flussdiagramm Lernzyklus

A.3. Halbzyklen-Szenario

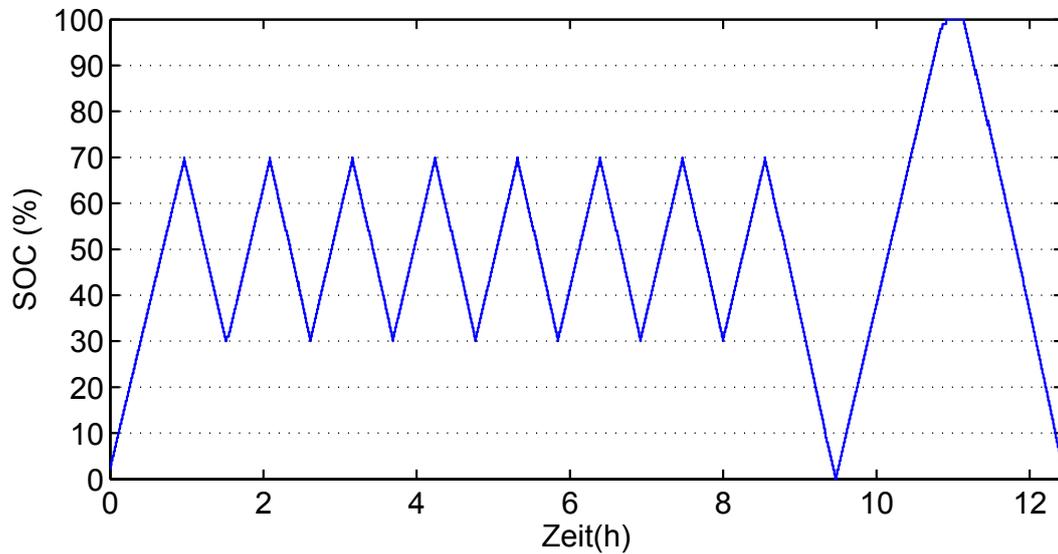


Abbildung A.3.: SOC-Verlauf bei den gefahrenen Halbzyklen

A.4. Weiterer Anhang

Der weitere Anhang der Arbeit befindet sich auf CD. Diese ist bei Prof. Dr.-Ing. Karl-Ragmar Riemschneider oder Prof. Dr.-Ing. Lutz Leutelt einzusehen.

Im weiteren Anhang enthalten:

- C-Quellcode vom Zustandsautomaten
- Matlab-Dateien zur Auswertung der Daten
- Änderungen an Evaluationsboards
- Datenblätter der verwendeten Chips
- Vollständige Konfiguration des Gas Gauge-ICs

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, 27. Februar 2015

Ort, Datum

Unterschrift