

Entwicklung eines modularen Batterie Management Systems für Lithium- Polymer- Akkumulatoren



Patrick Denk

Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Andreas Koch

Technische Universität
Darmstadt

Fachbereich Informatik

27.09.2013

ABSTRACT

Lithium-Polymer-Akkumulatoren (kurz: LiPo) sind wegen ihrer hohen Energie- und Leistungsdichte meist die erste Wahl der Akkutechnologie, wenn es darum geht mobile Gerätschaften wie Handy, Laptop oder auch Elektroauto mit Energie zu versorgen. Neben den Vorteilen dieser Technologie bringt sie allerdings auch gravierende Nachteile mit sich. Im Gegensatz zu herkömmlichen Nickel-Metall-Hybrid-Akkus (NiMH) besteht beim Überladen von LiPo-Akkus Feuergefahr, sowie beim Unterladen die Gefahr den Akku zu zerstören. Diese Gefahren können eingedämmt werden indem der LiPo-Akku in Kombination mit einem, wie in dieser Arbeit entwickelten, Batterie Management System (BMS) verwendet wird.

Als erster Schritt der Entwicklung werden verschiedene Fakten zusammengetragen, welche die Lebensdauer eines LiPo Akkus beeinflussen. Basierend auf diesen Erkenntnissen werden dann die zwei vorherrschenden Balancierverfahren mit Hinblick auf die Lebensdauer des Akkus analysiert.

Als zweiter Schritt werden die drei Hardwareprobleme vorgestellt, die bei der Entwicklung eines BMS gelöst werden müssen. Zu jedem Problem werden verschiedene Lösungsvorschläge aufgezeigt und miteinander verglichen.

Im letzten Schritt wird dann aus den gewonnenen Erkenntnissen ein optimal auf die gestellten Anforderungen abgestimmtes BMS entwickelt und evaluiert.

Alle Anforderungen konnten erfüllt werden und wurden teilweise sogar übertroffen. Der Balancierstrom des BMS erreicht mit 84 mA das Doppelte des geforderten Wertes. Auch der Stromverbrauch übertrifft mit lediglich 197 μA die Anforderungen bei weitem. Trotzdem wurden Größe und Kosten nicht vernachlässigt. Das BMS ist geringfügig kleiner als die geforderten 50 x 30 x 10 mm und kostet mit 1,05 € pro Zelle weniger als alles Vergleichbare.

INHALTSVERZEICHNIS

ABSTRACT	2
<u>1 EINLEITUNG</u>	5
1.1 EINLEITUNG	5
1.2 ZIELSETZUNG.....	6
1.3 MOTIVATION	6
1.4 GLIEDERUNG.....	6
<u>2 ANALYSE DER AKKU-TECHNOLOGIEN.....</u>	8
2.1 AKKU GRUNDBEGRIFFE.....	8
2.2 AKKU FUNKTIONSWEISE.....	10
2.3 LITHIUM AKKU MATERIALIEN UND FUNKTIONSWEISE.....	12
2.4 LADUNG EINER LIPO-ZELLE	16
2.5 ENTLADUNG EINER LIPO-ZELLE	17
2.6 LEBENSDAUER EINER LIPO-ZELLE.....	19
2.7 AKKUPACK AUFBAU	26
<u>3 BALANCIEREN</u>	29
3.1 GRÜNDE FÜR DEN ZELLENDRIFT	30
3.2 BALANCIERMETHODEN	32
<u>4 DESIGNMÖGLICHKEITEN</u>	35
4.1 ZELLSPANNUNG MESSEN.....	35
4.2 LADUNGSAUSTAUSCH.....	40
4.3 KOMMUNIKATION	48
4.4 FERTOGE HARDWARE IC'S	49
<u>5 REALISIERUNG</u>	54
5.1 ANFORDERUNGEN	54
5.2 HARDWARE VERSION 1	55
5.3 HARDWARE VERSION 2	62
5.4 SOFTWARE	64
<u>6 EVALUIERUNG</u>	77
6.1 BALANCIEREN.....	77

6.2	KOMMUNIKATION	78
6.3	STROMVERBRAUCH	78
6.4	KOSTEN	80
7	<u>ZUSAMMENFASSUNG</u>	82
7.1	DESIGNENTSCHEIDUNGEN	83
7.2	ERREICHTE FEATURES	83
7.3	VERGLEICH MIT KOMMERZIELLEN LÖSUNGEN	84
8	<u>AUSBlick.....</u>	87
8.1	VERBESSERUNGEN	87
8.2	ERWEITERUNGEN	88
9	<u>ANHANG</u>	89
	<u>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....</u>	90
	<u>ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....</u>	91
	<u>TABELLENVERZEICHNIS.....</u>	94
	<u>LITERATURVERZEICHNIS</u>	96

1 EINLEITUNG

1.1 EINLEITUNG

Japan, 11. März 2011, die Erde bebt und eine Erdbebenwoge (jap. Tsunami) rollt auf die Küste von Fukushima, dem Standort des 1966 erbauten Kernkraftwerks Fukushima Daiichi zu. Innerhalb weniger Sekunden nach Auftreffen des Tsunamis werden sicherheitskritische Einrichtungen des Kraftwerks so stark beschädigt, dass der Super-GAU nicht mehr abzuwenden ist. Spätestens nach diesem Unfall erkennt die Bundesregierung, dass sich das Atomzeitalter mit günstiger und reichlich vorhandener Energie seinem Ende neigt. Daraufhin werden Investitionen in erneuerbaren Energien wie Windkraft, Wasserkraft und auch Sonnenenergie getätigt, um der Kernkraft bis 2020 den Rücken kehren zu können. Auch wenn diese Energien keinen Super-GAU herbei führen können, besitzen sie doch einen gravierenden Nachteil. Sie sind nur dann verfügbar wenn der Wind weht, das Wasser fließt oder die Sonne scheint. Um erneuerbaren Energien zum Durchbruch zu verhelfen, bedarf es also einem Energiespeicher, der mit überschüssiger Energie gefüllt werden kann, wenn im Stromnetz Überfluss besteht und zudem Energie in das Stromnetz abgibt, wenn erhöhter Bedarf besteht.

Eine Möglichkeit zur Speicherung von elektrischer Energie besteht in der Nutzung von Akkumulatoren, welche elektrische Energie in Form von elektrochemischer Energie speichern und bei Bedarf auch wieder abgeben können.

Es existieren zahlreiche Akkutypen wie zum Beispiel der Nickel-Metallhydrid- oder der Blei-Akku, die in letzter Zeit allerdings mehr und mehr durch leistungsstärkere Lithium-Polymer-Akkus ersetzt werden.

Neben der stationären Speicherung von Energie eignet sich der LiPo Akku wegen seiner vergleichsweise hohen Energie- und Leistungsdichte auch zur Energieversorgung mobiler Gerätschaften wie Handy, E-Bike oder auch Elektroauto.

Während bei einem Handy noch eine einzelne LiPo-Zelle genügt um den Energiebedarf zu decken, müssen LiPo-Zellen bei größerem Energiebedarf wie beispielsweise dem Elektroauto oder einer Stromnetz-Puffer-Batterie zu einem Akkupack verschaltet werden. In einem Akkupack befinden sich mehrere parallel und in Serie geschaltete Zellen, die von außen wie ein großer Akku mit erhöhter Spannung betrachtet werden. Dies hat aber den Nachteil, dass einzelne Zellen des Akkupack während dem Lade- und Entladevorgang nicht mehr individuell vom Ladegerät überwacht werden können. Wegen Herstellertoleranzen und Alterungsprozessen können Zellen innerhalb des Akkupacks weniger Kapazität enthalten als andere und nach mehreren Lade- und Entladezyklen über- bzw. unterladen werden.

Um dies zu verhindern, soll in dieser Arbeit ein Batterie-Management-System (kurz: BMS) entwickelt werden, welches innerhalb des Akkupacks verbaut ist und durch Balanciermaßnahmen alle Zellen aneinander angleicht.

1.2 ZIELSETZUNG

Das Ziel dieser Arbeit ist es, zuerst die LiPo-Technologie genauer zu betrachten, um anschließend aus den gewonnen Erkenntnissen ein optimal auf die LiPo-Technologie abgestimmtes BMS entwickeln zu können.

Bei der Entwicklung des BMS sollen außerdem verschiedene Designmöglichkeiten aufgezeigt und verglichen werden, und aus den daraus gewonnen Erkenntnissen dann ein optimal auf die Anwendung zugeschnittenes BMS entstehen.

Der Einsatzort des BMS soll im Bereich E-Bike- oder Pedelec-Akku liegen, woraus folgende Anforderungen entstehen.

Es sollen 6 - 24 Zellen bis zu einer Größe von 20Ah pro Zelle unterstützt werden. Es soll möglich sein das BMS mit externen Systemen zu verbinden, um beispielsweise den aktuellen Akkustand übermitteln zu können. Außerdem soll das BMS die Größe des Akkupacks kaum verändern, und auch dauerhaft in diesem verbaut werden. Um den Akkupack durch die dauerhafte Verbindung mit dem BMS nicht zu entladen, muss besonderen Wert auf energiesparendes Design gelegt werden. Schlussendlich soll das gesamte System so kostengünstig wie möglich sein.

Zusammenfassend gelten folgende Anforderungen:

- Modularer Aufbau für bis zu 24 Zellen in Serie
- Für LiPo-Zellen bis ~ 20Ah
- Kommunikationsfähig
- Kleiner Formfaktor: 30 x 50 x 10 mm
- Geringer Stromverbrauch: < 1mA
- Einfache Herstellung
- Geringer Preis pro Zelle

1.3 MOTIVATION

Es existieren zwar bereits zahlreiche BMS auf dem Markt (siehe Abschnitt 7.3), allerdings erfüllen keine die in dieser Arbeit geforderten Anforderungen:

- Modulare BMS sind meist auf große Zellen ausgelegt und sind deswegen zu groß
- Kommunikationsfähige und parametrierbare BMS sind im Bereich von 400€ angesiedelt und übersteigen damit teilweise den Preis des Akkus selbst.
- Der Stromverbrauch der auf dem Markt befindlichen BMS ist sehr hoch

Aus diesen Gründen wird in folgender Arbeit ein eigenes BMS entwickelt.

1.4 GLIEDERUNG

Die folgende Arbeit lässt sich in 5 Kapitel unterteilen:

Analyse der LiPo-Akku-Technologien: Ziel dieses Abschnittes ist es die Funktionsweise der verschiedenen LiPo-Akku-Technologien aufzuzeigen und miteinander zu vergleichen. Des Weiteren

werden die inneren Vorgänge des Akkus während dem Lade- und Entladevorgang genauer betrachtet, um Erkenntnisse zur Optimierung des Balancieralgorithmus des BMS zu erlangen.

Balancierverfahren: In diesem Abschnitt geht es um das Balancieren von LiPo Akkupacks. Insbesondere wird darauf eingegangen warum eine Balancierung nötig ist und wie sie am besten funktionieren sollte.

Aufzeigen von verschiedenen Designmöglichkeiten: In diesem Abschnitt werden verschiedene elektrotechnische Realisierungen veranschaulicht, welche es ermöglichen Spannungen einzelner Zellen zu messen und Energie zwischen den Zellen zu transferieren.

Realisierung des BMS: In diesem Kapitel werden die im vorangegangenen Kapitel gewonnenen Erkenntnisse genutzt, um einen Schaltplan, Platine und Software für ein voll funktionsfähiges BMS zu entwickeln.

Evaluierung: Nachdem ein funktionsfähiges BMS hergestellt wurde, wird es im Hinblick auf die gestellten Anforderungen evaluiert.

2 ANALYSE DER AKKU-TECHNOLOGIEN

2.1 AKKU GRUNDBEGRIFFE

Um im Folgenden die verschiedenen LiPo-Technologien und Funktionsweisen genauer beschreiben zu können, bedarf es zuerst einigen Begriffserklärungen.

Spannung einer Zelle [V]

Die Spannung einer Zelle wird im unbelasteten Zustand gemessen und lässt sich als Indikator des Ladezustands deuten. Je voller eine Zelle ist, desto höher ist ihre Spannung. Die Spannung ist also proportional zum Ladezustand wie Abbildung 1 verdeutlicht.

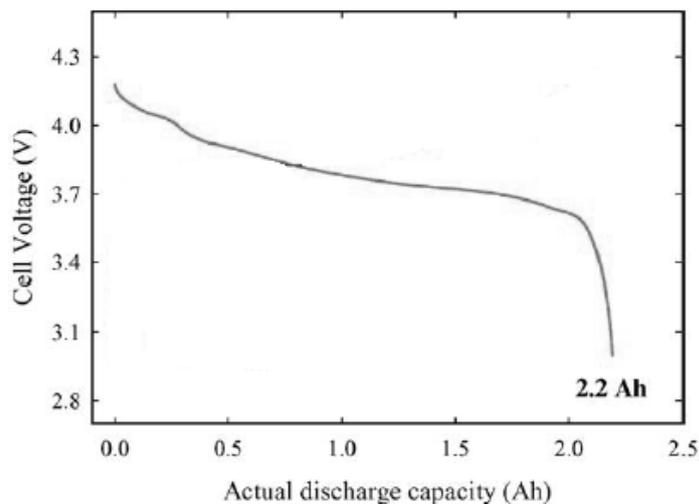


Abbildung 1: Spannungsverlauf beim Entladen einer LiPo-Zelle, aus (Popov, et al., 2004)

Wie man erkennen kann, besteht zwischen Akkuspannung und Ladezustand kein linearer Zusammenhang.

Minimale und maximale Spannung variieren je nach Akku-Technologie zwischen 2,0 und 4,2 Volt, und müssen eingehalten werden, um die vom Hersteller angegebene Lebensdauer zu erreichen.

Kapazität einer Zelle [Ah]

Der Energiegehalt einer Zelle wird meist in Amperestunden [Ah] angegeben und mit dem Buchstaben **C** für engl. Capacity abgekürzt. Hierbei wird bewusst nicht die Wattstunde [Wh] als Einheit für die Beschreibung der Energiemenge genutzt, da sich dadurch wegen der variablen Zellspannung während des Entladens die Berechnung des entnehmbaren Stroms [A] sehr erschwert.

Innenwiderstand [Ω]

Der Innenwiderstand einer Zelle wird in Ohm [Ω] angegeben und ist ein Indikator für den maximalen Entladestrom, sowie für das Alter der Zelle. Je älter eine Zelle ist und desto öfter sie geladen wurde, desto höher ist ihr Innenwiderstand gegenüber dem Neuzustand.

Entladestromfaktor

Der Lade- sowie der Entladestrom der Zelle wird meist in einem Vielfachen der Kapazität angegeben. Beispielsweise bedeutet ein maximaler Ladestromfaktor von 0,5C, dass pro Stunde die Hälfte der maximalen Kapazität der Zelle geladen werden kann.

Entladezustand: DOD

Der Entladezustand (engl.: **Depth of Discharge**, kurz **DOD**) beschreibt zu wie viel Prozent eine Zelle entladen wurde. Ein DOD von 80% bedeutet beispielsweise, dass sich noch 20% Restkapazität in der Zelle befindet. Der DOD wird meist im Zusammenhang mit der Lebensdauerangabe des Herstellers verwendet, um die Lebensdauer bei verschiedenen Entlademustern zu spezifizieren.

Ladezustand: SOC

Der Ladezustand (engl.: **State of Charge**, kurz **SOC**) ist das Gegenteil zum DOD. Er gibt also an wie viel Prozent der Gesamtkapazität sich noch in der Zelle befindet und wird meist im Zusammenhang mit Lade- oder Balanciervorgängen verwendet.

Lebensdauer

Die Lebensdauer einer Zelle wird als Anzahl der Ladezyklen einer bestimmten Tiefe (DOD) spezifiziert, nach denen die Kapazität der Zelle auf 80% ihres Ausgangswertes gefallen ist. Beispielsweise bedeutet eine Lebensdauer Angabe von 500 Zyklen bei 100% DOD, dass eine Zelle 500-mal komplett geladen und wieder entladen werden kann und danach noch 80% ihrer Nennkapazität besitzt.

Energiedichte [Wh/kg]

Die Energiedichte einer Zelle ist definiert als das Verhältnis zwischen der gespeicherten Energiemenge und der Masse der Zelle. Sie wird mit Wattstunden pro Kilogramm [Wh/kg] angegeben und lässt sich berechnen, indem man die Nennspannung mit der Nennkapazität des Akkus multipliziert und dann durch das Gewicht dividiert.

Tabelle 1 zeigt den typischen Energiegehalt einiger Speichersysteme.

Speichertechnologie	Energiedichte [Wh/kg]	Lebensdauer bei 100% DOD
Elektrolyt - Kondensator	0,01	100.000x
Blei Akku	30	500x
Lithium Titanat Akku	90	10.000x
Nickel Metallhybrid Akku	100	500x
Lithium Polymer Akku	125	1.000x
Wasserstoff inkl. Tank	331	∞
Lithium Luft Akku¹	1000	100x

Tabelle 1: Vergleich der Energiedichte verschiedener Speichertechnologien, aus (wikipedia, Energiedichte)

Kondensatoren können in Bezug auf ihr Gewicht nur sehr wenig Energie speichern. Der Blei-Akku steht schon etwas besser da. Lithium Polymer Akkus können in Bezug auf ihr Gewicht allerdings die

¹ In Entwicklung

meiste Energie speichern. Der Lithium-Luft-Akku befindet sich derzeit noch in Entwicklung, soll aber den LiPo Akku in Bezug auf seine Energiedichte um eine Größenordnung überbieten.

Neben der Energiedichte in Bezug auf das Gewicht wird bei manchen Speichertechnologien auch die Energiedichte in Bezug auf das Volumen in Betracht gezogen, falls diese sich wesentlich unterscheiden. Beispielsweise besitzt reiner Wasserstoff eine Energiedichte von 40k Wh/kg bei einer volumetrischen Energiedichte von nur 2,7 Wh/l bei einem Bar Kompression. Zum Vergleich hat Benzin mit 12 kWh/kg eine volumetrische Energiedichte von 9,6k Wh/l.

Leistungsdichte [W/KG]

Die Leistungsdichte beschreibt wie viel Leistung pro Gewichtseinheit des Speichers zur Verfügung steht. Sie wird in Watt pro Kilogramm angegeben und wird meist nur dann beachtet, wenn besonders viel Leistung benötigt wird, oder nur wenig Leistung zur Verfügung steht. Tabelle 2 zeigt die typische Leistungsdichte einiger Systeme.

Speichertechnologie	Leistungsdichte [W/kg]
PEMFC Brennstoffzelle	250 ²
Lithium Polymer	500
Lithium Titanat	4000
Elektrolyt Kondensator	10000

Tabelle 2: Leistungsdichte verschiedener Speichertechnologien, aus (wikimedia, Energiespeicher)

Kondensatoren liefern beispielsweise viel Leistung bei nur wenig Gewicht und werden deshalb oft zum kurzzeitigen Ausgleichen von Spannungsspitzen eingesetzt.

2.2 AKKU FUNKTIONSWEISE

Generell besteht jede Batterie, wie auch jeder Akku, aus zwei verschiedenen Elektroden. Einem verbindenden Elektrolyt und einem Separator. Dabei fungiert eine Elektrode als Anode, also als Elektronenspender, der negative Pol des Akkus, und eine Elektrode als Kathode, welche Elektronen absorbiert, also der positive Pol des Akkus. Abbildung 2 zeigt den Aufbau einer einfachen Batterie auf Basis von Zink und Kupfer, das sog. Daniell Element.

² (Zedda & Schlota, 1999/2000)

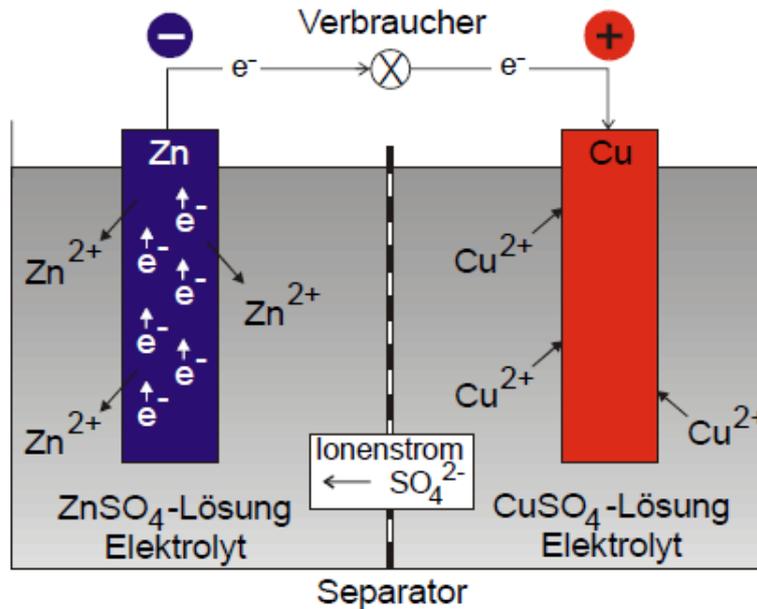
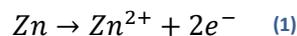


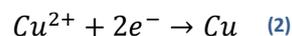
Abbildung 2: Aufbau des Zink-Kupfer-Akkus, aus (Winter & Möller, 2005)

Der negative Pol besteht aus Zink, der positive aus Kupfer. Die Elektrolyt-Lösung besteht aus Kupfer- und Zinksulfat. Der Separator besteht aus einem ionendurchlässigen Filterpapier.

Das Redoxpotential (siehe Tabelle 3: Redoxpotentiale verschiedener Stoffe) des Zinks beträgt -0,76 Volt, während das Potential von Kupfer bei 0,35 Volt liegt. Dies ergibt eine Spannung von $0,35 - (-0,76) = 1,11$ Volt. Verbindet man also die beiden Halbzellen mit einer Glühlampe, fließen bedingt durch das geringere Potential des Zinks, Elektronen in Richtung des Kupfers. Formel (1) zeigt die am negativen Pol ablaufende Oxidationsgleichung. Zink reagiert zu zwei Elektronen und einem Zink-Ion welches in den Elektrolyten übergeht.



Am positiven Kupferpol werden die Elektronen aufgenommen, wie Formel (2) beschreibt. Ein in der Elektrolytlösung vorhandenes Kupfer-Ion reduziert mit zwei Elektronen zu Kupfer.



Im Elektrolyt der Zink Elektrode entsteht nun ein Zn^{2+} -Überschuss, während im Elektrolyt der Kupfer Elektrode ein SO_4^{2-} -Überschuss entsteht. Durch das ionendurchlässige Filterpapier diffundieren die beiden Ionen in das jeweils andere Elektrolyt und rekombinieren zu ZnSO_4 .

Schließt man nun anstatt der Glühlampe eine Spannungsquelle mit einer Spannung größer der Potentialdifferenz der beiden Halbzellen an, so laufen alle Prozesse in umgekehrter Richtung ab und der Akku wird wieder geladen. Einzig die Mischung von Kupfer- und Zinksulfat im Elektrolyten der Kupferelektrode lässt sich nicht mehr vollständig entmischen, wodurch die Lade- und Entladezyklen dieses Akkus stark begrenzt sind.

2.2.1 REDOXPOTENTIAL

Das Redoxpotential beschreibt die Bereitschaft eines Stoffes in einem Stoffpaar Elektronen aufzunehmen oder abzugeben. Der Stoff mit dem geringeren Potential gibt Elektronen ab, während der Stoff mit dem höheren Potential Elektronen aufnimmt. Generell lässt sich sagen je größer das Potential zwischen Kathoden- und Anodenmaterial eines Akkus ist, desto größer ist seine Energiedichte. Tabelle 3 zeigt einige für Akkus typische Stoffe und ihre Redoxpotentiale bei Verwendung einer Wasserstoff Halbzelle als Reaktionspartner.

Material	Formel	Redoxpotential [V]
Cobalt	$Co^{3+} + e^{-} = Co^{2+}$	1,82
Titan	$Ti^{3+} + 2 e^{-} = Ti^{+}$	1,25
Eisen	$Fe^{3+} + e^{-} = Fe^{2+}$	0,77
Kupfer	$Cu^{2+} + 2 e^{-} = Cu$	0,35
Wasserstoff	$2H^{+} + 2 e^{-} = H_2$	0
Cobalt	$Co^{2+} + 2 e^{-} = Co$	-0,28
Zink	$Zn^{2+} + 2 e^{-} = Zn$	-0,76
Lithium	$Li^{+} + e^{-} = Li$	-3,04

Tabelle 3: Redoxpotentiale verschiedener Stoffe bei Standardbedingungen³, aus (wikipedia, Standard_electrode_potential)

Man erkennt, dass Lithium wegen seines großen negativen Potentials ein perfekter Kandidat für den negativen Pol eines Akkus ist, während Cobalt und Eisen ein guter Stoff für den Positiven Pol eines Akkus ist.

2.3 LITHIUM AKKU MATERIALIEN UND FUNKTIONSWEISE

Lithium Akkus bestehen wie auch das Daniell Element aus zwei Elektroden. Einem Elektrolyten und dem Separator, die in diesem Abschnitt genauer erklärt werden.

Dabei wird auf folgende Punkte eingegangen:

- Elektrolyt und Separator
 - o Lithium Ionen
 - o Lithium Polymer
- Kathoden
 - o $LiCoO_2$
 - o $LiMn_2O_4$
 - o $LiFePO_4$
- Anoden
 - o Li_2TiO_3

2.3.1 ELEKTROLYT UND SEPARATOR

Der Separator hat die Aufgabe die beiden elektrolytgetränkten Elektroden voneinander zu trennen, gleichzeitig aber ein guter Ionenleiter zu sein.

³ Standardbedingungen: 25°C, 1 Atmosphäre, hochreines Material

Beim Lithium-Akku existieren zwei vorherrschende Separatorbauweisen. Zum einen Lithium-Ionen und zum anderen Lithium-Polymer, wie in Abbildung 3 dargestellt.

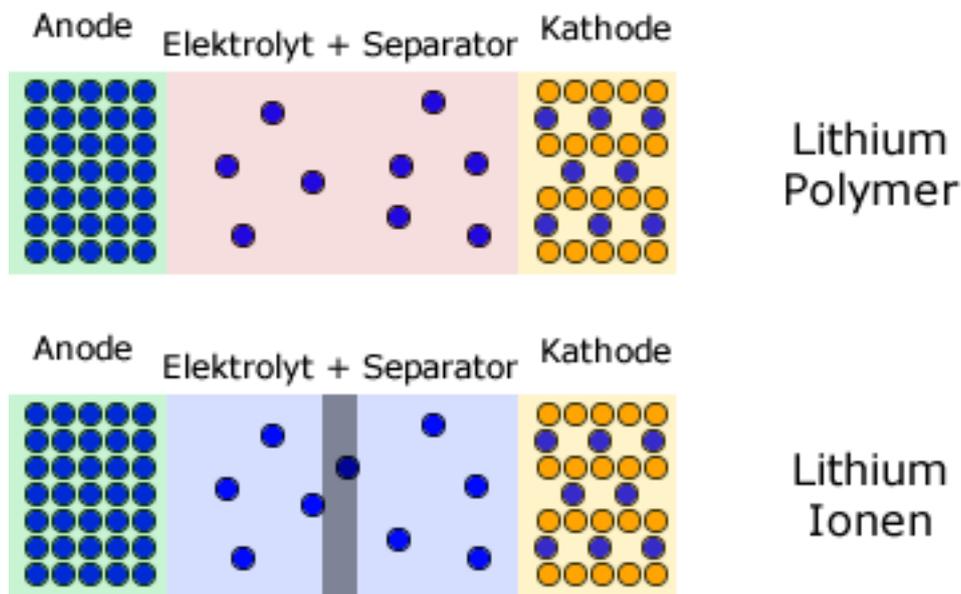


Abbildung 3: Schematischer Aufbau Lithium-Ionen und Polymer

Die Anode besteht aus Lithium (Blau). In der Mitte befindet sich der Elektrolyt mit Separator (Hellblau, Rot). Die Kathode besteht aus $LiCoO_2$ oder $LiMn_2O_4$ (Orange + Blau)

2.3.1.1 LITHIUM-IONEN

Beim Lithium-Ionen-Akku besteht der Separator aus einem ionendurchlässigen Kunststoff und ist von einem flüssigen Elektrolyten, wie zum Beispiel Lithiumhexafluorophosphat $LiPF_6$ gelöst in Ethylencarbonat umgeben. Durch die flüssige Eigenschaft muss durch die äußere Hülle des Akkus sichergestellt werden, dass Separator und Elektrolyt des Akkus an ihrem vorgesehenen Platz bleiben. Dies limitiert vor allem die möglichen Bauformen und erhöht die Herstellungskosten. Ein Lithium-Ionen-Akku benötigt immer ein festes und stabiles Gehäuse.

2.3.1.2 LITHIUM-POLYMER

Der Lithium-Polymer-Akku verwendet im Gegensatz zum Lithium-Ionen-Akku keinen flüssigen, sondern einen gelartigen Elektrolyten wie Polyvinylidenfluorid der direkt auf dem Separator aufgebracht ist. Der Separator besteht ebenfalls aus einem ionendurchlässigen Kunststoff und liegt als Folie vor. Dies erleichtert und vergünstigt vor allem die Herstellung des Akkus. Die Elektroden werden mit dem gelgetränkten Separator verpresst und verbacken und besitzen genug Eigenstabilität, so dass kein stabiles Gehäuse mehr benötigt wird. Dadurch lassen sich Lithium-Polymer-Akkus fast in jeder erdenklichen Bauform herstellen. Neben den Herstellungsvorteilen besitzen sie auch eine bessere Ionenleitfähigkeit, weswegen sich die Nennspannung des Akkus gegenüber dem Lithium-Ionen-Akku meist um 0,1 Volt erhöht.

2.3.2 ELEKTRODENMATERIALIEN

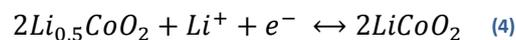
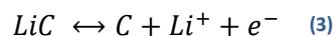
Im folgenden Abschnitt werden die am meisten verwendeten Kathoden- und Anoden-Materialien, so wie die daraus resultierenden Akkus vorgestellt.

2.3.2.1 LITHIUM COBALT OXID

Der Lithium-Cobalt-Oxid (kurz: $LiCoO_2$) Akku benutzt wie der Name schon andeutet, $LiCoO_2$ als Kathodenmaterial und Kohlenstoff, meist in Form von Graphit, als Anodenmaterial. Er wurde erstmals 1980 von John B. Goodenough beschrieben und seitdem fortlaufend weiterentwickelt. Die Nennspannung beträgt 3,6 Volt in der Lithium-Ionen Version und 3,7 – 3,8 Volt in der Lithium-Polymer Version. Je nach Ladezustand schwankt die Leerlaufspannung zwischen 3,0 und 4,2 Volt. Die Energiedichte beträgt 100-200 Wh/kg, sowie 200-300 Wh/l bei einer Leistungsdichte von 100-200 W/kg. Je nach Hersteller variiert die mögliche Anzahl von Ladezyklen zwischen 200 und 1000 bei 100% DOD. Die Selbstentladung beträgt bei Raumtemperatur ca. 5-10% monatlich (General Electronics Battery Co., Ltd., 2006).

Der Akku sollte minimal bei $-20^{\circ}C$ betrieben werden, da der Elektrolyt bei diesem Temperaturbereich zu gefrieren beginnt und dadurch die chemischen Reaktionen nur noch sehr gehemmt oder gar nicht mehr ablaufen können. Außerdem sollte eine Betriebstemperatur von $60^{\circ}C$ nicht überschritten werden. Bei Überladung oder Überhitzung des Akkus scheidet sich Sauerstoff von der Kathode ab und reagiert exothermisch mit dem organischen Elektrolyten innerhalb der Zelle. Dadurch erhöht sich die Temperatur weiter und es kommt zu einer immer stärker werdenden Kettenreaktion, dem so genannten „Thermischen Durchgehen“. Ohne Kühlung von außen kommt es unweigerlich zur Explosion und Zerstörung des Akkus.

Folgende Gleichungen zeigen die Reaktionen die an Anode (Formel (3)) und Kathode (Formel (4)) stattfinden.

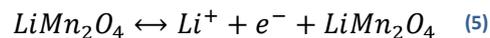


Die Verwendung von Cobalt im Kathodenmaterial bringt sehr hohe Material- und Herstellungskosten mit sich. Während Cobalt in den vergangenen 5 Jahren im Schnitt 40\$/kg kostete, bewegte sich Mangan (siehe Abschnitt 2.3.2.2) nur im Bereich von 4\$/kg (mobile-power.info, Handelspreise). Zudem steht $LiCoO_2$ im Verdacht Herzmuskelerkrankungen auszulösen (wikipedia, Lithium_cobalt_oxide).

2.3.2.2 LITHIUM PERMANGANATE

Der Lithium-Permanganate-Akku (kurz: $LiMn_2O_4$) besitzt eine Kathode aus $LiMn_2O_4$ und eine Anode aus Kohlenstoff, meist aus Graphit. Im Wesentlichen funktioniert er genau so wie der Lithium-Cobalt-Akku, besitzt allerdings nicht alle seiner negativen Eigenschaften. Neben geringerem Preis und bessere Umweltverträglichkeit des Mangans, ist der Lithium-Permanganate-Akku auch eigensicherer

als der Lithium-Cobalt-Akku. Da Mangan nicht mit Lithium reagiert, kann es zu keiner Abscheidung von Sauerstoff kommen, sodass ein thermisches Durchgehen aufgrund von Kathodenmaterial-Reaktionen ausgeschlossen ist. Die Kathodenreaktion ist durch Formel (5) beschrieben.



Die Anodenreaktion ist äquivalent zum Lithium-Cobalt-Akku (Formel (3))

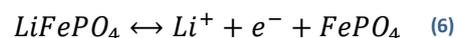
2.3.2.3 LITHIUM EISEN PHOSPHAT

Der Lithium-Eisen-Phosphat-Akku (kurz: $LiFePO_4$) wurde 1996 an der Universität von Texas in Austin erfunden und ist derzeit die am vielversprechendste Akkutechnologie auf dem Markt. Er besitzt zwar nur eine Energiedichte von 90-110 Wh/kg, dafür aber eine hohe Leistungsdichte von 1800 W/kg und eine überragende Lebensdauer von 5000 Zyklen. Außerdem ist er schnellladefähig mit bis zu 3C und kann Entladeströme von über 20C liefern. Die Nennspannung liegt bei 3,2 Volt mit einem Arbeitsbereich von 2,8 bis 3,7 Volt (winston-battery, WB-LYP100AHA).

Durch die Verwendung von Eisen und Phosphor als Kathodenmaterial können die Akkus sehr kostengünstig produziert werden und sind zudem noch umweltfreundlicher als cobalt- oder manganhaltigen Akkus.

Zudem besitzt der Lithium-Eisen-Phosphat-Akku die höchste Eigensicherheit aller auf dem Markt befindlichen LiPo-Technologien. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich Sauerstoff im $LiFePO_4$ -Material nur unter extremen Bedingungen abscheidet (Valence Technology, 2013) und somit kaum Explosions- oder Feuergefahr besteht.

Formel (6) beschreibt die an der Kathode stattfindende Reaktion.



Die Anodenreaktion ist äquivalent zum Lithium-Cobalt-Akku (Formel (3))

2.3.2.4 LITHIUM TITANAT

Beim Lithium-Titanat-Akku (kurz: Li_2TiO_3) besteht die Anode nicht wie sonst aus Kohlenstoff, sondern aus Li_2TiO_3 , während die Kathode aus den üblichen Materialien wie $LiMn_2O_4$ oder $LiCoO_2$ hergestellt wird. Lithium-Titanat besitzt im Vergleich zu Kohlenstoff eine 30-fach größere Oberfläche, die den Elektronenfluss begünstigt und den Akku somit hochstromfähig macht. Die Leistungsdichte beträgt 4000W/kg, obwohl die Energiedichte mit 70-90 Wh/kg gegenüber dem $LiCoO_2$ -Akku geringer ist. Die geringere Energiedichte ist auf die geringere Nennspannung von nur 2,4 Volt, bei einer Arbeitsspannung von 1,7 – 2,8 Volt, zurückzuführen (wikipedia, Lithiumtitanat-Akkumulator). Durch die veränderte Anode sind Lade- und Entladezyklen von 10000 und mehr möglich. Außerdem lässt sich der Akku im erweiterten Temperaturbereich von -40 bis +55°C betreiben (mobile-power.info, Lithium-Titanat-Akkus).

2.3.3 VERGLEICH VON KATHODEN UND ANODEN MATERIALIEN

Tabelle 4 vergleicht die verschiedenen Kathoden- und Anodenmaterialien und die daraus resultierenden Akkuparameter

Technologie	Nennspannung [V]	Energiedichte [Wh/kg]	Leistungsdichte [W/kg]	Energiedichte [Wh/L]	Zyklen	Selbst-Entladung [%/Monat]
<i>LiCoO₂</i>	3,7	180	200-300	340-400	400	5-10
<i>LiMn₂O₄</i>	3,8	100	?	?	300	?
<i>Li₂TiO₃</i>	2,4	70-90	4000	140-180	10000	?
<i>LiFePO₄</i>	3,2	90-110	1800	220	5000	3

Tabelle 4: Vergleich der Akku-Chemie, aus (General Electronics Battery Co., Ltd., 2006), (winston-battery, WB-LYP100AHA)

2.4 LADUNG EINER LIPO-ZELLE

Das Laden von LiPo-Zellen ist ein sehr kritischer Vorgang und sollte nur mit spezieller LiPo-Ladeelektronik durchgeführt werden, denn das Risiko von Feuer und Explosion bei falscher Ladung ist allgegenwärtig. Während modernere Nickel Metall-Hybrid-Akkus beim Überladen nur übermäßig heiß werden, neigen LiPo-Akkus eher zu Explosion und Selbstentzündung. Insbesondere beim Lithium-Cobalt-Oxid-Akku besteht durch die interne Bildung von Sauerstoff erhöhte Explosionsgefahr.

Um das überladen zu verhindern werden intelligente Lader verwendet, die Parameter wie Strom, Spannung und manchmal auch Temperatur verwenden, um den aktuellen Ladezustand des Akkus zu bestimmen.

Abbildung 4 zeigt den typischen Spannungs- und Stromverlauf während dem Laden einer LiPo-Zelle.

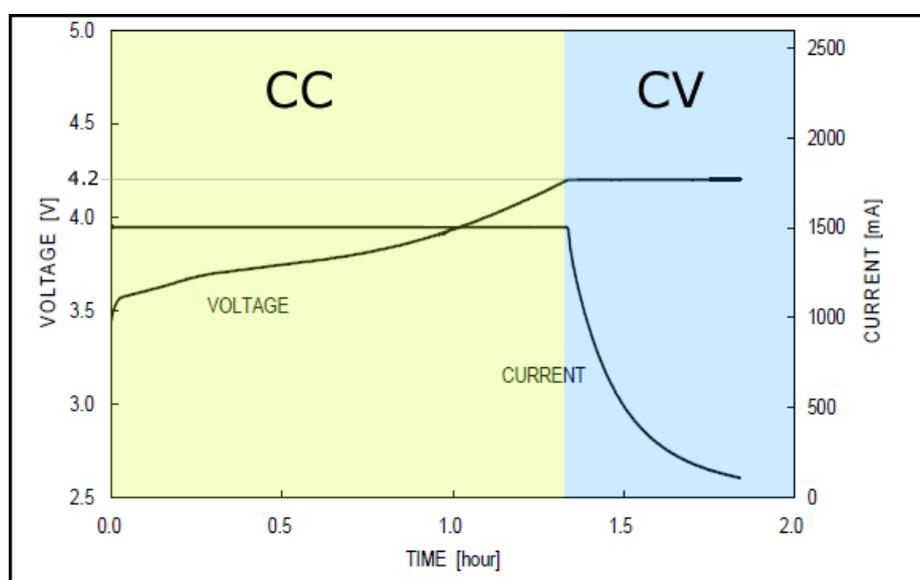


Abbildung 4: Typisches Ladeverhalten einer Li-Ion-Zelle, hier Panasonic CGR-18650CH bei 0.7C Ladestrom und 25°C, aus Datenblatt

Der Ladeprozess setzt sich dabei aus zwei Teilprozessen zusammen.

Konstanter Strom

In der ersten Ladephase wird die Zelle von dem Lader mit einem konstanten Strom (engl.: constant current, kurz: CC) versorgt. Der Ladestrom beträgt typischerweise 1C oder weniger. Durch die konstante Energiezufuhr steigt die Zellspannung nun mit der Zeit an. Sobald die Lade-Schluss-Spannung von 4,2 Volt erreicht wird geht der Lader in die zweite Phase über.

Konstante Spannung

Nachdem die Zelle die Lade-Schluss-Spannung erreicht hat, reguliert der Lader den Strom herunter, so dass die Spannung konstant bleibt (engl.: constant voltage, kurz: CV). Dies muss geschehen, weil die gemessene Spannung nicht der tatsächlichen unbelasteten Akkuspannung entspricht, sondern der Akkuspannung plus dem Spannungsabfall über dem Innenwiderstand des Akkus verursacht durch den Stromfluss. Die Außen gemessene Spannung ist also höher als die wirkliche Akkuspannung. Um dies zu umgehen, wird die Spannung konstant gehalten und der Strom langsam verringert. Dadurch verringert sich der Effekt des Spannungsabfalls immer mehr und die Zelle erreicht schlussendlich ihre Lade-Schluss-Spannung, wie Abbildung 5 verdeutlicht.

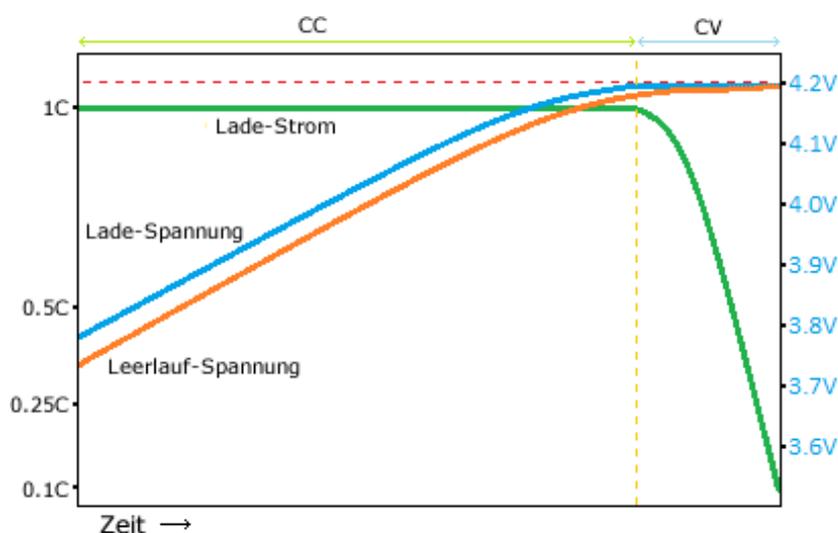


Abbildung 5: Angleich von Leerlauf- und Ladespannung, aus (tjinguytech, 2013)

Die Ladung wird typischerweise beendet sobald der Ladestrom 0.1C unterschreitet.

Manche Lader bieten auch eine Schnell-Ladefunktion an, in der lediglich eine CC-Phase, aber keine CV-Phase stattfindet. Wegen des immer geringer werdenden Stroms in der CV-Phase wird kaum noch Ladung im Akku gespeichert, die Ladezeit aber überproportional erhöht.

2.5 ENTLADUNG EINER LIPO-ZELLE

Zum Entladen der Zelle kann einfach ein Verbraucher angeschlossen werden. Dabei ist immer darauf zu achten, die vom Hersteller angegebene Minimalspannung nicht zu unterschreiten, um die Lebensdauer des Akkus nicht zu reduzieren. Typischerweise beträgt diese 3,0 Volt, variiert aber je nach Hersteller und Akku zwischen 2,5 und 3,5 Volt.

Der maximal entnehmbare Entladestrom beträgt meist 1C und wird durch den Innenwiderstand der Zelle limitiert. Bei hochstromfähigen Zellen wie LiFePo4 ist der Innenwiderstand beispielsweise wesentlich geringer als bei herkömmlichen LiPo-Zellen.

Die entnehmbare Ladung relativ zur Nennkapazität variiert je nach Zustand der Zelle, wie im Folgenden beschrieben wird.

2.5.1 TEMPERATURABHÄNGIGKEIT EINES LIPO AKKUS

Die entnehmbare Ladung hängt stark von der Temperatur der Zelle ab. Je wärmer die Zelle ist, desto mehr Ladung kann entnommen werden. Dies hängt damit zusammen, dass die Leitfähigkeit des Elektrolyten bei steigender Temperatur stark zunimmt. Abbildung 6 zeigt den Spannungsverlauf sowie die entnehmbare Ladung während der Entladung bei unterschiedlichen Temperaturen.

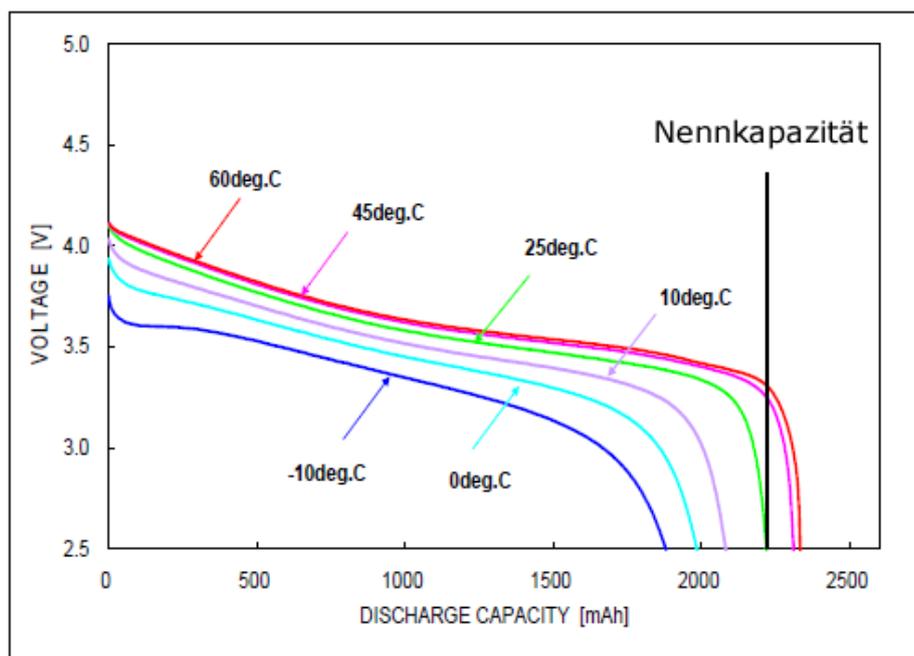


Abbildung 6: Temperaturabhängigkeit der Entladekurve von Panasonic CGR-18650CH bei 1C Entladestrom, aus Datenblatt

Üblicherweise wird die Nennkapazität bei Raumtemperatur angegeben. Bei höheren Temperaturen kann also mehr Ladung entnommen werden als vom Hersteller angegeben.

Allerdings ist das Erhöhen der Zelltemperatur ein zweischneidiges Schwert, da die Lebensdauer der Zelle stark verringert werden kann (siehe Kapitel 2.6.2).

2.5.2 STROMABHÄNGIGKEIT EINES LIPO-AKKUS

Neben der Temperaturabhängigkeit hängt die entnehmbare Ladung einer Zelle auch vom Entladestrom ab. Abbildung 7 zeigt die maximal entnehmbare Ladung bei unterschiedlichen Entladeströmen.

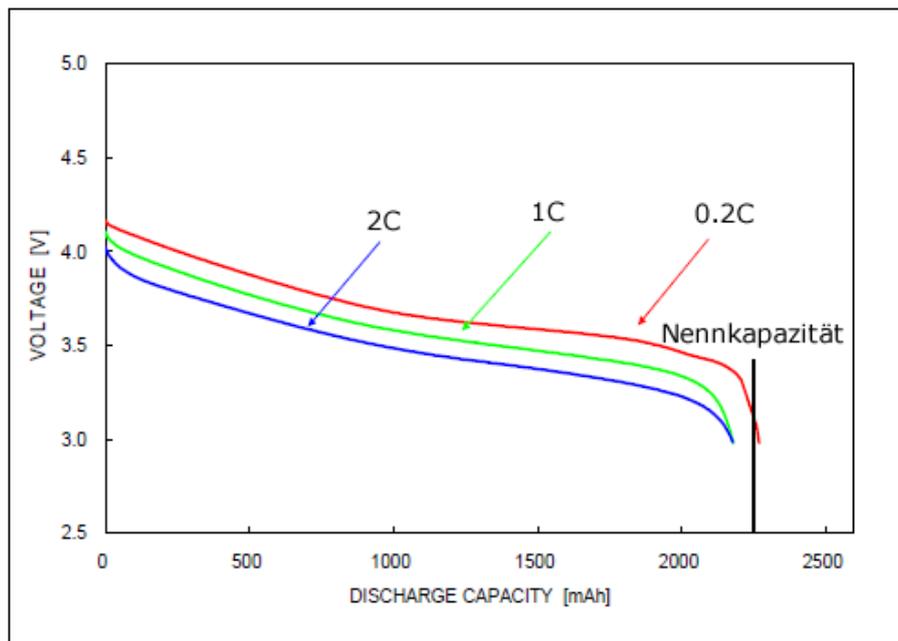


Abbildung 7: Stromabhängigkeit der Entladekurve von Panasonic CGR-18650CH bei 25°C

Generell gilt, je höher der Entladestrom desto weniger Ladung kann aus der Zelle entnommen werden. Während dies auch bei verfünffachen des Entladestroms von 0,2C auf 1C gilt, bleibt die entnehmbare Energiemenge bei weiterer Verdoppelung des Entladestroms von 1C auf 2C konstant. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich die in der Abbildung evaluierte Zelle bei 2C Entladestrom erhitzt, wodurch sich die entnehmbare Energiemenge wieder erhöht.

2.6 LEBENSDAUER EINER LIPO-ZELLE

Die Lebensdauer jedes LiPos ist begrenzt, kann bei optimaler Handhabung aber wesentlich erhöht werden. Im Folgenden wird genauer auf Faktoren und ihren Einfluss auf die Lebensdauer von LiPo-Zellen eingegangen. Alle in diesem Abschnitt befindlichen Daten und Schlussfolgerungen gelten speziell für Lithium-Cobalt-Oxid-Akkus, lassen sich aber meist auf alle Lithium-Akku-Technologien übertragen.

Generell verringert sich die Kapazität eines Akkus nach jedem Lade- und Entladevorgang, im folgenden Zyklus genannt, ein wenig. Üblicherweise wird im Datenblatt des Herstellers eine Grafik oder eine Zyklenanzahl angegeben, die beschreibt, nach wie vielen Zyklen unter Standardbedingungen ein Akku nur noch 80% seiner Nennkapazität liefern kann. Die Standardbedingungen hängen hierbei vom Hersteller und dem Anwendungsziel der Zelle ab. Abbildung 8 zeigt die entnehmbare Ladung einer Panasonic 18650 Zelle mit einer Nennkapazität von 2250mAh in Abhängigkeit der bereits gefahrenen Zyklen. Die Bedingungen beim Zyklen sind 25° Raumtemperatur, 0,7C Laden, 1C Entladen und eine Zellspannung zwischen 3,0 und 4,2 Volt.

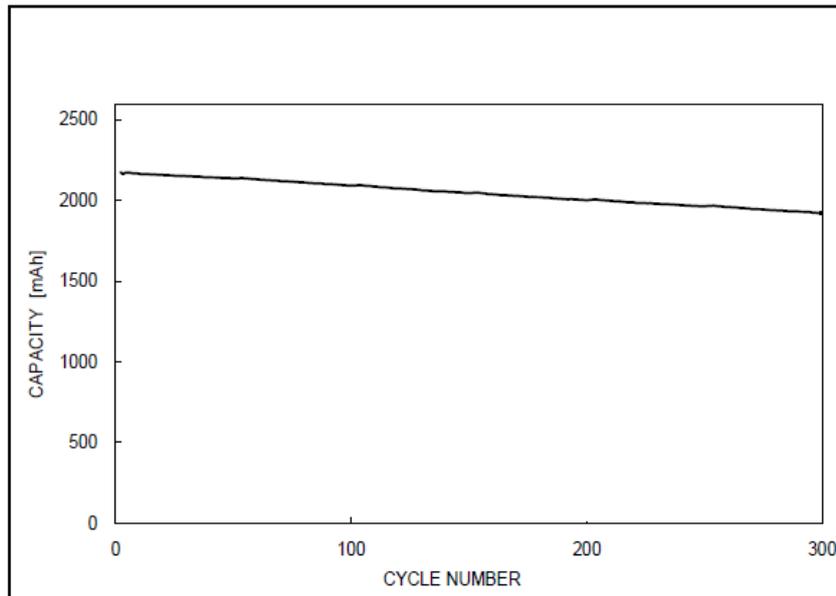


Abbildung 8: Veränderung der entnehmbaren Kapazität bei zunehmenden Zyklen, Panasonic 18650

Man erkennt, dass die Akkukapazität mit zunehmender Zyklenanzahl abnimmt. Nach 300 Zyklen verbleibt etwa 1900mAh Restkapazität, der Akku besitzt also nur noch 84% seiner Nennkapazität.

Weicht man nun von den oben genannten Standardbedingungen ab, kann sich dies positiv oder auch negativ auf die Lebensdauer des Akkus auswirken, wie im Folgenden gezeigt wird.

2.6.1 STROMABHÄNGIGKEIT EINES LIPO-AKKUS

Der vom Hersteller angegebene Ladestrom beträgt typischerweise 1C und sollte eingehalten werden um die spezifizierten Zyklen zu erreichen. Erhöht man nun den Ladestrom, um beispielsweise eine schnellere Ladung des Akkus zu erreichen, verringert sich die Lebensdauer stark.

Abbildung 9 zeigt die Restkapazität einer Samsung Rundzelle mit einer Nennkapazität von 900mAh in Abhängigkeit der Zyklen bei unterschiedlichen Ladeströmen.

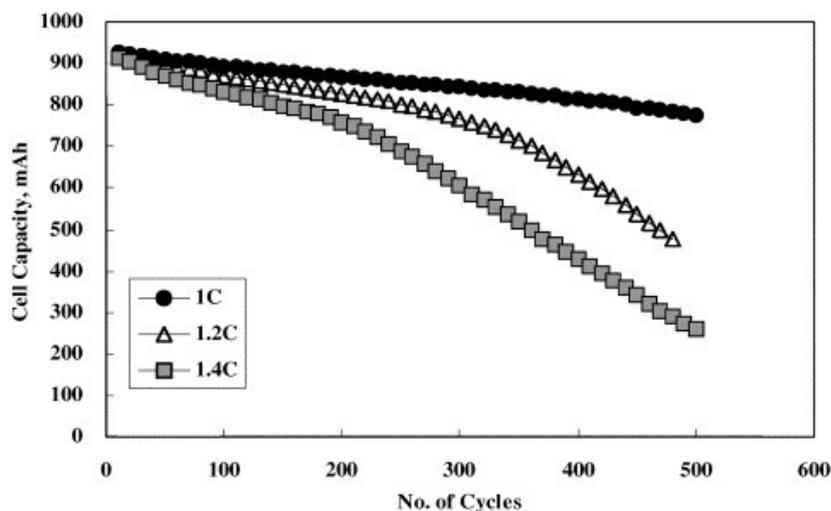


Abbildung 9: Kapazitätsverlauf bei verschiedenen Ladeströmen, aus (Lim & Seok Choi, 2002)

Während bei 1C Ladestrom 500 Zyklen erreicht werden, verringert sich die Lebensdauer bei Erhöhung des Ladestroms auf 1,2C schon um die Hälfte auf 250 Zyklen. Erhöht man den Ladestrom weiter auf 1,4C verringert sich die Lebensdauer auf ein Viertel der Nennlebensdauer.

Folgt man den Trend nun in umgekehrter Richtung erkennt man, je geringer der Ladestrom, desto mehr Zyklen können mit einer Zelle gefahren werden.

Ähnliches lässt sich beim Entladen des Akkus beobachten. Abbildung 10 zeigt den Kapazitätsverlust einer Sony US18650 Zelle in Abhängigkeit der Zyklen bei unterschiedlichen Entladeströmen.

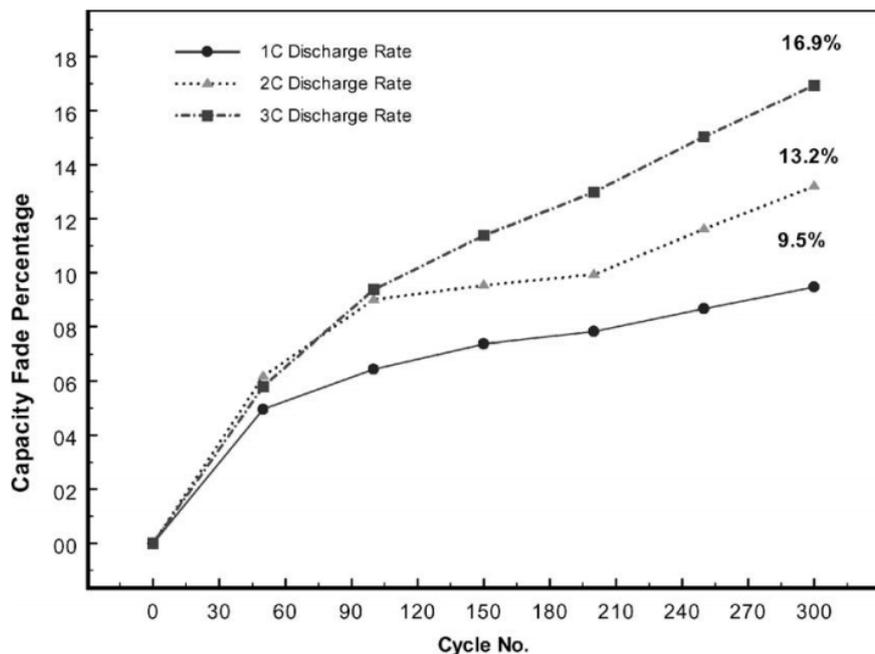


Abbildung 10: Kapazitätsverlust bei verschiedenen Entladeströmen, Sony US 18650 aus (Popov, et al., 2002)

Während der Kapazitätsverlust bei 1C Entladestrom nach 300 Zyklen nur 9,5% beträgt, beträgt er bei einem Entladestrom von 2C schon 13%. Wird der Strom weiterhin auf 3C erhöht, erhöht sich auch der Kapazitätsverlust um weitere 3%.

Es lässt sich also schlussfolgern: je geringer der Lade- bzw. Entladestrom, desto mehr Zyklen können gefahren werden.

2.6.2 TEMPERATURABHÄNGIGKEIT EINES LIPO-AKKUS

Die Eigenschaften von LiPo-Akkus sind sehr stark temperaturabhängig. Zum einen erhöht sich bei Erhöhung der Temperatur die Elektrolyt-Leitfähigkeit, so dass mehr Leistung und Ladung entnommen werden kann, zum anderen erhöht sich auch die Anzahl der irreversibel ablaufenden Reaktionen innerhalb der Zelle, die die Lebensdauer verringern. Abbildung 11 zeigt die Restkapazität einer Sony 18650 Zelle mit 1800mAh Nennkapazität in Abhängigkeit der Zyklen bei unterschiedlichen Temperaturen.

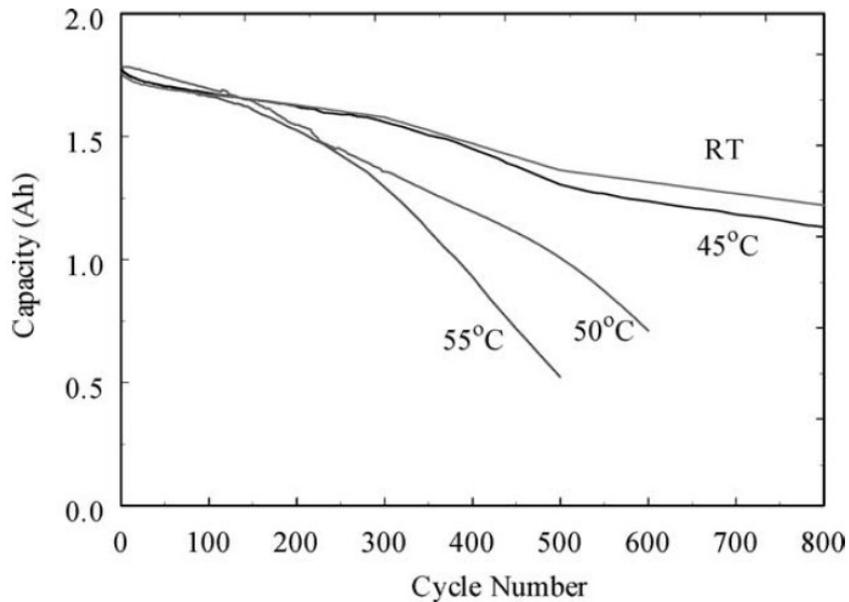


Abbildung 11: Kapazitätsverlust bei unterschiedlichen Temperaturen nach Zyklen, Sony 18650, aus (Branko, et al., 2002)

Nach etwa 450 Zyklen bei Raumtemperatur (RT, 25°C) erreicht die Zelle noch etwa 80% ihrer Nennkapazität. Bei 45° C ist dieser Restkapazitätsstand bereits nach 400 Zyklen erreicht. Wird die Temperatur weiter erhöht verkürzt sich die Lebensdauer stark. Bei 55° C ist die Zelle bereits nach 250 Zyklen verschlissen.

Man erkennt, je wärmer eine Zelle betrieben wird, desto schneller ist sie verschlissen. Akkus sollten also so kühl wie möglich und nur so warm wie nötig betrieben werden. Die untere Temperatur-Grenze ist der Gefrierpunkt des Elektrolyten, der wegen drohender Eisbildung nicht unterschritten werden sollte.

2.6.3 LAGERUNG EINES LIPO-AKKUS

Selbiges gilt für die (längere) Lagerung einer Zelle. Je wärmer eine Zelle gelagert wird, desto höher ist ihr Kapazitätsverlust. Abbildung 12 zeigt den Kapazitätsverlust einer Sony 16850 Zelle bei unterschiedlichen Temperaturen und Ladezuständen, die über 12 Monate hinweg gelagert wurde.

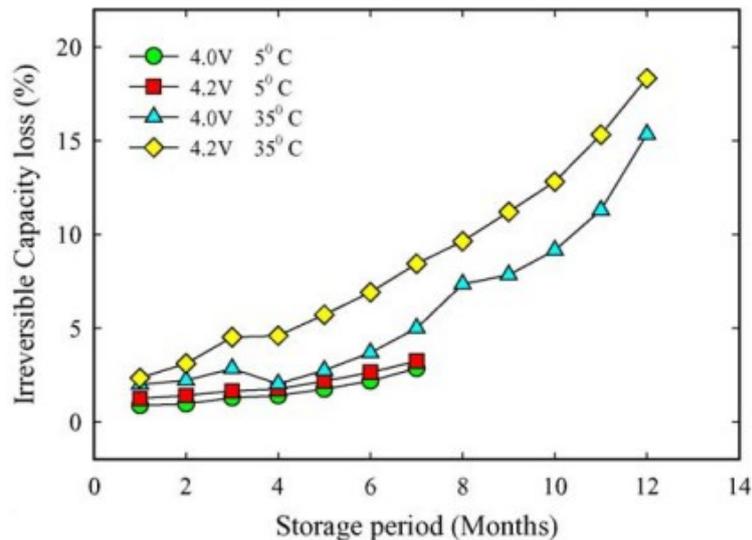


Abbildung 12: Kapazitätsverlust während der Lagerung bei unterschiedlichen Temperaturen und Ladezuständen, Sony US 18650, aus (Popov, et al., 2004)

Es zeigt sich deutlich, dass die bei 35°C gelagerten Zellen (Gelb + Blau) einen wesentlich größeren Kapazitätsverlust aufweisen, als die bei 5°C (Rot + Grün) gelagerten Zellen. Neben dem erkennt man auch, dass der Ladezustand der Zelle einen Einfluss auf den Kapazitätsverlust beim Lagern hat. Bei 35°C verliert die komplett vollgeladene Zelle (Gelb) etwa 3% mehr Kapazität als die nur teilweise geladene Zelle (Blau). Bei 5°C Lagerung fällt dieser Effekt zwar nicht sehr stark ins Gewicht, ist aber noch immer vorhanden.

Es lässt sich schlussfolgern, je kühler und leerer eine Zelle gelagert wird, umso geringer ist der Kapazitätsverlust.

2.6.4 LADE-SCHLUSS-SPANNUNG EINES LIPO-AKKUS

Die Lade-Schluss-Spannung (engl: End of Charge Voltage, kurz EOCV) beschreibt, bei welcher Spannung der Zelle die Ladung beendet wird. Üblicherweise werden LiPos auf 4,2 Volt geladen. Abbildung 13 zeigt eine bei unterschiedlichen EOCV betriebene Sony Rundzelle mit einer Nennkapazität von 900mAh.

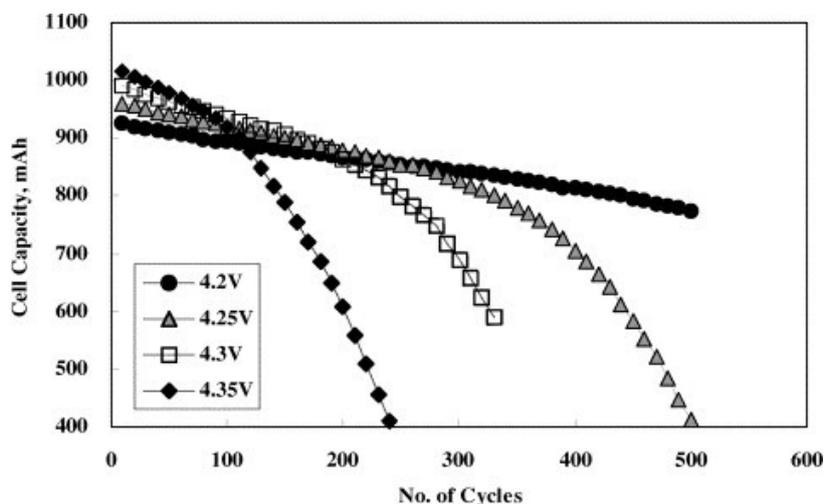


Abbildung 13: Kapazitätsverlauf bei unterschiedlichen Ladeschluss-Spannungen, aus (Lim & Seok Choi, 2002)

Man erkennt deutlich, dass die Zellen mit höherem EOCV in den ersten 100 Zyklen mehr Ladung liefern, dann aber rapide dem Alterungsprozess zum Opfer fallen. Während die mit 4,2 Volt geladene Zelle über 500 Zyklen übersteht, muss die mit 4,35 Volt geladene Zelle bereits nach 180 Zyklen als verschlissen gewertet werden.

Es gilt also, je niedriger die EOCV, desto höher ist die Lebensdauer der Zelle.

2.6.5 ENTLADE-SCHLUSS-SPANNUNG EINES LIPO-AKKUS

Die Entlade-Schluss-Spannung (engl: End of Discharge Voltage, kurz: EODV) gibt an, bei welcher Voltzahl die Entladung beendet wird. Sie variiert je nach Zelle und Hersteller zwischen 2,5 und 3,5 Volt. Bei Erhöhung der EODV verringert sich automatisch die entnehmbare Ladung der Zelle, weil die Entladung schon vor dem vollständigen Entladen unterbrochen wird.

Abbildung 15 zeigt die entnehmbare Ladung einer Sony Rundzelle mit 900mAh Nennkapazität in Abhängigkeit der Zyklen bei verschiedenen Entlade-Schluss-Spannungen.

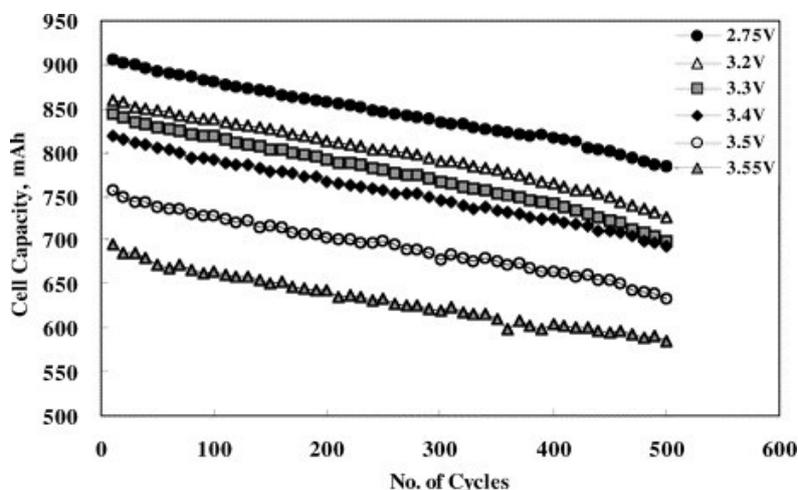


Abbildung 14: Kapazitätsveränderung bei verschiedenen Entlade-Schluss-Spannungen, aus (Lim & Seok Choi, 2002)

Obwohl die Erhöhung der EODV von 2,75V auf 3,55V eine verringerte entnehmbare Ladung von 23% mit sich bringt, bleibt die Lebensdauer in Bezug auf die verringerte Ladung konstant. Eine Zelle, die

mit einem EODV von 3,55V betrieben wurde, verliert genau so viel Kapazität wie eine Zelle mit einem EODV von 2,75V.

Eine Veränderung der EODV hat also keinen Einfluss auf die Lebensdauer der Zelle.

2.6.6 DEPTH OF DISCHARGE EINES LIPO-AKKUS

Kombiniert man nun die Erkenntnisse aus EOCV und EODV, lassen sich optimale Ladezustandsbereiche einer Zelle ermitteln, die die Lebensdauer bestmöglich erhöhen. Die Tiefe der Entladung (EODV) hat keinen Einfluss auf die Lebensdauer, deswegen empfiehlt es sich die Zelle möglichst im unteren Spannungsbereich zu betreiben. Die Höhe der Ladung (EOCV) hingegen beeinflusst die Lebensdauer, demnach sollte die Zelle also möglichst nie komplett geladen werden. Abbildung 15 zeigt die Restkapazität einer 18650 Zelle mit einer Nennkapazität von 1500mAh in Abhängigkeit der Zyklen bei unterschiedlichem DOD. Zum Ermitteln der Restkapazität wurde die Testzelle alle 25 Zyklen komplett geladen und wieder entladen.

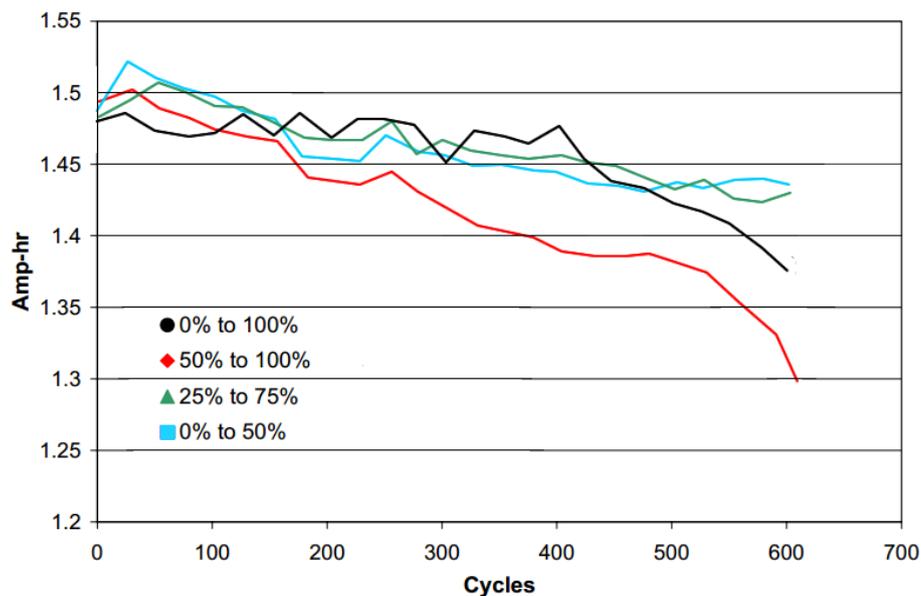


Abbildung 15: Kapazitätsverlust in Abhängigkeit vom DOD, aus (Cristo & Atwater, 2006)

0-100% entsprechen dabei dem kompletten Laden und Entladen der Zelle.

50-100% entsprechen dem „Top-Off“ Anwendungsszenario. Die Zelle wird vollständig geladen und immer nur teilweise entladen.

25-75% entsprechen teilweiser Ladung und Entladung.

0-50% entsprechen teilweiser Ladung und kompletter Entladung.

Man erkennt, dass alle Zellen die im oberen Spannungsbereich betrieben wurden, also 0-100% und 50-100%, eine kürzere Lebensdauer aufweisen als die Zellen, die im mittleren und unteren Spannungsbereich, also 25-75% und 0-50%, betrieben wurden.

Zwischen den beiden Szenarios 25-75% und 0-50% sind keine Unterschiede in Bezug auf die Lebensdauer zu erkennen.

Um eine bestmögliche Lebensdauer zu erreichen, sollte eine Zelle also im Bereich von 0-75% ihrer Nennkapazität betrieben werden. Dadurch verringert sich zwar die entnehmbare Kapazität um ca. 25%, aber die Lebensdauer erhöht sich überproportional.

2.6.7 ZUSAMMENFASSUNG LEBENSDAUER

Zusammenfassend lässt sich also durch folgende Punkte die Lebensdauer einer Zelle erhöhen:

- Geringer Lade- und Entladestrom
- Geringe Betriebs- und Lagertemperatur
- Ladung und Entladung im Bereich von 0-75% der Nennkapazität

2.7 AKKUPACK AUFBAU

In den meisten Anwendungen sind Spannungen, Entladeströme und Energiemenge, die eine einzelne Zelle liefern kann nicht ausreichend, um die für die Anwendung benötigte Leistung bzw. Energiemenge zu liefern. Durch Zusammenschaltung der Zellen zu einem Akkupack kann die Leistungsfähigkeit und Energiemenge erhöht werden. Üblicherweise wird die Verschaltung mehrerer Zellen mit „xSxP“ abgekürzt, wobei für jedes „x“ die Zahl der parallelen bzw. seriellen Zellen eingetragen wird. Ein Akkupack mit der Bezeichnung „4S3P“ besitzt also 4 Zellen seriell, die jeweils aus 3 parallelen Zellen bestehen.

2.7.1 PARALLELVerschALTUNG VON LIPO-ZELLEN

Bei der Parallelschaltung mehrerer Zellen werden alle negativen und alle positiven Pole einzelner Zellen miteinander verbunden (siehe Abbildung 16).

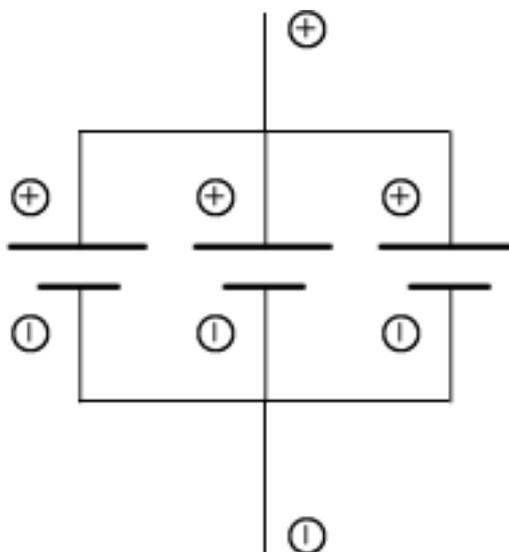


Abbildung 16: Parallelschaltung von 3 Zellen „1S3P“

Durch die Verbindung besitzen alle Zellen die gleiche Spannung, ihre Kapazität addiert sich. Damit zwischen den Zellen während dem Verschalten keine hohen Ströme auftreten, ist es wichtig dass alle Zellen die gleiche Spannung aufweisen, also den gleichen DOD besitzen. Eine übliche Vorgehensweise

ist es, alle Zellen vor dem Verschalten einzeln vollzuladen und anschließend zu verschalten. Außerdem sollten nur Zellen mit gleicher Chemie parallelisiert werden, da sich sonst durch die unterschiedlichen Spannungsanforderungen der einzelnen Zell-Chemien die nutzbare Kapazität des Akkupacks zusätzlich einschränkt.

Wegen dem geringeren Innenwiderstand der parallelisierten Zellen ist es nun möglich höhere Ströme aus dem Akkupack zu ziehen, wie Formel (7) zeigt.

$$I_{max} = \frac{U}{\frac{1}{n} \cdot R} \quad (7)$$

Mit n = Anzahl der Zelle, R = Innenwiderstand, R/n = Innenwiderstand der parallelisierten Zellen

2.7.2 SERIELLVERSCHALTUNG VON LIPO-ZELLEN

Bei der Seriell- oder auch Reihenschaltung werden die Zellen so verschaltet, dass am positiven Pol der ersten Zelle der negative Pol der zweiten Zelle angeschlossen wird (siehe Abbildung 17). Dies kann beliebig wiederholt werden. Derartig verschaltete Zellen werden oft als String (deutsch: Schnur) bezeichnet.

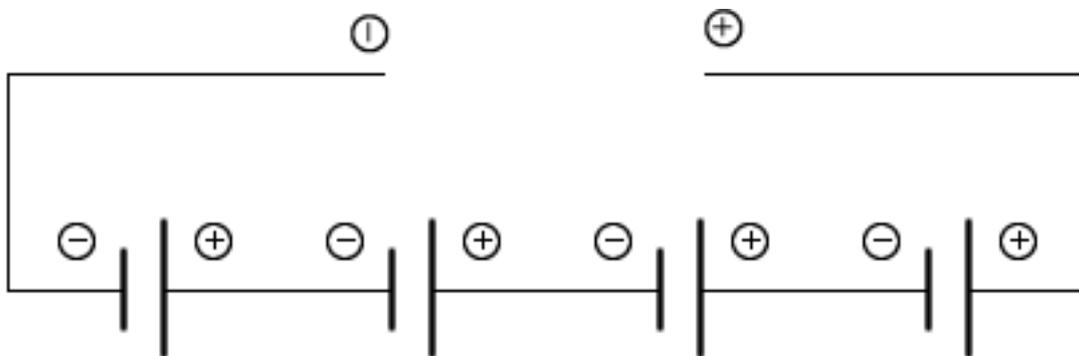


Abbildung 17: Reihenschaltung von 4 Zellen „4S1P“

Durch die Reihenschaltung addieren sich die Spannungen der einzelnen Zellen, während die gesamte Kapazität des Akkupacks durch die Zelle mit der geringsten Kapazität bestimmt wird. Sobald diese Zelle beim Entladevorgang unter ihre minimale Spannung fällt, muss die Entladung beendet werden. Gleiches gilt auch beim Laden. Sobald eine Zelle ihre maximale Spannung erreicht hat, muss der Ladevorgang beendet werden, obwohl einige Zellen möglicherweise noch nicht vollständig geladen sind (siehe Kapitel 3).

Obwohl sich der Innenwiderstand des Akkupacks um das n -fache einer einzelnen Zelle erhöht, bleibt wegen der n -fach erhöhten Spannung die maximal mögliche Stromentnahme konstant, wie Formel (8) zeigt.

$$I_{max} = \frac{n \cdot U}{n \cdot R} = \frac{U}{R} \quad (8)$$

Wegen der erhöhten Spannung kann nun bei gleichbleibendem Strom eine erhöhte Leistung aus dem Akkupack entnommen werden.

$$P_{max} = n \cdot U \cdot I_{max} \quad (9)$$

Im Gegensatz zur Parallelschaltung ist es bei der Reihenschaltung möglich verschiedene Zell-Chemien zu mischen. Dies wirkt sich zwar nicht negativ auf die Leistung des Akkupacks aus, müsste allerdings beim Balancieren wegen der verschiedenen Spannungsanforderungen besonders beachtet werden.

Vergleich

Folgende Tabelle fasst die Auswirkung der Verschaltungsmöglichkeiten zusammen.

Verschaltung	Entladestrom	Spannung	Innenwiderstand	Kapazität	Energie
Parallel	n	1	1/n	Z1+...+Zn	n
Seriell	1	n	n	Min (Z1...Zn)	n

Tabelle 5: Vergleich von Parallel- und Reihenschaltung

2.7.3 TYPISCHE VERSCHALTUNGEN VON LIPO-ZELLEN

Tabelle 6 zeigt einige typische Akkupack Anwendungen und die dabei eingesetzte Verschaltung.

Einsatzgebiet	Benötigte Leistung	Verschaltung	Kapazität pro Zelle
Handy	10W	1S1P	2.2Ah
Pedelec	250W	6SXP	10Ah
Sonnenbatterie	2.4kW	8SXP	250Ah
Ebike	5kW	18SXP	20Ah
Tesla Roadster	215kW	99S69P	?

Tabelle 6: Typische Akkupack Verschaltungen aus (sonnenbatterie, technische-daten) , (stealthelectricbikes, 2013)

Man erkennt, je höher die benötigte Leistung, desto mehr Zellen werden in Reihe verschaltet.

Bei der Auswahl der Verschaltung für eine neue Anwendung wird meist zwischen 2 Kriterien abgewogen.

Zum einen muss die Spannungsanforderung des Systems erfüllt werden. Ein Pedelec Motor erreicht bei 24 V seine Höchstgeschwindigkeit von 25 km/h, dementsprechend müssen mindestens sechs LiPo-Akku-Zellen verbaut werden.

Zum anderen muss der benötigte Kabelquerschnitt und die damit verbundene Verlustleistung bei hohen Strömen in Betracht gezogen werden. Bei einer Leistungsanforderung des Tesla Roadster von 215 kW und einer Akkuspannung von $99 \cdot 4,2V = 415$ Volt müssen $215.000W / 415V = 520A$ durch die Kabelstränge fließen. Vergleichsweise müssen durch die Oberleitung der Deutschen Bahn beim beschleunigen des ICE ca. 1400 Ampere fließen. Es empfiehlt sich also, die Spannung und damit die Anzahl der in Reihe verschalteten Zellen zu erhöhen, so dass vertretbare Kabelquerschnitte verwendet werden können. Andererseits muss aber bedacht werden, dass Spannungen von mehr als 400 Volt für den Menschen sehr gefährlich sind und bei Montage und Wartung besondere Sicherheitsmaßnahmen erfordern.

3 BALANCIEREN

Unter Balancieren versteht man, dass alle Zellen eines Akkupacks auf die gleiche Spannung oder den gleichen SOC geladen werden.

Sobald mehrere Zellen in Serie verschaltet sind, kommt es unweigerlich zum Driften der Zellen untereinander (siehe Abschnitt 3.1), so dass einige Zellen mehr Ladung enthalten als andere. Abbildung 18 verdeutlicht diesen Umstand.

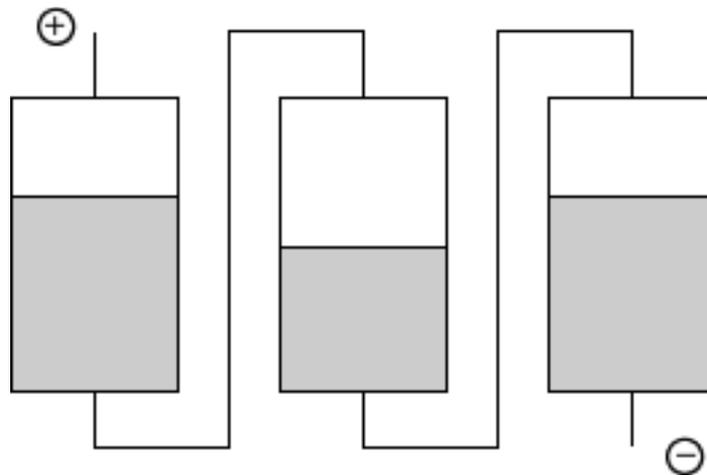


Abbildung 18: Akkupack mit Drift

Der Akkupack besteht aus drei in Serie verschalteten Zellen, die alle die gleiche Kapazität besitzen. Die mittlere der drei Zellen enthält weniger Ladung als alle anderen, sie ist also abgedriftet.

Würde man den unbalancierten Akkupack nun mit einem nicht balancierenden Lader laden, würde es zur Überladung der ersten und dritten Zelle kommen. Dies geschieht, weil der Lader nicht die Zellspannung der einzelnen Zellen, sondern nur die Spannung des ganzen Akkupacks überwacht. Der Lader geht davon aus, dass alle Zellen gleich balanciert sind und bei 4,2 Volt ihre EOCV erreicht haben. Erreicht der Akkupack also $3 \cdot 4,2 = 12,6$ Volt, ist er voll. Beim Laden fließt durch alle Zellen der gleiche Ladestrom. Alle Zellen nehmen pro Zeiteinheit die gleiche Ladungsmenge auf. Nach einer gewissen Ladezeit hat der Akkupack eine Spannung von 12,6 Volt und der Lader schaltet ab. Hingegen der Annahme, dass alle Zellen jetzt voll sind, sieht der Ladezustand der Zellen jetzt wie folgt aus (Abbildung 19).

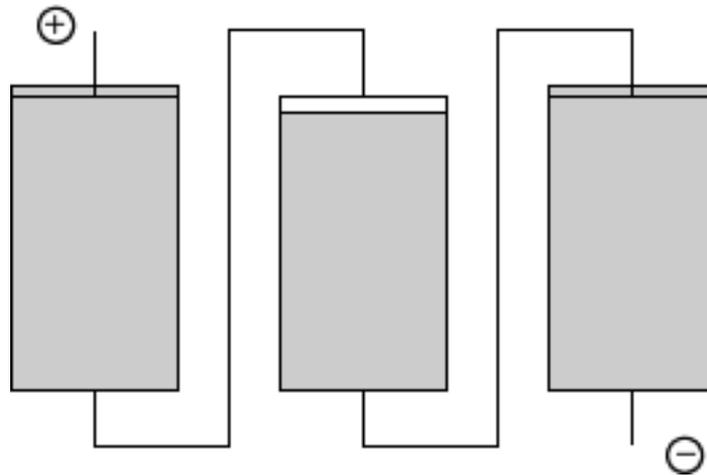


Abbildung 19: Akkupack mit Drift, überladen

Die erste und letzte Zelle wurde überladen und besitzen eine Spannung von beispielsweise 4,3 Volt, obwohl die mittlere Zelle nicht einmal voll ist und nur eine Spannung von 4 Volt aufweist.

Während es bei älteren Akku-Technologien wie NiMH-Akkus keine Probleme beim geringfügigen Überladen gibt, sollte die Überladung von LiPo-Akkus, wie in Abschnitt 2.6.4 gezeigt, möglichst vermieden werden.

Besser ist es, einen Lader zu verwenden, der die Zellspannung jeder Zelle überwacht. Um Überladung zu verhindern, muss die Ladung beendet werden, sobald eine Zelle ihre EOCV erreicht. Im obigen Beispiel würde das bedeuten, dass die Ladung beendet wird sobald die beiden äußeren Zellen voll sind. Obwohl die mittlere Zelle noch nicht voll ist, kann wegen den vollen äußeren Zellen nicht weiter geladen werden. Die Gesamtkapazität des Akkupacks wird nicht optimal ausgenutzt.

Selbiges lässt sich auch beim Entladen beobachten. Wird nur die gesamte Spannung des Akkupacks überwacht, lässt sich daraus nicht erkennen, dass eine Zelle bereits leer ist und ihre EODV erreicht hat. Die Entladung wird nicht beendet und die mittlere Zelle wird somit unterladen.

Wird die Spannung der einzelnen Zellen überwacht, muss die Entladung beendet werden, wenn die erste Zelle ihre EODV erreicht, selbst wenn in den anderen Zellen noch Ladung vorhanden ist. Dadurch wird die Kapazität des Akkupacks durch die schwächste Zelle bestimmt, was die gesamte Kapazität des Akkupacks stark verringern kann.

Bei paralleler Verschaltung mehrerer Zellen kann hingegen kein Drift entstehen, da alle Zellen die gleiche Spannung aufweisen, also per Definition balanciert sind. Paralleliert man Zellen unterschiedlicher Kapazität, liefern die Zellen mit höherer Kapazität automatisch mehr Strom, als die Zellen geringerer Kapazität.

3.1 GRÜNDE FÜR DEN ZELLENDRIFT

Zuerst stellt sich die Frage wie kann es möglich sein kann, dass einzelne Zellen in einem Akkupack, der aus Zellen mit identischen Spezifikationen besteht, einzelne Zellen abdriften.

Dafür gibt es eine Vielzahl an Gründen, von denen die beiden wichtigsten im Folgenden genauer erläutert werden.

3.1.1 LADUNGSUNTERSCHIEDE

Ein sehr banaler Grund für Ladungsunterschiede ist, dass die Zellen während der Montage des Akkupacks nicht balanciert wurden, so dass der Akkupack seit der Herstellung unbalanciert ist. Wird dann im Einsatz des Akkupacks kein balancierender Lader verwendet, bleibt er dauerhaft unbalanciert.

Durch die Benutzung des unbalancierten Akkupacks werden einige Zellen dann immer wieder Überladen, wodurch sie schneller an Kapazität verlieren als die Zellen im Pack, die nicht überladen werden. Dies führt zu Kapazitätsunterschieden der Zellen untereinander und damit zu einem Teufelskreis (siehe nächster Abschnitt).

3.1.2 KAPAZITÄTSUNTERSCHIEDE

Neben Ladungsunterschieden führen auch Kapazitätsunterschiede der einzelnen Zellen im Akkupack zu unterschiedlichen Driftverhalten der Zellen. Ein Beispiel ist in Abbildung 20 dargestellt.

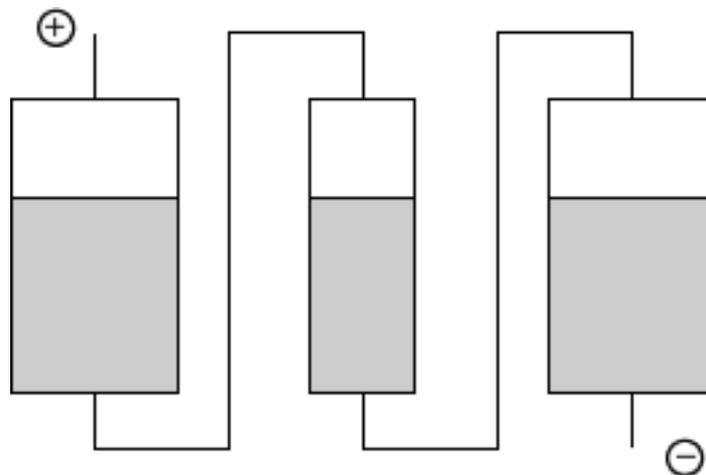


Abbildung 20: Akkupack mit Kapazitätsunterschied

Der Akkupack besteht aus 3 Zellen, wobei die mittlere Zelle nur die Hälfte der Kapazität der äußeren Zellen fasst. Alle Zellen sind zu 2/3 geladen.

Würde der Akkupack in diesem Zustand geladen werden, würde die mittlere Zelle vollgeladen sein, lange bevor die beiden äußeren Zellen voll sind. Bei Verwendung eines nicht-balancierenden Laders würde die Ladung erst beendet werden, wenn die Lade-Schluss-Spannung des Akkupacks erreicht ist. Somit würde dann die mittlere Zelle überladen werden und entsprechend schneller an Kapazität verlieren. Durch den erhöhten Kapazitätsverlust wird die mittlere Zelle über ihren Einsatzzeitraum immer stärker überladen und verliert immer mehr Kapazität. Ein Teufelskreis.

Um dem entgegenzuwirken, werden die einzelnen Zellen eines Akkupacks vor der Montage normalerweise „gematched“. Es wird also versucht produktionsbedingte Kapazitätsunterschiede durch Selektion der Zellen, die zusammen verbaut werden, auszugleichen. Dies kann allerdings nur bis zu einer bestimmten Genauigkeit geschehen.

Außerdem besitzen die einzelnen Zellen eines Akkupacks während dem Einsatz meist unterschiedliche Temperaturen, was nach Absatz 2.6.2 zu Kapazitätsunterschieden führt.

Schlussendlich ist es egal, wie stark man versucht die Kapazität aller Zellen anzugleichen, da es im Endeffekt auch durch die geringsten Kapazitätsabweichungen irgendwann zum starken abdriften einzelner Zellen kommt. Der einzige Weg dieses Problem effektiv zu lösen, ist das Balancieren der Zellen.

3.2 BALANCIERMETHODEN

Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten einen Akkupack zu balancieren:

3.2.1 TOP-BALANCIERUNG

Bei der Top-Balancierung werden alle Zellen im vollen Zustand auf die gleiche Spannung gebracht. Typischerweise wird dies gegen Ende oder nach der Ladung durchgeführt. Abbildung 21 zeigt einen Akkupack nach dem Laden mit Top-Balancierung.

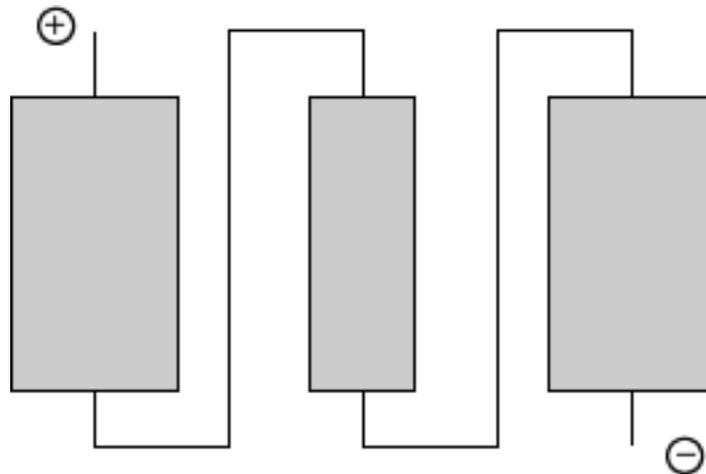


Abbildung 21: Top-Balancierter Akkupack, geladen

Der Akkupack besteht aus 3 Zellen, wovon die mittlere eine geringe Kapazität hat als die beiden anderen. Durch die Top-Balancierung sind alle Zellen auf ihre EOCV geladen und somit komplett voll.

Entlädt man den auf diese Weise balancierten Akkupack nun so lange bis die erste Zelle ihre EODV erreicht, zeigt sich ein Ladungszustand wie in Abbildung 22 dargestellt.

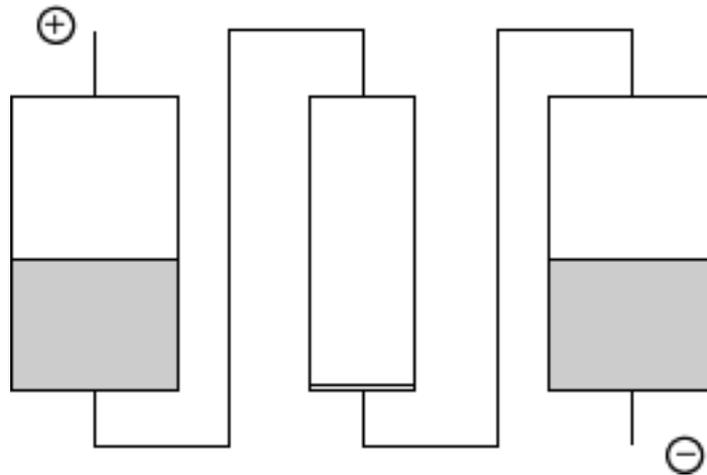


Abbildung 22: Top-Balancierter Akkupack, leer

Die mittlere Zelle erreicht wegen ihrer geringeren Kapazität als erstes ihre EODV, während die anderen beiden Zellen noch zur Hälfte voll sind.

3.2.2 BOTTOM-BALANCIERUNG

Bei der Bottom-Balancierung findet die Balancierung des Akkupacks im entladene Zustand statt. Alle Zellen werden auf die gleiche EODV gebracht. Abbildung 23 zeigt einen bottom-balancierten Akkupack.

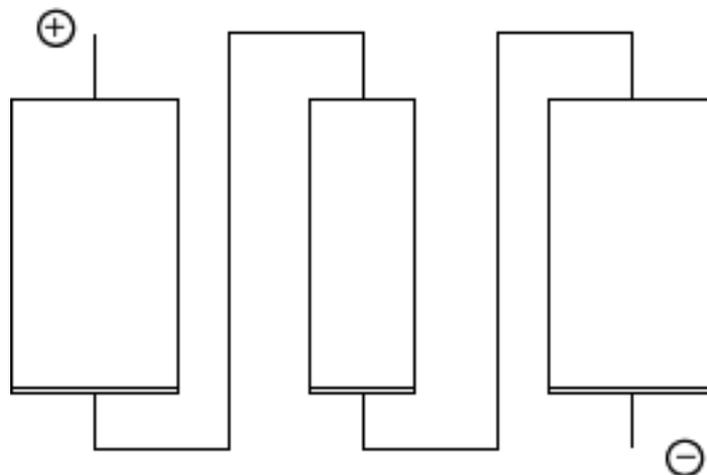


Abbildung 23: Bottom-Balancierter Akkupack, leer

Nach dem Laden mit einem Lader, der die Spannung jeder einzelnen Zelle überwacht, ergibt sich ein Ladungszustand wie in Abbildung 24 dargestellt.

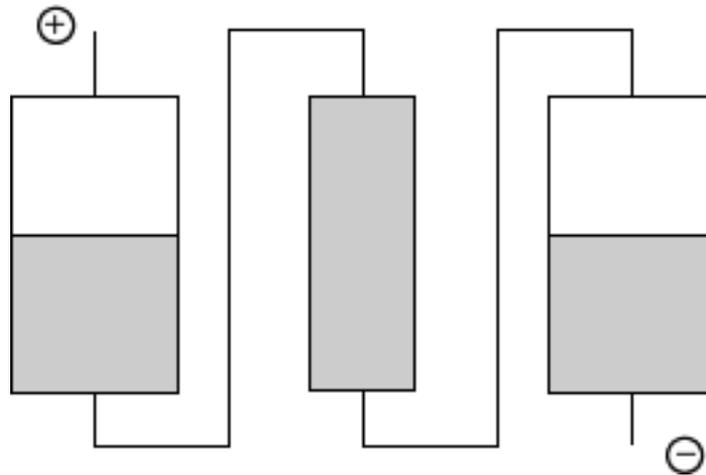


Abbildung 24: Bottom Balancierter Akkupack, geladen

Die Zelle mit der geringsten Kapazität ist voll bevor alle anderen Zellen voll sind. Die Ladung muss vorzeitig beendet werden.

3.2.3 VERGLEICH DER BALANCIERMETHODEN

Bei beiden vorgestellten Balancierverfahren wird die maximale entnehmbare Ladung durch die schwächste Zelle im Akkupack begrenzt. Die Wahl des Balancierverfahrens hat also keinen Einfluss auf die Kapazität des Akkupacks.

Allerdings zeigen sich Unterschiede bei der Lebensdauer der einzelnen Zellen.

- Die Zelle mit der geringsten Kapazität wird immer mit 100% DOD betrieben, es folgt also kein Unterschied
- Alle anderen Zellen werden beim Top-Balancing im oberen Ladungsbereich betrieben, während sie beim Bottom-Balancing im unteren Ladungsbereich betrieben werden. Nach Absatz 2.6.6 haben die bottom-balancierten Zellen also eine höhere Lebensdauer, auch wenn dies dem gesamten Akkupack wegen der schwächsten Zelle keinen Vorteil bringt.

Außerdem ergeben sich auch Unterschiede im praktischen Einsatz. Während das Top-Balancing-Verfahren einfach während oder nach dem Laden angewendet werden kann, muss für das Bottom-Balancing der gesamte Akkupack entladen werden. Normalerweise werden Akkus im praktischen Einsatz eher selten komplett entladen, und falls doch, werden sie oft direkt wieder geladen, so dass für das balancieren kaum Zeit bleibt.

Zudem gibt es Unterschiede in der Entladeelektronik.

- Beim Top-Balancing muss während dem Entladen die Spannung jeder einzelnen Zelle überwacht werden, damit keine Unterladung stattfindet.
- Beim Bottom-Balancing reicht es hingegen aus, wenn die Gesamtspannung des Akkupacks während dem entladen überwacht wird. Denn per Definition des Verfahrens sind alle Zellspannungen im entladenen Zustand gleich. Dies verringert die Größe der Entlade-Überwachungselektronik enorm, was in den meisten Fällen durchaus von Vorteil ist.

Trotz der komplizierteren Entladeelektronik beim Top-Balancing, eignet sich dieses Verfahren wegen seiner einfachen Anwendbarkeit während oder nach dem Laden besser zum Balancieren.

4.1.1 ZELLSPANNUNG MESSEN: WIDERSTÄNDE

Der einfachste Weg die Spannung der einzelnen Balancierkabel herunterzusetzen, ist sie mit Spannungsteilern so zu teilen, dass sie wieder im Messbereich des ADC liegen. Abbildung 26 verdeutlicht diese Methode.

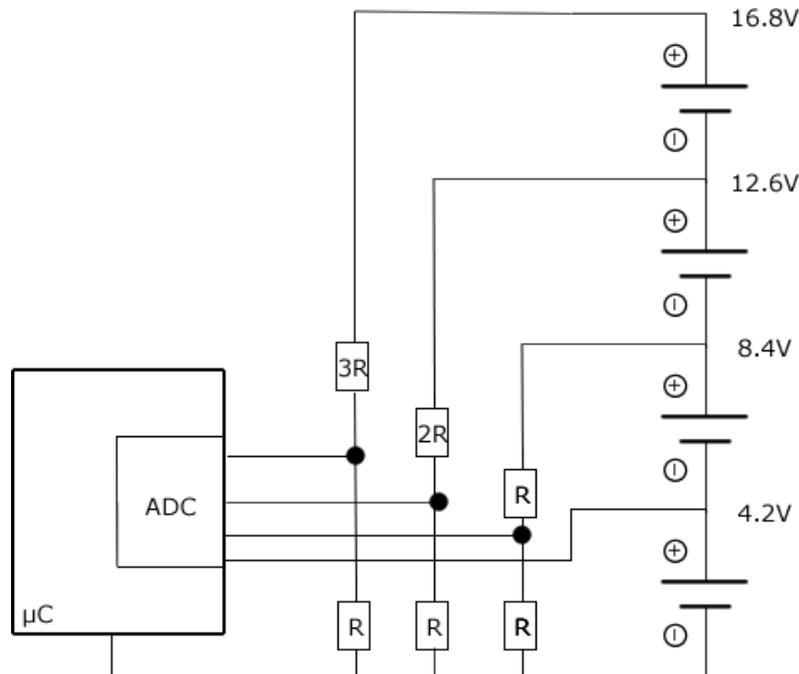


Abbildung 26: Spannungsmessung mit Widerständen

An jedes Balancierkabel werden zwei Widerstände in Reihe nach Ground angeschlossen. Der ADC wird jeweils zwischen den beiden Widerständen angeschlossen.

Die Widerstände werden so gewählt, dass die Spannungen aller Zellen im Spannungsbereich der ersten Zelle liegen. Die Spannung der zweiten Zelle wird beispielsweise durch zwei geteilt und landet wieder im Bereich der ersten Zelle ($8,4V : 2 = 4,2V$). Selbiges gilt für alle weiteren Zellen.

Diese Methode ist zwar sehr einfach zu realisieren, besitzt aber auch gravierende Nachteile. Eigentlich werden nicht die Spannungen der einzelnen Zellen, sondern immer die Spannung aller Zellen bis zum Ground-Potential gemessen. Misst man beispielsweise die Spannung des dritten Balancierkabels, erhält man (nach der Multiplikation mit 3) die Spannung 12,6 Volt. Um nun die Spannung der dritten Zelle zu erhalten, muss zusätzlich noch die Spannung am zweiten Balancierkabel gemessen werden und dann aus der Differenz der beiden Spannungen die Spannung der dritten Zelle berechnet werden. Dies ist zwar softwaretechnisch einfach zu realisieren, zerschlägt allerdings die Möglichkeit einer absoluten Messung aller Zellspannungen.

Ein weiterer Nachteil ist die verringerte Messauflösung der einzelnen Zellen. Während die erste Zelle noch mit voller ADC-Auflösung gemessen werden kann, wird die Auflösung beim Messen der zweiten Zelle durch die Spannungsteiler zwangsweise um den Faktor zwei verringert. Sollen nun 6 Zellen in Serie gemessen werden, beträgt die Auflösung bei der letzten Zelle nur noch $1/6$ der ursprünglichen Auflösung. Betrachtet man beispielsweise die Auflösung eines Atmega88 von 10Bit im Bereich 0 bis 5 Volt, erhält man bei der ersten Zelle eine Auflösung von 5 mVolt ($5000\text{mVolt} / 2^{10}$) und bei der letzten Zelle nur noch eine Auflösung von 30 mVolt ($5000\text{mVolt} \cdot 6 / 2^{10}$).

Zudem kann es bei dieser Messmethode zu Problemen beim Erreichen des „Low Power“-Ziels kommen. Die Widerstände sind fest mit den Balancierkabeln verbunden und entziehen den Zellen dauerhaft Strom. Noch dazu kommt, dass die Zellen wegen den unterschiedlichen Widerständen auch mit unterschiedlichen Strömen entladen werden und somit zum Ungleichgewicht der Zellen beitragen.

4.1.2 ZELLSPANNUNG MESSEN: KONDENSATOR

Eine weitere Möglichkeit die Spannung einzelner Zellen zu messen ergibt sich indem man einen Kondensator an die zu messende Zelle anschließt, diesen mit der Zellspannung lädt, und dann dessen Spannung gegenüber Ground misst. Abbildung 27 zeigt den schematischen Aufbau einer solchen Messschaltung.

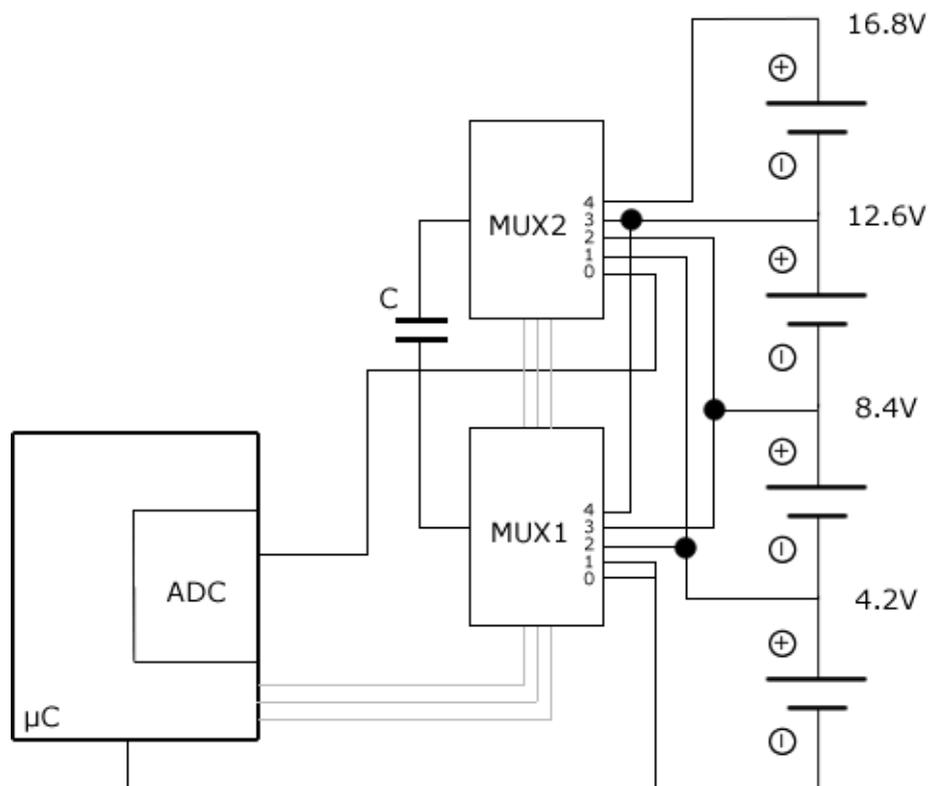


Abbildung 27: Spannungsmessung mit Multiplexern und Kondensator

Die Schaltung besteht aus zwei analogen Multiplexern und einem Kondensator. Die Bi-Direktionalen Multiplexer-Eingänge sind mit den Balancierkabeln und dem ADC verbunden. Die beiden Ausgänge mit dem Kondensator. Soll nun beispielsweise die Spannung der zweiten Zelle gemessen werden, werden beide Multiplexer auf Kanal 2 geschaltet (Abbildung 28), so dass Multiplexer1 den negativen Pol der zweiten Zelle mit dem negativen Pol des Kondensators, und Multiplexer2 den positiven Pol der zweiten Zelle mit den positiven Pol des Kondensators verbindet. Nach kurzer Zeit lädt sich der Kondensator auf die Spannung der zweiten Zelle. Danach werden beide Multiplexer auf Eingang 0 geschaltet (Abbildung 29). Dadurch verbindet Multiplexer1 den negativen Pol des Kondensators mit Ground, Multiplexer2 den positiven Pol des Kondensators mit dem ADC des Mikrocontrollers. Die Spannung der zweiten Zelle kann nun am ADC gemessen werden.

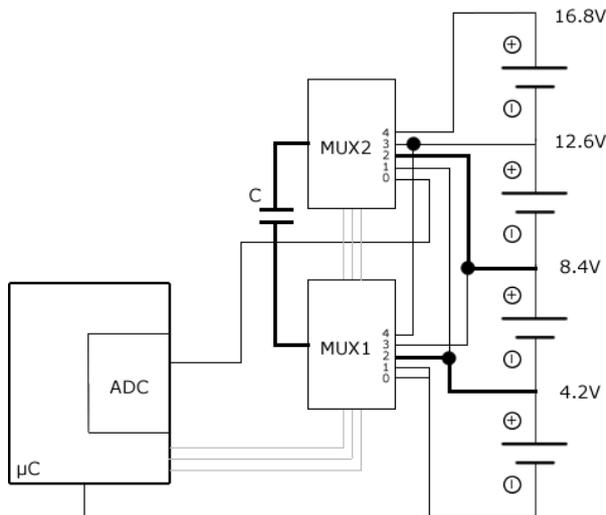


Abbildung 28: Spannungsmessung mit Multiplexern und Kondensator: Zelle 2

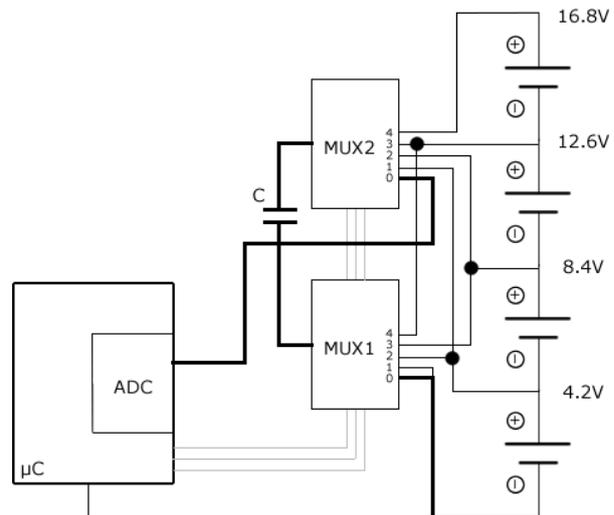


Abbildung 29: Spannungsmessung mit Multiplexern und Kondensator: ADC

Nachdem die Spannung mit dem ADC gemessen wurde, kann der Kondensator direkt an die nächste Zelle angeschlossen werden. Hat diese weniger Spannung als die Spannung am Kondensator, entlädt sich dieser und passt sich der neuen Zellspannung an. Dabei wird Ladung zwischen den Zellen transferiert. Da die Schaltfrequenz und Größe des Kondensators allerdings sehr klein ist, ist dieser Effekt kaum nennenswert.

Ein wesentlicher Vorteil dieser Methode ist die geringe Anzahl der benötigten Bauelemente. Für bis zu 7 Zellen in Reihe werden lediglich zwei 8:1 Multiplexer und ein Kondensator benötigt. Außerdem bleibt die Messauflösung bis hin zur 7. Zelle konstant. Es kann von allen Zellen die absolute Spannung gemessen werden und es muss keine relative Messung zur vorherigen Zelle stattfinden. Zudem verbrauchen die Multiplexer nur wenige μA Strom, was dem Erreichen des „Low Power“-Ziels entgegenkommt.

Allerdings existieren auch einige Nachteile. Multiplexer sind teurer als einfache Widerstände und besitzen eine Spannungsfestigkeit von höchstens 30 Volt. Sollen also mehr als 7 Zellen in Serie gemessen werden, müssen mehrere Multiplexer mit erweiterter Ansteuerungslogik gestapelt werden.

4.1.3 ZELLSPANNUNG MESSEN: DIFFERENZVERSTÄRKER

Ebenso ist es möglich, die einzelnen Zellspannungen mit Differenzverstärkern in den Spannungsbereich des ADCs zu überführen. Dabei wird aus je zwei aufeinander folgenden Balancierkabeln die Spannungsdifferenz gebildet und relativ zum Ground-Potential ausgegeben. Die Ausgabe entspricht dann genau der Zellspannung der Zelle zwischen den beiden Balancierkabeln. Zum Auswerten von n Zellen werden $n-1$ Operationsverstärker (kurz: OPV) benötigt, da die erste Zelle ohne OPV auskommt. Abbildung 30 verdeutlicht diesen Aufbau. Zur Vereinfachung wurden in der Abbildung keine einzelnen OPVs, sondern fertig beschaltete Differenzverstärker eingezeichnet. Jedes „D-OPV“-Modul besteht aus einem vollständig beschalteten OPV, der einen Differenzverstärker realisiert.

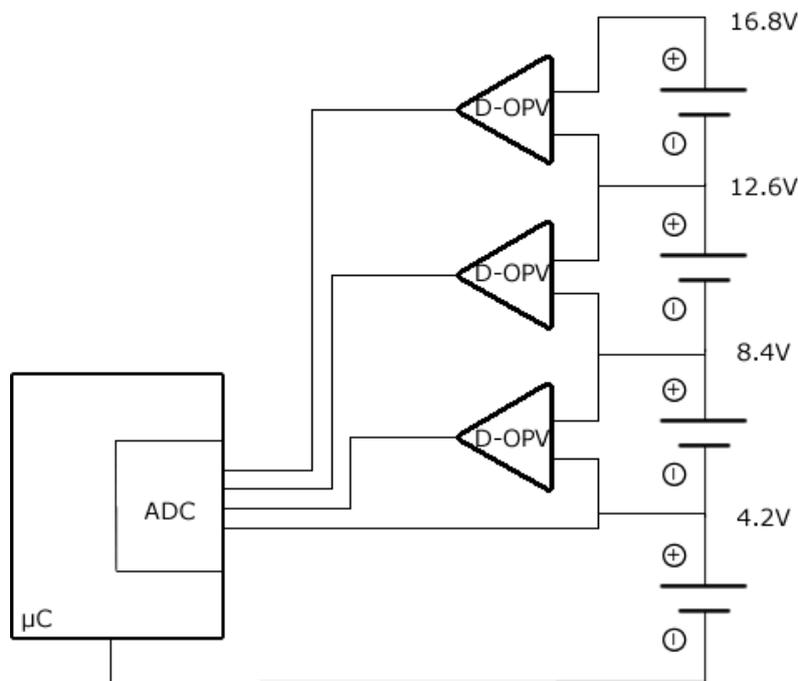


Abbildung 30: Spannungsmessung mit Operationsverstärkern (vereinfacht)

Der Differenzverstärker ist dabei das kritischste Bauteil. Er muss spannungsfest sein, um die addierte Zellspannung von 6 Zellen ($6 \cdot 4,2 = 25,2$ Volt) oder mehr zu verkräften und er muss gleichzeitig sehr wenig Strom verbrauchen. Mit auf dem Markt befindlichen Standard-OPVs lässt sich dies allerdings nicht verwirklichen. Entweder besitzen diese eine hohe Spannungsfestigkeit oder einen niedrigen Stromverbrauch. Die einzige Alternative sind teure Spezial-OPVs, die beide Anforderungen zu überproportional hohen Preisen erfüllen.

4.1.4 VERGLEICH DER MÖGLICHKEITEN DIE ZELLSPANNUNGEN ZU MESSEN

Abhängig von dem Anwendungsfall und der Anzahl der Zellen kommen verschiedene Messmethoden in Frage.

Legt man Wert auf einen kostengünstigen Aufbau und kann mit zunehmend schlechter werdender Messauflösung leben, empfiehlt sich der Aufbau nach der Widerstand-Methode.

Benötigt man eine hohe Messauflösung bei allen Zellen und muss nicht auf die Bauteilkosten achten, realisiert man die Differenzverstärker-Methode.

Benötigt man eine hohe Auflösung, muss aber auf den Preis achten, greift man zur Kondensator-Methode, die zwar geringfügige Bauteilkosten mit sich bringt, dafür aber eine absolute und hohe Messauflösung garantiert.

Tabelle 7 fasst diese Fakten zusammen.

	Bauteile pro Zelle	Stromverbrauch	Genauigkeit	Bauteil-Kosten
Widerstände	2	mittel	Relativ, gering	vernachlässigbar
Kondensator	~1	gering	Absolut, hoch	gering
Differenzverstärker	~5	gering ⁴	Relativ, hoch	hoch

Tabelle 7: Vergleich der Spannungsmessmethoden

4.2 LADUNGSAUSTAUSCH

Damit der Akkupack balanciert werden kann, muss eine Möglichkeit gefunden werden, einzelne Zellen im Zellstrang laden oder entladen zu können. Dies wird durch eine Balancierschaltung erreicht, die entweder aktiv oder passiv agiert. Aktive Balancierschaltungen zeichnen sich dadurch aus, dass diese beim Balanciervorgang keine Ladung aus dem Akkupack entnehmen, sondern lediglich Ladung von einer Zelle in eine andere umlagern. Dies wird vor allem durch den Einsatz von Spulen oder Kondensatoren erreicht. Passive Balancierschaltungen hingegen werden mit Widerständen realisiert und können nur Ladung aus einer Zelle entnehmen und in Form von Wärme freigeben. Es geht also Ladung verloren. Im Folgenden wird auf die verschiedenen Balancierschaltungen genauer eingegangen.

4.2.1 LADUNGSAUSTAUSCH: WIDERSTÄNDE

Mit Hilfe von einem Widerstand und einem Transistor lässt sich eine sehr einfache Entladeschaltung konstruieren, wie Abbildung 31 verdeutlicht. Sie lässt sich beliebig für weitere Zellen in Serie nach oben und unten fortsetzen.

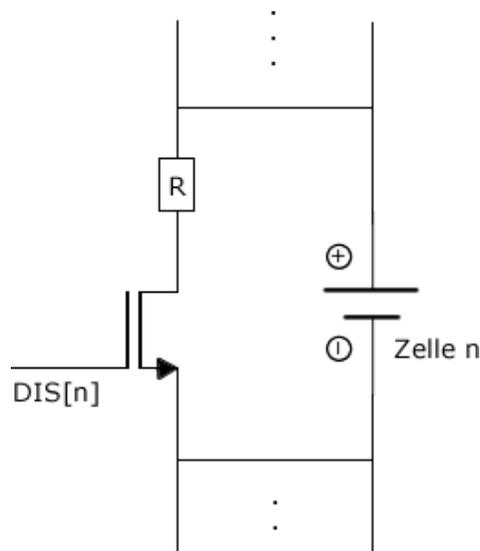


Abbildung 31: Entladeschaltung einer Zelle mit Widerstand

Widerstand und Transistor werden in Reihe verschaltet und dann mit Hilfe der Balancierkabel parallel zur Zelle angeschlossen. Im Leerlauf wird der $DIS[n]$ Anschluss des NMOS-FETs auf dem Spannungsniveau des negativen Pols der Zelle gehalten. Der Transistor ist also gesperrt und es kann

⁴ Hochwertiger OPV

kein Strom fließen. Soll die Zelle entladen werden, wird der $DIS[n]$ Anschluss des FETs auf das Spannungsniveau des positiven Pols der Zelle gezogen und der Transistor wird leitend. In Abhängigkeit vom Ladezustand der Zelle und der Größe des Widerstandes wird die Zelle nun mit einem Entladestrom I_e entladen, wie Formel (10) beschreibt.

$$I_e = \frac{U_{zelle}}{R} \quad (10)$$

Diese Schaltung ist zwar sehr einfach, weist allerdings das Problem auf, dass die entnommene Ladung nicht weiter im System verwendet werden kann und in Form von Wärme frei wird. Sollen hohe Balancierströme fließen muss also auf ausreichend Kühlung geachtet werden. Außerdem ist es nur möglich Zellen zu entladen. Eine Ladung der Zellen ist nicht möglich.

4.2.2 LADUNGS-AUSTAUSCH: ANSTEUERUNG

Generell besteht bei allen Balancierschaltungen das Problem, dass sie mit einem Spannungsniveau auf Höhe der zu balancierenden Zelle angesteuert werden müssen. Soll also beispielsweise ein Entlade-Transistor, wie in 4.1.1 vorgestellt, auf Höhe der zweiten Zelle im String geschaltet werden (Anschluss $DIS[2]$), müssen Spannungsniveau von 0 und 3+ Volt relativ zum negativen Pol der Zelle 2 gesehen bzw. 4,2 und 7,2 Volt absolut nach Ground zur Verfügung stehen. Bei handelsüblichen Mikrocontrollern stehen allerdings nur Spannungsniveau von 0 oder 5 Volt zur Verfügung, so dass hier eine spezielle Schaltung zum Wandeln der Pegel benötigt wird. Abbildung 32 zeigt einen Pegelwandler-Schaltkreis, der an einer widerstandsbasierten Balancierschaltung angeschlossen ist.

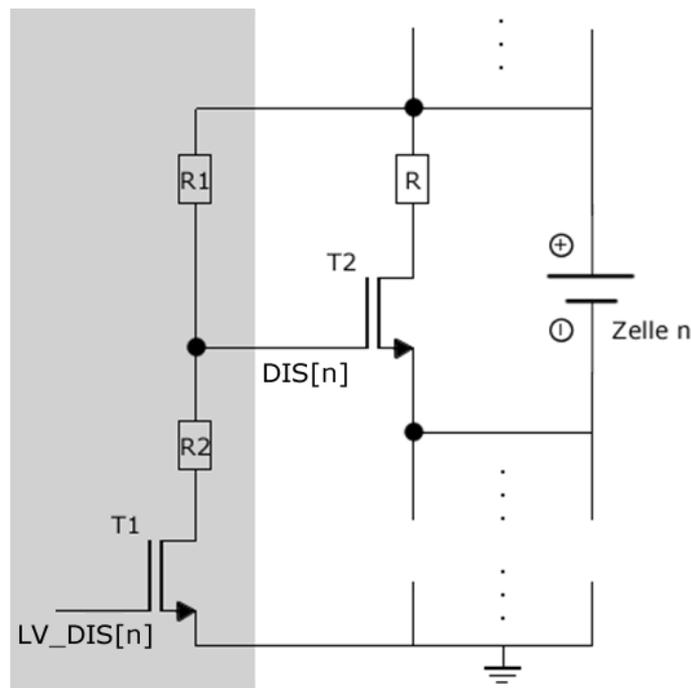


Abbildung 32: Pegelwandler Schaltung (grau) an widerstandsbasierender Balancierschaltung

Der Pegelwandler besteht aus zwei Widerständen und einem Transistor. Widerstand R1 ist mit dem positiven Pol der anzusteuern Zelle verbunden. Widerstand R2 mit R1, dem $DIS[n]$ Signal und dem Transistor T1, der wiederum direkt mit Ground verbunden ist. Dadurch ist es möglich ihn direkt mit Spannungsniveaus, die ein Mikrocontroller bereit stellen kann, anzusteuern. Die Ansteuerung erfolgt über den $LV_DIS[n]$ Eingang.

Ist der Spannungspegel des $LV_DIS[n]$ Signals „low“, also 0 Volt absolut nach Ground, sperrt der Transistor T1 und das $DIS[n]$ Signal wird von R1 auf den positiven Spannungspegel der Zelle gezogen. T2 wird dadurch leitend und die Zelle wird entladen. Ist der Spannungspegel des $LV_DIS[n]$ Signals „high“, also 5 Volt absolut nach Ground, wird T1 leitend und die beiden Widerstände R1 und R2 fungieren als Spannungsteiler. Damit T2 sperrt muss die an dem Spannungsteiler entstehende Spannung kleiner gleich der Spannung am negativen Pol der Zelle entsprechen. Um dies zu gewährleisten, muss das Widerstandsverhältnis zwischen R1 und R2, wie in Formel (11) beschrieben, eingehalten werden.

$$\begin{aligned}
 (n - 1) \cdot U_{Zelle} &= \frac{R2}{R1 + R2} \cdot n \cdot U_{Zelle} \\
 \Rightarrow (n - 1) \cdot (R1 + R2) &= R2 \cdot n \\
 \Rightarrow R1n - R1 + R2n - R2 &= R2 \cdot n \\
 \Rightarrow R1n - R1 &= R2 & (11) \\
 \Rightarrow R1 \cdot (n - 1) &= R2 \\
 \Rightarrow \frac{R2}{R1} &= n - 1
 \end{aligned}$$

Mit $n =$ „Nummer der Zelle“ beginnend bei 1.

Sollen die Widerstände beispielsweise für die zweite Zelle im String ausgelegt werden, muss das Verhältnis zwischen R1 und R2 etwa 1 betragen. Dadurch ergibt sich ein Spannungsteilungsfaktor von 2. Ist $LV_DIS[n]$ also „high“, stellt sich am Spannungsteiler die halbe Zellspannung der ersten beiden Zellen ein. Dies entspricht $2 \cdot 4,2 : 2 = 4,2$ Volt am $DIS[n]$ Signal. Der Transistor T2 sperrt.

4.2.3 LADUNGSAUSTAUSCH: SPULEN

Anders als bei Widerständen ist es mit Spulen möglich Ladung zwischen den einzelnen Zellen ohne Wärmeverluste zu transferieren. Lediglich der Widerstandsverlust der Spule geht verloren. Abbildung 33 zeigt das Konzept der induktiven Balancierschaltung.

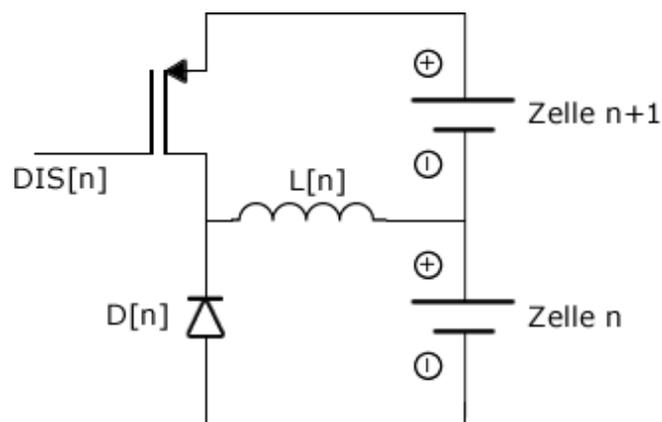


Abbildung 33: Induktive Balancierschaltung

Die Schaltung besteht aus einer Spule, einer Diode und einem Transistor. Um Ladung von Zelle $n+1$ zur Zelle n zu transferieren, wird der Transistor $DIS[n]$ kurz leitend geschaltet (Abbildung 34), so dass sich die Spule $L[n]$ auflädt. Nachdem die Spule geladen ist, wird der Transistor wieder abgeschaltet (Abbildung 35) und die Spule erzeugt mit ihrer gespeicherten Energie eine Selbstinduktionsspannung entgegengesetzter Polung, die durch die Diode $D[n]$ in die Zelle n entladen wird.

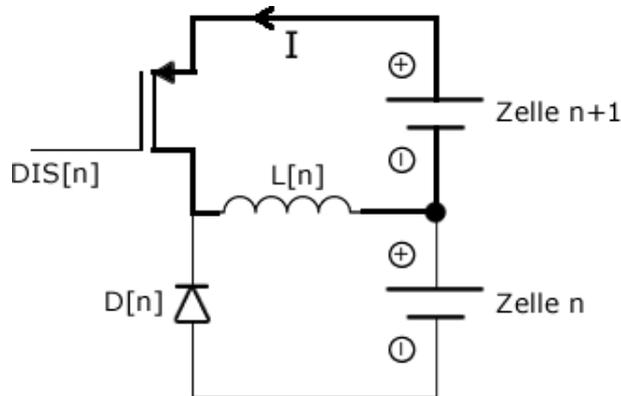


Abbildung 34: Induktive Balancierschaltung: Ladung der Spule

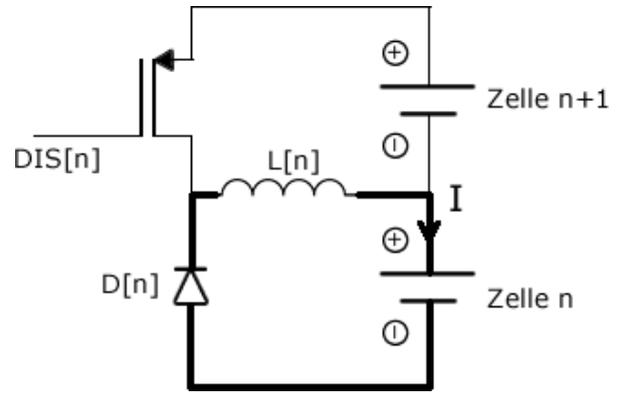


Abbildung 35: Induktive Balancierschaltung: Entladung der Spule

Die Schaltung lässt sich so nicht einfach nach oben und unten fortsetzen, da sich zwischen Diode $D[n]$ und dem negativen Pol der Zelle n keine weitere Spule befinden darf, die für ein Weiterführen der Schaltung nötig wäre. Würde man dort eine Spule platzieren, würde diese die Funktionalität der Schaltung negativ beeinflussen. Um dies zu umgehen, muss eine induktive Balancierschaltung für mehrere Zellen teils asynchron aufgebaut werden. Abbildung 36 zeigt einen solchen Aufbau.

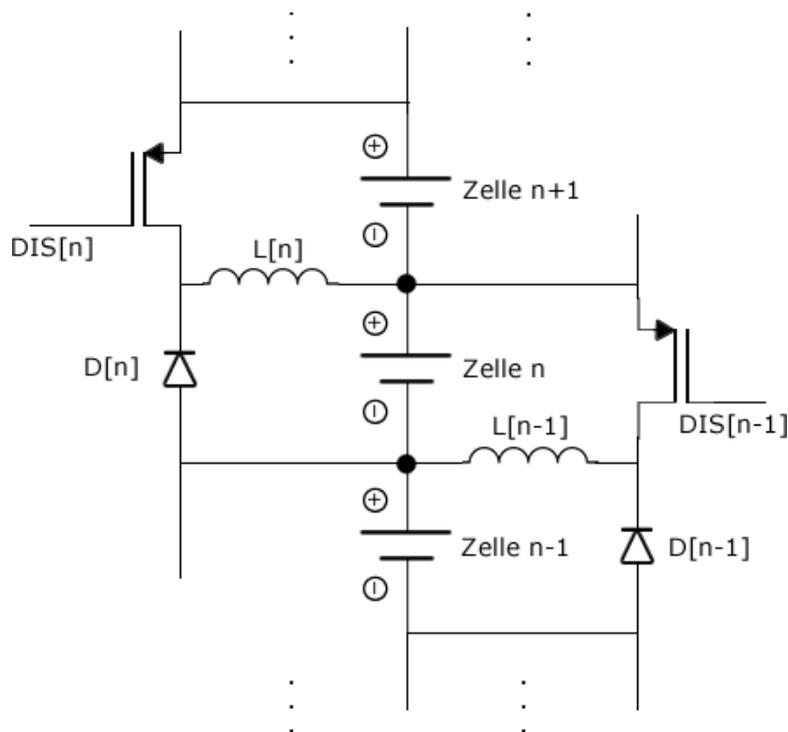


Abbildung 36: Induktive Balancierschaltung erweiterbar

Die Spulen werden alternierend einmal links und einmal rechts der Zelle platziert, so dass die Diode immer direkten Kontakt zum negativen Pol der Zelle hat. Ansonsten funktioniert die Schaltung exakt gleich wie oben beschrieben und lässt sich zudem noch beliebig nach oben und unten fortführen.

Die maximal möglichen Balancierströme hängen von der gewählten Spule ab. Bei Verwendung von SMD (Surface Mounted Device, deutsch: oberflächenmontiertes Bauelement) Spulen liegt der Balancierstrom im Bereich von ca. 0,5 bis 1 Ampere, wie Tabelle 8 zu entnehmen ist.

Frequenz [kHz]	Typ	Induktivität [μH]	Widerstand der Spule [$\text{m}\Omega$]	Spitzenstrom [mA]	Durchschnittsstrom [mA]
3	Ring	300	130	1240	740
3	Ring	470	135	790	280
3	SMD	220	380	2280	890
3	SMD	330	430	1620	610
3	SMD	470	560	1240	430

Tabelle 8: Balancierstrom bei verschiedenen Spulen aus (Atmel Corp, 2013)

Neben den Vorteilen des geringen Wärmeverlustes und den hohen Balancierströmen besitzt die oben gezeigte Schaltung allerdings auch einige Nachteile. Es ist nur möglich Ladung von einer höheren Zelle in eine tiefer liegende Zelle zu transferieren. Deswegen ist es ohne zusätzliche Schaltung nicht möglich die unterste im String befindliche Zelle zu entladen oder Ladung von tiefer liegenden Zellen auf höhere zu transferieren. Um dies zu ermöglichen, wird die unterste Zelle über einen Transformator mit der obersten Zelle verbunden wie in Abbildung 37 verdeutlicht.

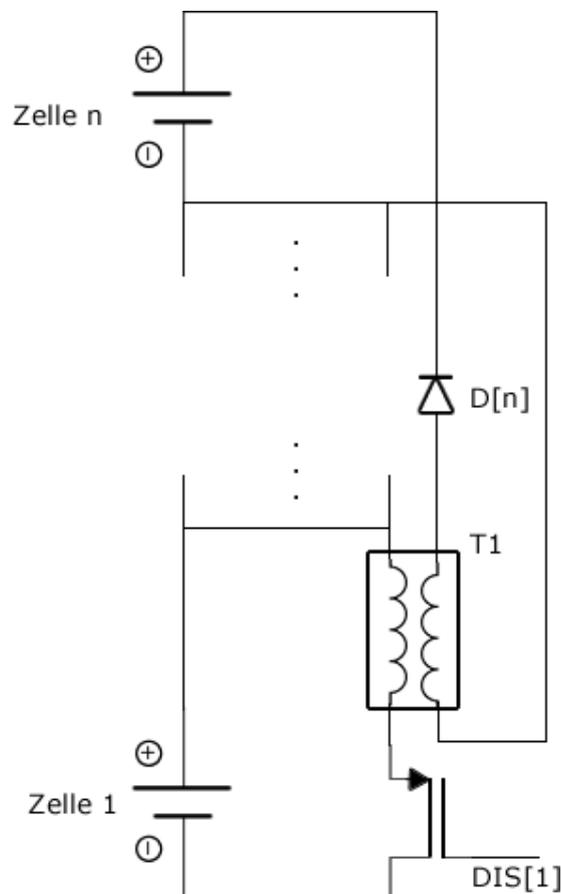


Abbildung 37: Induktiver Ladungsaustausch zwischen der untersten und obersten Zelle

Dadurch ist es möglich Ladung der untersten Zelle in die oberste Zelle im String zu übertragen und somit auch möglich Ladung von jeder beliebigen Zelle in jede andere beliebige Zelle zu transferieren.

Außerdem sollte die Ansteuerungsschaltung erweitert werden, um Kurzschlüsse durch undefinierte oder falsche Steuersignale zu vermeiden. Würde das Steuersignal $DIS[1]$ beispielsweise durch einen Absturz der Steuereinheit dauerhaft abgeschaltet werden, würde der Transistor die Zelle kurzschließen. Um das zu verhindern, wird das Steuersignal über einen Kondensator wechselstromgekoppelt. Dies wird erreicht indem die Ansteuerungsschaltung aus Kapitel 4.2.2 um zwei Widerstände und einen Kondensator erweitert wird.

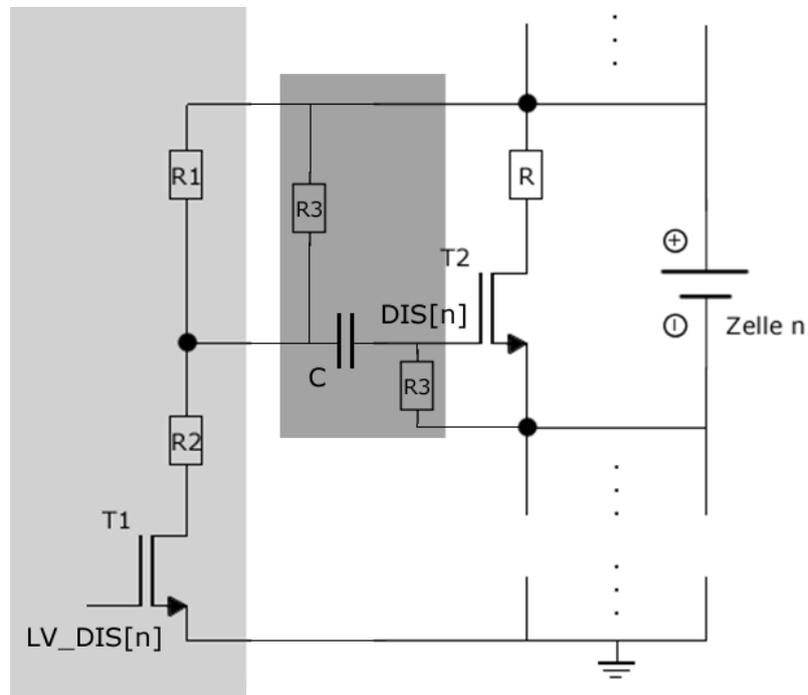


Abbildung 38: Erweiterte Ansteuerungsschaltung

Abbildung 38 verdeutlicht die erweiterte Ansteuerung (dunkelgrau). Das Steuersignal $Dis[n]$ des Transistors ist durch den Pulldown-Widerstand R immer auf den „low“ Pegel gezogen, so dass der Transistor Sperrt. Die linke Seite des Koppelkondensators wird durch den Pullup-Widerstand immer auf „high“ gezogen. Soll der Transistor nun durchgeschaltet werden, wird das $LV_DIS[n]$ Signal auf „high“ geschaltet, so dass die linke Seite des Kondensators auf „low“ geht. Anschließend wird das Signal $LV_DIS[n]$ auf „low“ geschaltet und die linke Seite des Kondensators geht wieder auf „high“. Während der Transition von „low“ zu „high“ gibt es an der rechten Seite des Kondensators einen kurzen „high“ Puls und der Transistor $T2$ schaltet kurz durch. Dadurch sind nur noch kurze Schaltungen des Transistors $T2$ möglich und eine Fehlansteuerung führt in keinem Fall zu einem Kurzschluss.

4.2.4 LADUNGSAUSTAUSCH: KONDENSATOREN

Auch mit Kondensatoren ist es möglich Ladung zwischen verschiedenen Zellen ohne nennenswerten Wärmeverlust zu transferieren. Abbildung 39 zeigt eine auf Kondensatoren basierende Balancierschaltung.

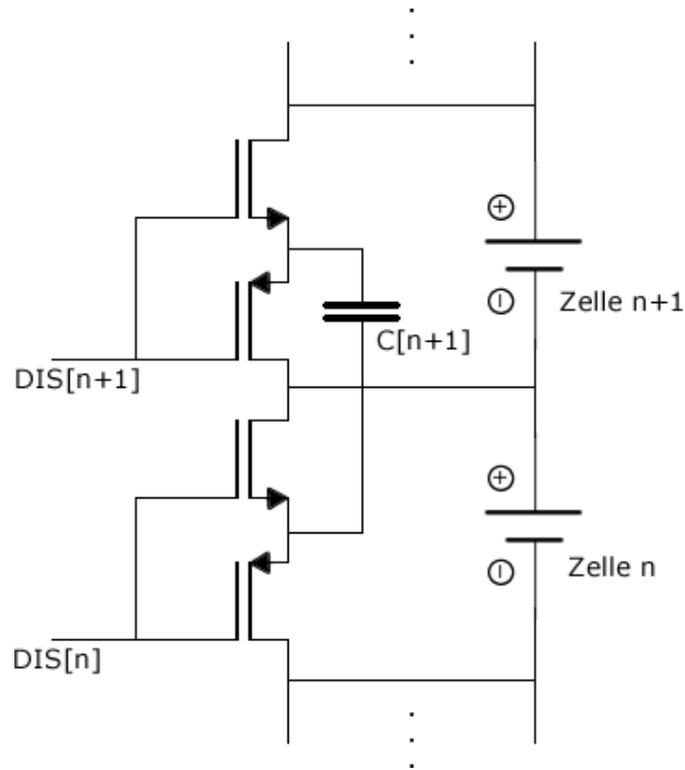


Abbildung 39: Kapazitive Balancierschaltung

Pro Zelle besteht die Schaltung aus einem NMOS-PMOS-Transistorpaar und einem Kondensator.

Soll Ladung zwischen den Zellen n und $n+1$ transferiert werden, wird der Kondensator $C[n+1]$ durch schalten der Signale $DIS[n]$ und $DIS[n+1]$ auf „high“ zuerst mit der Zelle $n+1$ verbunden (Abbildung 40) und anschließend durch invertieren der Steuersignale mit Zelle n verbunden (Abbildung 41). Dabei nimmt der Kondensator in Abhängigkeit der Spannungsdifferenz zwischen Zelle und Kondensator Ladung auf oder gibt sie an die Zelle ab. Wird der Schaltvorgang über längere Zeit wiederholt, gleichen sich die Spannungen der beiden Zellen an.

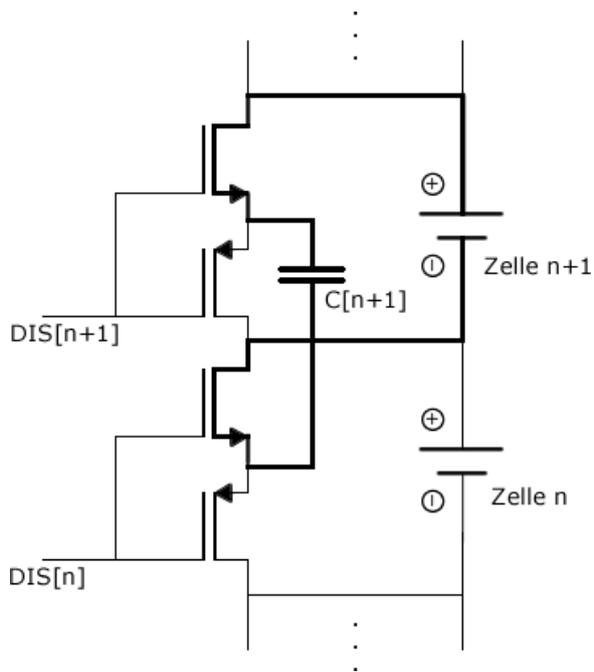


Abbildung 40: Kapazitive Balancierschaltung: Schritt 1

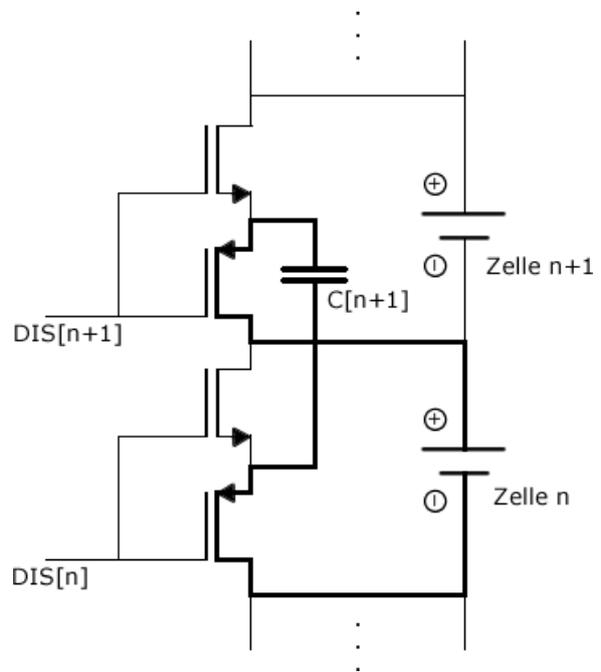


Abbildung 41: Kapazitive Balancierschaltung: Schritt 2

Die Schaltung lässt sich ohne Probleme nach oben und unten fortführen, so dass gleichzeitig mehrere Zellen auf die gleiche Spannung gebracht werden können.

Die erreichbaren Balancierströme hängen im Wesentlichen von der Schaltfrequenz der Schaltung, der Größe der Kondensatoren und dem Spannungsunterschied der Zellen ab. Bei Verwendung von großen SMD-Kondensatoren liegt der Balancierstrom im Bereich von einigen wenigen Milliampere, wie Tabelle 10 zeigt.

Schaltfrequenz [kHz]	Kapazität [μF]	Zell-Spannungs-Unterschied [mV]	Balancierstrom [mA]
2.3	33	110	15
3	100	70	18
1	470	70	20
3	470	70	28

Tabelle 9: Balancierströme bei kapazitivem Balancieren, aus (Atmel Corp, 2013)

Es sind zwar nur geringe Balancierströme möglich, dafür ist aber keine abgesicherte Schaltung zur Ansteuerung nötig, da keine Kurzschlüsse durch falsche Steuersignale möglich sind.

Darüber hinaus ist es gegenüber der induktiven Balancierschaltung ohne weiteres möglich, Ladung von tieferen Zellen in höhere im String befindliche Zellen zu verschieben, ohne dass ein Transformator oder ähnliches verbaut werden muss.

4.2.5 VERGLEICH DER LADUNGS-AUSTAUSCHMETHODEN

Im Vergleich zeigt sich, wenn hohe Balancierströme benötigt werden sollte zu induktiver Balancierung gegriffen werden.

Sind nur geringe Balancierströme nötig und es soll möglichst kein Wärmeverlust entstehen, sollte zur kapazitiven Balancierung gegriffen werden.

Legt man Wert auf eine kleine Schaltung und benötigt trotzdem hohe Ströme, sollte zu resistiver Balancierung gegriffen werden.

Methode	Balancierstrom [mA]	Wärmeverlust	Bauteile pro Zelle	Größe der Schaltung
Induktiv	500 - 1000	nein	3 + 3	groß
Kapazitiv	10 - 30	nein	2	mittel
Resistiv	1 - 1000	ja	2	gering

Tabelle 10: Vergleich möglicher Balancierschaltungen

4.3 KOMMUNIKATION

Besteht ein Akkupack aus sehr vielen in Serie geschalteten Zellen, muss die BMS-Platine aufgrund der hohen Spannungsunterschiede und der daraus resultierenden limitierten Anzahl an anschließbaren Zellen pro Schaltung, aus mehreren in Serie verschalteten BMS-Modulen bestehen. Um ein einheitliches Balancierziel zu finden, müssen diese Module untereinander kommunizieren können. Da die einzelnen Module allerdings mit unterschiedlichen Ground-Potentialen arbeiten, müssen die Kommunikationssignale vom Ground-Potential entkoppelt werden. Abbildung 42 verdeutlicht dieses Problem.

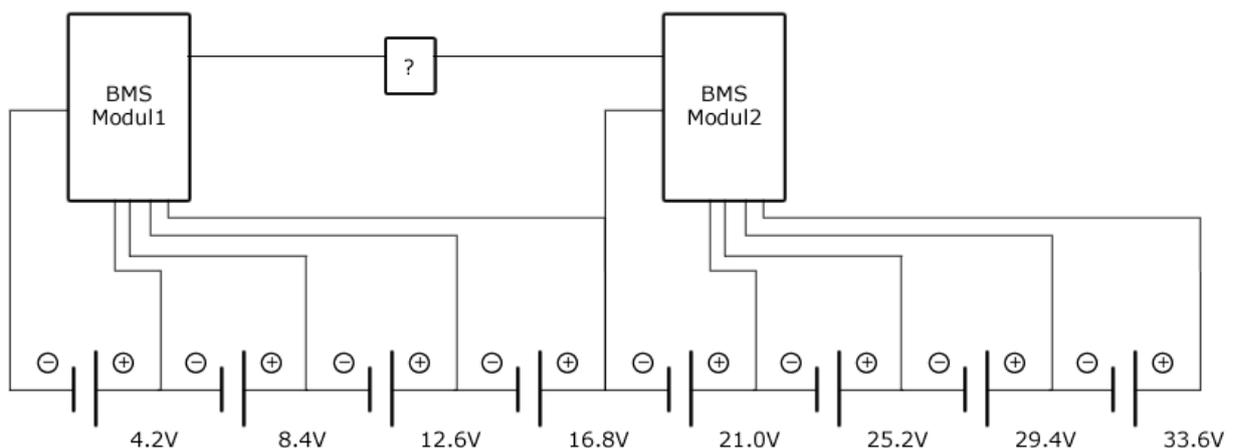


Abbildung 42: Verschaltung von zwei BMS-Module in Serie

Während bei dem ersten BMS-Modul „0 Volt“ als Ground-Potential verwendet wird, wird beim zweiten BMS-Modul „16.8 Volt“ als Ground verwendet.

Der einfachste Weg dieses Problem zu lösen, ist die Entkoppelung der Kommunikationssignale von ihrem Ground Potential mit Hilfe von Optokopplern. Optokoppler erlauben es Signale potentialfrei ,ohne Bezug zum Ground-Potential, zu übertragen. Dies wird erreicht, indem das zu übertragende Signal nicht elektrisch sondern elektromagnetisch übertragen wird. Abbildung 43 zeigt den typischen Aufbau eines Optokopplers.

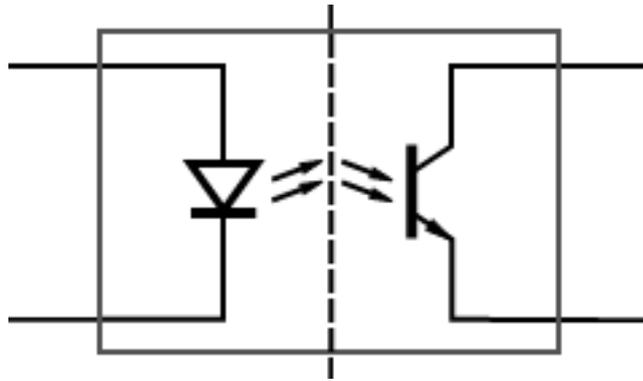


Abbildung 43: Schematischer Aufbau eines Optokopplers

Der Optokoppler besteht aus einer LED und einem Phototransistor. Je nachdem ob die LED durch eine Steuerspannung leuchtet oder nicht, schaltet der Phototransistor durch oder sperrt. Die Übertragung der Signale ist komplett potentialfrei. Der Potentialunterschied zwischen LED und Phototransistor darf bei handelsüblichen Optokopplern bis zu einigen tausend Volt betragen, ist also hoch genug um über mehrere hunderte Zellen hinweg zu kommunizieren.

Neben der Verkabelung selbst stellt sich auch die Frage nach der eingesetzten Übertragungsschnittstelle. Auf marktüblichen Mikrocontrollern stehen meist drei Schnittstellen zur Auswahl, die alle genügend hohe Datenraten zur Verfügung stellen, um die benötigten Daten der BMS untereinander auszutauschen:

- Inter-Integrated Circuit, kurz **I2C**
- Serial Peripheral Interface, kurz **SPI**
- Universal Asynchronous Receiver Transmitter, kurz **UART**

Der I2C-Bus nutzt zwei Datenleitungen zur Kommunikation, von denen eine bidirektional ausgelegt sein muss. Bidirektionale Entkopplung ist mit preiswerten Optokopplern nicht zu erreichen, sodass I2C für das Entwicklungskonzept dieser Arbeit ausscheidet.

Der SPI-Bus nutzt keine bidirektionalen Signale, dafür benötigt er aber vier Signalleitungen und damit vier Optokoppler pro BMS Modul.

Der UART nutzt zwei Signalleitungen. Eine zum Senden und eine zum Empfangen. Baut man eine Ringstruktur auf, wird pro BMS Modul lediglich ein Optokoppler benötigt.

Im Hinblick auf die Anforderungen des BMS-Moduls, wie geringer Stromverbrauch, geringe Größe, wenige Bauteile und geringer Preis, empfiehlt es sich also UART als Übertragungsschnittstelle zu verwenden.

4.4 FERTOGE HARDWARE IC'S

Neben allen vorgestellten Schaltungen besteht auch die Möglichkeit bereits fertig entwickelte und auf Batterie Management Systeme ausgelegte ICs (Integrated Circuit, deutsch: Integrierter Schaltkreis) zu verwenden, welche die Probleme „Spannung messen“, „Ladung austauschen“ und

„Kommunikation“ in einem Chip lösen. Abbildung 44 zeigt den typischen Aufbau eines solchen ICs anhand des BMS IC LTC6802 von Linear Technology.

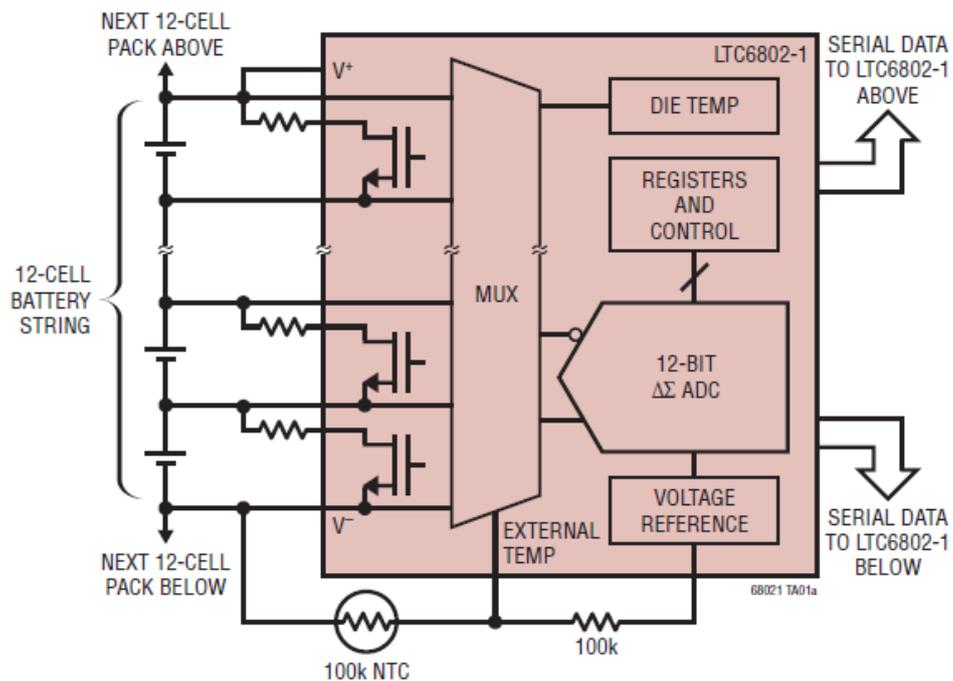


Abbildung 44: Schematischer Aufbau LTC6802, aus Datenblatt

Der IC besitzt 13 Eingänge zum direkten Messen der Zellspannungen, 12 Ausgänge zum Ansteuern einer Balancierschaltung, 2 Ein- und 2 Ausgänge zur Kommunikation zwischen mehreren in Serie verschalteten ICs und zusätzlich auch noch 2 Eingänge zum Anschluss von Temperatursensoren. Zudem ist es bei dem LTC6802 noch möglich die 12 Ausgänge, die normalerweise nur zur Ansteuerung der Balancierschaltung vorgesehen sind, direkt zum resistiven Balancieren zu verwenden.

Ein IC alleine beinhaltet also alle Schaltungen die benötigt werden, um ein Akkupack zu balancieren.

Es existieren zahlreiche BMS-ICs von verschiedenen Herstellern mit mehr oder weniger der gleichen Funktionalität. Auf die bekanntesten wird im Folgenden kurz eingegangen.

4.4.1 ATA6870⁵

Hersteller	Atmel Corporation
Jahr	2009
ADC	12 Bit incremental
Mikrocontroller	50 mA
Stromversorgung	10 μ A
Stromverbrauch sleep	15 mA
Stromverbrauch Active	3-6
Zellen pro IC	16
ICs pro String	SPI
Kommunikation	VQFN 48
Gehäuse	5,40 €
Preis	0,90 €
Preis / Zelle	

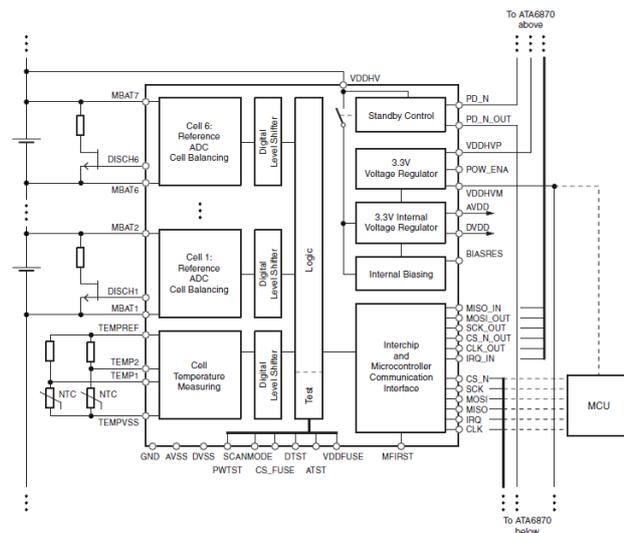


Abbildung 45: ATA6870

Sonstiges:

- 2 ADC Anschlüsse für einen Temperatursensor

4.4.2 AD7280⁶

Hersteller	Analog Devices
Jahr	2010
ADC	12 Bit successive approximation
Mikrocontroller	5 mA
Stromversorgung	5 μ A
Stromverbrauch sleep	9 mA
Stromverbrauch Active	4-6
Zellen pro IC	8
ICs pro String	SPI
Kommunikation	LQFP 48
Gehäuse	8,50 €
Preis	1,40 €
Preis / Zelle	

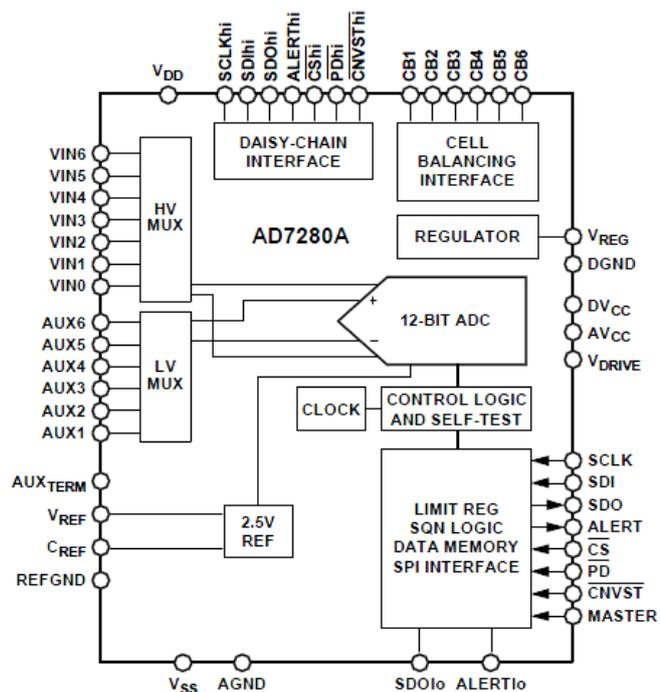


Abbildung 46: AD7280

Sonstiges:

- 6 Zusätzliche ADC Eingänge

⁵ www.atmel.com/devices/ata6870.aspx

⁶ www.analog.com/en/analog-to-digital-converters/energy-measurement/ad7280a/products/product.html

- Balancerschaltung bis 80mA
- 2 ADC Anschlüsse für einen Temperatursensor

4.4.5 BQ76PL536⁹

Hersteller	Texas Instruments
Jahr	2011
ADC	14 Bit successive approximation
Mikrocontroller	35 mA
Stromversorgung	12 µA
Stromverbrauch sleep	15 mA
Stromverbrauch active	3-6
Zellen pro IC	10+
ICs pro String	SPI
Kommunikation	TQFP 64
Gehäuse	10 €
Preis	1,60 €
Preis / Zelle	

Sonstiges:

- 2 ADC Anschlüsse für Temperatursensor
- GPIO Pins

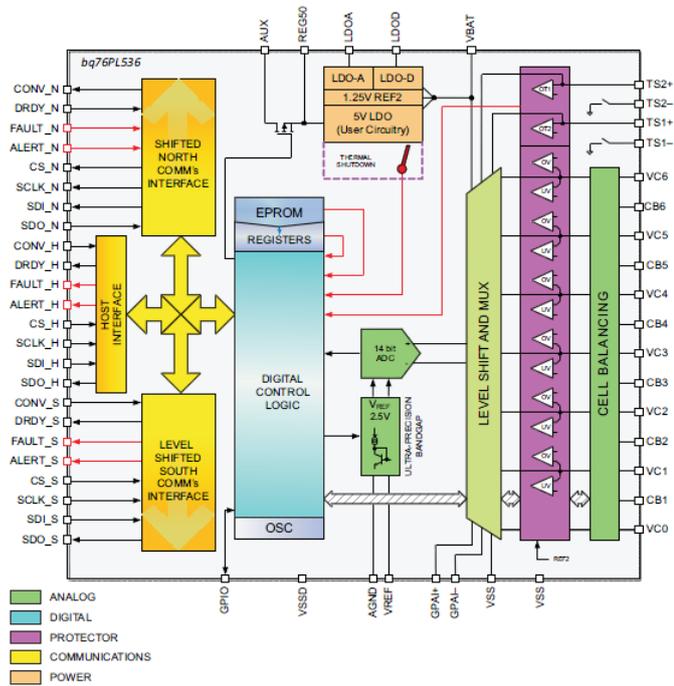


Abbildung 49: BQ76PL536

4.4.6 ZUSAMMENFASSUNG DESIGNMÖGLICHKEITEN

	Zellen pro IC	Ruhestrom [µA]	Strom aktiv [mA]	Inter-Chip	Gehäuse	Preis [€]	Preis / Zelle [€]
ATA6870	3-6	10	15	SPI	VQFN 48	5,40	0,90
AD7280	4-6	5	9	SPI	LQFP 48	8,50	1,42
ISL9216 +ISL9217	8-12	10	0.5	-	QFN 32 QFN 24	6,70 4,50	0,93
LTC6802	4-12	60	1.2	SPI	SSOP 44	15,40	1,28
BQ76PL536	3-6	12	15	SPI	TQFP 64	10,00	1,66

Tabelle 11: Vergleich verschiedener BMS-ICs

⁹ www.ti.com/product/bq76pl536

5 REALISIERUNG

Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit der Realisierung der während dieser Arbeit entwickelten BMS-Platine und den dabei überwundenen Schwierigkeiten.

5.1 ANFORDERUNGEN

Der Einsatzzweck der BMS-Platine soll im Bereich von E-Bikes oder Pedelecs liegen. Daraus resultieren, wie in der Einleitung schon kurz beschrieben, folgenden Anforderungen:

- **Modularer Aufbau für bis zu 24 Zellen in Serie:** Die Platine soll modular und symmetrisch aufgebaut werden, so dass die gleiche Platine mehrfach hintereinander geschaltet werden kann und so entsprechend mehr Zellen überwacht und balanciert werden können. E-Bikes nutzen üblicherweise maximal vier Akkupacks mit jeweils 6 Zellen in Serie.
- **Für LiPo-Zellen bis ca. 20Ah:** Die maximal auf einem E-Bike installierbare Kapazität pro Zelle beträgt - begrenzt durch Größe und Gewicht - ca. 20Ah. Aus dieser Vorgabe lässt sich auch der maximal benötigte Balancierstrom des BMS abschätzen. Werden die Akkus des E-Bikes im Schnitt einmal pro Tag komplett entladen, muss das BMS in der Lage sein die unbalancierten Zellen innerhalb von 24h wieder zu balancieren. Geht man von einem mehreren Jahren alten Akku aus der sehr oft benutzt wird, könnte während dem Entladen zwischen den einzelnen Zellen ein Ungleichgewicht von 5% der maximalen Zellkapazität entstehen. Innerhalb von 24 Stunden müssten also 1Ah Kapazität umgeladen werden. Daraus resultiert ein minimal benötigter Balancierstrom von ungefähr 42 mA.
- **Geringer Stromverbrauch:** Da das BMS dauerhaft mit dem Akkupack verbunden bleiben soll, darf es nur sehr wenig Strom verbrauchen. Nimmt man beispielsweise an, dass die Akkus des E-Bikes auf 10% ihrer Nennkapazität entladen werden und dann einen Monat lang nicht wieder benutzt und geladen werden, darf das BMS nicht mehr als diese 10% Restladung verbrauchen. Nimmt man weiterhin an, dass relativ kleine Zellen von nur 5 Ah Kapazität verbaut sind, dürfen innerhalb von einem Monat nur 500 mAh Ladung verbraucht werden. Daraus ergibt sich ein maximaler Stromverbrauch im Energiesparmodus von 500 mAh : (24 h · 30) = 0,7 mA
- **Kommunikationsfähig:** Die BMS-Platine muss zum einen in der Lage sein mit allen anderen verbundenen BMS-Platinen zu kommunizieren damit die Zellspannungen aller Zellen angeglichen werden können. Zum anderen soll es möglich sein die Zellspannungen aller Zellen im System zur Auswertung an ein externes System weiterzugeben. Wegen der Anforderung des geringen Stromverbrauchs sollte eine drahtgebundene Kommunikationsschnittstelle verwendet werden.
- **Kleiner Formfaktor: 30 x 50 x 10 mm:** Die Größe der BMS-Platine soll die Größe des Akkupacks kaum verändern.
- **Einfache Herstellung:** Die BMS Platine soll von Hand mehrfach angefertigt werden können. Integrierte Schaltkreise mit schwer lötbaren Bauformen wie BGA oder PLCC können deswegen nicht verwendet werden.
- **Geringer Preis pro Zelle:** Der Preis der BMS-Platine soll maximal ein Zehntel des Preises des Akkus betragen.

5.2 HARDWARE VERSION 1

5.2.1 BALANCIEREN UND MESSEN

In der ersten Hardware Version werden zum Balancieren und Messen der Spannung lediglich zwei Multiplexer und ein Kondensator verwendet. Die Schaltung ist im Wesentlichen aufgebaut wie in Abschnitt 4.1.2 vorgeschlagen. Dieses Design wurde vor allem wegen der geringen Anzahl der Bauelemente und der damit vereinfachten Fertigung gewählt (siehe Abschnitt 4.1.4). Abbildung 50 zeigt den Schaltplan der Mess- und Balancierschaltung der ersten Hardware Version.

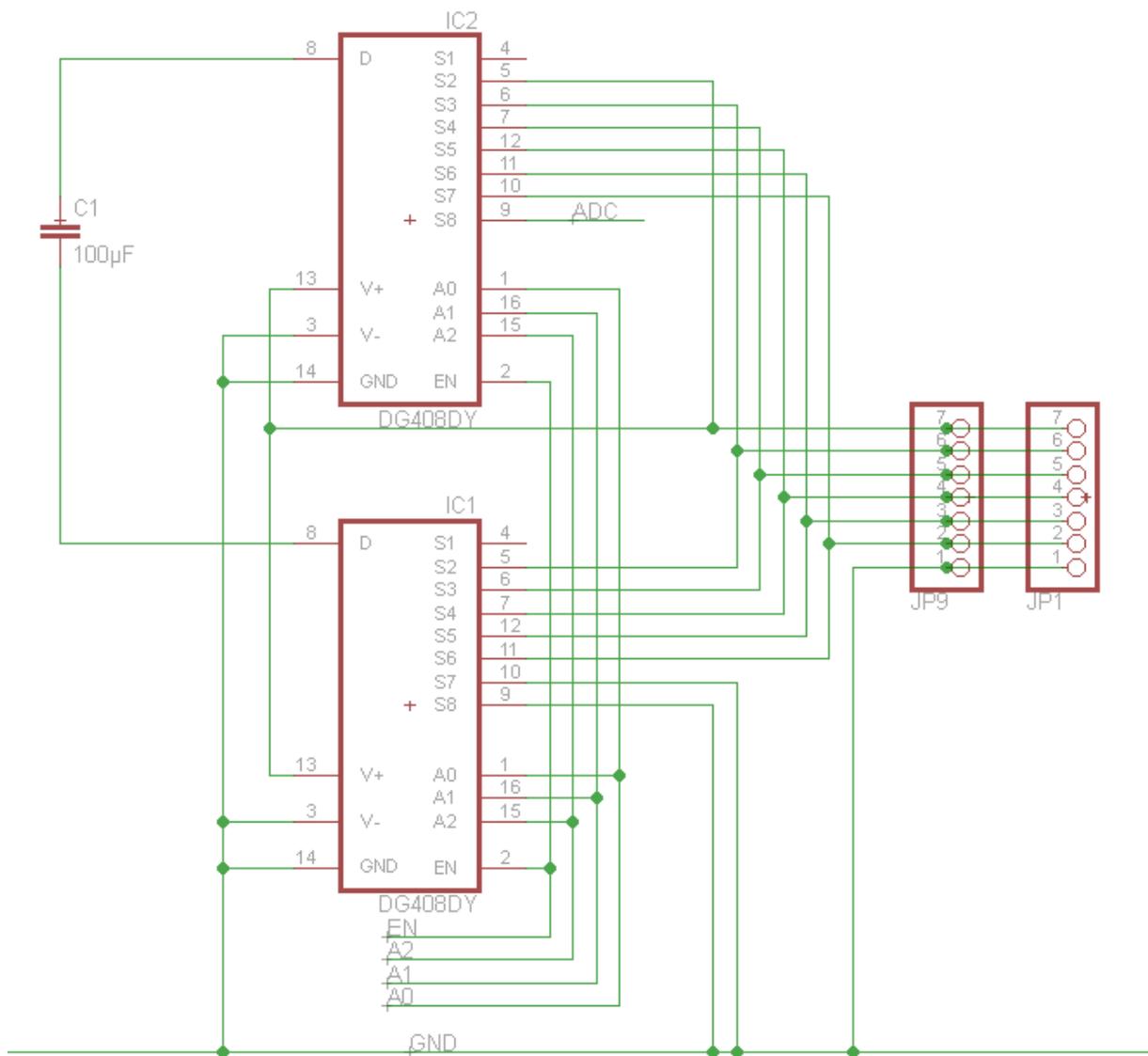


Abbildung 50: Mess- und Balancierschaltung Hardware Version 1

Die Schaltung besteht aus zwei DG408DY Analogen Multiplexern und einem 100µF Kondensator. An den Anschlüssen JP1 und JP9 kann jeweils das Balancierkabel eines Akkupacks mit sechs Zellen angeschlossen werden. Dieser Anschluss ist doppelt vorhanden, um das parallelisieren von zwei

Akkupacks zu vereinfachen. Die Schaltung wird durch alle Zellen des Akkupacks mit Strom versorgt und über die Steuersignale Enable (EN) und Adresse 0-2 (A0-A2) angesteuert.

Zum Messen der Spannung wird der Kondensator durch die Multiplexer erst an die Zelle und dann an den ADC angeschlossen. Zum Balancieren wird der Kondensator von einer Zelle zur nächsten geschaltet.

Beim Multiplexer DG408DY (Vishay Siliconix, DG408DY) handelt es sich um einen preisgünstigen 8:1 Analogen Multiplexer mit einer Spannungsfestigkeit von 44 Volt, die weit über den benötigten $6 \cdot 4,2 \text{ Volt} = 25,2 \text{ Volt}$ liegt. Die Steuersignale lassen sich mit 5 Volt-Pegel ansteuern und sind somit optimal von einem Mikrocontroller ansteuerbar. Der Ruhestrom belastet das Strombudget laut Datenblatt mit ca. $75 \mu\text{A}$.

Wie in Tabelle 9 gezeigt, sollte zum Erreichen eines hohen Balancierstroms der Kondensator so groß wie möglich gewählt werden. Da die Platine möglichst klein sein soll und deswegen nur aus SMD Bauteilen besteht, wird der größte erhältliche SMD-Kondensator im 1206-Gehäuse mit $100 \mu\text{F}$ Kapazität verwendet.

Zur Steuerung des Balanciervorgangs und Auswertung aller Zellspannungen wird ein Mikrocontroller benötigt, der die Multiplexer ansteuern, analoge Signale in digitale wandeln kann und ein UART-Interface besitzt, dass die Kommunikation mit anderen BMS ermöglicht. Die effektive Auflösung des ADC sollte mindestens 9 Bit betragen, damit die Zellspannungen auf 10 mV genau angeglichen werden können. Außerdem sollten effektive stromsparende Betriebsmodi vorhanden sein. Da keine großen Berechnungen durchgeführt werden, ist die Rechenleistung des Mikrocontrollers zweitrangig.

Diese Anforderungen treffen auf fast jeden Mikrocontroller der heutigen Generation zu. Wegen vorhandenem Know-How sowie Entwicklungswerkzeugen fällt die Wahl hier auf einen ATmega88PA von Atmel Corporation (Atmel Corp, 2013). Er ist einer der günstigsten Controller der ATmega-Serie. Er besitzt 8 Kbyte Flash Speicher, 1 KByte RAM, ein UART Interface, ein 10 Bit ADC, so wie genug freie Pins um einige Zusatzfunktionen zu realisieren. Zusätzlich stehen umfangreiche Stromsparmodi zur Verfügung. Abbildung 51 zeigt die Verschaltung des Mikrocontrollers.

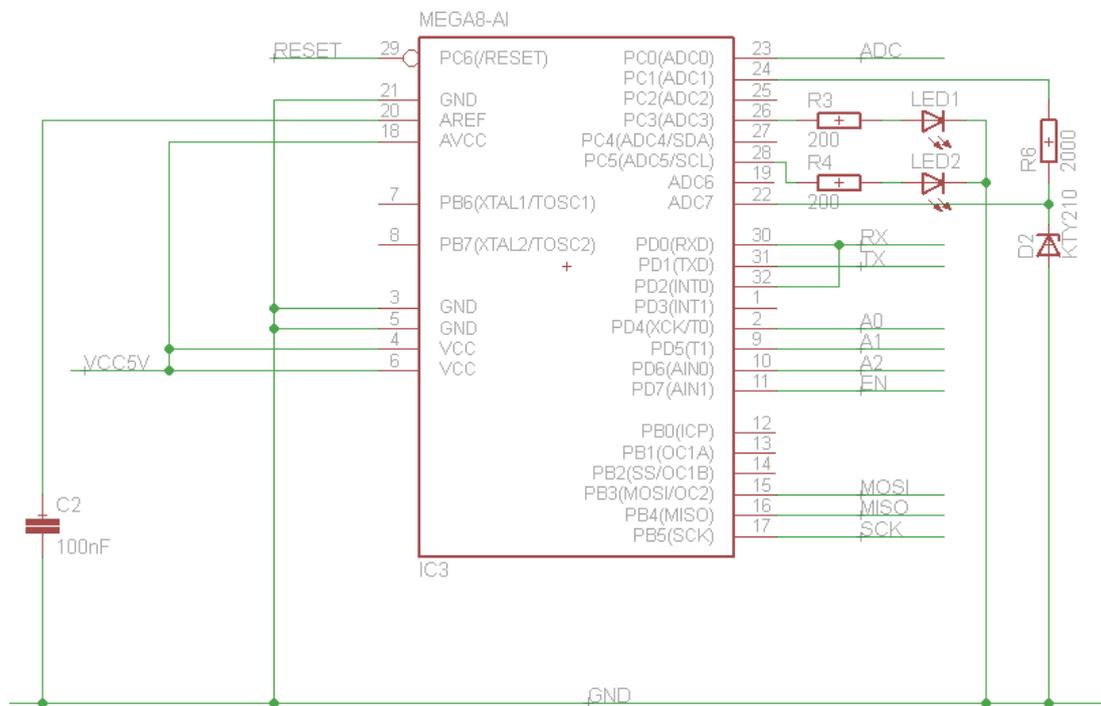


Abbildung 51: Verschaltung des Mikrocontrollers

Die angeschlossenen Pins lassen sich dabei in folgende Kategorien einteilen:

Funktion	Pins	
Multiplexer Ansteuerung	PD4 <-> A0 PD5 <-> A1 PD6 <-> A2 PD7 <-> EN	Pins zur Ansteuerung der Multiplexer
Analog Digital Wandler	PC0	Anschluss der Multiplexer an den ADC
Kommunikation	PD0 <-> RX PD1 <-> TX PD2 <-> RX	Pins zur Kommunikation RX wurde zusätzlich mit dem Interrupt Pin INTO verbunden, um den Controller über die Kommunikationsleitung aus dem Schlafmodus wecken zu können
Zusatzfunktion Temperatur	PC1	KTY210 Temperatursensor zum Überwachen der Akkutemperatur. Der interne Temperatursensor des Atmega88PA ist zu ungenau
Zusatzfunktion LED	PC3 <-> LED1 PC5 <-> LED2	LEDs zur Anzeige der Aktivität des BMS
Programmierung	PB3 <-> MOSI PB4 <-> MISO PB5 <-> SCK PC6 <-> RESET	Pins zur Programmierung des Controllers
Stromversorgung	VCC AVCC AREF GND	Stromversorgung des Mikrocontrollers

5.2.2 KOMMUNIKATION

Zur Kommunikation wird wie in Abschnitt 4.3 vorgeschlagen, ein Optokoppler in Verbindung mit der UART-Schnittstelle des Mikrocontrollers verwendet. Abbildung 52 zeigt die konkrete Realisierung.

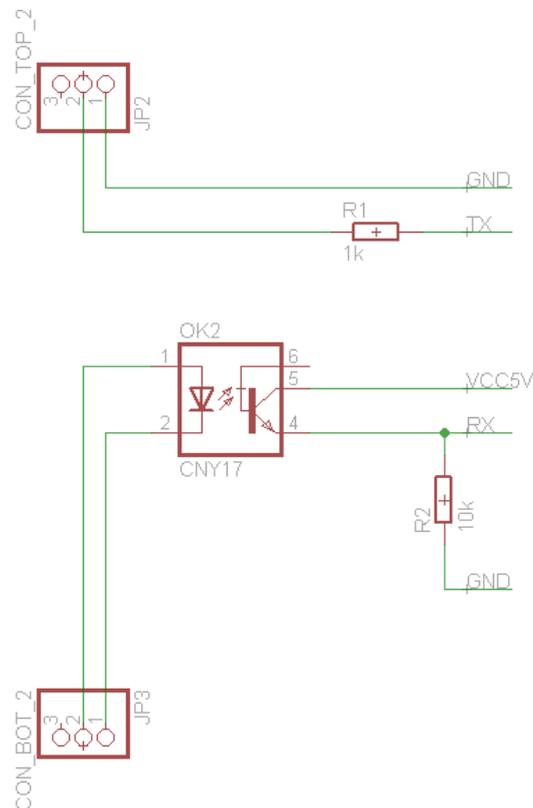


Abbildung 52: Entkopplung der UART-Schnittstelle

Pro BMS-Modul werden ein Optokoppler und zwei Widerstände benötigt. Das TX-Signal des BMS[n-1] liegt am Stecker JP3 an und ist an die LED des Optokopplers OK2 angeschlossen. Ist das TX-Signal des BMS[n-1] auf „high“ geschaltet, leuchtet die LED und zieht das RX-Signal des BMS[n] auf „high“. Ist das TX-Signal auf „low“ geschaltet, leuchtet die LED nicht und der Pull-down-Widerstand R2 zieht das RX-Signal auf „low“. Zur Kommunikation von BMS[n] mit BMS[n+1] ist das TX-Signal des BMS[n] über einen Widerstand mit dem Stecker JP2 verbunden. Der Widerstand R1 wird benötigt, um den Stromfluss durch die LED zu begrenzen.

Der Widerstand R1 wird durch den Optokoppler bestimmt. Damit dieser problemlos arbeitet, müssen 5 mA durch seine LED fließen. Bei einer Ansteuerungsspannung von 5 Volt ergibt sich also ein Widerstand von 1 kOhm.

Der Widerstand R2 hingegen lässt sich nur schwer bestimmen. Wird er zu groß oder zu klein gewählt, begrenzt er unnötig die Übertragungsrate. Um R2 zu ermitteln, wurden zwei BMS in Reihe verschaltet und bekannte Daten bei verschiedenen R2 und Baudraten übermittelt. Die maximalen Baudraten, bei der keine Fehlübertragungen entstehen, lassen sich Tabelle 12 entnehmen.

Widerstand R2	Maximale fehlerfreie Baudrate
10 kOhm	9600
4,7 kOhm	56700
1 kOhm	115200

Tabelle 12: Maximale Baudrate in Abhängigkeit des Widerstands R2

Bei $R2 = 1 \text{ k}\Omega$ ist also eine maximale Übertragungsrate von 115.200 Baud möglich. Ein kleinerer Widerstand wurde nicht getestet, da ohnehin keine höhere Übertragungsrate möglich ist (siehe Abschnitt 5.4.4).

Durch diesen Aufbau ist es möglich, Informationen vom BMS[n-1] zum BMS[n] und darüber hinaus zu übertragen. Damit auch Informationen in die andere Richtung fließen können, wird das ganze System wie in Abbildung 53 dargestellt in einem Ring verschaltet.

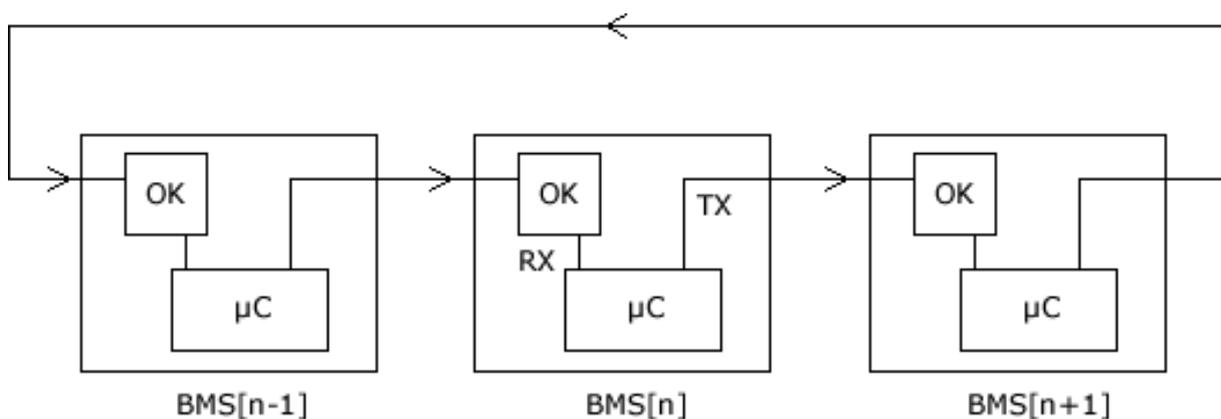


Abbildung 53: Ringverschaltung der BMS

Jedes BMS-Modul schickt sein Wissen über die vorherigen BMS an das nachfolgende BMS weiter.

Um mit externen Systemen Daten abgreifen zu können, muss lediglich das TX-Signal des untersten BMS abgegriffen werden. Durch die Ringstruktur können so alle Daten mitgelesen werden. Sollen auch Daten wie beispielsweise eine neue Konfiguration des BMS geschrieben werden, muss ein Mikrocontroller zwischen das TX-Signal des ersten BMS und den Optokoppler des zweiten BMS geschaltet werden, der alle empfangenen Daten so wie eventuelle externe Daten weiter schickt. In beiden Fällen ist es nötig, dass das Daten abgreifende System/Mikrocontroller mit dem Ground-Pegel der ersten Zelle im Akkupack arbeitet.

Damit im späteren Betrieb der Stromverbrauch möglichst gering gehalten wird, muss außerdem darauf geachtet werden, dass das TX-Signal nicht permanent auf „high“ steht, so dass die LED des Optokopplers nicht dauerhaft leuchtet.

Für die konkrete Softwarerealisierung siehe Abschnitt 5.4.4.

5.2.3 STROMVERSORGUNG

Während die Multiplexer direkt von der 25 Volt Akkuspannung versorgt werden können, benötigt der Mikrocontroller eine stabilisierte Spannung von genau 5 Volt. Dies ist wichtig, um zum einen den fehlerfreien Betrieb des Mikrocontrollers sicherstellen zu können und zum anderen werden die 5 Volt als Referenzspannung für den ADC verwendet. Damit mehrere zusammengeschaltete BMS-

Module mit der gleichen Referenzspannung arbeiten, sollten die 5 Volt auf jedem Modul möglichst genau erreicht werden. Da der Stromverbrauch des Mikrocontrollers sehr gering ist, und im Betrieb kaum Schwankungen unterliegt, eignet sich hierfür ein einfacher Festspannungsregler, wie Abbildung 54 in dargestellt.

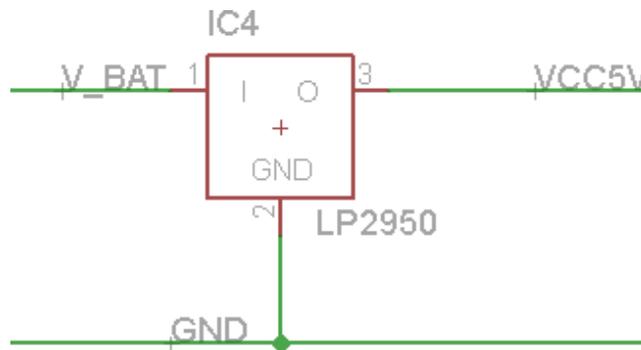


Abbildung 54: Stromversorgung des Mikrocontrollers mit LP2950

Beim LP2950 (Texas Instruments, LP2950) handelt es sich um einen einfachen 5 Volt Festspannungsregler mit maximal 100 mA Ausgangsstrom. Er besitzt einen Spannungseingang, an dem Spannungen von 5,15 bis 30 Volt angelegt werden können, sowie einen Transistorstabilisierten 5 Volt Ausgang. Die maximale Schwankung der Ausgangsspannung beträgt laut Datenblatt 0,3%. Der Eingang wird direkt mit der sechsten und obersten Zelle des Akkus verbunden, der Ausgang direkt mit den Stromversorgungspins des Mikrocontrollers.

Bei der Auswahl des Spannungsreglers lagen insbesondere Preis und Eigenstromverbrauch im Fokus. Standard-Spannungsregler wie beispielsweise der LM2905 verbrauchen einige mA allein für den Betrieb ohne Last, können also wegen des „geringen Stromverbrauch“- Ziels nicht verwendet werden. Es existieren viele Festspannungsregler mit einigen μA Ruhestromverbrauch (LTC1844, ADP3367), allerdings kosten diese teilweise mehr als alle Bauteile des BMS-Modul selbst und besitzen nur eine geringe Spannungsfestigkeit von maximal 15 Volt, können also bei Akkuspannungen von bis zu 25,2 Volt nicht verwendet werden. Einzig der LP2950 kostet kaum mehr als ein LM2905 (Handelsüblicher Festspannungsregler, ca. 0,50€). Dieser Spannungsregler hat einen Ruhestromverbrauch von nur $75\mu\text{A}$ und eine Spannungsfestigkeit von 30 Volt.

Während der Entwicklung wurde auch die Verwendung eines Schaltreglers in Erwägung gezogen. Bei Schaltreglern wird die Spannung mit Hilfe von Spulen heruntertransformiert, anstatt wie beim LP2950 mit Transistoren unter hohen Verlusten heruntergeteilt. Bei der Wandlung von 25 auf 5 Volt werden beim LP2950 ca. 20 Volt in Wärme umgewandelt, der Wirkungsgrad liegt also höchstens bei 20%. Selbst Abwärtswandler mit schlechtem Design erreichen weit über 50% Wirkungsgrad. Allerdings zeigte sich nach einiger Recherche, dass Abwärtswandler mit geringem Ruhestromverbrauch noch viel teurer als äquivalente Festspannungsregler sind und auch nicht die benötigte Spannungsfestigkeit von 25 Volt bieten (LTC3620, ADP1111).

5.2.4 LEITERPLATTENLAYOUT

Das Leiterplattenlayout wurde so kompakt wie möglich gehalten. Die Größe beträgt lediglich 40 x 25 mm und ist damit wesentlich kleiner als geplant. Abbildung 55 zeigt den Aufbau der Leiterplatte. Die gelben Rechtecke markieren die beiden Akku Anschlüsse, die grünen Rechtecke die Anschlüsse zur Kommunikation der BMS. Sie sind so positioniert, dass die Leiterplatten hintereinander gestapelt

werden können und so ein Großteil des Kommunikationswegs durch Ineinanderstecken entsteht. Die Akkupacks können dann ohne Platzprobleme seitlich in die Leiterplatten eingesteckt werden.

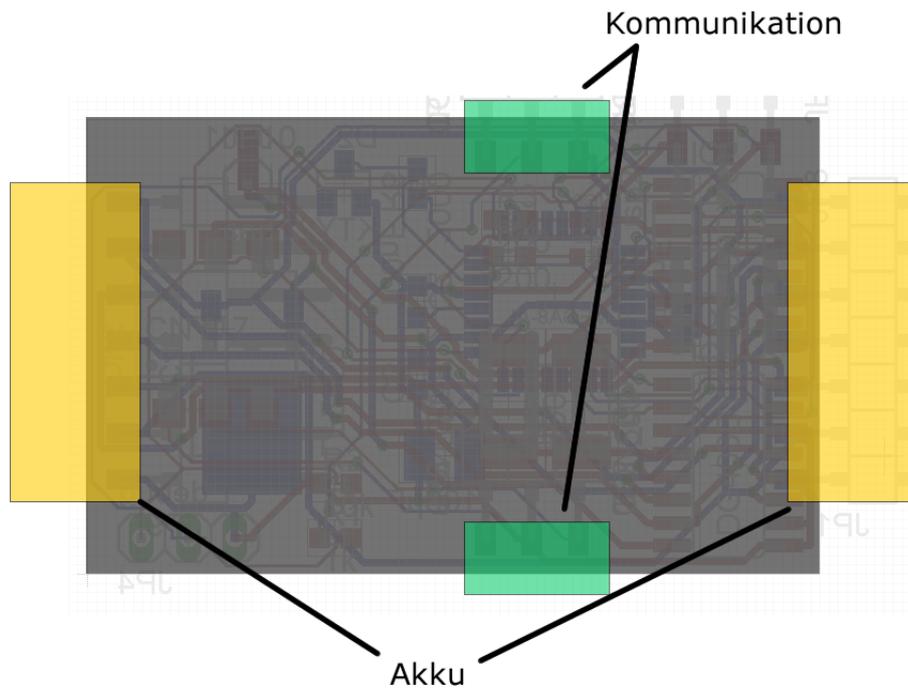


Abbildung 55: Platzierung der Steckverbinder auf der Leiterplatte

5.2.5 PROBLEM BEIM BALANCIEREN

Prinzipiell funktionierte es zwar, den Kondensator mit Hilfe der Multiplexer zwischen den Zellen hin und her zu schalten und Ladung zu transferieren, allerdings sind dabei nur sehr geringe Ströme geflossen. Dies ist auf den geringen, aber dennoch signifikanten Innenwiderstand der Multiplexer zurückzuführen. Dieser beträgt bei einer Betriebsspannung von 25 Volt ca. 50 Ohm. Da immer beide Multiplexer beteiligt sind, beträgt der gesamte Widerstand ca. 100 Ohm. Herrscht zwischen Kondensator und Zelle ein noch relativ großer Spannungsunterschied von 0,1 Volt, können maximal 1 mA fließen. Dazu kommt, dass der Spannungsunterschied zwischen Zelle und Kondensator während der Ladung des Kondensators immer kleiner wird und somit der Strom immer geringer wird. Bedenkt man dann noch, dass der Strom einmal in den Kondensator geladen und auch wieder entladen werden muss, verringert sich der effektive Balancierstrom weiter um den Faktor 2. Im Endeffekt war der Balancierstrom also geringer als der angepeilte Ruhestromverbrauch von maximal 700µA, und damit nicht praktikabel.

Die einzige Möglichkeit den Balancierstrom zu erhöhen, stellt eine Vergrößerung des Spannungsunterschieds zwischen Zelle und Kondensator dar. Dies kann erreicht werden, indem der Kondensator nicht mehr von Zelle zu Zelle, sondern von mehreren Zellen zu einer Zelle geschaltet wird. Beim Ladevorgang des Kondensators wird dieser nicht wie geplant nur mit einer Zelle verbunden, sondern gleich mit zwei der in Serie verschalteten Zellen, wie in Abbildung 56 dargestellt. Dadurch lädt sich der Kondensator auf die doppelte Zellspannung von ca. 8,4 Volt. Beim Entladen wird der Kondensator dann wieder an eine einzelne Zelle angeschlossen, so dass der

Spannungsunterschied zwischen beiden Zellen immer mindestens 4,2 Volt beträgt. Dadurch erhöht sich der maximal mögliche Strom auf 42 mA.

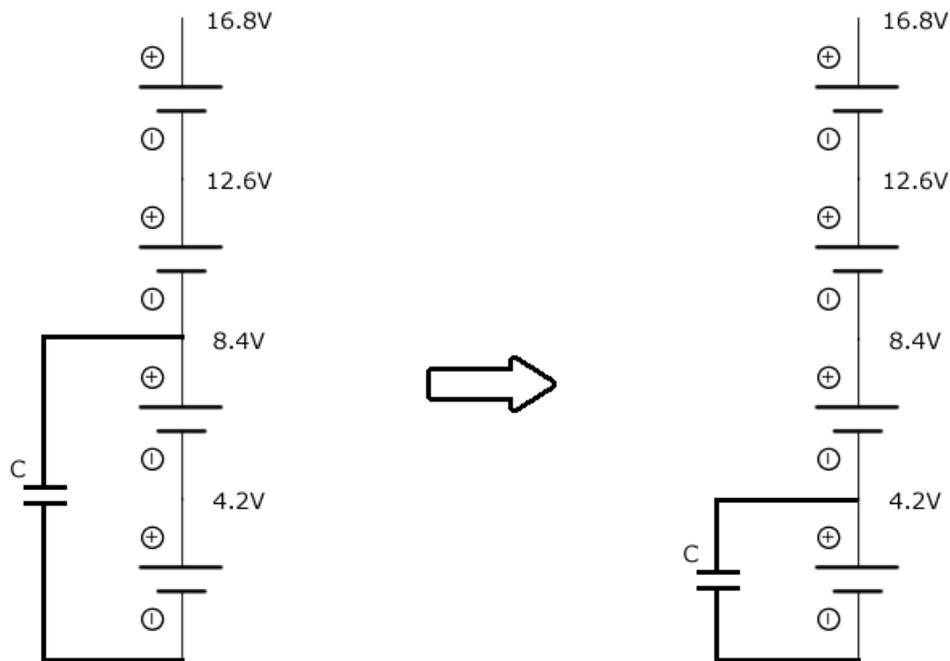


Abbildung 56: Kondensator über mehrere Zellen, Ladung links, Entladung rechts

Um diese Idee zu testen, wurde das BMS so modifiziert, dass die Multiplexer unabhängig voneinander angesteuert werden konnten. Allerdings zeigten sich sofort Probleme in Form von Hitzeentwicklung. Laut Datenblatt können die Multiplexer Ströme von 30mA mit bis zu 100mA Spitze ertragen. Die Spitzenströme von 42mA waren allerdings schon zu viel. Es war also nicht möglich den Balancierstrom auf diese Weise zu erhöhen.

5.3 HARDWARE VERSION 2

Da mit der ersten Hardware Version der angepeilte Balancierstrom von 42 mA nicht erreicht werden konnte, wurde eine zweite Hardware Version entwickelt, die folgende Änderungen enthält:

Um einen höheren Balancierstrom zu erreichen wurde anstatt der kapazitiven Balanciermethode die resistive Balanciermethode verwendet. Außerdem wurde aus Kosten- und Platzgründen der Optokoppler CNY17 durch den preiswerteren und kleineren LTV816 ersetzt. Der Kondensator C1, der zuvor zum Balancieren möglichst groß gewählt wurde, dient nun nur noch zum Messen der Zellspannungen. Um die Lade- und Entladezeit von C1 gering zu halten, sollte er so klein wie möglich gewählt werden. Der ADC des Atmega88 nutzt einen 10 pF großen Sample&Hold-Kondensator, um die zu messende Analogspannung zwischenspeichern. Damit sich die Spannung an C1 beim Laden des 10 pF Kondensators um weniger als 0,1% verändert, wird C1 um den Faktor 10.000 größer gewählt als der Kondensator des ADCs. C1 wird also auf 100nF verkleinert. Abschließend wurde das Leiterplattenlayout geringfügig an die neuen Bauteile angepasst.

5.3.1 BALANCIEREN

Zum balancieren wird bei der zweiten Hardware Version die Ladungsaustausch-Methode nach Abschnitt 4.2.1 verwendet. Gründe hierfür sind die geringe Anzahl der benötigten Bauteile und damit der geringe Platzverbrauch auf der Platine, so wie der damit verbundene geringere Fertigungsaufwand und natürlich der größere Balancierstrom. Der Balancierstrom wird im Wesentlichen vom Widerstand R13 (Abbildung 57) bestimmt und nur durch das thermische Limit des Widerstands begrenzt. Das thermische Limit wird von der verwendeten Bauform des Widerstands vorgegeben und beträgt bei SMD-Widerständen mit 0603-Bauform ca. 0,1 Watt. Deswegen wird R13 im Gegensatz zu allen anderen Widerständen des BMS in der Bauform 1206 verbaut, die eine thermische Belastbarkeit von ca. 0,25 Watt bietet (Panasonic, 2008). Nach „ $P = U^2 : R$ “ ergibt sich mit $P = 0,25$ Watt und $U = 4,2$ Volt ein maximal möglicher Widerstand von 70 Ohm. Um das Limit nicht auszureizen, wird hier also ein 50 Ohm Widerstand gewählt. Dadurch ergibt sich ein maximaler Balancierstrom von 84 mA.

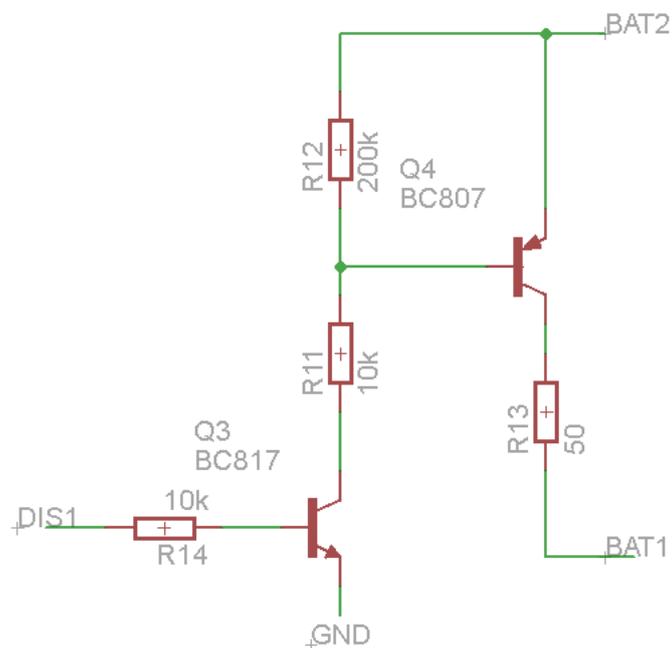


Abbildung 57: Resistives Balanciermodul

Da es sich bei den Transistoren nicht wie in Abschnitt 4.2.2 gezeigt um Feldeffekt-Transistoren, sondern um Bipolar-Transistoren handelt, muss zum Ansteuern keine Spannung anliegen. Es muss lediglich ein gewisser Strom durch die Basis fließen, wodurch sich die Berechnung der Widerstände R11 und R12 erschwert. Um diesen Schritt zu vereinfachen, wurde ein SPICE-Modell der Schaltung erstellt und diese dann so optimiert, dass der Transistor Q4 durchschaltet, aber gleichzeitig wenig Strom von BAT2 nach Ground fließt. Dies wurde für alle sechs Zellen wiederholt und so die entsprechenden Widerstände bestimmt.

Der Widerstand R14 begrenzt den Basisstrom des Transistors Q3 und wurde standardmäßig mit 10 kOhm gewählt.

5.3.2 LAYOUT

Das Layout hat sich nur geringfügig verändert. Um Platz für die neue Balancierhardware zu schaffen wurde die Platine auf 4,5 x 3 cm vergrößert und der Anschluss für den zweiten parallel angeschlossenen Akku entfernt.

5.4 SOFTWARE

Um eine spätere Erweiterung der Hardware auf sieben Zellen pro Platine zu vereinfachen, wurde die Software bereits auf sieben Zellen ausgelegt. Wird die Zellspannung einer nicht angeschlossenen Zelle gemessen, behält der Messkondensator die Spannung der zuvor gemessenen Zelle und die gemessene Spannung ist gleich der zuvor gemessenen Zellspannung. Somit haben nicht angeschlossene Zellen keinen Einfluss auf den Balancieralgorithmus.

5.4.1 HAUPTROUTINE

Die Software des BMS besteht im Wesentlichen aus 5 Teilen:

- Spannungen der einzelnen Zellen messen
- Ansteuerung der Balancierhardware
- Übermitteln der Zellspannungen
- Energiesparmodus
- Empfang von Nachrichten

Diese 5 Teile werden wie in folgender Abbildung dargestellt:

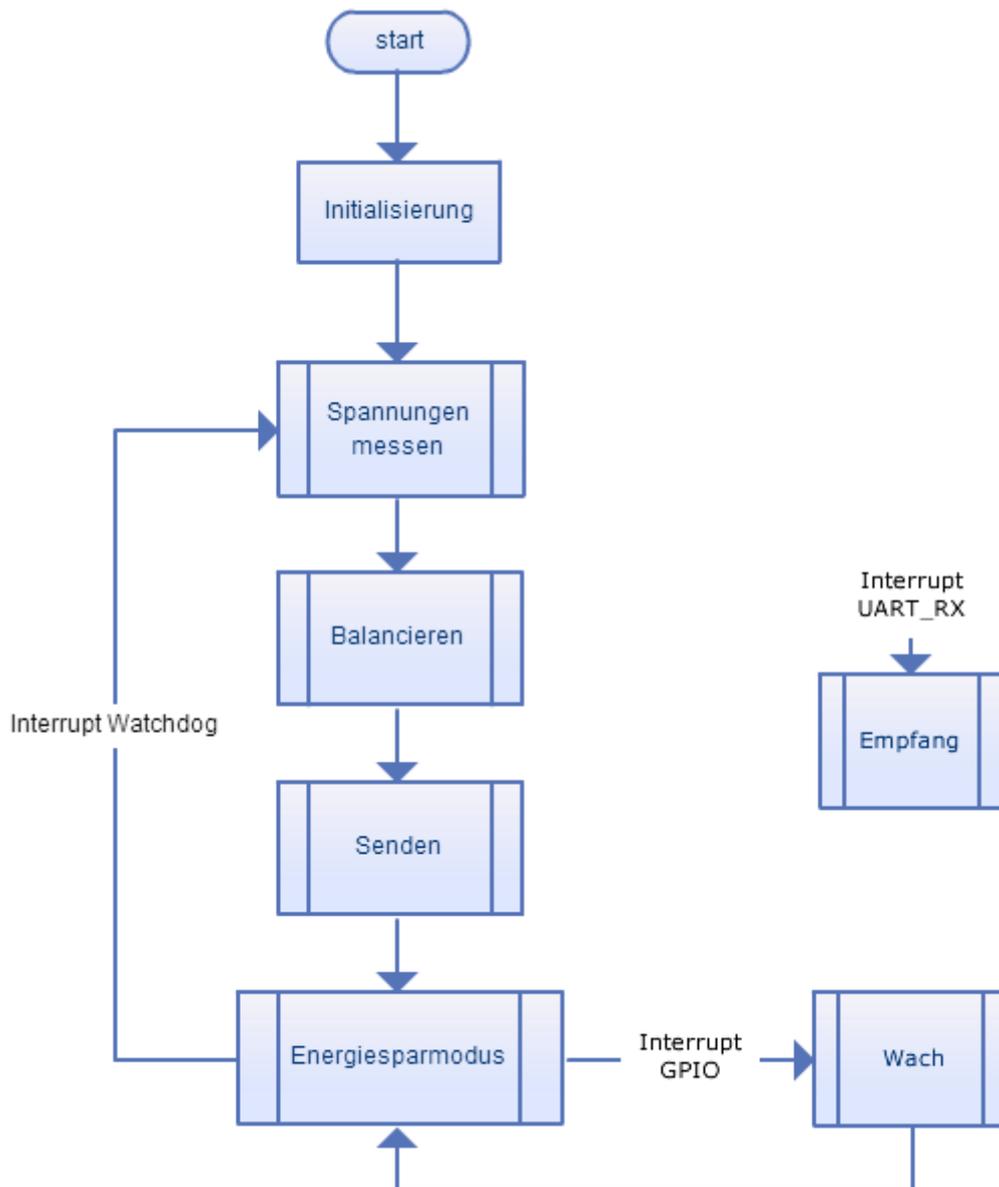


Abbildung 58: Programmablauf der Hauptroutine

Einmalig werden anfangs alle benötigten Komponenten und Variablen initialisiert. Dazu zählen beispielsweise der UART, der ADC, alle Pins und auch der Speicher der Messwerte.

Anschließend werden die Spannungen der einzelnen Zellen gemessen.

5.4.2 MESSEN DER ZELLSPANNUNGEN

Der Programmablauf beim Messen der Zellspannungen wird in Abbildung 59 dargestellt.

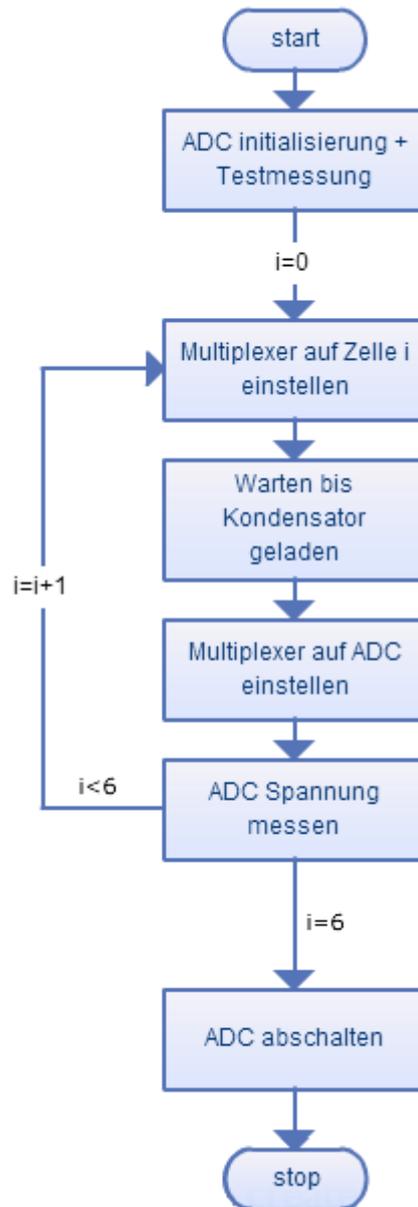


Abbildung 59: Programmablauf beim Messen der Zellspannungen

Zuerst wird der ADC aktiviert und initialisiert. Dies muss jedes Mal wiederholt werden, weil der ADC nach Beendigung der Messung wieder deaktiviert wird, so dass Strom gespart wird. Die erste ADC-Messung nach Aktivierung benötigt mehr Zeit als alle nachfolgenden Messungen. Um Messunterschiede zu vermeiden wird die erste Messung verworfen.

Anschließend werden die Multiplexer auf die zu messende Zelle eingestellt und der Kondensator lädt sich auf die Zellspannung auf. Die Zeitkonstante der Schaltung beträgt $T = R \cdot C = 100\text{Ohm} \cdot 100\text{nF} = 10 \mu\text{s}$ ($100\text{Ohm} = \text{Doppelter Innenwiderstand der Multiplexer}$). Nach fünf Zeitkonstanten, also $50 \mu\text{s}$, hat der Kondensator 99% seiner Endspannung erreicht. Wegen Bauteiltoleranzen und sonstiger Unsicherheiten wird hier sicherheitshalber $80 \mu\text{s}$ gewartet.

Danach werden die Multiplexer so eingestellt, dass die Kondensatorspannung am ADC anliegt. Die Spannung wird mit einem ADC-Takt von 500 kHz gemessen und abgespeichert. Der ADC des

Atmega88 könnte zwar noch schneller betrieben werden, allerdings würde sich dadurch die Messauflösung verringern. Dieser Vorgang wird für alle sieben Zellen wiederholt.

Abschließend wird der ADC wieder deaktiviert.

5.4.3 BALANCIEREN

Nachdem die Zellspannungen gemessen wurden, werden die Zellen balanciert. Dies geschieht wie in Abbildung 60 dargestellt.

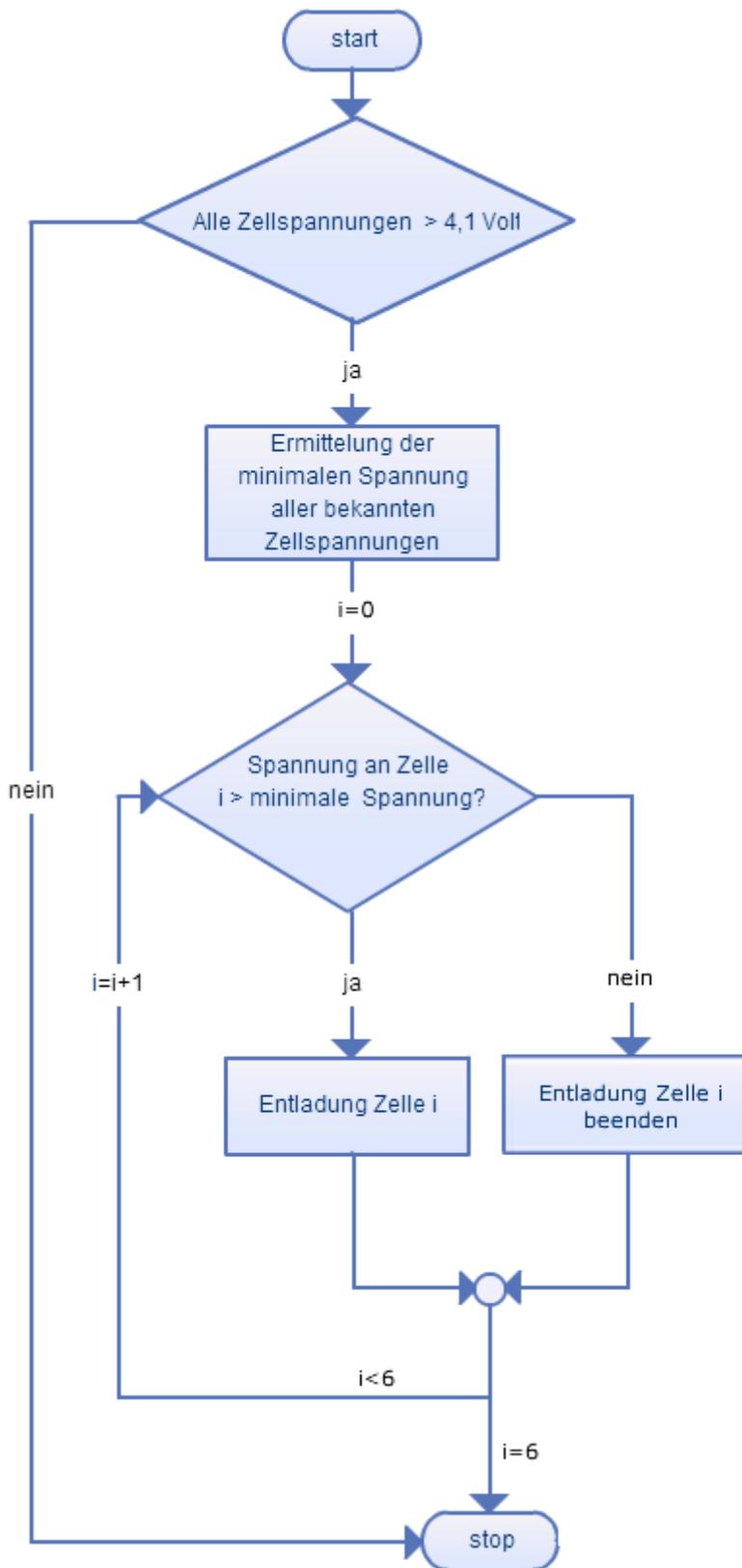


Abbildung 60: Programmablauf Balancieren

Zuerst wird überprüft ob alle direkt am BMS anliegenden Zellspannungen größer als 4,1 Volt sind. Ist dies nicht der Fall findet keine Balancierung statt, denn die Zellen sollen nur Top-balanciert werden (siehe Abschnitt 3.2.1).

Anschließend wird aus allen bekannten Zellspannungen die minimale Zellspannung ermittelt. Dabei werden nicht nur die Spannungen der direkt angeschlossenen Zellen, sondern auch die Spannungen aller am BMS-System angeschlossenen Zellen, die durch die stetige Kommunikation vorliegen, mit einbezogen. Dies stellt sicher, dass alle im System befindlichen Zellen auf die gleiche Spannung balanciert werden.

Daraufhin wird für jede direkt angeschlossene Zelle entschieden, ob ihre Spannung höher als die minimale bekannte Zellspannung ist. Ist die Spannung höher, wird die Entlade-Hardware für diese Zelle aktiviert. Ist sie geringer, wird die Entlade-Hardware deaktiviert.

5.4.4 KOMMUNIKATION

Die Kommunikation dient zum Übertragen der Zellspannungen zwischen den einzelnen BMS-Modulen und optionalerweise auch mit externen Systemen.

Durch die besonderen Anforderungen und Gegebenheiten müssen zuerst einige grundlegenden Kommunikationsdetails geklärt werden, bevor auf die eigentlichen Softwareroutinen eingegangen werden kann.

Datenrate

Damit der Stromverbrauch während der Kommunikation gering ausfällt, sollte die Datenrate so hoch wie möglich gewählt werden, so dass der Mikrocontroller die Daten in kürzester Zeit übertragen und anschließend wieder in den Energiesparmodus übergehen kann. Durch die Verwendung von Optokopplern und Widerständen in den Kommunikationsleitungen wird die Datenrate nach oben begrenzt. Der Optokoppler besitzt Signal- Steig- und Fallzeiten von ca. 5 μ s. Die Signalleitung benötigt also mindestens 5 μ s, um vom niedrigen Pegel auf den hohen Pegel zu schalten. Daraus ergibt sich eine maximal erreichbare Bitrate von ungefähr 200.000 Bits/Sekunde. Aus Kompatibilitätsgründen wird die nächste darunterliegende und typische Bitrate von 115.200 Bits/Sekunde gewählt.

Wecksignal

Wenn Daten an das nachfolgende BMS verschickt werden sollen, ist es sehr wahrscheinlich, dass dieses zu diesem Zeitpunkt im Energiesparmodus ist. Damit das BMS Daten empfangen kann, muss es also zuerst aus dem Energiesparmodus geweckt werden. Dies wird erreicht, indem der UART-Transmitter des sendenden BMS aktiviert wird, wodurch das TX-Signal automatisch auf „high“ gezogen wird. Durch die steigende Flanke wird das empfangende BMS über den GPIO-Interrupt geweckt (siehe unten). Anschließend muss gewartet werden, bis das empfangende BMS vollständig aufgewacht ist und dessen UART-Hardware wieder aktiviert hat. Die Wartezeit setzt sich aus vier Taktzyklen reiner Aufwachzeit sowie vier Zyklen Konfigurationszeit zusammen. Nach acht Taktzyklen Wartezeit wird das Datenpaket schlussendlich übermittelt.

Datenpaket

Das Datenpaket selbst besteht aus drei Teilen wie in Tabelle 13 dargestellt.

Paketstart	Länge	Pakettyp	Daten	Prüfsumme
55 55 55 55 55	0-3F	01	XX	XX

Tabelle 13: Aufbau eines Datenpakets

Es besteht aus:

- Der physikalischen Schicht:
 - Einem 5 Byte langen Paketstart, zur Signalisierung eines neuen Paketstarts
- Der Transportschicht:
 - Länge: Zur Vereinfachung der Empfangsroutine und Datenintegritätsprüfung
 - Pakettyt: Um verschiedenartige Daten übermitteln zu können
 - Prüfsumme: Die Summe aller Bytes des Pakets ohne Wecksignal und Paketstart, zur Datenintegritätsprüfung
- Der Anwendungsschicht:
 - Die zu übertragenden Daten selbst

Durch das *Paket Typ* Feld ist es möglich, unterschiedliche Daten zwischen den BMS auszutauschen. In der derzeitigen Software Version wird dies allerdings noch nicht genutzt, so dass der *Paket Typ* immer gleich 0x01 ist.

Bei dem Datenpaket mit dem Typ 0x01 handelt es sich um das Spannungsübermittlungs-Paket. Je nachdem, wie viele andere BMS dem Absender-BMS bekannt sind, beinhaltet es mehrere Datensätze, wie in Tabelle 14 dargestellt.

Datensatz BMS 0	Datensatz BMS 1	Datensatz BMS 2	Datensatz BMS 3
-----------------	-----------------	-----------------	-----------------

Tabelle 14: Zusammensetzung des Datenpakets 0x01

Diese einzelnen Datensätze setzen sich jeweils aus folgenden Daten zusammen.

BMS ID	Status	Zelle 0	...	Zelle 6	Temperatur
00-04	00-03	0000-13FF	...	0000-13FF	00-80

Tabelle 15: Zusammensetzung des Datenpakets 0x01

- BMS ID: Die ID des BMS, dessen Zellspannungen im Datensatz enthalten sind
- Status: Der Status des BMS, derzeit noch ungenutzt
- Zelle 0 – Zelle 6: Die einzelnen Zellspannungen
- Temperatur: Der Messwert des Temperatursensors

Adressierung

Damit jedes BMS im System identifiziert werden kann, ist es nötig, dass eine eindeutige Adressierung vorliegt. Um dies zu erreichen gibt es 2 Möglichkeiten:

- Automatische Adressierung
- Manuelle Adressierung

Da manuelle Adressierung sehr aufwendig und umständlich ist, wurde lange über eine automatische Adressierung nachgedacht. Wie sich herausstelle, handelt es sich bei der automatischen Adressierung wegen nachfolgenden Punkten um ein sehr komplexes Problem:

- Durch die Ringstruktur ist die Kommunikationsfähigkeit ohne eindeutige Adressierung sehr eingeschränkt

- Auf dem Mikrocontroller können, wegen nicht vorhandenem Rauschen des ADC, nur schlechte Zufallszahlen generiert werden
- Die Adressierung darf keine Kollisionen enthalten, da sonst Teile des Akkupacks bei der Gesamtbalancierung nicht beachtet werden würden

Insbesondere die Kollisionsfreiheit macht im Zusammenhang mit der Ringstruktur große Probleme. Es ist, falls überhaupt, nur schwer möglich diese zu garantieren.

Aus diesem Grund wird vorerst auf die automatische Adressierung verzichtet. Da der Atmega88 werksseitig keine eindeutigen IDs in seinem Speicher einprogrammiert hat, muss jedes BMS-Modul also per Hand mit einer eigenen ID versehen werden.

Die Kommunikationsroutine teilt sich in Sende- und Empfangsroutine, die im Folgenden genauer erläutert werden.

5.4.4.1 SENDERROUTINE

Beim Senden von Datenpaketen wird nach folgender Softwareroutine vorgegangen.



Abbildung 61: Softwareablauf beim Senden von Daten

Zuerst wird der UART-Transmitter aktiviert. Anschließend wird gewartet bis das empfangende BMS vollständig aufgewacht ist. Daraufhin wird das Datenpaket verschickt und der UART-Transmitter wieder deaktiviert. Die Aktivierung und Deaktivierung des Transmitters muss durchgeführt werden, weil der Signalpegel des TX-Pins immer „high“ ist, während keine Übertragung stattfindet. Würde

man den Transmitter nicht deaktivieren, würde so die LED des Optokopplers dauerhaft leuchten und Strom verbrauchen, obwohl keine Daten übertragen werden. Außerdem würde das nachfolgende BMS dauerhaft aus seinem Energiesparmodus geweckt werden.

5.4.4.2 EMPFANGSRoutine

Beim Empfang von Datenpaketen wird nach folgender Softwareroutine vorgegangen.

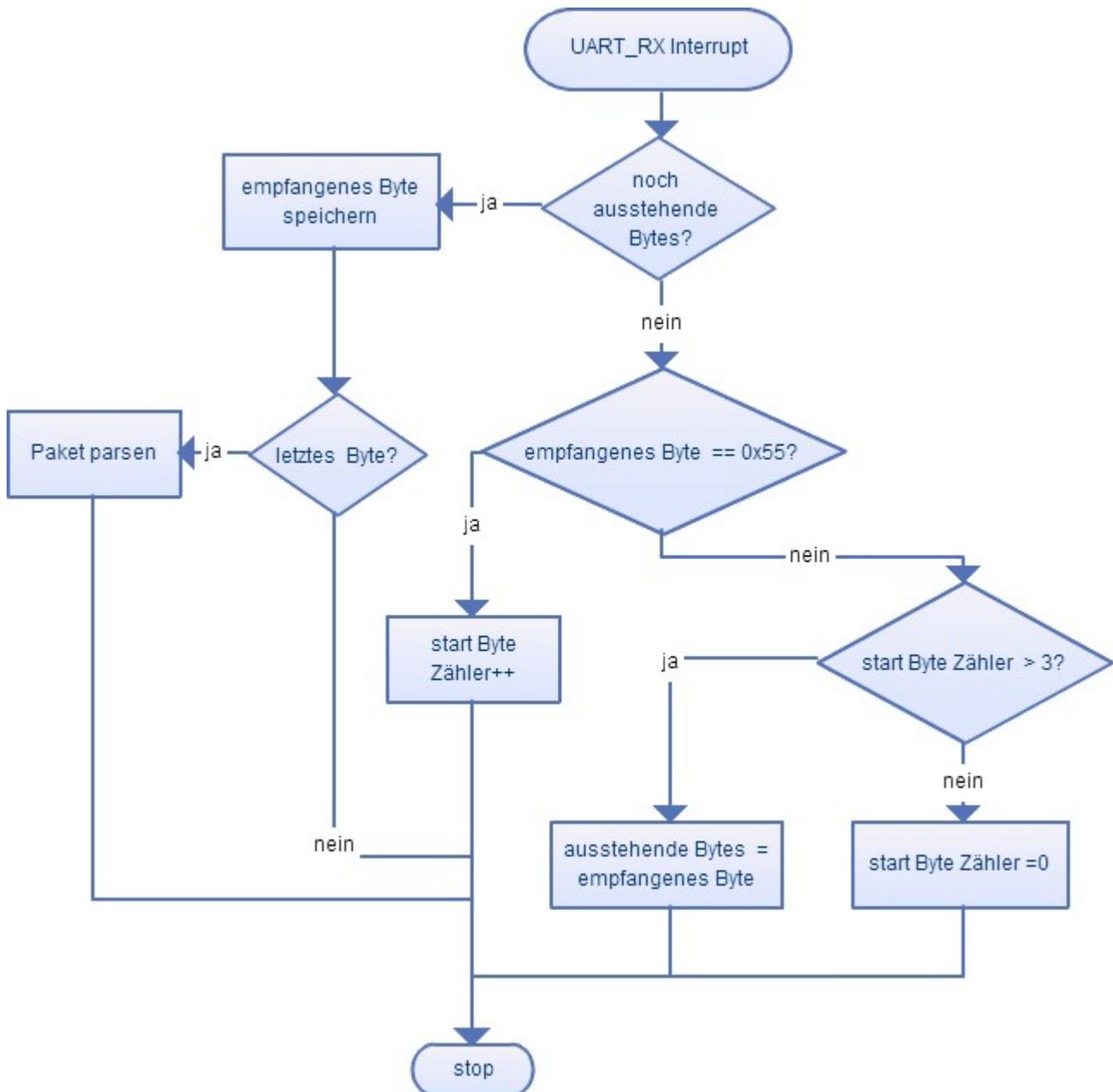


Abbildung 62: Softwareablauf beim Empfangen von Daten

Immer wenn der UART erfolgreich ein Byte empfangen hat, wird die *UART_RX*-Interrupt-Routine ausgeführt. Diese dient im wesentlichen dazu den Paketstart zu erkennen.

Wird ein Byte empfangen, wird zuerst geprüft, ob dem voran gegangenen Datenpaket noch Bytes fehlen. Ist dies der Fall, wird das Byte gespeichert und geprüft ob es sich um das letzte Byte des Pakets handelt. Ist es das letzte, wird das Paket geparsed und dann in beiden Fällen die Empfangsroutine beendet.

Fehlen allerdings keine Bytes des voran gegangenen Datenpakets, wird geprüft ob es sich um das Paket-Startbyte `0x55` handelt. Ist dies der Fall, wird der Paket-Startbyte-Zähler um eins erhöht. Wird dann das erste Byte, welches nicht `0x55` ist, empfangen, wird geprüft ob bereits mehr als drei Startbytes eingegangen sind. Ist dies der Fall, handelt es sich bei dem eingegangenen Byte um das erste Byte des Pakets, welches die Länge des Pakets angibt. Die Anzahl der ausstehenden Bytes wird auf die Länge des Pakets gesetzt. Wurden hingegen nicht mehr als drei Startbytes empfangen, wird der Startbyte-Zähler zurück gesetzt und auf den nächsten Paketstart gewartet.

Damit diese Routine funktioniert, muss sich das erste Byte des Pakets, also die Länge, vom Paket-Startbyte unterscheiden. Durch die geringe Größe der Datenpuffer im Mikrocontroller, ist die maximale Paketlänge aber ohnehin auf 64 Byte begrenzt und kann somit nicht den Wert `0x55` annehmen.

5.4.5 ENERGIESPARMODUS

Der Energiesparmodus ist neben dem Balancieren der wichtigste und sogleich komplizierteste Teil der Software. Dies liegt daran, dass nicht nur der Energieverbrauch minimiert werden muss, sondern die Kommunikation auch weiterhin funktionieren soll. Befindet sich der Mikrocontroller im Energiesparmodus, muss sichergestellt sein, dass weiterhin Nachrichten der anderen BMS empfangen werden können. Dies wird mit dem Programmablauf wie in Abbildung 63 dargestellt, erreicht.

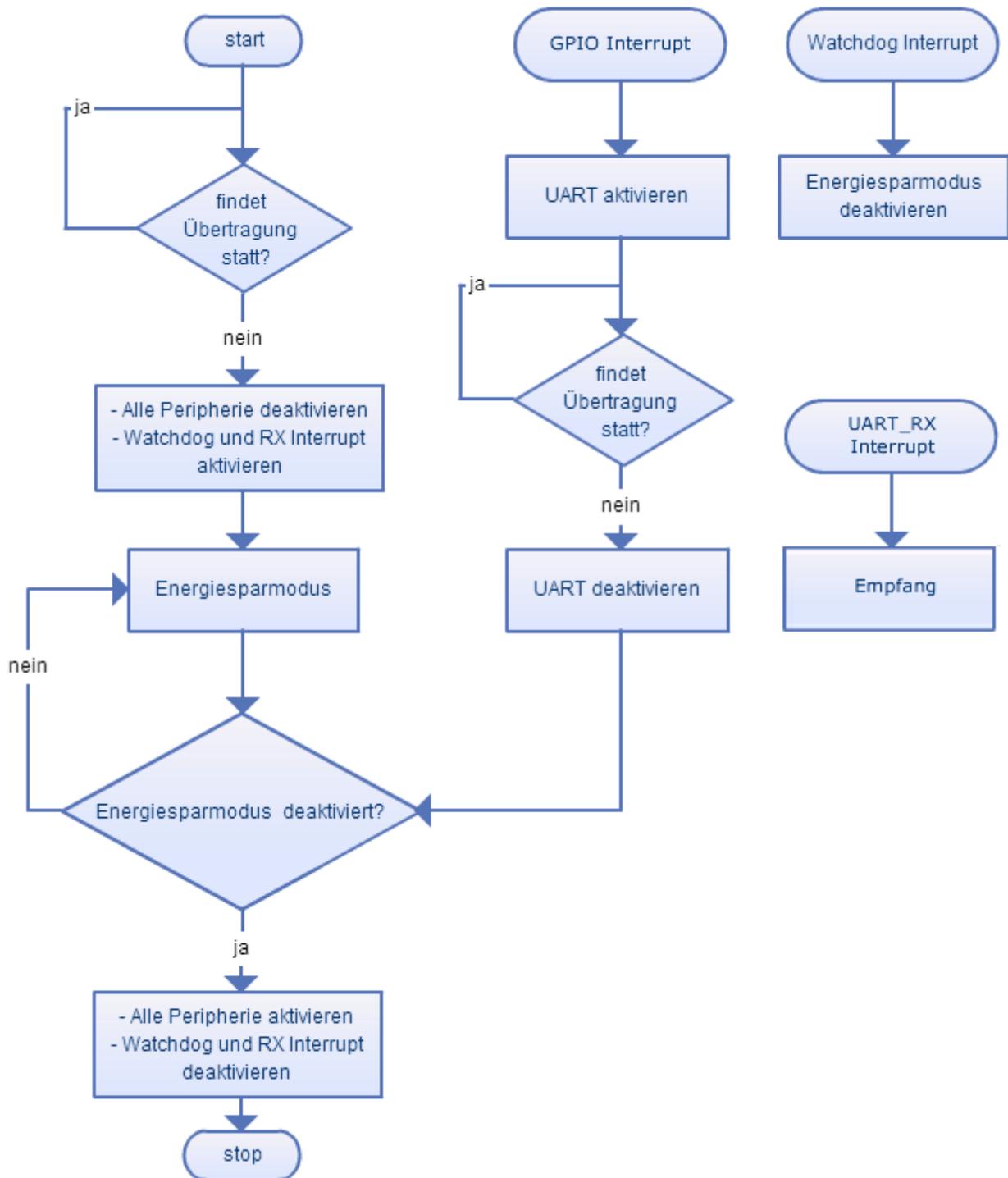


Abbildung 63: Programmablauf zur Steuerung des Energiesparmodus

Generell findet vor dem Eintreten in den Energiesparmodus immer eine Prüfung statt, ob gerade eine Nachricht von einem anderen BMS empfangen wird. Ist dies nicht der Fall, oder wurde die Nachricht komplett übertragen, wird die gesamte Peripherie wie UART und ADC komplett deaktiviert.

Daraufhin wird der *Watchdog*-Timer und *GPIO*-Interrupt aktiviert und der Mikrocontroller in den Energiesparmodus versetzt.

Nach Ablauf des *Watchdog*-Timers wird der Mikrocontroller durch den *Watchdog*-Interrupt aus dem Energiesparmodus geweckt und der Programmablauf wird fortgesetzt.

Die gesamte Peripherie wird wieder aktiviert, sowie *Watchdog*-Timer und *GPIO*-Interrupt deaktiviert.

Geht nun während sich der Mikrocontroller im Energiesparmodus befindet eine Nachricht ein, wird dieser durch den *GPIO*-Interrupt geweckt, wodurch er den UART aktivieren kann und wieder Daten empfangen werden können. Anschließend wird wieder gewartet bis die Übertragung abgeschlossen ist und draufhin in Abhängigkeit davon, ob der Energiesparmodus noch aktiviert ist, oder bereits vom *Watchdog*-Interrupt deaktiviert wurde, der Mikrocontroller in den Energiesparmodus versetzt beziehungsweise der Programmablauf fortgesetzt.

5.4.5.1 IMPLEMENTIERUNGSDetails

Überprüfung ob Übertragung stattfindet

Bei jedem komplett empfangenen Byte setzt die UART-Empfangsroutine einen Zähler auf seinen Maximalwert. Während der Energiesparmodus auf den Abschluss der Kommunikation wartet, dekrementiert er diesen Zähler kontinuierlich. Werden keine weiteren Bytes mehr empfangen, wird der Zähler nicht mehr erhöht und erreicht irgendwann den Zählerstand 0, der für die Energiesparmethode das Ende der Übertragung signalisiert. Alternativ wird der Zähler auch von der Empfangsroutine bei erfolgreichem Empfang eines Datenpakets direkt auf 0 gesetzt, so dass sofort wieder in den Energiesparmodus übergegangen werden kann.

Empfangs (GPIO) Interrupt

Da der UART im Energiesparmodus nicht funktionsfähig ist, wird hier neben dem *UART_RX*-Interrupt ein extra Interrupt benötigt. Dieser *GPIO*-Interrupt wird durch eine Pegeländerung des *RX*-Signals des UART ausgelöst und weckt den Mikrocontroller aus dem Energiesparmodus. Sobald dieser erwacht ist, wird der UART aktiviert und es können Daten empfangen werden. Besonders wichtig hierbei ist, dass nur der UART-Empfänger aktiviert wird. Würde man hier auch den UART-Sender mit aktivieren, hätte das eine Pegeländerung des *UART-TX*-Signals zur Folge, welches das nachfolgende BMS auch wecken würde.

GPIO-Interrupt und Watchdog-Interrupt

Um Deadlocks zu vermeiden, setzt der *Watchdog*-Interrupt lediglich einen Flag, der verhindert, dass der Mikrocontroller wieder in den Energiesparmodus übergehen kann, anstatt den Energiesparmodus nur zu deaktivieren. Da der *GPIO*-Interrupt durch den *Watchdog*-Interrupt unterbrochen werden kann, könnte es sonst zu einer Situation kommen, in der der *Watchdog* den Energiesparmodus deaktiviert, während im Hintergrund noch der *GPIO*-Interrupt aktiv ist. Dadurch würde der *GPIO*-Interrupt am Ende nicht erkennen, ob der *Watchdog* bereits den Energiesparmodus deaktiviert hat und den Mikrocontroller wieder in den Energiesparmodus versetzen. Da der *Watchdog*-Timer bereits gefeuert hätte, würde der Programmablauf mit Ausnahme neuer *GPIO*-Interrupts nicht weiter fortgesetzt werden. Durch das Setzen des Flags durch den *Watchdog*-Interrupt kann der Energiesparmodus nach Ausführung der *GPIO*-Interrupt-Routine nicht wieder betreten werden und ein Deadlock wird ausgeschlossen.

Bei der Überprüfung, ob der Flag gesetzt ist, sowie dem Eintritt in den Energiesparmodus, handelt es sich um eine atomare Operation, so dass ein Deadlock an dieser Stelle ausgeschlossen werden kann.

Energiesparmodus

Der Atmega88PA besitzt verschiedene Energiesparmodi, die bei unterschiedlichen Anforderungen eingesetzt werden können. Tabelle 16 zeigt alle verfügbare Energiesparmodi und die im jeweiligen Energiesparmodus betriebene Peripherie.

Sleep Mode	Active Clock Domains					Oscillators		Wake-up Sources							Software BOD Disable
	clk _{CPU}	clk _{FLASH}	clk _{IO}	clk _{ADC}	clk _{ASY}	Main Clock Source Enabled	Timer Oscillator Enabled	INT1, INT0 and Pin Change	TWI Address Match	Timer2	SPM/EEPROM Ready	ADC	WDT	Other I/O	
Idle			X	X	X	X	X ⁽²⁾	X	X	X	X	X	X	X	
ADC Noise Reduction				X	X	X	X ⁽²⁾	X ⁽³⁾	X	X ⁽²⁾	X	X	X		
Power-down								X ⁽³⁾	X				X		X
Power-save					X		X ⁽²⁾	X ⁽³⁾	X	X			X		X
Standby ⁽¹⁾						X		X ⁽³⁾	X				X		X
Extended Standby					X ⁽²⁾	X	X ⁽²⁾	X ⁽³⁾	X	X			X		X

Tabelle 16: Energiesparmodi des Atmega88PA, aus (Atmel Corp, 2013)

Ohne jeden einzelnen Punkt in der Tabelle verstehen zu müssen, erkennt man schnell, dass im Standby, Power-Down- und Power-Save-Modus die wenigste Peripherie aktiv ist. Dementsprechend ist hier die größte Energieeinsparung zu erwarten. Der Standby benötigt einen externen Taktgeber, der beim BMS nicht vorhanden ist. Er kann also nicht benutzt werden. Power-Down- und Power-Save-Modus wurden während der Entwicklung getestet und ergaben eine äquivalente Stromeinsparung. Da im Power-Save bei gleichem Stromverbrauch mehr Peripherie aktiv ist als beim Power-Down-Modus, wird der Power-Save-Modus als Energiesparmodus verwendet.

Ist der Energiesparmodus einmal aktiviert, kann er nur noch durch bestimmte Interrupts wieder beendet werden. Nach Auftreten eines Interrupts wird der Mikrocontroller geweckt und zuerst die zugehörige Interrupt-Routine ausgeführt. Anschließend wird die Programmausführung dort fortgesetzt, wo sie zuvor durch den Energiesparmodus unterbrochen wurde.

6 EVALUIERUNG

6.1 BALANCIEREN

Zur Evaluation der Balancierfähigkeit des BMS wurde aus zwei unterschiedlich geladenen 3-Zellen-Akkus „3S1P“ ein einzelner 6-Zellen-Akku „6S1P“ erstellt. Anschließend wurde dieser an das BMS-Modul angesteckt. Durch die Kommunikationsschnittstelle wurden die Zellspannungen über die Zeit ausgelesen. Zur Erstellung des Diagramms wurde die automatische Balancier-Abschaltgrenze von 4,1 Volt deaktiviert. Abbildung 64 zeigt das dabei entstandene Diagramm.

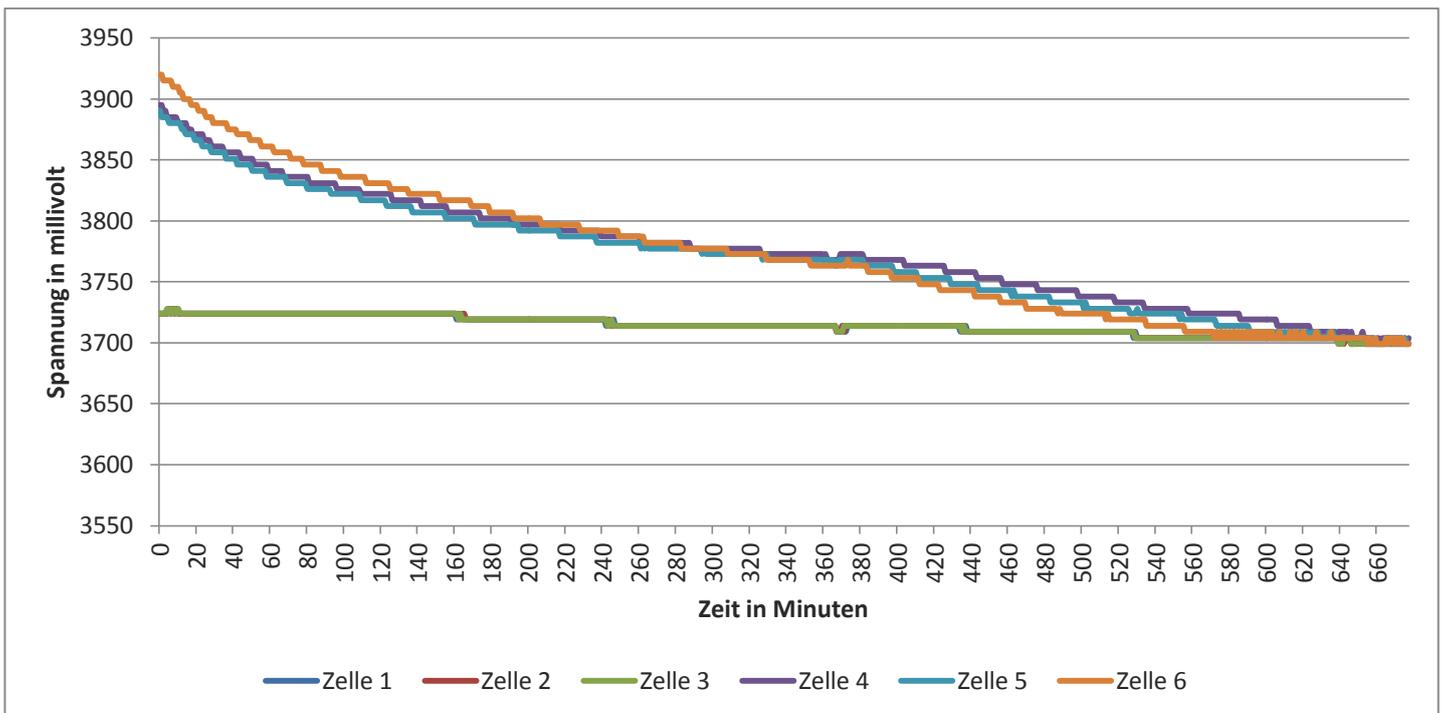


Abbildung 64: Verlauf der Zellspannungen beim balancieren

Man erkennt, dass anfangs jeweils drei Zellen die gleiche Spannung besitzen. Mit der Zeit werden die drei Zellen mit der höheren Spannung durch das BMS entladen und passen sich der Spannung der anderen drei Zellen an. Zum Ende hin besitzen alle Zellen die gleiche Spannung.

Nachdem der Balanciervorgang abgeschlossen war, wurden die einzelnen Zellen mit dem Handmultimeter nachgemessen. Tabelle 17 zeigt die Ergebnisse.

	laut BMS	Zelle 1	Zelle 2	Zelle 3	Zelle 4	Zelle 5	Zelle 6
Spannung (mV)	3699	3703	3701	3703	3713	3710	3720
Abweichung (mV)	0	4	2	4	14	11	21
Abweichung (%)	0.00	0.11	0.05	0.11	0.38	0.30	0.56

Tabelle 17: Spannungen nach dem Balanciervorgang

Laut BMS waren alle Spannungen auf 3699 mV angeglichen. Die Messung per Handmultimeter ergab eine maximale Abweichung von 21 mV bei Zelle 6. Dies entspricht einer Abweichung von nur 0,56%.

Da in diese Richtung keine konkreten Anforderungen gestellt wurden, liegt diese Abweichung voll im Rahmen.

6.2 KOMMUNIKATION

Zur Evaluierung der Kommunikation wurden zwei BMS-Module in einem Ring verschaltet und die Kommunikation zwischen erstem und zweitem Modul per Computer mitgelesen. Zuerst wurde das erste BMS (ID = 0) durch einen 6-Zellen-Akku mit Strom versorgt. Auf der Kommunikationsleitung konnte das Datenpaket „0x01“ im 8-Sekunden-Takt wie folgt mitgelesen werden:

BMS ID	Status	Zelle 0	Zelle 1	Zelle 2	Zelle 3	Zelle 4	Zelle 5	Zelle 6	Temperatur
0	0	3724	3724	3724	3895	3890	3920	3920	24

Anschließend wurde das zweite BMS an einen zweiten 6-zelligen Akku angeschlossen. Nach maximal 16 Sekunden bestand das Datenpaket aus den Zellspannungen beider BMS wie folgt.

BMS ID	Status	Zelle 0	Zelle 1	Zelle 2	Zelle 3	Zelle 4	Zelle 5	Zelle 6	Temperatur
0	0	3724	3724	3724	3895	3890	3920	3920	24
BMS ID	Status	Zelle 0	Zelle 1	Zelle 2	Zelle 3	Zelle 4	Zelle 5	Zelle 6	Temperatur
1	0	3920	3924	3929	3915	3920	3924	3924	24

Nach kurzer Zeit waren also beiden BMS-Modulen alle Spannungen, der am System angeschlossenen Zellen bekannt und eine Balancierung auf eine gemeinsame Spannung konnte stattfinden.

6.3 STROMVERBRAUCH

Eines der wichtigsten und komplexesten Probleme bei der Entwicklung der Software des BMS war die Optimierung der Software auf geringen Stromverbrauch. Dieses Problem wird im Folgenden evaluiert.

Der gesamte Stromverbrauch setzt sich aus folgenden Einzelverbrauchern zusammen:

- Stromverbrauch des Spannungswandlers
- Stromverbrauch der beiden Multiplexer
- Stromverbrauch des Mikrocontrollers
 - Mikrocontroller
 - Kommunikation (Optokoppler)

Hiervon kann lediglich auf den Stromverbrauch des Mikrocontrollers inklusive der Kommunikation Einfluss genommen werden. Tabelle 18 zeigt die mit dem Handmultimeter PeakTech 3360 (Absolute Genauigkeit 1%, relativ 0,025%) gemessenen Stromverbräuche im Detail.

Bauteil	Verbrauch Energiesparmodus	Verbrauch Active
Spannungswandler LP2950	90 μ A	200 μ A (aus Datenblatt)
Multiplexer DG408DY (1x)	15 μ A	15 μ A
Mikrocontroller Atmega88PA (8 MHz)	60 μ A	9 mA
Mikrocontroller Atmega88PA (1 MHz)	60 μ A	5 mA
Mikrocontroller Atmega88PA (125 kHz)	60 μ A	4 mA
Optokoppler LTV816	0	4 mA
Summe (8 MHz)	180 μ A	13,2 mA

Tabelle 18: Zusammenfassung der Stromverbräuche

Hingegen der Erwartung, dass der Stromverbrauch des Mikrocontrollers im Wesentlichen von der Betriebsfrequenz abhängt, zeigt sich hier ein anderes Bild. Vergleicht man die beiden Betriebsfrequenzen 125 kHz und 8 MHz erkennt man, dass für die 64x-Rechenfrequenz nur der doppelte Strom verbraucht wird. Da das Programm bei 8 MHz schneller abgearbeitet ist und der Mikrocontroller dadurch wieder schneller in den Energiesparmodus wechseln kann, wird bei Betrieb mit 8 MHz mehr Strom gespart als bei 125 kHz. Dementsprechend wird der Mikrocontroller des BMS mit 8 MHz betrieben.

Abbildung 65 und Abbildung 66 verdeutlichen den Stromverbrauch im Energiespar- und Active-Modus.

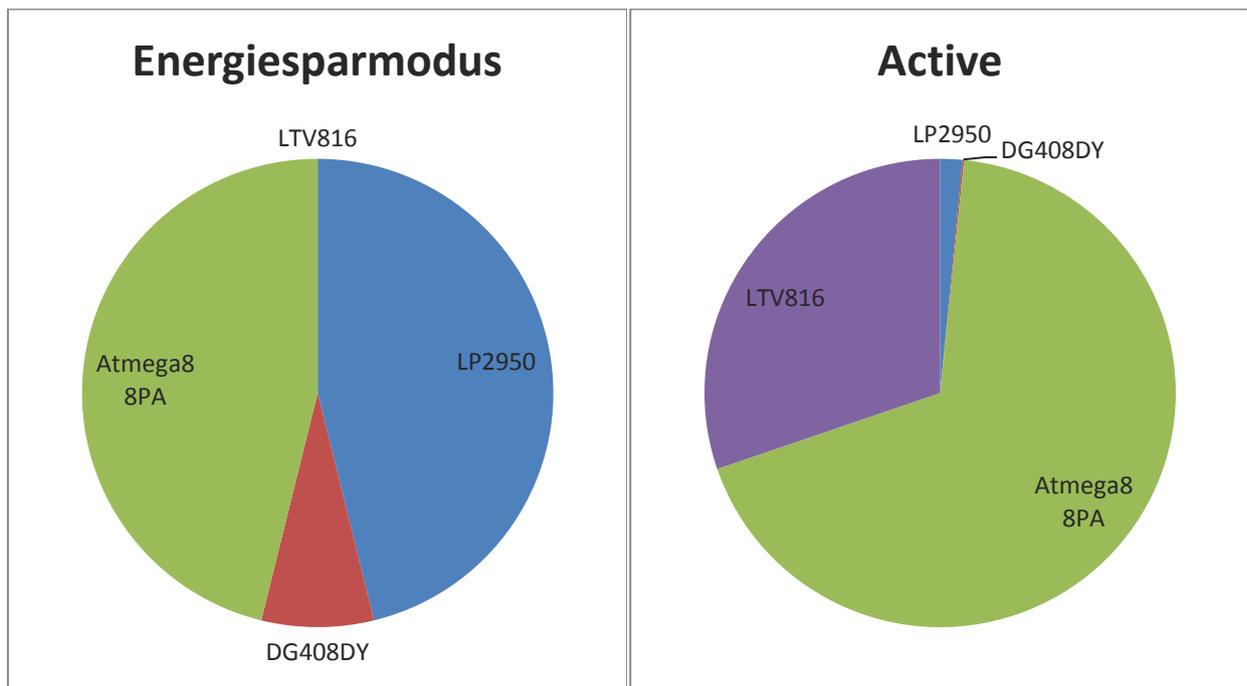


Abbildung 65: Stromverbrauch Energiesparmodus

Abbildung 66: Stromverbrauch Active-Modus

Man erkennt, dass der Stromverbrauch im Energiesparmodus im Wesentlichen vom Spannungswandler LP2950 und vom Mikrocontroller Atmega88PA bestimmt wird. Im Active-Modus wird der Stromverbrauch hingegen zum Großteil vom Mikrocontroller bestimmt.

Durch Simulation zeigte sich, dass der Mikrocontroller ca. 31.000 Zyklen benötigt, um die Schleife der Main-Routine (Messen + Balancieren + Senden) zu durchlaufen. Bei 8 MHz ergibt das etwa 3,9 ms Ausführungszeit. Beim Durchlaufen der Empfangsroutine werden ca. 76 Bytes übertragen. Pro Byte werden bei 115.200 Baud 86,8 µs benötigt. Für 76 Bytes werden also nochmals 6,6 ms Active-Zeit benötigt. Insgesamt ist der Mikrocontroller pro Durchlauf also 10,5 ms im Active Modus.

Der Energiesparmodus dauert in der längsten Einstellung 8 Sekunden.

Der Gesamtstromverbrauch setzt sich also aus

$$\frac{8s \cdot 180\mu A + 0,0105s \cdot 13.215 \mu A}{8,01s} = 197\mu A \quad (12)$$

zusammen.

6.4 KOSTEN

Da bei der Entwicklung großen Wert auf geringen Preis gelegt wurde, fallen die Kosten des Prototypen sehr gering aus. Tabelle 19 zeigt alle Kosten im Detail.

Bauteil	Preis [€] am 9.9.2013	Distributor
Atmega88PA	1,80	Digikey
Platine	1,00	Seedstudio.com
DG408DY	0,90	Aliexpress
LP2950	0,50	Reichelt
LTV816	0,20	Reichelt
Kleinteile	1,00	-
Gesamt:	6,30	-

Tabelle 19: Zusammenfassung der Kosten

Daraus folgt ein Preis pro Zelle von 1,05€, was im günstigeren Bereich der BMS-ICs liegt. Allerdings sind bei diesem noch keine Kleinteile und Mikrocontroller zur Ansteuerung mitgerechnet.

Würde man das BMS in größeren Mengen herstellen, könnte der Preis weiter gesenkt werden. Kurze Recherchen ergaben, dass sich die Preise bei Herstellung von 1000 Stück wie folgt verändern.

Bauteil	Preis [€] am 9.9.2013	Distributor
Atmega88PA	1,10	Digikey
Platine	1,00	Seedstudio.com
DG408DY	0,70	Aliexpress
LP2950	0,10	Digikey
LTV816	0,10	Digikey
Kleinteile	0,50	-
Gesamt:	4,20	-

Tabelle 20: Zusammenfassung der Kosten bei Fertigung von 1000 Stück

In beiden Fällen werden dabei nur die Kosten der Bauteile beachtet und keine Herstellungskosten berechnet. Würde man 1000 Platinen in Deutschland fertigen lassen, würde sich der Preis vermutlich um ca. 3 Euro pro Platine erhöhen.

7 ZUSAMMENFASSUNG

Akkufunktionsweise

Akkus bestehen aus zwei unterschiedlichen Metallen, die zusammen ein Redoxpaar bilden. Schließt man einen Verbraucher zwischen die beiden Metalle reagieren diese mit dem Elektrolyten und es fließt Strom durch den Verbraucher. Im Gegensatz zur Batterie lässt sich dieser Prozess beim Akku durch Anlegen einer negativen Spannung umkehren, so dass der Akku geladen wird.

Akkutypen

Auf Basis von Lithium lassen sich verschiedene Akkus herstellen, die sich in ihren Eigenschaften teilweise stark unterscheiden. Die bekanntesten Akkus auf Lithiumbasis sind:

- Lithium Cobalt Oxid
- Lithium Permanganate
- Lithium Eisen Phosphat
- Lithium Titanat

Ladung / Entladung

Die Ladung des Lithiumakkus besteht aus der konstanten Strom- und der konstanten Spannungsphase. Der Verlauf der Zellspannung ist während dem (End-) Ladevorgang nicht linear.

Lebensdauer

Die Lebensdauer des Akkus hängt stark von der Verwendung ab. Um die Lebensdauer eines Lithium-Cobalt-Oxid-Akkus zu maximieren sollten folgende Ratschläge beachtet werden:

- Ladestrom so gering wie möglich
- Entladestrom so gering wie möglich
- Akkutemperatur so gering wie möglich
- Lagerung so kalt und entladen wie möglich
- Ladeschlussspannung so gering wie möglich
- Betrieb nur im unteren Füllstandsbereich

Akkupack

Einzelne Zellen werden zu einem Akkupack zusammen geschaltet, um die entnehmbare Leistung zu steigern und die speicherbare Energie zu erhöhen. Mögliche Verschaltungen sind:

- Seriell: erhöht die Gesamtspannung
- Parallel: erhöht den entnehmbaren Strom

Balancieren

Es ist möglich einen Akkupack im vollen oder im leeren Zustand zu balancieren. Im Endeffekt hat das Balancierverfahren allerdings keinen Einfluss auf die Lebensdauer des gesamten Akkupacks, sondern lediglich Einfluss auf die Lebensdauer einzelner Zellen. Die Restkapazität des Akkupacks wird allein

durch die schwächste Zelle im Pack bestimmt. Die Kapazität der schwächsten Zelle ist unabhängig vom Balancierverfahren.

7.1 DESIGNENTSCHEIDUNGEN

Während der Entwicklung des BMS wurden viele Designentscheidungen getroffen, die im Folgenden noch einmal zusammengefasst werden.

	Entscheidung	Grund
Balancierverfahren	Top-Balancing	<ul style="list-style-type: none"> • Einfach zu realisieren • Kein Lebensdauerunterschied zwischen den Verfahren
Zellspannung messen	Multiplexer	<ul style="list-style-type: none"> • Wenig Bauteile • Absolute Messung der Zellspannungen
Zellen Balancieren	Resistiv	<ul style="list-style-type: none"> • Wenig Bauteile • Hoher Entladestrom
Kommunikationshardware	UART	<ul style="list-style-type: none"> • Benötigt nur 2 Signalleitungen
Baudrate	115.200	<ul style="list-style-type: none"> • So schnell wie möglich, spart Energie
Taktfrequenz des Mikrocontrollers	8 MHz	<ul style="list-style-type: none"> • BMS System ist bei 8 MHz am effizientesten
Energiesparmodus	Power-Save	<ul style="list-style-type: none"> • Größte Einsparung bei größter Funktionalität
Entlade-Widerstand	50 Ohm	<ul style="list-style-type: none"> • Thermisches Limit der SMD 1206 Bauform
Größe des Messkondensators	100nF	<ul style="list-style-type: none"> • So klein wie möglich

Tabelle 21: Zusammenfassung der Designentscheidungen

7.2 ERREICHTE FEATURES

	Anforderung	Erreicht	
Balancierstrom	Min. 42 mA	Bis 84 mA	<input checked="" type="checkbox"/>
Stromverbrauch	Max. 700 µA	197 µA	<input checked="" type="checkbox"/>
Zellenanzahl	Min. 24	Bis zu 4 x 6, Software limitiert	<input checked="" type="checkbox"/>
Kommunikation mit ext. Systemen	Möglich	Per UART möglich	<input checked="" type="checkbox"/>
Größe	Kleiner als 50x30x10 mm	45x30x5 mm	<input checked="" type="checkbox"/>
Aufbau	Modular	1 bis 4 Module in reihe steckbar	<input checked="" type="checkbox"/>
Balanciereinstellungen	-	Per Firmware veränderbar	
Kosten	Gering	6,30 Euro	<input checked="" type="checkbox"/>
Fertigung	Per Hand	Per Hand möglich	<input checked="" type="checkbox"/>

Tabelle 22: Zusammenfassung der erreichten Features

7.3 VERGLEICH MIT KOMMERZIELLEN LÖSUNGEN

Kommerzielle Batterie Management Systeme lassen sich in 2 Gruppen einteilen.

Zur ersten Gruppe gehören BMS, die bei großen Anwendungen wie beispielsweise Elektroautos oder Notstromversorgungen von Serverzentren zum Einsatz kommen. Bei diesen Anwendungen findet man oft Zellen mit einer sehr hohen Kapazität von einigen hundert Amperestunden, die einen hohen Balancierstrom erfordern. Zudem ist die Zellenanzahl des Akkupacks von System zu System sehr unterschiedlich, so dass diese BMS-Module meist modular erweiterbar aufgebaut sind. Da die Zellen sehr groß sind, wird bei diesen BMS wenig Wert auf geringen Stromverbrauch und kleinen Formfaktor gelegt. Im Folgenden wird exemplarisch ein Batterie Management System dieser Gruppe vorgestellt.

Emus BMS

Beim Emus BMS handelt es sich um ein von der Firma JSC Elektromotus entwickeltes Batterie Management System, welches zum Einsatz in Elektrofahrzeugen, wie Autos oder Booten, gedacht ist. Das System besteht aus einer Controllereinheit und modular erweiterbaren kleinen Zelleinheiten, die pro in Serie verschalteter Zelle verbaut werden. Optional lässt sich das System mit einem Stromsensor und einer Datenschnittstelle wie USB, RS232 oder CAN erweitern. Abbildung 67 zeigt die typischen Komponenten dieses Systems.

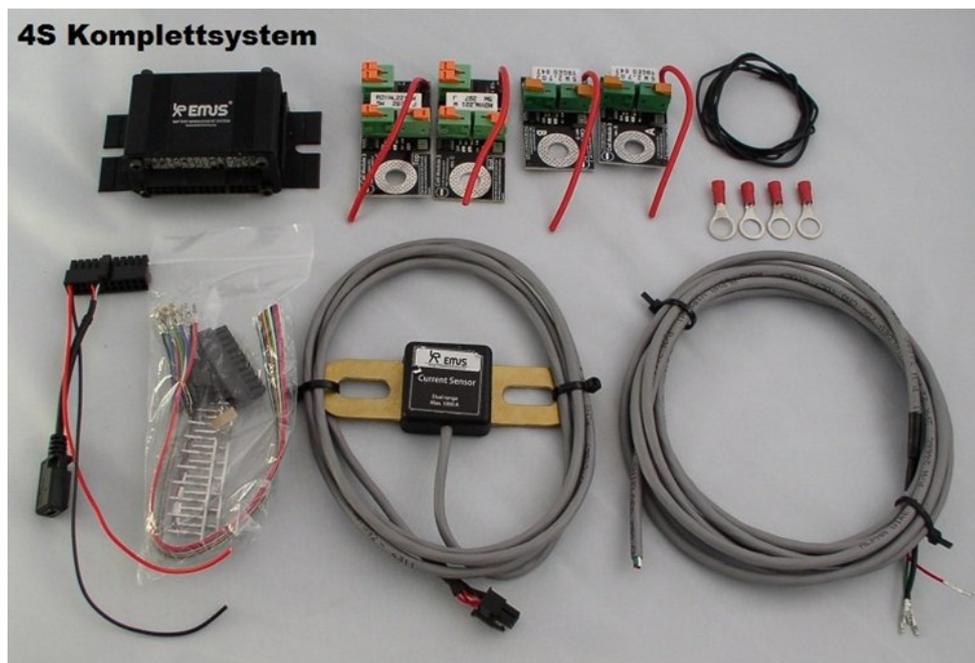


Abbildung 67: Komponenten des Emus BMS

Die genauen Spezifikationen dieses BMS lassen sich aus Tabelle 23 entnehmen.

Features	
Balancierstrom	Max. 1,5 A
Stromverbrauch	40 mA
Zellanzahl	2-255
Zellen pro Modul	1
Kommunikation mit ext. Systemen	ja
Größe	50x30x17 mm
Modular	ja
Balanciereinstellungen	Per Software
Preis	300 € + 15 € pro Zelle

Tabelle 23: Features des Emus BMS

Zur zweiten Gruppe gehören BMS, die für Elektrofahrräder oder Akkuschauber konzipiert sind. Die Zellkapazität dieser Anwendungen liegt meist im Bereich von einigen Amperestunden, wodurch nur ein geringer Balancierstrom benötigt wird, allerdings auch mehr Augenmerk auf einen geringen Stromverbrauch gelegt wird. Zusätzlich sind diese Anwendungen meist sehr platzkritisch, so dass das BMS so klein wie möglich konstruiert wird. Eine modulare Bauweise ist wegen der normalerweise von vorneherein bekannten Akkuspezifikation überflüssig. Im Folgenden wird exemplarisch ein Batterie Management System dieser Gruppe vorgestellt.

Smart BMS

Beim Smart BMS handelt es sich um ein von der Firma BMSbattery entwickeltes Batterie Management System, welches für den Einsatz in E-Bike- oder Pedelecakkus vorgesehen ist. Es besteht lediglich aus einer Platine und lässt sich nicht erweitern. Abbildung 68 zeigt die Platine des Smart BMS.

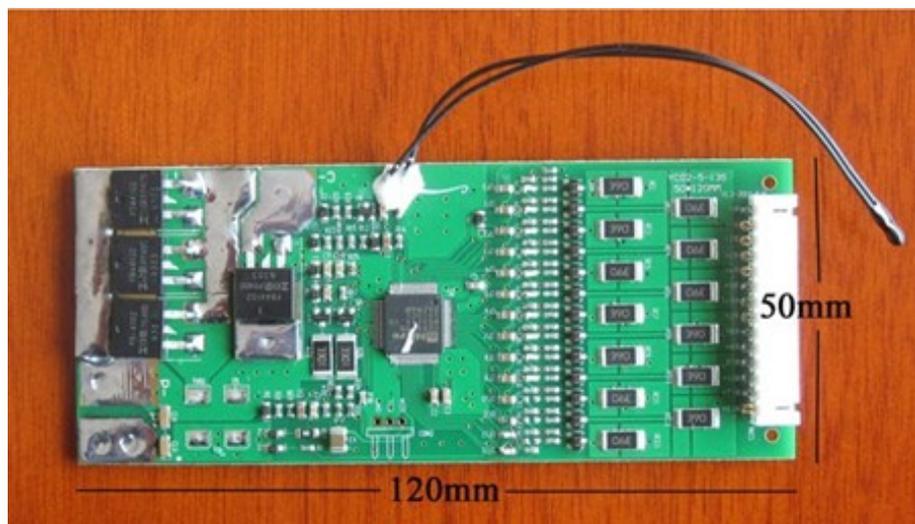


Abbildung 68: Smart BMS

Die Features des Smart BMS lassen sich aus Tabelle 24 entnehmen.

Features	
Balancierstrom	100 mA
Stromverbrauch	50 μ A
Zellanzahl	2-13
Kommunikation mit ext. Systemen	nein
Größe	120x50x7 mm
Modular	nein
Balanciereinstellungen	Per Software
Preis	15 €

Tabelle 24: Features des Smart BMS

Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass keines der oben vorgestellten BMS die gestellten Anforderungen erfüllt. Das Emus BMS ist zwar modular aufgebaut und kann mit externen Systemen kommunizieren, allerdings ist das Gesamtsystem zu groß und zu teuer. Das Smart BMS hingegen ist vergleichsweise kostengünstig und hat einen sehr geringen Stromverbrauch. Allerdings kann es nicht modular erweitert werden und besitzt auch keine Möglichkeit zur Kommunikation mit externen Systemen. Tabelle 25 vergleicht noch einmal das in dieser Arbeit entwickelte BMS mit den zwei exemplarischen Systemen. Die rot markierten Bereiche zeigen die Features, die nicht den Anforderungen entsprechen.

	Emus BMS	Smart BMS	Entwickeltes BMS
Balancierstrom	1,5 A	100 mA	84 mA
Stromverbrauch	40 mA	50 μ A	197 μ A
Zellenanzahl	2-255	2-13	6 - 24
Zellen pro Modul	1	-	6
Kommunikation mit ext. Systemen	ja	nein	ja
Größe	50x30x17 mm pro Zelle	120x50x7 mm	45x30x5 mm
Aufbau	Modular	Fest	Modular
Balanciereinstellungen	Per Software	Per Software	Per Firmware
Preis	300 € + 15 € pro Zelle	15 €	6,30 € Pro Modul

Tabelle 25: Vergleich der zwei exemplarischen BMS mit dem hier entwickelten BMS

8.1 VERBESSERUNGEN

Auslegung auf größere Zellen

Durch die Verwendung kleinerer Entlade-Widerstände in größerer Bauform könnte der Balancierstrom erhöht werden. Dadurch könnten auch Zellen mit größerer Kapazität balanciert werden.

Verbesserung des Energieverbrauchs im Energiesparmodus

Der Energieverbrauch des Spannungswandlers könnte im Energiesparmodus weiter reduziert werden, indem er zeitweise komplett abgeschaltet werden würde. Während der Spannungswandler abgeschaltet ist, könne ein Kondensator den Mikrocontroller mit Strom versorgen.

Verbesserung der Software: Status

Jedes BMS könnte einen Status besitzen. Mögliche Stati wären:

- Am Balancieren
- Am Lader
- Akkupack wird entladen
- Ultra Energiesparmodus

Im Status „Am Lader“ könnte dann beispielsweise komplett auf den Energiesparmodus verzichtet werden und die Zellspannung sekundlich kommuniziert werden.

Im „Ultra Energiesparmodus“ hingegen würde die Zellspannung beispielsweise nur noch stündlich kommuniziert, so dass sich der gesamte Energieverbrauch im Energiesparmodus weiter verringert.

Verbesserung der Software: Automatische Adressierung

Wie bereits beschrieben, handelt es sich bei der automatischen Adressierung um eine komplexe Aufgabe, die in Zukunft gelöst werden könnte.

Verbesserung der Software: Konfiguration über Kommunikationsschnittstelle

Die Software des BMS könnte so erweitert werden, dass Konfigurationsparameter über die Kommunikationsschnittstelle verändert werden können.

8.2 ERWEITERUNGEN

Ladegerät

Durch die Kommunikationsfähigkeit des BMS könnte ein herkömmliches CV/CC-Ladegerät so erweitert werden, dass es die Spannungen aller Zellen mitlesen kann und somit bei Überladung einer Zelle frühzeitig abschalten kann.

Live-Anzeige im Betrieb

Ebenso könnten alle Zellspannungen während des Entladevorgangs auf einem extra angebrachten Displaymodul dargestellt werden.

Akku-Schutzplatine

Zusätzlich zu den BMS-Modulen könnte ein Power-Modul entwickelt werden, welches die Zellen vor Unterladung schützt. Dieses Modul müsste lediglich die Kommunikation der BMS auswerten können und einen Schalter besitzen, der den Akku vom Verbraucher trennt.

Erhöhung der Zellanzahl des BMS

Am Multiplexer können bis zu 7 Zellen angeschlossen werden. In der aktuellen Hardware Version sind allerdings maximal 6 Zellen vorgesehen. In der nächsten Hardware Version könnte die mögliche Anzahl der Zellen pro BMS also von 6 auf 7 Zellen erhöht werden, ohne dass sich die Kosten merklich verändern.

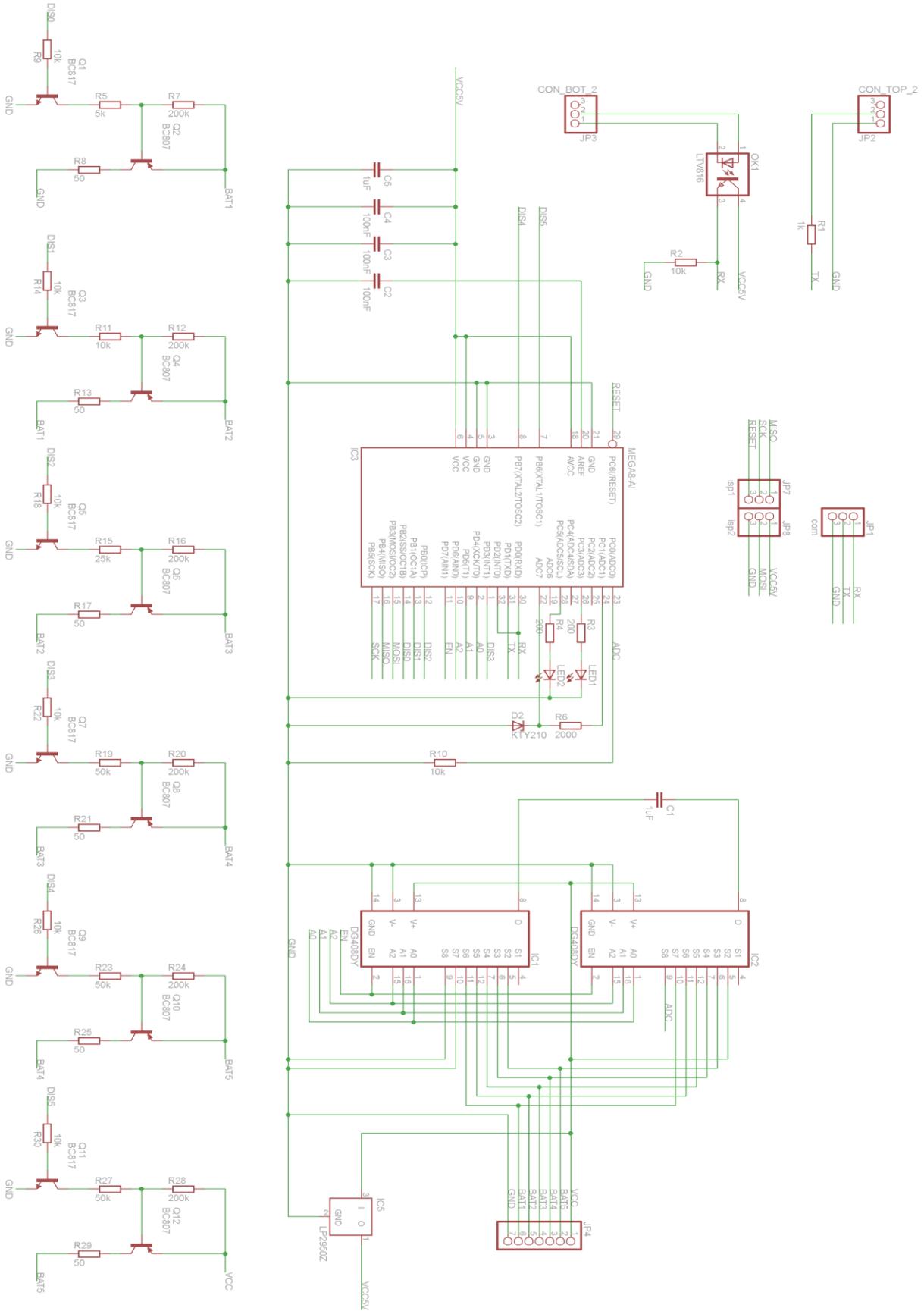


Abbildung 69: Schaltplan des BMS

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

LiPo	Lithium-Polymer (Akkumulator)
BMS	Batterie Management System
C	Capacity, deutsch: Kapazität
DOD	Depth of Discharge, deutsch: Entladezustand
SOC	State of Charge, deutsch: Ladezustand
CC	Constant Current, deutsch: konstanter Strom
CV	Constant Voltage, deutsch: konstante Spannung
EOCV	End of Charge Voltage, deutsch: Lade-Schluss-Spannung
EODV	End of Discharge Voltage, deutsch: Entlade-Schluss-Spannung
ADC	Analog-Digital-Konverter
OPV	Operationsverstärker
IC	Integrated Circuit, deutsch: integrierter Schaltkreis
I2C	Inter-Integrated Circuit
SPI	Serial Peripheral Interface
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
SMD	Surface Mounted Device, deutsch: oberflächenmontiertes Bauelement

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Spannungsverlauf beim Entladen einer LiPo-Zelle, aus (Popov, et al., 2004).....	8
Abbildung 2: Aufbau des Zink-Kupfer-Akkus, aus (Winter & Möller, 2005).....	11
Abbildung 3: Schematischer Aufbau Lithium-Ionen und Polymer	13
Abbildung 4: Typisches Ladeverhalten einer Li-Ion-Zelle, hier Panasonic CGR-18650CH bei 0.7C Lade Strom und 25°C, aus Datenblatt.....	16
Abbildung 5: Angleich von Leerlauf- und Ladespannung, aus (tjinguytech, 2013)	17
Abbildung 6: Temperaturabhängigkeit der Entladekurve von Panasonic CGR-18650CH bei 1C Entladestrom, aus Datenblatt	18
Abbildung 7: Stromabhängigkeit der Entladekurve von Panasonic CGR-18650CH bei 25°C.....	19
Abbildung 8: Veränderung der entnehmbaren Kapazität bei zunehmenden Zyklen, Panasonic 18650	20
Abbildung 9: Kapazitätsverlauf bei verschiedenen Ladeströmen, aus (Lim & Seok Choi, 2002).....	20
Abbildung 10: Kapazitätsverlust bei verschiedenen Entladeströmen, Sony US 18650 aus (Popov, et al., 2002)	21
Abbildung 11: Kapazitätsverlust bei unterschiedlichen Temperaturen nach Zyklen, Sony 18650, aus (Branko, et al., 2002)	22
Abbildung 12: Kapazitätsverlust während der Lagerung bei unterschiedlichen Temperaturen und Ladezuständen, Sony US 18650, aus (Popov, et al., 2004)	23
Abbildung 13: Kapazitätsverlauf bei unterschiedlichen Ladeschluss-Spannungen, aus (Lim & Seok Choi, 2002)	24
Abbildung 14: Kapazitätsveränderung bei verschiedenen Entlade-Schluss-Spannungen, aus (Lim & Seok Choi, 2002).....	24
Abbildung 15: Kapazitätsverlust in Abhängigkeit vom DOD, aus (Cristo & Atwater, 2006)	25
Abbildung 16: Parallelschaltung von 3 Zellen „1S3P“	26
Abbildung 17: Reihenschaltung von 4 Zellen „4S1P“	27
Abbildung 18: Akkupack mit Drift.....	29
Abbildung 19: Akkupack mit Drift, überladen	30
Abbildung 20: Akkupack mit Kapazitätsunterschied	31
Abbildung 21: Top-Balancierter Akkupack, geladen.....	32
Abbildung 22: Top-Balancierter Akkupack, leer	33

Abbildung 23: Bottom-Balancierter Akkupack, leer	33
Abbildung 24: Bottom Balancierter Akkupack, geladen	34
Abbildung 25: Spannungsmessung mehrerer Zellen in Serie	35
Abbildung 26: Spannungsmessung mit Widerständen	36
Abbildung 27: Spannungsmessung mit Multiplexern und Kondensator.....	37
Abbildung 28: Spannungsmessung mit Multiplexern und Kondensator: Zelle 2	38
Abbildung 29: Spannungsmessung mit Multiplexern und Kondensator: ADC.....	38
Abbildung 30: Spannungsmessung mit Operationsverstärkern (vereinfacht)	39
Abbildung 31: Entladeschaltung einer Zelle mit Widerstand	40
Abbildung 32: Pegelwandler Schaltung (grau) an widerstandsbasierender Balancierschaltung	41
Abbildung 33: Induktive Balancierschaltung	42
Abbildung 34: Induktive Balancierschaltung: Ladung der Spule	43
Abbildung 35: Induktive Balancierschaltung: Entladung der Spule	43
Abbildung 36: Induktive Balancierschaltung erweiterbar	43
Abbildung 37: Induktiver Ladungsaustausch zwischen der untersten und obersten Zelle	44
Abbildung 38: Erweiterte Ansteuerungsschaltung	45
Abbildung 39: Kapazitive Balancierschaltung	46
Abbildung 40: Kapazitive Balancierschaltung: Schritt 1	47
Abbildung 41: Kapazitive Balancierschaltung: Schritt 2	47
Abbildung 42: Verschaltung von zwei BMS-Module in Serie	48
Abbildung 43: Schematischer Aufbau eines Optokopplers	49
Abbildung 44: Schematischer Aufbau LTC6802, aus Datenblatt.....	50
Abbildung 45: ATA6870.....	51
Abbildung 46: AD7280.....	51
Abbildung 47: ISL9216 + ISL9217.....	52
Abbildung 48: LTC6802.....	52
Abbildung 49: BQ76PL536.....	53
Abbildung 50: Mess- und Balancierschaltung Hardware Version 1	55

Abbildung 51: Verschaltung des Mikrocontrollers	57
Abbildung 52: Entkopplung der UART-Schnittstelle	58
Abbildung 53: Ringverschaltung der BMS	59
Abbildung 54: Stromversorgung des Mikrocontrollers mit LP2950	60
Abbildung 55: Platzierung der Steckverbinder auf der Leiterplatte	61
Abbildung 56: Kondensator über mehrere Zellen, Ladung links, Entladung rechts	62
Abbildung 57: Resistives Balanciermodul	63
Abbildung 58: Programmablauf der Hauptroutine	65
Abbildung 59: Programmablauf beim Messen der Zellspannungen	66
Abbildung 60: Programmablauf Balancieren	68
Abbildung 61: Softwareablauf beim Senden von Daten	71
Abbildung 62: Softwareablauf beim Empfangen von Daten	72
Abbildung 63: Programmablauf zur Steuerung des Energiesparmodus	74
Abbildung 64: Verlauf der Zellspannungen beim balancieren	77
Abbildung 65: Stromverbrauch Energiesparmodus	79
Abbildung 66: Stromverbrauch Active	79
Abbildung 67: Komponenten des Emus BMS	84
Abbildung 68: Smart BMS	85
Abbildung 69: Schaltplan des BMS	89

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Vergleich der Energiedichte verschiedener Speichertechnologien, aus (wikipedia, Energiedichte)	9
Tabelle 2: Leistungsdichte verschiedener Speichertechnologien, aus (wikimedia, Energiespeicher)..	10
Tabelle 3: Redoxpotentiale verschiedener Stoffe bei Standardbedingungen, aus (wikipedia, Standard_electrode_potential)	12
Tabelle 4: Vergleich der Akku-Chemie, aus (General Electronics Battery Co., Ltd., 2006), (winston-battery, WB-LYP100AHA)	16
Tabelle 5: Vergleich von Parallel- und Reihenschaltung	28
Tabelle 6: Typische Akkupack Verschaltungen aus (sonnenbatterie, technische-daten) , (stealthelectricbikes, 2013)	28
Tabelle 7: Vergleich der Spannungsmessmethoden.....	40
Tabelle 8: Balancierstrom bei verschiedenen Spulen aus (Atmel Corp, 2013)	44
Tabelle 9: Balancierströme bei kapazitivem Balancieren, aus (Atmel Corp, 2013)	47
Tabelle 10: Vergleich möglicher Balancierschaltungen	48
Tabelle 11: Vergleich verschiedener BMS-ICs	53
Tabelle 12: Maximale Baudrate in Abhängigkeit des Widerstands R2	59
Tabelle 13: Aufbau eines Datenpakets	69
Tabelle 14: Zusammensetzung des Datenpakets 0x01	70
Tabelle 15: Zusammensetzung des Datenpakets 0x01	70
Tabelle 16: Energiesparmodi des Atmega88PA, aus (Atmel Corp, 2013)	76
Tabelle 17: Spannungen nach dem Balanciervorgang	77
Tabelle 18: Zusammenfassung der Stromverbräuche	79
Tabelle 19: Zusammenfassung der Kosten	80
Tabelle 20: Zusammenfassung der Kosten bei Fertigung von 1000 Stück	81
Tabelle 21: Zusammenfassung der Designentscheidungen	83
Tabelle 22: Zusammenfassung der erreichten Features	83
Tabelle 23: Features des Emus BMS	85
Tabelle 24: Features des Smart BMS	86

Tabelle 25: Vergleich der zwei exemplarischen BMS mit dem hier entwickelten BMS86

LITERATURVERZEICHNIS

Anon., 2013. *Lithium-Ionen-Akkus*. [Online]

Available at: <http://www.mobile-power.info/d/batterielexikon/akkus-li-ion.html>

Anon., 2013. *Lithium-Ionen-Speicher: Grundlegende Fakten*. [Online]

Available at: <http://www.batteriezukunft.de/technik/lithium-ionen-speicher.html>

Atmel Corp, 2013. *Active Cell Balancing Methods for Li-Ion Battery Management ICs*, s.l.: s.n.

Atmel Corp, 2013. *Atmega88PA Full Datasheet*, s.l.: s.n.

Barsukov, Yevgen;Texas Instruments, 2005. *Battery Cell Balancing: What to Balance and How*, s.l.: s.n.

Branko, P., White, R., Haran, B. & Ramadass, P., 2002. *Capacity fade of Sony 18650 cells cycled at elevated temperatures Part I. Cycling performance*, Department of Chemical Engineering, University of South Carolina: Journal of Power Sources 112 (2002) 606–613.

Cristo, L. & Atwater, T., 2006. *Characteristics and Behavior of Cycled Aged Lithium Ion Cells*, Ft. Monmouth NJ: US Army RDECOM, Communications, Electronics, Research, Development and Engineering Center.

ERIKSSON, T., 2001. *LiMn2O4 as a Li-Ion Battery Cathode*, ACTA UNIVERSITATIS UPSALIENSIS: s.n.

General Electronics Battery Co., Ltd., 2006. *Comparison of Different Battery Technologies*, s.l.: s.n.

Lim, H. & Seok Choi, S., 2002. *Factors that affect cycle-life and possible degradation mechanisms of a Li-ion cell based on LiCoO₂*, Corporate R&D Center, Samsung SDI Co. Ltd.: Journal of Power Sources.

mobile-power.info, Handelspreise. [Online]

Available at: <http://www.mobile-power.info/d/charts/charts-cobalt-handelspreise.html>

[Zugriff am 11 06 2013].

mobile-power.info, Lithium-Titanat-Akkus. [Online]

Available at: <http://www.mobile-power.info/d/batterielexikon/akkus-lithium-titanat.html>

[Zugriff am 11 06 2013].

Möller, D. K.-C., 2005. *Primäre und wiederaufladbare Lithium-Batterien*, Institut für Chemische Technologie Anorganischer Stoffe, TU Graz: s.n.

Panasonic, 2008. *Thick Film Chip Resistors*. [Online]

Available at: <http://www.panasonic.com/industrial/components/pdf/AOA0000CE1.pdf>

Panasonic, 2010. *Panasonic CGR-18650*, s.l.: s.n.

Popov, B., Haran, B. & Ning, G., 2002. *Capacity fade study of lithium-ion batteries cycled at high discharge rates*, Department of Chemical Engineering, University of South Carolina: Journal of Power Sources 117 (2003) 160–169.

Popov, B., White, R. & Ramasamy, R., 2004. *Calendar life performance of pouch lithium-ion cells*, Department of Chemical Engineering, University of South Carolina: *Journal of Power Sources* 141 (2005) 298–306.

sonnenbatterie, technische-daten. [Online]
Available at: <http://www.sonnenbatterie.de>
[Zugriff am 11 06 2013].

stealthelectricbikes, 2013. [Online]
Available at: <http://www.stealthelectricbikes.com>
[Zugriff am 11 06 2013].

Texas Instruments, LP2950. [Online]
Available at: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lp2950-n.pdf>

tjinguytech, 2013. [Online]
Available at: <http://www.sites.google.com/site/tjinguytech>
[Zugriff am 11 06 2013].

Tübke, D. J., 2013. *Li/LiCoO₂-System anorganisch*. [Online]
Available at: <http://www1.ict.fraunhofer.de/deutsch/scope/ae/liakkum.html>

Valence Technology, 2013. *Building safer Li-Ion batteries*. [Online]
Available at: <http://www.houseofbatteries.com/articles.php?id=27>
[Zugriff am 10 5 2013].

Vishay Siliconix, DG408DY. [Online]
Available at: <http://www.vishay.com/docs/70062/dg408.pdf>

wikimedia, Energiespeicher. [Online]
Available at: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Energiespeicher2.svg>
[Zugriff am 11 06 2013].

wikipedia, Energiedichte. [Online]
Available at: <http://de.wikipedia.org/wiki/Energiedichte>
[Zugriff am 11 06 2013].

wikipedia, Lithium_cobalt_oxide. [Online]
Available at: http://en.wikipedia.org/wiki/Lithium_cobalt_oxide
[Zugriff am 11 06 2013].

wikipedia, Lithiumtitanat-Akkumulator. [Online]
Available at: <http://de.wikipedia.org/wiki/Lithium-Titanat-Akkumulator#Lithiumtitanat-Akkumulator>
[Zugriff am 11 06 2013].

wikipedia, Standard_electrode_potential. [Online]
Available at: [http://www.en.wikipedia.org/wiki/Standard_electrode_potential_\(data_page\)](http://www.en.wikipedia.org/wiki/Standard_electrode_potential_(data_page))
[Zugriff am 11 06 2013].

winston-battery, WB-LYP100AHA. [Online]

Available at: http://en.winston-battery.com/index.php/products/power-battery/item/wb-lyp100aha?category_id=176

[Zugriff am 11 06 2013].

Winter, M. & Möller, K., 2005. *Primäre und wiederaufladbare Lithium-Batterien*, Institut für Chemische Technologie Anorganischer Stoffe, TU Graz: s.n.

Zedda, M. & Schlota, J., 1999/2000. *Portable Anwendung mit PEM Brennstoffzellen*. [Online]

Available at: http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th1999/th1999_02_05.pdf

[Zugriff am 11 06 2013].

Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Masterarbeit ohne Hilfe Dritter und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die aus den Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Darmstadt, 27.09.2013