

H T
W E
G I

Hochschule Konstanz
Fakultät Elektrotechnik
und Informationstechnik

Studie aktives Balancingsystem für die Amperia 20

Masterprojekt EIM

Felix Dollhopf Matr.-Nr.: 290233

HTWG Konstanz

Wintersemester 2019/2020

Autor: Felix Dollhopf, Matr.-Nr.: 290233

Fach: Masterprojekt EIM, Master

INHALTSVERZEICHNIS

<i>Einleitung</i>	3
ELaketric Racing-Team.....	3
Motivation und Ziele	3
Gliederung der Arbeit.....	4
<i>Stand der Technik</i>	6
Lithium-Ionen Batterie.....	6
Forschungsaktivitäten von Fahrzeugbatterien	7
Batteriemanagementsystem	10
Balancingsystem	11
Balancingbedarf	13
Passives Balancing.....	13
Aktives Balancing	14
<i>Aktive Balancing-topologien</i>	15
Single Kondensator.....	15
Multi Kondensator	16
Single Induktivität.....	17
Multi Induktivität	18
Single Winding Transformer.....	19
Multi Windings Transformator	20
Multiple Transformator	20
Wandler	21
<i>Marktstudie aktive Balancingsysteme</i>	22
<i>Lastenheft Amperia 20</i>	25
IST-Zustand Amperia-18.....	25
SOLL-Zustand Amperia 20	27

Schnittstellen BMS.....	28
Kenngößen Batterie	28
Anforderungen BMS.....	29
<i>Auswahl der aktiven Balancing Topologie.....</i>	<i>32</i>
Vergleich und Bewertung unterschiedlicher Topologien	32
Wahl der Topologie	33
Multi Induktivität	34
Funktionsprinzip Multi Induktivität	35
<i>Kostenabschätzung aktives Balancing</i>	<i>37</i>
Auswahl der Bauteile.....	37
Abschätzung der Kosten	38
<i>Zusammenfassung und Ausblick</i>	<i>40</i>
<i>Literatur</i>	<i>41</i>
<i>Abbildungs- und Tabellenverzeichnis.....</i>	<i>44</i>
<i>Anhang.....</i>	<i>45</i>

EINLEITUNG

Dieses Masterprojekt beschreibt ein aktives Balancing System für Lithium-Ionen-Batterien. Im Folgenden wird zunächst das ELaketric Racing Team vorgestellt, bevor die Motivation und Zielsetzung der Arbeit aufgezeigt wird. Abschließend wird ein kurzer Überblick über die einzelnen Kapitel gegeben.

ELAKETRIC RACING-TEAM

Das eLaketric Team der HTWG Konstanz entwickelt seit mehr als 4 Jahren Elektromotorräder, um an dem Wettbewerb MotoStudent teilzunehmen. Die Rennserie findet im zwei Jahres Tonus statt. Nachdem im Oktober 2018 das zweite Rennevent stattfand, bei dem die „Amperia 18“ den 5. Platz in der Gesamtwertung belegte, geht es nun in die Entwicklung der „Amperia 20“. Von Saison zu Saison möchte das Team professioneller arbeiten und dabei auch verschiedene bisherige Kaufteile in Eigenarbeit, speziell angepasst auf die relevanten Bedürfnisse, entwickeln. Ein Teil der spezifischen Daten relevanter Komponenten werden dabei innerhalb des Reglements vorgegeben. Einen Großteil der Entwicklung und Kernstück des Motorrads nimmt die Batterie ein. Diese ist eine Eigenentwicklung und wird selbst gefertigt. Das bisherige Batteriemanagement System ist ein Kaufteil, welches lediglich durch Wahl der Parameter mittels beigelegter Software individualisiert wird. Da man mit der Performance des Systems nicht sonderlich zufrieden ist soll nun ein eigenes Batteriemanagement System konzipiert und entwickelt werden. Das System soll dabei genauer auf die speziellen Anforderungen angepasst werden und die Möglichkeit der Umsetzung und Integration analysiert werden.

MOTIVATION UND ZIELE

Derzeit ist eines der primären Kriterien der Elektromobilität die Reichweite der Transaktionsbatterie zu erhöhen, um die Technologie als echte Alternative zu herkömmlichen Verbrennungsmotoren zu nutzen. Dabei ist es wichtig die Energie der Batterie so effizient wie möglich nutzen zu können. Das Zell-Balancing ist dabei eine wichtige Funktion, um die Effizienz einer Batterie zu erhöhen. Dazu wurden in dieser Arbeit verschiedene Konzepte eines „aktiven Balancing Systems für Lithium-Ionen Zellen“ verglichen und aufbauend der Grundstein eines eigenen Systems gelegt. Dieses wurde speziell auf die

Bedürfnisse des ELaketric Racing-Teams angepasst. Da die Batterie etwa 30% des Gesamtgewichts des Motorrads beträgt ist jede mögliche Zelleneinsparung ein Gewinn. Die Hoffnung ist es, die Anzahl der Zellen und somit das Gewicht der Batterie zu verringern, bei gleichbleibender Reichweite und Leistung.

Obwohl das aktive Balancing kostenintensiver und aufwendiger als das passive Balancing ist, wurde es bereits in der Praxis eingesetzt. Als Anwendungsbeispiel dienen die Elektrobusse der *Sileo GmbH* mit intelligentem und angewendetem aktiven Balancing BMS [1]. Des weiteren stellt die Firma *Tesvolt* ein BMS mit „Active Battery Optimizer“ her [2].

Im Rahmen dieser Arbeit soll die Notwendigkeit von Ladungsausgleich für eine Lithium-Ionen-Batterie untersucht werden. Dadurch wird die Basis für die Konzeption eines aktiven Balancing Systems gebildet. Zunächst werden verschiedene Topologien von Symmetrierungsarten untersucht, anschließend technisch bewertet und untersucht, welche Topologie denkbar ist, um ein aktives Balancing-System in dem Motorrad des ELaketric Racing-Teams einzusetzen.

GLIEDERUNG DER ARBEIT

Diese Arbeit ist wie folgt gegliedert. Zunächst werden in Kapitel 2 die Grundlagen der Lithium-Ionen-Batterie beschrieben. Die Funktionsweise und der Aufbau einer Lithium-Ionen Traktionsbatterie, welche in elektrischen Fahrzeugen verwendet werden, werden erläutert. Zusätzlich werden Grundlagen zu dem Aufbau eines BMS und dessen Funktionen erläutert. Anschließend wird auf unterschiedliche Zellbalancing-Topologien eingegangen. Abschließend von diesem Kapitel werden bereits bestehende Lösungen aktiver Balancing-Schaltungen kommerzieller Anbieter vorgestellt und technisch bewertet.

In Kapitel 3 werden unterschiedliche dissipative Systeme dargestellt. Der Aufbau verschiedener Topologien wird erläutert, sowie auf deren Vor- und Nachteile eingegangen.

In Kapitel 4 wird der aktuelle Stand der Batterie und des Balancingystems der Amperia 18 beschrieben. Anschließend werden die Anforderungen an das neue aktive Balancingssystem formuliert. Dazu werden wichtige Funktionen und Daten erläutert.

In Kapitel 5 werden die beschriebenen Topologien verglichen und deren Funktionsweise genauer beschrieben. Anschließend wird die Wahl der Topologie getroffen und diese nochmals detaillierter erläutert.

Anschließend wird in Kapitel 6 eine Kostenabschätzung des gewählten aktiven Balancing-Systems erstellt. Zuvor werden die notwendigen Bauteile aufgezählt und erläutert.

Abschließend wird eine Zusammenfassung gegeben mit Ausblick der Arbeit zur finalen Umsetzung.

STAND DER TECHNIK

In diesem Kapitel werden die Hauptkomponenten eines aktiven Balancingsystems erläutert. Zunächst werden die Grundlagen der Lithium-Ionen Batterie beschreiben, bevor deren Aufbau und Funktionsweise erläutert wird. Anschließend erfolgt in diesem Kapitel eine Übersicht über der grundsätzlichen Aufbau eines BMS und dessen Funktionen. Der letzte Teil des Kapitels geht auf unterschiedliche Zell-Balancingsysteme ein.

LITHIUM-IONEN BATTERIE

Bei einer Batterie handelt es sich um einen elektrochemischen Energiespeicher und Energiewandler. Die chemische Energie, welche in ihrem aktiven Material gespeichert ist, wird bei der Entladung direkt in elektrische Energie umgewandelt. Handelt es sich um eine Sekundärzelle so ist dieser Vorgang reversibel und die Zelle kann wieder geladen werden. Diese wieder aufladbaren Lithium-Akkumulatoren unterscheiden sich daher von den nicht wiederverwendbaren Primärzellen [1]. Der Begriff Batterie bezeichnet im Allgemeinen eine Anordnung von zwei oder mehreren Zellen in Reihen oder Parallel Verschaltung. Zusätzlich ist auch eine Kombination aus beiden Verschaltungen gängig, um die gewünschte Stromstärke, Kapazität und Spannung zu erreichen.

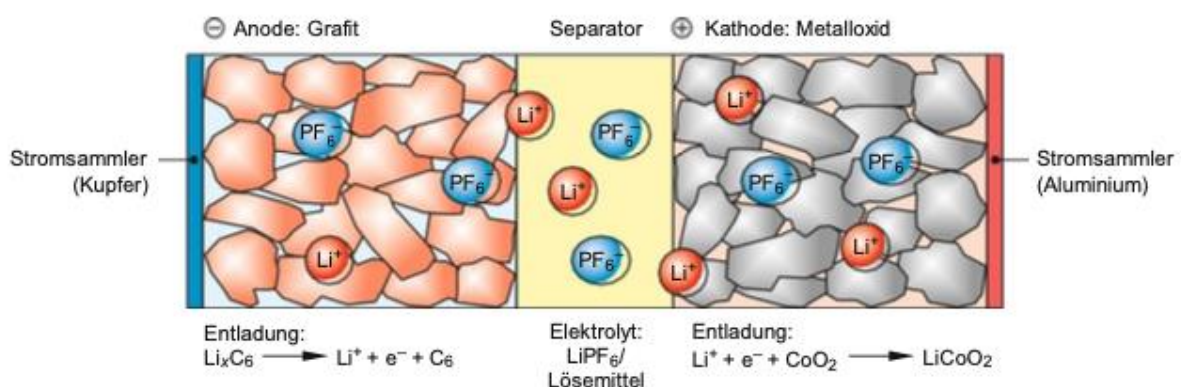
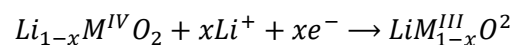


Abbildung 1: Prinzipieller Aufbau und Funktionsweise einer Lithiumionen-Zelle[1]

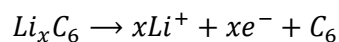
Abbildung 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer wieder aufladbaren Lithiumionen-Zelle. Dabei befindet sich auf beiden Seiten ein Stromsammler. Der Stromsammler auf der negativen Seite ist Kupfer, der auf

der positiven Seite Aluminium. Die Zelle ist dabei aufgebaut aus zwei Halbzellen, einer positiven und einer negativen. Lithiumionen-Zellen nutzen Kohlenstoff als negatives Elektrodenmaterial und Metalloxide als positive Elektrode. In Abbildung 1 besteht die negative Halbzelle aus Graphit und die positive aus einem Metalloxid. Üblicherweise befinden sich die Elektroden in einer Lösung eines Lithiumsalzes innerhalb eines organischen Lösungsmittel, diese Kombination bezeichnet man als ionenleitfähiges Elektrolyt. Um den Austausch der Lithium Ionen zu gewährleisten sind die beiden durch einen Separator getrennt. Dieser ist meist eine poröse Membran, welche beide Elektroden voneinander isoliert und den Durchtritt von Lithium-Ionen ermöglicht. Bei der Entladung der Zelle dringen einzelne Lithium-ionen in die positive Elektrode, beim Laden ist es umgekehrt und die Ionen dringen in die negative Elektrode. So wandern sie bei der Entladung durch den Elektrolytraum von Minus nach Plus, bei der Ladung ist es umgekehrt. Das in der Elektrolytlösung enthaltene Lithiumsalz speist Lithium-ionen nach. Dem Ionen Strom geht ein Elektronenstrom entgegen, welcher über einen externen Kreislauf als elektrischer Strom abgegriffen werden kann.

Interkalation beim Entladen:



Deinterkalation beim Entladen:



Diese Reaktionsgleichungen laufen während der Entladung ab. Die positive Metalloxiidelektrode (MO_2 für ein vierwertiges Metallkation) Elektronen auf (Kathode: elektrochemische Reduktion) und die negative Graphitelektrode arbeitet als Elektronenquelle (Anode: elektrochemische Oxidation) [1]

FORSCHUNGSAKTIVITÄTEN VON FAHRZEUGBATTERIEN

Lithium-Ionen-Batterien spielen seit vielen Jahren bereits eine wichtige Rolle in allen möglichen Technologiebranchen für die mobile Nutzung von unterschiedlichsten Geräten. Auch ihre Rolle in der Elektromobilität ist mittlerweile immens und steigt weiter. Spätestens nach dem Druck auf eine Mobilitätswende ist dieser Anstieg deutlich. Sie eignen sich derzeit am besten für die Nutzung, da sie eine hohe spezifische Energie und Energiedichte, sowie eine hohe spezifische Leistung im Vergleich zu anderen gängigen Batterietypen.

Die Elektromobilität soll eine Schlüsselrolle im Verkehr des städtischen Raums spielen. Sie soll die Luft- und Lärmbelastung in größeren Städten minimieren und zu einer umweltfreundlicheren Mobilität führen. Zukünftige Speichertechnologien sollen kostengünstige und nachhaltige Alternativen von Verbrennungsmotoren werden, mit der gleichen Leistung und Reichweite. Bis dahin ist noch viel an Forschungsarbeit nötig. Um die gleiche Speicherkapazität von heutigen Kraftstofftanks zu erreichen muss die Energiedichte etwa um den Faktor 50 verbessert werden[1].

Lithiumzelle ist nicht gleich Lithiumzelle, denn es gibt bereits eine breite Palette an unterschiedlichen Technologien. Denn die Technologie richtet sich vor allem nach den Batterieanforderungen. Heutige Entwicklungsaktivitäten und Forschungen setzen die Ziele eine zuverlässige und leistungsfähige Lithium-Ionen-Zelle für das automobiler Anwendungsgebiet zu erschließen.

Im Folgenden werden einige wichtige Technologien aufgezeigt [1]:

- Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Akku (NCA)
- Lithium-Nickel-Mangan-kobalt-Akku (NMC)
- Lithium-Eisen-Phosphat-Akku (LFP)
- Lithium-Titanat-Akku (LTO)
- Lithium-Polymer-Akku (Li-Poly)
- Lithium-Schwefel-Akku (Li-S)
- Lithium-Luft-Akku (Li-Luft)

Nach Angaben des Fraunhofer Instituts wird ein deutlicher Anstieg der Forschung im Bereich der Li-S Technologie im Jahr 2020 erfolgen. Die vielversprechende Li-Luft Technologie wird allerdings erst ab dem Jahr 2030 erwartet [1]. Neben Batterieentwickler, sowie bedeutender Forschungseinrichtungen und Instituten forciert auch die Automobilindustrie selbst die Forschung in der Batterietechnologie. Unter anderem der japanische Automobilhersteller Toyota intensiviert sein Engagement im Bereich der Neuentwicklung von Lithium-Ionen-Batterien. Dabei konzentriert sich da Unternehmen auf die Erhöhung der spezifischen Leistung, dabei sollen Festkörpertechnologie und Lithium-Luft-Systeme zielführend sein und eine bis zu fünfmal höhere spezifische Leistung als heutige Batterien liefern[QUELLE]. Nach Schätzungen des Argonne National Laboratory wird die Energiedichte künftiger Lithiumbatterien bis 2020 bei 200 Wh kg^{-1} (375 Wh L^{-1}) und bis 2030 bei 300 Wh kg^{-1} (550 Wh L^{-1}) liegen[QUELLE]. Einen anderen Weg verfolgt das europäische „HORIZON 2020“ Programm. Es denkt an das kommende Limit und Ende der Lithiumära und erforscht Nanotechnologien und neue Materialien

zur Herstellung von Automobilbatterien[1]. Die Ziele des U.S. Advanced Battery Consortium (USABC) formuliert die Ziele für fortschrittliche Fahrzeugbatterien wie folgt[2]:

- 350 Wh kg^{-1} (C/3)
- 750 Wh L^{-1} (C/3)
- 300 W kg^{-1} (10s - Spitzenlast)
- 700 W kg^{-1} (30s - Spitzenlast)
- Lebensdauer von 1000 Lade-Entlade-Zyklen
- Umgebungsbedingungen -30°C bis $+52^\circ\text{C}$
- Ladezeit $< 7 \text{ h}$
- Schnellladung bis 80% SOC $< 15\text{min}$
- Selbstentladung $< 1\%$ pro Monat

Zudem muss eine neue Batterietechnologie natürlich preiswert und umweltfreundlich sein, zusätzlich wird auch zunehmend der Druck auf die Industrie erhöht bereits in der Entwicklung solcher Technologien den Recycling und Verwertungsprozess zu bedenken.

BATTERIEMANAGEMENTSYSTEM

Eine weitere Schlüsselkomponente des Elektroautos ist das Batteriemanagementsystem, denn Batteriesysteme erreichen häufig mehrere hundert Volt Klemmenspannung. Dies begründet sich durch die mehrfache Parallel- und Reihenschaltung einzelner Zellen zu einem gesamten Batteriepack. Da eine Vielzahl an Zellen verbaut ist gibt es ungleiche Zellspannungen durch Unterschiede in Zellkapazität, den einzelnen Innenwiderständen, dem chemischen Abbau und Zell- und Umgebungstemperaturen beim Laden und Entladen verursacht. Betriebsbedingungen für Elektrofahrzeuge sind sehr unterschiedlich und komplex, z.B. aktuelle Umgebungstemperatur, Änderung der Umgebungstemperatur, Feuchtigkeitsänderung, Ladekapazitätsänderung, Luftdruckänderung, atmosphärische Korrosion, etc. [3].

Das BMS kann man mit den menschlichen Sinnen und Gehirn vergleichen, es nimmt alle Informationen der einzelnen Zellen, der gesamten Batterie und der Umwelt auf und verarbeitet diese und reagiert entsprechend darauf. Daher ist ein ausgeklügeltes Batteriemanagementsystem sehr wichtig für die Implementierung der Batterie in ein Elektrofahrzeug. Ein solches System sollte mit seinen Funktionen folgende Ziele ermöglichen [4]:

- Verbesserte Batterielaufzeit
- Reduzierte Schadensraten
- Energie für längere Zeit zwischen dem Aufladen
- Ausreizen der Maximalen Kapazität, Effizienz und Zuverlässigkeit im Betrieb

Abbildung 2 zeigt die Funktionen eines modernen BMS. Darunter sind die vier Kernfunktionen, Sicherheit, Diagnose, Kommunikation und Batteriezustandsüberwachung und Verwaltung. Die Überwachung einer Zelle oder eines Blockes beinhaltet die Überwachung des aktuellen Zustandes und der Werte der Batterie, um diese Werte für weitere Funktionen zur Verfügung zu stellen. Darüber hinaus steuert es die Kühlungssystem, HV- und NV- Schütze und das Balancingsystem. Eine weitere Aufgabe ist die Kommunikationsschnittstelle zu externen Steuergeräten und reagiert auf mögliche Fehlerzustände. Zur Überwachung der Batteriezustände werden in der Regel alle Einzelzellspannungen, der Laststrom sowie Temperaturen an ausgewählten Zellmodulen gemessen [5]. Diese Größen werden herangezogen, um die Zustandsgrößen SOC, SOH, Leistung und Ladefähigkeit zu ermitteln und diese dann über externe Kommunikationsschnittstellen auszugeben. Zusätzlich wird mittels verschiedener Sicherheitsfunktionen verhindert, dass die Batterie in einem kritischen Zustand gerät, wie Überhitzung

oder Tiefenentladung, um ihre Lebensdauer zu verlängern und auch schwerwiegende Folgen einer thermischen Überhitzung zu eliminieren. Dadurch sollen Fahrzeug und Insassen sicher vor Gefährdung sein.



Abbildung 2: Funktionen des Batteriemanagementsystems

Im Fokus dieser Arbeit steht der Ladungsausgleich durch das aktive Balancing. Folgend wird zunächst auf das Balancing allgemein und anschließend auf die Notwendigkeit des Balancings eingegangen.

BALANCINGSYSTEM

Die Erhöhung der Batteriespannung wird durch eine Reihen Verschaltung von mehreren Einzelzellen erreicht. In einer solchen Reihenschaltung bestimmt die Zelle mit der kleinsten Kapazität die Gesamtkapazität der Batterie. Das Problem dabei ist, dass nicht nur eine große Menge an Energie in den anderen Zellen ungenutzt bleibt, sondern die schwächste Zelle auch beim Laden und Entladen geschützt werden muss. Der Lösungsansatz ist zu versuchen den Ladezustand aller Zellen auf das gleiche Niveau zu bringen. Diesen Ausgleichsvorgang nennt man Balancing.

Dieses Balancing ist notwendig, da es nicht möglich ist in der Herstellung alle Zellen exakt gleich zu fertigen. Die unterschieden der Zellkapazität rühren daher von einer Abweichung in der Herstellung des physischen Volumens, das zur Speicherung der Ladung zur Verfügung steht [6]. Zusätzlich ändert sich die Kapazität einer Zelle über Zeit. Verschiedene Alterungsmechanismen aufgrund von u.a. Betrieb und Lagerung haben Einfluss auf die Kapazität. Die wichtigsten Parameter, welche sich auf den Alterungsprozess auswirken sind SOC, Temperatur, Entladestrom und Entladetiefe [7]. Als letztes können sich aufgrund von Selbstentladung und variierender Leck- und Ruhestrome der angeschlossenen Elektronik über einen längeren Zeitraum unterschiedliche Ladezustände einstellen.

Ein gängiger Wert für interne Impedanzunterschiede zwischen einzelner Zellen einer Produktionscharge ist etwa 15%. Eine höhere Impedanz begrenzt die speicherbare Energiemenge. Diese Impedanzunterschiede wirken sich nicht direkt auf die OCV aus, jedoch führen sie zu Spannungsunterschieden während der Entladung [8]. Beide Fälle resultieren in einer höheren Spannungsbelastung der Zelle mit höherer OCV. Angenommen wird eine Batterie von vier Zellen in Reihe mit je 4,2 V Spannung. Eine dieser Zellen hat weniger Kapazität als die anderen drei. Der Akku wird mittels CC / CV (Konstantstrom / Konstantspannung) auf 16,8V geladen. Aufgrund der unterschiedlichen Kapazität ist die Zellspannung nicht bei allen vier Zellen gleich. Die Spannung der defekten Zelle ist höher als die Spannung der anderen Zellen und auch höher als 4,2 V. Die Spannung der anderen drei Zellen liegt dagegen unter 4,2 V. Weißt die schwache Zelle eine Kapazitätsmangel von mehr als 10% zur Gesamtkapazität auf steigt ihre Spannung in eine gefährlichen Bereich von über 4,3V. Dies führt bestenfalls zu einer weiteren Verschlechterung der Zelle im schlimmsten Fall jedoch zu einem starken Sicherheitsrisiko und zur Explosion. Ein weiteres Problem das dadurch entsteht, ist die durchgehend schneller voranschreitende Verschlechterung. Der Grund hierfür ist, dass sobald eine Zelle eine geringere Kapazität aufweist, wird sie während der Ladung einer zunehmend höheren Spannung ausgesetzt, wodurch sie noch schneller abbaut und ihr Kapazität noch geringer wird [9].

Neben der bereits erwähnten Ursachen gibt es noch einen weiteren Grund für ein Ungleichgewicht, die Wärmedifferenz innerhalb eines Batteriemoduls. Dies führt zu unterschiedlichen Selbstentladungsraten der Zellen. Bei einem Akku-Pack mit einer Selbstentladungsrate von 1% pro Monat bei Raumtemperatur, führt die Installation an einem Ort, welcher ein Temperaturgefälle von 10°C über das gesamte Pack zu einem Ungleichgewicht der Zellen von 0,2% pro Tag [10]. Dies entspricht etwa 6% innerhalb eines Monats, 132mAh bei einer 2200mAh Zelle.

BALANCINGBEDARF

Der Balancingbedarf hängt von unterschiedlichen Kriterien ab. Er variiert stark anhand der verwendeten Zellen, dem Alter und Zustand dieser Zellen, der Verschaltung und den Balancingkriterien. In [11] wurde ein auf die Zellkapazität bezogener Balancingbedarf von 0,7% pro Monat und Zelle abgeschätzt. Dieser Wert wurde in der beschriebenen Arbeit anhand eines zwölfmonatigen zyklischen Alterungstests mit 1200 äquivalenten Vollzyklen an Batteriemodulen (39,2Ah) berechnet. Daraus folgt ein Balancingbedarf von 2.8mAh pro Zyklus und Modul [11]. Nach [12] liegen Balancingströme bei ca. 100mA für 40Ah Zellen. Die Ströme sind abhängig von der Zellkapazität, der gewünschten Balancingdauer, der zu erwartenden Zellunterschiede und der Wärmeentwicklung während der Balancings.

PASSIVES BALANCING

Die derzeit bekannteste und einfachste Methode des Balancings ist das passive Balancing, auch als Dissipativsystem bekannt. Bei dieser Technologie handelt es sich um eine Topologie welche ausschließlich das Balancing während der Ladevorgangs unterstützt. Dies wird durch zusätzliche Widerstände erreicht, die zum Ausgleichen der Zellspannungen Energie in Wärme „verbrennen“. Dies geschieht, wenn die Differenz zwischen der größten und kleinsten Zellspannung eine gewählte Differenz überschreitet. Bei dieser Methode geht die Balancingenergie über ein dissipatives Element verloren. Dadurch entstehen große Wärmeverluste durch hohe Ströme über diese Widerstände. Somit ist ein gutes Wärmemanagement der Zellen nötig, um diese Wärmeverluste zu steuern. Der größte Vorteil dieser Methode ist die technisch einfache und kostengünstige Umsetzung. Sie benötigt zudem weniger Platz und Komponenten als andere Ausgleichsschaltungen. Nachteilig ist, dass der Vorgang des Ladens lange dauert, denn er wird so lange wiederholt bis die schwächste Zelle den gewünschten SOC aufweist [13].

AKTIVES BALANCING

Das aktive Balancing wird auch als nicht dissipatives System genannt. Das Ziel ist es die überschüssige Energie der „starken“ Zellen nicht als Wärme zu verlieren, sondern zu verschieben. Dabei wird die Energie in einem Element zwischengespeichert und im nächsten Schritt einer der schwachen Zellen zugeführt. Daraus folgt eine sehr aufwendige und kostenintensive Konstruktion und System. Dennoch birgt es in Zeiten immer größeren Energiebedarfs eine gute Möglichkeit Energie einzusparen. Zudem gibt es die Möglichkeit die Ladezeit zu verkürzen, da die Energie nicht verschwendet wird. Der wohl größte Vorteil ist, dass sich die Technologie nicht nur auf den Ladevorgang beschränkt, sondern auch während der Entladung genutzt werden kann. Daher kann es die richtige Wahl für Elektrofahrzeuge sein um deren Reichweite zu erhöhen und die Ladedauer zu verkürzen. Dabei gibt es verschiedene Kategorien [14]:

- Zelle zu Zelle: Energie wird zwischen benachbarten Zellen bewegt
- Zelle zu Batterie: Die Energie wird aus den vollgeladenen Zellen entnommen und der gesamten Batterie zugeführt
- Batterie zu Zelle: Die Energie wird aus der gesamten Batterie entnommen und der am wenigsten geladenen Zelle zugeführt
- Bidirektional: Je nach Bedarf entweder von Zelle zu Batterie oder von Batterie zu Zelle

In [14] wurden diese Kategorien verglichen und nach Anwendung beschrieben. Dabei eignet sich die Zelle zu Zelle Variante am besten für kleine Batterien mit wenig Zellen. Zellen zu Batterie Balancing ist am einfachsten in der Umsetzung und hat den größten Wirkungsgrad. Batterie zu Zelle ist am geeignetsten für die Verwendung von einem Ladegerät mit N Ausgängen für N Zellen. Eine Bidirektionale Struktur ist am besten für die Umverteilung von Energie geeignet.

AKTIVE BALANCING-TOPOLOGIEN

SINGLE KONDENSATOR

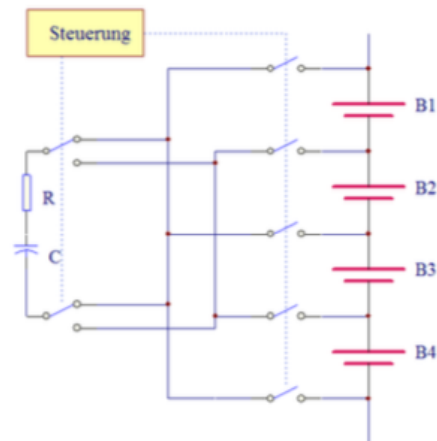


Abbildung 3: Balancing Schaltung mit Single Kondensator [17]

Wie Abbildung 2 zeigt wird ein Kondensator und $n+1$ Schalter für n Zellen gebraucht [18]. Diese Technologie benutzt eine einfache Strategie. Überschreitet der Spannungsunterschied zwischen zwei Zellen einen Schwellenwert, lädt der Kondensator die Energie zwischen den beiden Zellen um. Durch die Schalter ist dies möglich, ohne dass diese beiden Zellen neben einander liegen. Je geringer der Spannungsunterschied ist, desto niedriger ist der Energieaustausch zwischen den Zellen pro Schaltzyklus. Die Ausgleichsgeschwindigkeit dieser Methode ist gering, kann jedoch durch eine intelligenteren Steuerung erhöht werden. Zudem ist eine sehr sichere und verlässliche Steuerung nötig. Sollte ein Fehler am Schalter passieren, entsteht ein Kurzschluss zwischen benachbarten Zellen [17].

MULTI KONDENSATOR

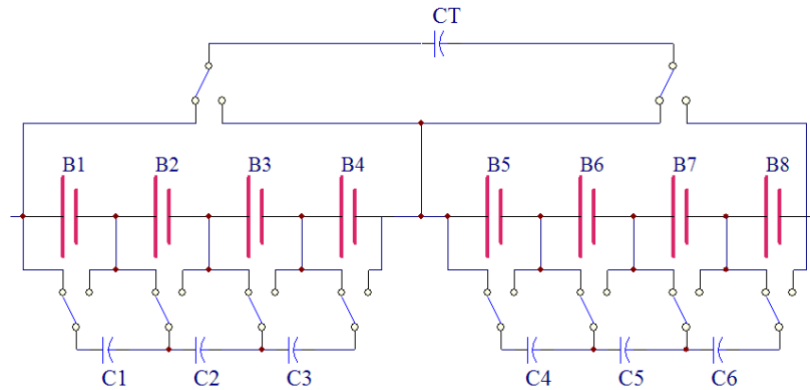


Abbildung 4: Multi Kondensator Balancing Topologie [17]

Eine weitere Variante des Energieaustauschs wird in [17; 18] beschrieben. Wie in Abbildung 3 zu sehen ist, erfordert diese Methode $n-1$ Kondensatoren $n+2$ Schalter für n Zellen. Diese Technologie kommt ohne zusätzliche intelligente Steuerung aus, da alle Schalter nur zwei Zustände haben. Die Zellen werden zunächst auf das Spannungsniveau aufgeladen, wodurch kein Kurzschluss entstehen kann bei Fehlbedienung der Schalter. Im Vergleich zur ersten Topologie kann der Energieaustausch nur zwischen zwei benachbarten Zellen erfolgen [17]. In Lithium-Ionen-Batterien ist die Zellenausgleichsgeschwindigkeit des geschalteten Multi-Kondensators langsam, wenn die äußeren Zellen nicht ausgeglichen sind. Um die Geschwindigkeit des Zellenausgleichs zu erhöhen, können die in [19] zusammengefassten Kettenstrukturen des geschalteten Kondensators angewendet werden. Der Wirkungsgrad der beiden Varianten ist gleich. Die auf geschalteten Kondensatoren basierende Methode hat viele Vorteile. Diese sind unter anderem die einfache Implementierung, geringes Volumen, geringe Kosten und hohe Leistung. Der Nachteil ist die relativ lange Ausgleichzeit.

SINGLE INDUKTIVITÄT

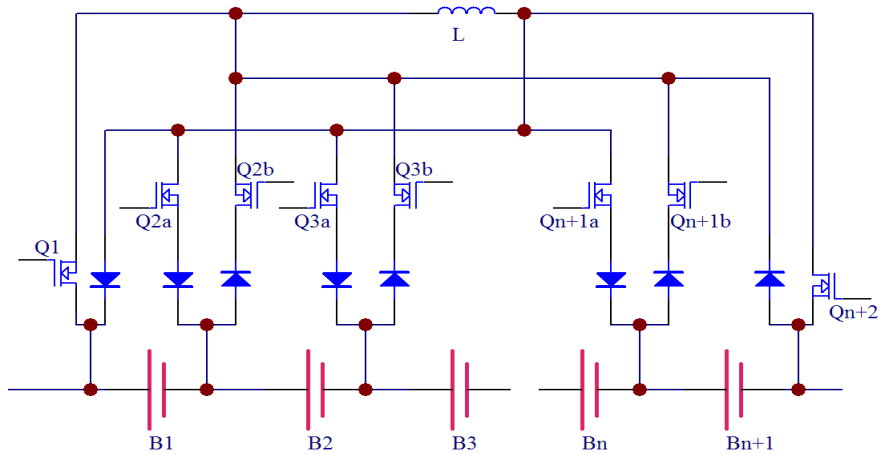


Abbildung 5: Balancing Topologie mit Singel Induktivität [17]

Eine weitere Topologie der Energiespeicherung, nutzt nach [18; 20] eine Induktivität. Diese Methode nutzt eine Spule zum Energieausgleich, wie in Abbildung 4 gezeigt. Das Steuersystem erfasst die Spannung der Zellen und wählt die beiden Zellen aus, welche für die Energieübertragung genutzt werden [18]. Die Spule speichert die Energie zwischen. Nach Abschalten der Stromzufuhr baut sich das magnetische Feld ab und gibt die Energie an die gewählte Zelle weiter. Aufgrund des relativ hohen Ausgleichstroms bieten sie eine geringere Ausführungszeit für den Ausgleich [21]. Dafür wird eine komplizierte Schaltung mit vielen ICs und Bauelementen benötigt. Durch Ausfälle in der Software, mangelnde Qualität der ICs und Bauteile kann ein großes Sicherheitsrisiko bestehen [17].

MULTI INDUKTIVITÄT

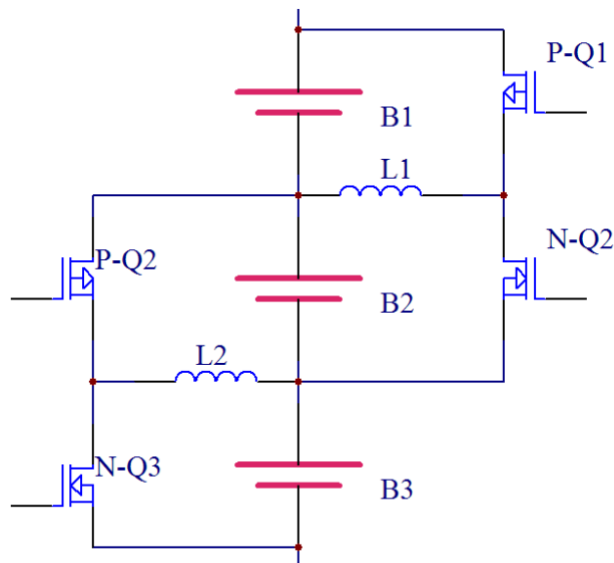


Abbildung 6: Multi Induktivität Balancing Topologie [17]

Nach [18] werden in einem Multi Induktivität System $n-1$ Spulen zum Ausgleichen von n Zellen verwendet, siehe Abbildung 5. Die Steuerung erfasst die Spannungsdifferenz der zwei benachbarten Zellen und legt anschließend ein PWM-Signal mit der Bedienung an, dass die übergeordnete Zelle zuerst eingeschaltet werden muss. Das Prinzip besteht darin, Energie von der Hochspannungszelle zur unteren Zelle zu übertragen. Der Hauptnachteil ist die lange Ausgleichszeit, da die Energieübertragung von der ersten zur letzten Zelle lang ist, wodurch sich eine lange Ausgleichszeit ergibt. In [22] die beschriebene Schaltung entwickelt. Es zeigt sich, dass diese Variante im Vergleich zu Single-/Multi-Kondensator Methode gute Ausgleichsgeschwindigkeiten hat, zusätzlich enthält es weniger Schalter. Dadurch ist die Methode effizienter und weist weniger Verluste auf. In [23] wurden unterschiedliche Architekturen für Ladungstransfers vorgestellt und geeignete Lösungen für die schnelle Simulation und beste Strategie des aktiven Balancing untersucht. So kann die Energie mit hoher Effizienz zwischen geordneten Zellen übertragen werden.

SINGLE WINDING TRANSFORMER

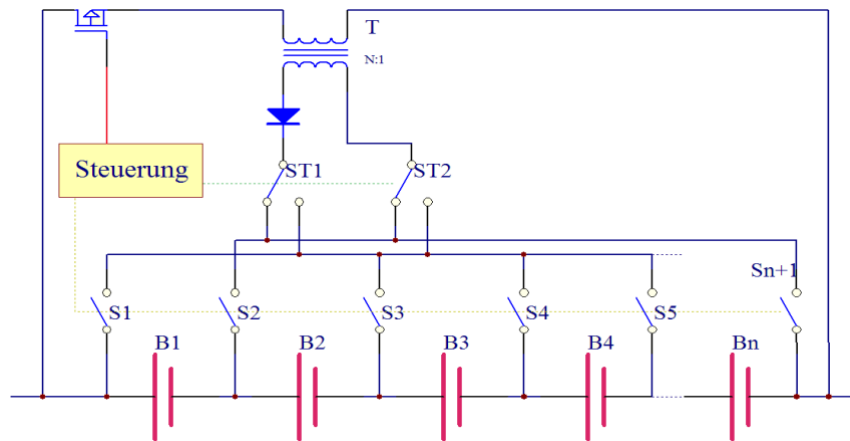


Abbildung 7: Balancing Technologie Single Winding Transformer [17]

Abbildung 6 zeigt das Schaltbild der Single Winding Transformer Technologie, auch bekannt als „geschalteter Transformator“ genannt. Die Variante beruht auf dem Prinzip des Sperrwandlers [17; 18; 21]. Mit dieser Topologie kann die Ladung „Modul zu Zelle“ und „Zelle zu Modul“ transportiert werden. Die Primärseite des Transformators wird mit dem gesamten Batteriemodul durch einen Schalter verbunden und die Sekundärseite des Transformators wird mit Hilfe einer 2-n Schaltmatrix mit n Zellen der Schaltmatrix gekoppelt. Soll eine Zelle geladen werden, wird in der ersten Phase der Primärschalter geschlossen und es baut sich ein magnetisches Feld in der Primärspule auf. In der zweiten Phase öffnet der Primärschalter und schließt den Sekundärschalter. Der Strom aus der Sekundärspule lädt die gewünschte Zelle. Ist die Energie im Transformator vollständig abgebaut, werden die Sekundärschalter wieder geöffnet. Mit diesem Verfahren kann eine große Ladungsmenge ausgetauscht werden. Probleme bereitet das schnelle Schalten von hohen Strömen. Vorteile dieser Methode sind die schnelle Übertragung der Energie, zusätzlich treten wenig Verluste auf. Nachteilig ist die kostenintensive Implementierung.

MULTI WINDINGS TRANSFORMATOR

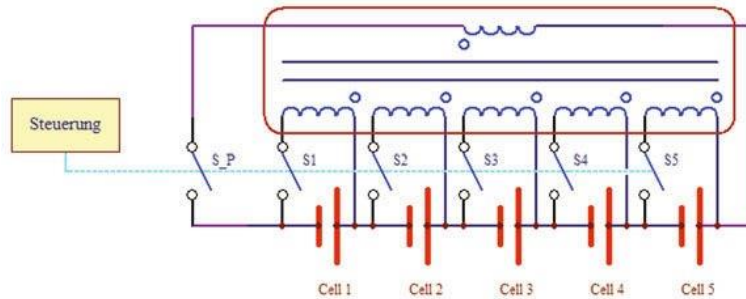


Abbildung 8: Balancing Technologie Mutli Windings Transformator [17]

Abbildung 7 zeigt die zweite Variante einer Balancingtopologie mit einem Transformator. Dabei wird jede Zelle mit eigener sekundärseitigen Wicklung verbunden und kann nur für die jeweilige Zelle einen Balancingstrom liefern. Die Primärseite des Transformators ist über das Schaltelement mit der Gesamtbatterie verbunden. Sobald eine erhöhte Spannungsdifferenz detektiert wird, wird der an der Zelle mit höchster Spannung befindliche Schalter eingeschaltet. Beim Abgeben der gespeicherten Energie fließt der Strom durch den zugeschalteten primärseitigen Schalter in die gesamte Batterie zurück [17]. Diese Topologie benötigt für n Zellen n sekundärseitige Windungen und $n+1$ Schalter [18]. Ein Nachteil dieser Anordnung ist die kostenintensive und aufwendige Herstellung. Der größte Vorteil jedoch ist die sehr einfache Handhabung mit nur einem Schaltelement.

MULTIPLE TRANSFORMATOR

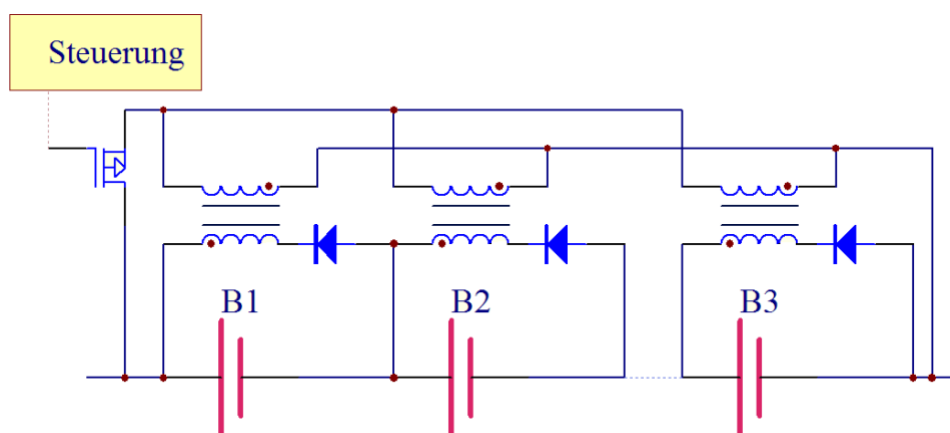


Abbildung 9: Balancing Technologie Multiple Transformator [17]

Die letzte Anordnung des Zellenausgleichs mit Transformator ist in Abbildung 8 dargestellt. Dabei erhält jede Zelle einen eigenen Speicherkern [18]. Das Balancing einer Zelle kann in beidseitiger Richtung erfolgen, zum Aufladen und Entladen. Diese Methode ist sehr gut für den modularen Aufbau geeignet [17]. Durch die vielen Schaltelemente und Transformatoren entstehen hier höhere Verluste gegenüber der Multi Windings Technologie. Zudem sind die Schaltung und Steuerung komplizierter.

WANDLER



Abbildung 10: Wandler des aktiven Balancing

Abbildung 9 zeigt verschiedene Wandler des aktiven Balancing nach [18; 21]. Mit den vorgestellten Wandlertypen wird kein Anspruch auf Vollständigkeit gesetzt, da die Anzahl der in der Literatur beschriebenen Schaltungen zu groß ist. Es wurden vielmehr die Grundsaltungen vorgestellt, aus denen die meisten gleichen Schaltungen resultieren. Dabei folgen alle Transformator Topologien dem Prinzip des Sperrwandlers, auch Flyback Wandler genannt. Alle Arten des des Balancings zeichnen sich durch eine vollständige Kontrolle aus. Das aktive Balancing hat allerdings relativ hohe Kosten und Komplexität im Vergleich zu passiven Balancing Methoden. In [24] wurde die Effizienz des aktiven Balancings mit Flyback Wandler untersucht und es ergibt sich ein Wirkungsgrad von 70%. In [25; 26; 27; 28] wird das aktive Balancing mit Flyback Wandler hinsichtlich Reduzierung der Kosten, Erhöhung der Batteriekapazität und Maximierung der Leistung und Zuverlässigkeit der gesamten Batterie untersucht.

Insgesamt hat das aktive Balancing mit Flyback Wandler eine höhere Energieübertragungseffizienz als eine passive Ausgleichsschaltung. Dem gegenüber stehen höhere Kosten und ein komplexer Steuerungsalgorithmus. Da jede Zelle mit zusätzlichen passiven Komponenten und aktiven Schaltern verbunden ist.

MARKTSTUDIE AKTIVE BALANCINGSYSTEME

Die Firma *Mountain Embedded* liefert als eines ihrer neuesten aktiven Balancingsysteme eine dezentrale Lösung auf dem Prinzip eines DC-DC Wandlers mit sehr hohem Wirkungsgrad von Zelle zu Zelle. Dieses System stellt einen sehr guten Ansatz eines Balancers dar. Jede Platine sorgt autark für den Ausgleich zwischen ihrer verbundenen Zelle und ihrer Nachbarzelle in Pluspol-Richtung. Dies erübrigt den Gebrauch eines separaten Controllers, jedoch werden viele Leitungen benötigt. Der Ladungstransfer läuft mit hohem Wirkungsgrad von Zelle zu Zelle ab, ohne externe Puffer. Die Platinen laufen autark, kommunizieren jedoch zusätzlich digital entlang der Kette. Dieser Balancer ist nicht für jeden Lithium-Zellen Typ geeignet. Er ist nur für Lithium-Eisen-Phosphat Zellen (3,3V) und Lithium-Polymer-Zellen (3,7V) einsetzbar [29].

Linear Technology bietet gleich mehrere Systeme aktiver Balancer mit hohem Wirkungsgrad an [30; 31; 32]. Diese Systeme arbeiten auf dem Prinzip des Flyback DC-DC Wandlers parallel zu jeder Zelle. Mit den ICs LT8584 und LT6804 können einzelne Batteriemodule aus bis zu zwölf Zellen aufgebaut werden. Die dadurch aufgebauten Systeme nutzen Flyback Konverter, um die einzelnen Zellen zu entladen. Dieser Vorgang ist bidirektional und kann somit sowohl von Zell zu Modul als auch umgekehrt ablaufen. Zusätzlich stellt die Firma die fehlergeschützten Controller-ICs LTC3300-1 und LTC3300-2 her. Diese sind geeignet für transformatorbasierte bidirektionale aktive Balancingsysteme von Batteriemodulen. Ein einzelner LTC3300-1 kann bis zu 6 in Reihe geschaltete Batteriezellen mit einer Eingangsgleichspannung von bis zu 36V ausgleichen. Allerdings sind diese Systeme nicht auf 6 Zellen beschränkt, sollen mehrere Zellen in Reihe betrieben werden ermöglicht *Linear Technology* ebenfalls eine Reihenschaltung der Module. Dazu sind die Transformator Anschlüsse auf der Sekundärseite benachbarter Module zu überlappen.

Texas Instruments bietet ebenfalls eine Mehrheit technischer Lösungen zur Zellüberwachung und zum aktiven sowie passiven Balancing an. Zum aktiven Balancing und Ladungsausgleich zwischen Zellen zu ermöglichen nutzt *TI* die Power Tump™ Technologie mit den ICs BQ78PL116 und BQ76PL102 [33; 34]. Diese Technologie ermöglicht ebenfalls einen bidirektionalen Energieaustausch.

TI liefert mit seiner neu Entwicklung ein aktives Balancingsystem mit Flyback-Konverter [35]. Mittels Schaltmatrix kann die Schaltung des Flyback Wandlers zwischen sieben Zellen hin her schalten. Diese Schaltmatrix besteht aus acht bidirektionalen Leistungsschaltern welche durch das IC EMB1428Q angesteuert wird. Zusätzlich wird der Flyback-Konverter durch das IC EMB1990Q angesteuert.

In [36; 37] werden aktive Balancingsysteme mit Flyback-Konverter der Firma *Infineon* beschrieben. Diese Variante ermöglicht sowohl Top-Balancing, als auch Bottom-Balancing. Der verwendete Flyback-Konverter besteht aus nur einem Transformator. Jede Zelle wird mit einer eigenen Sekundärwicklung gekoppelt und die Primärwicklung ist mit der gesamten Batterie verbunden. Die Zellen werden mittels Schalter mit dem Transformator verbunden und entladen, anschließend wird die Energie über die Sekundärseite des Transformators an den gesamten Strang abgegeben.

AMS bietet ein Demoboard unter Verwendung des IC AS8506 an [38]. Ähnlich wie *Infineon* bietet *NXP* ein aktives Balancing mithilfe eines DC-DC Konverters an [39]. Anders als die bisher genannten Firmen nutzt *Atmel* in [40] eine Spule für das aktive Balancing. Allerdings kann die mit diesem Demoboard die Energie nur zwischen zwei benachbarten Zellen übertragen werden. Durch Verwendung eines zusätzlichen Transformators wird die Energieübertragung von der untersten zur obersten Zelle ermöglicht.

Im Folgenden wird eine Bewertungsmatrix zur Marktstudie erstellt. Das Ziel dieser Analyse ist es eine objektive Betrachtung der aktuell verfügbaren und bereits erwähnten aktiven Balancingsysteme. Die Bewertung wird nach VDI 2225 Vorgenommen. Dazu werden Bewertungskriterien mit Betrachtung von technischen Anforderungen festgelegt. Da die einzelnen Kriterien eine unterschiedliche Wichtigkeit innerhalb des Systems besitzen wurden ihnen Gewichtungsfaktoren zugeordnet in Betrachtung der Umsetzung innerhalb des eLaketric Racing Teams. So kann der Einfluss der Kriterien verdeutlicht werden. Diese Bewertung ist in Tabelle A.1 zu sehen. Die Matrix weist jedem Kriterium eine Wertigkeit von erstrangig (+) über zweitrangig (-) bis gleichrangig (0) zu. Das Kriterium erhält ein Pluszeichen, wenn das einzelne Kriterium in der „horizontalen Anordnung“ wichtiger als die der „vertikalen Anordnung“ ist, andernfalls wird ein Minus vorgesehen. Wenn das Kriterium gleichrangig ist wird eine Null eingetragen. Die Wertigkeit ergibt sich aus der Summe aller Pluszeichen einer Zeile. Der Gewichtungsfaktor (g_i) errechnet sich aus den Wertigkeiten (w_{ij}) aus folgender Formel:

Gewichtungsfaktor:
$$g_i = \frac{w_{ij}}{\sum(w_{ij})}$$

Abbildung zeigt die Bewertung der am Markt verfügbaren Systeme. Die Kriterien sind mit Punkten anhand der Marktstudie bewertet und anschließend mit dem Gewichtungsfaktor multipliziert. Anschließend werden die Punkte summiert und die Lösungen verglichen.

Kriterien	Gewichtungs-faktor	Benchmark							
		Aktive Balancer für Lithium-Akkuketten (Mountain Embedded)		LTC3300-1/ -2 Bidirectional Multicell Battery Balancer (Linear Technology)		LT8584 Monolithischer Flyback DC/DC Wandler (Linear Technology)		EMB1428Q & EMB1499 DC/DC Switch Matrix Driver active Balancer (Texas Instruments)	
Ausgleichstrom	0,25	Max. 5A je Nachbarzelle	2	bis zu 10A	3	Max. 2,5A, nur beim Entladen	2	2A bis 5A	2
Wirkungsgrad	0,08	>92% (bidirektional DC-DC-Wandler)	4	bis zu 92% (bidirektionaler Flyback Wandler)	4	bis zu 92% (bidirektionaler Flyback Wandler)	4	bis zu 93% Ladungstransfer	4
Zellenanzahl	0,25	einzelne Platine für jede Zelle	0	6 Zellen pro IC, n/6 Ics für n Zellen	3	ein IC pro Zelle	0	7 Zellen pro IC, n/7 Ics für n Zellen	3
Bauraumbedarf	0,17	einzelne Platine für jede Zelle nötig	1	großer Bauraumbedarf für ein Batteriemodul	1	großer Bauraumbedarf	2	großer Bauraumbedarf für ein Batteriemodul	1
universelle Anwendbarkeit	0,08	Nutzung von LiFe und Li-Polymer Zellen aus E-Fahrzeugen	3	Li-Ion und LiFePO4 Zellen und anwendbar in >1000V Systems	4	Anwendbar in HV-Batterien	4	Nutzung von Li-Ion Zellen, HV-Systeme und 48V-Batterien	4
Bewertung			1,23		2,31		1,48		2,06

Abbildung 11: Bewertungsmatrix Benchmark aktives Balancing

Die Punkte von 1 bis 4 bewerten die Benchmarks anhand der Kriterien von unbefriedigend bis sehr gut. Es ist zu erwähnen, dass die Bewertung speziell auf die Batterie des eLaketric Racing Teams ausgelegt ist. Die Bewertung muss für jede Änderung der Batterie oder des Einsatzgebietes neu durchgeführt werden.

Das Kriterium des Ausgleichstroms ist besser, je höher der mögliche Ausgleichsstrom ist. Denn je höher der Strom desto kürzer die Dauer des Ladungsausgleichs. Daher wird ein Ausgleichsstrom ab 10A als sehr gut eingestuft und kleiner als 100mA als unbefriedigend. Im Vergleich zum passiven Balancing wird das aktive Balancing als verlustlos eingestuft, da keine Energie absichtlich in Wärme umgesetzt wird. Aus diesem Grund wird ein Wirkungsgrad über 90% als sehr gut bewertet und unter 70% als unbefriedigend. Die Auswertung gibt eine Aussage über den geeignetsten Lösungsansatz zur Anwendung im Rennmotorrad Amperia. Der aktive Balancer LT3300-1/2 der Firma *Linear Technology* liegt in der technischen Wertigkeit knapp vor der aktiven Balancer Variante der Firma *Texas Instruments*.

LASTENHEFT AMPERIA 20

IST-ZUSTAND AMPERIA-18

Das aktuelle BMS stammt von der Firma *Elektromotus* aus Litauen. Es handelt sich um das Model Emus BMS. Das Master Modul ist mit 28 Slave Modulen verbunden, jeder parallele Zellenstrang besitzt ein Slave Modul. Es wird somit immer die äußerste Zelle überwacht, da davon ausgegangen wird, dass diese die anfälligste Zelle des Stranges darstellt. Der Bus ist als Ringstruktur angeordnet. Es wird somit nicht jede einzelne Zelle überwacht, sondern jeder einzelne Strang. Dabei werden folgende Werte überwacht:

- I_{gesamt}
- $U_{Parallel\ Strang}$
- U_{gesamt} (Addition)
- $Temp_{slave}$

Die Slave Module überwachen die Spannung und Temperatur der einzelnen Parallelstränge. Sie sind am äußeren Ende der Parallelstränge direkt an der Zelle angebracht. Die Module werden mit dem Plus- und Minuspol der Zellen und zur Kommunikation seriell mit den anderen Modulen verbunden. Der Stromsensor ist in Reihe der Hochstromleitung verbaut und misst den Strom von Batterie zu Motorcontroller. Er ist direkt mit der Control Unit verbunden.

Das BMS übernimmt dabei als Hauptaufgabe die Überwachung der Batterie und Steuerung des Ladevorgangs der Batterie und schützt diese vor Beschädigung. Dabei reagiert das BMS mit einem NOT-Aus, wenn eines der folgenden Probleme auftritt:

- I_{gesamt} → zu groß
- $U_{Parallel\ Strang}$ → zu groß / zu klein
- U_{gesamt} (Addition)
- $Temp_{slave}$ → zu groß

Auf Basis dieser Werte wird der aktuelle Ladezustand geschätzt. Das BMS fungiert als passives BMS bei Entladung und Ladung. Um alle Zellen möglichst gleichmäßig und auf das gleiche Niveau zu laden, werden die Zellen geladen und sobald eine gewisse Differenz zwischen den einzelnen Spannungswerten der Stränge überschritten ist wird das Laden unterbrochen. Es folgt eine Entladung der Stränge bis auf das Spannungsniveau des niedrigsten Strangs. Dies geschieht über einen Lastwiderstand am Slave, welcher die Energie als Wärme abgibt. Anschließend beginnt erneut das Laden der Zellen bis die Differenz wieder überschritten ist. Dieser Vorgang wiederholt sich bis dieser Prozess nicht mehr funktioniert, da die Schwelle zu gering ist und die Batterie als vollgeladen gilt. Ein großer Nachteil dieser Methode ist, dass das Laden der Batterie sehr lange dauert, viel Wärme erzeugt wird und Energie dadurch „verbrannt“ wird.

Beim Entladen beendet der schwächste Strang der Batterie die Entladung, wenn eine vorgegebene Spannung bzw. SOC erreicht ist. Dadurch können andere Stränge noch deutlich mehr Energie haben, welche allerdings nicht genutzt werden kann. Somit verliert die gesamte Batterie an nutzbarer Kapazität.

Die Control Unit liest die Daten der Slave Module und des Stromsensors aus und verarbeitet diese. Sie steuert den Ladevorgang über ein Relais (Ansteuerung über CAN möglich).

Das BMS und der Sevcon Motorcontroller sind mit CAN verbunden haben aktuell aber keinerlei Kommunikation.

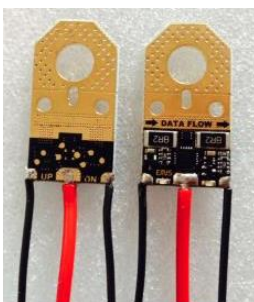


Abbildung 12: Slave Modul



Abbildung 13: Batterie mit Slave Modulen

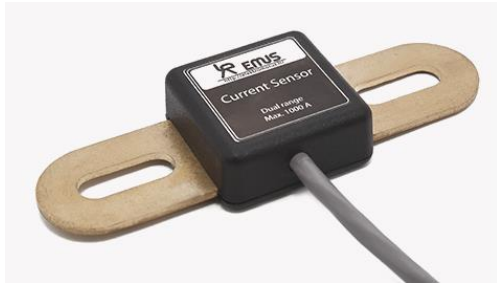


Abbildung 14: Stromsensor



Abbildung 15: Mastercontrol Unit

SOLL-ZUSTAND AMPERIA 20

Das neue BMS soll die gleichen Aufgaben erfüllen wie das Aktuelle. Dabei soll es die Batterie während des Ladens und Entladens schützen. Sie soll geschützt werden vor Tiefenentladung, Überladung, thermischer Zerstörung und ungleichmäßiger Ladung oder Entladung. Darüber hinaus soll die Ladezeit der Batterie verkürzt werden und die Ausnutzung der Kapazität, mittels dynamischen Ausgleichs (active Balancing) während der Be- und Entladung verbessert werden. Die Anzahl der Temperatursensoren soll von einem auf zwei bis drei pro Strang erweitert werden. Zusätzlich soll nicht nur eine Kommunikation während des Ladevorgangs mit dem Ladegerät erfolgen, sondern auch während der Entladung mit dem Motorcontroller bestehen.

Die Strommessung soll ebenfalls über einen Stromsensor erfolgen. Die Temperatur und die Spannung sollen ebenfalls über Slave Module an des Strängen gemessen werden.

Mittels dieser Werte Soll von einer zentralen Steuereinheit folgende Aufgaben erfüllt werden:

- *Überwachung der Zellspannung und -temperatur*
- *Schätzung des Ladezustands und der Alterung*
- *Begrenzung der Eingangsleistung und Ausgangsleistung zum Schutz vor Überhitzung und Überladung*
- *Steuerung verschiedener Ladeprofile*
- *Ausbalancieren des Ladezustands einzelner Stränge*
- *Isolation des Batteriepakets gegenüber der elektrischen Last*
- *Freischalten der Batterie*

Das Balancing soll aktiv erfolgen, wofür ein Vergleich von kapazitiven und induktiven Schaltungstypen erstellt werden soll. Die Steuerung soll über eine zentrale Einheit erfolgen. Entweder mit erprobten Technologien aus dem automotive Bereich oder gängige leistungsfähige μC .

SCHNITTSTELLEN BMS

Zur Kommunikation mit anderen Steuergeräten und zum Anschluss von wichtigen Sensoren oder Bauteilen benötigt das BMS einige Schnittstellen. Folgend sind die notwendigen Schnittstellen des Systems aufgeführt:

- CAN Schnittstelle
- Analoge I/O
- Digitale I/O
- USB
- Serielles Zellkommunikationsinterface
- Stromsensor Eingang
- Display Anschluss

Die CAN Schnittstelle dient zur Kommunikation mit verschiedenen anderen Systemen und Steuergeräten. Analoge und Digitale Eingänge dienen zum Anschluss von verschiedenen Sensoren oder Steuersignalen. Eine USB Schnittstelle kann zum Anschluss von Speichermedien für späteres auswerten der Daten verwendet werden. Zusätzlich kann der Anschluss auch zum Einstellen der Parameter des Systems über eine direkte PC-Kommunikation erfolgen. Das serielle Kommunikationsinterface dient zum Anschluss der einzelnen Zellstränge. Ein Stromsensor Eingang ist notwendig zur Kontrolle des fließenden Stroms und zu dessen Regelung, um die Zellen und das System zu schützen. Ein zusätzlicher Display Anschluss ist wünschenswert zur Aktuellen Anzeige relevanter Daten.

KENNGRÖßEN BATTERIE

Zusätzlich zu den relevanten Schnittstellen sind die Kenngrößen der Batterie wichtig für die Auslegung des Systems. Diese sind im Folgenden aufgeführt:

- Serieller Strang ca. 31 Zellen
- Paralleler Strang ca. 22 Zellen
- Ladeschlussspannung 130,2 V
- Nennspannung 115,2 V
- Entladeschlussspannung 62 V
- Max. Entnahme Strom 660 A
- Nennkapazität 68,64 Ah
- Nennenergie 7,91 kWh
- Max. Energie 8,94 kWh

Die Anzahl der seriellen Stränge geben die Spannung der Batterie an. Die neue Batterie soll eine Anzahl von mindestens 31 Strängen aufweisen, wodurch die Ladeschlussspannung der Batterie bei 130,2 V liegt und bis zu einer Entladeschlussspannung von 62 V reicht. Die Nennspannung des Systems liegt bei 115,2 V. Der maximal entnehmbare Strom ergibt sich aus der Anzahl an parallelen Zellen. Somit stellen 22 parallele Zellen einen Strom von bis zu 660 A zur Verfügung. Die Gesamtkapazität der Batterie ergibt sich zu 68,64 Ah was ausreichend für etwa 35 bis 40 Rennkilometer ist. Die Energie der Batterie liegt bei maximal 8,94 kWh.

ANFORDERUNGEN BMS

Zunächst werden im Folgenden die funktionalen Anforderungen gezeigt. Diese muss das System besitzen, um die gewünschte Funktionalität zu erfüllen und als BMS in der Batterie eingesetzt zu werden.

- Spannungsmessung
- Temperaturmessung
- Strommessung
- Berechnung des SoC
- Berechnung des SoH
- Sofortiges Abschalten bei Fehlererkennung
- Steuerung der Ladeprofile
- Aktives Balancing während des Ladens und Entladens
- Konfiguration mittels PC

Neben den Grundaufgaben, die sowohl ein passives und ein aktives System erfüllen sind hier ebenfalls gewünschte Zusatzfunktionen aufgezählt. Zu den Kernaufgaben gehören die ersten vier Punkte der Aufzählung, diese muss jedes BMS besitzen. Die Berechnung des SoH ist eine Zusatzoption, wodurch der aktuelle Zustand der Zellen hinsichtlich ihrer Ladekapazität und Leistung bestimmt wird. Die Steuerung verschiedener Ladeprofile soll dazu dienen auf unterschiedliche äußere Bedingungen zu reagieren. So ist es beispielsweise notwendig an der Rennstrecke das Motorrad so schnell wie möglich wieder auf die Strecke zu schicken, dazu würde versucht werden den maximalen Ladestrom solange wie möglich aufrecht zu erhalten. Diese Variante ist allerdings schädlich für die Zellen, wodurch der SoH auf Dauer sinkt. Daher soll es möglich sein die Batterie „gesund“ zu laden, was jedoch zu einer deutlich längeren Ladezeit führt. Das BMS soll das aktive Balancing unterstützen, sowohl während der Lade – als auch während des Entladevorgangs. Als letzter Punkt soll das BMS über eine PC-Schnittstelle konfiguriert werden können.

Neben diesen funktionalen Anforderungen bestehen auch nichtfunktionale Anforderungen. Diese ergeben sich durch äußere Bedingungen und persönliche Wünsche. Folgend sind diese nichtfunktionalen Anforderungen aufgezählt.

- Optimales Nutzen der Bereits vorhanden Bauraum Fläche
- Einfache Benutzbarkeit aufgrund detaillierter Ausarbeitung und Code Kommentaren
- Hohe Zuverlässigkeit
- Hohe Effizienz
- Möglichkeit der nachträglichen Anpassung an neue Anforderungen
- Einfache Bedienbarkeit
- Einfacher Ein- und Ausbau zur Wartung und Analyse

Das BMS soll in etwa die gleichen Ausmaße der aktuellen Variante haben. Ziel ist es, dass kein zusätzlicher Bauraum geschaffen werden muss und das System so ausgelegt wird das es in die bisherige Batterie einfach eingefügt werden kann. Das System soll ebenfalls von Personen bedient werden können, welche nicht direkt an der Entwicklung dabei waren. Dadurch ist eine detaillierte Ausarbeitung und Dokumentation des Systems notwendig. Durch die hohen Anforderungen an Systeme im Rennsport soll eine hohe Effizienz und Zuverlässigkeit erfüllt werden. Dadurch soll die Ladezeit verkürzt werden, die Dauerleistung des Motorrads erhöht werden und Ausfälle aufgrund von Batterieproblemen verringert werden. Durch Veränderungen des Reglements von Saison zu Saison ändern sich die Anforderungen an das Batteriesystem. Die Änderungen von Saison 2018 zu Saison 2020 ergaben eine

Erhöhung der maximalen Nennspannung der Batterie, wodurch die Anzahl der seriellen Stränge verändert werden musste. Es wäre wünschenswert, wenn ein teilweise modularer Aufbau die Anpassung an solche neuen Anforderungen möglich macht ohne ein gesamtes System entwickeln zu müssen. Abschließend soll das entwickelte System eine einfache Bedienbarkeit aufweisen.

Nur bei fehlerfreier Funktionalität und 100%-iger Sicherheit wird ein tatsächlicher Einbau in das Batteriesystem des neuen Motorrads in Betracht gezogen. Denn die Sicherheit des Fahrers und Personals steht an oberster Stelle.

AUSWAHL DER AKTIVEN BALANCING TOPOLOGIE

In diesem Kapitel werden Vor- und Nachteile der Schaltungen diskutiert. Zusätzlich wird die Bewertung dieser Varianten aufgezeigt und die Entscheidung für eine Topologie getroffen.

VERGLEICH UND BEWERTUNG UNTERSCHIEDLICHER TOPOLOGIEN

Im Folgenden werden die beschriebenen Balancingvarianten unter verschiedenen Gesichtspunkten betrachtet. Die unterschiedlichen Topologien werden anhand von Schaltungsdesign, Anwendung, Implementierung, Ausgleichsgeschwindigkeit, Größe, Effizienz des Balancingsystems und Kosten verglichen.

Die Single Kondensator Variante ermöglicht einen Ladungstransfer im Lade- und Entlademodus, jedoch ohne der Möglichkeit Ladung zwischen zwei Batteriemodulen zu übertragen. Die Ausgleichsgeschwindigkeit mit Single Kondensator ist relativ gering, kann jedoch durch eine intelligente Steuerung erhöht werden. Zum Vergleich hat die Mutli Kondensatortopologie einen besseren Ausgleichstrom und hat eine leichtere Steuerung. Zum Nachteil wird die höhere Anzahl an Schaltern welche die Spannung komplett blockieren können. Allgemeine Vorteile der kapazitiven Schaltung sind der modulare Aufbau, die kleine Baugröße und eine relativ einfache Ansteuerung. Der Nachteil der Kondensator Technologie ist der höhere Einschaltstrom, wenn die Kondensatoren entladen sind [18]. Aus diesem Grund können SoC-basierte Balancingalgorithmen nicht umgesetzt werden.

Balancingschaltungen mit Induktiver Zwischenspeicherung ermöglichen ein Umladen zwischen benachbarten Zellen. Diese Technologie bietet ebenfalls einen modularen Aufbau, sowie gleich belastete Schalter und Spulen. Der größte Unterschied zwischen den beiden Varianten ist die höhere Ausgleichsgeschwindigkeit der Multi Induktivitäts-Schaltung verglichen zur Single Induktivität.

Zusätzlich gibt es die Transformator-Technologie mit Sperrwandler Topologie. Diese Technologie gibt es wie die vorherigen beiden als Single und Multi Transformator Schaltung. Vorteil der Single Transformator Schaltung ist, dass nur ein Transformator nötig ist, wodurch Platz und Gewicht bei der Implementierung eingespart wird. Nachteilig ist die Abhängigkeit der Ströme von der Wicklungsanzahl, somit ist nur ein spannungsbasiertes Balancing möglich. Da der Transformator nur ein Übersetzungsverhältnis besitzt, dass dem Verhältnis von Strangspannung zur Zellspannung entspricht,

ist diese Topologie nicht für große Zellstränge einsetzbar. Ein weiterer Nachteil ist, das Balancing wird nicht zwischen Modulen realisiert [20].

Der Aufbau einer Schaltung mit Sperrwandlertopologie basiert primärseitig und sekundärseitig auf seinem Transformator. Diese Balancingmethode lädt und entlädt die ungleiche Zellenergie über einen Transformator, der eine isolierte Struktur mit sicherer Energieübertragung bietet [6]. Bei der Schaltungsentwicklung sollte unbedingt der magnetische Hystereseverlust eines Transformator berücksichtigt werden, um einen hohen Wirkungsgrad der Energieübertragung zu gewährleisten. Der Steuerungsalgorithmus ist sehr komplex, wobei die Komplexität mit Anzahl der auszugleichenden Zellen steigt, da jede Zelle mit zusätzlichen passiven Komponenten und aktiven Schaltern verbunden wird. Neben der höheren Komplexität und größeren Anzahl der Bauteile ist diese Schaltung teurer und aufwändiger als andere Balancingschaltungen [20].

WAHL DER TOPOLOGIE

Das Ziel ist es eine Aussage über die aktive Zell-Balancingtopologie zu treffen. Die Bewertungskriterien sind anhand der technischen Anforderungen festgelegt. Da die Kriterien nicht gleich zu bewerten sind wird ein Gewichtungsfaktor hinzu gezogen, sodass deren Einfluss verdeutlicht werden kann. Diese werden in Tabelle A.2 gegenübergestellt und der Gewichtungsfaktor aus den Wertigkeiten berechnet.

Abbildung 16 zeigt die Bewertung der aktiven Balancingtopologien. Wie bereits im letzten Abschnitt sind die Kriterien mit Punkten bewertet und anschließend mit dem Gewichtungsfaktor multipliziert. Anschließend werden die Ergebnisse aufsummiert.

Die Auswertung zeigt, dass das aktive Balancing mit Multi Induktivität die höchste technische Wertigkeit besitzt. Die Technologie wurde als effektive und objektiv geeignete aktive Balancingmethode für Lithium-Ion Batterien festgelegt. Im Vergleich mit den anderen Methoden ist die mehrfach geschaltete Induktivität eine der einfachsten Verschaltungen und Steuerungen. Sie benötigt einen MOSFET und eine Induktivität pro Zelle. Diese Topologie eignet sich daher sehr gut für einen aktiven Ladungstransfer bei geringen Kosten und geringem Bauraum in Elektrofahrzeugen. Zusätzlich erreicht diese Variante eine gute Ausgleichsleistung mit einer geringen Anzahl an von Bauteilen [41]. Die gute Ausgleichsgeschwindigkeit beim Ladungsaustausch benachbarter Zellen und der hohe Effizienzgewinn wurden ebenfalls gut bewertet [22].

Kriterien		Ausgleichsgeschwindigkeit	Wirkungsgrad	Umsetzungsrisiko	Baugröße	Bewertung
Gewichtungsfaktor		0,3	0,1	0,2	0,2	
Topologien aktives Balancing	Single Kondensator	geringe Balancinggeschwindigkeit 0	Wirkungsgrad < 70% 1	sichere Steuerung 2	ein Kondensator, n+1 Schalter für n Zellen 2	0,9
	Multi Kondensator	lange Balancingdauer, Ausgleich nur zwischen benachbarten Zellen 0	Wirkungsgrad < 50% 0	sichere Schaltung aufgrund vieler Schalter 2	n-1 Kondensator, 2 x n Schalter für n Zellen 2	0,8
	Single Induktivität	schneller Ausgleich durch hohen Balancingstrom 2	Wirkungsgrad > 80% 3	großes Sicherheitsrisiko, durch - Softwareausfall - Qualität der Ics - Qualität der Bauelemente 1	1 Spule für n Zellen, Kapazitätsfilter für hohe Schaltfrequenz 2	1,5
	Multi Induktivität	Energieaustausch von ersten zur letzten Zelle sehr lang 2	Wirkungsgrad > 80% 3	genaue Spannungsmessung, hohe Belastung der Diode durch Strom und Spannung 2	n-1 Spulen für n Zellen, n-1 Schalter, Kapazitätsfilter für hohe Schaltfrequenz 2	1,7
	Single Windings Transformator	schnelle Energieübertragung 2	geringe magnetische Verluste 2	präzise Schaltersteuerung 2	2 x n bidirektionale Schalter für n Zellen 1	1,4
	Multi Windings Transformator	lange Balancingdauer, da die Energie über den Eisenkern übertragen wird 1	hohe Verluste durch Schaltelemente und Magnetisierung 1	komplexe Steuerung und Implementierung 1	n sekundäre Wicklungen für n Zellen, n+1 Schalter 1	0,8
	Multiple Transformator	langsames Balancing 0	geringer Wirkungsgrad, durch hohe magnetische Verluste 1	komplexe Schaltung und Steuerung 2	n Transformatoren für n Zellen 1	0,7
	Wandlerbasierte Schaltungen	lange Balancingdauer 1	hohe Verluste durch Schalter und Diode 1	komplexer Steuerungsalgorithmus 2	n Wandler für n Zellen 0	0,8

Abbildung 16: Bewertungsmatrix aktiver Balancing Topologien

MULTI INDUKTIVITÄT

In diesem Abschnitt wird das aktive Balancing mittels Multi Induktivität erläutert. Die einfache Schaltung dieser Topologie ermöglicht den Energieaustausch zwischen benachbarten Zellen. Um die Anwendung zu erweitern, um so Batterien mit vielen Zellen in Serie zu balancieren, sollte der Aufbau modular gestaltet werden. Der hohe Wirkungsgrad ergibt sich aus dem Ladungsausgleich zwischen benachbarten Zellen. Erfolgt der Energieausgleich über mehrere Zellen bzw. in eine entfernte Zelle erhöhen sich die Verluste und der Wirkungsgrad sinkt.

Es stehen bereits einige Schaltungen mit dieser Topologie zur Verfügung. Bereits im Jahr 1995 wurde ein Patent zu dieser Schaltung veröffentlicht [42]. Aufbauend haben verschiedene Hersteller wie *Texas Instruments*, *NXP* und *Atmel* diese Schaltungstopologie untersucht. *Texas Instruments* stellt diese Schaltung mit Power Pump Balancing vor. Besonderes Interesse liegt auf den Weiterentwicklungen dieser Schaltungen, welche gutes Potenzial für die Verwendung in Batteriesystemen haben. Die Schaltung soll dazu beitragen den Wirkungsgrad zu erhöhen und die Kosten der komplexen Ansteuerung und Auslegung zu senken. Zudem soll die Balancingschaltung ein direktes Umladen zwischen entfernten Zellen ermöglichen.

FUNKTIONSPRINZIP MULTI INDUKTIVITÄT

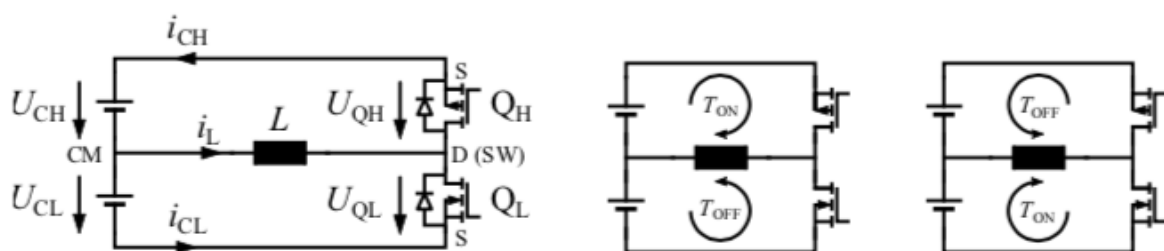


Abbildung 17: Schaltung eines Zelle zu Zelle Balancing-Moduls [13]

Die Schaltung enthält n Zellen, $n-1$ bidirektionale Inverswandler und $n-1$ Spulen. Abbildung 13 stellt das schematische Funktionsprinzip dar. Der Inverswandler besteht aus einer Speicherdrossel und zwei Leistungsschaltern. Hier kommt ein p- und n-Kanal MOSFET zum Einsatz, dieser MOSFET besitzt eine Body Diode. Der Zwischenspeicher für die Energieübertragung dieser Schaltung besteht aus einer Induktivität. Das Schließen des Lowside-Transistors, der Transistor an der schwachen Zellkapazität, für die Zeit T_{ON} bewirkt ein Aufladen der Induktivität mit $U = L di/dt$ von der starken Zelle. Werden die ohmschen Verluste vernachlässigt, so steigt der Spulenstrom linear an. Während dieser Zeit fließt kein Strom in die Zelle und durch den Highside-Transistor. Die Zellspannungen werden hier als konstant angenommen und der MOSFET weist ein ideales Schaltverhalten auf [13].

Durch öffnen des Lowside-Transistor zur Zeit T_{ON} , kommutiert der Spulenstrom von der schwachen zur starken Zelle. Die Spannung liegt nun an der Induktivität an und die Spule wird linear entladen. Der Strom in die Spule sinkt solange, bis die Freilauf-Diode des Highside-Transistors sperrt. Die MOSFETS werden mittels PWM gesteuert, das Taktverhältnis darf maximal 50% betragen. Der Strom sinkt in jedem Schaltzyklus Null und bleibt dies für eine Totzeit. In diesem Fall spricht man von Discontinuous Conduction Mode (DCM).

KOSTENABSCHÄTZUNG AKTIVES BALANCING

In diesem Kapitel werden die Kosten für ein aktives Balancingsystem abgeschätzt. Anhand der benötigten Bauteile können die Kosten identifiziert werden. Da in dieser Arbeit keine Hardwareentwicklung und -aufbau umgesetzt wird, werden die Anzahl und Verwendung der Bauteile anhand der Literatur abgeschätzt. Möglicherweise entstehende Mehrkosten zu einem passiven Balancingsystem können durch eine bessere Kapazitätsausnutzung der Batterie einem Kapazitätsgewinn gegenübergestellt werden.

AUSWAHL DER BAUTEILE

Die Wahl des Konverters wird nach Berechnung dessen Leistung vorgenommen. Diese bestimmt wie schnell die Energie zwischen Zellen hin und her geladen werden kann. Die Konverterleistung berechnet sich nach [13]:

$$P_{bal} > U_N * I_{pack} = U_N * C_{rate} * SOI_C * C_{akt} \quad \text{mit } SOI_C = \frac{\Delta C_{akt}}{C_{akt}}$$

Der SOI wird aus dem maximalen Kapazitätsunterschied relativ zum Mittelwert der aktuellen Zellkapazität berechnet. Die notwendige Balancingleistung ist häufig von der Stromrate abhängig.

$$P_{bal} > U_N * C_{rate} * SOI_C * C_{akt} = 3,7 V * 50A * 11 = 2,03 W$$

Die nutzbare Leistung in diesem Beispiel ist bereits um 11% reduziert. Das Batteriepack mit einem mittleren Entladestrom wird auf 50A geschätzt. Daraus ergibt sich eine notwendige Balancingleistung von ca. 2 W.

Für die weiteren Bauteile müssen die Schaltfrequenz und Leistungsinduktivität betrachtet werden. In [13] ist eine Schaltfrequenz von 100 kHz festgelegt, um elektromagnetische Störungen auszuschließen. Der maximale Strom in der Induktivität ergibt sich durch folgende Gleichung.

$$I_L = \frac{U_{Zelle} * T_{on}}{L}$$

Die Leistungsinduktivität wird kleiner als 10 µH gewählt.

Die einzelnen Bauteile wie MOSFET's, Logikschalter und Digital-Isolatoren müssen mit Spannung versorgt werden. Die Batterie benötigt mehrere Balancingmodule in Reihe aufgrund der Anzahl an serieller Stränge. Jedes dieser Module benötigt eine separate, galvanisch getrennte Spannungsversorgung. Diese kann entweder über eine externe Versorgung erfolgen oder man verwendet die Batterie selbst zur Versorgung. Die verwendete Elektronik benötigt eine Versorgung zwischen 3,3 V und 5 V. Dafür wird zur Kostenrechnung der Linearregler LP2980 der Firma Texas Instruments betrachtet.

ABSCHÄTZUNG DER KOSTEN

Zunächst werden die Kosten der einzelnen Komponenten betrachtet. Da die Kosten variieren wird sich hier auf Preise des Versandhauses *Mouser* bezogen. Kosten für Temperatursensoren, Leiterplatte und Gehäuse werden vernachlässigt.

Die Tabelle 1 stellt die Anzahl der nötigen Komponenten dar, welche für ein aktives Balancing-Board notwendig sind. Bauteile wie Microcontroller und Kommunikationsschnittstelle werden nur einmal benötigt und sind gegebenenfalls bereits vorhanden bzw. es existieren persönliche Präferenzen des Entwicklers. Daher werden diese in der Kostenabschätzung vernachlässigt.

Tabelle 1: Anzahl benötigte Bauteile

Balancing-Schaltung	Spule (L)	Leistungsschalter	Treiber	Linearregler	Ansteuerung
aktives Balancing (Multi-Induktivität)	N-1	2N-2	2N-2	N-1	N-1

Tabelle 2: Bauteilkosten des aktiven Balancings

Bauteil	Bezeichnung	Funktion	Preis/Stk.	Anzahl	Kosten
Balancer	LTC3300-1	Balancing	13,50 €	6	81,00 €
Monitor	LTC6803-1	Moitoring	10,00 €	3	30,00 €
Spule	SRP1250-6R8M	Speicherelement	0,61 €	30	18,30 €
Mosfet (n - Chan.)	FDD6670A	Wandler	0,98 €	30	29,40 €
Mosfet (p - Chan.)	FDD6685	Wandler	0,48 €	30	14,40 €
Treiber (2 - Chan.)	LM5111-1MY	Wandler	1,35 €	30	40,50 €
Linearregler	REG1117-3.3	U - Versorgung	2,15 €	30	64,50 €
Digital-Iso (2 - Chan.)	ISO7320FCDR	Galvanische Iso.	2,45 €	30	73,50 €
				Σ	351,60 €

Nach Bestimmung der Anzahl der einzelnen Bauteile werden in Tabelle 2 die einzelnen Komponenten aufgezeigt. Anhand der Anzahl und des Stückpreises ergeben sich die Gesamtkosten zu etwa 350,00 €. Dazu werden noch etwa 100,00 bis 150,00 € für weitere kleine Bauteile und vernachlässigte Komponenten kommen. Dadurch kommt man auf grobe Kosten von etwa 500,00 € für das Board.

Die derzeit verwendete passive Balancingeinheit EMUS BMS kostet 390,00 €, wodurch die aktive Balancingschaltung ca. 1/3 teurer ist. Durch den potenziellen mehr Gewinn an Kapazität und Langlebigkeit der Zellen ist sind die Mehrkosten abzuwiegen. Gegebenenfalls kann durch eine effizientere Ausnutzung der Kapazität die Anzahl an Zellen verringert werden, wodurch Kosten an anderer Stelle eingespart werden können.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Innerhalb eines Batteriesystems weisen die einzelnen Zellen unterschiedliche Kapazitäten auf. Die entnehmbare Kapazität wird durch die Zelle mit der geringsten Kapazität bestimmt. Zusätzlich Laden und Entladen sich die Zellen aufgrund minimaler Abweichungen durch Material, Fertigungstoleranzen und Alter. Diese Mechanismen haben Auswirkungen auf SoC, Entladestrom, Temperatur und Gesamtentladetiefe. Um diese Auswirkungen auszugleichen besitzt ein Batteriesystem eine Balancingeinheit.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit verschiedenen Varianten des aktiven Balancings. Das Ziel ist ein Vergleich verschiedener Topologien und eine Wahl der Komponenten für ein aktives Balancingsystem anhand der gewünschten Funktionalität. Anschließend wird anhand des Konzepts eine Kostenabschätzung für ein Balancingboard erstellt.

Eine Marktstudie aktueller Balancingtopologien und Systemen erfolgt bevor diese bewertet werden. Die Bewertung stützt sich auf Balancinggeschwindigkeit, Wirkungsgrad, Bauraumbedarf, Kosten und universelle Anwendbarkeit.

Abschließend wird eine Kostenabschätzung des aktiven Balancingsystems erstellt. Dabei zeigt sich, dass Kosten und Aufwand eines aktiven Balancingsystems deutlich über denen eines passiven Systems liegen. Dies kann jedoch durch die erreichten Vorteile kompensiert werden.

Ein aktives Balancingsystem bietet die Möglichkeit die Performance des Motorrads, speziell die der Batterie, zu erhöhen und einen weiteren Schritt der Optimierung zu gehen. Das größte Problem in der Umsetzung dürfte der erhöhte Bauraumbedarf gegenüber dem passiven System sein. Daher ist es notwendig die Entwicklung in enger Abstimmung mit den Batteriekonstruktoren zu realisieren um den notwendigen Platz für Board und Komponenten bereitzustellen. Durch Optimierung der Energieeffizienz der Batterie durch aktives Balancing könnten Zellen und somit Gewicht eingespart werden, was zu einem höheren Leistungsgewicht führt. Daher wird es als sinnvoll erachtet, aufbauend auf dieser Arbeit ein aktives Balancingsystem zu entwickeln und innerhalb der Batterie der Amperia 18 zu testen.

LITERATUR

1. Sileo GmbH. *Our Intelligent Battery Management System increases Battery Performance*. Mai 2017. url: <https://www.sileo-ebus.com/your-benefits/efficient/?L=1>.
2. Tesvolt GmbH. *Tesvolt Battery Management System mit Bidirektionaler Active Battery Optimizer*. Mai 2017. url: <https://www.tesvolt.com/de/active-battery-optimizer.html>.
3. Peter Kurzweil. „Lithiumionen-Batterien“. In: *Elektrochemische Speicher: Super-kondensatoren, Batterien, Elektrolyse-Wasserstoff, Rechtliche Rahmenbedingungen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018, S. 165–263. isbn: 978-3-658-21829-4. doi: 10.1007/978-3-658-21829-4_3.
4. Kraysberg, A., Ein-Eli, Y.: Higher, stronger, better. A review of 5 Volt cathode materials for advanced lithium-ion batteries. *Adv. Energy Mater.* **2**(8), 922–939 (2012)
5. Chuan Sheng Si. „Development research about the power battery management system of pure electric vehicle“. In: *2011 International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet)*. 2011 International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet) (Xianning, China). IEEE, 16.04.2011 - 18.04.2011, S. 276–279. isbn: 978-1-61284-458-9. doi: 10.1109/CECNET.2011.5769003.
6. Sriram Yarlagadda, Tom T. Hartley und Iqbal Husain. „A Battery Management System Using an Active Charge Equalization Technique Based on a DC/DC Converter Topology“. In: *IEEE Transactions on Industry Applications* 49.6 (2013), S. 2720–2729. issn: 0093-9994. doi: 10.1109/TIA.2013.2264794.
7. Susanne Rothgang u.a. „Challenges in battery pack design“. In: *2012 Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion*. 2012 Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion (ESARS) (Bologna, Italy). IEEE, S. 1–6. isbn: 978-1-4673-1372-8. doi: 10.1109/ESARS.2012.6387503.
8. W. F. Bentley. *Cell Balancing Considerations for Lithium-Ion Battery Systems*. eng. Piscataway: IEEE, 1997. 1360 S. isbn: 9780780336315. url: <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=4373>.
9. M. Broussely u.a. „Main aging mechanisms in Li ion batteries“. In: *Journal of Power Sources* 146.1-2 (2005). PII: S0378775305005082, S. 90–96. issn: 03787753. doi: 10.1016/j.jpowsour.2005.03.172.
10. Yevgen Barsukov. „Battery Cell Balancing: What to Balance and How“. In: (). url: <https://www.ti.com/download/trng/docs/seminar/Topic%20%20-%20Battery%20Cell%20Balancing%20-%20What%20to%20Balance%20and%20How.pdf>.
11. Yevgen Barsukov. „Battery Cell Balancing: What to Balance and How“. In: (). url: <https://www.ti.com/download/trng/docs/seminar/Topic%20%20-%20Battery%20Cell%20Balancing%20-%20What%20to%20Balance%20and%20How.pdf>.
12. W. F. Bentley. *Cell Balancing Considerations for Lithium-Ion Battery Systems*. eng. Piscataway: IEEE, 1997. 1360 S. isbn: 9780780336315. url: <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=4373>.
13. Manuel Brühl. „Aktive Balancing-Systeme für Lithium-Ionen Batterien und deren Auswirkungen auf die Zellalterung“. In: (2017).

14. Christian Campestrini u. a. „Ageing of lithium-ion battery modules with dissipative balancing compared with single-cell ageing“. In: *Journal of Energy Storage* 6 (2016). PII: S2352152X16300469, S. 142–152. issn: 2352152X. doi: 10.1016/j.est.2016. 03.004.
15. Youngchul Lee, Seonwoo Jeon und Sungwoo Bae. „Comparison on Cell Balancing Methods for Energy Storage Applications“. In: *Indian Journal of Science and Technology* 9.17 (2016). issn: 0974-6846. doi: 10.17485/ijst/2016/v9i17/92316.
16. Davide Andrea. *Battery management systems for large lithium-ion battery packs*. Boston: Artech House, 2010. xi, 290. isbn: 1608071049.
17. M. Hübner Dan Jiang. *Aktives Batteriemanagementsystem (BMS) mit Datenerfassungssystem im Elektro- Versuchsfahrzeug*. Springer, 2014. url: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-658-05130-3_9.
18. Mohamed Daowd u. a. „Passive and active battery balancing comparison based on MATLAB simulation“. In: *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC) (Chicago, IL, USA). IEEE, 6.09.2011 - 09.09.2011, S. 1–7. isbn: 978-1-61284-248-6. doi: 10.1109/VPPC. 2011.6043010.
19. Moon-Young Kim u. a. „A Chain Structure of Switched Capacitor for Improved Cell Balancing Speed of Lithium-Ion Batteries“. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 61.8 (2014), S. 3989–3999. issn: 0278-0046. doi: 10.1109/TIE.2013. 2288195.
20. Wai Chung Lee, David Drury und Phil Mellor. „Comparison of passive cell balancing and active cell balancing for automotive batteries“. In: *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)(Chicago, IL, USA). IEEE, 6.09.2011 - 09.09.2011, S. 1–7. isbn: 978-1-61284-248-6. doi: 10.1109/VPPC.2011.6043108.
21. Medo. „A Review of Passive and Active Battery Balancing based on MATLAB- Simulink“. In: (2011).
22. Ali Farzan Moghaddam und Alex van den Bossche. „A Cell Equalization Method Based on Resonant Switched Capacitor Balancing for Lithium Ion Batteries“. In: *2018 9th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (IC- MAE)*. 2018 9th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE) (Budapest). IEEE, 10.07.2018 - 13.07.2018, S. 337–341. isbn: 978-1-5386- 7229-7. doi: 10.1109/ICMAE.2018.8467638.
23. TUM. „Many to Many active cell Balancing stretegy design“. In: (2015).
24. Dimo Dimitrov Stefanov. *A Flyback Converter Based System for an Active Charge Balancing of Li-Ion Battery Packs. Proceedings : September 13 - 15, 2018, Sozopol, Bulgaria*. eng. Piscataway, NJ: IEEE, 2018. 1 S. isbn: 9781538666937. url: <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=8519940>.
25. Markus Einhorn, Werner Roessler und Juergen Fleig. „Improved Performance of Serially Connected Li-Ion Batteries With Active Cell Balancing in Electric Vehicles“. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 60.6 (2011), S. 2448–2457. issn: 0018-9545. doi: 10.1109/TVT.2011.2153886.
26. Abusaleh M. Imtiaz und Faisal H. Khan. „“Time Shared Flyback Converter” Based Regenerative Cell Balancing Technique for Series Connected Li-Ion Battery Strings“. In: *IEEE Transactions on Power Electronics* 28.12 (2013), S. 5960–5975. issn: 0885-8993. doi: 10.1109/TPEL.2013.2257861.
27. Wai Chung Lee, David Drury und Phil Mellor. „An integrated design of active balancing and redundancy at module level for Electric Vehicle batteries“. In: *2012 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*. 2012 IEEE Trans- portation Electrification Conference and Expo (ITEC) (Dearborn, MI, USA). IEEE, 18.06.2012 - 20.06.2012, S. 1–6. isbn: 978-1-4673-1408-4. doi: 10.1109/ITEC.2012. 6243504.

28. Yu Liu u. a. „A novel active equalizer for Li-ion battery pack in electric vehicles“. In: *Energy Procedia* 158 (2019). PII: S1876610219310951, S. 2649–2654. issn: 18766102. doi: 10.1016/j.egypro.2019.02.017.
29. Mountain Embedded. „Aktive Balancer für Lithium Akkuketten“. In: (2018).
30. Linear Technology Corporation. „LTC3300-1 - High Efficiency Bidirectional Multi-cell Battery Balancer“. In: (2013). url: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/LTC3300-1.pdf>.
31. Linear Technology Corporation. „LT8584 - 2.5A Monolithic Active Cell Balancer with Telemetry Interface“. In: (2013). url: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/8584fb.pdf>.
32. Linear Technology Corporation. „LTC3300-2, High Efficiency Bidirectional Multi-cell Battery Balancer“. In: (2019). url: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/LTC3300-2.pdf>.
33. Texas Instruments. „Cell balancing buys extra run time and battery life“.
34. Texas Instruments. „PowerLAN Gateway Battery Management Controller with PowerPump Cell Balancing“. In: (2008). url: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq78pl114.pdf>.
35. Texas Instruments. „16-Cell Lithium-Ion Battery Active Balance Reference Design“. In: (2016). url: <http://www.ti.com/lit/ug/tidubz7/tidubz7.pdf>.
36. Infinion. „Battery Management Board 4.0“. In: (2010).
37. C. Bonfiglio und W. Roessler. „A cost optimized battery management system with active cell balancing for lithium ion battery stacks“. In: *2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. 2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC) (Dearborn, MI)*. IEEE, 7.09.2009 - 10.09.2009, S. 304–309. isbn: 978-1-4244-2600-3. doi: 10.1109/VPPC.2009.5289837.
38. AMS. „AS8506-AN03 Active Balancer“. In: (2013). url: <https://www.mouser.com/ds/2/588/AS8506-AN03-276529.pdf>.
39. Inc. Freescale Semiconductor. „Active Cell Balancing in Battery Packs“. In: (2012).
40. Atmel Corporation. „User Guide for Atmel ATA6870 and Atmel ATmega32HVB Evaluation Kit Hardware DK11“. In: (2015). url: http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/Atmel-9302-User-Guide-for-Atmel-ATA6870-and-Atmel-ATmega32HVB_Application-Note.pdf.
41. *A New Cell-to-Cell Balancing Circuit with a Center-Cell Concentration Structure for Series-connected Batteries. 5th IEEE Annual International Energy Conversion Congress and Exhibition in the Asia Pacific Region ; 3 - 6 June 2013, Crown Convention Centre, Melbourne, Australia*. eng. Piscataway, NJ: IEEE, 2013. 7 S. isbn: 9781479904822. url: <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=6573224>.
42. Heribert Schmidt. „Vorrichtung zum Ladungsausgleich zwischen wenigstens zwei Energiewandlern oder -Speichern“. In: (1995).

ABBILDUNGS- UND TABELLENVERZEICHNIS

Abbildung 1: Prinzipieller Aufbau und Funktionsweise einer Lithiumionen-Zelle[1].....	6
Abbildung 2: Funktionen des Batteriemanagementsystems	11
Abbildung 3: Balancing Schaltung mit Single Kondensator [17]	15
Abbildung 4: Multi Kondensator Balancing Topologie [17]	16
Abbildung 5: Balancing Topologie mit Singel Induktivität [17]	17
Abbildung 6: Multi Induktivität Balancing Topologie [17]	18
Abbildung 7: Balancing Technologie Single Winding Transformer [17]	19
Abbildung 8: Balancing Technologie Mutli Windings Transformator [17]	20
Abbildung 9: Balancing Technologie Multiple Transformator [17]	20
Abbildung 10: Wandler des aktiven Balancing	21
Abbildung 11: Bewertungsmatrix Benchmark aktives Balancing.....	24
Abbildung 12: Slave Modul	26
Abbildung 13: Batterie mit Slave Modulen	26
Abbildung 14: Stromsensor	27
Abbildung 15: Mastercontrol Unit.....	27
Abbildung 16: Bewertungsmatrix aktiver Balancing Topologien	34
Abbildung 17: Schaltung eines Zelle zu Zelle Balancing-Moduls [13]	35
Tabelle 1: Anzahl benötigte Bauteile	38
Tabelle 2: Bauteilkosten des aktiven Balancings	39
Tabelle A. 1: Gewichtungsmatrix Marktstudie.....	45
Tabelle A. 2: Gewichtungsmatrix Aktives Balancing	45

ANHANG

Tabelle A. 1: Gewichtungsmatrix Marktstudie

Gewichtungsmatrix								
Nr.	Bewertungskriterien	Wertigkeit (Wij)					Gewichtungsfaktor (gi)	
		1	2	3	4	5		
1	Ausgleichsstrom		+	+	0	+	3	0,25
2	Wirkungsgrad	-		-	+	0	1	0,08
3	Anzahl der Zellen	0	+		+	0	3	0,25
4	Bauraumbedarf	-	+	-		+	2	0,17
	universelle	-	-	-	+		1	0,08
5	Anwendbarkeit							

Tabelle A. 2: Gewichtungsmatrix Aktives Balancing

Gewichtungsmatrix							
Nr.	Bewertungskriterien	Wertigkeit (Wij)				Gewichtungsfaktor (gi)	
		1	2	3	4		
1	Ausgleichsstrom		+	+	+	3	0,3
2	Wirkungsgrad	-		-	+	1	0,1
3	Umsetzungsrisiko	-	+		+	2	0,2
4	Baugröße	-	+	+		2	0,2