



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorthesis

Rico Loschwitz

Überwachungs-, Zellenbalancierungs- und
Leistungselektronik für eine Starterbatterie in
Lithium-Eisen-Phosphat-Technologie

Rico Loschwitz

Überwachungs-, Zellenbalancierungs- und
Leistungselektronik für eine Starterbatterie in
Lithium-Eisen-Phosphat-Technologie

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

Betreuender Prüfer : Prof. Dr.-Ing. Karl-Ragmar Riemschneider
Zweitgutachter : Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Jörg Dahlkemper

Abgegeben am 07. Februar 2013

Rico Loschwitz

Thema der Bachelorthesis

Überwachungs-, Zellenbalancierungs- und Leistungselektronik für eine Starterbatterie in Lithium-Eisen-Phosphat-Technologie

Stichworte

Lithium, Batterie, LiFePO₄, Batterie-Management-System

Kurzzusammenfassung

Da die Batterie in Fahrzeugen immer stärker, beispielsweise durch die Start-Stop-Automatik, beansprucht wird, soll hier die Möglichkeit einer Lithium-Eisen-Phosphat-Batterie als Starterbatterie in Fahrzeugen untersucht werden. Dieser Batterietyp verspricht eine längere Lebensdauer und eine höhere Energiedichte als konventionelle Blei-Säure-Batterien, was Gewicht einspart und somit den Kraftstoffverbrauch der PKW reduziert.

Rico Loschwitz

Title of the paper

Monitoring, Cellbalancing and power electronics for a starter battery in lithium-iron-phosphate-technology

Keywords

lithium, battery, LiFePO₄, battery management system

Abstract

Because of the rising stress of batteries, for instance resulting out of the start-stop system, a lithium-iron-phosphat-battery is going to be proved as an alternative starter-battery in vehicles. This type of battery promises a longer durability and a higher density of energy than conventional lead-acid-batteries do. This leads to a reduction of weight and as a result of this to a lower fuel consumption.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Karl-Ragmar Riemschneider dafür bedanken, dass er mir ermöglicht hat diese Arbeit zu erstellen und für sein Engagement im Rahmen der Forschungsprojekte ESZ-ABS und BATSEN. Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Jörg Dahlkemper für seine Arbeit als Zweitprüfer.

Außerdem möchte ich Herrn Dipl.-Ing. Matthias Schneider und Herrn Dipl.-Ing. Günter Müller für ihre Unterstützung danken, die maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Weiteren Dank richte ich an die Firma ecc Repenning GmbH für die zur Verfügung gestellten Lithium-Eisen-Phosphat-Zellen, welche noch aus einer Vorserienproduktion stammen.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinen Eltern, die mir die Möglichkeit gegeben haben mein Studium zu absolvieren und mich immer unterstützt haben.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	7
1.1	Allgemeines	7
1.2	Warum Lithium-Ionen-Akkumulatoren	7
1.2.1	Aufbau Rundzellen	10
2	Voruntersuchungen	12
2.1	Anforderungen an die LiFePO ₄ -Zellen	12
2.2	Anforderungen an die Sicherheitsschaltung	12
2.2.1	Funktionsweise der Sicherheitselektronik	12
2.3	Die erste Prototyp-Batterie nach Hillermann [11]	16
2.3.1	Gesammelte Erfahrungen	17
3	Aufbau des Batteriesystems	20
3.1	Entwurf der BMS-Platine	20
3.2	Der Leistungsteil	22
3.2.1	Separater Lade- und Entladezweig	23
3.2.2	Zusammengeführte Lade- und Entladezweige	24
3.2.3	Vergleich der Schaltungen	25
3.2.4	Verwendete Bauteile	25
3.3	Mechanische Konstruktion	25
3.3.1	Auswahl des Gehäuses	25
3.3.2	Positionierung der Bauteile	26
4	Inbetriebnahme	28
4.1	BMS-Platine	28
4.1.1	Sichtprüfung	28
4.1.2	Funktionsprüfung	28
4.2	Die LiFePO ₄ -Zellen	30
4.2.1	Impedanzspektroskopie	30
4.3	Gesamtaufbau	31
5	Erprobung der Batterie	33
5.1	Startversuch am Fahrzeug	33
5.1.1	Versuchsaufbauten zur Spannungsstabilisierung	38

<i>Inhaltsverzeichnis</i>	6
5.1.2 Relais als Leistungsschalter verwenden	43
5.2 Beobachtungen	44
6 Zusammenfassung	45
6.1 Bewertung	45
6.2 Ausblick	46
Tabellenverzeichnis	48
Abbildungsverzeichnis	49
7 Anhang	50
7.1 Schaltung der BMS-Platine	50
Literaturverzeichnis	60

1 Einführung

1.1 Allgemeines

Diese Bachelorthesis ist im Rahmen des Forschungsprojekts Drahtlose Zellensensoren für Fahrzeugbatterien (BATSEN) an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW Hamburg) entstanden. Ziele des Forschungsvorhabens sind es, mithilfe eines Sensornetzwerkes jede einzelne Zelle einer Fahrzeugbatterie zu überwachen und aus den gewonnenen Daten Kenntnisse über den genauen Ladezustand, den so genannten State of Charge (SOC), sowie den Gesundheitszustand der Batterie, den so genannten State of Health (SOH) zu erhalten. Diese Erkenntnisse sind insbesondere in der Elektromobilität von großer Bedeutung, wenn es um die Abschätzung der noch zur Verfügung stehenden Reichweite oder um die frühzeitige Erkennung eines eintretenden Defektes einer einzelnen Batteriezelle geht.

Ein wichtiger Punkt ist die Untersuchung der Anwendung einer Lithium-Eisen-Phosphat (LiFePO₄)-Starterbatterie. Ziel ist es, Erkenntnisse über das Betriebsverhalten der Zellen für die spätere Auslegung entsprechender Sensoren zu sammeln.

In einer vorhergehenden Diplomarbeit in diesem Projekt wurde bereits eine LiFePO₄-Starterbatterie entwickelt und getestet. In dieser Ausarbeitung soll jene Arbeit [11] aufgegriffen und weiterentwickelt werden.

Lithium-Ionen-Akkus reagieren empfindlich auf falsche Behandlung. Daher werden diese meist in Verbindung mit einem BMS (Battery Management System) betrieben. Dieses erhöht die Sicherheit beim Betrieb dieses Akkutypes erheblich. Die Elektronik sichert den Akku gegen Über- und Unterspannung, sowie gegen Überstrom und thermische Überlastung. Der Aufbau und Einsatz einer solchen Überwachungselektronik soll es in dieser Arbeit ebenfalls gehen.

1.2 Warum Lithium-Ionen-Akkumulatoren

Moderne Fahrzeuge haben eine Vielzahl von elektrischen Verbrauchern an Bord, welche die Starterbatterien zunehmend belasten. Besonders die Start-Stop-Automatik in vielen Fahrzeugen bringt die konventionelle Blei-Säure-Batterie immer weiter an ihre Leistungsgrenzen. Desweiteren geht die Automobilindustrie den Weg, den Kraftstoffverbrauch durch

leichtere Materialien zu reduzieren. So kann beispielsweise durch ein Einsatz eines Lithium-Ionen-Akku, aufgrund der höheren Energiedichte, ca. 30% des Gewichtes einer vergleichbaren Blei-Säure-Batterie eingespart werden.

Beispielsweise wiegt eine Blei-Säure-Batterie mit einer Kapazität von 60 Ah etwa 17,7 kg. [3] Die hier verwendeten LiFePO₄-Zellen wiegen zusammen ca. 4,4 kg ohne Elektronik und Gehäuse bei einer Kapazität von etwa 50 Ah. Die erzielbare Gewichtsreduktion von ca. 10 kg verbessert die CO₂-Bilanz eines Fahrzeugs.

Die Lithium-Ionen-Akkus zeichnen sich durch eine hohe Energiedichte aus und unterliegen keinem Memory-Effekt, was Techniken zur Energierückgewinnung in Elektrofahrzeugen zugutekommt. Die meisten Lithium-Ionen-Typen sind jedoch thermisch instabil¹. Je nach Aufbau bzw. den eingesetzten Materialien werden Lithium-Ionen-Akkus weiter untergliedert: der Lithium-Polymer-Akkumulator (LiPo), Lithium-Cobaltdioxid-Akkumulator (LiCoO₂), Lithium-Titanat-Akkumulator (Li₄Ti₅O₁₂), der Lithium-Luft-Akkumulator (4LiOH), der Lithium-Mangan-Akkumulator (LiMn₂O₄) und der hier verwendete Lithium-Eisenphosphat-Akkumulator (LiFePO₄) welcher eine gute thermische Stabilität aufweist. LiFePO₄-Zelle werden erst bei Umgebungstemperaturen über 300 °C instabil. Das sind über 150 °C mehr als bei LiCoO₂. [15]

Kenndaten, wie Zellenspannung, Temperaturempfindlichkeit oder der maximal erlaubte Lade- oder Entladestrom, variieren bauartbedingt stark und sind wesentlich vom eingesetzten Elektrodenmaterial und Elektrolyt abhängig. Als Anodenmaterial wird jedoch meistens Graphit verwendet. Die Angabe der Untergruppe (z.B. „Lithium-Eisenphosphat-Akkumulator“) ist aus diesem Grund informativer als die Angabe des Oberbegriffs „Lithium-Ionen-Akkumulator“.

Für die hier aufzubauende Starterbatterie wurden Lithium-Eisen-Phosphat-Akkumulatoren gewählt, da diese Technologie nicht zu einem thermischen Durchgehen² neigt wie viele andere Batterietypen aus Lithium. Sie können einen sehr hohen Strom für den Startvorgang liefern, und die Nennspannung von vier in Reihe geschalteten Zellen liegt näher an der Nennspannung konventioneller 12 V Starterbatterien als die der meisten anderen Lithium-Akkumulatoren. Bei einer Nennspannung von 3,3 V pro LiFePO₄-Zelle ergibt das eine Spannung von 13,2 V. Damit ist es möglich, die LiFePO₄-Starterbatterie mit einer konventionellen Lichtmaschine³ bei der von einer Spannung von 13,8 V ausgegangen wird zu laden, ohne eine Spannungsanhebung durch einen DC/DC-Wandler oder den Tausch des vorhandenen Fahrzeuggenerators vorzunehmen.

¹Unter thermischer Stabilität wird das Verhalten einer Zelle in einem bestimmten Temperaturbereich verstanden.

²Thermisches Durchgehen bezeichnet die Überhitzung der Lithium-Zelle durch interne chemische Reaktionen und beschädigt eine Zelle, bis hin zum Brand. Dieses kann bei Beschädigung des Separators auftreten.

³Eine Lichtmaschine ist der Stromgenerator in Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor.

Vorteile von Lithium-Eisen-Phosphat

- LiFePO₄-Zellen gelten aufgrund ihres festen Elektrolyts und der Zellchemie als eigensicher, d.h. ein thermisches Durchgehen und eine Membranschmelzung wie bei anderen Lithium-Ionen-Akkumulatoren gilt als ausgeschlossen
[2]
- Eine hohe Leistungsdichte von etwa 90 Wh/kg
[9]
- Hohe Dauerentladeströme und sehr hohe Pulsbelastung bis zur 25fachen Kapazität möglich
[9]
- Hohe Ladeströme von 3C⁴ und Pulsadeströme bis 6C
[9]
- LiFePO₄-Akkumulatoren weisen ein sehr flaches Spannungsprofil zwischen ca. 20-80% Ladungskapazität auf. In diesem Bereich ist eine Spannungsstabilität gewährleistet
- Bessere Umweltverträglichkeit als herkömmliche Lithium-Akkutypen, wie z.B. Lithium-Cobaltoxid
- Hohe Zyklenfestigkeit, im Vergleich zu konventionellen Batterietypen. Abhängig von Temperatur und Entladetiefe bis zu 20.000 Zyklen möglich
[16]
- Durch die Zellspannung von 3,2 - 3,3 V eignen sich 2 bzw. 4 in Reihe geschaltete LiFePO₄-Zellen sehr gut zum Austausch konventioneller Bleibatterien (6 V oder 12 V)

Nachteile von Lithium-Eisen-Phosphat

- Durch ihre Zellspannung von 3,2-3,3 V können LiFePO₄-Zellen nicht einfach herkömmliche Lithium-Ionen-Zellen direkt ablösen. Beispielsweise werden in Mobiltelefonen Lithium-Polymer-Akkus eingesetzt, welche eine Zellspannung von 3,7 V besitzen.
- Es gibt nur wenig genormte Bauformen, wodurch eine Anwendung erschwert wird.

⁴C beschreibt den 1-Stunden-Entladestrom einer Batterie, beispielsweise 5 A bei einer 5 Ah Batterie

- Aufgrund des flachen Spannungsprofils wird eine spannungsbasierte Bestimmung des Ladezustandes erschwert.

1.2.1 Aufbau Rundzellen

In Abbildung 1.1 ist der Aufbau einer Lithium-Ionen-Rundzelle dargestellt. Die Schichten der Anode und Kathode sind durch einen Separator getrennt. Diese Lagen werden anschließend aufgerollt um möglichst viel Fläche auf kleinen Raum zu gewinnen. Dieses ist wichtig, da die Kapazität des Akkumulators von der Größe der Elektrodenfläche abhängig ist.

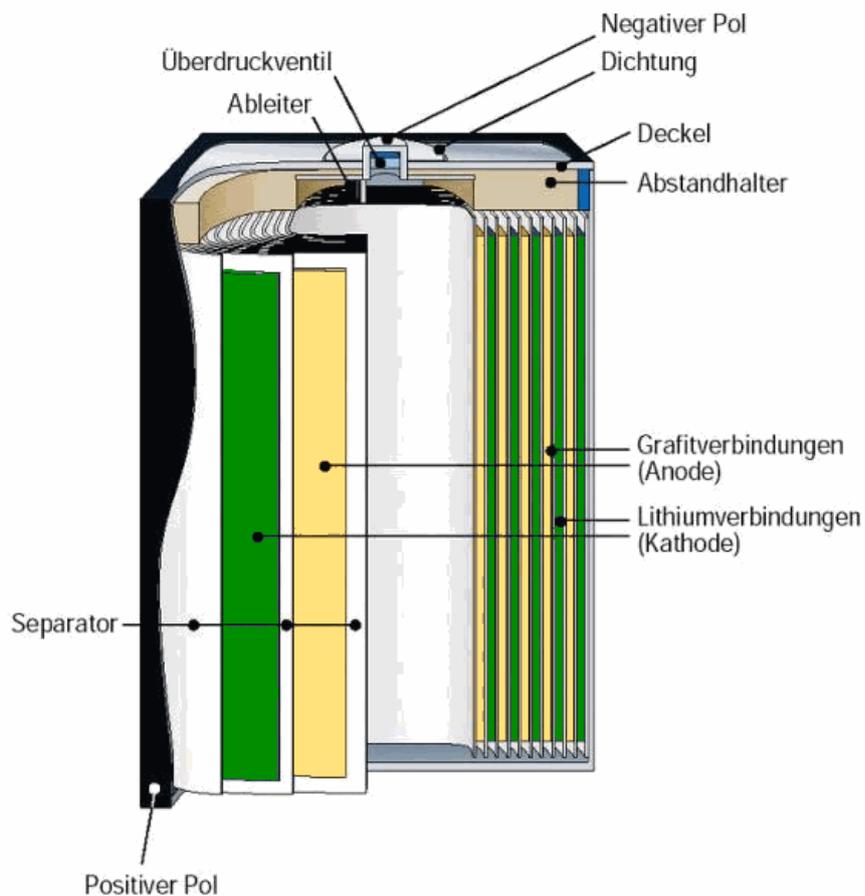


Abbildung 1.1: Aufbau einer Lithium-Ion-Rundzelle
[4]

Kupfer- und Aluminiumfolien werden als Elektroden verwendet und sind jeweils mit Graphit- und Lithiumverbindungen beschichtet.

Die negative Elektrode eines Lithium Akkus besteht meistens aus Graphit. Die positive Elektrode besteht aus Metalloxiden wie Lithiumcobalddioxid, Lithiumnickeloxid oder das

hier verwendende Lithiumeisenphosphat. Zur Verbesserung der Leitfähigkeit der Katode wird das Lithium-Material ebenfalls mit Graphit überzogen. Die Elektroden werden an den Stirnseiten mit dem Gehäuse verschweißt.

Ins Innere des Akkus darf kein Wasser geraten, da das Lithium mit dem Wasser reagiert und es zu einer Wärmeentwicklung bis hin zum Brand kommen könnte. [4]

Das Überdruckventil ist vorhanden um eventuell produzierten Sauerstoff (Oxid) aus dem Gehäuse entweichen lassen zu können.

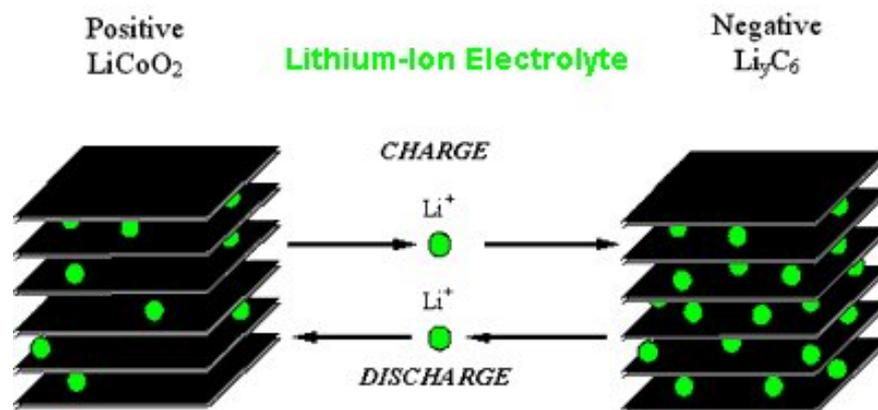


Abbildung 1.2: Funktionsweise eines Lithium-Ionen-Akkus
[13]

In Abbildung 1.2 ist die chemische Funktionsweise eines Lithium-Ionen-Akkus dargestellt. Wird elektrische Energie in den Akku eingebracht, sammeln sich die Elektronen im negativen Pol. Das geschieht durch Interkalation, das Einlagern von Elektronen in der Graphitschicht auf den Folien. Wird eine Last angeschlossen und die Energie wieder entnommen, werden die Elektronen wieder freigegeben und wandern über die angeschlossene Last vom negativen in den positiven Pol des Akkus. Gleichzeitig bewegen sich die positiv geladenen Ionen in die LiFePO_4 -Schicht.

2 Voruntersuchungen

Zunächst wurde das Konzept einer Starterbatterie auf LiFePO₄ Basis und einer Sicherheitsschaltung untersucht. Eine Analyse des ersten Prototypen der Starterbatterie wurde durchgeführt, um für das Redesign einige Verbesserungsansätze zu sammeln.

2.1 Anforderungen an die LiFePO₄-Zellen

Die entstehende Batterie soll als Starterbatterie für PKW eingesetzt werden können. Um dieses zu erreichen, muss die Batterie eine Spannung von etwa 12 V liefern, sowie kurzzeitig einen Startstrom von mehreren hundert Ampere. Da LiFePO₄-Zellen einen Pulsstrom von der etwa 25fachen Kapazität erreichen können, reicht es theoretisch Akkuzellen mit einer Kapazität von etwa 32 Ah zu verwenden.

2.2 Anforderungen an die Sicherheitsschaltung

Um die Batteriezellen schützen zu können, wurden einige Bedingungen an die Sicherheitsschaltung gestellt. Darunter fällt, dass die Batterie im Fehlerfall automatisch von der Last oder dem Ladegerät getrennt wird. Desweiteren sollten alle Grenzwerte sowie die Abschaltgeschwindigkeit frei konfigurierbar sein. Um die Lebensdauer der Zellen zu verlängern, sollte außerdem eine Balancingfunktion enthalten sein. Diese hat die Aufgabe alle Zellenspannungen der Batterie bestmöglich anzugleichen.

2.2.1 Funktionsweise der Sicherheitselektronik

Um die Lebensdauer der LiFePO₄-Zellen zu maximieren, dürfen diese nicht Über- oder Tiefenentladen werden. Da eine Starterbatterie entwickelt werden sollte, muss auch gegen Überstrom gesichert werden, um die Zellen gegen zu große Belastung zu schützen. Dabei soll auf Über- und Unterspannung reagiert werden können, welche in bestimmten Grenzen über das Programmierool des BMS eingestellt werden können. Überschreitet die Spannung einer Zelle die jeweilige Grenze für eine gewisse Zeit, wird entweder der Lade-MOSFET

bei Überspannung oder der Entlade-MOSFET bei Unterspannung gesperrt. Dieses geschieht solange, bis alle Zellenspannungen in den zulässigen Spannungsbereich, zuzüglich einer Spannungshysterese zurückgekehrt sind. Zum anderen wird der Strom überwacht, welcher zu einer Abschaltung beider MOSFET führen würde, wenn die eingestellte Stromgrenze für eine gewisse Zeit überschritten ist. Dieses gilt ebenso für die Temperaturüberwachung.

Über- und Unterspannungsüberwachung

Lithium-Eisenphosphat-Akkumulatoren haben eine Ladeschlussspannung von 3,65 V und eine Entladeschlussspannung von 2,5 V. Die Überwachungselektronik muss diese Grenzen überwachen können und gegebenenfalls die Akkuzellen von dem Ladegerät oder der Last trennen können. Dieses ist notwendig, da sich eine Zelle bei Überladung selbst schädigt bis hin zur Zerstörung. Da hier eine Starterbatterie realisiert werden soll, kann es aufgrund der hohen Strombelastung vorkommen, dass die Zellenspannungen kurzzeitig unter die Entladeschlussspannung fallen. Deswegen ist es sinnvoll, wenn eine Verzögerungszeit für die Abschaltung einstellbar ist. Diese sollte bis ca. 2 Sekunden verzögern können, da davon ausgegangen wird, dass nach dieser Zeit der große Motorstartstrom nicht mehr fließt und der Motor sogar schon gestartet sein kann.

Stromüberwachung

Hier soll zwischen Dauerstrom und Pulsbelastung unterschieden werden. Da die Batterie belastet und auch geladen wird, muss auch dieses unterschieden werden können. In Tabelle 2.1 sind die Grenzen aus einem LiFePO₄-Datenblatt darstellt. Diese LiFePO₄-Zellen werden als Orientierung herangezogen, da zu dieser Zeit für die verwendeten Zellen noch keine Datenblätter zur Verfügung standen. Dieses ist möglich, da diese Zellen den Verwendeten in Kapazität und Baugröße nahe kommen.

	Nennstrom	Dauerstrom	Pulsstrom
Laden	38 A (1C)	114 A (3C)	228 A (6C)
Entladen	76 A (2C)	570 A (15C)	950 A (25C)

Tabelle 2.1: Strombelastungen einer LiFePO₄-Zelle

[9]

Temperaturüberwachung

LiFePO₄-Zellen gelten als thermisch stabil und bei dem ersten Prototyp nach Hillermann [11] sind keine Temperaturschwankungen an den Zellen nachweisbar gewesen. Aus diesem Grund kommt nur ein Temperatursensor zum Einsatz, welcher zwischen den Zellen angebracht wird. Der zulässige Temperaturbereich der Zellen befindet sich bei -15 °C – 60 °C nach [9]. Die Sicherheitselektronik muss diesen Temperaturbereich unterstützen und die Zellen gegebenenfalls schützen.

Balancierungsfunktion

Das BMS soll neben der Sicherheitsüberwachung eine möglichst hohe Lebensdauer der Batterie gewährleisten und sicherstellen, dass die Ladezustände der einzelnen Zellen aufeinander abgestimmt werden. Dies geschieht durch eine geeignete Zellsymmetrierung, das sogenannte „Cell Balancing“. Die Zellsymmetrierung oder Ausbalancierung der Ladezustände wird in der Regel durch Entladen vorgenommen. Dazu wird zu jeder Zelle ein Widerstand und ein Schaltelement vorgesehen, um einzelne Zellen gezielt entladen zu können wie Abbildung 2.1 andeutet. [5]

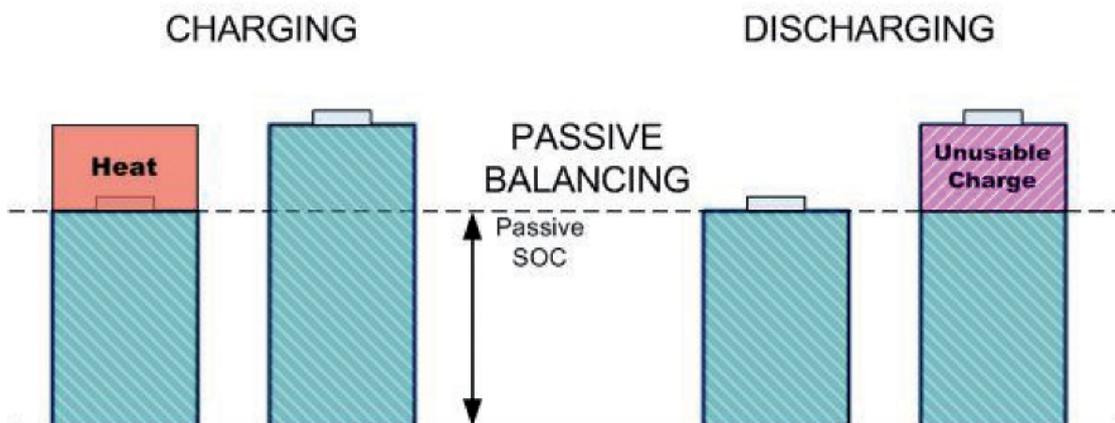


Abbildung 2.1: Passiver Ladungsausgleich von Batteriezellen
Modifiziert aus [18]

Die verwendete Überwachungselektronik

Da die Wahl auf das BMS BQ77910a von Texas Instruments gefallen ist, liegt zum einen daran, dass dieses die zuvor genannten Anforderungen erfüllt und bereits aus der ersten Prototypbatterie bekannt ist. Zudem arbeitet dieses BMS autark, wird also durch die zu überwachenden Akkuzellen versorgt und es ist keine weitere Steuerelektronik nötig. Die

Recherche nach besser geeigneten BMS blieb zu diesem Zeitpunkt ergebnislos. Aus diesem Grund wird auf die BMS-Recherche von [11] verwiesen.

Die Einstellmöglichkeiten des BQ77910a wurden dem Datenblatt des BQ77910a [21] entnommen und werden in den nachfolgenden Tabellen dargestellt.

Überspannung			
Einstellbereich	Schrittweite	Hysterese	Verzögerung
2,8 V – 4,375 V	25 mV	0 mV – 300 mV	0,5 s – 2,25 s

Tabelle 2.2: Einstellbereich der Überspannung des BQ77910a

Unterspannung			
Einstellbereich	Schrittweite	Hysterese	Verzögerung
1,4 V – 2,9 V	100 mV	0,4 V - 1,6 V	0 s – 32 s

Tabelle 2.3: Einstellbereich der Unterspannung des BQ77910a

Der Strom wird von dem BMS BQ77910a über einen $1\text{ m}\Omega$ Strommesswiderstand ermittelt. Da bei der hier entstehenden Starterbatterie ein Strommesswiderstand von $2\text{ m}\Omega$ eingesetzt werden sollte, muss in dem Programmierool für das BMS der doppelte Strom eingestellt werden, um auf das gewünschte Ergebnis zu kommen.

Überstrom bei Entladung		
Einstellbereich	Schrittweite	Verzögerung
125 A – 500 A	25 A	20 ms – 2000 ms
Tatsächliche Strombegrenzung		
Einstellbereich	Schrittweite	Verzögerung
62,5 A – 250 A	12,5 A	20 ms – 2000 ms

Tabelle 2.4: Einstellbereich des Entladestroms des BQ77910a

Pulsstrombegrenzung bei Entladung		
Einstellbereich	Schrittweite	Verzögerung
100 A – 950 A	50 A	$60\ \mu\text{s}$ – $1500\ \mu\text{s}$
Tatsächliche Strombegrenzung		
Einstellbereich	Schrittweite	Verzögerung
50 A – 475 A	25 A	$60\ \mu\text{s}$ – $1500\ \mu\text{s}$

Tabelle 2.5: Einstellbereich des Pulsentladestroms des BQ77910a

Pulsstrombegrenzung bei Ladung		
Einstellbereich	Schrittweite	Verzögerung
-50 A – -425 A	25 A	60 μ s – 960 μ s
Tatsächliche Strombegrenzung		
Einstellbereich	Schrittweite	Verzögerung
-25 A – -212,5 A	12,5 A	60 μ s – 960 μ s

Tabelle 2.6: Einstellbereich des Plusladestroms des BQ77910a

Mit einem NTC-103-Tempersensor (B-Wert: 3435 K \pm 0,5 %) soll die Temperatur im inneren des Batteriegehäuses gemessen werden. Der BQ77910a hat einen festen Arbeitstemperaturbereich von 0 °C – 60 °C, welcher sich nicht konfigurieren lässt. Überschreitet die Temperatur diese Grenzen, werden die Zellen von der Last getrennt.

2.3 Die erste Prototyp-Batterie nach Hillermann [11]

Bei dem ersten Prototyp [11] wurden zwei LiFePO₄-Stränge mit vier Zellen und 16 Ah Kapazität parallel zusammengeschaltet. Um eventuelle Ausgleichsströme zu unterbinden, wurden die Stränge durch Dioden voneinander getrennt. Dieses hat zur Folge, dass über die Dioden immer eine Spannung von 0,7 V abfällt. Eine Lichtmaschine, welche die Batterie während des Fahrens aufladen soll, hat eine Nennspannung von ca. 13,8 V. Bei vier LiFePO₄-Zellen in Reihe und einer Diode kommt man auf eine Ladeschlussspannung von 13,9 V. Somit ist ein DC/DC-Wandler erforderlich um die Lichtmaschinenspannung hochzusetzen. Desweiteren sind durch die getrennten Batteriestränge separate BMS, DC/DC-Wandler und Leistungselektronik notwendig, wie in Abbildung 2.2 dargestellt ist.

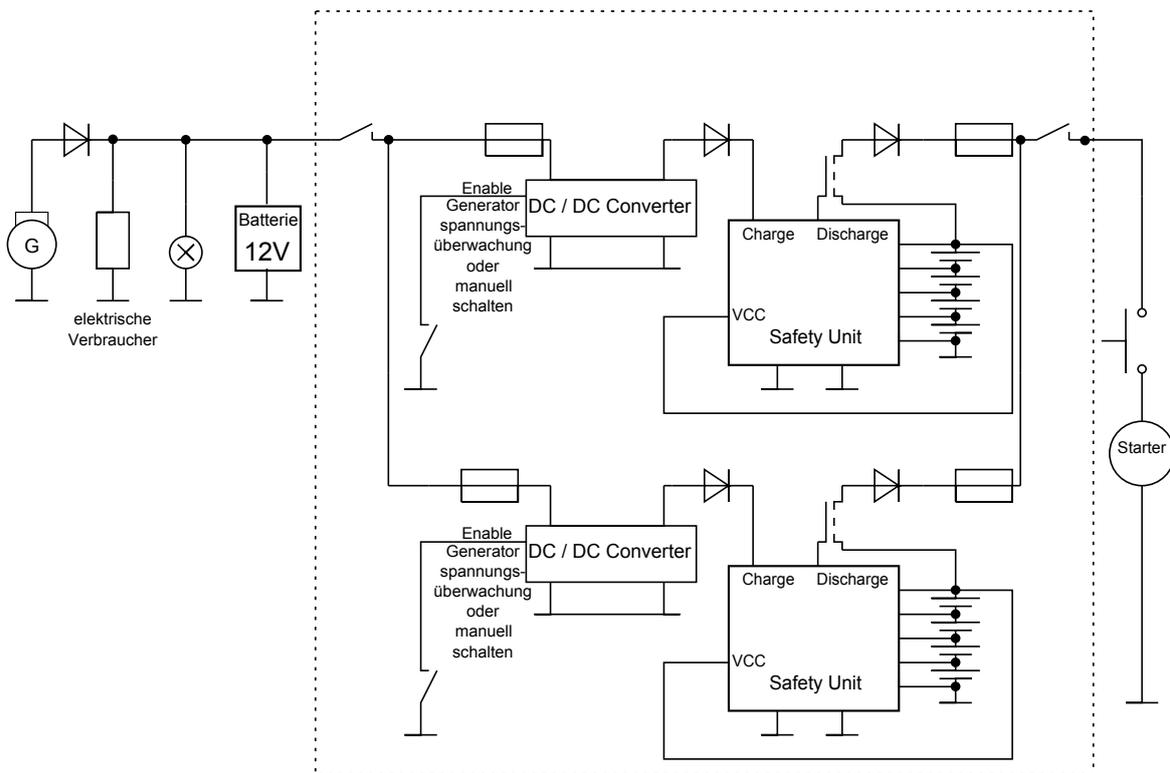


Abbildung 2.2: Schematischer Schaltungsaufbau des ersten Prototypen [11]

2.3.1 Gesammelte Erfahrungen

Bei der ersten Prototypbatterie nach Hillermann [11] konnte nachgewiesen werden, dass eine LiFePO₄-Starterbatterie als Ersatz zur konventionellen Blei-Säure-Batterie dienen kann. Es konnte erfolgreich ein Audi mit 6-Zylinder 2,8 Liter und 142 kW Benzinmotor gestartet werden.

Bereits erzielte Erkenntnisse aus der Diplomarbeit von [11] waren zum einen, dass die erwarteten Temperaturschwankungen beim Laden und Entladen nicht auftraten und zum anderen, dass das verwendete Gehäuse für einen Versuchsaufbau zu klein gewählt war.

Nach mehreren Startversuchen und Ladevorgängen ist aufgefallen, dass die Zellenspannungen langsam auseinanderdriften. Da über die Zellenspannung Rückschlüsse auf den Ladezustand einer Zelle gezogen werden kann, ist davon auszugehen, dass die Zellen im Strang unterschiedlich stark belastet oder geladen wurden. Um dieses zu verhindern, ist eine Zellenbalancierung notwendig, um die Ladezustände der Zellen einander anzupassen.

In Abbildung 2.3 ist ein einzelner Strang mit Lade-, Leistungs- und Sicherheitselektronik nach [11] dargestellt. Da die Spannung zum Laden hochgesetzt wird, muss die Batterie

getrennte Lade- und Endladepole besitzen. Somit ist dieser Prototyp nicht als vollwertiger Ersatz zur konventionellen Blei-Säure-Starterbatterie zu sehen.

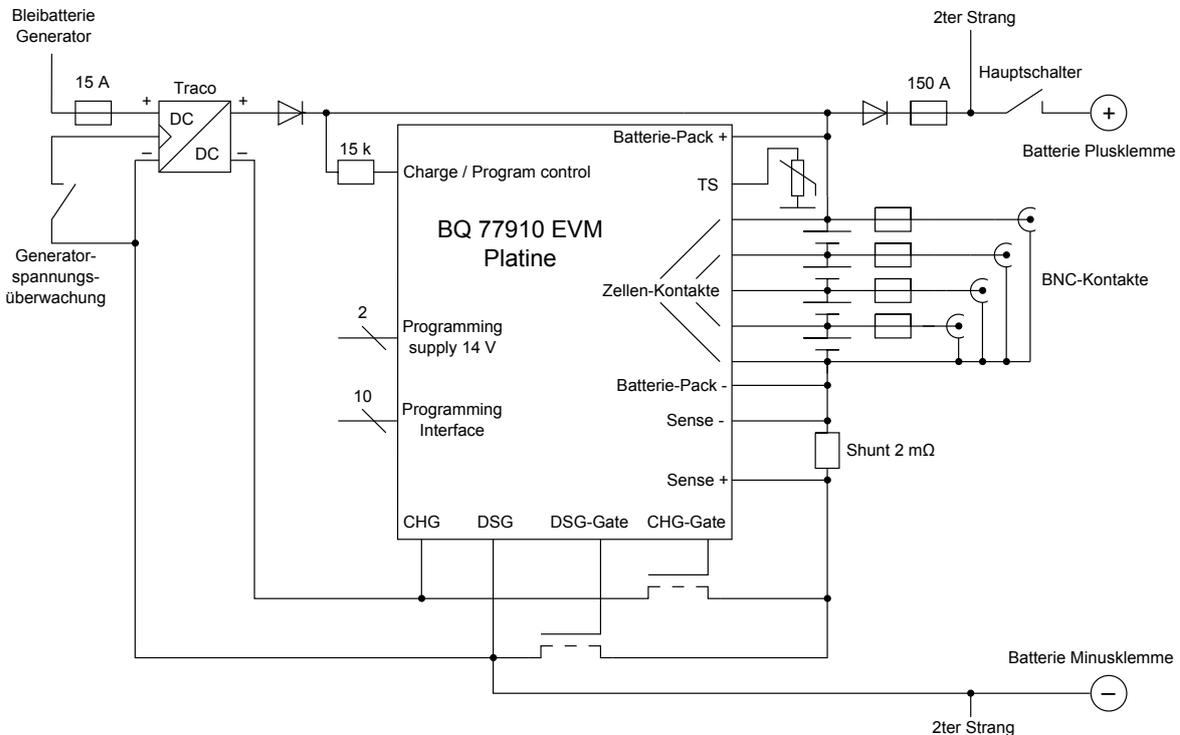


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung des Leistungsteils eines Zellenstranges vom ersten Prototypen

[11]

Um diese Nachteile zu beseitigen, können die verwendeten 16 Ah LiFePO₄-Stränge ohne Dioden parallel geschaltet werden. Somit kann der DC/DC-Wandler eingespart werden und die Batterie direkt vom der Lichtmaschine geladen werden. Außerdem können die parallel geschalteten Zellen zusammen auf Über- und Unterspannung überwacht werden. Diese Konfiguration spart ein BMS und einen Leistungsteil ein. Ob parallel geschaltete Batteriestränge aus Sicherheitsgründen durch Dioden getrennt werden müssen, hängt von vielen Faktoren, wie dem Anwendungsfall und dem Zustand der Zellen ab und kann zu diesem Zeitpunkt nicht sicher bestimmt werden.

Da es inzwischen LiFePO₄-Zellen mit mehr als der doppelten Kapazität gibt, reicht es bei dem nächsten Prototypen, einen einzelnen Strang mit Überwachungs- und Leistungselektronik aufzubauen.

Bei dem ersten Prototypen sollte getestet werden, ob das BMS von Texas Instruments (BQ77910) für eine PKW-Starterbatterie ausreichend ist. Es wurde ein Evaluationsboard verwendet, bei dem die für geringe Leistung ausgelegten MOSFET und Strommesswiderstände von der Platine getrennt und durch leistungsstärkere, externe Bauteile ersetzt wur-

den. Bei dem neuen Prototypen sollte eine eigene Platine entworfen werden, welche die Steuersignale über Klemmleisten zur Leistungselektronik führt. Auch die enthaltene Balancierungsfunktion sollte durch einen externen Aufbau erweitert und auf die neue Platine gebracht werden.

3 Aufbau des Batteriesystems

Da das BMS BQ77910a von Texas Instruments eingesetzt werden sollte, wurde der Schaltungsentwurf des Evaluationsboard für dieses BMS als Vorbild genommen und für die neuen Anforderungen angepasst. Der Schaltplan und eine detaillierte Beschreibung der Anschlussklemmen der BMS-Platine befindet sich im Anhang dieser Ausarbeitung.

3.1 Entwurf der BMS-Platine

Es sollte eine Sicherheitselektronik für eine KFZ-Starterbatterie mit 12 V realisiert werden. Hierzu reicht es eine 4-Zellen-Überwachung zu entwickeln. Da ein weiterer Schritt bei der LiFePO₄-Batterien Entwicklung 24 V Batterien für Flurförderfahrzeuge sind, wurde die Platine für die maximal 10 unterstützten Zellen ausgelegt.

Die Programmierschnittstelle wurde auf der neu erstellten Platine übernommen. Die Spannungen für die Ansteuerung der Lade- und Entlade-MOSFET sind zusätzlich über Dioden an Messklemmen hinausgeführt worden, damit der Signalverlauf verfolgt werden kann, ohne eventuelle Rückwirkungen durch die Messung befürchten zu müssen.

Die Platine wurde so entworfen, dass die Leistungselektronik über Klemmenkontakte komplett ausgelagert ist. Um das Evaluationsboard von TI konfigurieren zu können, muss dort über einen externen 15 k Ω Widerstand die Zellenspannung an den CHGST-Pin des BQ77910a gelegt werden. Um dieses zu vereinfachen, wurde der Programmierwiderstand für den BQ77910a auf der Platine integriert und kann über einen Jumper geschaltet werden. Der Temperaturfühler wird über einen Steckkontakt an die Platine angeschlossen und kann so an einen beliebigen Ort innerhalb der Starterbatterie gebracht werden. Da es sich immer noch um einen Prototypen handelt, sind zudem Steckkontakte zum Abgreifen der Zellenspannungen angebracht an denen BNC-Kontakte angeschlossen werden können, um die Spannungsverläufe extern an einem Oszilloskop verfolgen zu können. Darüber hinaus sind an verschiedenen Stellen Testpunkte vorhanden.

Das verwendete BMS BQ77910a besitzt eine Zellenbalancierfunktion, welche einen Balancierungsstrom von 50 mA zulässt. Da LiFePO₄-Zellen mit einer Kapazität von 50 Ah eingesetzt werden sollten, wurde eine Schaltung zur Verstärkung des Balancierungsstroms

auf die Platine gebracht. Ein Schaltungsbeispiel wurde von Texas Instruments bereitgestellt und in Abbildung 3.1 dargestellt.

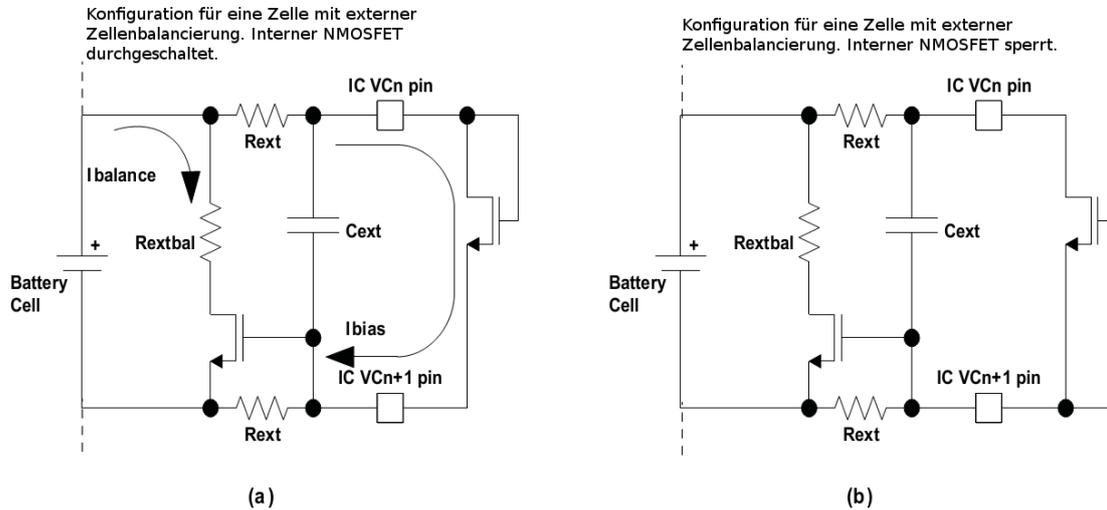


Abbildung 3.1: Externe Beschaltung der Balancingfunktion
Modifiziert aus [20]

Es wird davon ausgegangen, dass die Ladungszustände der Zellen nur langsam auseinanderdriften, deshalb wurde der Balancierungsstrom auf 0,5 A begrenzt. Daraus ergibt sich folgende Leistungsanforderung an den Entladewiderstand:

$$\begin{aligned}
 I_{bal} &= 0,5 A \\
 R_{bal} &= \frac{U_{Cell}}{I_{bal}} = \frac{3,3 V}{0,5 A} = 6,6 \Omega \rightarrow 6,8 \Omega \\
 P_{bal} &= \frac{(U_{Cell})^2}{R_{bal}} = \frac{(3,65 V)^2}{6,8 \Omega} = 1,96 W
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

Der Balancierungswiderstand wurde für die Nennspannung einer LiFePO4-Zelle ausgelegt, wobei die maximale Leistung für die Ladeschlussspannung dieses Zellentypen ausgerechnet wurde. Mit diesen Werten wurde ein 2 W SMD-Lastwiderstand (RCL12256R80JNEG) ausgewählt und ein N-Channel SMD-MOSFET (IRLML2060TRPBF), welcher für eine Belastbarkeit von 1,2 A/3,6 W ausgelegt ist. Mit dem R_{DSon} des MOSFETs ergibt sich ein maximaler Balancierungsstrom von:

$$I_{bal} = \frac{U_{Cell}}{R_{bal} + R_{DSon}} = \frac{3,65 V}{6,8 \Omega + 480 m\Omega} = 0,501 A
 \tag{3.2}$$

Der komplette Schaltplan sowie die Klemmenbelegungen der entwickelten BMS-Platine befinden sich im Anhang 7 dieser Arbeit.

3.2 Der Leistungsteil

Um die LiFePO₄-Zellen schützen zu können, muss auch eine entsprechende Leistungselektronik zum Trennen der Zellen von der Last oder dem Ladegerät installiert werden. Hier dienen MOSFET vom Typ STE250NS10 der Firma ST als Leistungsschalter. Diese MOSFET werden von der Überwachungselektronik, der BMS-Platine gesteuert. Die verwendeten MOSFET sind selbstsperrend, damit auch bei Ausfall der Überwachungselektronik die Zellen vom Stromkreis getrennt werden.

Zusätzlich kommt eine träge 150 A Schmelzsicherung in den Lastkreis, damit bei eventuellen Fehlfunktionen sicher abgeschaltet wird. Außerdem wird ein mechanischer Schalter am Gehäuse angebracht, um die Batterie manuell abschalten zu können.

Der Leistungsteil des BMS kann auf unterschiedliche Weise aufgebaut werden. Hier sollen zwei Möglichkeiten dargestellt werden.

3.2.1 Separater Lade- und Entladezweig

Das Evaluationsboard von Texas Instruments für das verwendete BMS BQ77910a verwendet getrennte Lade- und Entlade-MOSFET.

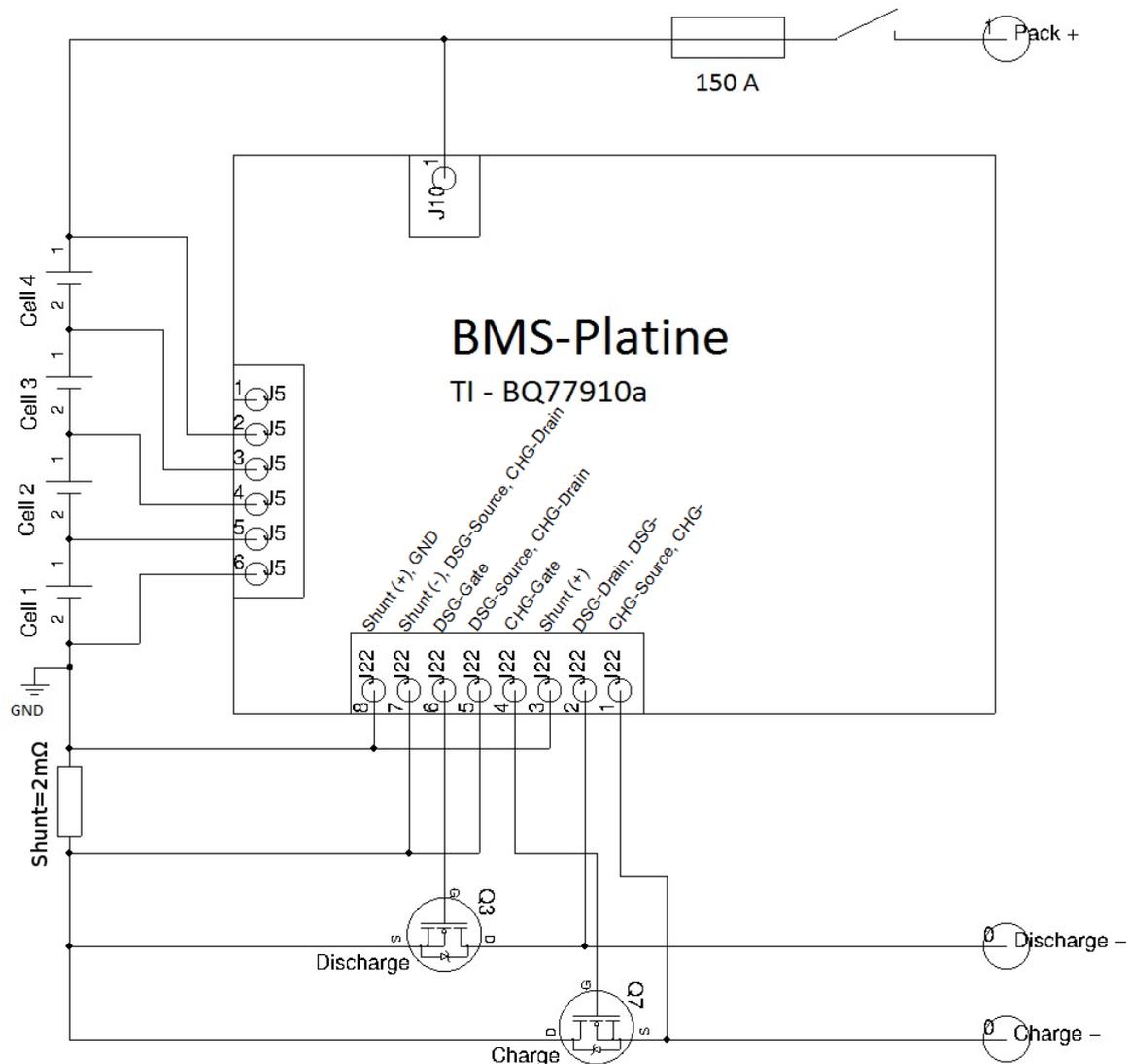


Abbildung 3.2: Hardwareaufbau Leistungsteil. – Separater Lade- und Entladezweig.

Wie in der Grafik 3.2 zu erkennen ist, gibt es bei diesem Aufbau einen positiven Pol und zwei getrennte Massen. Eine Masse ist zum Laden der Akkuzellen, die andere zum Entladen. Dieses bringt den Vorteil, dass nur der Spannungsabfall über einen MOSFET von der Gesamtspannung abfällt. Der Nachteil ist jedoch, dass diese Konfiguration nicht einfach eine konventionelle Bleibatterie im Fahrzeug ersetzen kann.

3.2.2 Zusammengeführte Lade- und Entladezweige

Im Datenblatt zum BMS wird auch der Aufbau der Leistungsteils wie in Abbildung 3.3 vorgeschlagen.

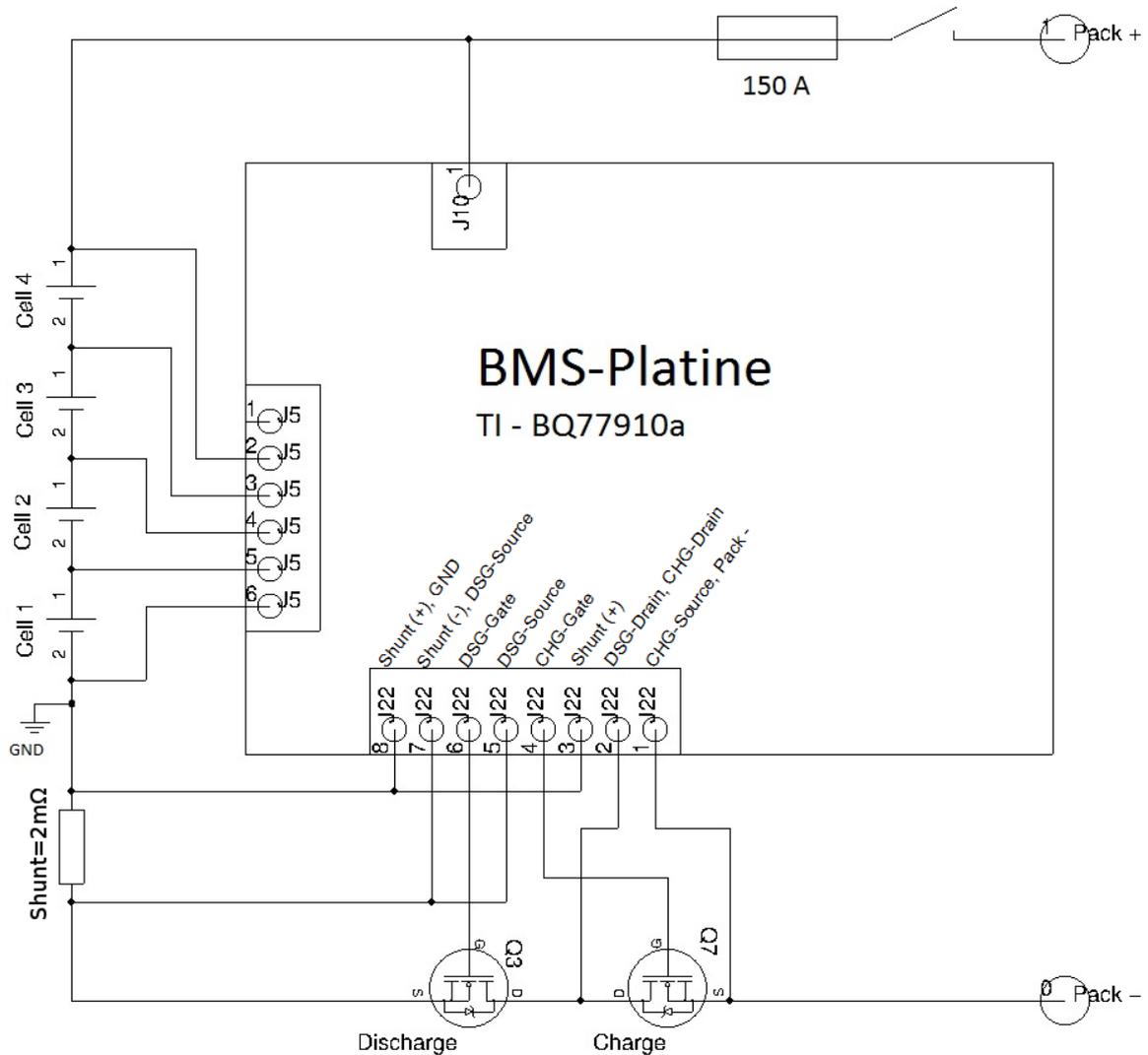


Abbildung 3.3: Hardwareaufbau Leistungsteil. – Lade- und Entlade-FETs in Reihe.

In diesem Schaltungsaufbau gibt es nur jeweils einen positiven und einen negativen Pol. Dieser Aufbau kommt einer wirklichen Starterbatterie sehr viel näher, da jetzt über dieselben Kontakte geladen und entladen werden kann. Der Nachteil ist, dass immer eine Restspannung über beide MOSFET von der Gesamtspannung der LiFePO₄-Batterie abfällt.

3.2.3 Vergleich der Schaltungen

Der Aufbau nach Abbildung 3.2 findet in Geräten Verwendung, bei denen der Hersteller den Akkumulator und das Ladegerät mitliefert. Dieses ist z.B. bei Notebooks und einigen Akkuwerkzeugen der Fall. Der Leistungsteil im ersten Prototyp bei [11] wurde nach diesem Prinzip aufgebaut, da das verwendete Evaluationsboard dieses vorgegeben hat und zunächst nur nachgewiesen werden sollte, ob LiFePO₄-Batterien als zukünftige Starterbatterien in Frage kommen.

Hier sollte eine Batterie entwickelt werden, welche als Ersatz zur konventionellen Blei-Säure-Starterbatterie zum Einsatz kommen kann. Voraussetzung dafür sind elektrische Eigenschaften, wie die Hochstromfähigkeit und eine hohe Zyklenfestigkeit. Die Nennspannung muss das gegebene Bordnetz der Fahrzeuge unterstützen und es muss, eine direkte Austauschbarkeit der vorhandenen Batterie ermöglicht werden. Deshalb wurde sich für den Schaltungsaufbau nach Abbildung 3.3 entschieden, da dieser Aufbau den direkten Tausch der Bleibatterie gestattet.

3.2.4 Verwendete Bauteile

Da es sich um eine Starterbatterie für PKW handelt, fließen entsprechende Ströme. Dafür müssen die Leistungsbauteile ausgelegt werden. Bei dem Prototyp nach Hillermann [11] wurden MOSFET der Firma ST als Leistungsschalter eingesetzt, welche für einen Dauerstrom vom 220 A und einen Pulsstrom von 880 A ausgelegt sind. Hinzu kommt ein Strommesswiderstand der Firma OHMITE mit 2 m Ω und einer Pulsbelastungsfähigkeit von 950 A.

Diese Bauteile haben sich bewährt und wurden deshalb weiter eingesetzt.

3.3 Mechanische Konstruktion

3.3.1 Auswahl des Gehäuses

Da eine mobile Batterie aufgebaut werden sollte, wurde ein Blechkoffer mit 1 mm Wandstärke gewählt. Um mehr Stabilität in den Koffer zu bringen, ist eine 5 mm starke Aluminiumplatte als Bodenplatte installiert worden. Diese wird zusätzlich als Bauteileträger verwendet, wie es auch bei Elektronikschaltschränken üblich ist. So entsteht eine Konstruktion nach dem Baukastenprinzip, welche sich leicht ändern oder erweitern lässt. Da die Leistungsbauteile direkt auf die Aluminiumplatte montiert werden, dient diese zusätzlich der Kühlung.

Da es sich immer noch um einen Prototypen handelt, wurden BNC-Buchsen an dem Gehäuse installiert, worüber die einzelnen Zellenspannungen mit einem Oszilloskop abgegriffen werden können. Um die Oszilloskopanschlüsse gegen Überstrom zu schützen, wurden diese Messanschlüsse mit Schmelzsicherungen gesichert.

3.3.2 Positionierung der Bauteile

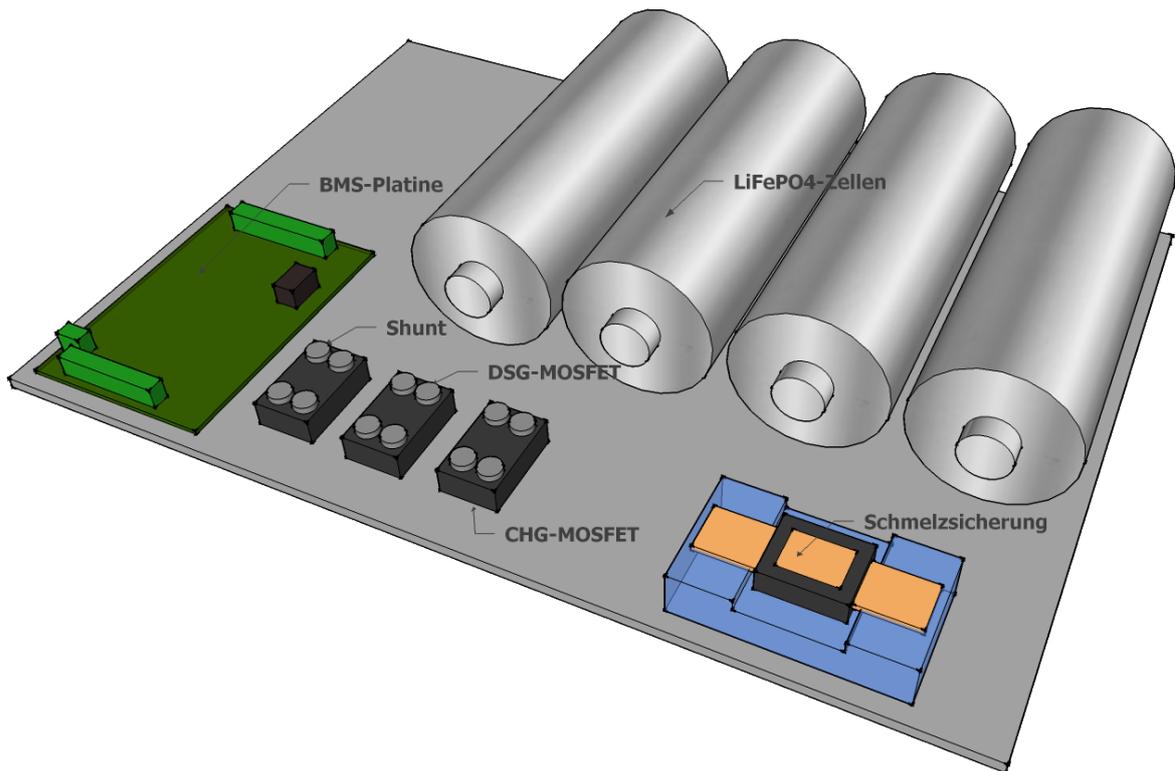


Abbildung 3.4: Positionen der einzelnen Bauteile

Um zu überprüfen, wieviel Platz benötigt wird, damit ein übersichtlicher Aufbau gewährleistet werden kann, wurden mit dem CAD-Programm Google-Sketchup 8 [12] Modelle der einzelnen Bauteile angefertigt und durch einfaches Ausprobieren die optimalen Positionen auf der Bodenplatte ermittelt.

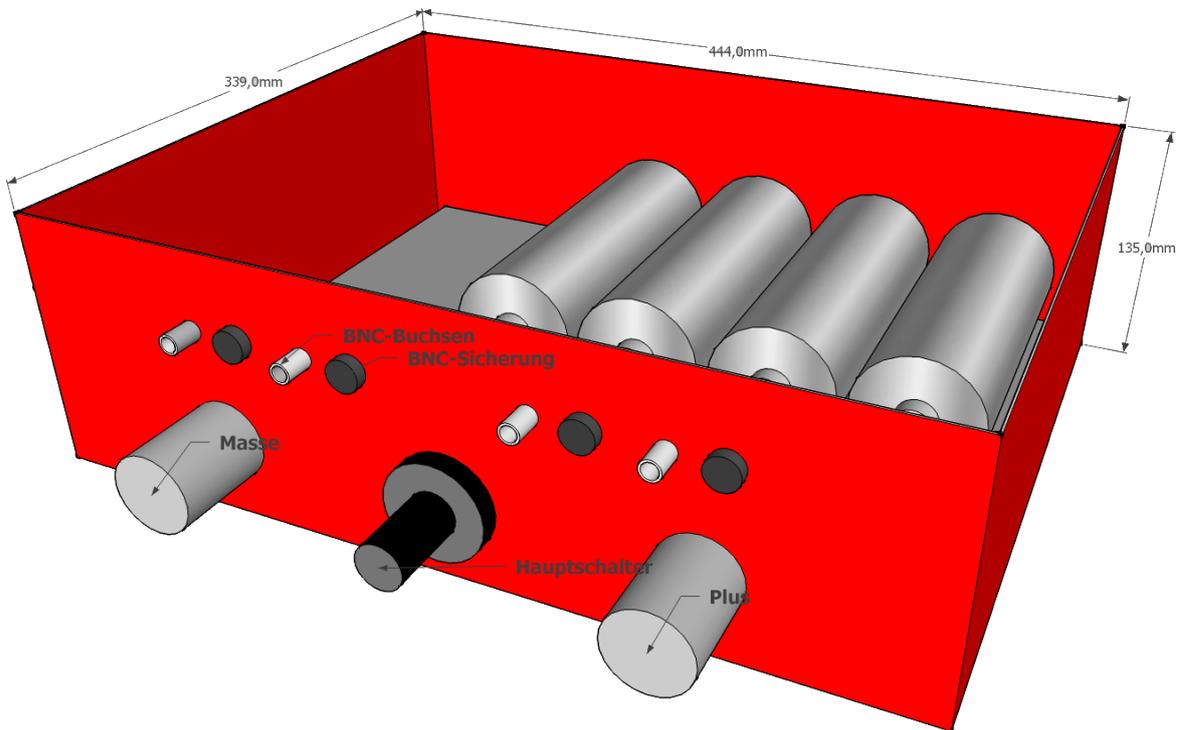


Abbildung 3.5: Batteriekasten mit bestückter Bodenplatte und Anbauteilen

Die Montageplatte wurde fest in den Koffer installiert. An der Frontseite sind die beiden Batteriepole, der Hauptschalter und BNC-Buchsen zum Messen der einzelnen Zellspannungen am Oszilloskop hinausgeführt. Zur Verdrahtung der Messkontakte, sowie die Steuerleitungen für die MOSFET wurden Leitungen mit einem Querschnitt von $0,5\text{ mm}^2$ verwendet. Die LiFePO₄-Zellen wurden mit einer 16 mm^2 Leitung verbunden, wie der gesamte Leistungsteil der Starterbatterie. Die Kontaktstärken der Leistungsbauteile sind in Tabelle 3.1 beschrieben.

Bauteil	Schraubkontakt
LiFePO ₄ -Zellen	M10 / 10 mm
Shunt	M4 / 8 mm
MOSFET	M4 / 8 mm
Schmelzsicherung	M8 / 100 mm
Anschlusspole	M10 / 15 mm
Schlüsselschalter	M10

Tabelle 3.1: Verbindungsstärken der Leistungsbauteile

Eine 150 A Schmelzsicherung wurde als Fall-back-Sicherung in den Lastkreis mit eingebracht. Die Anschlusspole wurden aus Aluminiumzylindern gedreht und mit M32 Kabelverschraubungen am Batteriegehäuse fixiert.

4 Inbetriebnahme

4.1 BMS-Platine

4.1.1 Sichtprüfung

Bevor die BMS-Platine getestet werden kann, wurde diese einer Sichtprüfung unterzogen. Dabei werden die Bauteile und Lötstellen visuell kontrolliert, um eventuelle Kurzschlüsse zu vermeiden. Ob die Verbindungen der Anschlussbeine des ICs (BQ77910a) korrekt sind, wurde unter einem Mikroskope kontrolliert und vorhandene Kurzschlüsse beseitigt.

4.1.2 Funktionsprüfung

Damit der BQ77910a über den PC ausgelesen werden kann, müssen zuerst einige Vorbereitungen getroffen werden. Ein Zellenimulator muss an die Klemmen J4 und J5 angeschlossen werden, über welche die Zellenspannungen für den BQ77910a abgegriffen werden. Bei dem Simulator handelt es sich um ein einfaches Widerstandsnetzwerk welches die einzelnen Zellenspannungen simuliert und selbst durch ein externes Netzteil mit Strombegrenzung versorgt wird. Dieselbe Spannung dient auch zum Betrieb des BQ77910a und liegt bei ca. 30 V an den Klemmen J10 (+30 V) und J22.8 (GND). Die Zellen werden zunächst simuliert, damit bei einer eventuellen Fehlfunktion seitens der BMS-Platine, der Strom und damit der Schaden begrenzt werden kann und die Zellen nicht beschädigt werden.

Beim Simulieren der Zellen ist aufgefallen, dass die Lastwiderstände, welche den verstärkten Balancierungsstrom begrenzen, sich erhitzen. Die Balancierungsschaltung ist in Abbildung 3.1 auf Seite 21 dargestellt. Nach Überprüfen der Schaltung fiel weiterhin auf, dass bei der Konzeption der Platine die MOSFET, welche für die Erhöhung des Balancierungsstroms verantwortlich sind, Drain und Source vertauscht wurden. Durch das Diodenverhalten der MOSFET im Inversbetrieb ist dauerhaft ein Strom geflossen, welcher die Zellen langsam entlädt. Durch den physikalischen Aufbau der dreibeinigen MOSFET ist ein Redesign der BMS-Platine notwendig. Für die weitere Inbetriebnahme wurden die Balancierungs-MOSFET und -Lastwiderstände von der BMS-Platine entfernt und der Test der Balancierungsfunktion verschoben.

Durch Anlegen der Versorgungsspannung an den BQ77910a, kann der TI Interface Adapter an Klemme J3 und eine 14 V Programmierspannung an Klemme J2 angeschlossen werden. Um den BQ77910a mit dem PC ansprechen zu können, muss dieser erst aufgeweckt werden. Dieses geschieht, indem ein Jumper auf Klemme J20 gesteckt wird.

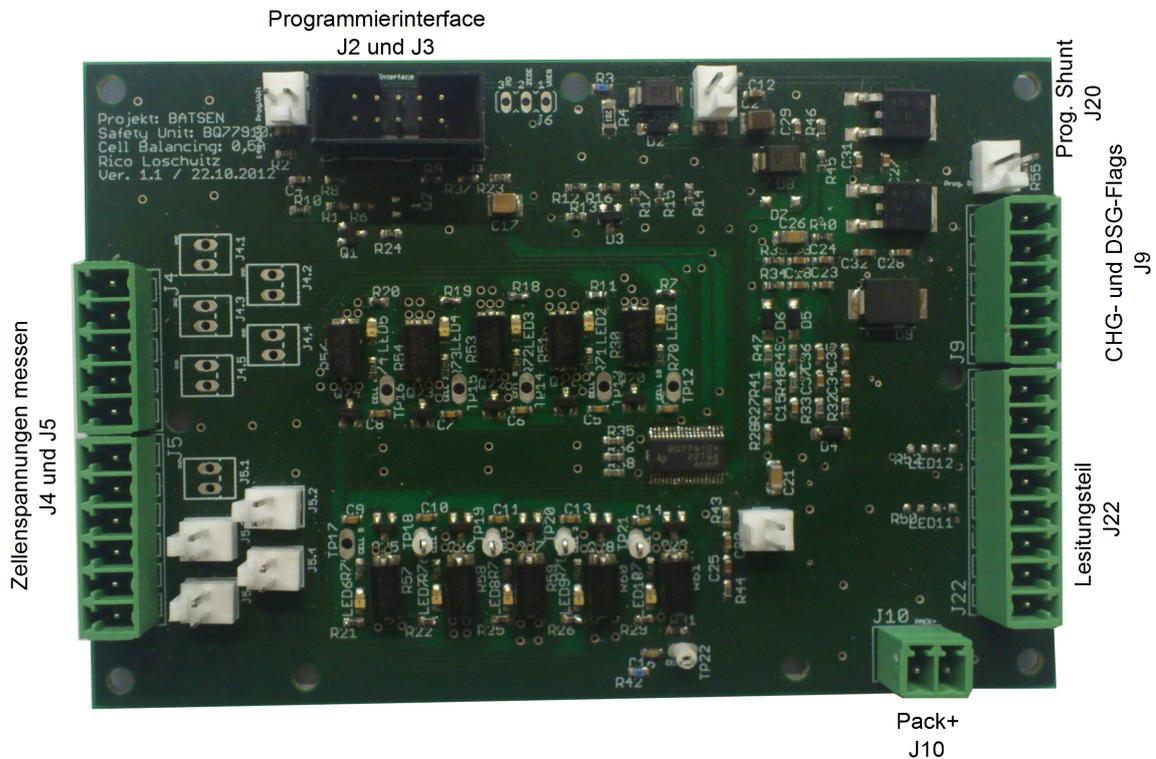


Abbildung 4.1: BMS – Hier wird die 2. Version der BMS-Platine mit Bezeichnungen der Klemmleisten dargestellt.

Ist das BMS korrekt vorbereitet und das Programmiertool geöffnet, wird der BQ77910a sofort erkannt und seine Einstellungen ausgelesen.

Da der BQ77910a von dem Programmiertool auch nach mehreren Versuchen nicht erkannt werden konnte, wurden nochmals die Lötstellen auf Fehler überprüft. Nach Kontrolle des Schaltplans hat sich herausgestellt, dass eine fehlende Masseverbindung auf Pin 8 der Klemme J22 das Verbinden mit dem PC verhindert hat.

Nach der Fehlerbehebung, sowie erneutem Aufbau der Schaltung und Starten des TI-Programmiertools wurde der BQ77910a erkannt und alle Daten erfolgreich ausgelesen. Einstellungen konnten verändert und wieder zurückgeladen werden. Durch Variieren der Spannung am Zellsimulator konnte eine Über- und Unterspannung der zu überwachen Zellen simuliert werden. Durch einfaches Messen der Charge- (CHG-) und Discharge- (DSG-)Flags an Klemme J9 mit einem Multimeter, konnte bestätigt werden, dass das BMS im Fehlerfall die Leistungsschalter, wie erwartet, in den sperrenden Zustand schaltet.

Nachdem alle Funktionen der BMS-Platine getestet und die Ursachen der vorhandenen Fehler entdeckt wurden, ist ein Redesign der Platine erstellt worden. Diese wurde nochmals, wie in diesem Kapitel beschrieben, kontrolliert und getestet.

4.2 Die LiFePO4-Zellen

Da es sich bei den eingesetzten Zellen noch um Vorserienmodelle handelt, welche von der Firma ecc Repenning GmbH zur Verfügung gestellt wurden, konnte keine vollständige Gewährleistung auf die Funktionsfähigkeit der Zellen gegeben werden. Da diese bei der Übergabe unterschiedliche Ladungszustände aufwiesen, wurden die Zellen zuerst einzeln bis zur Ladeschlussspannung von 3,65 V geladen.

4.2.1 Impedanzspektroskopie

Um den Innenwiderstand von LiFePO4-Zellen zu bestimmen, reicht es nicht, einen einfachen Belastungstest durchzuführen. Deshalb wurden die Zellen einer Impedanzspektroskopie unterzogen. Hier wird der Innenwiderstand der Zellen unter einer Last von 900 mA über verschiedene Frequenzen ermittelt.

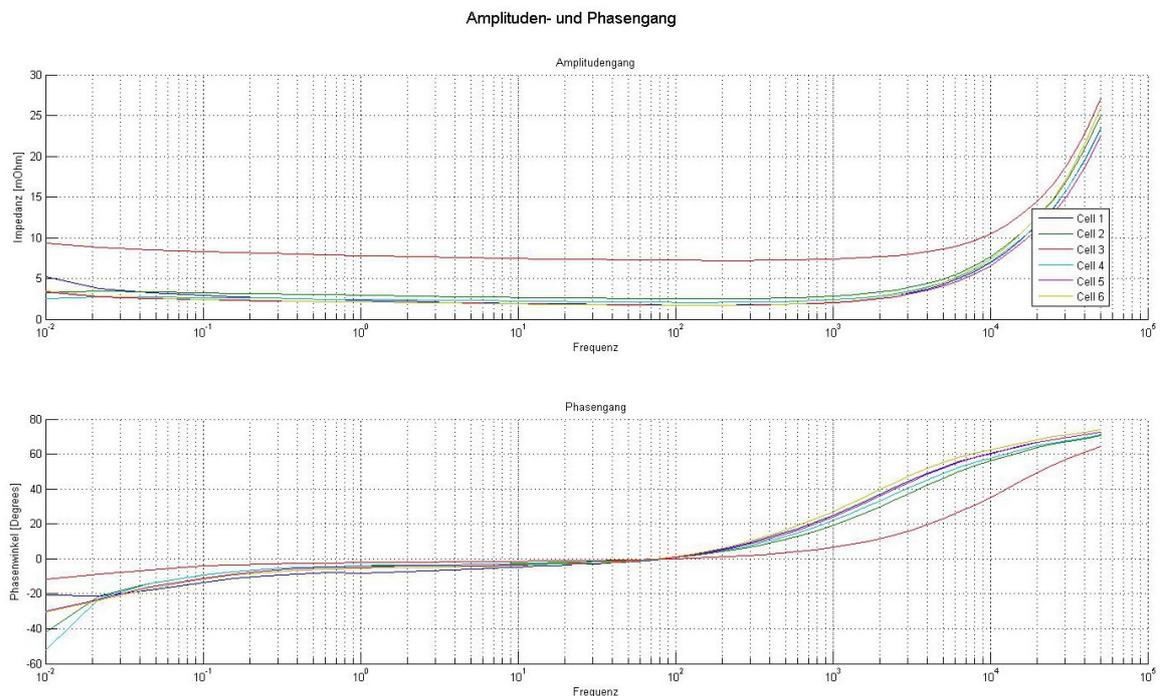


Abbildung 4.2: Impedanzspektroskopie aller Zellen

Aus den Messungen in Abbildung 4.2 geht hervor, dass die Zelle 3 einen abweichenden Amplituden- und Frequenzgang als die anderen aufweist. Tatsächlich ist die Zelle 3 bei späteren Startversuchen am Fahrzeug auch geschädigt worden, was sich durch einen sehr starken Spannungseinbruch bemerkbar machte. Die anderen Zellen wiesen alle einen ähnlichen Amplituden- und Frequenzgang auf, was den Einsatz dieser Zellen im Verbund erlaubt.

4.3 Gesamtaufbau

Nachdem die einzelnen Komponenten überprüft wurden, sind diese zur Starterbatterie zusammengefügt worden. Die Gesamtkonstruktion wurde an einem Messplatz kontrolliert geladen und entladen. Dabei wurden über externe Messgeräte die Gesamtspannung, der Strom und die Temperatur der Batterie gemessen. Die Messdaten wurden mit Matlab an einem PC eingelesen, welcher im Fehlerfall über eine Relaiskarte das Ladegerät oder die Last von der Batterie trennen kann.

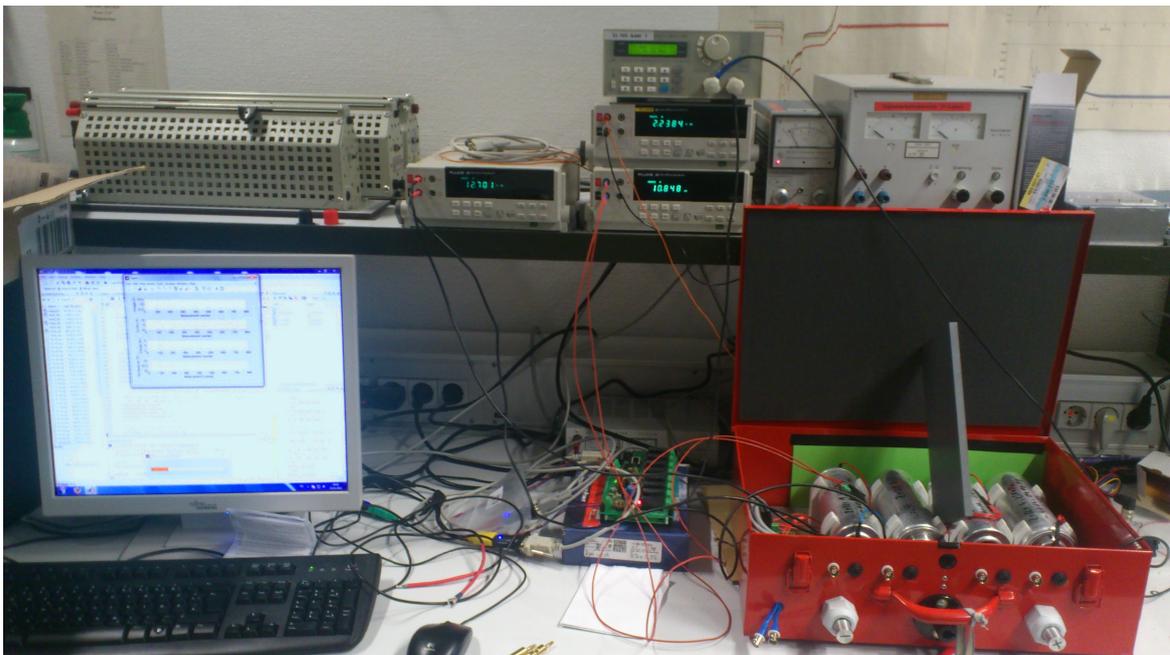


Abbildung 4.3: Messaufbau mit Starterbatterie

Abbildung 4.3 zeigt den Messaufbau zur kontrollierten Ladung und Entladung. Die Zellenspannungen und die Leistungselektronik wurde mit einem Fluke 45 Tischmultimeter mit einer Genauigkeit von $\pm 0,025\%$ [23] gemessen. Der Strom wurde über einen Hallensensor LEM DHAB S/24 im Messbereich $\pm 75\text{ A}$ und der Genauigkeit von $\pm 2\%$ [17] und einem Fluke 45 gemessen. Die Temperatur wurde mit einem CON-TS-NTC Temperatursensor mit einer Toleranz von $\pm 0,5\%$ [10] und einem weiteren Fluke 45 gemessen.

Die Messungen der drei Fluke 45 wurden über deren serielle Schnittstelle mittels Matlab am PC im Sekundentakt ausgelesen, ausgewertet und in Diagrammen dargestellt. Im Fehlerfall wird die Batterie durch eine Conrad 8fach-Relaiskarte 230 V / AC, 16 A vom Lastkreis getrennt.

Geladen wurde die Batterie durch ein 10 A Netzteil mit Strombegrenzung, welche beim ersten Test auf 4 A eingestellt wurde. Entladen wurden die LiFePO₄-Zellen über eine elektronische Last (EA-EL 3710 A), welche eine Quelle mit maximal 10 A oder 150 W belasten kann.

Hier hat sich gezeigt, dass die Leistungselektronik bei Über- und Unterspannung die Batterie sicher von der externen Beschaltung trennt. Eine Temperaturänderung konnte nicht festgestellt werden, was auf die geringen Ströme zurückzuführen ist.

5 Erprobung der Batterie

Nach der Inbetriebnahme der Platine, der LiFePO₄-Zellen und dem Hardwareaufbau des Leistungsteils, wurde die Starterbatterie an drei Testfahrzeugen überprüft. Durch die Reihenschaltung der MOSFET ist es möglich, die LiFePO₄-Batterie als vollwertige Starterbatterie im Fahrzeug einzusetzen. Bei diesem Aufbau ist es nicht mehr notwendig, die Bordelektronik des Fahrzeugs durch eine separate Batterie zu stützen, wie es noch beim ersten Prototyp nach [11] der Fall war.

5.1 Startversuch am Fahrzeug

In Tabelle 5.1 sind die verwendeten Testfahrzeuge mit den wichtigsten Motordaten aufgelistet.

Hersteller	Typ	Motor	Hubraum	Zylinder	Leistung	Baujahr
BMW	3C	OTTO/GKAT	1,6 Liter	4	75 kW	1994
Volkswagen	Golf 3	OTTO/GKAT	1,8 Liter	4	55 kW	1991
Audi	A4	OTTO/GKAT	2,8 Liter	6	142 kW	1999

Tabelle 5.1: Liste der Testfahrzeuge

Im Folgenden werden die Fahrzeuge nur durch Angabe der Hersteller bezeichnet.

Die LiFePO₄-Batterie wurde zuerst in dem BMW getestet. Um die Messwerte aufnehmen zu können, wurden die einzelnen Zellspannungen über die BNC-Buchsen sowie der Gesamtstrom, welcher über eine Stromzange gemessen wurde, mit Oszilloskopen (Tektronix MSO 3034) aufgenommen. Die gespeicherten Messwerte wurden später mit MATLAB¹ am PC ausgewertet.

Auch die Signalspannungen zur Ansteuerung der Leistungs-MOSFET sind über BNC-Buchsen am Gehäuse abzugreifen. Diese BNC-Buchsen wurden nicht extra gesichert, da die Signale direkt vom TI-BMS (BQ77910a) kommen und dieser einen maximalen Strom von 75 μ A [21] zulässt.

¹MATLAB ist eine höhere Programmiersprache für mathematische Berechnungen und dient hier zur Datenanalyse

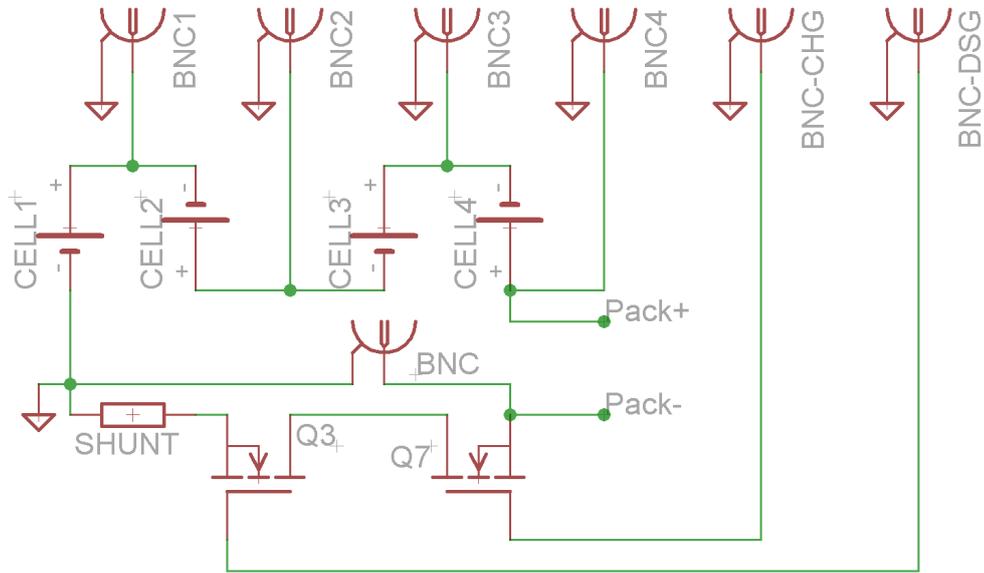


Abbildung 5.1: Darstellung des Messaufbaus am Fahrzeug

So werden alle wichtigen Signalverläufe ohne großen Aufwand am Oszilloskop aufgenommen.

Startversuch BMW 1,6 Liter Otto-Motor

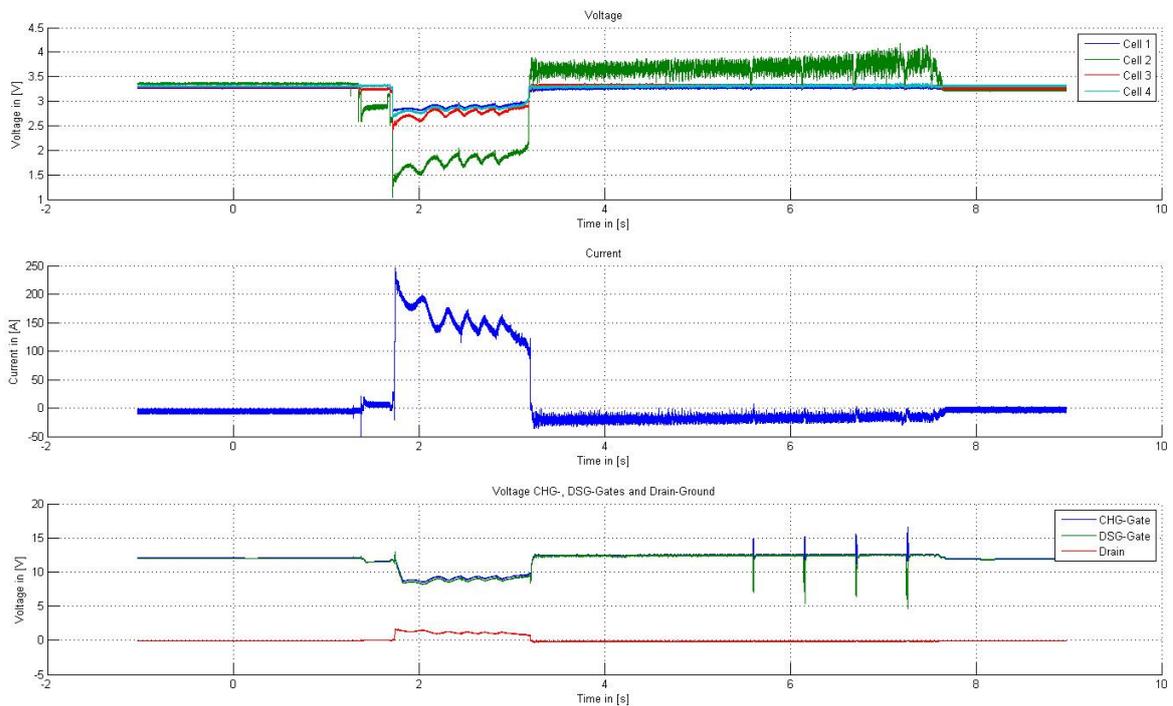


Abbildung 5.2: Startversuch mit defekter Zelle am BMW

In Abbildung 5.2 ist die Messung des Startversuchs am BMW mit einer defekten Zelle zu sehen. In dem oberen Diagramm sind die Zellenspannungen aufgetragen. Die Ruhespannungen aller Zellen liegen etwa auf dem gleichen Niveau. Erst bei Belastung bricht eine Zelle sehr viel stärker ein als die der anderen Zellen. Bei dieser handelt es sich jedoch nicht um die bereits aus der Impedanzspektroskopie auf Seite 30 bekannte Zelle 3. Nach dem erfolgreichen Startvorgang werden alle Zellen durch den Fahrzeuggenerator geladen. Dabei wird die Spannung der defekten Zelle stärker angehoben, als die der anderen. Außerdem ist eine große Schwankung der Spannung zu erkennen, welches nach näherer Betrachtung auf die Umdrehungszahl des Generators zurückzuführen ist. Aus diesem Versuch lässt sich ableiten, dass eine Impedanzspektroskopie nicht ausreicht um einen Defekt einer LiFePO₄-Zelle zu erkennen.

Die anderen drei LiFePO₄-Zellen haben während des gesamten Versuches in etwa das selbe Spannungsniveau. Auch die in der Impedanzspektroskopie auffällige Zelle 3 wurde bei diesem Versuch eingesetzt, ist aber nicht weiter aufgefallen.

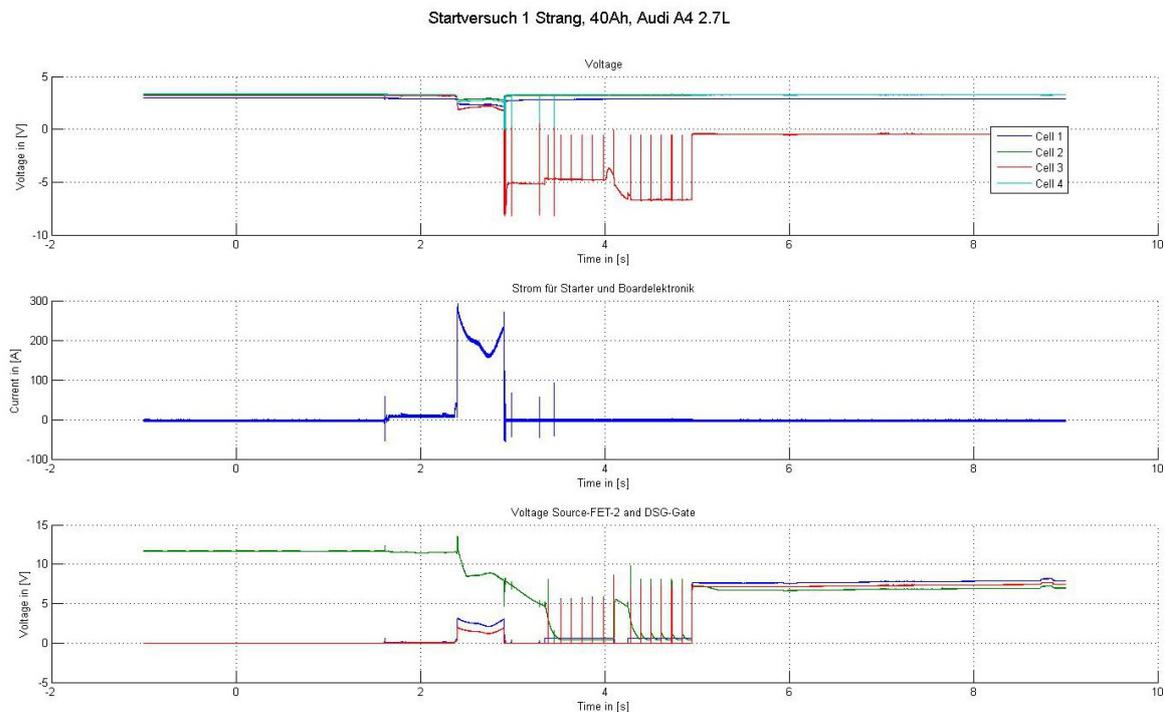


Abbildung 5.3: Fehlgeschlagener Startversuch am Audi

Aus Abbildung 5.3 geht hervor, dass die verwendeten LiFePO₄-Zellen bei dem großen Motor an ihre Leistungsgrenze geführt werden. In diesem Versuch bricht die Spannung der Zellen so stark ein, dass die Steuerelektronik vom Fahrzeug selbst, durch ein Relais abschaltet. Durch den plötzliche Lastabfall steigt die Spannung der Zellen wieder an und das Fahrzeug versucht erneut zu starten. Dieses Verhalten führt zu den Spannungsspitzen in Abbildung 5.3. In dem unteren Diagramm sind die Spannungen über die MOSFET sowie die

Gate-Source-Spannung an dem Lade-MOSFET aufgetragen. Durch den hohen Strom von etwa 300 A entsteht ein Spannungsabfall von etwa 4 V über den Strommesswiderstand sowie die beiden MOSFET, welche der Fahrzeugelektronik fehlt, wie Formel 5.2 zeigt. Aus den Datenblättern der verwendeten Bauteile sind folgende Daten bekannt:

$$\begin{aligned}R_{DSon} &= 5,5 \text{ m}\Omega \\ R_{Shunt} &= 2 \text{ m}\Omega\end{aligned}\tag{5.1}$$

Mit diesen Werten lässt sich der Spannungsabfall über die Leistungsbauteile im Startmoment berechnen.

$$\begin{aligned}U_{Leistungsteil} &= (2 \cdot R_{DSon} + R_{Shunt}) \cdot I \\ U_{Leistungsteil} &= (2 \cdot 5,5 \text{ m}\Omega + 2 \text{ m}\Omega) \cdot 300 \text{ A} = 3,9 \text{ V}\end{aligned}\tag{5.2}$$

Daraus folgt, dass dem Fahrzeug folgende Restspannung zur Verfügung steht:

$$U_{Fahrzeug} = U_{Batterie} - U_{Leistungselektronik} = 13,2 \text{ V} - 3,9 \text{ V} = 9,3 \text{ V}\tag{5.3}$$

Um zu überprüfen, ob der Spannungsabfall über die MOSFET dafür verantwortlich war, dass der Motor nicht gestartet werden konnte, wurde ein weiterer Startversuch durchgeführt, bei dem der Lade-MOSFET überbrückt wurde.

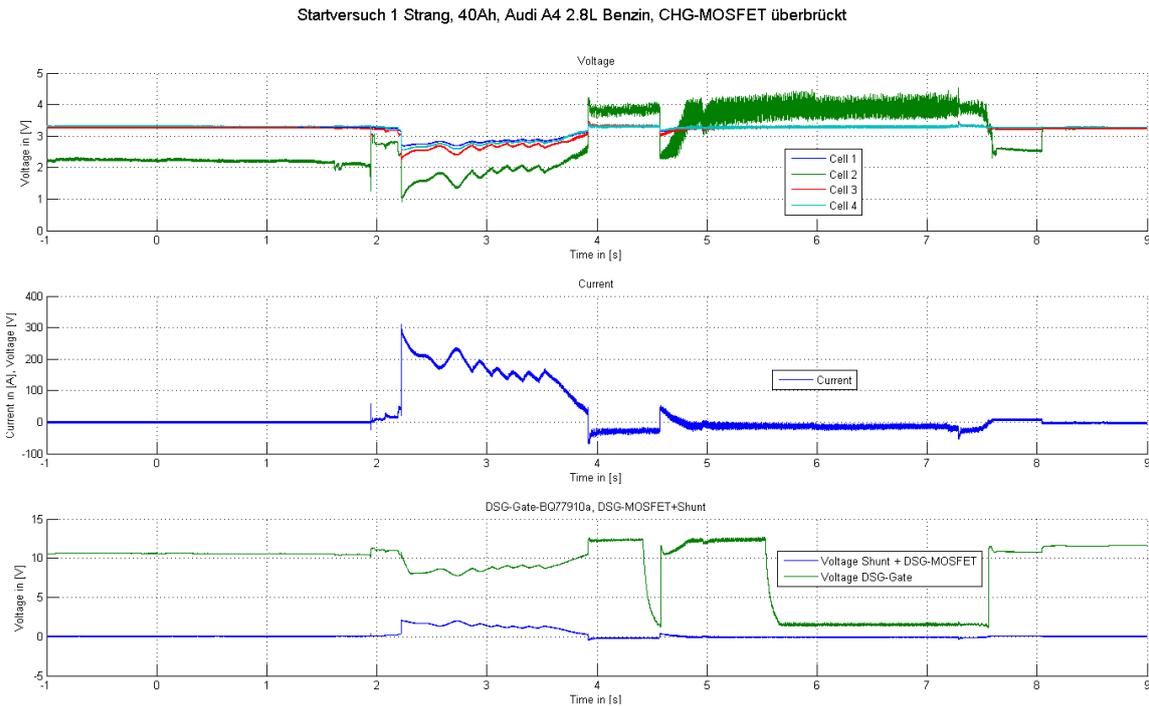


Abbildung 5.4: Startversuch am Audi A4 2.8 Liter Benzin ohne CHG-MOSFET

Die auffällige Zelle aus Abbildung 5.2 wurde weiterhin eingesetzt und war diesmal schon zu Beginn des Versuchs stark entladen. Abbildung 5.4 zeigt, dass der Audi trotz der schwachen Zelle bei einem Spannungsabfall über nur einen MOSFET startet. Da die defekte Zelle, unabhängig von ihrem Ladungszustand, einen weit größeren Spannungseinbruch als die anderen Zellen aufweist, wurde diese gegen eine andere LiFePO₄-Zelle getauscht und der Versuch mit beiden MOSFET in Reihe wiederholt.

Dabei sollte der Motor gestartet werden und über mehrere Minuten die Ladung der Starterbatterie durch den Fahrzeuggenerator gemessen werden.

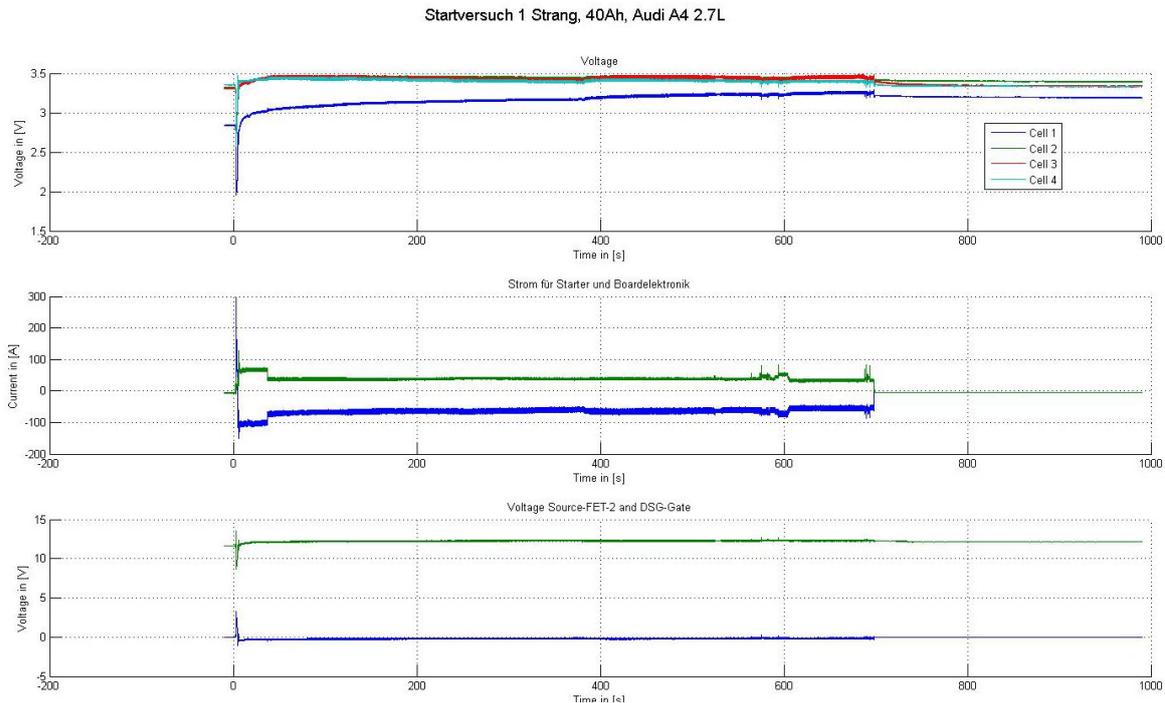


Abbildung 5.5: Start- und Ladeversuch am Audi A4 2.8 Liter Benzin

In dem oberen Diagramm sind die einzelnen Zellenspannungen aufgetragen. Dabei ist zu sehen, dass eine weitere Zelle stark entladen war. Da hier Vorserienmodelle verwendet wurden und zwischen den Startversuchen zwei Wochen lagen, ist davon auszugehen, dass sich diese Zelle selbst entladen hat. Trotz der geringen Ladung einer Zelle, konnte der Audi gestartet werden und die Batterie wurde mit einem Strom von etwa 75 A geladen wie das mittlere Diagramm in Abbildung 5.5 zeigt. Separat wurde auch der Strom aufgetragen, den die Bordelektronik des Audi benötigt.

Bei allen Startversuchen ist die Gate-Source-Spannung U_{GS} der selbstsperrenden MOSFET eingebrochen. Da diese Spannung direkt von der Batteriespannung abhängt und diese beim Motorstart aufgrund der starken Belastung einbricht, können die MOSFET nicht sicher offengehalten werden und der Widerstand an der Drain-Source-Strecke R_{DS} vergrößert sich, was einen größeren Spannungsabfall über die MOSFET U_{DS} bedeutet. Um diesen selbstverstärkenden Effekt zu verhindern, muss eine Schaltung zur Spannungsstabilisierung der MOSFET-Ansteuerung entwickelt werden. Dadurch soll gewährleistet werden, dass die MOSFET nur im Fehlerfall sperren.

5.1.1 Versuchsaufbauten zur Spannungsstabilisierung

Um zu verhindern, dass die Leistungsschalter aufgrund eines kurzzeitigen Spannungseinbruchs der zu schützenden LiFePO₄-Zellen sperren, wie es beim Starten eines Verbren-

nungsmotors der Fall ist, soll ein Weg gefunden werden, die Gate-Source-Spannung U_{GS} zu stabilisieren. Dabei soll die vorhandene Sicherheitsschaltung nicht in ihrer Funktion eingeschränkt werden.

5.1.1.1 Entfernen eines MOSFET

Eine Lösung wäre der Einsatz eines einzelnen MOSFET im Leistungsteil. Da an einem MOSFET bauteilbedingt immer eine gewisse Spannung abfällt, wird dem Fahrzeug von Anfang an mehr Spannung zur Verfügung gestellt. So ließen sich ein Treiber und DC/DC-Wandler einsparen. Da ein MOSFET im inversen Betrieb einer Diode gleicht, könnten die LiFePO4-Zellen bei dieser Beschaltung nur in einer Richtung geschützt werden. Auch der Einsatz anderer Leistungsbauteile wie eines IGBT würde nicht funktionieren, da diese eine Freilaufdiode benötigen, um ihre Ladungsträger abbauen zu können und sicher in den sperrenden Betrieb zu schalten.

5.1.1.2 DC/DC-Wandler mit Logikgattern zur Ansteuerung der MOSFET

Es wird ein DC/DC-Wandler zur Spannungsstabilisierung eingesetzt. Dieser regelt einen breiten Eingangsspannungsbereich auf eine Ausgangsspannung von 15 V. Da die Schaltgeschwindigkeit der Sicherheitsschaltung nicht verringert werden darf, werden die Schaltsignale für die MOSFET auf Logikgatter gelegt, welche mit der Ausgangsspannung des DC/DC-Wandlers versorgt werden. Durch die integrierten Schmitt-Trigger sollen die Schaltsignale zusätzlich entprellt werden.

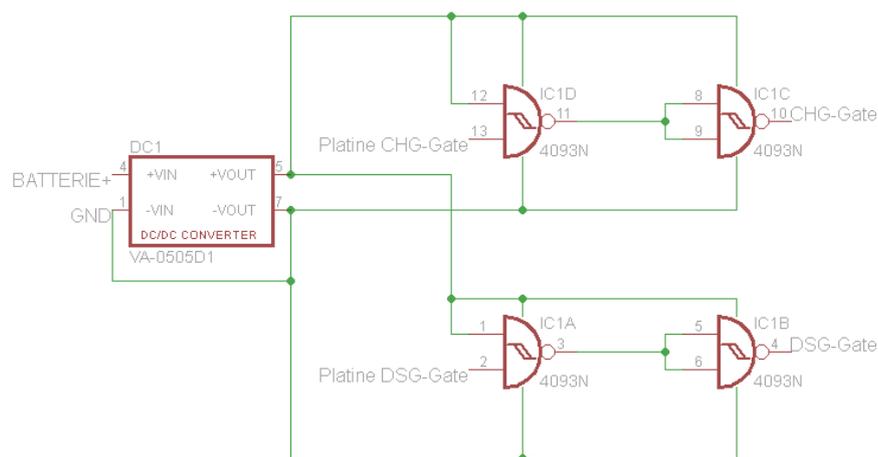


Abbildung 5.6: Stabilisierungsschaltung der MOSFET-Ansteuerspannung mit einem DC/DC-Wandler

Die Schaltschwellen der Logikgatter sind abhängig von der Versorgungsspannung. Tabelle 5.2 stellt die Schaltschwellen bei verschiedenen Versorgungsspannungen dar. Aus Abbildung 3.3 gehen die Anschlusskontakte für diese Schaltung hervor.

Versorgungsspannung	Logische 0	Logische 1
16 V	6,1 V	10,8 V
15 V	6,1 V	9,9 V
14 V	5,5 V	9,2 V
13 V	5,2 V	8,5 V
12 V	5 V	7,8 V
11 V	4,6 V	7,1 V
10 V	4,2 V	6,6 V
9 V	3,8 V	5,8 V
8 V	3,4 V	5,2 V
7 V	3 V	4,5 V

Tabelle 5.2: Schaltschwellen der Logikgatter zur Spannungsstabilisierung in Abhängigkeit der Versorgungsspannung

Erprobung

Beim Test der Schaltung konnte das Fahrzeug nicht gestartet werden und die Logikgatter zur Ansteuerung des CHG-MOSFET sind zerstört worden. Es hat sich herausgestellt, dass die LiFePO₄-Zellen nicht ausreichend geladen waren und der Entlade-MOSFET in den Sperrbetrieb geschaltet wurde. Der Lade-MOSFET sollte jedoch weiter leitend bleiben. Aufgrund der Reihenschaltung der MOSFET, wie in Abbildung 3.3 auf Seite 24 dargestellt ist, kann die Gate-Source-Spannung des Lade-MOSFET nicht aufrecht gehalten werden. Da der Entlade-MOSFET komplett sperrt, wird die Masseverbindung getrennt.

Erkenntnisse

Aus diesem Versuch ist zu erkennen, dass die MOSFET eine separate Masse benötigen, um diese steuern zu können.

5.1.1.3 Zwei separate MOSFET Treiber mit Ladungspumpe

Um die Kosten für einen weiteren DC/DC-Wandler sparen zu können, wurde überprüft, ob der Einsatz von MOSFET-Treibern mit integrierter Ladungspumpe eine mögliche Lösung wäre. Durch Bauteilrecherche hat sich ergeben, dass eine Reihe von High-Side-MOSFET-Treibern existieren, die einen passenden Spannungsbereich unterstützen. Durch das verwendete BMS von Texas Instruments werden die MOSFET aber Low-Side (im Minuspol) geschaltet, was den Einsatz der High-Side-MOSFET-Treiber verhindert.

5.1.1.4 Zwei separate DC/DC-Wandler und Low-Side-MOSFET-Treiber

Durch diese Art der Spannungsstabilisierung ist sichergestellt, dass beide MOSFET eine eigene Masseverbindung bekommen und die FETs somit im leitenden Zustand bleiben. Zur Erprobung wurden DC/DC-Wandler eingesetzt, welche einen Eingangsspannungsbereich von 9-36 V besitzen.

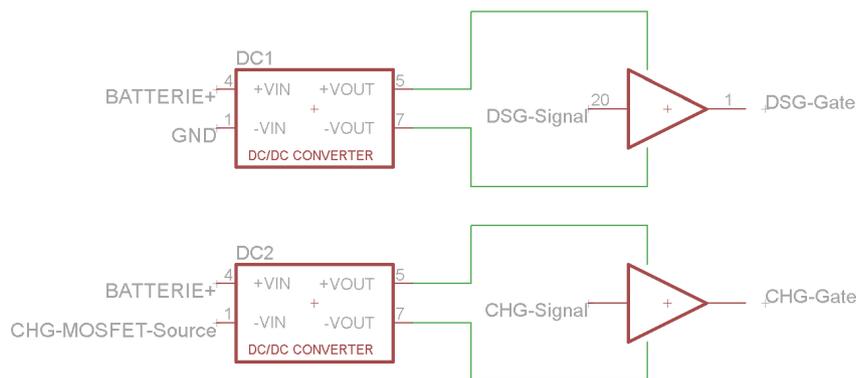


Abbildung 5.7: Spannungsstabilisierung mit zwei DC/DC-Wandlern

Erprobung

Um die Stabilisierungsschaltung zu testen, wurde ein weiterer Startversuch mit dem VW Golf und dem Audi A4 durchgeführt.

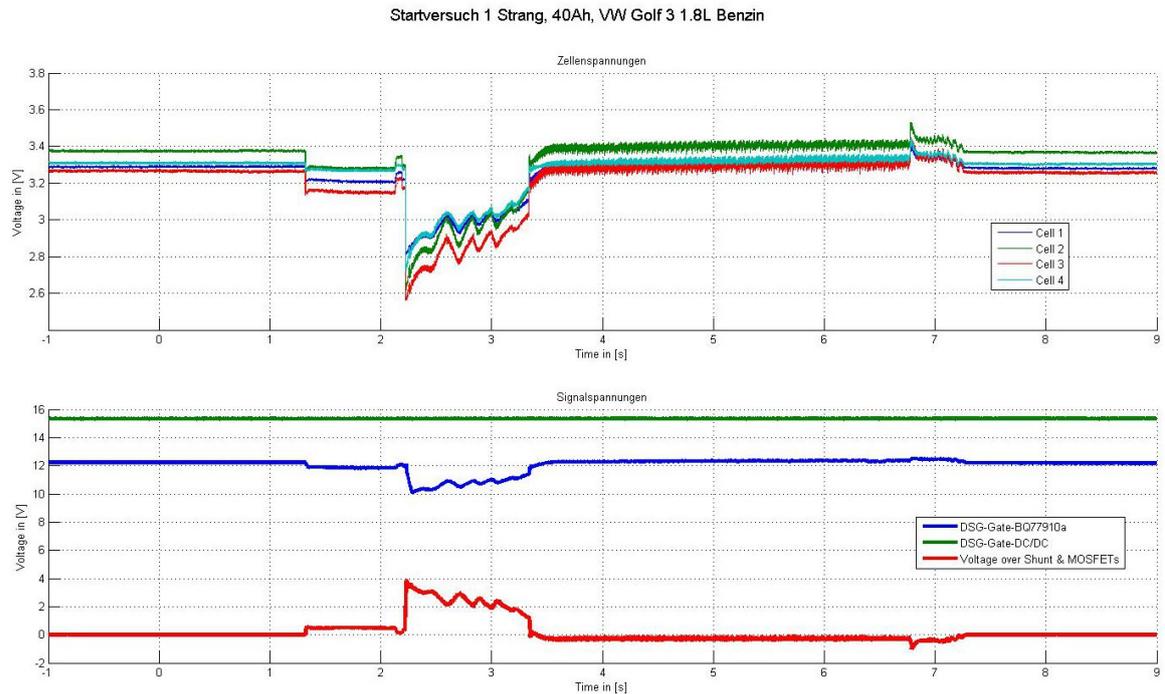


Abbildung 5.8: Startversuch des BMW mit 2 DC/DC-Wandler und Low-Side-MOSFET-Treiber

Die Zellspannungen sind beim Startversuch wie erwartet eingebrochen. Im unteren Diagramm in Abbildung 5.8 sind die Signalspannung für den Entlade-MOSFET vom BMS direkt (blaue Kurve) aufgetragen, diese ist wie die Zellspannungen erwartungsgemäß eingebrochen. Im selben Diagramm ist die stabilisierte Signalspannung vom Low-Side-MOSFET-Treiber (grüne Kurve) aufgetragen. Das Spannungsniveau wurde wie erwartet durch die Stabilisierungsschaltung gehalten. Die rote Kurve in der Skala stellt den Spannungsabfall über beide MOSFET und den Strommesswiderstand dar.

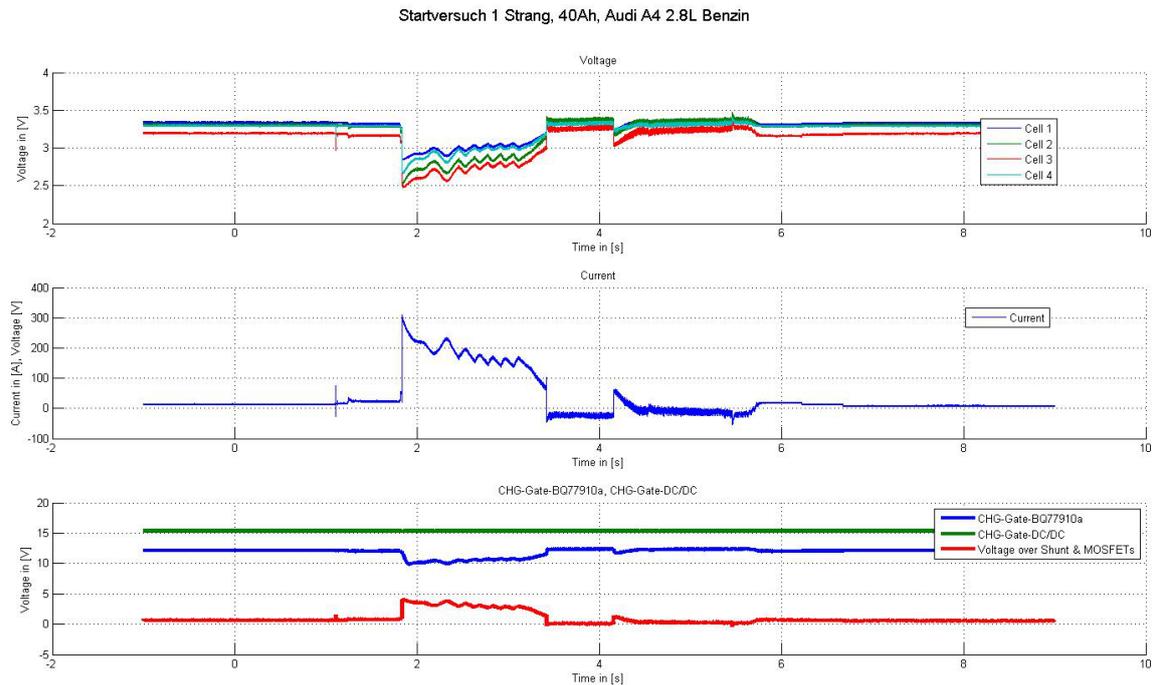


Abbildung 5.9: Startversuch des Audi mit 2 DC/DC-Wandler und Low-Side-MOSFET-Treiber

Auch bei den sicher geöffneten MOSFET gibt es einen Spannungsabfall im Startmoment der Testfahrzeuge über den R_{DSon} und den Messwiderstand, der sich aufgrund des hohen Stroms nicht vermeiden lässt. Trotzdem konnte bei diesen Versuchen gezeigt werden, dass die Stabilisierungsschaltung funktioniert und so eingesetzt werden kann.

5.1.2 Relais als Leistungsschalter verwenden

Eine weitere Möglichkeit wäre, die MOSFET gegen ein Relais zu tauschen, um die LiFePO₄-Zellen zu schützen. Hier muss darauf geachtet werden, dass das Relais den maximal fließenden Gleichstrom sicher abschalten kann und die Spule des Relais mit 12V Gleichspannung gesteuert werden kann. Ein mögliches Bauteil wäre das V23130C2021A412 - RELAIS, BATTERIE DISCONNECT, 12V von TECONNECTIVITY, welches einen Strom von 260 A bei 23 °C Umgebungstemperatur schalten kann. Dieses Relais ist bistabil, was heißt, dass es durch einen Stromstoß umgeschaltet wird und keinen dauerhaften Haltestrom benötigt.

$$\begin{aligned}
 R_{Coil} &= 4,7 \Omega \\
 U_{Coil} &= 12 V \\
 I_{Coil} &= \frac{U_{Coil}}{R_{Coil}} = \frac{12 V}{4,7 \Omega} = 2,55 A
 \end{aligned}
 \tag{5.4}$$

[19]

Aus Formel 5.4 geht hervor, dass ein Strom von 2,55 A notwendig ist, um im Fehlerfall den Lastkreis zu öffnen. Bei Ausfall der Überwachungselektronik muss bei dieser Lösung sichergestellt werden, dass die LiFePO₄-Zellen geschützt werden.

5.2 Beobachtungen

Entladung der Zellen

Nach mehreren Balancierungsversuchen konnte festgestellt werden, dass jeweils nur eine Zelle stark entladen wurde. Da das Entladen einzelner Zellen auch bei deaktivierter Balancierung unregelmäßig und unterschiedlich stark auftrat, liegt der Verdacht nahe, dass die Zellen aus der Vorserienproduktion selbst fehlerhaft sind. Um zu überprüfen, ob die verwendeten Zellen oder die Überwachungselektronik verlustbehaftet sind, wurden die 50 Ah LiFePO₄-Zellen gegen 15 Ah LiFePO₄-Zellen aus einer Serienproduktion getauscht und über einen Zeitraum von einer Woche überwacht. In dieser Zeit konnte eine Spannungsänderung festgestellt werden, was allerdings auf den Leerlaufstrom der eingesetzten DC/DC-Wandler zurückzuführen ist.

Zeitraum	Zelle 1	Zelle 2	Zelle 3	Zelle 4
Start	3,31 V	3,32 V	3,31 V	3,31 V
3 Tage	3,29 V	3,26 V	3,26 V	3,29 V
7 Tage	3,17 V	3,06 V	2,98 V	3,17 V

Tabelle 5.3: Spannungsverlauf der 15 Ah LiFePO₄-Zellen bei Lagerung

Folgerung

Die verwendeten DC/DC-Wandler zur Stabilisierung der MOSFET-Ansteuerspannung haben einen nicht zu vernachlässigenden Leerlaufstrom [1], welcher die 15 Ah Zellen innerhalb weniger Tage entlädt. Die Asymmetrie der Zellenspannungen nach dieser Zeit, könnte sich durch Fertigungstoleranzen bei Kapazität und Innenwiderstand erklären lassen.

6 Zusammenfassung

Im Folgenden sollen die Ergebnisse dieser Bachelorthesis betrachtet werden. Ebenso soll ein Ausblick gegeben werden, welche Punkte dieser Arbeit noch einmal zur Fortführung oder Optimierung aufgegriffen werden können.

6.1 Bewertung

Ein wichtiges Ziel war es, bei der Weiterentwicklung der LiFePO₄-Starterbatterie einen vollwertigen Ersatz zur konventionellen Blei-Säure-Batterie zu realisieren. Diese Anforderung konnte durch die Neuordnung der MOSFETs in Reihenschaltung erfüllt werden. Die neue Batterie besitzt zwei Anschlusspole über die jeweils geladen und entladen werden kann. Wie im Kapitel 5.1 nachgewiesen werden konnte, wurden mit der neuen Batterie verschiedene Fahrzeuge gestartet und die Batterie durch den Fahrzeuggenerator wieder geladen.

Aufgrund der verwendeten LiFePO₄-Zellen konnte auf eine Parallelschaltung zweier LiFePO₄-Stränge verzichtet werden. Dadurch war es möglich, die Kosten der Starterbatterie zu reduzieren, indem auf Dioden, DC/DC-Wandler und eine BMS-Platine verzichtet werden konnte, was in Kapitel 2.3.1 genauer beschrieben wurde.

Bei dem neuen Prototyp wurde eine eigene BMS-Platine entwickelt, bei der die neuen Anforderungen, wie höherer Balancierungsstrom und Auslagerung der Leistungselemente aufgenommen wurden, wodurch der Umbau des TI-Evaluationsboards wie beim ersten Prototyp umgangen wurde.

Die Funktionsfähigkeit der BMS-Platine konnte getestet und nachgewiesen werden. Dabei wurde das Verhalten der BMS-Platine bei Über- und Unterspannung sowie bei Überstrom ermittelt. Außerdem wurde eine zusätzliche Sicherung gegen Überstrom und eine manuelle Abschaltfunktion mittels Schlüsselschalter geschaffen.

Es konnte nachgewiesen werden, dass die entwickelte LiFePO₄-Batterie mit Sicherheitselektronik ein Fahrzeug mit kleinen Motor (1,6 - 1,8 Liter) ohne weitere Probleme starten kann. Bei größeren Motoren, wie dem verwendeten Audi A4 mit 2,8 Liter Motor, kamen

die verwendeten LiFePO₄-Zellen an ihre Leistungsgrenze. Der Spannungsbereich der entwickelten Batterie liegt im selben Bereich wie die Bordnetze der Testfahrzeuge. Auch die Laderegelung der Fahrzeuggeneratoren hat die Batterie erfolgreich laden können.

Wie in Kapitel 1.2 bereits angedeutet wurde, ist eine LiFePO₄-Batterie leichter als eine vergleichbare Blei-Säure-Batterie. Um dieses zu verdeutlichen ist in Tabelle 6.1 das Gewicht der hier entstandenen Prototypbatterie im Vergleich zu einer vergleichbaren Blei-Säure-Batterie dargestellt. Auch ohne auf das Gewicht der verwendeten Materialien zu achten, ist die LiFePO₄-Batterie etwa 35% leichter als die Blei-Säure-Batterie. Durch Verwendung eines Plastikgehäuses können außerdem das Gewicht des Blechgehäuses und der 5 mm starken Aluminiumplatte zu einem großen Teil eingespart werden.

Bauteile LiFePO ₄ -Batterie	Gewicht	Blei-Säure-Batterie
4 LiFePO ₄ -Zellen	4400 g	60 Ah
MOSFET & Shunt	84 g	
BMS-Platine	51 g	
Gehäuse	3400 g	
Aluplatte	3165 g	
Installationsmaterial	500 g	
Batterie Gesamtgewicht:	11600 g	17700 g [3]

Tabelle 6.1: Vergleich des Gewichts mit einer Blei-Säure-Batterie

Die Balancierungsfunktion der BMS-Platine konnte nicht weiter untersucht werden. Es konnte durch Messungen nachgewiesen werden, dass die Balancierung einschaltet, wenn die dazu erforderlichen Vorbedingungen gegeben waren. Da das passende Messwerkzeug nicht zur Verfügung stand, konnte der Balancierungsverlauf nicht festgehalten werden.

6.2 Ausblick

Im Verlauf dieser Arbeit sind weitere Ideen aufgekommen, welche in einer weiterführenden Arbeit aufgegriffen werden können.

Weiterhin offen ist die Balancierungsfunktion des BQ77910a, welche im Rahmen dieser Arbeit nicht nachvollzogen werden konnte. Dazu können Langzeitmessreihen mit einem Datenlogger für Batteriezellen, welcher in einer anderen Bachelorthesis im Projekt BAT-SEN entwickelt wird, durchgeführt werden.

Die in dieser Arbeit entwickelte BMS-Platine sollte einem Redesign unterzogen werden. Wobei der Versuchsaufbau zur Stabilisierung der Ansteuerspannung für die MOSFET, welche in Kapitel 5.1.1 beschrieben wurde, durch geeignetere Bauteile ersetzt und mit auf das Redesign der BMS-Platine gebracht werden.

In dieser Arbeit wurden nur Startversuche an Fahrzeugen durchgeführt, welche nach kurzer Zeit beendet waren. Interessant wäre die Wärmeentwicklung bei einer längeren starken Belastung der LiFePO₄-Zellen zu verfolgen. Dieses könnte mit einer Wärmebildkamera bei einem Dauerstartversuch an einem Testfahrzeug durchgeführt werden, wobei das Starten des Motors verhindert werden muss.

In Kapitel 5.1.2 wurde die Möglichkeit beschrieben, die verwendeten MOSFET als Leistungsschalter durch ein Relais zu ersetzen. Damit könnte der Spannungsabfall über den R_{DSon} der beiden MOSFETs vermieden werden. Dabei ist sicherzustellen, dass die Batterie sicher vom Laststromkreis getrennt wird, falls das BMS ausfallen sollte. Desweiteren muss hierfür eine Schaltung entwickelt werden, welche die Flanken der MOSFET Steuerspannungen erkennt und daraufhin Stromstöße an das Relais sendet.

Um die Kapazität der Gesamtbatterie zu erhöhen und damit den Spannungseinbruch im Startmoment eines Verbrennungsmotors zu minimieren, können zwei LiFePO₄-Stränge parallel zusammengeschaltet werden. Dieses Modell wurde auch bei [11] eingesetzt, wobei dort die Stränge durch Dioden getrennt wurden. Durch einen Versuchsaufbau von LiFePO₄-Zellen in Parallelschaltung ohne Trennung durch Dioden, könnte das Verhalten der Zellen getestet werden.

Tabellenverzeichnis

2.1	Strombelastungen einer LiFePO4-Zelle	13
2.2	Einstellbereich der Überspannung des BQ77910a	15
2.3	Einstellbereich der Unterspannung des BQ77910a	15
2.4	Einstellbereich des Entladestroms des BQ77910a	15
2.5	Einstellbereich des Pulsentladestroms des BQ77910a	15
2.6	Einstellbereich des Pulsladestroms des BQ77910a	16
3.1	Verbindungsstärken der Leistungsbauteile	27
5.1	Liste der Testfahrzeuge	33
5.2	Schaltsschwellen der Logikgatter zur Spannungsstabilisierung in Abhängigkeit der Versorgungsspannung	40
5.3	Spannungsverlauf der 15 Ah LiFePO4-Zellen bei Lagerung	44
6.1	Vergleich des Gewichts mit einer Blei-Säure-Batterie	46
7.1	Klemmenbelegung von J1	55
7.2	Klemmenbelegung von J2	55
7.3	Klemmenbelegung von J3	56
7.4	Klemmenbelegung von J4	56
7.5	Klemmenbelegung von J5	57
7.6	Klemmenbelegung von J6	57
7.7	Klemmenbelegung von J8	58
7.8	Klemmenbelegung von J9	58
7.9	Klemmenbelegung von J10	58
7.10	Klemmenbelegung von J20	59
7.11	Klemmenbelegung von J22 bei parallelen MOSFETs	59
7.12	Klemmenbelegung von J22 bei MOSFETs in Reihe	59

Abbildungsverzeichnis

1.1	Aufbau Rundzelle Lithium-Ion-Akku	10
1.2	Funktionsweise eines Lithium-Ion-Akku	11
2.1	Passiver Ladungsausgleich von Batteriezellen	14
2.2	Schematischer aufbau des ersten Prototypen	17
2.3	Schematische Darstellung des Leistungsteils eines Zellenstranges vom ersten Prototypen	18
3.1	Externe Beschaltung der Balancingfunktion	21
3.2	Hardwareaufbau Leistungsteil – Parallelschaltung	23
3.3	Hardwareaufbau Leistungsteil – Reihenschaltung	24
3.4	Bestückte Bodenplatte	26
3.5	Kasten mit Bauteilen	27
4.1	Platine des BMS	29
4.2	Impedanzspektroskopie aller Zellen	30
4.3	Messaufbau für Gesamtbatterie	31
5.1	Darstellung des Messaufbaus am Fahrzeug	34
5.2	Startversuch mit defekter Zelle am BMW	34
5.3	Fehlgeschlagener Startversuch am Audi	35
5.4	Startversuch am Audi A4 2.8 Liter Benzin ohne CHG-MOSFET	37
5.5	Start- und Ladeversuch am Audi A4 2.8 Liter Benzin	38
5.6	Stabilisierungsschaltung der MOSFET-Ansteuerspannung mit einem DC/DC-Wandler	39
5.7	Spannungsstabilisierung mit zwei DC/DC-Wandlern	41
5.8	Startversuch des BMW mit 2 DC/DC-Wandler und Low-Side-MOSFET-Treiber	42
5.9	Startversuch des Audi mit 2 DC/DC-Wandler und Low-Side-MOSFET-Treiber	43
7.1	Schaltung der BMS-Platine – Seite 1	51
7.2	Schaltung der BMS-Platine – Seite 2	52
7.3	Schaltung der BMS-Platine – Seite 3	53
7.4	Schaltung der BMS-Platine – Seite 4	54

7 Anhang

7.1 Schaltung der BMS-Platine

Im Folgenden ist der Schaltungsentwurf der BMS-Platine und anschließend die Klemmenbelegungen aufgeführt:

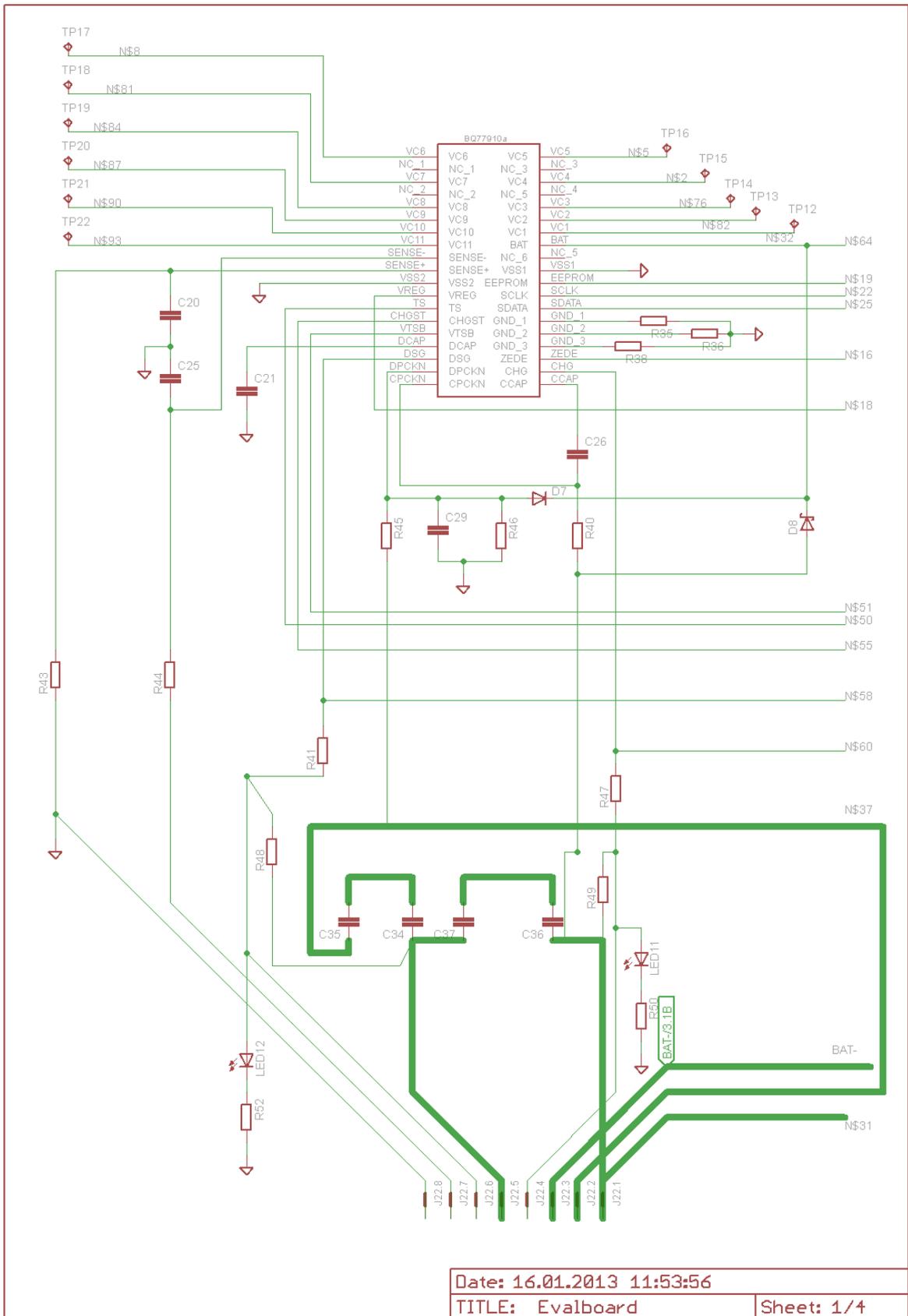


Abbildung 7.1: Schaltung der BMS-Platine – Seite 1

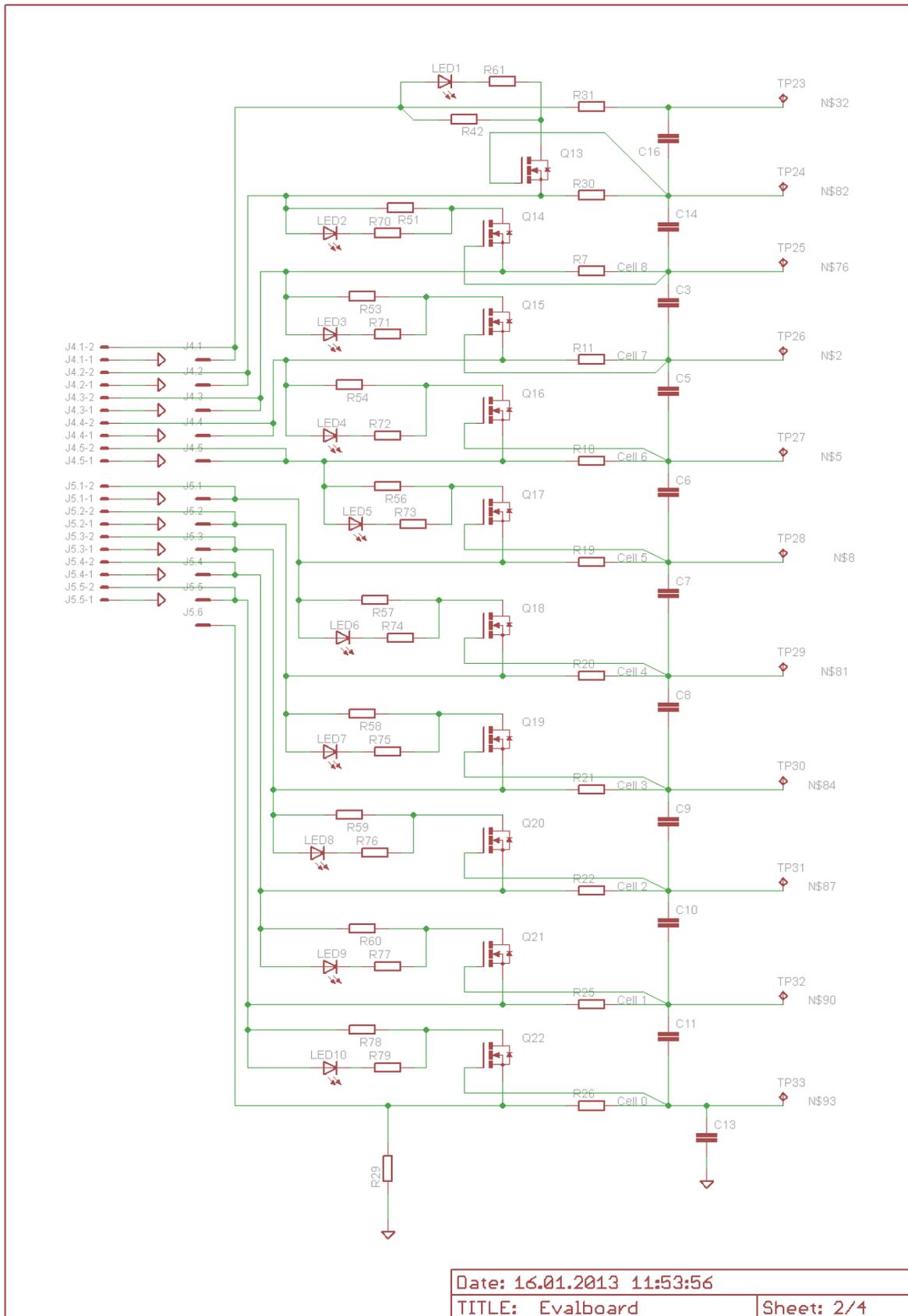


Abbildung 7.2: Schaltung der BMS-Platine – Seite 2

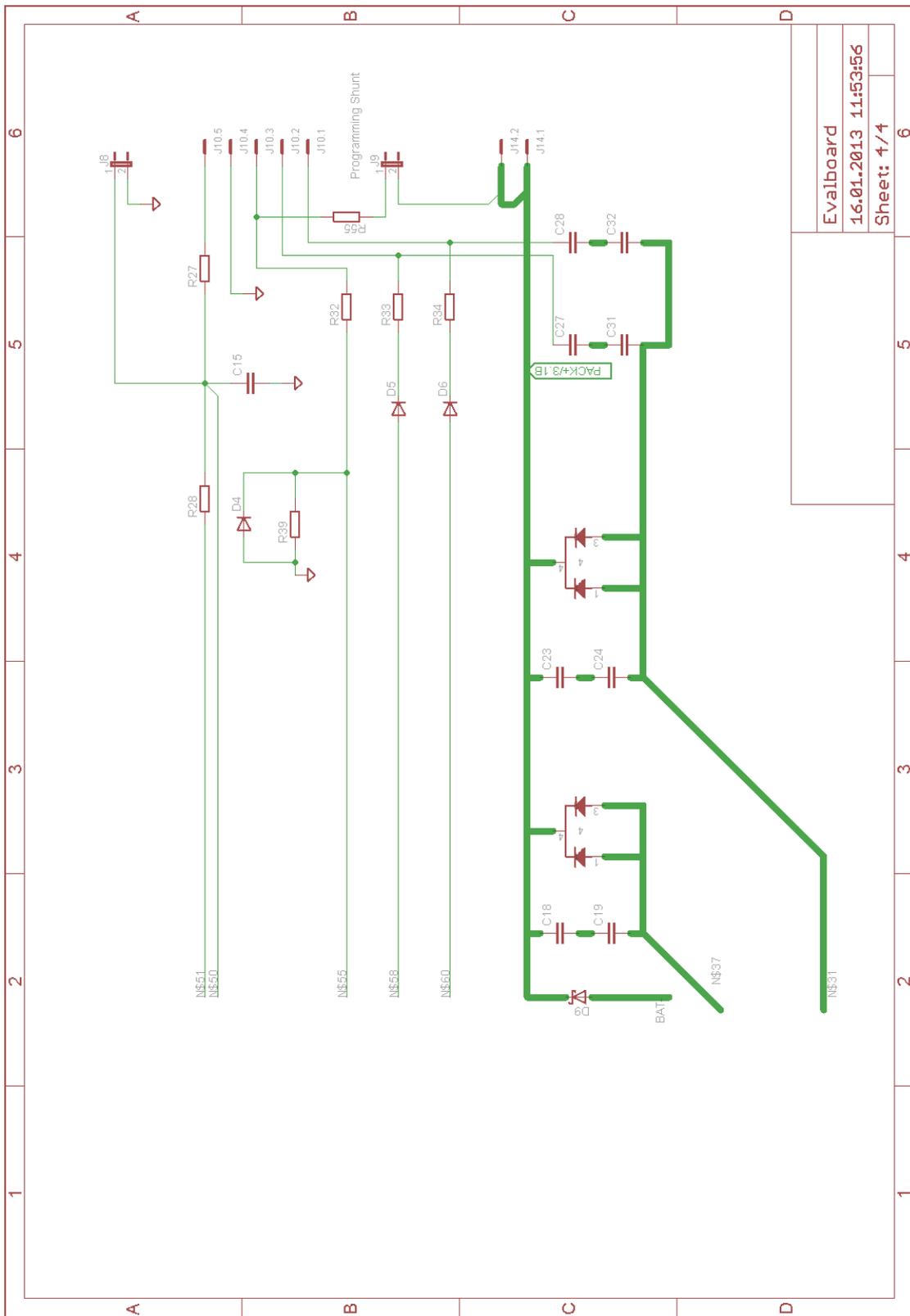


Abbildung 7.4: Schaltung der BMS-Platine – Seite 4

Bez.	Pin	Verbindung	Anschluss	Funktion
J1	1	R5 -	Externes Amperemeter	R5 und J1 bieten eine Möglichkeit zur Strommessung wird für die Anwendung aber nicht benötigt.
J1	2	R5 +		

Tabelle 7.1: Klemmenbelegung von J1

Bez.	Pin	Verbindung	Anschluss	Funktion
J2	1	C1	14V	Spannungsversorgung zum Programmieren des BQ77910a (Programmierspannung)
J2	2	C1	GND	

Tabelle 7.2: Klemmenbelegung von J2

Bez.	Pin	Verbindung	Anschluss	Funktion
J3	1	-		Programmierschnittstelle zum PC
J3	2	-		über I ² C Protokoll
J3	3	R8		
J3	4	R9		
J3	5	-		
J3	6	GND		
J3	7	-		
J3	8	-		
J3	9	R13		
J3	10	R15		

Tabelle 7.3: Klemmenbelegung von J3

Bez.	Pin	Verbindung	Anschluss	Funktion
J4	1	R7, LED1, R30	Zelle 10 (Pluspol)	Messen der einzelnen Zellspannungen
J4	2	R11, LED2, R51, Q20	Zelle 9 (Pluspol)	über den BQ77910a zur Überwachung
J4	3	R18, LED3, R53, Q21	Zelle 8 (Pluspol)	jeder Zelle.
J4	4	R19, LED4, R54, Q22	Zelle 7 (Pluspol)	
J4	5	R20, LED5, R56, Q23	Zelle 6 (Pluspol)	

Tabelle 7.4: Klemmenbelegung von J4

Bez.	Pin	Verbindung	Anschluss	Funktion
J5	1	R21, LED6, R58, Q24	Zelle 5 (Pluspol)	Messen der einzelnen Zellspannungen
J5	2	R22, LED7, R59, Q25	Zelle 4 (Pluspol)	über den BQ77910a zur Überwachung
J5	3	R25, LED8, R60, Q26	Zelle 3 (Pluspol)	jeder Zelle.
J5	4	R26, LED9, R60, Q27	Zelle 2 (Pluspol)	
J5	5	R29, LED10, R61, Q28	Zelle 1 (Pluspol)	
J5	6	R31, R42, Q29	Zelle 0 (Minuspol)	

Tabelle 7.5: Klemmenbelegung von J5

Bez.	Pin	Verbindung	Funktion
J6	1 (VREG)	C17, VREG(BQ77910a)	Referenzspannung 3,3 V vom BQ77910a
J6	2 (ZEDE)	R37, R9, ZEDE(BQ77910a)	Externe Spannung anlegen um anderen Highpegel
J6	3 (PD)	R23	einzustellen Pull-Down Widerstand für ZEDE

Tabelle 7.6: Klemmenbelegung von J6

Bez.	Pin	Verbindung	Anschluss	Funktion
J8	1	R27, R28, TS(BQ77910a)	Thermistor +	Anschluss Temperaturfühler
J8	2	GND	Thermistor -	empfohlen TS-NTC-103

Tabelle 7.7: Klemmenbelegung von J8

Bez.	Pin	Verbindung	Anschluss	Funktion
J9	1	C19, R39	CHGFLAG	Signal das der Lade-MOSFET durchschaltet
J9	2	C18, R34	DSGFLAG	Signal das der Entlade-MOSFET durchschaltet
J9	3	R32	CHGCTL	Steuersignal für Ladegerät-Erkennung
J9	4	GND	GND	GND für TS
J9	5	R28	TS	Temperatur-Signal

Tabelle 7.8: Klemmenbelegung von J9

Bez.	Pin	Verbindung	Anschluss	Funktion
J10	Alle	D9, D10, D11 C27, C28, J20.2, R3	Pluspol oberste Zelle	Höchste Spannungsebene der Akkuzellen

Tabelle 7.9: Klemmenbelegung von J10

Bez.	Pin	Verbindung	Funktion
J20	1	R55	Wake-Up Jumper zur
J20	2	J10	Programmierung

Tabelle 7.10: Klemmenbelegung von J20

Bez.	Pin	Verbindung	Anschluss
J22	1	C36, R49, R40, D8, C32, D11, C23, C24	Q7-Source, CHG-
J22	2	R45, C35, C31, D10	Q3-Drain, DSG-
J22	3	D9, D1	Shunt (+)
J22	4	R47	Q7-Gate
J22	5	R48, C34, C37	Q3-Source, Q7-Drain
J22	6	R41, R48	Q3-Gate
J22	7	R44	Shunt (-), Q3-Source, Q7-Drain
J22	8	R43, R42, GND	Shunt (+), (Minuspole unterste Zelle)

Tabelle 7.11: Klemmenbelegung von J22 bei parallelen MOSFETs

Bez.	Pin	Verbindung	Anschluss
J22	1	C36, R49, R40, D8, C32, D11, C23, C24	Q7-Source, CHG-
J22	2	R45, C35, C31, D10	Q3-Drain, Q7-Drain
J22	3	D9, D1	Shunt (+)
J22	4	R47	Q7-Gate
J22	5	R48, C34, C37	Q3-Source
J22	6	R41, R48	Q3-Gate
J22	7	R44	Shunt (-), Q3-Source
J22	8	R43, R42, GND	Shunt (+), (Minuspole unterste Zelle)

Tabelle 7.12: Klemmenbelegung von J22 bei MOSFETs in Reihe

Literaturverzeichnis

- [1] *DC/DC-Konverter TEP 150WI Serie, 150 Watt*
- [2] *Drahtlose Zellsensoren für Fahrzeugbatterien BATSEN*
- [3] AUTOMOTIVE.COM www.varta.com: Die VARTA Start-Stop Batterien im Überblick. (2012)
- [4] BATTERIE-INFO.DE: Aufbau Lithium-Ion-Rundzellen. (2012)
- [5] BEE, Dipl. Ing. J.: Verfahren zum Ausbalancieren von Ladezuständen einer Batterie mit mehreren Batteriezellen sowie ein entsprechendes Batteriemanagementsystem und eine Batterie. In: *German Patent DE102010002326* (2011)
- [6] BKER, Bernhard: *Moderne Elektronik im Kraftfahrzeug 3*. expert verlag, 2008
- [7] DIPL.-ING. DAVID VERGOSSEN, AEV: Ionen am Start. In: *dSpace Magazin* (2012)
- [8] EISENPHOSPHAT-AKKUMULATOR <http://de.wikipedia.org/wiki/Lithium-Eisenphosphat-Akkumulator>. In: *Wikipedia* (2012)
- [9] GAIA-AKKU.COM: *38AhHP_LFP.pdf*, 2012
- [10] GMBH, Hygrosens I.: *PRÄZISIONS TEMPERATURENSOR CON-TS-NTC*, 2008
- [11] HILLERMANN, Lars: Starterbatterie in Lithium-Eisen-Phosphat-Technologie – parallele Zellenmodule mit Überwachungs- und Leistungselektronik. In: *Journal* (2012)
- [12] [HTTP://WWW.GOOGLE.DE/INTL/DE/SKETCHUP/DOWNLOAD/](http://www.google.de/intl/de/sketchup/download/): Google Sketchup 8. (2012)
- [13] [HTTP://WWW.MPOWERUK.COM/CHEMISTRIES.HTM](http://www.mpoweruk.com/chemistries.htm): Alternative chemical reactions. (2012)
- [14] IONEN-AKKUMULATOR <http://de.wikipedia.org/wiki/Lithium-Ionen-Akkumulator>. (2012)
- [15] J. JIANG, J.R. D.: ARC studies of the reaction between Li_0FePO_4 and LiPF_6 or LiBOB EC/DEC electrolytes. (2004), S. 5

-
- [16] JOHN WANG, Jocelyn Hicks-Garner Elena Sherman Souren Soukiazian Mark Verbrugge Harshad Tataria James Musser Peter F.: Cycle-life model for graphite-LiFePO₄ cells. In: *Journal of Power Sources* (2010)
- [17] LEM: *Automotiv Current Transducer DHAB S/24*, 2008
- [18] MARCINKOWSKI, Jack: Aktiver Ladungsausgleich bei Lithium-Ionen-Akkusätzen. (2010)
- [19] TE-CONNECTIVITY: *Battery Disconnect Switch BDS-A*, 2008
- [20] TEXASINSTRUMENTS: *slua463 nch_{ext}ET*, 2008
- [21] TEXASINSTRUMENTS: *bq77910A*, 2012
- [22] TEXASINSTRUMENTS: *bq77910AEVM*, 2012
- [23] WWW.FLUKE.COM: *Fluke 45 Bench Meter with dual display*, 2013

Versicherung über die Selbstständigkeit

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

Hamburg, 07. Februar 2013

Ort, Datum

Unterschrift