



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Diplomarbeit

Lars Hillermann

Starterbatterie in Lithium-Eisen-Phosphat-
Technologie – parallele Zellenmodule mit
Überwachungs- und Leistungselektronik

*Fakultät Technik und Informatik
Department Informations - und
Elektrotechnik*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Information and
Electrical Engineering*

Lars Hillermann

Starterbatterie in Lithium-Eisen-Phosphat-
Technologie – parallele Zellenmodule mit
Überwachungs- und Leistungselektronik

Diplomarbeit eingereicht im Rahmen der Diplomprüfung
im Studiengang Informations- und Elektrotechnik
Studienrichtung Automatisierungstechnik
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. Andreas Suhl

Abgegeben am 31. Mai 2012

Lars Hillermann

Thema der Diplomarbeit

Starterbatterie in Lithium-Eisen-Phosphat-Technologie,
parallele Zellenmodule mit Überwachungs- und Leistungselektronik

Stichworte

Starterbatterie, Lithium, Eisen-Phosphat, Batterie-Management-System,
DC/DC-Wandler, Akkumulator, Laden, Entladen, Batteriegehäuse

Kurzzusammenfassung

Neueste Elektronik in Fahrzeugen speziell die Start-Stop-Automatik stellt die Starterbatterie vor neue Herausforderungen. Dadurch, dass die Bleibatterie viel stärker entladen wird, als es bei älteren Fahrzeugen der Fall ist, wird sie irreversible beschädigt und fällt eher aus. In den Pannenstatistiken des ADAC lässt sich ersehen, dass die Hauptursache des Ausfalls eines Fahrzeuges die Batterie ist. In dieser Diplomarbeit wird ein erster Prototyp einer Starterbatterie in Lithium-Eisen-Phosphat-Technologie konzipiert und angefertigt. Die klassische Bleibatterie soll dadurch abgelöst werden.

Lars Hillermann

Title of the paper

Starter battery in lithium-iron-phosphate technology,
parallel cell modules with monitoring devices and power electronics

Keywords

Starter battery, lithium, iron phosphate, battery management system,
DC/DC-converters, battery, charging, discharging, battery case

Abstract

Recent electronic in vehicles and especially the start-stop system, are new challenges for the well known SLI batteries. But with these new applications the risk for a fast discharge and a possible deep discharge grows. In that case the capacity of the battery will be irreversible decreased. Also the risk for an early accidental battery fault increases. From the ADAC statistics it can be seen that the car electronic is the most frequent reason for a total car fault. In this thesis a prototype of SLI battery based on lithium cells is designed and build. The traditional lead-acid battery should be replaced by it.

Danksagungen

An dieser Stelle möchte ich mich besonders bei Prof. Dr.-Ing. Karl-Ragmar Riemschneider bedanken, der mich während meiner Diplomarbeit betreut und umfangreich unterstützt hat. Vielen Dank an Prof. Dr.-Ing. Andreas Suhl für seine Unterstützung im Laufe des Studiums und für die Bewertung als Zweitprüfer.

Ganz besonders bedanken möchte ich mich bei meiner Frau Janina Hillermann, die mir bei vielen Formulierungen und auch bei der Korrektur der Diplomarbeit immer zur Seite stand. Vielen Dank auch an Herrn Dipl.-Ing. Günter Müller, der mir bei der Korrektur meiner Abschlussarbeit geholfen hat.

Zudem möchte ich auch meinen Vater danken, der mich nicht nur finanziell, sondern auch moralisch immer unterstützt hat.

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation und Einführung	1
1.1	Das Element Lithium.....	4
1.2	Verwendung von Lithium	6
1.3	Warum Lithium für Akkumulatoren?	9
1.4	Kapazität und Energiedichte	11
1.5	Energiedichten von verschiedenen Lithium-Akkumulatoren	12
1.5.1	Spannung von verschiedenen Lithium-Akkumulatoren	14
1.6	Aufbau von Lithium-Ionen-Akkus	15
1.7	Das Funktionsprinzip eines Lithium-Akkumulators	17
1.7.1	Interkalation	19
1.7.2	Dendrit (Kristallographie)	19
1.8	Vorteile von Lithium-Ionen-Akkus	20
1.9	Lebensdauer von Lithium-Ionen-Akkumulatoren	21
1.10	Lade- und Entladekurven von einem Lithium-Eisen-Phosphat-Akkumulator	22
1.11	Bauformen von verschiedenen Lithium Batterien	23
2	Analyse.....	28
2.1	Auswahl der Akkumulatoren für die Starterbatterie	28
2.2	Konzept der Lithiumzellen-Verschaltung.....	29
2.3	Abschnitt Komponententest	32
2.3.1	Temperaturverhalten und Spannungsabfall der Leistungsdiode ermitteln	32
2.3.2	Verhalten des DC/DC-Wandlers	35
2.4	Schaltplan für das Laden der Lithiumzellen.....	38
2.5	Auswahl und Dimensionierung der Bauteile.....	43
2.6	Entwurf eines Gehäuses für die Lithiumzellen	49
3	Realisierung.....	52
3.1	Anfertigung Starterbatteriegehäuse und Positionierung der Bauteile	52
3.2	Umbau der Safety Unit	56
3.3	Starterbatterie Inbetriebnahme und Programmierung der Safety Unit	60
3.4	Funktionstest der Safety Unit.....	62
3.5	Messungen am Fahrzeug	63
4	Auswertung und Fazit	73
4.1	Zusammenfassung	73
4.2	Bewertung der erzielten Ergebnisse	75
4.3	Kostenabschätzung der Starterbatterie in Serienproduktion	76
4.4	Fazit	80

INHALTSVERZEICHNIS

5	FMEA (Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse) an der Starterbatterie	81
5.1	Methodik der FMEA	81
5.2	Auswertung der FMEA der Starterbatterie	81
6	Ausblick	94

Abkürzungsverzeichnis	VII
Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	XII
Quellenverzeichnis	XIII

1 Motivation und Einführung

Die Anzahl der Fahrzeuge die im Jahresablauf eine Panne hatten, werden vom ADAC dokumentiert und in einer Pannenstatistik festgehalten. In der Abbildung 1.1 ist zu sehen, dass der größte Anteil der Fahrzeuge durch einen Defekt der Batterie, des Generators, oder des Anlassers liegen geblieben ist. Der Hauptanteil dieser 42,2 % lässt sich wiederum auf die Batterie als größten Auslöser zurückführen.

Zahlreiche Elektronik im Fahrzeug ist abhängig von der Batterie. Auch sicherheitsrelevante Systeme sind in erster Linie von der Batterie abhängig und vertrauen auf eine funktionierende Spannungsversorgung.

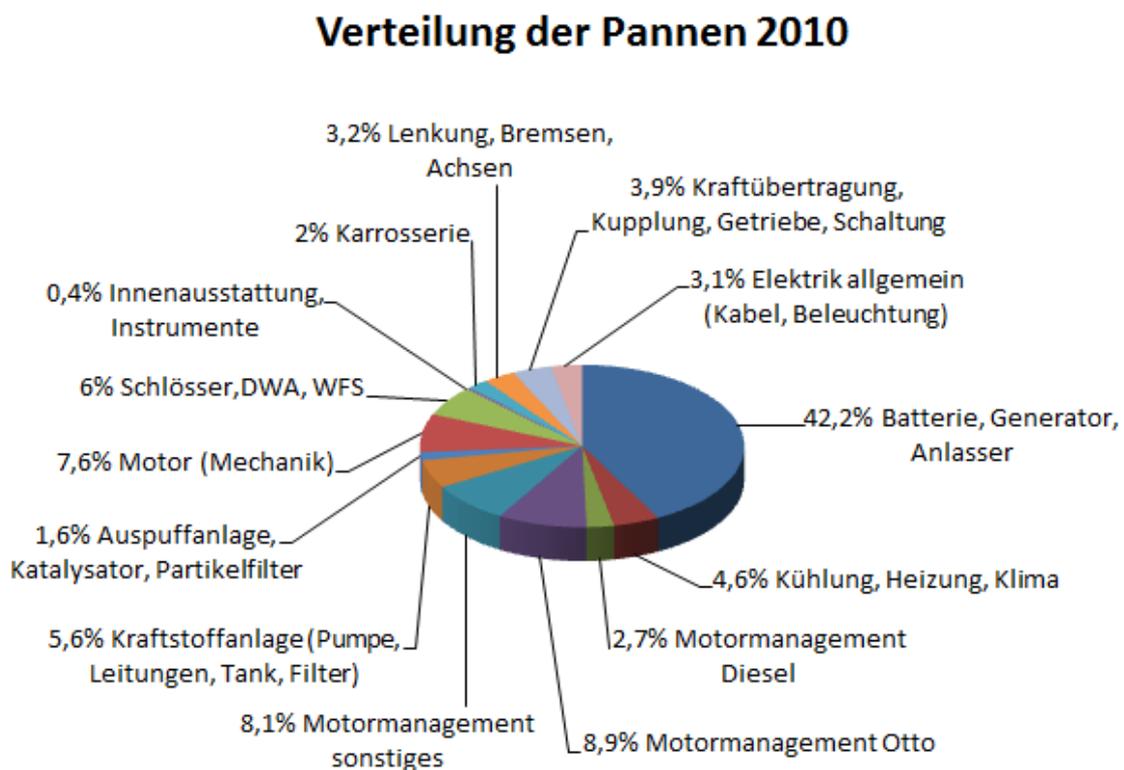


Abbildung 1.1: ADAC Pannenstatistik 2010 [1.1]

Die Standard-Starterbatterien werden seit vielen Jahren als Bleibatterie gefertigt, sie sind kostengünstig und haben sich im Alltag der Kraftfahrzeuge bewährt. Allerdings haben diese Batteriesysteme auch Nachteile, durch die in bestimmten Betriebssituationen Probleme entstehen können.

Bei Bleibatterien, die etwas tiefer entladen werden, nehmen die Elektroden permanenten Schaden und die Kapazität der Batterie nimmt ab. Das ist in den meisten heutigen Betriebssituationen der Starterbatterie allerdings nicht der Fall.

Durch die Weiterentwicklung der Kraftfahrzeuge im Bereich der Kraftstoffeinsparung wurde unter anderem die sogenannte Start – Stopp – Automatik eingeführt und seitdem immer häufiger in neuen Kraftfahrzeugen eingesetzt. Diese Automatik sorgt beim Anhalten des Fahrzeugs dafür, dass der Motor abgeschaltet wird z.B. an Ampeln. Dadurch verbraucht das Fahrzeug, bezogen auf die gesamte Strecke, weniger Kraftstoff. Die Anforderungen an die Bleibatterie, die das gesamte Bordnetz betreibt sind also stark gestiegen. Alle Schaltgeräte und Komponenten müssen bei ausgeschaltetem Generator, der sich nur im Betrieb befindet wenn auch der Motor läuft, über die Bleibatterie abgedeckt werden. In dem Augenblick wenn der Motor wieder startet, muss die Bleibatterie auch hierfür den Startstrom liefern. Das Starten eines Motors benötigt einen sehr hohen Strom im Verhältnis zu den anderen Verbrauchern im Automobil.

Bei „kälteren“ Temperaturen braucht der Startvorgang noch mehr Energie, wenn das Fahrzeug gestartet wird und die Leistungsfähigkeit der Bleibatterie nimmt ebenfalls mit der Umgebungstemperatur ab.

Wenn jetzt z.B. im Stadtverkehr das Fahrzeug häufig ausgeschaltet und wieder gestartet wird, geht das auf Kosten der Lebensdauer der Bleibatterie, da diese sich nicht schnell genug wieder vollständig aufladen kann und die Elektroden irreparablen Schaden nehmen.

Die Bleibatterie „altert“ durch diesen Vorgang schneller und muss viel früher ausgetauscht werden als bei älteren Fahrzeugen.

Das hohe Eigengewicht der Bleibatterie, das permanent im Automobil transportiert werden muss sorgt für einen höheren Verbrauch des Kraftfahrzeugs. Hier besteht ebenfalls noch Forschungsbedarf nach leichteren Alternativen.

Eine Alternative ist, die Bleibatterie durch eine Lithium-Batterie zu ersetzen, die eine höhere Zyklenanzahl besitzt. Diese kann viel häufiger geladen und auch tiefer entladen werden, ohne Schaden zu nehmen. Die Lithium-Batterien sind auch sehr viel leichter als vergleichbare Modelle aus Blei, allerdings besitzen die Lithium-Batterien eine andere bzw. höhere Spannung als die Bleibatterien, was den Einsatz der Lithiummodelle in Kraftfahrzeugen etwas schwieriger macht, da die Spannung der Lithium-Batterie an die Bordnetzspannung der Fahrzeuge angepasst werden muss.

Bei der Entladung der Lithiumzellen muss die Spannung reduziert werden, was etwas leichter ist als die Spannung zu erhöhen, allerdings muss auch hierbei beachtet werden, dass die einzelnen Zellen der Lithium-Batterie durch eine Safety-Unit¹ überwacht und geschützt werden müssen.

Beim Starten des Motors fließt der höchste Strom durch die Leistungselektronik der Safety-Unit. Bei Dieselfahrzeugen kann der Startstrom bis zu 1000 Ampere betragen, daher muss dafür gesorgt werden, dass die Leistungselektronik für diese sehr hohen

¹Safety-Unit ist eine elektronische Überwachungsschaltung, die die Überspannung, Unterspannung und in den meisten Fällen auch Temperaturen der einzelnen Lithium-Zellen überwacht.

Ströme ausgelegt ist, um im Fehlerfall (z.B. Unterspannung der Zellen oder Überschreiten des Entladestroms) die Lithium-Batterie schnell genug und sicher abschalten zu können.

Im Ladevorgang müssen die Lithium-Zellen vor einer Überspannung geschützt werden, die sehr genau (auf 50mV) eingehalten werden muss, da ansonsten ein thermisches Durchgehen²⁻¹ der Lithium-Zellen befürchtet werden muss.

Die Temperaturüberwachung der Zellen wird durch die Safety-Unit permanent gewährleistet, da diese selbst durch die Lithium-Zellen mit Spannung versorgt wird und auch beim Abschalten der einzelnen Stränge weiterhin aktiv ist.

In dieser Diplomarbeit soll nun der erste Schritt getan werden, um die Standard-Bleibatterie durch ein Modell aus Lithium zu ersetzen, indem alle Schaltgeräte und die weitere Elektronik des Bordnetzes an der vorhandenen Bleibatterie angeschlossen bleibt und die separate Leitung zum Starter an die neue Lithium-Starterbatterie angeschlossen wird.

Die Lithium-Batterie ist nur für den reinen Startvorgang zuständig und muss alle anderen Verbraucher, die im Fahrzeug vorhanden sind, nicht versorgen. Ähnlich wird es heutzutage schon in Fahrzeugen der Oberklasse mit einer zweiten Servicebatterie realisiert.

Im nächsten Schritt soll untersucht werden, ob die Lithium-Batterie mit dem Fahrzeuggenerator geladen werden kann und die dafür entworfene Ladeschaltung funktioniert.

Davor müssen allerdings noch alle Komponenten für den Bau der Starterbatterie ausgewählt und dimensioniert werden. Bevor diese dann zum Einsatz kommen, müssen die Bauteile getestet werden, ob sie sich so verhalten wie ausgewählt und in den Datenblättern angegeben.

Zunächst soll nun erklärt werden, warum eine Batterie aus Lithium-Eisen-Phosphat ausgewählt wurde und nicht aus einer Kombination von Lithium und anderen Stoffen oder auch aus anderen bewährten Stoffen z.B. Nickel-Cadmium (NiCd), Nickel-Metallhydrid (NiMH), die für die Produktion von Akkumulatoren verwendet werden. Es gibt eine Vielzahl von verschiedenen Akkumulator-Modellen, die in anderen Anwendungsbereichen zum Einsatz kommen.

Die weltweiten Ressourcen des Stoffes Lithium und deren Verteilung auf der Erdoberfläche ist sehr unterschiedlich und wird umstritten in den Medien als sehr knapp dargestellt. Gerade in Hinblick auf die von der Bundesregierung angestrebte Elektromobilität, die bis zum Jahr 2020 einen Anteil von 1 Million Fahrzeugen mit elektrischem Antrieb auf den deutschen Straßen haben will, wird der Bedarf an Lithium steigen.

Um die Vor- und Nachteile dieser verhältnismäßig neuen Akkumulatoren-Technologie besser verstehen und nachvollziehen zu können, wird der Stoff Lithium und der chemische Ablauf in einem Lithium-Akkumulator dargestellt und erläutert.

²⁻¹ Thermisches Durchgehen bedeutet, dass die Zelle aufgrund von chemischen Reaktionen so stark überhitzt, dass die Zelle ohne äußere Einwirkung abbrennt.

1.1 Das Element Lithium

Die Angaben dieses Kapitels stammen aus Internetquellen es wird kein Autorenrecht beansprucht.

Lithium ist ein silbrig weiß-graues Alkalimetall, welches immer an Mineralien gebunden ist. In reiner Form kommt es in der Natur nicht vor, da es sehr reaktionsfreudig ist.

Lithium wurde 1817 von Johan August Arfwedson entdeckt. Es ist ein weiches Leichtmetall und besitzt die kleinste Dichte ($0,534\text{g/cm}^3$) der festen Elemente (unter Standardbedingungen, Raumtemperatur). Lithium reagiert sehr stark mit Wasser. Um Verätzungen hervorzurufen, genügt schon die Feuchtigkeit der Haut.

Lithium wird in trockenen Umgebungen aufbewahrt, um es vor der in der Luft enthaltenen Feuchtigkeit, zu schützen. Bei trockener Luft ist es längere Zeit stabil, bei feuchter Luft bildet sich eine matte gräuliche Schicht aus Lithiumhydroxid. Es kann unter anderem auch in Paraffinöl bzw. in Petroleum aufbewahrt werden (siehe Abbildung 1.2).

Lithium ist gesundheitsschädlich, allerdings sehr viel weniger als das nächste Leichtmetall Beryllium im Periodensystem. Es befindet sich häufig in Form seiner Salze als Spurenelement in Mineralwasser wieder. Die Konzentration ist so gering, dass es für den Menschen nicht schädlich ist.

Lithium wird erst seit 1923 kommerziell produziert. Seit 2007 sind Batterien und Akkumulatoren das wichtigste Einsatzgebiet.



Abbildung 1.2: Lithium-Stücke in Paraffinöl zum Schutz vor Oxidation [1.2]

Der Anteil Lithium in der Erdkruste ist etwa dreimal ($0,006\%$) höher als der von Blei.

Die Gewinnung von Lithium erweist sich, im Gegensatz zu Blei, als sehr viel schwieriger, da es sehr weit verteilt ist. Häufig kommen Lithiumsalze, besonders Lithiumchlorid, in Salzseen vor. Der Anteil kann bis zu 1% betragen.

Lithium ist ein guter Stromleiter $10,6 \cdot 10^6 \text{ A/(Vm)}$ (ca. 18% von Kupfer) und Wärmeleiter.

Lithium besitzt unter den Alkalimetallen den höchsten Siedepunkt (1615K bzw. 1342°C), den höchsten Schmelzpunkt ($453,69\text{K}$ bzw. $180,54^\circ\text{C}$) und auch die größte spezifische

Motivation und Einführung

Wärmekapazität (3482J/(kg K)). Es besitzt außerdem die größte Härte (Mohs-Härte = 0,6) der Alkalimetalle, allerdings lässt es sich mit einem Messer leicht schneiden.

In Bolivien in dem Salzsee Salar de Uyuni werden die größten Reserven vermutet ca. 5,4 Millionen Tonnen Lithium.

Lithium besitzt unter den Alkalimetallen den höchsten Siedepunkt (1615K bzw. 1342°C), Schmelzpunkt (453,69K bzw. 180,54°C) und auch die größte spezifische Wärmekapazität (3482J/(kgK)). Zudem besitzt es die größte Härte (Mohs-Härte = 0,6) der Alkalimetalle, lässt sich aber mit einem Messer leicht schneiden.

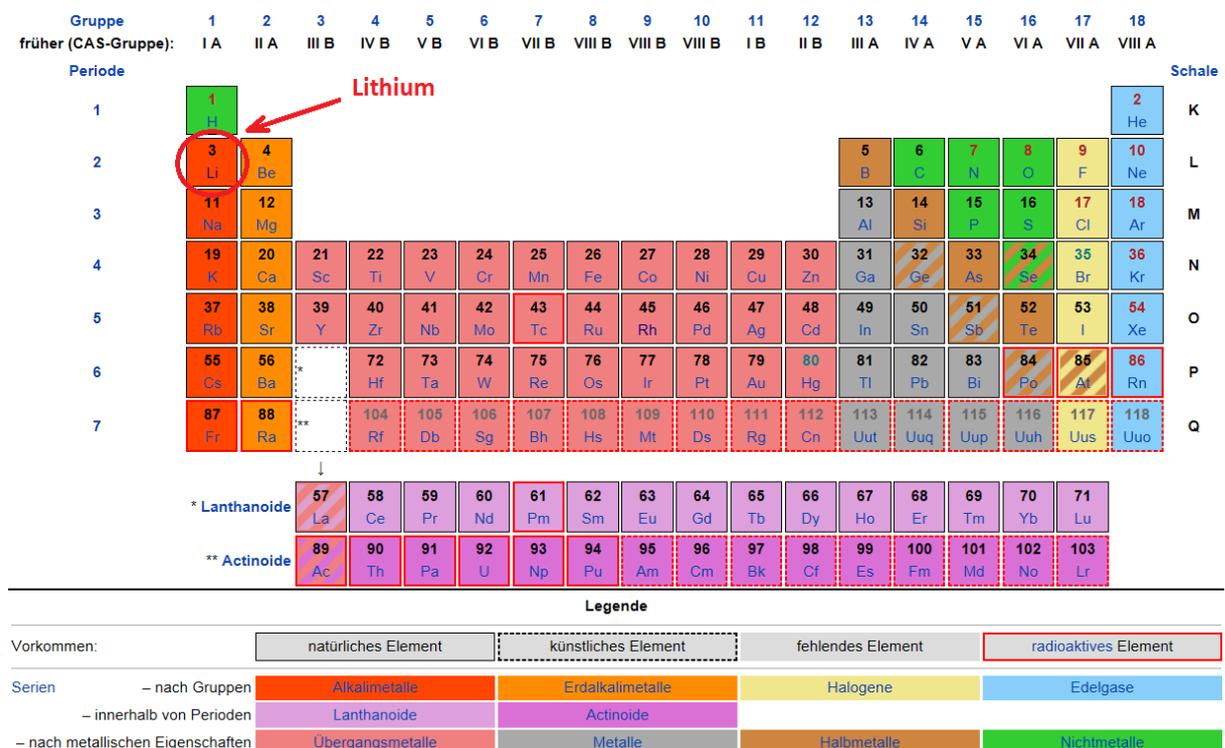
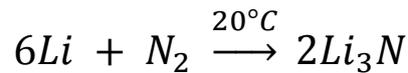


Abbildung 1.3: Periodensystem der Elemente [2]

Lithium reagiert, wie alle Alkalimetalle, mit sehr vielen Elementen und Verbindungen (z.B. Wasser) unter Wärmeabgabe. Unter den Alkalimetallen ist es das Reaktionsträgste.

Unter den Alkalimetallen, reagiert Lithium als einziges mit Stickstoff. Es genügt schon der Anteil von Stickstoff (ca.78%) in der normalen Raumluft bei Raumtemperatur und es entsteht langsam Lithiumnitrid (Abbildung 1.4).



Dieses wird durch die hohe Ladungsdichte des Li^+ -Ions und damit durch eine hohe Gitterenergie des Lithiumnitrids ermöglicht. Im ganzen Periodensystem gesehen, hat Lithium das niedrigste Normalpotential (-3,04V) und ist das unedelste Element.



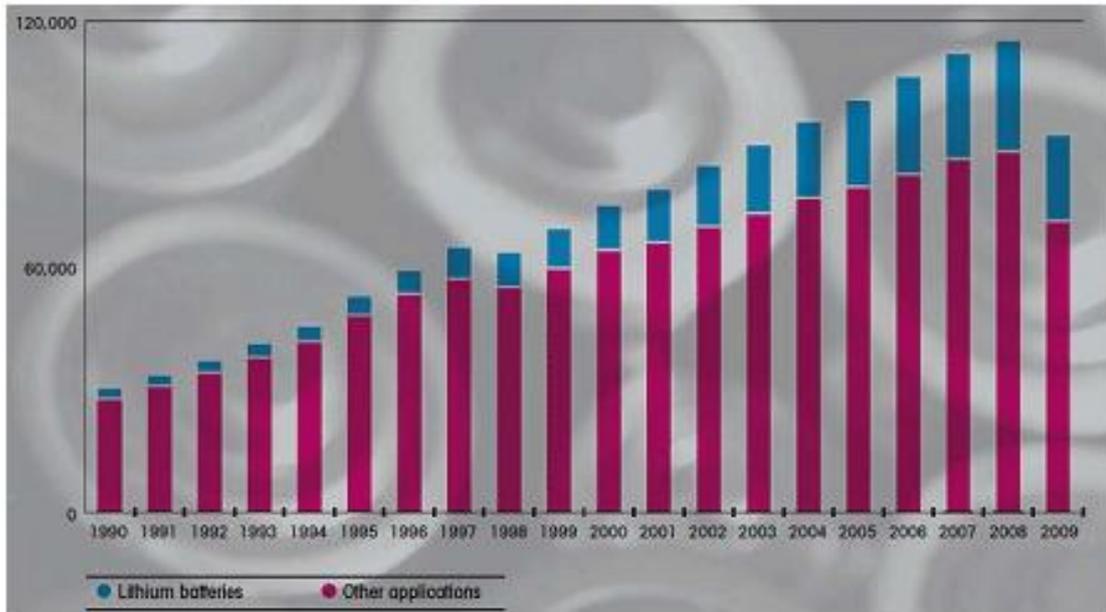
Abbildung 1.4: Elementares Lithium bildet an der Luft langsam dunkles Lithiumnitrid [3]

1.2 Verwendung von Lithium

Der größte Anteil der gewonnenen Lithiumsalze (Lithiumcarbonat, Lithiumhydroxid, Lithiumchlorid, Lithiumbromid) wird nicht zu reinem Metall reduziert, sondern direkt weiter verwendet oder in andere Lithiumverbindungen umgewandelt.

„Der Lithiumbedarf wurde für 2010 auf 125.000 Tonnen Lithiumcarbonat-Äquivalent (LCE) geschätzt und ist in den letzten Jahren immer mehr gestiegen. Grund dafür ist vor allem die Verwendung des Lithiums in Akkus.

Lediglich im Jahr 2009 sank der Lithiumbedarf wegen der Wirtschaftskrise und ihrer Auswirkungen auf die Automobilindustrie und die Baubranche um rund 20% (siehe Abbildung 1.5). Durch die Entwicklung von Hybrid- und elektrischen Fahrzeugen kann aber mit einem erneuten, starken Anstieg in den nächsten Jahren gerechnet werden“ Zitat aus www.rohstoff-welt.de[4].



Quelle: signumBOX / Dundee Securities Ltd.

Abbildung 1.5: weltweiter Lithiumbedarf für Batterien und andere Zwecke seit 1990 in Tonnen pro LCE [4]

Lithium wird am häufigsten in der Glas- und Keramikindustrie (31%) und in der Batterieherstellung (23%) verwendet. Durch die Weiterentwicklung der Lithium-Ionen-Akkus wird sich der Bedarf in den folgenden Jahren dahin gehend verändern, dass der Anteil an Akkumulatoren stark steigt.

Die weltweite Fördermenge beträgt momentan ca.180.000t und könnte bis zum Jahr 2025 auf ca. 340.000t ausgebaut werden. Die Nachfrage könnte bis dahin ca. 288.000t LCE oder sogar noch mehr betragen.

Der weltweit größte Lithium-Produzent SQM (Sociedad de QuímicaMinera de Chile SA) gibt an, dass dieser Bedarf sogar auf 450.000 - 500.000 Tonnen bis zum Jahr 2030 steigen könnte.

Der durchschnittliche Lithiumpreis lag im Jahr 2010 bei 5.000 USD pro Tonne LCE, vor der Wirtschaftskrise waren es noch 6.500 USD pro Tonne [4].

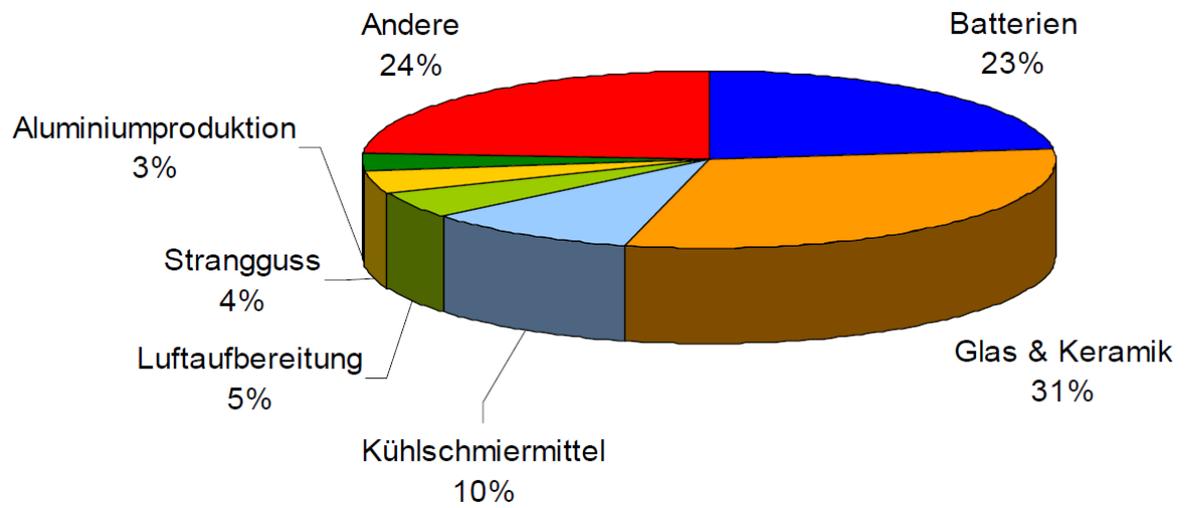


Abbildung 1.6: Aufteilung des Bedarfs an Lithium auf Anwendungsbereiche (United States Geological Survey 2010) [5]

1.3 Warum Lithium für Akkumulatoren?

Lithium ist das leichteste Alkalimetall, welches im Periodensystem vorhanden ist. (Zur Erinnerung $0,534\text{g/cm}^3$ bei 20°C). Vergleichen wir es mit Kalium, welches auch eine verhältnismäßig geringe Dichte ($0,856\text{g/cm}^3$) aufweist, allerdings ca. 60% schwerer ist und ein geringeres Normalpotential ($-2,931\text{V}$) hat, sieht man den Unterschied.

Es muss eine Referenzelektrode zum Messen genutzt werden, da das elektrochemische Potential einer Elektrode nur gegen eine andere Elektrode gemessen und kein absolutes Potential bestimmt werden kann.

Die Standard - Referenzelektrode in der Elektrochemie ist die Normal - Wasserstoffelektrode (Standard Hydrogen Electrode – SHE). Sie hat ein Potential von 0 V und die anderen Elemente der elektrochemischen Spannungsreihe beziehen sich auf dieses Potential.

Blei ist sogar mehr als das Zwanzigfache schwerer als Lithium und hat ein Normalpotential von nur $-0,1251\text{V}$.

Das optimale Verhältnis für einen Akkumulator wäre, ein sehr leichtes Element mit sehr hohem Normalpotential und ein sehr leichtes Element mit sehr niedrigen Normalpotential zu kombinieren (Abbildung 1.8).

Man könnte auch das Element mit dem höchsten positiven Potential aus der elektrochemischen Spannungsreihe nehmen und auf Fluor zurückgreifen, das mit $2,87\text{ V}$ Normalpotential den größten Wert aufweist. Allerdings ist Fluor sehr giftig, äußerst reaktionsfreudig und stark ätzend.

Es liegt in seiner reinen Form bei Standardbedingungen als Gas vor, gehört zu den Halogenen und reagiert mit allen Stoffen, außer mit den Edelgasen Neon und Helium.

Würde reines Lithium und der Sauerstoff aus der Umgebungsluft für die Zelle verwendet werden, hätte die Zelle eine sehr hohe Spannung, wäre recyclingfähig und sehr leicht.

Nach Schätzungen wird die Entwicklung noch ca. 10 Jahre brauchen bis sie auf dem kommerziellen Markt erhältlich ist.

In Abbildung 1.7 ist ein Beispiel für eine Kennzeichnung einer Standard Lithiumzelle zu sehen.

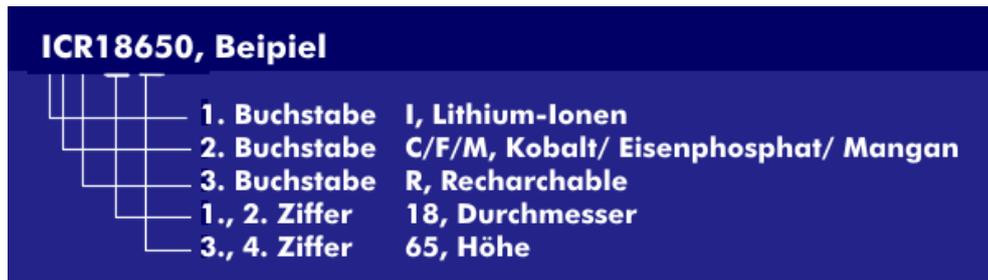


Abbildung 1.7: Kennzeichnung von Lithium-Ionen-Akkus [12]

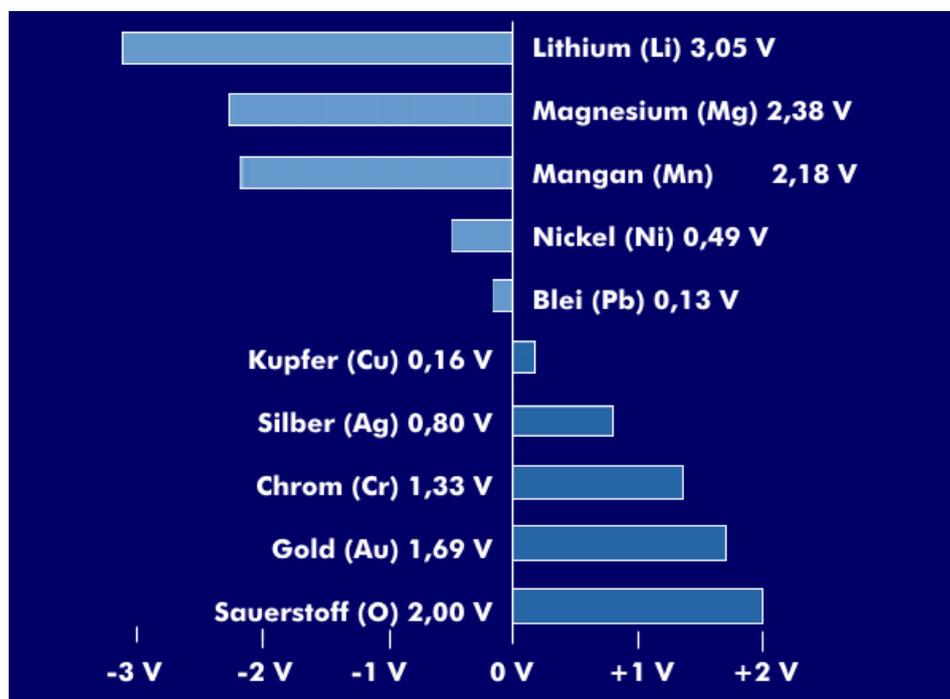


Abbildung 1.8: Elektrochemische Spannungsreihe für einige Elemente [6]

In Abbildung 2.8 ist ein Auszug der Elektrochemischen Spannungsreihe zu sehen, allerdings sind nicht alle Materialien oder auch chemischen Verbindungen enthalten, die für den Bau von Akkumulatoren verwendet werden.

1.4 Kapazität und Energiedichte

Mit der **Kapazität** von Akkumulatoren oder auch Batterien ist eigentlich die gesamte Menge der elektrischen Ladung gemeint, die die Batterie bzw. der Akku speichern oder liefern kann.

Die Kapazität wird meist in Amperestunden (Ah) angegeben. Bei einzelnen Zellen spricht man auch von Amperesekunden (As) bzw. von Coulomb (C). Eine Amperesekunde entspricht einem Coulomb ($1As = 1C$).

Die Kapazität von Batterien / Akkus darf nicht mit der Kapazität von Kondensatoren verwechselt werden, die in Farad (F) ausgedrückt wird. Ein Farad entspricht einem Ampere, multipliziert mit einer Sekunde dividiert durch ein Volt ($F = As/V$).

Mit der Angabe der Kapazität kann berechnet werden, wie lange ein bestimmter Strom oder auch wie viel Strom über einen bestimmten Zeitraum entnommen werden kann.

Die **Energiedichte** bzw. spezifische Energie drückt aus, wie groß die Ladungsmenge (Energienmenge) der Zelle pro Volumen (ccm bzw. l) oder Gewicht (kg) ist. In der Literatur wird deshalb teilweise auch von Energiegewicht oder Energievolumen gesprochen.

Nach DIN 5485 ist die spezifische Energie speziell massenbezogen und die volumetrische Energiedichte die dimensional bezogene Bezeichnung. [14]

Durch die Angabe der Energiedichte kann man Rückschlüsse auf die Betriebs- und Nutzungsdauer von verschiedenen Betriebsmitteln ziehen. Die Energiedichte (Energie pro Volumen) und die spezifische Energie (Energie pro Gewicht) sollten so groß wie möglich sein, damit die Akkumulatoren wenig Platz einnehmen und ein geringes Gewicht haben (siehe Abbildung 1.10).

Die Energiedichte eines typischen Lithium-Akkumulators beträgt mehr als das doppelte eines Nickel-Cadmium-Akkumulators ($40 - 50Wh/kg$) und zwar zwischen $95 - 190Wh/kg$ oder $250 - 500Wh/l$.

Um die Energiedichte zu berechnen, wird die mittlere Entladespannung mit dem Entladestrom (bis zum Erreichen der Ladeschlussspannung) und der Zeit multipliziert, danach wird durch das Volumen dividiert.

Es gibt noch einen weiteren Leistungsparameter: die spezifische Leistung (W/kg). Hierbei wird die Leistung bis zum Erreichen der Entladespannung in Relation zum Gewicht gesetzt.

Sie wird berechnet mit der mittleren Entladespannung multipliziert mit dem Entladestrom und dividiert durch das Gewicht.

1.5 Energiedichten von verschiedenen Lithium-Akkumulatoren

Der Lithium-Ionen-Akku wurde und wird ständig weiter entwickelt. So sind bisher sehr viele verschiedene Akkumulatoren auf den Markt gebracht worden oder werden es noch wie z.B.:

- Lithium-Polymer-Akku
- Lithium-Titanat-Akku
- Lithium-Mangan-Akkumulator
- Lithium-Eisen-Phosphat-Akkumulator
- Lithium-Eisen-Mangan-Phosphat-Akkumulator
- Lithium-Eisen-Yttrium-Phosphat-Akkumulator
- Zinn-Schwefel-Lithium-Ionen-Akkumulator (ca. ab 2020)
- Lithium-Luft-Akkumulator (ca. ab 2025)

Material	Energiedichte
LiCoO₂ (Lithium-Kobalt)	110 bis zu 190 Wh/kg
LiPo oder LiPoly(Lithium-Polymer-Akku)	140 bis zu 180 Wh/kg
LTO (Lithium-Titanat)	70 bis zu 90 Wh/kg
LiMnO₂ (Lithium-Mangan)	110 bis zu 130 Wh/kg
LiFePO₄ (Lithium-Eisenphosphat)	90 bis 110 Wh/kg
Zinn-Schwefel-Lithium-Ionen-Akkumulator	ca. 300 Wh/kg
Lithium-Luft-Akkumulator	ca. 1000 Wh/kg

Tabelle 1.1: Verschiedene Lithium-Ionen-Akku Materialien und die dazu gehörenden Kapazitäten [15], [18], [19]

Die typische Leistungsdichte eines Lithium-Akkumulators liegt bei 300 - 1500W/kg je nach verwendetem Material. Bei den Hochleistungs-Typen liegt die Leistungsdichte zwischen 2kW/kg und 4kW/kg.

Bei den Hochenergie-Typen liegt die Energiedichte zwischen 200Wh/kg und 400Wh/kg.

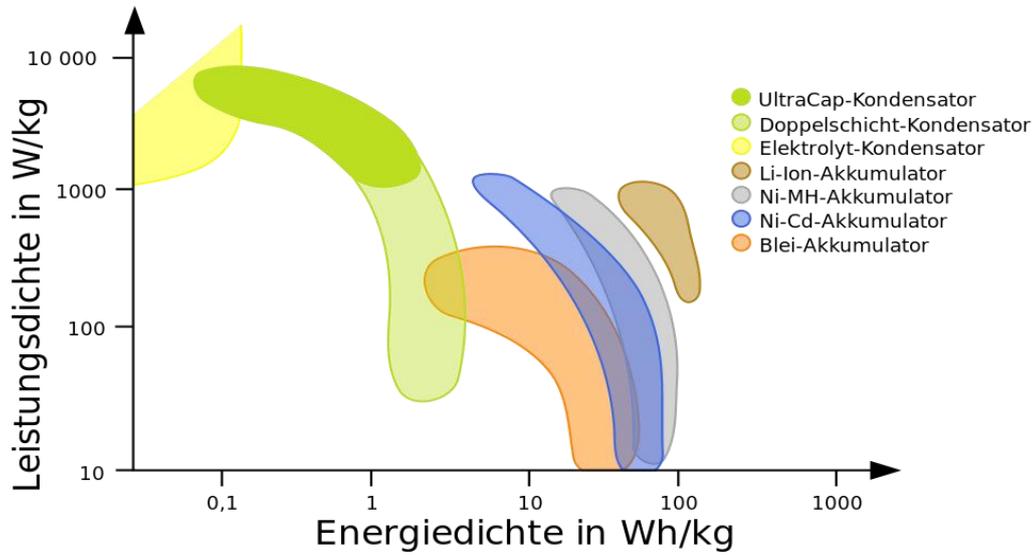


Abbildung 1.9: Vergleich der Leistungs- und Energiedichten einiger Energiespeicher [17]

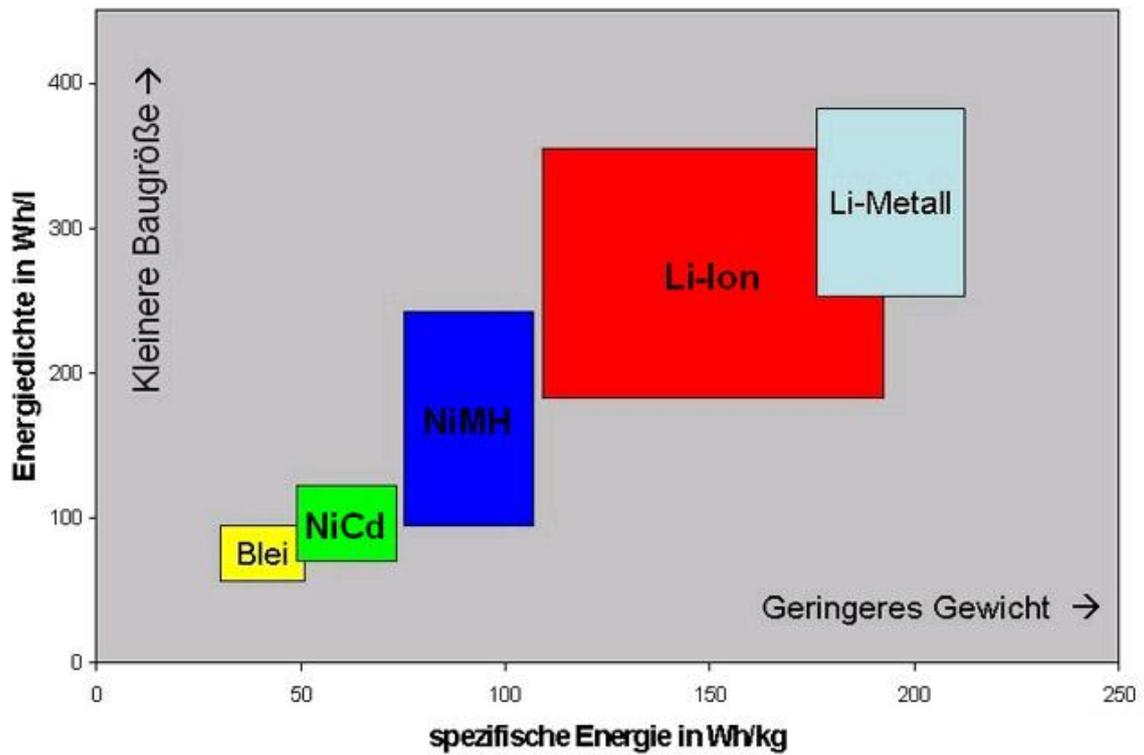


Abbildung 1.10: Lithium-Systeme im Vergleich zu anderen bekannten Batteriesystemen [10]

1.5.1 Spannung von verschiedenen Lithium-Akkumulatoren

Die Nennspannung eines Lithium-Ionen-Akkumulators liegt bei ca. 3,6V und ist somit ungefähr dreimal so hoch wie die eines Nickel-Metallhydrid-Akkumulators (NiMH-Akku), der einen Wert von 1,2V aufweist. Die Ladeschlussspannung liegt bei ungefähr 4,2V und die Entladeschlussspannung bei ca. 2,5V je nach verwendeten Elektrodenmaterialien.

Diese Werte dürfen nicht über- bzw. unterschritten werden, da dies sonst zu irreversiblen Schäden führen würde, die Kapazität des Akkumulators sinkt und der Akku wäre unbrauchbar.

Material	Nennspannung
LiCoO ₂	3,6 V
LiPo oder LiPoly	3,7 V
LiMnO ₂	3,7 – 3,8 V
LiFePO ₄	3,2 - 3,3 V
Li ₂ FePO ₄ F	3,6 V

Tabelle 1.2: Verschiedene Lithium-Ionen-Akku Materialien und die dazu gehörenden Spannungen [15]

Aus der Tabelle 1.2 ist ersichtlich dass die meisten Lithium-Akkus aufgrund ihrer fast gleichen Spannungen ohne Probleme untereinander austauschbar sind.

Nur das Modell Lithium-Eisenphosphat (LiFePO₄) liegt mit seinen Spannungswerten etwas niedriger und kann nicht ohne weiteres für die anderen Modelle eingesetzt werden.

An den Klemmen der Batterie oder des Akkumulators wird die Ruhespannung (open circuit voltage – OCV) gemessen. Diese ist etwas weniger als die Gleichgewichtsspannung²⁻², da in dem Akkumulator immer geringe chemische Reaktionen stattfinden und dadurch eine geringe Selbstentladung vorhanden ist.

Wenn dem Akkumulator Strom entnommen wird, kann nur die Klemmenspannung gemessen werden, da an dem Innenwiderstand des Akkus auch eine Spannung abfällt.

²⁻²Die Gleichgewichtsspannung ist wie folgt definiert: „Wenn der elektrische Stromkreis nicht geschlossen ist, stellt sich ein Gleichgewichtszustand in der Zelle ein. Das elektrische Potential, das dabei zwischen den Elektroden herrscht, ist dann die Gleichgewichtsspannung.“ [29].

Die **Coulomb-Effizienz** ist das Verhältnis der Menge der Elektronen, die dem Akkumulator entnommen werden kann, zu den Elektronen die vorher in den Akkumulator geladen wurden.

Die Coulomb-Effizienz beträgt annähernd 100%, also kann fast vollständig der gesamte Strom wieder entnommen werden.

Nur bei den ersten Lade- Entladevorgängen wird eine sogenannte Deckschicht auf den Elektroden der Anode und Kathode gebildet durch die die Kapazität des Akkus etwas geringer wird.

Die **Energie-Effizienz** ist das Verhältnis der Menge an Energie, die in dem Akkumulator vorhanden ist zu der Energie, die dem Akkumulator wieder entnommen werden kann.

Es gibt immer einen Spannungsverlust bei Batterien und Akkumulatoren durch den Innenwiderstand, bedingt dadurch, dass sich der Widerstand dem Lade- oder Entladestrom entgegenstellt. Dennoch beträgt der Wirkungsgrad ca. 90%.

Wenn im Verhältnis zum maximalen angegebenen Strom ein kleiner Lade- /Entladestrom fließt, kann der Wirkungsgrad sogar bis 98% betragen.

1.6 Aufbau von Lithium-Ionen-Akkus

In der Abbildung 1.11 kann man den Aufbau einer runden Lithium-Batterie-Zelle sehen. Die einzelnen Schichten werden aufeinander gelegt und dann zu einem Zylinder aufgerollt.

Die durch den Separator getrennten Elektroden werden außen mit einer Kupfer- oder auch Aluminiumfolie als Stromableiter versehen. Wenn weitere Lagen parallel geschaltet werden sollen, werden diese auch wieder durch einen Separator getrennt und somit elektrisch isoliert. Durch die Größe der Elektrodenfläche wird die Kapazität der Zelle bestimmt. Die einzelnen Stromableiter werden am Deckel bzw. am Boden mit den Außenkontakten verschweißt.

Das aktive Material der negativen Elektrode eines Lithium-Ionen-Akkus besteht meistens aus Graphit und die positive Elektrode aus Metalloxiden wie z.B. LiCoO_2 (Lithiumcobalddioxid), LiNiO_2 oder LiMn_2O_4 .

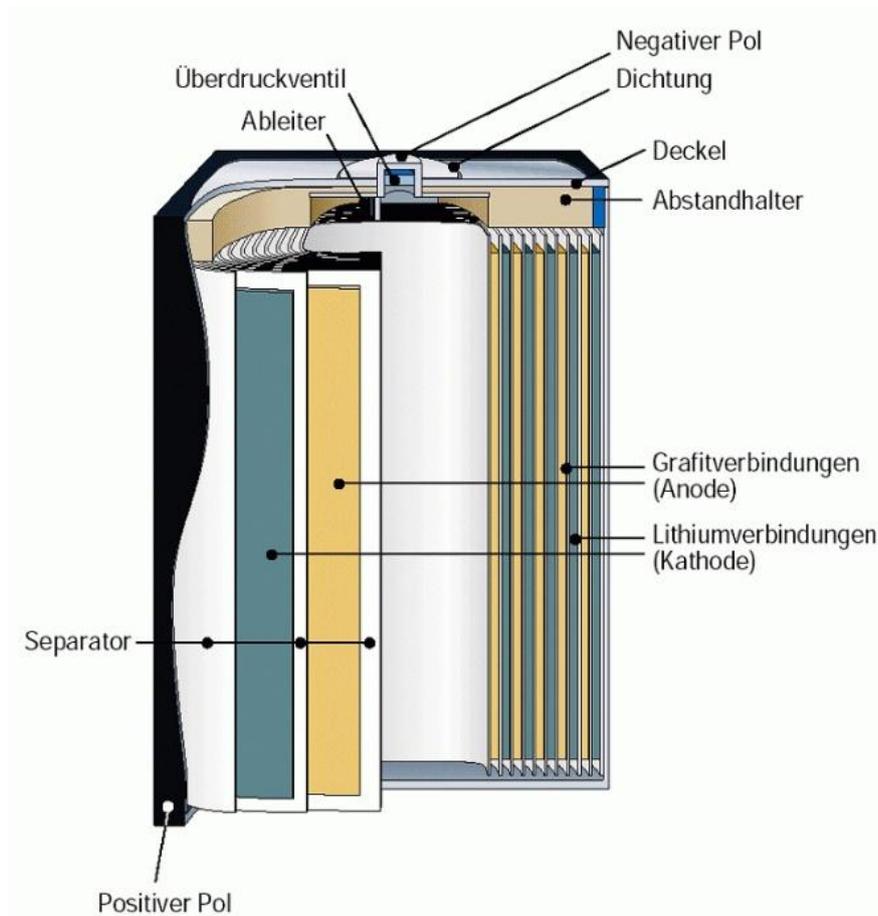


Abbildung 1.11: Lithium-Ionen-Akku: Die Lithium-Ionen-Technologie besitzt im Vergleich zu den herkömmlichen Akkus wie NiCd oder NiMH die höchste spezifische Energie. (Quelle: Varta) [11]

Im Inneren des Lithium-Akkumulators ist fast kein Wasser vorhanden (Anteil von $H_2O < 20$ ppm), sollte trotzdem einmal Wasser durch eine Beschädigung eindringen z.B. durch einen Unfall, so würde das Lithium im Akkumulator mit starker Wärmeentwicklung reagieren und es würde zu einem Brand oder zu einer Verpuffung kommen.

Der Elektrolyt besteht aus aprotischen Lösungsmitteln, wie z.B. Ethylencarbonat, Propylencarbonat, Dimethylcarbonat, Diethylcarbonat oder 1,2-Dimethoxyethan gelösten Lithiumsalzen wie $LiPF_6$.

Unter anderem werden folgende Materialien verwendet [15]:

Negative Elektrode

- Graphit (Interkalation von Lithium) (Definition siehe 1.8.1 Seite 19)
- nanokristallines, amorphes Silizium (Interkalation von Lithium)
- $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ (Lithium-Titanat-Akku)
- SnO_2 Zinndioxid

Elektrolyt

- Salze, wie LiPF_6 (Lithiumhexafluorophosphat) oder LiBF_4 (selten) in wasserfreien aprotischen Lösungsmitteln (z. B. Ethylencarbonat, Diethylcarbonat etc.)
- Polymer aus Polyvinylidenfluorid (PVDF) oder Polyvinylidenfluorid-Hexafluorpropen (PVDF-HFP)
- $\text{Li}_3\text{PO}_4\text{N}$ Lithiumphosphatnitrid

Positive Elektrode

- LiCoO_2
- LiNiO_2
- $\text{LiNi}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_2$
- $\text{LiNi}_{0,85}\text{Co}_{0,1}\text{Al}_{0,05}\text{O}_2$
- $\text{LiNi}_{0,33}\text{Co}_{0,33}\text{Mn}_{0,33}\text{O}_2$
- LiMn_2O_4 Spinell
- LiFePO_4 (siehe Lithium-Eisen-Phosphat-Akkumulator)

(Quelle: Wikipedia Lithium-Ionen-Akkumulator)

1.7 Das Funktionsprinzip eines Lithium-Akkumulators

Das Funktionsprinzip eines Lithium-Akkumulators ist in Abbildung 1.12 zu sehen. Es zeigt die Vorgänge im Inneren des Lithiumionen-Akkumulators beim Laden (grüne Pfeile) und beim Entladen (rote Pfeile).

„Im Lithium-Ionen-Akku wird die elektrische Energie in Lithium-Atomen, an der negativen Elektrode und Übergangsmetall-Ionen an der positiven Elektrode, in einem chemischen Prozess mit Stoffänderung gespeichert.

Das unterscheidet den Li-Ion-Akku vom Lithium-Ionen-Kondensator, bei dem die Speicherung der elektrischen Energie ohne Stoffänderung erfolgt.

Im Li-Ion-Akku kann Lithium in ionisierter Form durch den Elektrolyten zwischen den beiden Elektroden hin- und herwandern, daher kommt auch der Name des Lithium-Ionen-Akkus.

Im Gegensatz zu den Lithium-Ionen sind die Übergangsmetall-Ionen ortsfest.“ [15]

Beim Ladevorgang wandern die positiv geladenen Lithium-Ionen durch den Elektrolyten von der positiven Elektrode zu der Negativen und gleichzeitig wandern die Elektronen über einen externen Stromkreis von der Negativen zu der positiven Elektrode.

An der positiven Elektrode nehmen nicht die Lithium-Ionen das Elektron wieder auf, sondern die vorhandenen Übergangsmetallionen, diese sind im geladenen Zustand stark ionisiert und ziehen die Elektronen stärker an als die Lithium-Ionen.

Die Übergangsmetallionen können Elemente wie Kobalt-, Nickel-, Mangan oder auch Eisen sein. Durch diese Gegebenheit liegt das Lithium auch im entladenen Zustand an der positiven Elektrode in Ionenform vor.

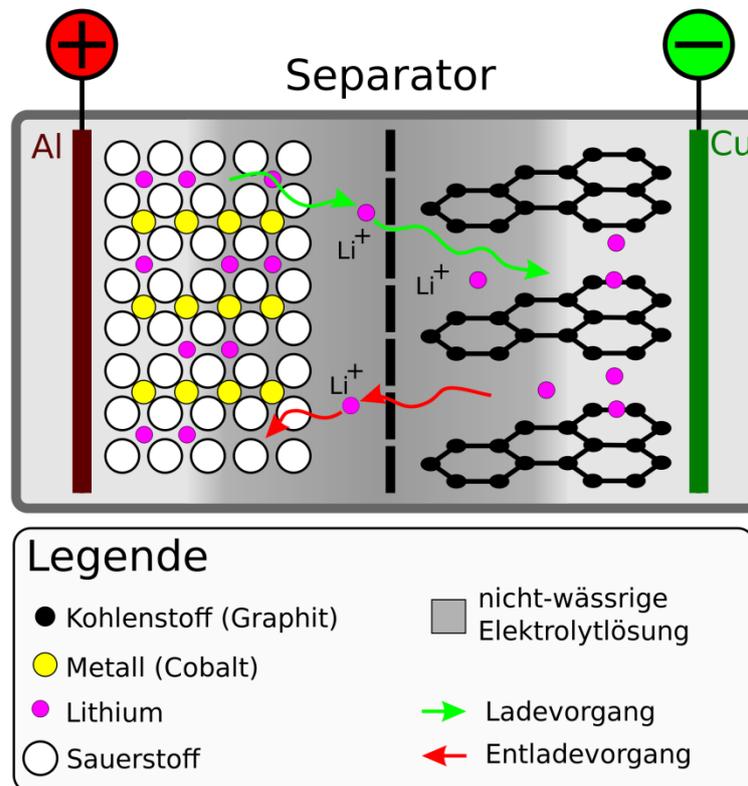


Abbildung 1.12: Schematischer Aufbau einer Lithium-Ionen-Zelle (positive Elektrode: LiCoO_2 ; negative Elektrode: Li-Graphit) [9]

An der negativen Elektrode ist das Lithium nicht ionisiert, daher würde es sich anbieten die negative Elektrode aus reinem Lithium zu fertigen.

Allerdings wäre dies in der Praxis schwierig, denn das Lithium wird nicht als reines Metall abgeschieden, sondern bildet eine Deckschicht aus und wird dendritisch abgeschieden.

Dieser fein verteilte Lithium-Schwamm ist sehr reaktiv und kann durch den Separator bis zur positiven Elektrode wachsen und somit einen Kurzschluss verursachen.

Deswegen werden die sehr kleinen Lithium-Atome in anderen Stoffen eingelagert, wie z.B. in Graphit zwischen den einzelnen Graphitebenen. In diesem Zusammenhang spricht man von Interkalationsverbindung.

1.7.1 Interkalation

Interkalation ist der Vorgang, in der sich eine bewegliche Gastspezies in ein vorhandenes Wirtsgitter einnistet, ohne die Struktur selber zu zerstören. Es wird ein elektrisch leitender Wirt als Elektrode in einen Elektrolyten eingebracht und anodisch bzw. kathodisch polarisiert, dadurch treten Anionen (negativ geladene Teilchen bzw. Ionen) oder Kationen (positiv geladene Teilchen bzw. Ionen) durch den Elektrolyten über in das Wirtsgitter.

Die Interkalation funktioniert so, dass sich eine Deckschicht auf der negativen Elektrode ausbildet, die für die sehr kleinen Lithium-Ionen durchlässig ist, aber für die Lösungsmittelmoleküle undurchlässig.

Wenn die Deckschicht allerdings nicht stark genug ausgebildet ist, kommt es zur Interkalation mit Lithium-Ionen und den Lösungsmittelmolekülen, dadurch wird dann die Graphitelektrode irreversibel zerstört.

1.7.2 Dendrit (Kristallographie)

Als Dendrit bezeichnet man eine baum- oder strauchartige Kristallstruktur die von der negativen Elektrode durch den Separator zu der positiven Elektrode wächst, hierdurch entsteht ein Kurzschluss.

Dieser Kurzschluss bedeutet, dass die Zelle unbrauchbar ist. Bilden sich die Dendriten noch schwach aus, führt das zunächst zu deutlicher Selbstentladung.

Ein gutes Beispiel für eine Kristallstruktur in dendritischer Form ist die Schneeflocke oder auch Eisblumen an einer Fensterscheibe siehe Abbildung 1.13.



Abbildung 1.13: Eisblumen an einer Fensterscheibe, als Beispiel für eine dendritische Form
[16]

1.8 Vorteile von Lithium-Ionen-Akkus

Der Lithium-Ionen-Akku besitzt eine hohe Energiedichte, ist thermisch stabil, hat eine fast konstante Ausgangsspannung über einen großen Entladezeitraum (siehe Abbildung 1.14 Seite 24), hat eine hohe Anzahl an Entlade- und Ladezyklen und weist keinen **Memory-Effekt** auf.

Der Memory-Effekt ist eigentlich ein Scheinproblem denn:

„Der Memory-Effekt ist das Phänomen, dass ein Akku nicht alle Energie abgibt, die er gespeichert hat, weil er wieder aufgeladen wurde, bevor er völlig leer war, und den Zustand, den er zum Zeitpunkt des Neuauf ladens erreicht hat, als Zustand der Erschöpfung gespeichert hat“ [13].

Dies ist die allgemein verbreitete, aber nicht wissenschaftliche zu begründende Annahme, dass die Akkumulatoren durch solche willkürlichen Lade- und Entladezyklen ihre Spannung bzw. ihre Leistung einbüßen. Richtig hingegen ist, dass die Lade- und Entladezyklen sehr oft hintereinander denselben Lade- bzw. Entladestatus erreichen müssen bevor der Akku sich dieses „merkt“, d.h. bevor sich also die kristalline Struktur im nicht entladenen Bereich vergrößert.

Der Memory-Effekt wurde in den 60er Jahren von der NASA bei einem ihrer Satelliten entdeckt, als man NiCd-Akkus immer gleichmäßig durch Solarpanel geladen und in den dunklen Phasen entladen hatte. Die Kapazität des Akkus reichte nur noch bis zur

nächsten Ladephase und nicht mehr darüber hinaus, obwohl die Akkus überdimensioniert waren.

Den Memory Effekt gab es also auch bei den vorherigen Akkutypen, nicht wirklich bei den Endverbrauchern.

Das Problem warum die Akkumulatoren an Spannung verloren, war viel mehr eine zu lange Aufladung. Durch den Ladestrom nach der vollständigen Aufladung der Zellen findet eine Umkristallisation an der Cadmiumelektrode statt und lässt die Ausgangsspannung auf ca. 1,08V von ehemals 1,2V der Zelle sinken.

Einige Verbraucher reagieren sehr empfindlich auf eine zu niedrige Spannung (z.B. Digitalkameras) und signalisieren dem Anwender, dass der Akku bereits leer ist, obwohl nur die Spannung reduziert wurde und die Zelle noch Strom liefern kann (die Kapazität der Zelle ist allerdings geringer geworden).

Bei den Lithium-Akkumulatoren gibt es keinen Memory-Effekt und ist deswegen für die weitere Abschlussarbeit nicht von Bedeutung.

1.9 Lebensdauer von Lithium-Ionen-Akkumulatoren

Die Lebensdauer von Lithium-Ionen-Akkumulatoren ist abhängig von den verwendeten Materialien (Qualität und Reinheit), dem Lade-/Entladehub bzw. den Temperaturen während der Lagerung und natürlich von der Ladestromstärke.

Der Akku wird am besten bei Raumtemperatur (ca. 20°C) betrieben. Zu niedrige Temperaturen im Gebrauch lassen ihn schneller altern und auch zu hohe Temperaturen bei der Lagerung tragen dazu bei.

Durch langsames Laden und Entladen bleibt die Kapazität des Akkus erhalten, weil die Elektroden nicht so stark belastet werden. Wird der Akkumulator mit einem verhältnismäßig hohen Strom geladen, so verringert sich auch hierdurch die Lebensdauer.

Die Zyklenlebensdauer und die kalendarische Lebensdauer der Lithiumzellen ist Typen abhängig.

Die erste Generation von Lithium-Akkumulatoren hatte eine sehr kurze Lebensdauer, nach einem Jahr wurden schon erhebliche Kapazitätsverluste bemerkt und nach zwei bis drei Jahren waren die Akkumulatoren unbrauchbar.

Man stellte einen erheblichen Einfluss der Lagerbedingungen fest. Die Akkus wurden voll aufgeladen und bei zu hohen Temperaturen gelagert, dies führte zu unumkehrbaren chemischen Reaktionen und schädigte die Lithium-Akkus nachhaltig.

1.10 Lade- und Entladekurven von einem Lithium-Eisen-Phosphat-Akkumulator

In der nächsten Abbildung 1.14 ist die Ladekurve (blau) und die Entladekurve (rosa) von einer Lithium-Eisen-Phosphat-Zelle zu sehen.

Es ist gut die lange flache Entladekurve zu erkennen, dieses ist bei sehr vielen Lithium-Ionen-Akkumulatoren der Fall.

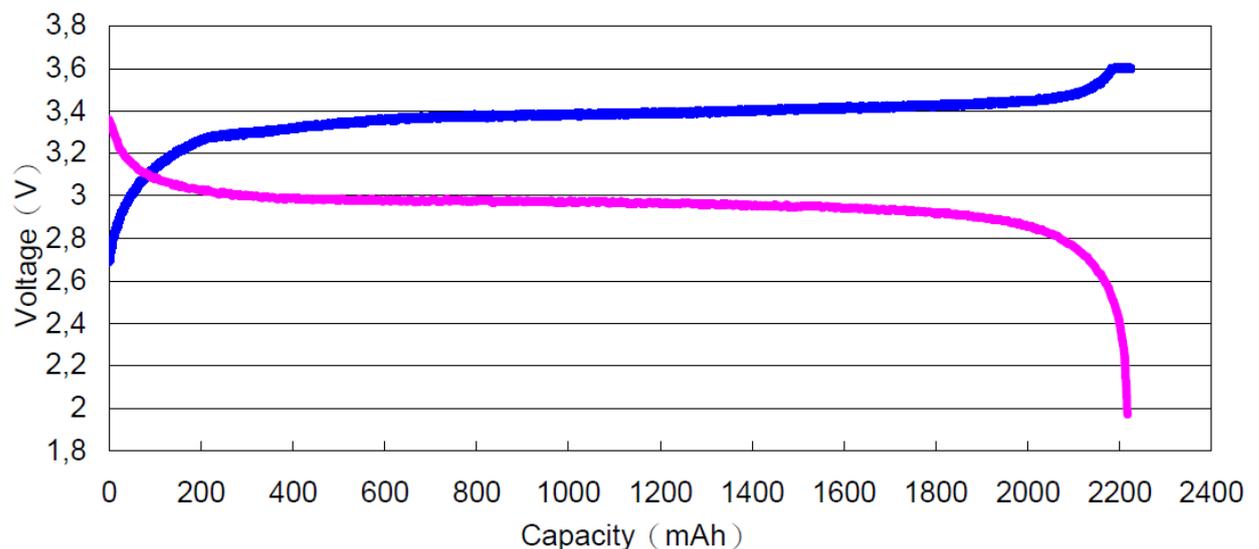


Abbildung 1.14: Lade- und Entladekurve eines Lithium-Eisen-Phosphat-Akkus 26650HP-Fe [27]

Bei stärkeren Belastungen des Akkumulators sinkt die Spannung an den Klemmen ab, aber der Verlauf der Entladekurve bleibt sehr flach. Erst bei extrem hoher Belastung ist erkennbar, dass die Kurve einbricht und sich dann wieder etwas verbessert.

Es ist zu sehen, dass die Ausgangsspannung auf dem jeweiligen Level relativ stabil bleibt und erst am Ende der Kapazität absinkt.

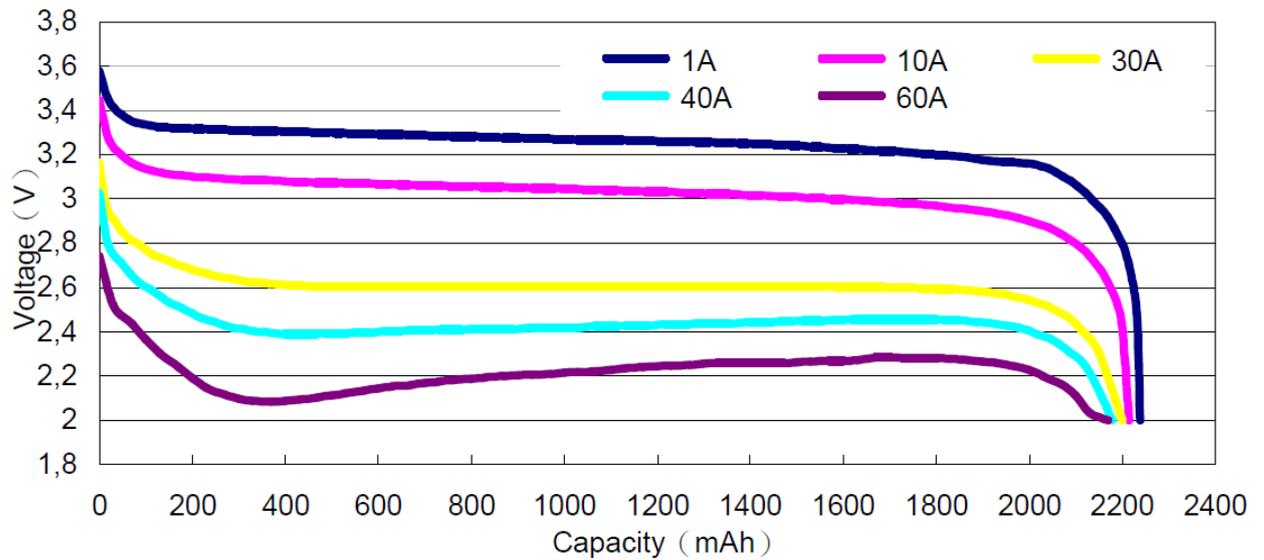


Abbildung 1.15: Entladekurven bei unterschiedlich starken Entladeströmen 26650HP-Fe [27]

1.11 Bauformen von verschiedenen Lithium Batterien

Lithium-Batterien werden auf den Markt in runden, prismatischen oder Knopfzellenform angeboten.

Die in den folgenden Tabellen angegebenen Größen und Bezeichnungen gelten nicht nur für Lithium-Batterien sondern z.B. auch für Nickel-Cd und Nickel-MH Gerätebatterien.

Motivation und Einführung



Standardgrößen nach verschiedenen Normen
Alle Angaben in mm

Typ	IEC	ANSI	JIS	Durchmesser	Breite	Höhe
		M		90.8		41.5
		F		91.3		33
	--	DD		32.9		123.5
Mono	R 20	D	UM 1	32.9		61.3
Baby	R 14	C	UM 2	26.2		49.8
		A		17.0		49.0
Mignon	R 6	AA	UM 3	14.7		50.5
Micro	R 03	AAA	UM 4	10.5		44.5
Lady	R 1	N	UM 5	12		30.2
4.5V-Block	3 R 12	--	UM 10	62	22	67
9V Block	6 F 22	PP3	--	26.5	17.5	48.5

Klassifizierung von Li-Sekundärsystemen nach IEC

Kürzel	Beschreibung
1. Buchstabe	Beschreibt die negative Elektrode: I: Li-Ionen L: Lithium metallisch oder Li-Legierung
2. Buchstabe	Beschreibt die positive Elektrode C: Auf Kobalt-Basis N: Auf Nickel-Basis M: Auf Mangan-Basis V: Auf Vanadium Basis
3. Buchstabe	Beschreibt die Form: R: Rund P: Prismatisch
<i>Größenangabe für runde Zellen</i>	
4.+5. Stelle	Durchmesser in mm
6.-8. Stelle	Höhe in 1/10 mm
Beispiel ICR 18650	Runde Li-Ionen Zelle mit Kobaltbasierter pos. Elektrode. Durchmesser ca. 18 mm, Höhe: 65 mm
<i>Größenangabe für prismatische Zellen</i>	
4. + 5. Stelle	Breite in mm
6. + 7. Stelle	Dicke in mm
8. + 9. Stelle	Höhe in mm
Beispiel ICP 340848	Prismatische Li-Ionen Zelle mit Kobaltbasierter pos. Elektrode. Breite 34 mm, Dicke 8mm, Höhe 48 mm
Anmerkung	Bei Größen von mehr als 100 mm werden die Zahlengruppen durch einen Schrägstrich getrennt und die Ziffernzahl entsprechend vergrößert. Bei dünnen prismatischen Zellen kann einer Zifferngruppe ein T vorangestellt werden. Die Angabe erfolgt dann in 1/10 mm.

Tabelle 1.3: Bauformen von verschiedenen Lithium-Batterien [20]

Motivation und Einführung

Die meisten Lithium-Akkumulatoren werden in runder Form (Zylinderform) oder in eckiger Form (Rechteckform) mit verschiedenen Dicken, Längen bzw. Breiten hergestellt.

Die einzige Ausnahme sind die Lithium-Polymer-Akkumulatoren, deren innerer Aufbau aus Folien mit Aluminiumbeschichtung besteht und somit sehr flexibel in ihrer Bauform sind.

Sie werden wegen der günstigeren Herstellungskosten oft nur in die verwendeten Folien eingeschweißt und werden deswegen auch als Coffee Bag bezeichnet (siehe Abbildung 1.16).

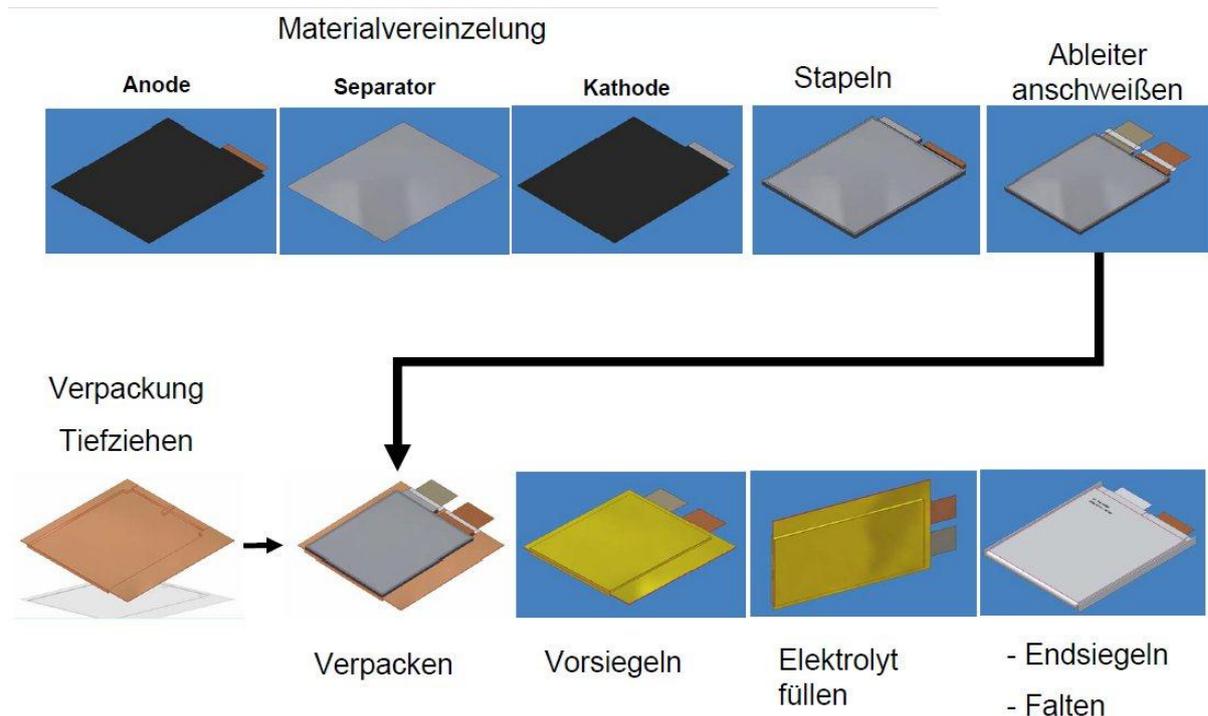


Abbildung 1.16: Aufbau eines Lithium-Polymer-Akkumulators (Coffee Bag) [21]

In Abbildung 1.17 ist ein Beispiel von einem Lithium-Polymer-Akkumulator zu sehen, der in Folie eingeschweißt wurde. Durch diese dünnen Folien können auch sehr dünne Akkumulatoren in allen möglichen Formen gefertigt werden.



Abbildung 1.17: Beispiel für einen Lithium-Polymer-Akkumulator [22]



Abbildung 1.18: Bauformen von verschiedenen Lithium-Akkumulatoren [23], [24]

In der folgenden Darstellung (Abbildung 1.19) ist eine Übersicht der verschiedenen auf dem Markt erhältlichen Akkumulatoren, mit den dazu gehörenden Bauformen und deren Abhängigkeit zu der Energie- und Leistungsdichte, zu sehen.

Erkennbar ist, dass die Energiedichte und die spezifische Energie für zylindrische Bauformen höher liegen als für andere Ausführungen.

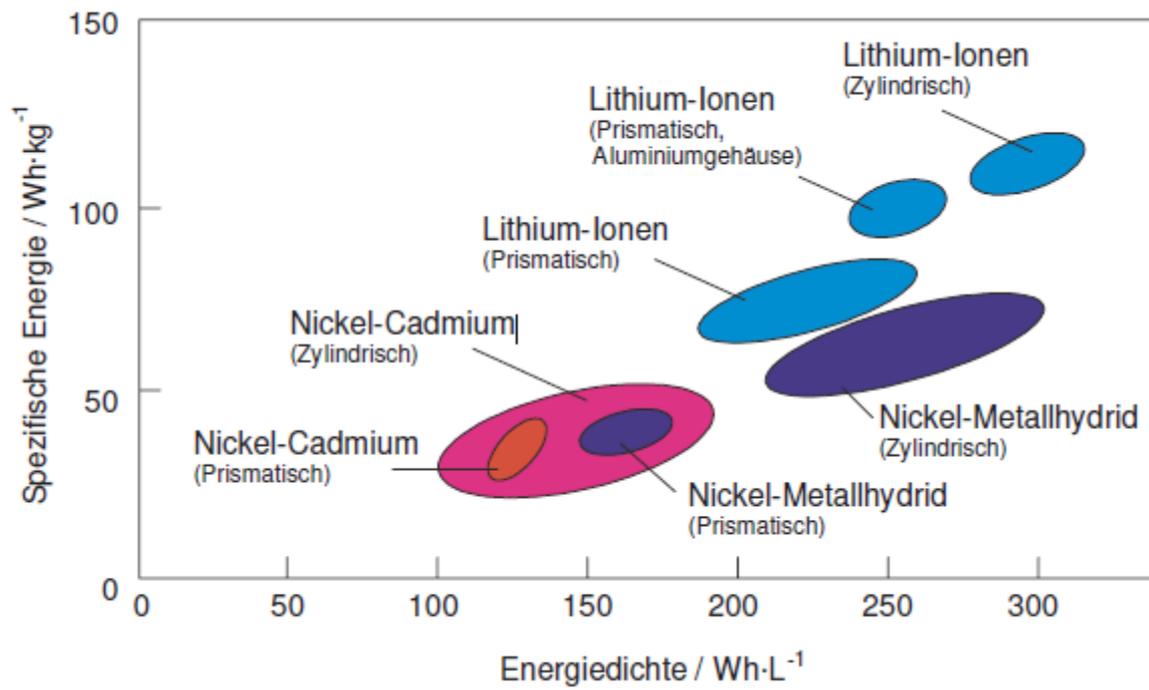


Abbildung 1.19: Abhängigkeit der Energiedichte und Leistungsdichte von der Bauform [28]

2 Analyse

In der Analyse soll festgestellt werden, was alles für den Bau einer Starterbatterie benötigt wird und in welchen Größenordnungen die elektronischen Bauteile und Komponenten dimensioniert werden müssen. Es soll ermittelt werden, welche Ströme und welche Erwärmung der Bauteile zu erwarten ist. Die Größe des Gehäuses soll möglichst in den gleichen Dimensionen wie eine normale Bleistarterbatterie sein, damit die Starterbatterie auf Lithiumbasis direkt ausgetauscht werden kann und im Fahrzeug Platz findet.

2.1 Auswahl der Akkumulatoren für die Starterbatterie

Für die Starterbatterie wurden Lithium-Eisen-Phosphat-Akkumulatoren gewählt, da diese Modelle nicht zum Thermal Runaway neigen wie die meisten anderen Typen aus Lithium. Sie können einen sehr hohen Strom für den Startvorgang liefern, außerdem liegt die Spannung von vier in Reihe geschalteten Zellen näher an der Betriebsspannung der Fahrzeuge als die der meisten anderen Akkumulatoren.

Die Zellen aus Lithium-Eisen-Phosphat haben alle eine höhere Zyklenfestigkeit und eine längere Lebensdauer als Akkumulatoren aus anderen Stoffen.

Die zylindrische Bauform wurde gewählt, weil sie die größte spezifische Energie und Energiedichte aufweist.

Es standen folgende Zellen zur Auswahl:

	A123 XCell Nanophosphate 2300	BAK International Limited 26650HP- Fe	LINANO 16 Ah 3,2V 10C Headway 40160SE
Nennspannung [V]	3,3	3,2	3,2
Amperestunden [Ah]	2,3	2,3	16
Max. Peak Entladestrom [A]	70 (30C)	70	160 (10C)
Dauer Entladestrom [A]	Keine Angaben	23 (10C)	80 (5C)
Max. Ladestrom [A]	10	11,5 (5C)	64 (4C)

Es wurden große Zellen mit 16Ah ausgewählt, da bei kleineren Zellen der Verdrahtungsaufwand höher gewesen wäre und mehr Safety Units benötigt worden wären. Außerdem sollte die Starterbatterie in ihren Abmessungen nicht größer werden als eine vergleichbare Bleibatterie, deswegen wurden keine größeren Zellen als 16Ah in die Auswahl einbezogen. Den gewählten Zellen kann kurzzeitig ein sehr hoher Strom entnommen werden, bis zu 10C also 160A pro Zelle. Bei einer Parallelschaltung der Zellen erhöht man die Kapazität auf das Doppelte und auch der Strom erhöht sich auf den doppelten Wert.

2.2 Konzept der Lithiumzellen-Verschaltung

Um die weiteren Komponenten der Starterbatterie auswählen zu können, muss zuerst die Verschaltung der beiden Stränge und deren Ladeschaltung festgelegt werden. In dem ersten Entwurf (siehe Abbildung 2.1) werden die 2 Lithiumzellen parallel geschaltet und dann in einer Reihenschaltung miteinander verbunden. Das hat den Vorteil der Kostenersparnis da dies sehr einfach zu realisieren ist und keine zusätzlichen Bauteile benötigt werden. Der Nachteil ist, dass die Lithiumzellen unterschiedliche Innenwiderstände aufweisen können und somit auch unterschiedlich stark geladen werden, dies wird aber sehr schnell wieder ausgeglichen durch Querströme, in dem die stärker geladene Zelle die schwächer geladene Zelle auflädt. Dadurch erwärmen sich die Zellen leicht und sie altern etwas schneller, weil diese Zellen sich etwas häufiger und stärker entladen als die Zellen mit dem höheren Innenwiderstand.

In dem zweiten Entwurf (siehe Abbildung 2.1) wird das Umladen der einzelnen Lithiumzellen durch Dioden vor den Zellen verhindert auch das Laden der Stränge gegenseitig wird so unterbunden. Der Nachteil ist, dass in dieser Verschaltung die parallel liegenden Zellen mit geringerem Innenwiderstand beim Entladen stärker belastet werden als die Zellen mit einem höheren Innenwiderstand. Beim Laden ist es so, dass diese Zellen mit dem niedrigeren Innenwiderstand auch höher aufgeladen werden und somit auch wiederum einer höheren Belastung ausgesetzt sind. In diesem Schaltungskonzept können nur mindestens zwei Zellen gleichzeitig geladen werden. Außerdem verliert man bei jeder Zelle ca. 0,7V Zellenspannung durch die in Reihe geschaltete Diode und die Verlustleistung steigt parallel zu dem Entladestrom.

Das bedeutet also $3,2V - 0,7V = 2,5V$ pro parallel geschalteter Zelle und $4 * 0,7V = 2,8V$ Spannungsfall über den Dioden so folgt bei 400A: $400A * 2,8V = 1120W$ als kurzzeitige Verlustleistung beim Startvorgang.

Das sind hohe Verluste im Gegensatz zum dritten Entwurf (siehe Abbildung 2.1), der in Bezug zu den beiden vorangegangenen Entwürfen keine Ausgleichsströme aufweist, weder zwischen den Zellen noch zwischen den Strängen.

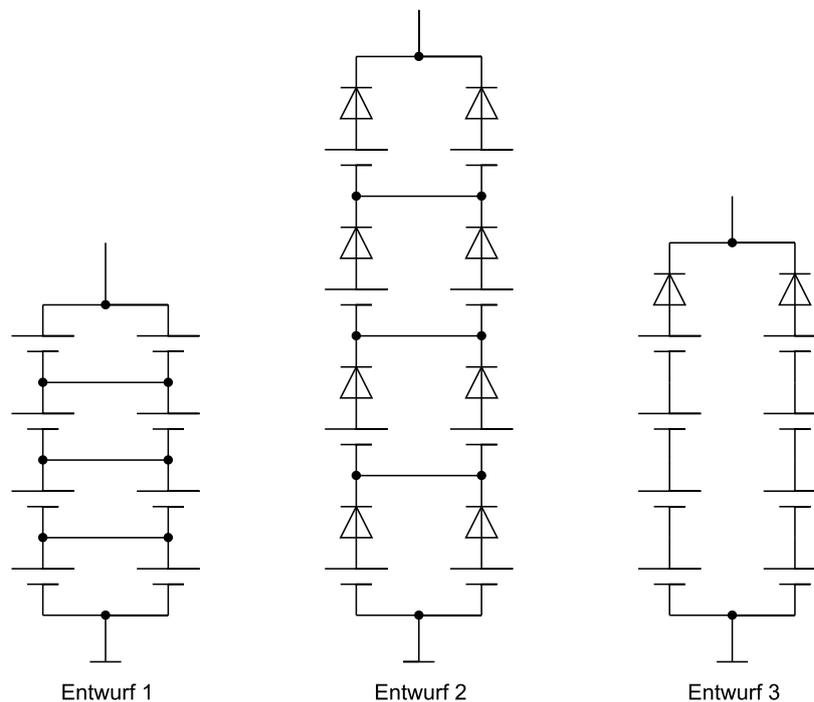


Abbildung 2.1: Verschaltungskonzepte der einzelnen Zellen

Für das Aufladen der Lithiumzellen standen zwei Konzepte zur Auswahl. Das erste Konzept sah vor, die einzelnen Zellen über jeweils einen DC/DC-Wandler für jede Zelle, also 8 DC/DC-Wandler für die gesamte Starterbatterie zu laden (siehe Abbildung 2.2).

Die Stränge müssten gegeneinander entkoppelt werden um Querströme zu vermeiden und auch die Zellen untereinander dürften sich im Ladezustand nicht gegenseitig beeinflussen. Die DC/DC-Wandler, in diesem Fall Schaltregler von der Firma Traco, sollten den passenden Spannungsbereich besitzen und einen hohen Strom liefern, hierbei gilt es zu beachten das 4C also 64A Ladestrom pro Zelle nicht überschritten wird. Dieser Wert ist allerdings so hoch das es keine DC/DC-Wandler in Serienproduktion für diese hohen Ströme bei einer Spannung $\leq 5V$ zu kaufen gibt, außerdem wäre die Belastung von dem Bordnetz des Fahrzeugs extrem hoch, da im Lademoment für jede Zelle 64A benötigt würde. Somit würde die Gesamtbelastung des Generators im Lademoment der Zelle 512A ($8 \cdot 64A$) betragen. Dieser ist in der Regel aber nur für ca. 100A ausgelegt (800W bis 1000W bei einer Spannung von 13,8V für einen kleinen typischen Fahrzeuggenerator)³.

Deswegen wurde das Serienmodell TEN 25-1211 mit 9V bis 18V Eingangsspannung und einer Ausgangsspannung von $5V \pm 10\%$ (einstellbar mit externem Widerstand) bei einem

³ Standard-Fahrzeuggeneratoren kleiner Fahrzeuge besitzen eine Leistung von ca. 800W bis 1000W, im Oberklassensegment werden Fahrzeuggeneratoren bis zu einer Leistung von 3000W eingesetzt.

Ausgangsstrom von 5A ausgewählt. Der Gesamteingangsstrom würde somit ca. 20A betragen und ist somit für den typischen Fahrzeuggenerator kein Problem.

Dadurch könnten die Zellen alle zu 100% aufgeladen werden, unabhängig von den jeweiligen Kapazitäten der einzelnen Lithiumzellen. Allerdings hätte man dann alle einzelnen Zellen separat durch Safety Units überwachen lassen müssen, die die jeweiligen DC/DC-Wandler im Moment der vollständigen Aufladung weggeschaltet hätten. Das bedeutet hoher Bauteilaufwand, viel Verdrahtung und somit auch sehr hohe Kosten für die Starterbatterie.

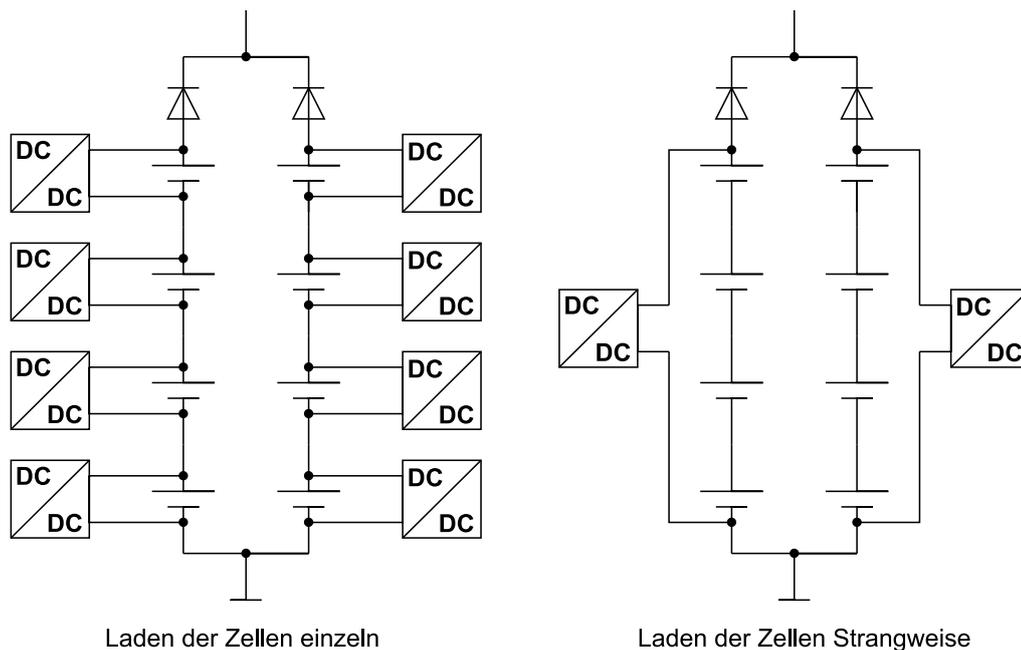


Abbildung 2.2: Ladekonzepte der Zellen für den Entwurf 3

Das zweite Konzept besteht darin, einen ganzen Strang mit einem DC/DC-Wandler zu laden (siehe Abbildung 2.2) und somit DC/DC-Wandler bzw. Safety Units einzusparen, allerdings gibt es nur DC/DC-Wandler bei einer Ausgangsspannung von 15V und einem Strom von maximal 10A. Das hat zur Folge, dass die eigentlich möglichen sehr hohen Ladeströme 128A ($2 \cdot 64A$) und somit auch die kurzen Ladezeiten nicht erreicht werden können. Generatoren von kleinen Fahrzeugen könnten auch diese 128A hohen Ströme zum schnellen Laden der Starterbatterie nicht liefern.

Bei den beiden ersten Entwürfen der Verschaltungskonzepte werden die Zellen beim Entladen mit dem geringsten Innenwiderstand, am stärksten belastet. Das dritte

Verschaltungskonzept hat keine Verbindungen zwischen den einzelnen Zellen, nur zwischen den entkoppelten Strängen. Dadurch fließen keine Querströme zwischen den Zellen und Strängen.

Ausgewählt wurde für die Realisierung der Starterbatterie der Entwurf 3 und das Strangweise laden.

2.3 Abschnitt Komponententest

Um die geforderten Ziele dieser Diplomarbeit zu realisieren, werden zunächst einzelne elektronische Komponenten der zukünftigen Starterbatterie getestet und deren Verhalten und Eigenschaften überprüft. Besonders die hohen Ströme im Einschaltmoment des Fahrzeugs sind eine Herausforderung an die jeweiligen Bauteile und strapazieren die Elektronik sehr stark, dieses muss bei der Auswahl der Bauteile berücksichtigt werden.

An die Starterbatterie werden hohe Anforderungen gestellt: Im normalen Betrieb bei laufendem Fahrzeug Lade-/Entlade-Betrieb zur Unterstützung der Bordspannung bei hohem Verbrauch, bei ausgeschaltetem Fahrzeug mit minimalem Verbrauch einiger elektronischen Komponenten und natürlich im Startmoment beim Anlassen des Fahrzeugs.

Beim Anlassen werden mehrere hundert Ampere von der Starterbatterie abgefordert, bei großen Dieselfahrzeugen sogar bis zu eintausend Ampere.

2.3.1 Temperaturverhalten und Spannungsabfall der Leistungsdiode ermitteln

Für die Leistungsdiode 80EPF02 423XA, die als erstes in den Entladezweigen der Stränge eingesetzt werden sollte, wurde das Temperaturverhalten und der Spannungsabfall über der Diode ermittelt. Hierfür wird ein kleiner Versuchsaufbau (siehe Abbildung 2.2) aufgebaut und mit dem Oszilloskop bzw. dem Temperatursensor verbunden.

In der Tabelle 2.1 sind die Ergebnisse der Messreihe mit der Diode zu sehen, die verschiedenen hohen Ströme mit den jeweiligen Temperaturen und den daraus berechneten Temperaturkoeffizient Kelvin pro Watt. Es wurden die Angaben aus dem Datenblatt überprüft und messtechnisch ermittelt.

Die Diode wurde nicht genommen aufgrund ihres zu geringen Spitzenstroms, der bei ca. 80A liegt. Die Diode sollte einen Spitzenstrom von mindestens 220A durchlassen ohne beschädigt zu werden.

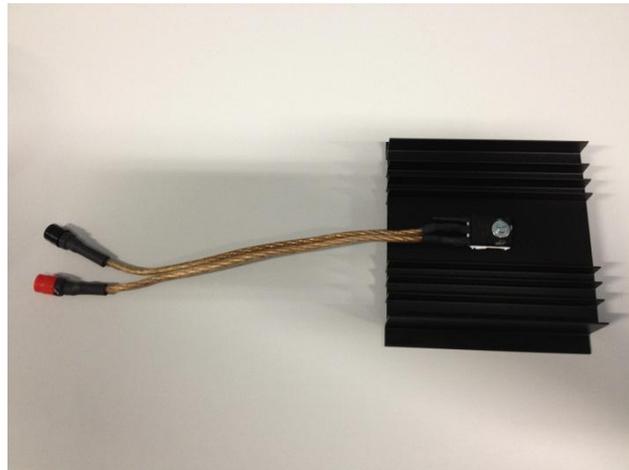


Abbildung 2.3: Diode 80EPF02 423XA mit Kühlkörper und Anschlussleitungen für den Versuchsaufbau

In der folgenden Abbildung 2.4 ist der Spannungsfall von 0,7V über der Diode zu sehen der bei einem Stromfluss von 10 Ampere auftritt.

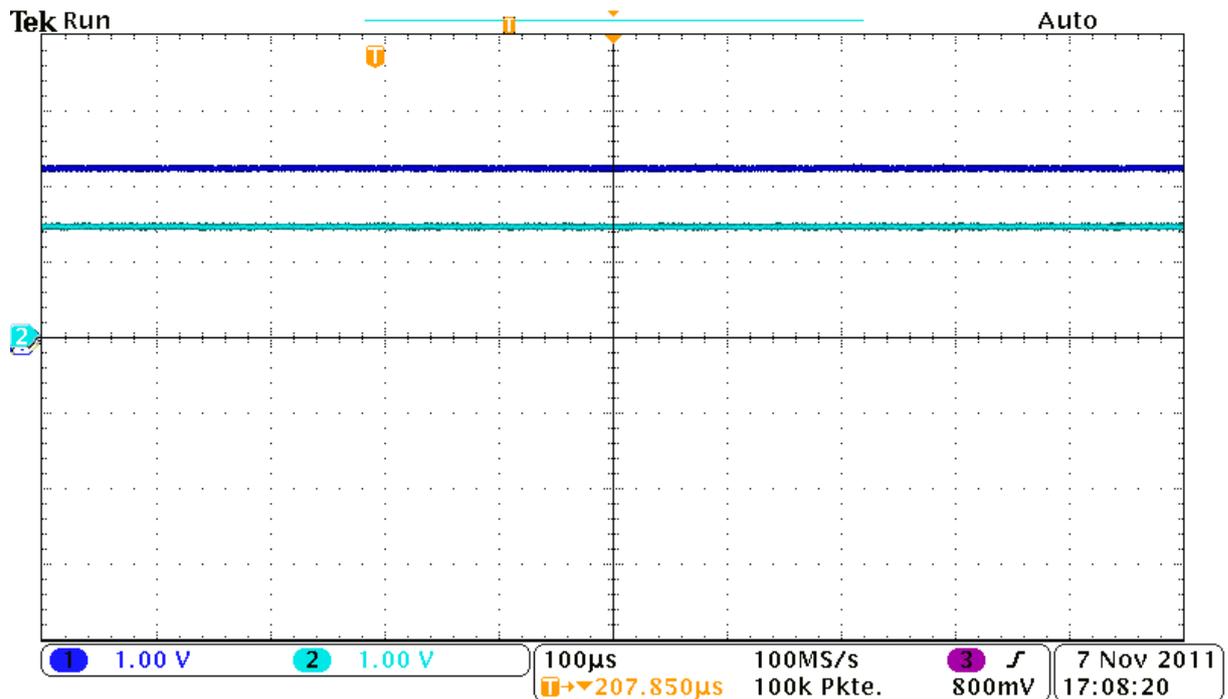


Abbildung 2.4: Spannungsabfall 0,7V über der Leistungsdiode 80EPF02 423XA bei einem Stromfluss von ca. 10A

U _F	I _F	Temperatur der Diode	Δ Temperatur	K / W
0,663	1	23	1	1,52
0,717	2	24	2	1,39
0,754	3	25	3	1,36
0,784	4	27	5	1,59
0,798	5	29	7	1,75
0,822	6	31	10	2,02
0,838	7	33	12	2,04
0,856	8	35	14	2,04
0,869	9	37	16	2,05
0,881	10	39	18	2,04

Tabelle 2.2.1: Temperaturverlauf der Diode 80EPF02 423XA bei verschiedenen Stromstärken

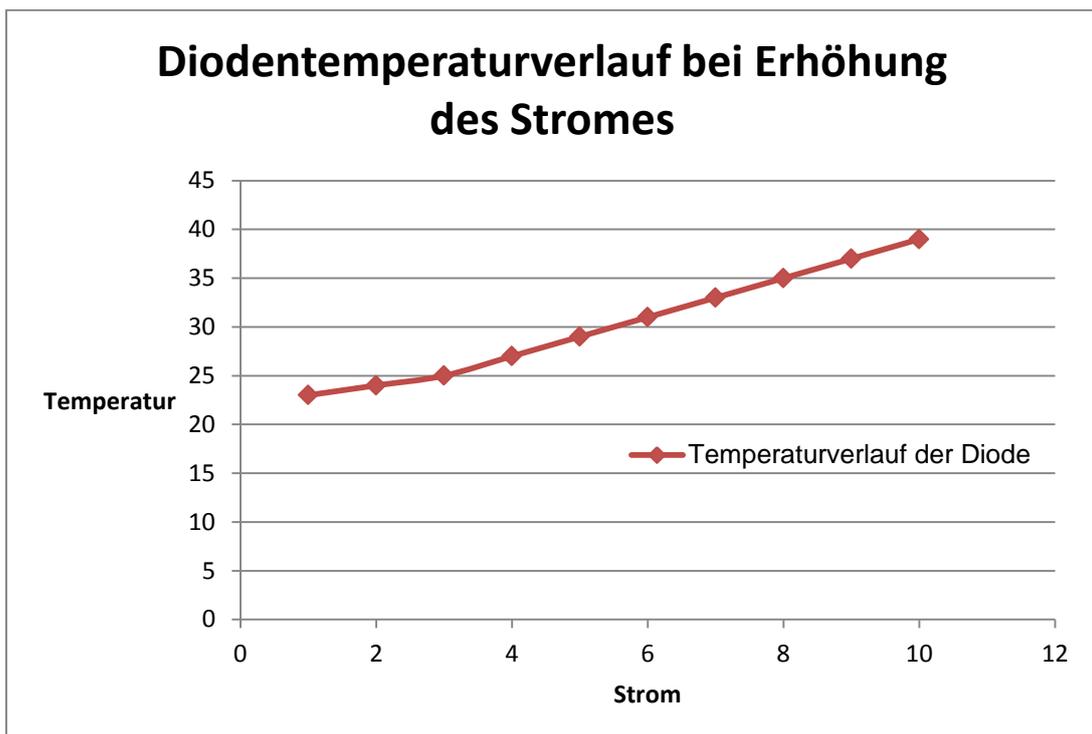


Abbildung 2.5: Diagramm zu dem Temperaturverlauf der Diode 80EPF02 423XA bei verschiedenen Stromstärken

2.3.2 Verhalten des DC/DC-Wandlers

Um das Verhalten des Schaltreglers zu testen, wurde eine Platine angefertigt (siehe Abbildung 2.6) und ein Versuchsaufbau (siehe Abbildung 2.5) im Labor erstellt.

Der Schaltregler wurde ausgangsseitig durch einen veränderbaren Heizwiderstand belastet und der Ausgangstrom so lange erhöht, bis der DC/DC-Wandler abschaltet (siehe Tabelle 2.2).

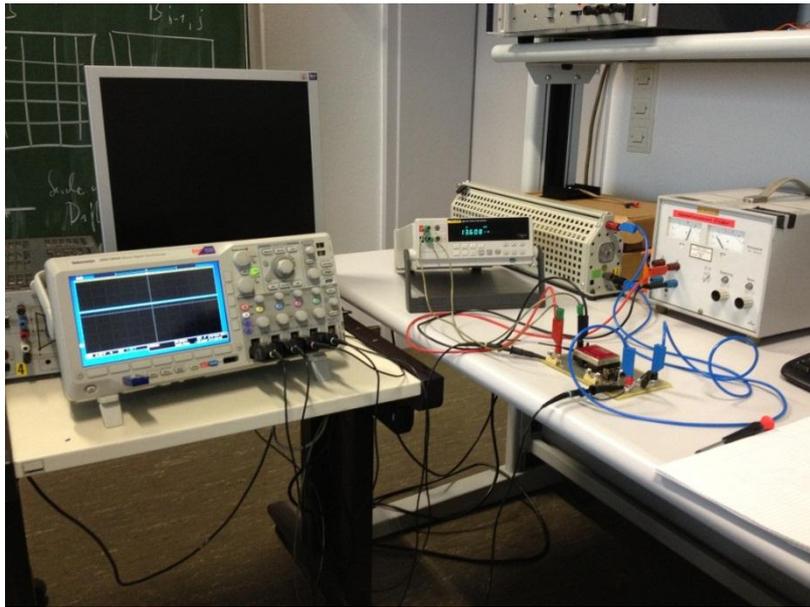


Abbildung 2.6: Versuchsaufbau für den kleinen Schaltregler mit Messgeräten

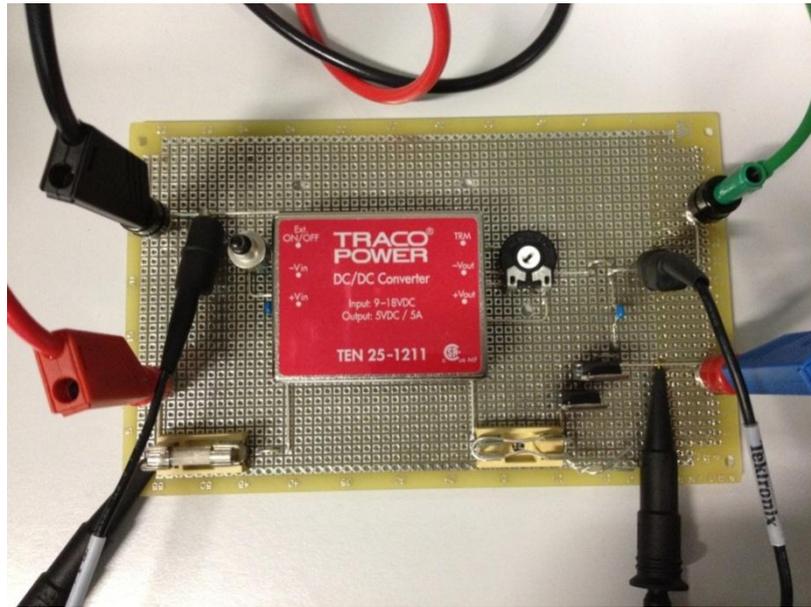


Abbildung 2.7: Platine des kleinen DC/DC-Wandler mit Anschlüssen für den Versuchsaufbau

Diese Modelle sind permanent kurzschlussfest und reduzieren bei Überlast die Ausgangsspannung, das Abschalten erfolgt temperaturbedingt bei 105°C. Nach dem Abkühlen des Schaltreglers schaltet sich der DC/DC-Wandler selbsttätig wieder ein.

Die Welligkeit der Ausgangsspannung bleibt auch bei einem höheren Strom als angegeben sehr niedrig, allerdings bricht die Spannung ein.

Eingangssp.	Eingangsstrom	Ausgangssp. max.	Ausgangsstrom	Temperatur
14V	1,4A	4,4V	3,2A	36°C
14V	1,8A	4,4V	4A	41°C
14V	2,3A	4,4V	5A	57°C
14V	2,8A	4,4V	6A	69°C
14V	2,7A	3,8V	6,5A	81°C
14V	2,6A	3,1V	7A	91°C
14V	2,4A	2,5V	7,5A	97°C
14V	2,4A	2,1V	8A	105°C

Tabelle 2.2: Temperatur, Spannung und Stromverlauf des kleinen Schaltreglers bei verschiedenen Belastungen

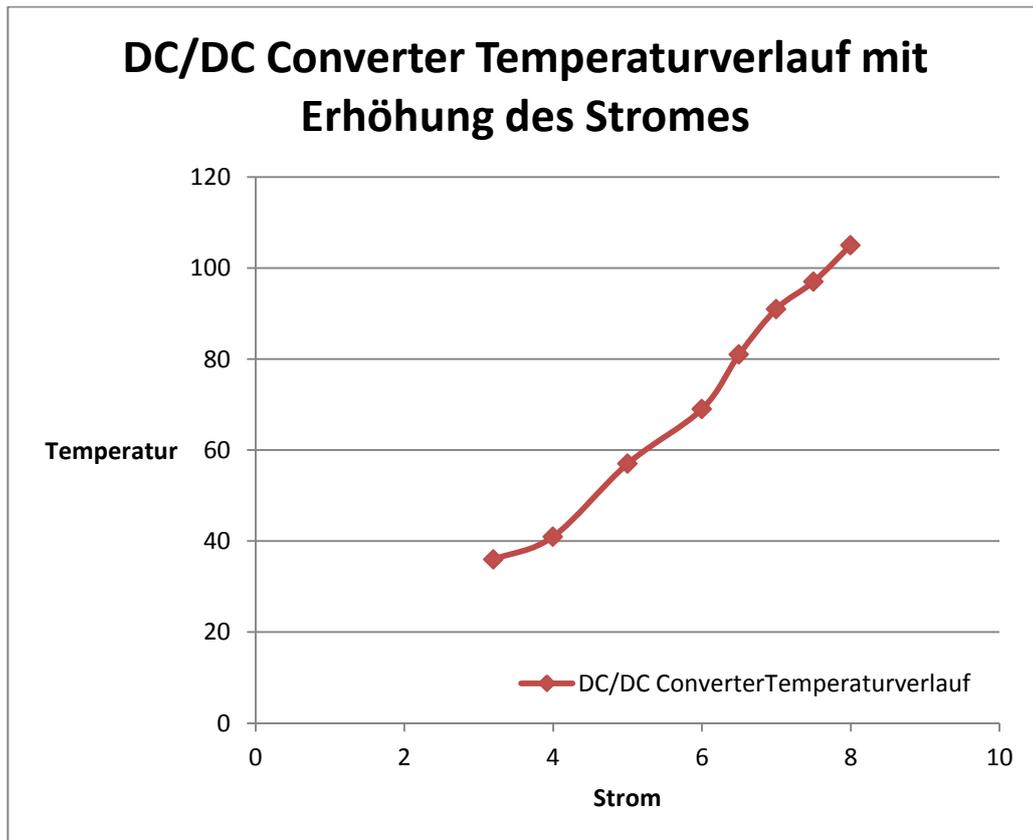


Abbildung 2.8: Temperaturverlauf des Schaltreglers bei einer Erhöhung des Stromes

Die zellenweise Ladung der Zellen kann also mit dem kleinen Schaltregler TEN 25-1211 realisiert werden, allerdings sind der Bauteil Aufwand und damit auch die Fehleranfälligkeit hoch.

Der Kostenfaktor ist ebenfalls nicht zu vernachlässigen und ist deutlich höher als bei einem größeren Schaltregler (mit höherer Spannung) der einen ganzen Strang laden könnte.

Auf dieses Schaltungskonzept mit einem größeren Schaltregler wurde auch bei der Realisierung zurückgegriffen und der Schaltungsaufbau mit 8 kleinen Schaltreglers wurde zunächst zurück gestellt und soll vielleicht in einer der nächsten Modellentwürfe verwendet werden.

2.4 Schaltplan für das Laden der Lithiumzellen

Da, wie vorher erklärt, für das Aufladen der Zellen ein großer Schaltregler pro Strang eingesetzt werden soll, der 4 Zellen gleichzeitig laden kann, musste noch ein Schaltplan erstellt werden.

Die vielversprechendsten beiden Schaltpläne sind in Abbildung 2.9 und 2.10 zu sehen, in beiden Schaltplänen wird ein Schaltregler TEP 150-2413WI mit einer Eingangsspannung von 9V bis 36V und einer Ausgangsspannung von 15V +20% bei einem Ausgangstrom von 10A eingesetzt. Es wird pro Strang ebenfalls nur eine Safety Unit benötigt, die die 4 Zellen im Strang gleichzeitig überwachen kann. Dadurch werden drei Safety Units pro Strang eingespart, was die Kosten noch einmal reduziert.

Aus Sicherheitsgründen wurden Sicherungen in den Ladezweigen der Starterbatterie vor die Schaltregler eingesetzt und auch in den Entladezweigen wurden 150A Sicherungen eingeplant, die bei länger andauernden hohen Strömen (Kurzschluss) den Strang abschalten.

Die Diode direkt hinter dem DC/DC-Wandler sorgt zum einem dafür, dass die Spannung zum Laden der Lithiumzellen etwas geringer wird und dadurch etwas näher an der geeigneten Ladespannung liegt und zum anderen, dass der Schaltregler nicht rückwärts einspeist und so zum Verbraucher wird.

Die andere Diode liegt im Lastteil und muss einen bedeutend höheren Strom vor allem kurzzeitig aushalten, denn der Strom beim Startvorgang eines Fahrzeugs kann bis zu 1000A bei Dieselmotoren betragen. Bei Benzinmotoren ist der Strom geringer in etwa 400A bei 20°C bei einer Dreiliter-Maschine in einem Zeitraum von etwa einer Sekunde (siehe Abbildung 3.18). Diese Diode entkoppelt die beiden Stränge und reduziert die Spannung eines Stranges um 0,7V von $4 \cdot 3,2V = 12,8V$ auf 12,1V. Dadurch ist die Starterbatteriespannung im selben Bereich, wie es heute in Fahrzeugen mit Bleibatterie der Fall ist, die Lithium-Starterbatterie ist somit spannungskompatibel und kann alternativ zum Starten eingesetzt werden. Auch die Versorgung der Fahrzeugelektronik sollte funktionieren.

In Abbildung 2.9 wird die Starterbatterie zusammen mit der vorhandenen Bleibatterie des Fahrzeugs eingesetzt, um die verbaute Elektronik bzw. die Schaltgeräte konstant mit Spannung zu versorgen, da nicht sicher voraus gesagt werden kann, ob die Starterbatterie mit Lithium im Startmoment genügend Versorgungsenergie bereitstellt.

In der Abbildung 2.10 wird die Schaltung ohne eine zusätzliche Stützbatterie aufgebaut und die Versorgung der Fahrzeugelektrik wird über eine zusätzliche Diode rückwärts eingespeist. Dies hätte den Vorteil der Gewichtsersparnis gegenüber einer zusätzlichen Stützbatterie, allerdings würden die Lithiumzellen sich selber permanent über den Schaltregler aufladen und so die gespeicherte Energie selbst verbrauchen.

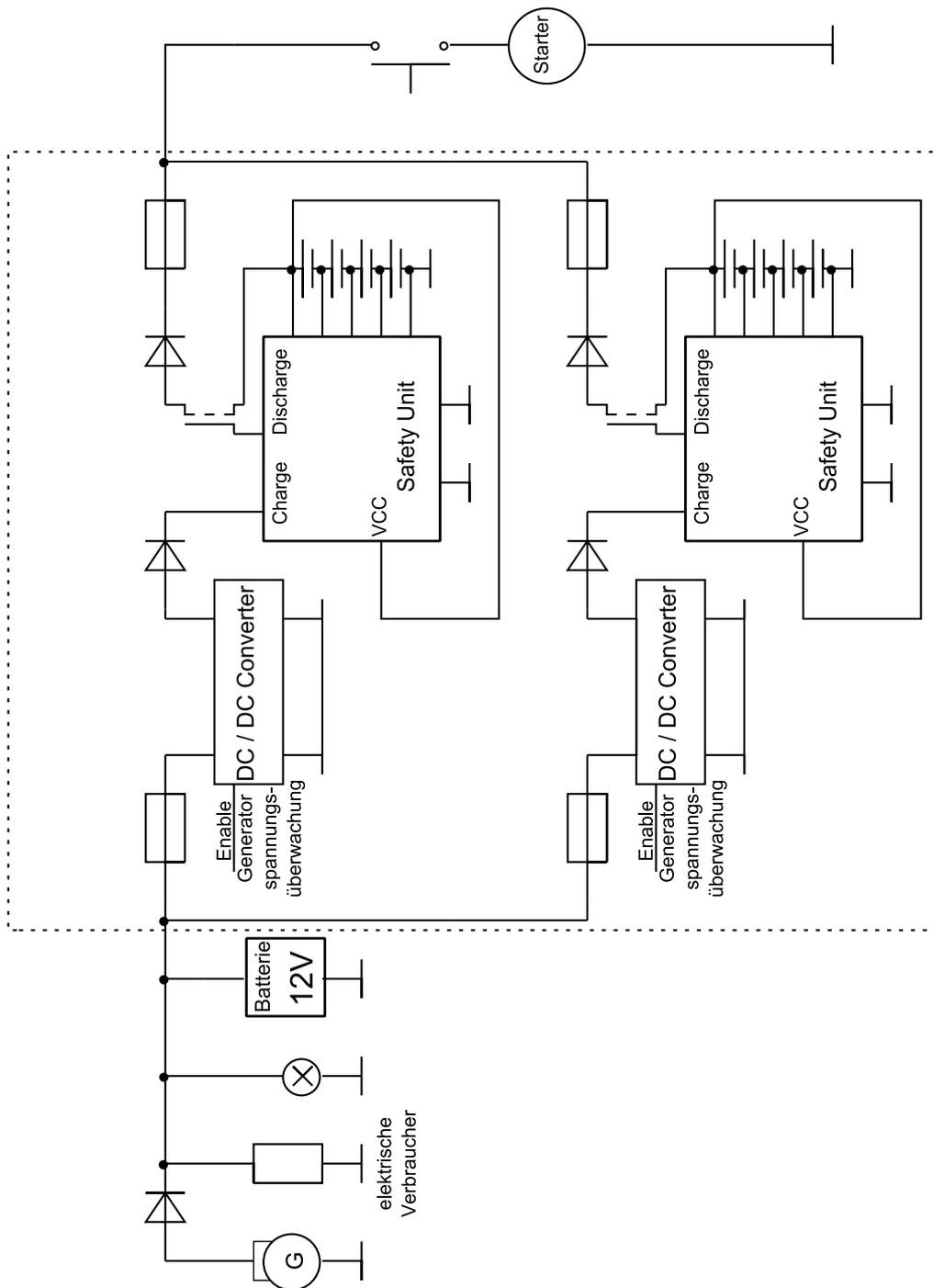


Abbildung 2.9: Schaltplan für den Aufbau der Starterbatterie mit Fahrzeug Peripherie und Fahrzeugelektrik. Eine zweite Stützbatterie für die Versorgung der Fahrzeugelektronik wurde im Fahrzeug belassen. Der Bereich innerhalb der gestrichelten Linie entspricht der Starterbatterie.

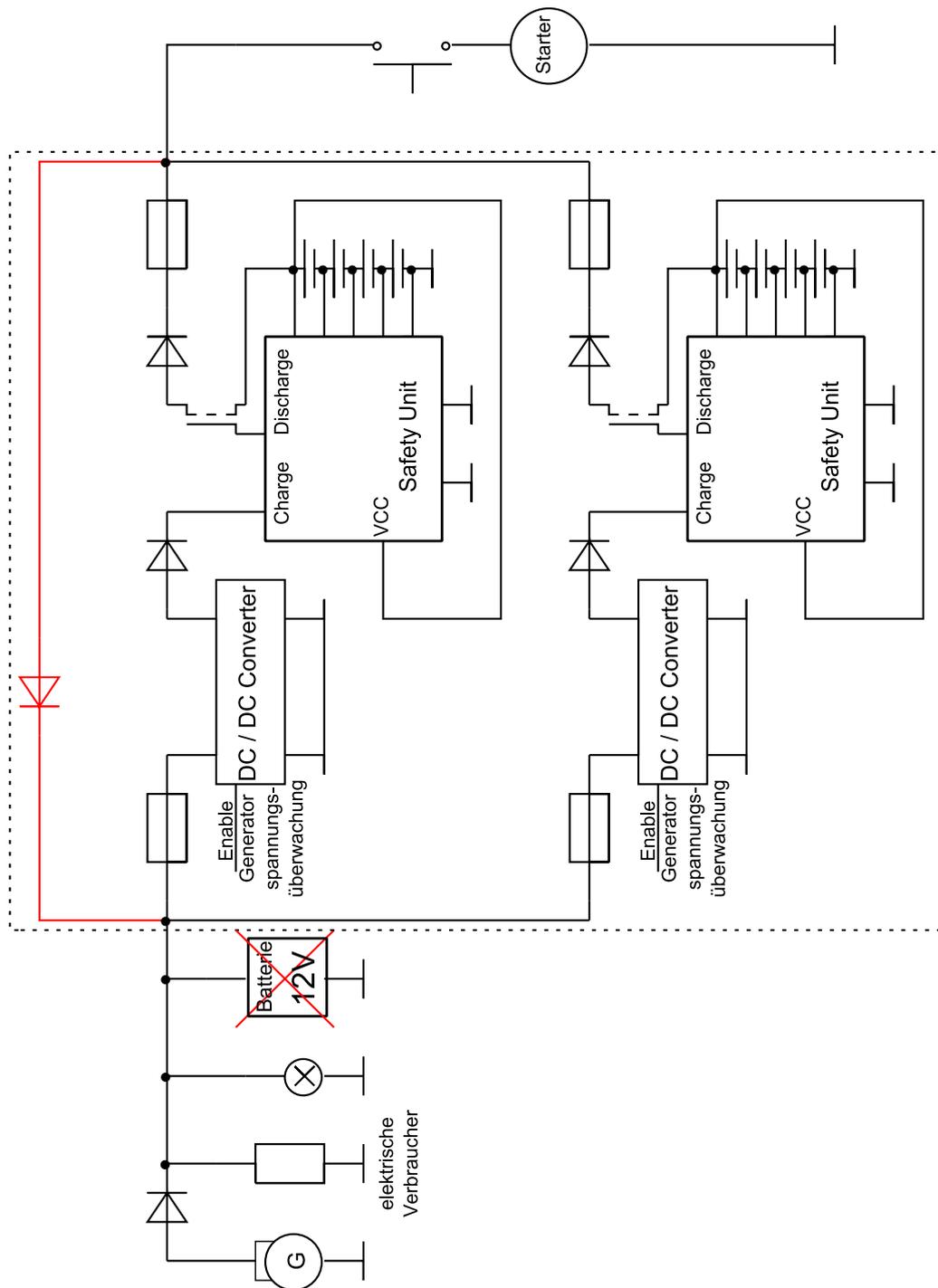


Abbildung 2.10: Schaltplan für den Aufbau der Starterbatterie mit Fahrzeug Peripherie und Fahrzeugelektrik. Ohne zweite Stützbatterie sondern mit einer Diode die die Versorgung der Fahrzeugelektronik übernimmt. Der Bereich innerhalb der gestrichelten Linie entspricht der Starterbatterie.

Um dies zu verhindern muss der Schaltregler schaltbar sein. Wie schon in der Abbildung 2.10 angedeutet, müsste man hierfür den Enableeingang⁴ durch eine Fahrzeuggeneratorüberwachung kontrollieren, so dass die Lithiumstarterbatterie sich nicht bei stillstehendem Motor über dem Schaltregler entladen kann.

In Abbildung 2.11 ist der gewählte Schaltplan zu sehen, der zusätzlich zu der Stützbatterie noch manuell schaltbare Enableeingänge⁵, einen Hauptschalter für das Entladen und einen Ladehauptschalter besitzt. So ist für die durchzuführenden Versuche ein strangweises Laden möglich, was die Menge der möglichen Optionen der Starterbatterie erhöht. Die Starterbatterie lässt sich durch Deaktivieren einer Sicherung zu einer kleineren, nur noch mit der Hälfte der Kapazität arbeitenden Batterie umbauen, die Starterbatterie wird dann nur noch mit einem Strang betrieben und kann so an kleineren Fahrzeugen getestet werden.

⁴ Enableeingang ist ein Eingang am Linearregler mit dem der DC / DC-Wandler ein- und aus geschaltet werden kann.

⁵ Anschluss an die Generatorüberwachung des Fahrzeugs wäre sehr aufwendig gewesen und hätte keine weiteren Erkenntnisse geliefert.

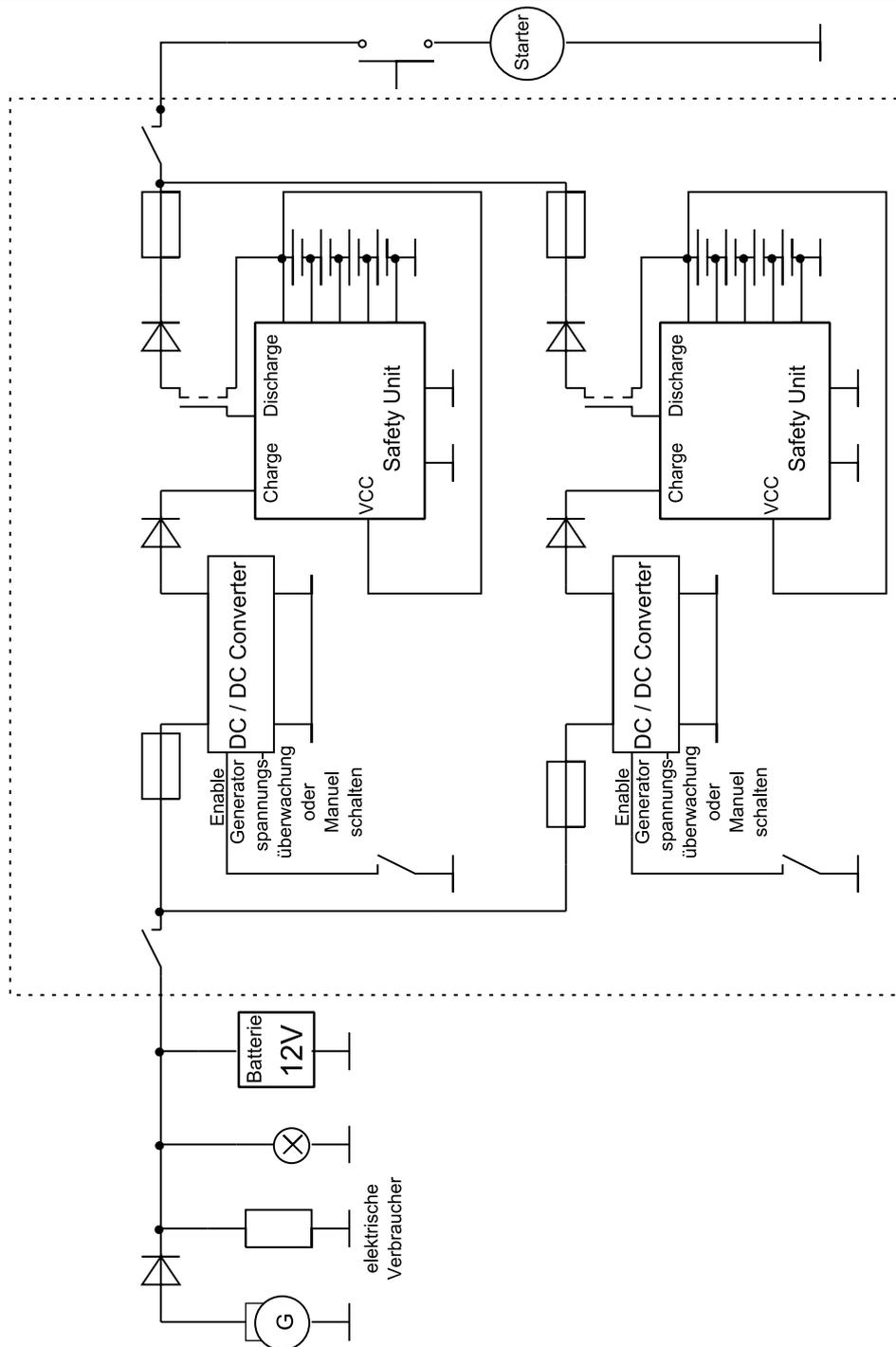


Abbildung 2.11: Schaltplan für den Aufbau der Starterbatterie mit Fahrzeug Peripherie und Fahrzeugelektrik. Mit zweiter Stützbatterie für die Versorgung der Fahrzeugelektronik und einem Hauptschalter für das Entladen. Der Ladekreis hat ebenfalls einen Hauptschalter und kann durch Schalter an den Enableeingängen pro Strang geschaltet werden.

2.5 Auswahl und Dimensionierung der Bauteile

Um den Schaltplan entwerfen zu können, mussten vorher noch die passenden Bauteile ermittelt werden, die den hohen Entladestrom im Startmoment und den Dauerbetrieb ohne Probleme überstehen. Auch thermische Probleme der Bauteile und der Zellen, die sich im Lade- und im Entlademoment erwärmen, mussten berücksichtigt werden. Die Leitungsquerschnitte mussten den Strömen angepasst werden und für die Messabgriffe wurden noch die richtigen BNC-Buchsen benötigt.

Als erstes wurden die Zellen bestimmt (siehe 2.1), als nächstes wurde die richtige Safety Unit bestimmt, hierfür standen auch mehrere zur Auswahl (siehe Tabelle 2.3). Viele der erhältlichen Safety Units sind nicht für Lithium-Eisen-Phosphat-Zellen geeignet, weil der Spannungsbereich nicht kompatibel ist. Die meisten auf dem Markt erhältlichen Safety Units sind für Lithiumzellen mit einer Zellenspannung von 3,6V bis 3,7V ausgelegt und nicht für die Lithium-Eisen-Phosphat-Modelle mit 3,2V bis 3,3V. In die nähere Auswahl kamen nur die Safety Units, die auch mindestens 4 Zellen gleichzeitig überwachen konnten und eine Spannungsüberwachung integriert haben. Nach Safety Units mit den beschriebenen Lade und Entladeströmen wurde nach kurzer Zeit nicht mehr gesucht, da die auf dem Markt erhältlichen Safety Unit oder BMS (Battery Management System) nicht für diese hohen Ströme ausgelegt sind, sondern nur für kleine Anwendungen wie z.B. Handy oder Laptop. Es musste also eine fertige Safety Unit mit Evaluation Board⁶ umgebaut oder eine neue konzipiert werden. Die Entscheidung fiel aus Zeitgründen auf den Umbau einer fertigen Safety Unit. Ausgewählt wurde zuerst eine Safety Unit von Linear, die LTC 6802-1 mit einer Überwachung bis zu 12 Zellen, Über- bzw. Unterspannung und Balancierung (siehe Anhang). Die Safety Unit kann keine Temperaturen überwachen, kein Strom messen und besitzt keine eigene Elektronik zum Abschalten der Zellen.

Als nächstes wurde eine Safety Unit von Texas Instruments ausgewählt, die BQ 76 PL 536, mit einer Überwachung bis zu 6 Zellen, 2 Temperaturen, Über- bzw. Unterspannung, einem SPI-Bus um die Warnsignale auszugeben und ist mit bis zu 32 Bauteilen erweiterbar (siehe Anhang). Dazu sollte ein Laderegler die Aufladung regeln, der BQ 24630 ebenfalls von Texas Instruments wurde als erste Option gewählt, allerdings besitzt die Safety Unit BQ 76 PL 536 keine Stromüberwachung und hat keine eigene Elektronik um die Zellen abzuschalten. Die Alternative war das Evaluations-Board mit der Safety Unit BQ 77910 EVM, mit einer Überwachung bis zu 10 Zellen, Temperaturmessung, Über- bzw. Unterspannung, Stromüberwachung und eigener Elektronik um die Zellen abzuschalten. Dieses Evaluations-Board hat bereits externe MOSFETs, die zwar nicht für so hohe Ströme ausgelegt sind, aber diese können leicht von der Platine demontiert und durch größere ersetzt werden. Die Safety Unit besitzt keinen SPI oder I2C-Bus, kann aber über ein Programm von Texas Instruments und

Analyse

einen USB-Adapter Warnmeldungen auf den PC-Schirm ausgeben und auch programmiert werden.

	BQ 76 PL 536 Texas Instruments	LTC 6802-1 Linear	BQ 77910 Texas Instruments
Spannungsbereich von 3,2V für Eisen-Phosphat	Ja	Ja	Ja
Überwachung von min. 4 Zellen	Ja	Ja	Ja
Über- und Unterspannungsüberwachung	Ja	Ja	Ja
Temperaturüberwachung	Ja	Nein	Ja
Balancieren	Ja	Ja	Ja
Stromüberwachung	Nein	Nein	Ja
eigene Elektronik zur Abschaltung der Zellen	Nein	Nein	Ja

Tabelle 2.3: Vergleich der Safety Units

Durch die Veränderungen an der Platine musste auch der Shunt demontiert und ein passend berechneter neuer Shunt extern montiert werden.

Der Shunt muss passend für die Bereiche der Safety Unit ausgewählt werden die noch in Low und High unterteilt sind (siehe Tabelle 2.4), diese sind im Programm wählbar.

PARAMETER		RANGE (EEPROM Selected)	MIN	MAX	STEP
Overvoltage	Cell voltage		2.8 V	4.375 V	25 mV
	Delay		0.5 s	2.25 s	0.25 s
	Hysteresis		0 mV	300 mV	25 mV or 50 mV
Undervoltage	Cell voltage		1.4 V	2.9 V	100 mV
	Delay		500 ms	32 s	Binary spacing
	Hysteresis		400 mV	1600 mV	400 mV
Discharge overcurrent	SENSE(-) pin voltage with respect to SENSE(+)	Low	25 mV	100 mV	5 mV
		High	125 mV	500 mV	25 mV
	Delay		20 ms	300 ms	20 ms
			400 ms	2000 ms	100 ms
Discharge short circuit	SENSE(-) pin voltage with respect to SENSE(+)	Low	40 mV	190 mV	10 mV
		High	200 mV	950 mV	50 mV
	Delay	Fast	60 μs	960 μs	60 μs
		Slow	50 ms	1500 ms	50 ms or 100 ms
Charge short circuit	SENSE(-) pin voltage with respect to SENSE(+)	Low	-10 mV	-85 mV	5 mV
		High	-50 mV	-425 mV	25 mV
	Delay		60 μs	960 μs	60 μs

Tabelle 2.4: Zusammenfassung des erfassbaren Spannungsbereichs und der Ansprechzeiten der Safety Unit mit den einstellbaren Bereichen Low und High sowie Slow und Fast [33]

Die Anforderungen an den Shunt, an die Diode im Entladebereich und an den Entlade-MOSFET sind, die hohen Einschaltströme zu realisieren. Im Dauerbetrieb, wenn die Starterbatterie als Alternative zur Bleibatterie eingesetzt werden würde, müssten die Bauteile natürlich auch diese Belastung aushalten, die allerdings bei weitem nicht so hoch ist.

Nach langen Recherchen wurde die Bauform des Isotop-Gehäuses favorisiert und für alle Bauteile (Diode, Mosfet, Shunt) im Entladebereich eingesetzt. Diese Bauform bietet stabile große Kontakte und eine Zweipunktbefestigung des Gehäuses mit großer Kontaktfläche für den Kühlkörper.

Die Diode STPS16045TV hat einen Spannungsabfall von 0,69V, entsprechend einer Verlustleistung von 55,2W bei einem Strom von 80A. Der Startstrom tritt nur so kurzzeitig auf, so dass die Erwärmung des Kühlkörpers nicht relevant ist.

Der nachfolgende Abschnitt ist der Quelle [26] entnommen.

Berechnung der Kühlkörper:

$$R_{thK} = (a) \frac{T_i - T_U}{P_Q} - (b)(R_{thG} + R_{thM})$$

⁶ Evaluation-Board ist die Platine mit den elektronischen Bauteilen und den Anschlüssen für die Lithiumzellen.

verwendete Kenngrößen:

$$R_{th} = \text{Wärmewiderstand allgemein, Einheit: } 1 \frac{K(elvin)}{W(att)}$$

R_{thK} = Wärmewiderstand des Kühlkörpers

R_{thG} = Wärmewiderstand des zu kühlenden Bauteilgehäuses

R_{thM} = Wärmewiderstand der Verbindungsfläche (Wärmeleitpaste oder Wärmeleitkleber) zwischen Bauteil und Kühlkörper

T_i = Temperatur der Wärmequelle, ist beispielsweise bei Halbleiterbauelementen die maximale Temperatur der Sperrschicht

T_U = Temperatur des Kühlmediums

P_Q = abzuleitende Wärmeleistung des zu kühlenden Bauteils

Der Wärmewiderstand bildet die Grundlage für weiterführende Berechnungen zur Konstruktion des Kühlkörpers. Ausgehend davon können nun zusätzliche Faktoren (a), (b) mit einbezogen werden, zum Beispiel:

- Art und Eigenschaften des Kühlmediums (Gas oder Flüssigkeit)
- freie oder erzwungene Konvektion
- horizontale oder vertikale Einbaulage
- (dunkle) Farbe der Kühlkörperoberfläche
- rückwirkende Erwärmung durch möglicherweise
 - zwangsläufig bedingter Erhöhung der Umgebungstemperatur
 - reflektierte Wärmestrahlung

Bei freier Konvektion in geschlossenen Räumen müssen der Einbauort im Raum, die Einbaulage und die Bauform des Kühlkörpers mit berücksichtigt werden. Eine vertikale Einbaulage mit vertikal ausgerichteten Kühlrippen entspricht dem Optimum. Ist der Kühlkörper dagegen horizontal verbaut, spielt die Anordnung der Kühlrippen eine wesentliche Rolle. In dem Fall wird die Kühlleistung begünstigt, wenn die Kühlrippen senkrecht und nicht parallel zur Längsachse des Kühlkörpers angeordnet sind. [26]

Für die Berechnung wurde der Wert der Wärmeleitpaste nicht berücksichtigt, da dieser ca. $100 \mu K/W$ beträgt und deswegen vernachlässigbar klein ist.

Für die Diode bedeutet das einen thermischen Widerstand $R_{thK} = (150^\circ C - 20^\circ C) / 55,2 W - 1 K/W = 1,35 K/W$.

Analyse

Für den Shunt OHMITE - TGHGCR0020FE mit einem Widerstand von 0,002 Ohm beträgt der Spannungsabfall 0,16V bei einem Strom von 80A. Die Verlustleistung beträgt $0,16V \cdot 80A = 12,8W$ und der R_{thK} berechnet sich zu $(70^{\circ}C - 20^{\circ}C) / 12,8W = 0,56K/W = 3,35K/W$.

Für den MOSFET STE250NS10 N Kanal mit einem Widerstand von $R_{DS(on)} = 0,0055$ Ohm beträgt der Spannungsabfall 0,4V bei einem Strom von 80A. Die Verlustleistung beträgt $0,4V \cdot 80A = 32W$ und der R_{thK} berechnet sich zu $R_{thK} = (150^{\circ}C - 20^{\circ}C) / 32W = 0,25K/W = 3,81K/W$.

Der gewählte Kühlkörper hat einen R_{thK} von 0,87 K/W, das bedeutet, dass der Kühlkörper nur um 0,87 Kelvin pro Watt wärmer wird und sogar für alle drei Bauteile ausreicht. Allerdings muss für die Montage mehrerer elektronischer Komponenten auf einen Kühlkörper die elektrische Isolation der Bauteile untereinander gewährleistet sein, was laut Angaben der Datenblätter zu beachten ist und durch Messungen gezeigt wurde.

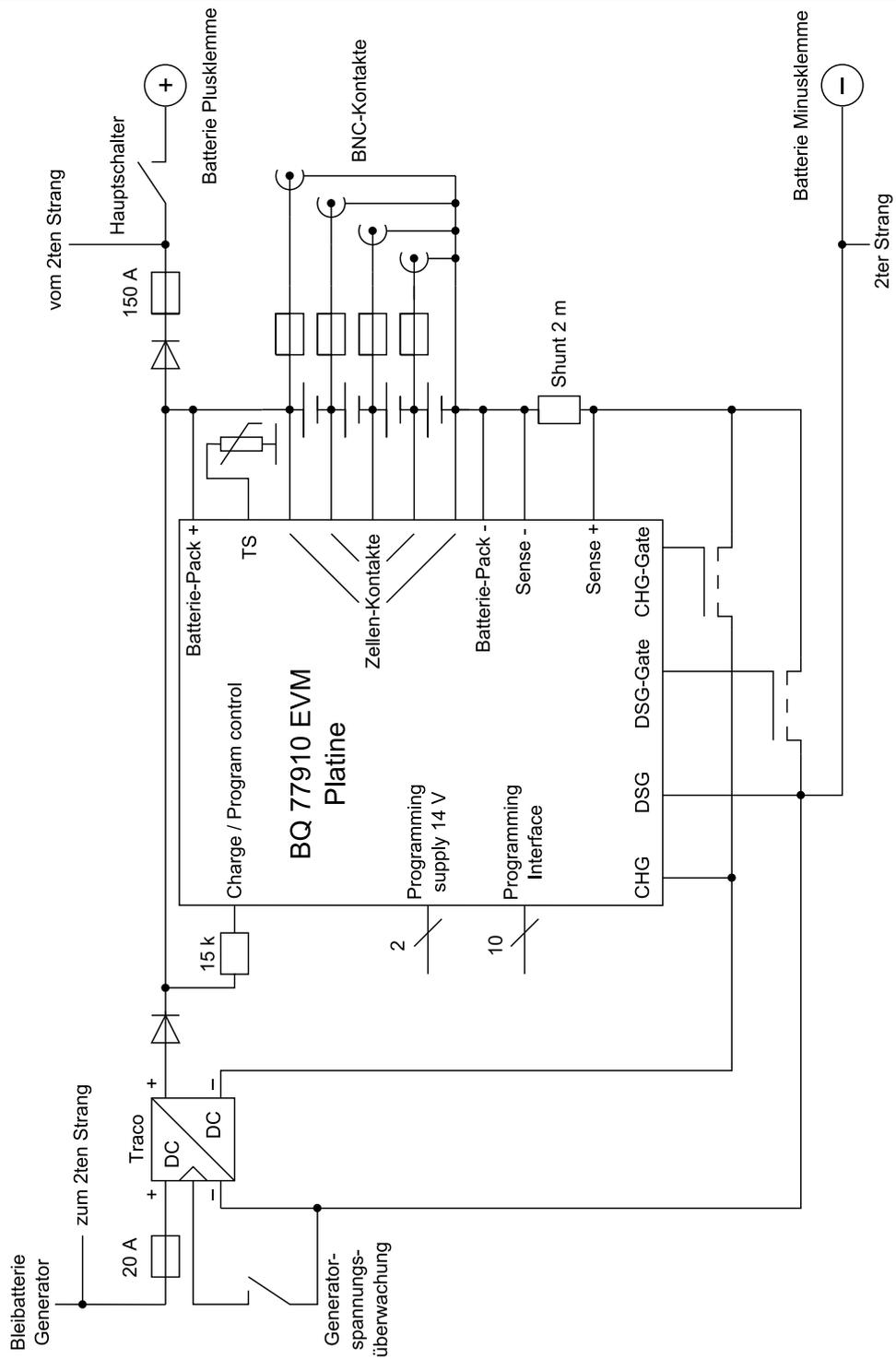


Abbildung 2.12: Die realisierte Version des Schaltplans für die Starterbatterie mit den Anschlüssen an die Safety Unit und den externen Bauteilen der Leistungselektronik, hier erfolgt die Darstellung von einem Strang

2.6 Entwurf eines Gehäuses für die Lithiumzellen

Der ersten Entwürfe sahen einen Deckel und einen Boden aus Aluminium vor (siehe Abbildung 2.13), die Seitenteile sollten etwas schmaler sein, so dass Lüftungsschlitze entstehen und die Starterbatterie genügend Wärme abgeben kann.

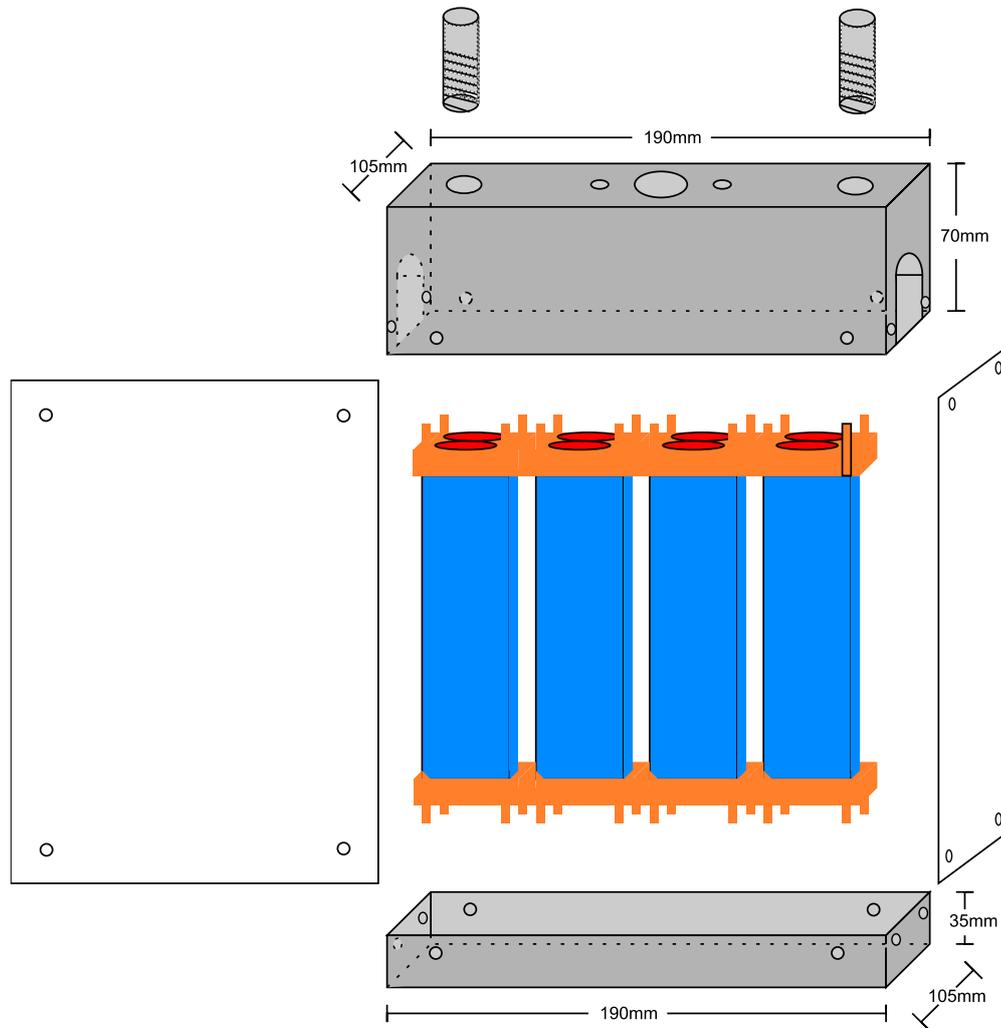


Abbildung 2.13: Entwurf des Gehäuses der Starterbatterie mit Deckel und Boden aus Aluminium und Seitenteilen aus Acryl. Die Lüftungsschlitze werden durch Einsetzen kleinerer Platten als die Gesamtbreite an allen vier Seiten realisiert

Nach Absprache mit der Fachwerkstatt, nach Recherche über den Werkstoff Acryl⁸ und aus Zeitgründen wurde dieser Entwurf modifiziert und auf den Werkstoff Makrolon⁹ zurückgegriffen, der eine höhere Temperaturbeständigkeit, höhere Schlagfestigkeit und

⁸ Acryl ist ein Handelsname und steht für PMMA Polymethylmethacrylat, es ist temperaturbeständig bis ca. 70°C.

⁹ Makrolon ist ein Handelsname und steht für PC Polycarbonat, es ist temperaturbeständig bis ca. 110°C.

Analyse

Kratzfestigkeit besitzt als Acryl. Außerdem haben Gewinde in diesem Material einen geringeren Abrieb und können viel häufiger genutzt werden.

In dem letzten Entwurf (siehe Abbildung 2.14) bestehen alle Gehäuseteile aus Makrolon, die Platten wurden in der Werkstatt geschnitten und die Passgenauigkeit überprüft bzw. die Löcher für die Verschraubung der Platten miteinander und sämtliche anderen Löcher für Durchführungen, Befestigungen und Lüftung gebohrt. Für die Dimensionierung des Gehäuses wurde für die Verdrahtung und die Belüftung, im Inneren auf jeder Seite ca. 1cm Freiraum gelassen, im Deckel wurde wegen des großen Hauptschalters ca. 6cm Freiraum gelassen.

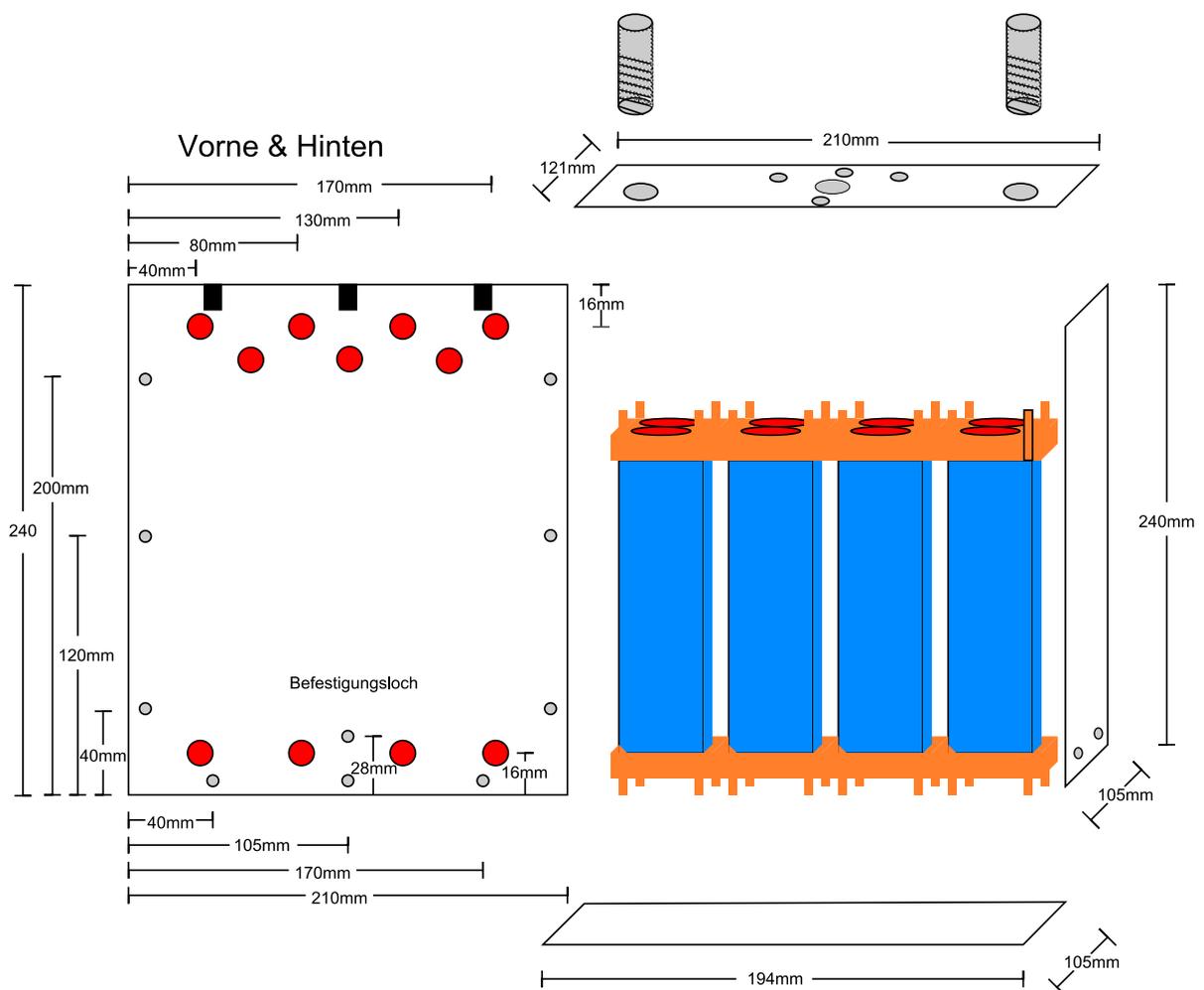


Abbildung 2.14: Realisierter Entwurf des Gehäuses der Starterbatterie mit allen Teilen aus Makrolon und Realisierung der Belüftung des Gehäuses durch Lüftungslöcher

Realisierung

Die Anschlussbolzen der Starterbatterie wurden einer handelsüblichen Bleibatterie nachempfunden und in der Werkstatt angefertigt.

Das Makrolon wurde mit einer etwas dickeren Wandstärke (8mm) gewählt, als es bei den Acrylplatten angedacht war, dadurch wurde die Stabilität erhöht und es ist möglich, Gewinde in das Material zu schneiden, so dass auf ein Kontern mit Muttern verzichtet werden konnte.

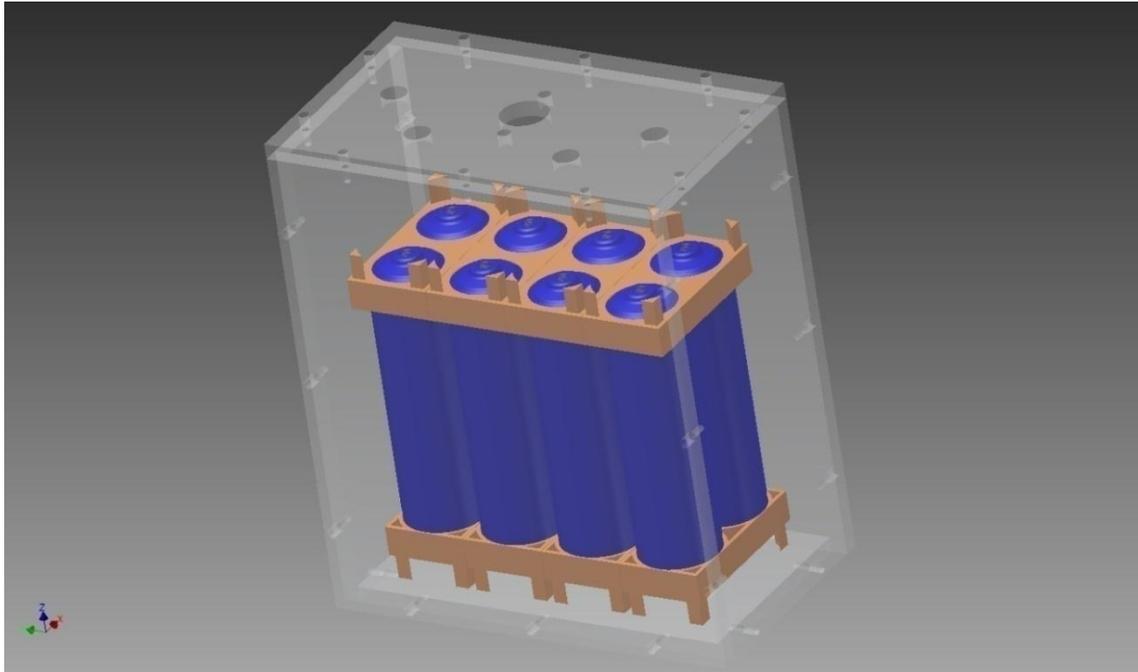


Abbildung 2.15: Lithiumzellen und Gehäuse mit Inventor Autodesk (Auto-CAD) erstellt und so die Maßhaltigkeit und Passgenauigkeit der Makrolonplatten bzw. vorgesehenen Löcher und Gewinde überprüft (Technische Zeichnungen siehe Anhang)

Das 8mm dicke Makrolon isoliert die Zellen sehr stark so dass eine Abgabe der Wärme nur noch schlecht möglich ist und es wurden deswegen sehr viele Lüftungslöcher in den Deckel des Gehäuses gebohrt. Auch zwischen den Zellenhalterungen wurden Löcher gebohrt, um ein zu starkes Erwärmen der Zellen zu verhindern. Außerdem wurden in den Gehäuseboden zwei 40mm Lüfter eingesetzt um die Zellen zu kühlen. Die Starterbatterie steht deswegen auf sehr hohen Füßen, weil die Lüfter die Luft ansaugen müssen.

3 Realisierung

In dem Kapitel der Realisierung sollen die gewonnen Erkenntnisse der vorangegangenen Kapitel einfließen und dazu beitragen, eine funktionsfähige Starterbatterie anzufertigen. Es wird konkret auf die einzelnen Anfertigungsschritte, anzufertigenden Bauteile und Änderungen an dem elektronischen Equipment eingegangen.

3.1 Anfertigung Starterbatteriegehäuse und Positionierung der Bauteile

Bei der Realisierung wurde zuerst das Gehäuse angefertigt und zusammengesetzt, um die Maßhaltigkeit und die Passgenauigkeit der Makrolonplatten zu kontrollieren bzw. um zu überprüfen, ob die Gewindelöcher an der richtigen Position und tief genug sind (siehe Abbildung 3.1).



Abbildung 3.1: Überprüfung des Gehäuses und der Gewindebohrungen auf Maßhaltigkeit und Passgenauigkeit

Erst danach wurde die Positionierung der Bauteile durch empirisches Ermitteln auf dem Gehäuse platziert. Es wurde dabei darauf geachtet, dass der Kühlkörper mit seinen Lamellen senkrecht montiert wird und auch der Schaltregler mit seinem bauseits vorhandenen Kühlkörper wurde mit seinen Lamellen senkrecht montiert um einen

Realisierung

optimalen Wärmeabtransport durch die Thermik zu gewährleisten (siehe Abbildung 3.3). Die BNC-Buchsen zum Messen der Zellspannungen bekamen aus Sicherheitsgründen nachträglich noch Sicherungen in die Messleitungen eingebaut um zu verhindern, dass bei Messungen unkontrollierte Kurzschlüsse entstehen.

Die restlichen Bauteile wurden an dem Gehäuse angebracht und die Verdrahtung der Lithiumzellen wurde vorbereitet, die elektronischen Bauteile, Schalter und Sicherungen wurden mit den laut VDE richtigen Leitungsquerschnitten verdrahtet und mit den passenden Aderendhülsen, Ringkabelschuhen, Gabelkabelschuhen, Flachsteckhülsen versehen (siehe Abbildung 3.4).



Abbildung 3.2: Bearbeitung der Makrolonplatten und des Kühlkörpers für die Positionierung, Befestigung und Verdrahtung der einzelnen Bauteile und elektronischen Komponenten



Abbildung 3.3: Gehäuse der Starterbatterie mit positionierten Bauelementen und Batterieanschlusspole

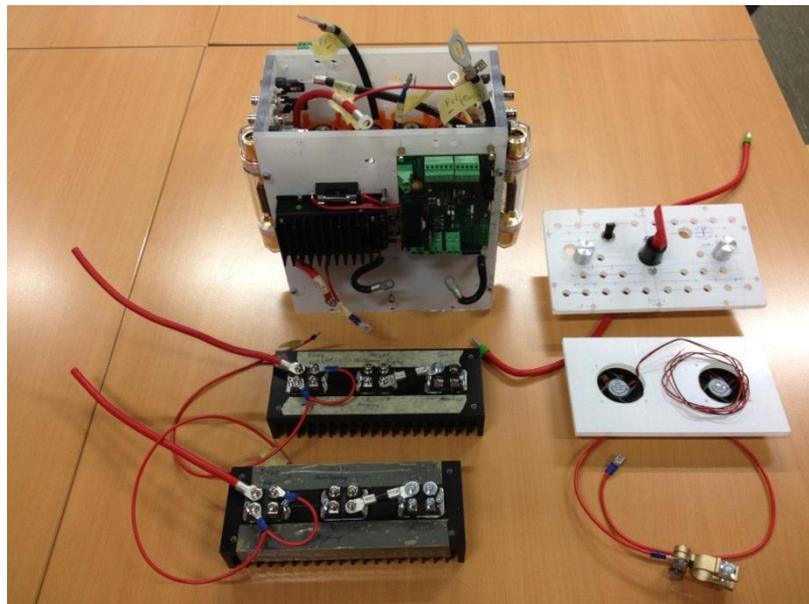


Abbildung 3.4: Starterbatteriegehäuse mit eingesetzten Lithium-Eisen-Phosphat-Zellen, bestückten Gehäuseplatten und Kühlkörper sowie verdrahteten Bauteilen

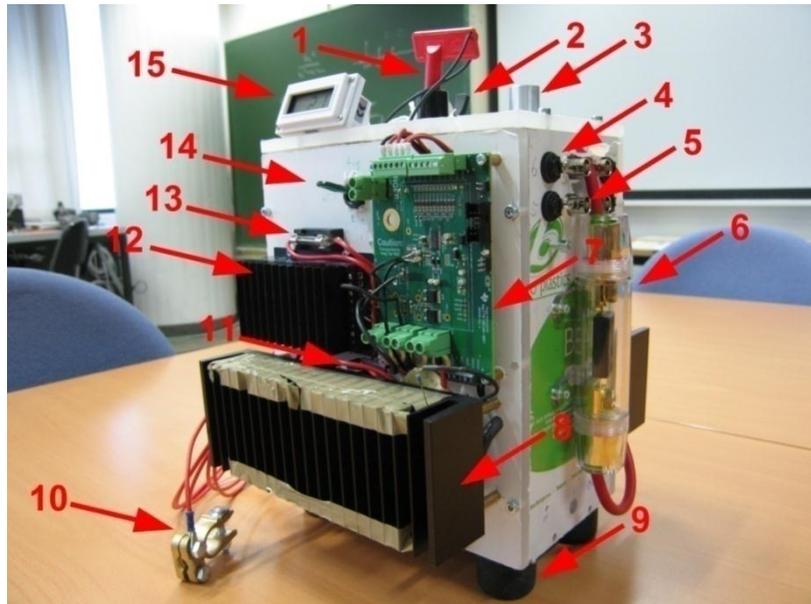


Abbildung 3.5: Fertiges Model der Starterbatterie mit zusätzlichem Temperatursensor an den Zellen

- 1) Entladehauptschalter
- 2) Ladehauptschalter
- 3) Anschlusspol
- 4) Vorsicherung Messleitung (100mA)
- 5) Zellenspannung Mess-BNC-Buchsen
- 6) Entladestrangsicherung (150A)
- 7) Safety Unit
- 8) Kühlkörper
- 9) Gummifüße
- 10) Anschlussklemme für das Laden
- 11) Lade-Mosfet
- 12) DC/DC-Wandler (Schaltregler)
- 13) Vorsicherung Schaltregler (20A)
- 14) Schalter Enable für strangweise Aufladung
- 15) Temperaturanzeige der Zellen

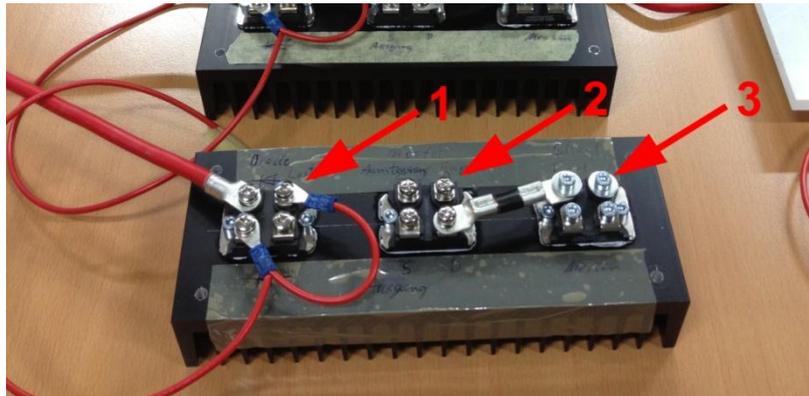


Abbildung 3.6: Rückseite vom Kühlkörper der Starterbatterie mit montierten elektronischen Bauteilen (1. Diode, 2. MOSFET, 3. Shunt)

3.2 Umbau der Safety Unit

Die Safety Unit wurde umgebaut (siehe Abbildung 3.9). Als erstes wurde der Thermistor ausgelötet und die Anschlussleitung verlängert, der Thermistor wurde zwischen den Lithiumzellen des jeweiligen Stranges an eine Zelle angeklebt.

Danach wurden die MOSFETs vom Lade- und Entladestromkreis ausgelötet und Source, Drain, Gate von der Platine, mit je einer Ader verlängert um die externen MOSFETs anzusteuern.



Abbildung 3.7: Rückseite der Safety Unit im Auslieferungszustand

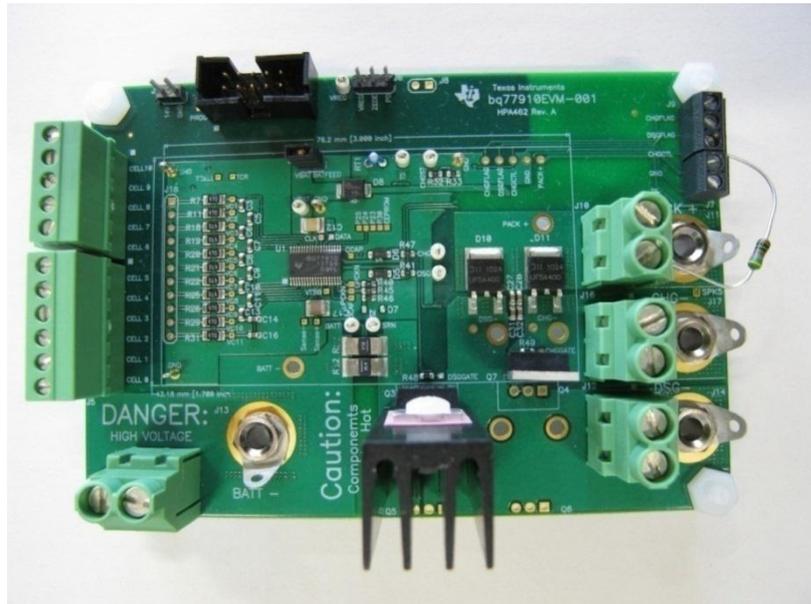


Abbildung 3.8: Vorderseite der Safety Unit im Auslieferungszustand mit Wake Up Widerstand

Die Shunts mussten ebenfalls von der Safety Unit genommen werden, um die extern fließenden Ströme zu messen. Es wurden die Anschlüsse mit Adern verlängert und an dem Shunt auf dem Kühlkörper angeschlossen (siehe Abbildung 3.9). Auf den Abbildungen 3.7 und 3.8 ist das Evaluationsboard BQ 77910 im Auslieferungszustand zu sehen (ohne die Modifikationen).

In Abbildung 3.9 sind die Änderungen an dem Evaluationsboard zu sehen.

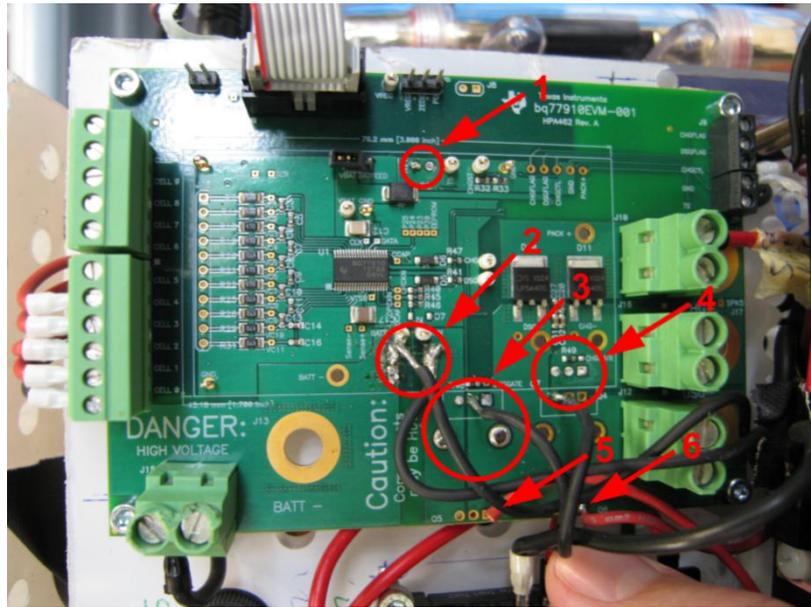


Abbildung 3.9: Vorderseite der Safety Unit nach Modifikationen im Laufe der Schaltungsentwicklung

- 1) Thermistoranschluß unterhalb der Platine verlängert und den Thermistor an eine Zelle angebracht
- 2) Shunts entfernt und mit Adern zu dem externen Shunt verlängert
- 3) Entlade-MOSFET von der Platine abgenommen und den Ansteuerungsausgang an einen externen größeren MOSFET angeschlossen
- 4) Lade-MOSFET von der Platine abgenommen und den Ansteuerungsausgang an einen externen größeren MOSFET angeschlossen
- 5) Masseanschluß von dem Entlade-MOSFET
- 6) Masseanschluß von dem Lade-MOSFET

Siehe auch Abbildung 3.10

Realisierung

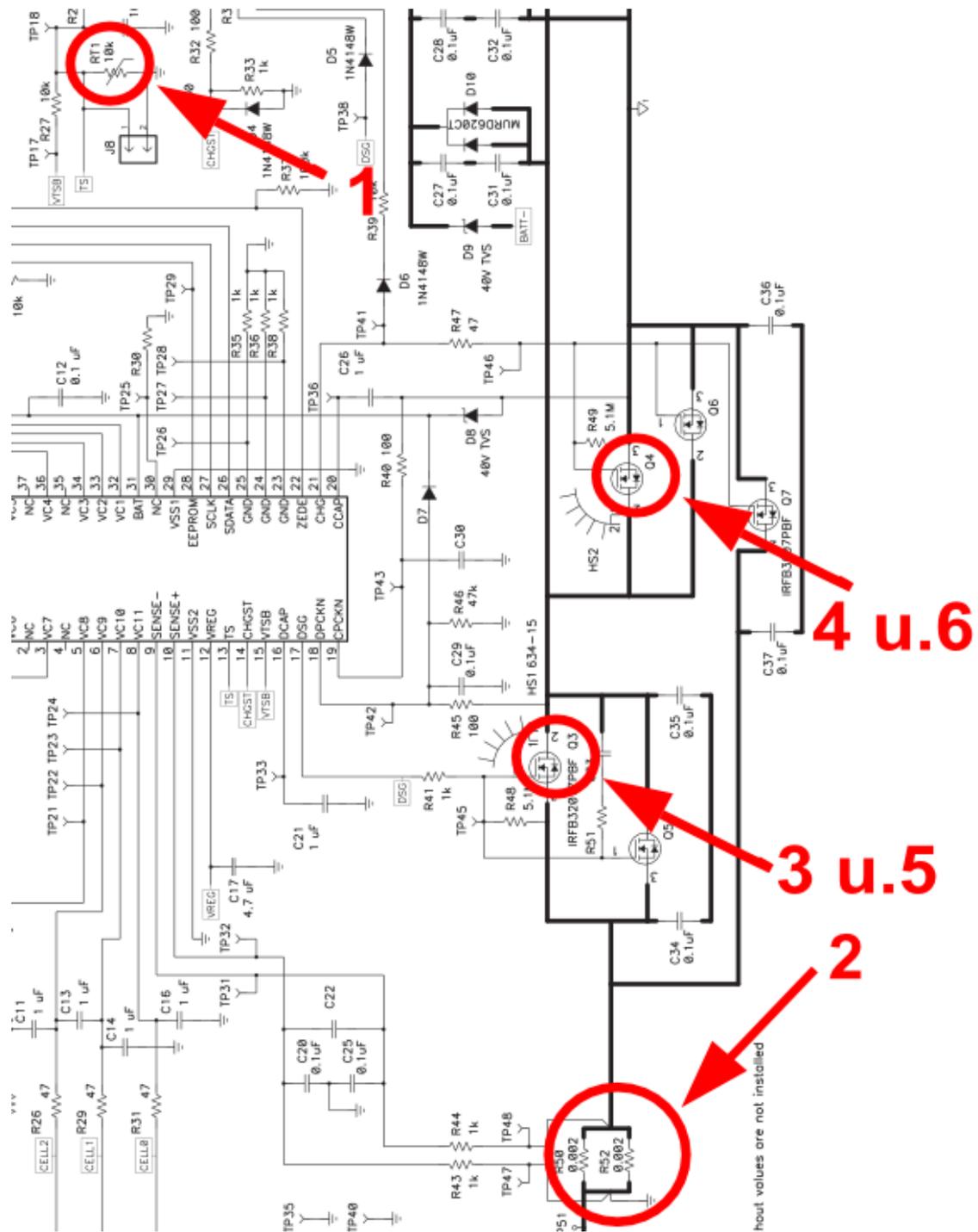


Abbildung 3.10: Ausschnitt aus dem Schaltbild der Safety Unit BQ 77910 (Texas Instruments) mit eingezeichneten Änderungen an der Platine bzw. dem Schaltbild [32]

3.3 Starterbatterie Inbetriebnahme und Programmierung der Safety Unit

Bevor die Safety Unit programmiert werden kann, muss die Starterbatterie in Betrieb genommen werden, dafür müssen noch die letzten Metallverbinder an den Zellen montiert werden (siehe Abbildung 3.11). Erst jetzt wird die Safety Unit mit Spannung versorgt und kann mit Hilfe einer zusätzlichen externen Programmierspannung, einem ca. 15k Ohm großen Wake-Up-Widerstand¹⁰ und dem passenden Programmieradapter, programmiert werden.

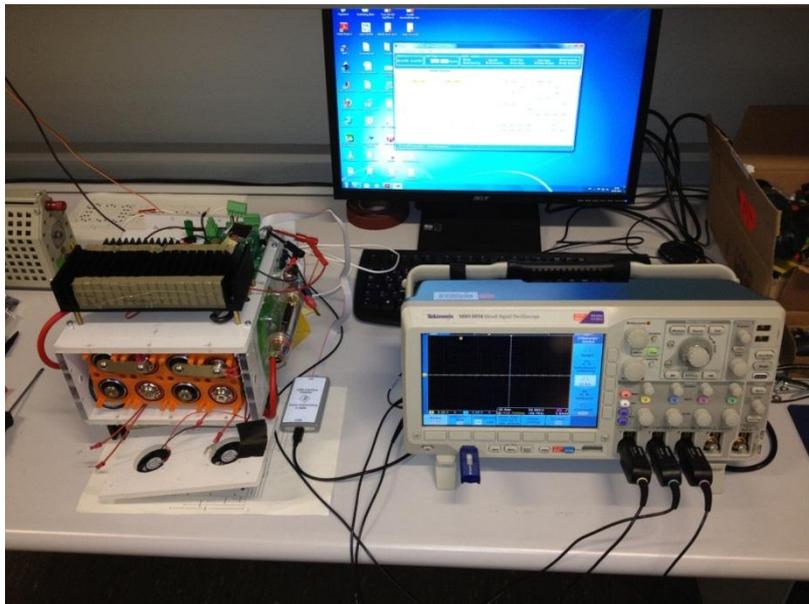


Abbildung 3.11: Inbetriebnahme der Starterbatterie, links das Herstellen der Verbindungen der einzelnen Lithium-Eisen-Phosphat-Zellen und mittig Programmierung der Werte für die Safety Unit

Bei der Programmierung gilt es zu beachten, dass der Wake-Up-Widerstand nur kurz für die Programmierung und beim ersten Mal der Inbetriebnahme angeschlossen wird und danach wieder abgeklemmt wird. Ansonsten zeigt das Programm von Texas Instruments Fehler an die nicht vorhanden sind z.B. keine Zelle angeschlossen, Kurzschluss oder Übertemperatur.

Die Werte für die Safety Unit wurden laut dem Hersteller der Lithiumzellen und nach der größten Sicherheit eingestellt.

¹⁰ Der Wake-Up-Widerstand wird beim ersten Anschluss der Zellen an die Safety Unit zum Aufwecken benötigt und zum Programmieren, die Größe des Widerstandes ist abhängig von der Höhe der Zellenspannung.

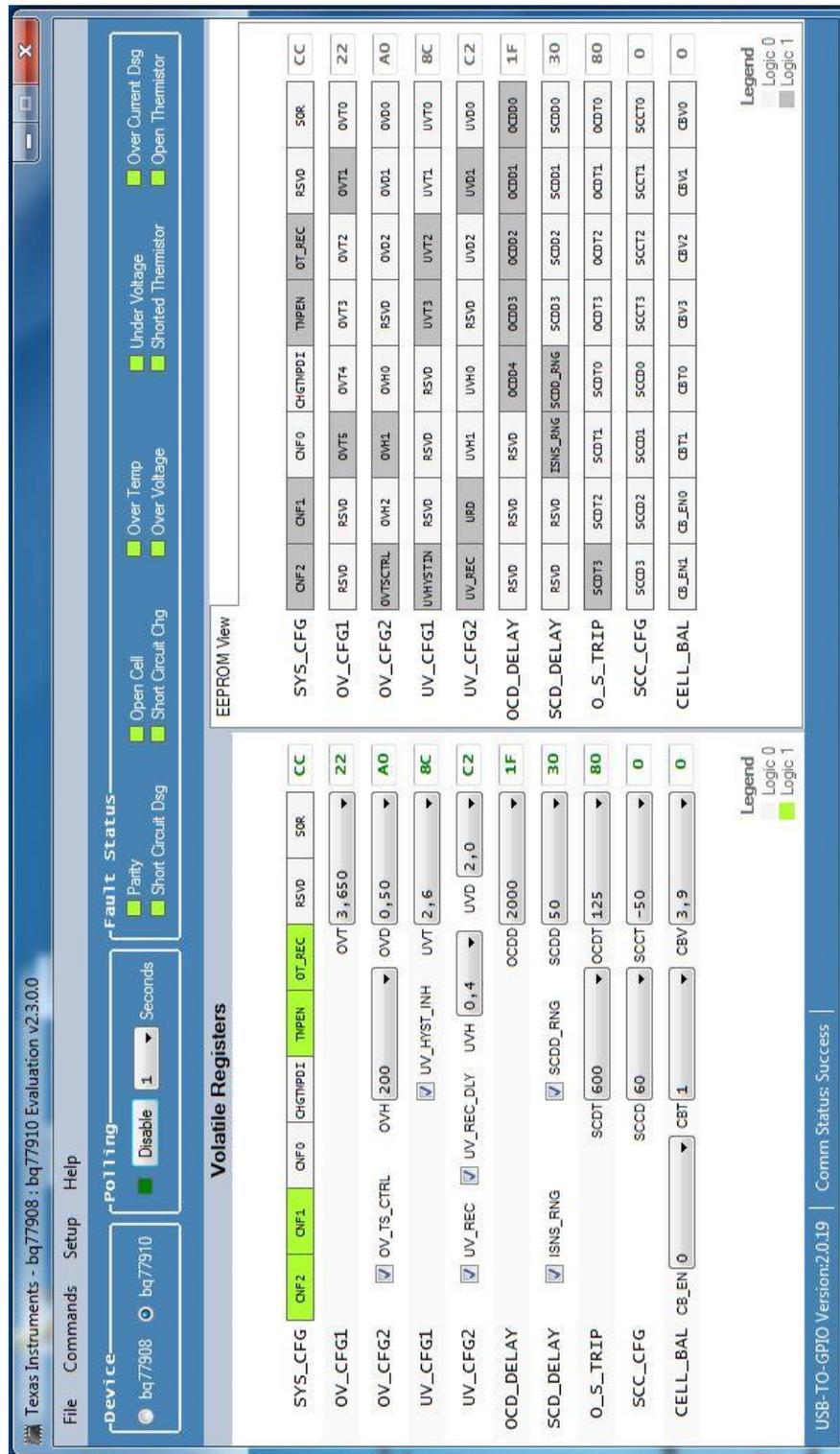


Abbildung 3.12: Bildschirmanzeige Programmierprogramm von der Safety Unit

Auf der linken Seite des Safety Unit Programms (siehe Abbildung 3.12) werden die Werte eingestellt die zu der Safety Unit (in die Register) übertragen werden sollen. Auf der rechten Seite stehen die Werte die in der Safety Unit gespeichert sind. Die Bedeutung der einzelnen Einstellmöglichkeiten wird im Programm bei Berührung mit der Maus auf dem Bildschirm angezeigt. Es können hier unter anderem die Werte der Über- und Unterspannung, der Kurzschlussstrom, Überstrom, die verschiedenen Hysteresen und Zeiten eingestellt werden.

3.4 Funktionstest der Safety Unit

Die Funktion der Safety Unit wurde überprüft. In Abbildung 3.13 und 3.14 ist die Ansprechzeit des Entlade-MOSFETs zu sehen. Bei der Überprüfung der Safety Unit wurde festgestellt, dass die Schaltung noch modifiziert werden muss, damit die Schaltung richtig arbeiten kann. Es wurde von jedem MOSFET noch eine Verbindung zu der Safety Unit gezogen und eine Verbindung auf der Platine durchtrennt, damit die Werte über dem Shunt stimmen, vorher ist ein Teil des Stromes über die Platine geflossen, dies hat zu falschen Messergebnissen bei der Strommessung geführt.

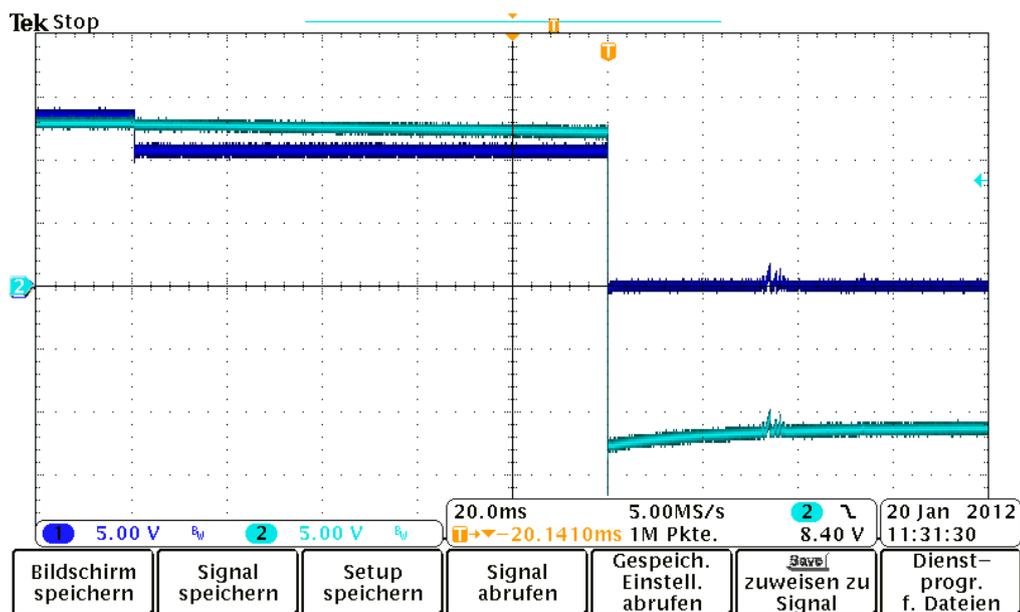


Abbildung 3.13: Abschaltzeit des Entlade-MOSFETs bei Kurzschluß (100ms)

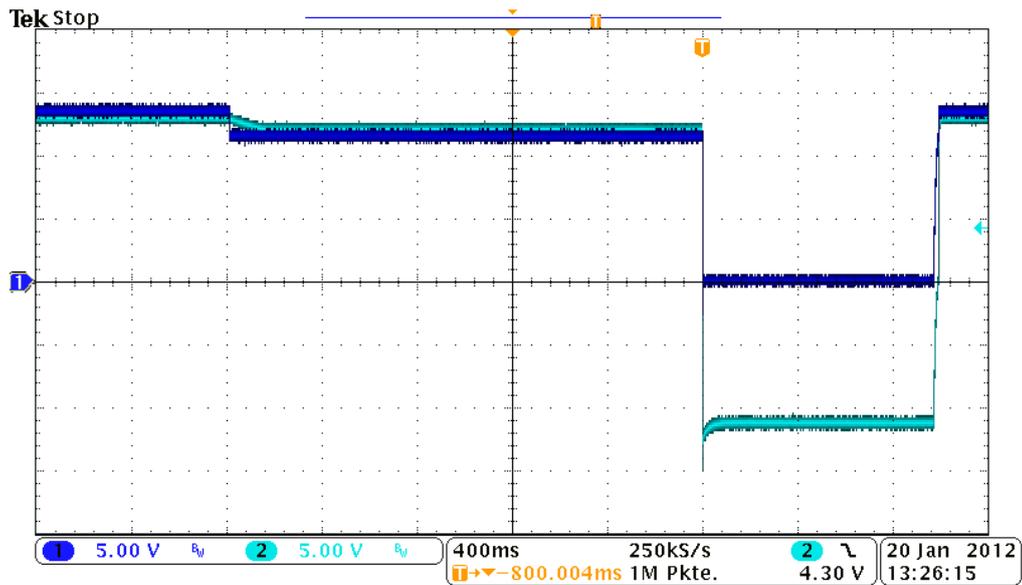


Abbildung 3.14: Abschaltzeit des Entlade-MOSFETs bei Überlast (2000ms)

3.5 Messungen am Fahrzeug

Für die Messungen am Fahrzeug stand ein Audi A4 mit 2,8l Hubraum und 142 kW zur Verfügung. Die ersten Messungen wurden bei ca. 15°C Außentemperatur durchgeführt. Die Starterbatterie sollte eigentlich die gleichen Abmaße haben, wie eine handelsübliche Bleibatterie. Bei der Montage der Bauteile am Gehäuse wurde dann das ursprüngliche Maß überschritten, so dass die Starterbatterie nicht unter der Motorhaube Platz fand. Die Lithium-Batterie wurde mit einer langen Leitung (50mm²) zu einem Tisch neben dem Fahrzeug verbunden (siehe Abbildung 3.15 und 3.16). Dadurch waren die elektronischen Bauteile der Starterbatterie besser erreichbar. Im Startmoment sollten der Entladestrom und die Spannungseinbrüche der Zellen gemessen werden. Dafür wurden die Anschlüsse im Fahrzeug aufgetrennt. Die Minusanschlüsse der Bleibatterie und der Starterbatterie wurden mit dem Masseanschluss des Fahrzeugs über einen angefertigten Kupferbolzenadapter verbunden. Der Pluspol des Fahrzeugs wurde aufgetrennt, indem die dicke Ader (Anschluss vom Starter) mit dem Pluspol der Starterbatterie verbunden wurde und die Ader mit dem kleinen Querschnitt an dem Pluspol der Bleibatterie verbleibt. Zusätzlich wurde das Ladekabel der Starterbatterie an den Pluspol der Bleibatterie angeschlossen (siehe Abbildung 3.16).

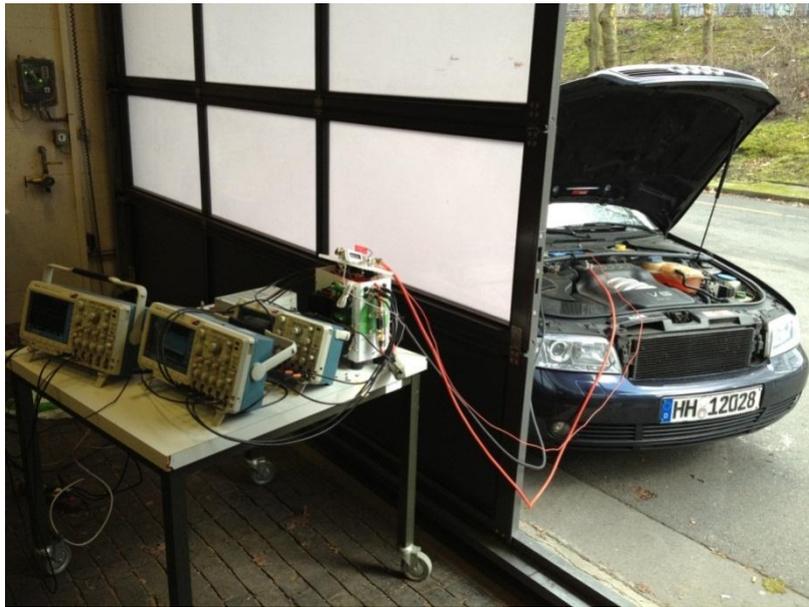


Abbildung 3.15: Versuchsaufbau am Fahrzeug für die Aufzeichnungen der Spannungen und Ströme im Startmoment und dem Ladeschaltungsfunktionstest



Abbildung 3.16: Anschluss der Starterbatterie am Fahrzeug mit Kupferadapterbolzen und Starterbatterieladeanschlussleitung

Realisierung

Die Starterbatterie wurde für kleine Fahrzeuge konzipiert, die in einem Bereich von 1l und etwas mehr Hubraum liegen. Der Audi besitzt eine viel größere Maschine mit 2,8l Hubraum. Es ist mehr Drehmoment und daher mehr Starterleistung aufzubringen, da ein höherer Strom beim Starten benötigt wird, das Starten gelang ohne Probleme mehrfach hintereinander. Die Ströme in den Strängen lagen im Einschaltmoment in dem erwarteten Bereich von 200A (siehe Abbildung 3.18), die Spannungen der Zellen hatten im Moment des Startens verschiedene Spannungswerte und brachen dann etwas unterschiedlich stark ein, was an den verschiedenen hohen Innenwiderständen der Zellen lag (siehe Abbildung 3.19 und 3.20).

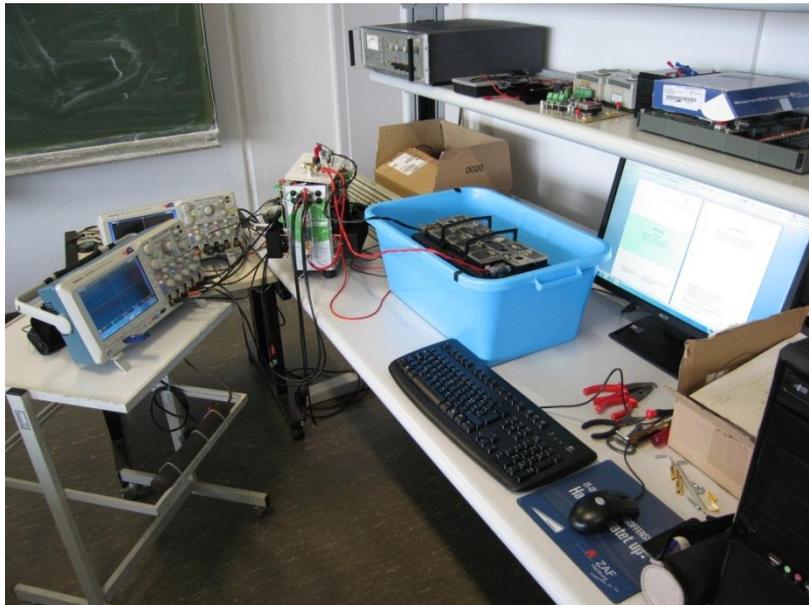


Abbildung 3.17: Fehlersuche in der Ladeschaltung im Labor. Um die hohen Ladeströme zu realisieren, wurde eine Bleibatterie mit 100Ah zum Aufladen benutzt

Beim Versuch die Lithiumzellen mit laufendem Generator im Fahrzeug zu laden, ertönte ein pfeifendes Geräusch, sobald beide Stränge eingeschaltet wurden. Beim Laden von einem Strang ertönten keine Geräusche. Es wurde festgestellt, dass die Schaltregler sich gegenseitig in ihrem Ausgangsstrom beeinflussen. Der Versuch wurde abgebrochen und im Labor mit einer Autobatterie als Versorgungsspannung erneut überprüft. Das Geräusch war auch hier deutlich zu hören. Als Abhilfemaßnahme wurde das Ladekabel in seinem Querschnitt vergrößert, von $2,5\text{mm}^2$ auf 5mm^2 , und in seiner Länge verkürzt, dann wurden die Dioden im Ladekreis ausgetauscht, um den Rückstrom, der durch die Dioden fließt zu verkleinern. Es konnte nur eine geringe Verbesserung der störenden Geräusche erzielt werden. Die Verdrahtung der Starterbatterie wurde überprüft

und es wurde ein Fehler (Vertauschung) in der Strangzuordnung des negativen Potentials der Lithiumzellen entdeckt. Dies war der Fehler, durch den die Schaltregler sich gegenseitig in ihrem Ausgangsstrom beeinflussten. Die Anschlüsse wurden strangrichtig umverdrahtet und das Verhalten der Schaltreglers erneut überprüft. Das Geräusch war immer noch zu hören, allerdings erst nach dem das Laden mehrere Minuten ohne Störungen funktioniert hatte (siehe Abbildung 3.21). Das Geräusch wurde von den Schaltregler erzeugt, sobald die Eingangsspannung unter die benötigten 9V sank und der Schaltregler nicht mehr richtig arbeiten konnte. Die eingesetzte Bleibatterie hatte zu diesem Zeitpunkt nur noch eine geringe Restladung und konnte die geforderte Spannung nicht mehr liefern. Nach Aufladung der Bleibatterie und erneuter Messung war kein Geräusch mehr hörbar.

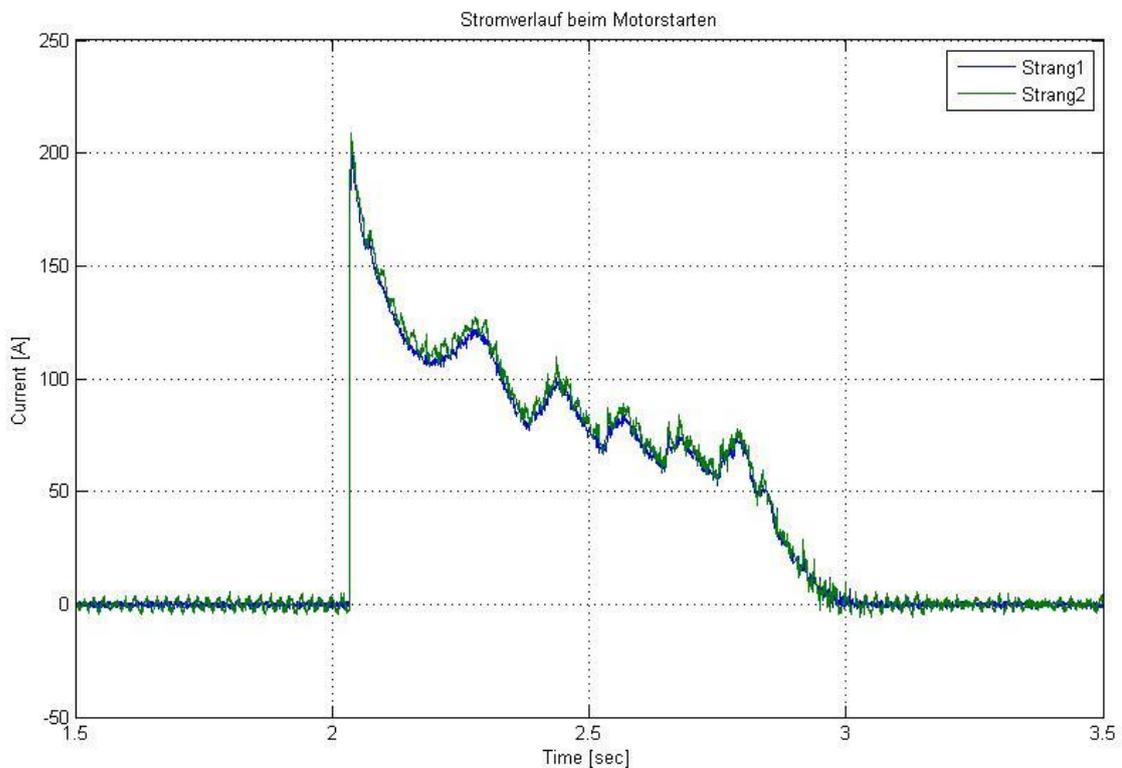


Abbildung 3.18: Stromverlauf beim Motorstarten von beiden Strängen (die Verläufe sind weitgehend übereinstimmend)

Realisierung

In Abbildung 3.22 und 3.23 ist eine Aufladung von beiden Strängen zu sehen. In Abbildung 3.23 ist bei dem Strang 1 eine Hysterese von 200mV eingestellt und bei Strang 2 keine Hysterese. Es ist gut erkennbar, dass das Wiedereinschalten des Strang 1 immer etwas später geschieht, da sich die Ruhespannung der Zellen immer langsamer einstellt. Bei Strang 2 wird nicht auf das Absinken der Ruhespannung gewartet und die Zelle wird viel häufiger versucht zu laden, so dass die Zelle in einen Zustand der Überladung geht und einen sehr hohen Spannungswert annimmt.

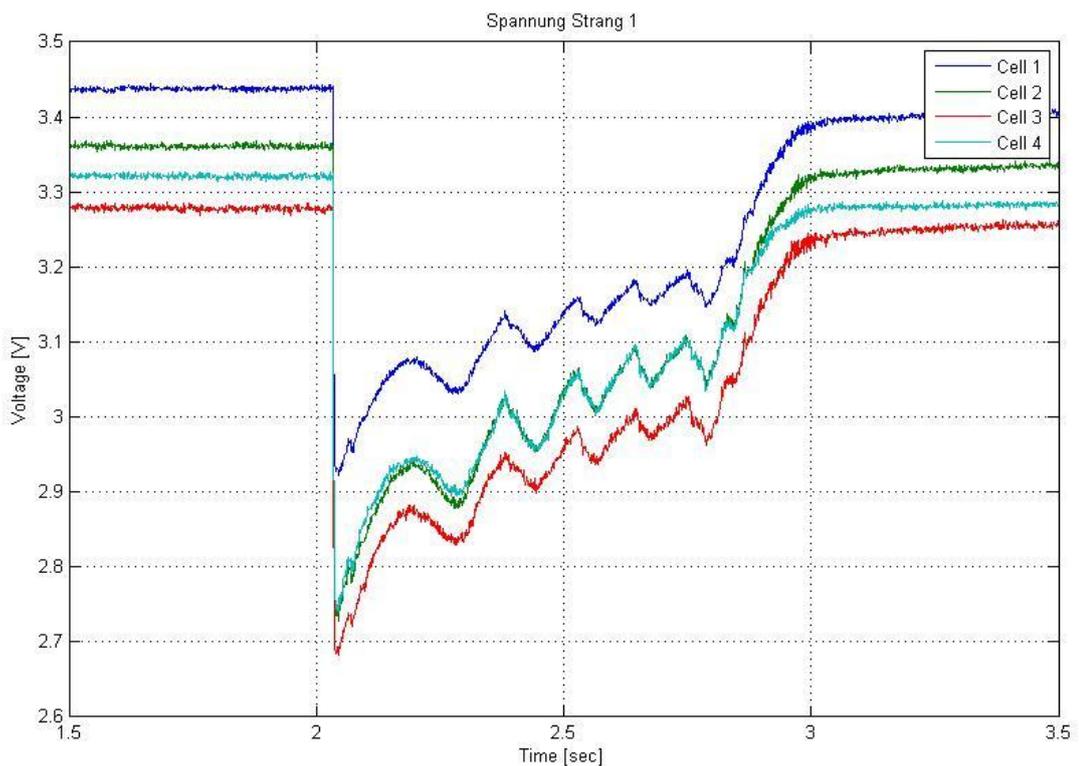


Abbildung 3.19: Spannungsverlauf von Strang 1 beim Starten

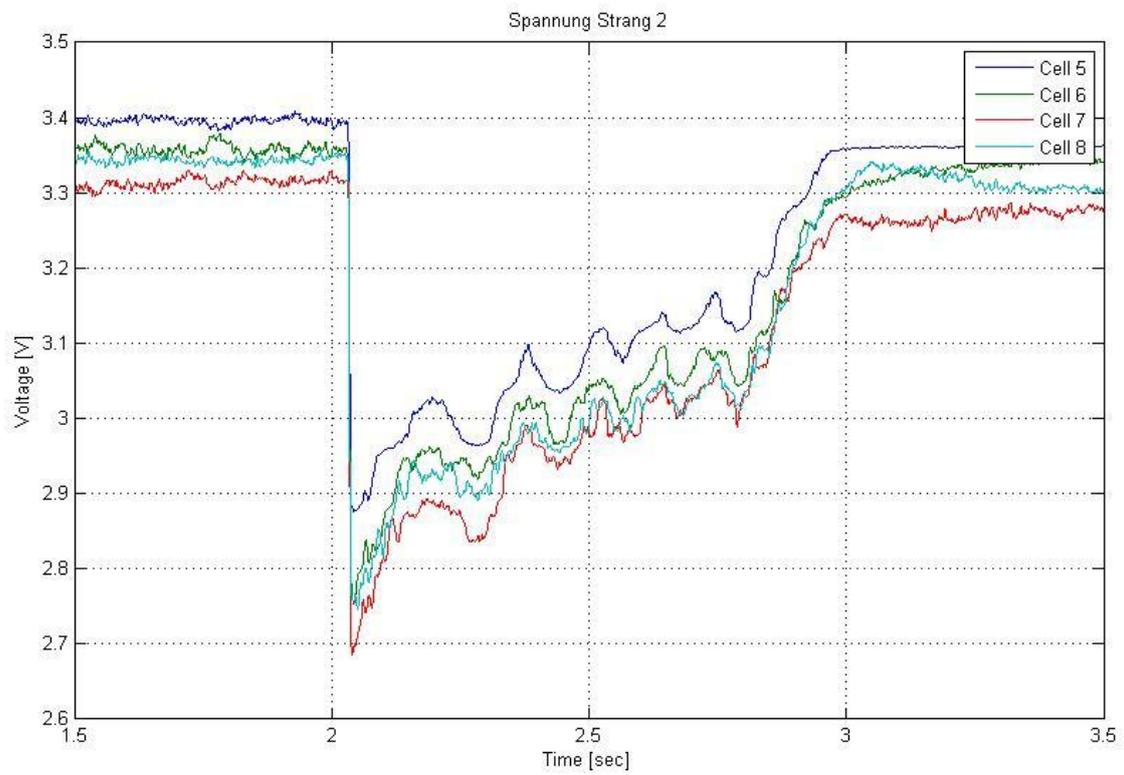
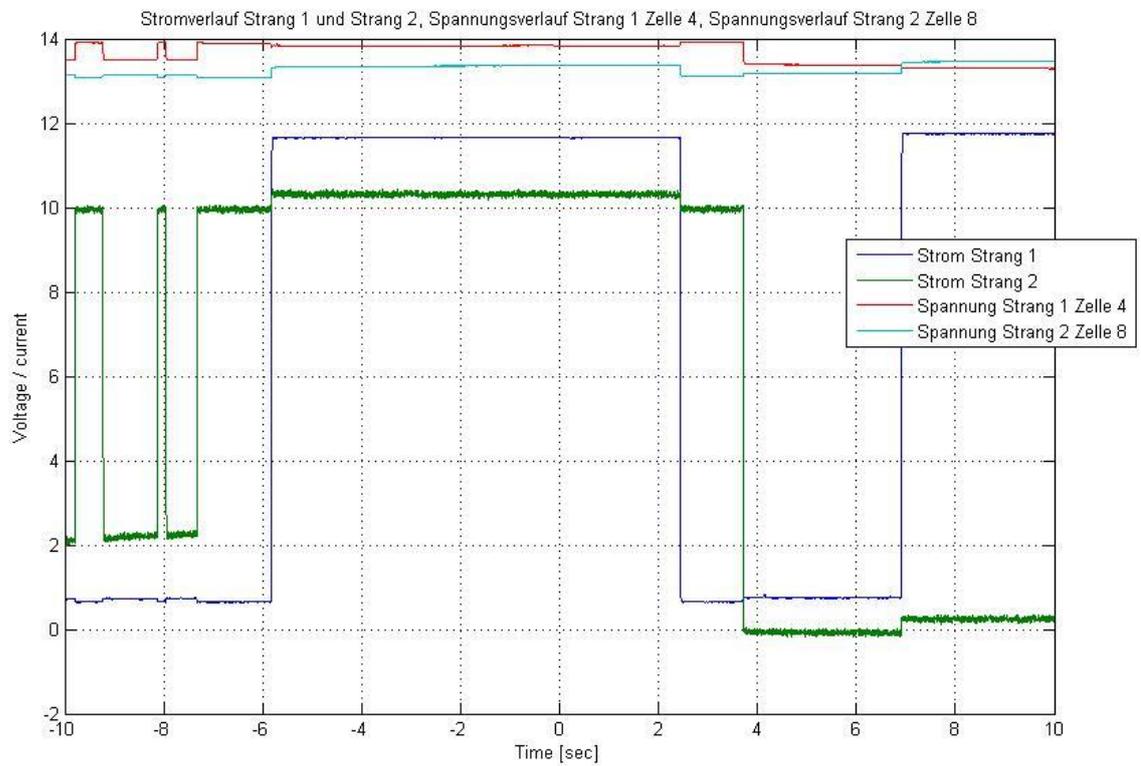


Abbildung 3.20: Spannungsverlauf von Strang 2



3.21: Strom und Spannungsverlauf von beiden Strängen mit gegenseitiger Beeinflussung der Schaltregler durch falsch angeschlossene Masse an den Batteriezellen. Die Abbildung stellt eine Fehlfunktion da, die später behoben wurde, siehe Kapitel 3.5 Seite 66

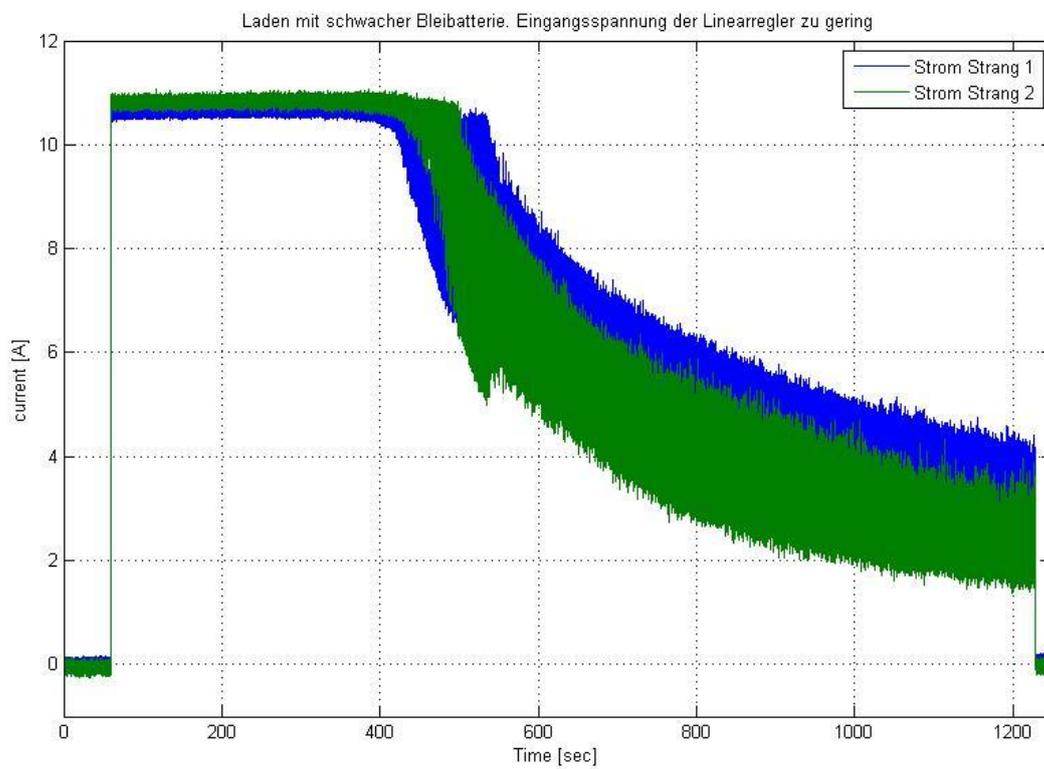


Abbildung 3.22: Stromverlauf bei zu gering aufgeladener Bleibatterie als Quelle zum Laden (Geräusentwicklung nach ca. 400s). Fehlersituation in Kapitel 3.5 Seite 65 diskutiert

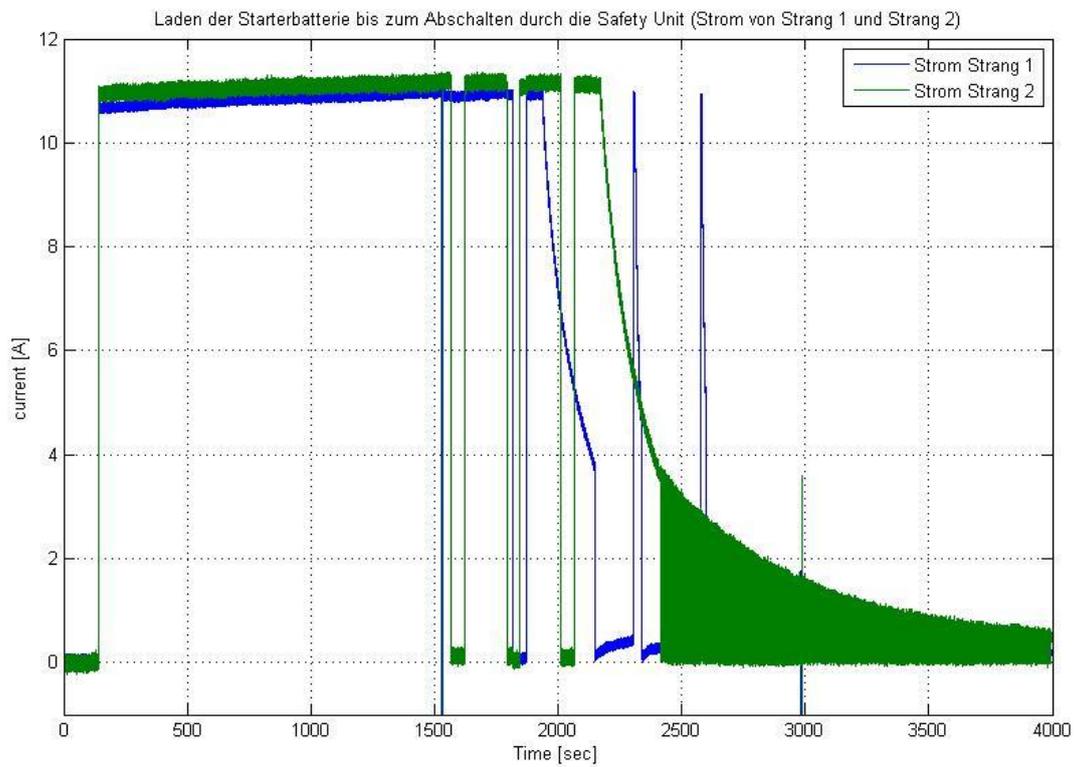


Abbildung 3.23: Stromverlauf beim Ladevorgang. Strang 1 mit eingestellter Hysterese von 200mV und Strang 2 ohne eingestellte Hysterese bis zum Wiedereinschalten des Lade-MOSFETs der Safety Unit. Stromeinbrüche entstehen durch das automatische Abschalten der Stromzangen

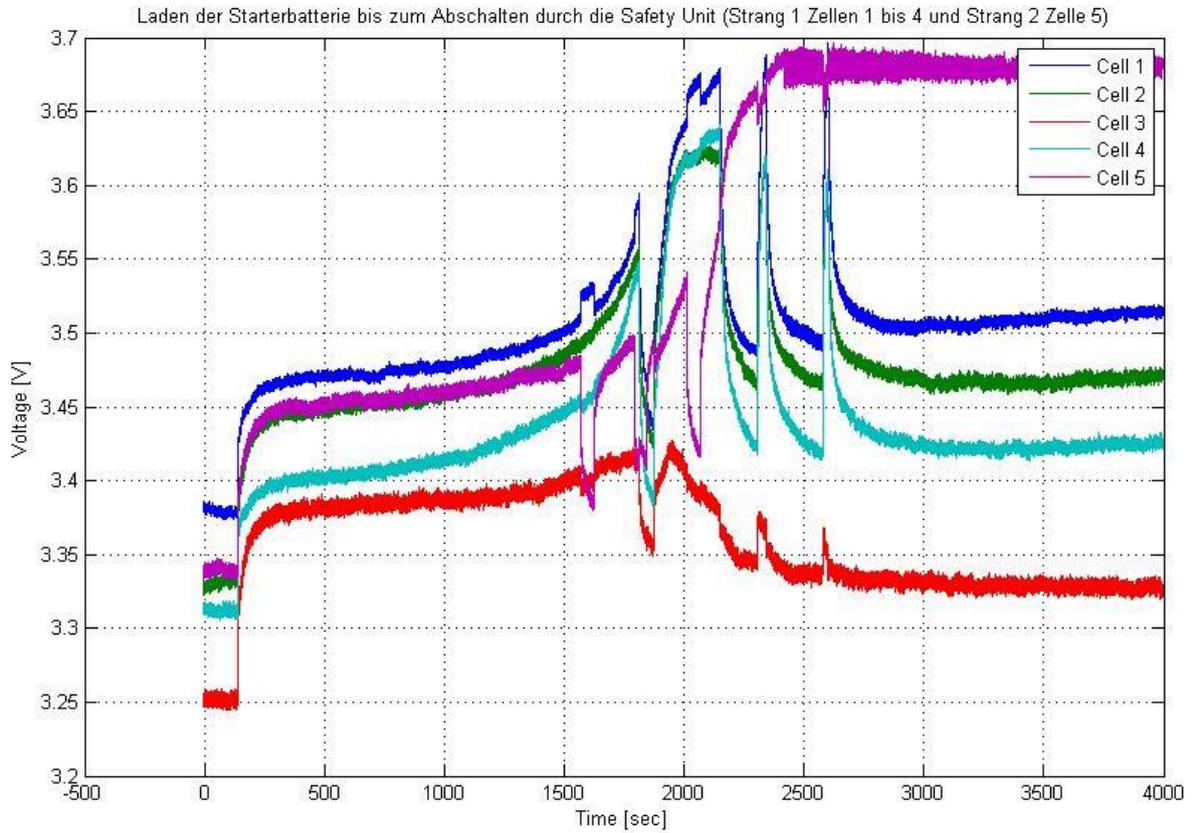


Abbildung 3.24: Spannungswerte von Strang 1 der Zellen 1 bis 4 und Strang 2 der Zelle 5. Aufladen von beiden Strängen bis zum Abschalten durch die Safety Unit (Überschreiten der eingestellten Ladeschlussspannung von 3,65V)

4 Auswertung und Fazit

In diesem Kapitel soll eine Zusammenfassung und eine Auswertung der vorangegangenen Kapitel bzw. der gemessenen Ergebnisse erfolgen und zuletzt ein Fazit abgeleitet werden.

4.1 Zusammenfassung

Am Anfang dieser Diplomarbeit stand die Idee, die seit Jahrzehnten verwendete und sehr schwere Bleibatterie, durch eine andere, neue Technologie zu ersetzen. Diese Starterbatterie sollte möglichst alle positiven Eigenschaften der Bleibatterie beinhalten. Dies bedeutet: Fähigkeit hohe Ströme zu liefern, lange Lebensdauer aufweisen und spannungskompatibel zu dem Bordnetz mit 12V Nennspannung zu sein (13,8V tatsächliche typische Spannung).

Eine Alternative zu der Bleibatterie wird unter anderem gesucht, weil heute an die Batterien in Fahrzeugen höhere Ansprüche gestellt werden. Es kommt die Rolle eines Pufferspeichers mit vielen Zyklen hinzu. Die Bleibatterien altern, durch die sogenannte Start-Stopp-Automatik, sehr schnell. Diese Start-Stopp-Automatik hat den Vorteil, dass das Fahrzeug weniger verbraucht, da es bei jedem Stopp (z.B. an Ampeln) den Motor ausschaltet und beim Anfahren wieder startet. In dem Moment des Haltens wird kein Treibstoff verbraucht. Das häufige Starten des Fahrzeugs geht sehr stark zu Lasten der Bleibatterie, da diese nicht so schnell wieder aufgeladen werden kann und sie immer weiter entladen wird. In Fahrzeugen ohne Start-Stopp-Automatik wird das Fahrzeug nur einmal gestartet und erst beim Erreichen des Zielortes ausgeschaltet, dadurch wird nur kleiner Teil der Kapazität der Bleibatterie genutzt. Bei stärkerer Entladung mit der Start-Stopp-Automatik wird die Bleibatterie soweit entladen, dass sie nachhaltig geschädigt wird. Die Lebensdauer der Bleibatterie nimmt stark ab und sie muss viel früher ausgetauscht werden.

Deswegen wird nach alternativen Akkumulatoren gesucht, die das häufige Starten des Fahrzeugs durch eine höhere Zyklenfestigkeit und ohne eine Abnahme der Kapazität überstehen.

Mit den Lithium-Eisen-Phosphat-Zellen wurde eine interessante Alternative gefunden, die durch ihren fast identischen Spannungsbereich (durch vier in Reihe geschaltete Zellen) und ihre thermische Sicherheit, im Gegensatz zu den meisten anderen Lithium-Akkumulatoren, ohne Risiken in Fahrzeugen eingesetzt werden kann. Die Starterbatterie sollte in ihren Abmaßen ähnlich denen der Bleibatterie sein und direkt in das Fahrzeug als Alternative eingesetzt werden können.

Als erstes musste die Höhe der zu erwartenden Ströme im Startmoment und der maximal zu Verfügung stehende Strom für das Laden bestimmt werden, um die elektronischen Bauteile und Komponenten darauf abzustimmen. Dafür wurde im Internet recherchiert und Messungen von vorangegangenen Abschlussarbeiten im Projekt BATSEN¹¹ herangezogen.

Als die Größen feststanden, wurden die Vor- und Nachteile der Reihen- und der Parallelschaltung ermittelt, um eine geeignete Schaltung, mit den dazu benötigten elektronischen Bauteilen, zu entwerfen. Danach musste ein Gehäuse konzipiert und angefertigt werden in dem die Zellen und die restlichen Komponenten Platz haben. Es mussten Sicherungen und Schalter vorgesehen werden, um im Störfall schnell eingreifen zu können und die Batterie abzuschalten bzw. das Laden zu unterbrechen. Die Batterie wurde so aufgebaut, dass ohne viele Handgriffe die Kapazität halbiert werden konnte und auch das Laden wurde durch vorhandene Enableschalter pro Strang schaltbar gemacht.

Zum Schluss wurde am Fahrzeug die Funktion der Starterbatterie überprüft, in dem das Fahrzeug mehrmals angelassen wurde und dabei der Stromverlauf der Stränge und das Einbrechen der Spannungen der Zellen mit Oszilloskopen aufgezeichnet wurde. Ebenfalls wurde das Laden der Starterbatterie überprüft und der Ladestrom der Stränge und das Ansteigen der Spannungen der Zellen mit Oszilloskopen aufgezeichnet.

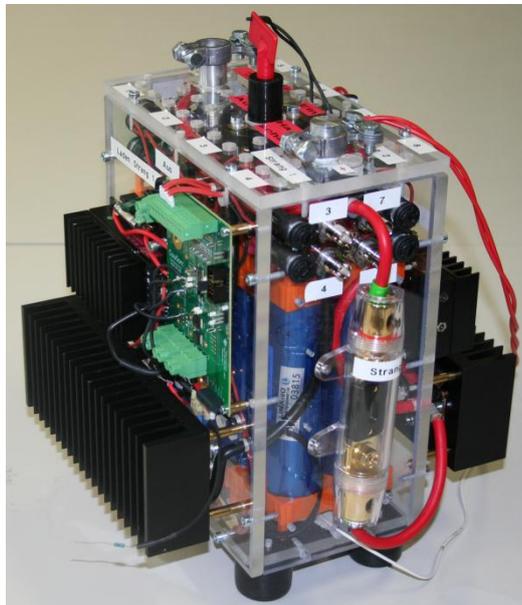


Abbildung 4.1: Fertige Lithium-Starterbatterie ohne Schutzfolien auf dem Makrolongehäuse

¹¹ BATSEN steht für Drahtlose Zellsensoren für Fahrzeugbatterien, es ist ein vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördertes Forschungsprojekt.

4.2 Bewertung der erzielten Ergebnisse

Das Ziel dieser Diplomarbeit war es, eine Starterbatterie mit Lithiumzellen zu entwickeln und ein Fahrzeug damit zu starten. Die damit verbundenen Anpassungen der Reihen- und Parallelschaltung der Zellen, der Anpassung der Spannung und die Umbauten der Safety Unit stellten einen großen Realisierungsanspruch dar. Zum einen musste die richtige Zellengröße (Kapazität) bzw. die Art der Lithiumzelle bestimmt werden, zum anderen musste der Strom bestimmt werden der im Startmoment zum Fließen kommt, um die elektronischen Bauteile für diesen kurzen, aber sehr hohen Strom zu dimensionieren. Des Weiteren sollte die Lithiumstarterbatterie im Fahrzeug geladen werden können, was eine Anpassung der Spannung des Fahrzeugs an die Zellenspannung nötig machte.

Das wichtigste Ergebnis ist, dass die Lithiumstarterbatterie das Fahrzeug ohne Probleme starten konnte und das bei einer relativ großen (2,8l Benzin) Maschine. Die Lithium-Eisen-Phosphat-Zellen können kurzfristig mit ca. 220A einen sehr großen Strom liefern (siehe Abbildung 3.18), der die Herstellerangaben übertrifft (diese waren mit maximal Peak 10C also 160A angegeben). Die gemessenen Zellenspannungen beim Starten brechen im Startmoment stärker ein als erwartet (in beiden Strängen). Besonders die etwas weniger stark geladenen Zellen, erreichen für Lithiumzellen sehr niedrige Spannungswerte. Nach mehrmaligem Auf- und Entladen stellte sich ein Ungleichgewicht der Zellenspannungen ein. Dies resultierte durch die unterschiedlichen Innenwiderstände der Zellen, obwohl die Zellen beim Distributor durchgemessen und beim Zusammensetzen der Starterbatterie nach ihren Innenwiderständen zusammengestellt wurden (alle 2,7mOhm).

Die elektronischen Bauteile waren alle richtig dimensioniert und hielten den Anforderungen stand. Im Startmoment und auch beim Aufladen ergaben sich keine Probleme der Elektronik, durch Ausfall oder zu hohe Temperaturen. Die Lithium-Eisen-Phosphat-Zellen verhielten sich beim Aufladen und auch beim Entladen sehr temperaturkonstant und erwärmten sich maximal um ca. 6°C. Das Laden der Zellen funktionierte wie erwartet, mit einem Strom von ca. 11A (siehe Abbildung 3.23), der durch die DC/DC-Wandler bereitgestellt wurde. Die Spannung der einzelnen Zellen stieg schnell an (siehe Abbildung 3.24) und wurde dann durch die Safety Unit ab dem eingestellten Spannungswert (3,65V) abgeschaltet und je nach eingestellter Hysterese wieder eingeschaltet. Die Abbildung 3.24 macht deutlich, dass der Strang 2 (Zelle 5) ohne eingestellte Hysterese zu stark aufgeladen wird und der Schutz durch die Safety Unit aufgehoben wird. Ein Problem trat auf, als versucht wurde, beim Laden alle Zellenspannungen (Zelle 5 bis 8) von dem Strang 2 aufzuzeichnen. Die Safety Unit schaltete immer wieder zu früh ab, obwohl die eingestellte Ladeschlussspannung noch nicht erreicht war. Auch bei erneuten Versuchen die Spannungen von Strang 1 (Zelle 1

bis 4) nochmal aufzuzeichnen, schaltete die Safety Unit immer wieder zu früh ab. Dieser Fehler konnte aus Zeitgründen nicht mehr geklärt werden.

Erfüllt wurde:

- Lithiumzellen wurden eingesetzt
- Erfahrung mit der Safety Unit wurde gesammelt
- Parallelschaltung der Stränge wurde realisiert
- Ein Ladekonzept für die Zellen wurde erstellt

Negativ war:

- Starterbatterie ist nicht wettbewerbsfähig
- Zu hohe Kosten
- Zu hoher Aufwand

Nicht erreicht wurde:

- Die Balancierung der Zellen

4.3 Kostenabschätzung der Starterbatterie in Serienproduktion

Die entstandenen Kosten für den Prototypen der Starterbatterie (siehe Tabelle 4.1 und 4.2) belaufen sich auf ca.1350,- Euro.

Für eine Serienproduktion würden viel geringere Materialkosten entstehen, die je nach Größe der aufgelegten Serie schwanken. In der Tabelle 4.2 ist zu sehen, wie viel die Starterbatterie heute in Einzelfertigung, heute in Serie mit einer Auflage von 100.000 bis zu 1 Million und bei einer heutigen optimierten Serie mit einer Auflage von 100.000 bis zu 1 Million kosten würde. In der rechten Spalte der Tabelle 4.3 ist eine zukünftige Serienproduktion angedacht, mit Zellen in einer Größenordnung von 50 Ah die im Verhältnis zu dem Preis noch niedriger liegen sollten als die heutigen 16Ah Zellen.

Auswertung und Fazit

	Anzahl	Einzelpreis €	Gesamtpreis €
Lithiumzellen 16Ah	8	29,90	239,20
Schaltregler TRACOPOWER TEP 150-2413WI	2	199,40	398,80
WIDERSTAND SOT-227 100W R002	2	35,08	70,16
MOSFET N SOT-227B	2	33,66	67,32
DIODE SCHOTTKY 2X80A 45V	2	25,34	50,68
Kfz-Sicherheits-Schalter 50 A 12 V	1	19,05	19,05
SCI Kfz-Kippschalter 30 A Grün 12 V	1	4,24	4,24
BNC-Einbaubuchse Chassisbuchse	8	3,36	26,88
PB Fastener Anschraubpuffer	4	2,86	11,44
Temperatursensor TS-NTC-103	2	2,71	5,42
FUSE HOLDER, IP68, 5X20MM	8	2,23	17,84
SICHERUNG 5X20 TRAEGE 100MA	8	0,55	4,40
LUEFTER 50X50X15MM 12VDC	2	9,09	18,18
Lüfter-Schutzgitter	2	1,28	2,56
Sicherung 6,3x32 mm 20 A Träge	1	3,10	3,10
Sicherungshalter 6,3 x 32 mm	2	1,67	3,34
Kühlkörper SK 47 Fischer Elektronik	2	17,11	34,22
Kfz-Kippschalter Beleuchtung 20 A	2	2,72	5,44

Tabelle 4.1: Kostenaufstellung des Prototypen der Starterbatterie Teil 1

Auswertung und Fazit

Leitungen	1	20,00	20,00
ANL Sicherung 150 A	2	2,99	5,98
Sicherungshalter SH 200	2	19,95	39,90
TI USB INTERFACE ADAPTER	1	54,75	54,75
Safety Unit BQ77910AEVM-001	2	46,27	92,54
Kabelschuhe, Ringkabelschuhe, Aderendhülsen, Gabelkabelschuhe, Flachsteckhülsen	1	20,00	20,00
Makrolonplatten	1	91,40	91,40
Batterieanschlusspole	2	15,00	30,00
Kleinmaterial, Schrauben, Muttern	1	15,00	15,00
Gesamtsumme vom Material der Starterbatterie ohne Arbeitszeit			<u>1351,84 €</u>

Tabelle 4.2: Kostenaufstellung des Prototypen der Starterbatterie Teil 2

Auswertung und Fazit

Material	heutige Einzelproduktion der Starterbatterie mit 16 Ah			heutige Serienproduktion der Starterbatterie mit 16 Ah		
	Anzahl	Einzel. €	Gesamt. €	Anzahl	Einzel. €	Gesamt. €
Gehäuse, Batterieanschlusspole, Leitungen und Kühlkörper	1	150	150	1	5	5
Zellen	8	30	240	8	10	80
Traco	2	200	400	2	10	20
Leistungsdiode	2	25	50	1	2	2
Leistungs-MOSFET	2	34	68	2	1,5	3
Shunt	2	35	70	2	2	4
Safety Unit	2	50	100	2	5	10
Gesamte Produktionskosten			1078,-			124,-
Material	heutige optimierte Serienproduktion der Starterbatterie mit 16 Ah			zukünftige optimierte Serienproduktion der Starterbatterie mit 50 Ah		
	Anzahl	Einzel. €	Gesamt. €	Anzahl	Einzel. €	Gesamt. €
Gehäuse, Batterieanschlusspole, Leitungen und Kühlkörper	1	5	5	1	5	5
Zellen	8	10	80	4	10	40
Traco	entfällt			entfällt		
Leistungsdiode	entfällt			entfällt		
Leistungs-MOSFET	2	1,5	3	2	0,5	1
Shunt	2	2	4	2	1	2
Safety Unit	2	5	10	2	2,5	5
Gesamte Produktionskosten			102,-			53,-

Tabelle 4.3: Kostenabschätzung der Starterbatterie in Serienproduktion, bei einer Auflage von 100.000 bis 1 Million Stück

4.4 Fazit

Ein erster Schritt in Richtung Lithium-Starterbatterie wurde gegangen. Die Messergebnisse, das Gewicht und die Größe der gebauten Starterbatterie sprechen dafür, dass man sich auf dem richtigen Weg befindet, um die schwere und veraltete Bleibatterie zu ersetzen. Um aus dem Nichts eine neue Starterbatterie zu konzipieren, mussten viele Parameter in der Vorüberlegung bedacht werden und eine Menge Recherche betrieben werden, um die im Laufe dieser Arbeit anfallenden Aufgaben zu bewerkstelligen. Es wurde aufgezeigt, dass die Lithiumtechnologie bereits so weit fortgeschritten ist, dass die übliche Bleibatterie in Fahrzeugen ersetzt werden könnte. Dadurch würde die Gewichtseinsparung zu einem verringerten Treibstoffverbrauch führen und durch die höhere Lebensdauer würde ein Austausch der Starterbatterie viel später erfolgen. Die gemessenen Ergebnisse geben Hinweise darauf, welche Schwachstellen noch in der neuen Technologie stecken und welche es noch zu beheben gilt. Im Laufe dieser Diplomarbeit unterzog sich die Lithium-Starterbatterie einem ständigen Entwicklungsprozess, um die bestmöglichen Ergebnisse zu erzielen. Die Starterbatterie auf Lithium-Eisen-Phosphat-Basis kann als erster Prototyp für eine neue Art von Starterbatterien verstanden werden, die noch eine Menge Forschungsbedarf hat, bevor an eine Serienfertigung gedacht werden kann. Durch diese Diplomarbeit wurden mir der Bereich der Elektrochemie und der Bereich der Akkumulatoren mit ihren spezifischen Anforderungen und Gegebenheiten näher gebracht. Auch die Elektronik und Leistungselektronik bzw. die Abläufe in einem Projekt wurden so besser verstanden. Insgesamt wurde durch diese Arbeit mein Wissen erweitert und meine Kenntnisse auf projektbezogene Arbeiten noch einmal verbessert.

5 FMEA (Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse) an der Starterbatterie

5.1 Methodik der FMEA

FMEA bedeutet: **F**ehler-**M**öglichkeiten- und **E**influss-**A**nalyse.

Es ist eine bewährte und in der Industrie eingesetzte Methode, um im Vorwege in der Erstellung eines Produktes möglichst viele bzw. alle Fehler zu erkennen und zu beheben, bevor eine Reklamation durch den Kunden entsteht. Für die Lithium-Starterbatterie wurde eine FMEA erstellt, um mögliche Fehlerquellen aufzuzeigen und im Fehlerfall die Störung schneller zu finden und zu beheben.

In der FMEA wird durch Kennzahlen in verschiedenen Bereichen eine RPZ (Risiko-prioritätszahl) bzw. RPN (Risk Priority Number) ermittelt z.B.:

- **Bedeutung der Funktion (Auswirkung auf den Kunden) = (Severity)**
von Note 1 (unwichtig) bis 10 (entscheidend)
- **Auftreten des Fehlers (Wahrscheinlichkeit des Auftretens) = (Occurrence)**
Von Note 1 (praktisch nie) bis 10 (sehr häufiges Auftreten)
- **Entdeckungswahrscheinlichkeit durch Prüfung im Werk = (Detection)**
Von Note 1 (immer) bis 10 (niemals)

Mit Hilfe der RPZ wird versucht, eine Reihenfolge (Rangfolge) der Fehler zu erstellen. Die RPZ mit dem höchsten Wert hat die höchste Priorität und muss als erstes beachtet werden. Die Risiko Prioritätszahl errechnet sich durch $B * A * E = RPZ$. Diese Definition lehnt an die Quellen [31] und [44] an.

5.2 Auswertung der FMEA der Starterbatterie

Bereits die Analyse der FMEA war wertvoll und brachte Erkenntnisse über die Fehlermöglichkeiten, die in der Produktion der Starterbatterie auftreten können. Die folgende Auswertung der FMEA der Starterbatterie zeigt Tendenzen an, wo die größten bzw. meisten Fehler in der Fertigung der Starterbatterie anfallen. Durch die Höhe der Risikoprioritätszahlen kann ersehen werden, wo in der Fertigung das größte Verbesserungspotential liegt. In diesem Fall wurde die höchste RPZ (160) für den Bereich Laden MOSFET hochohmig festgestellt und ist somit als erstes zu verbessern bzw. zu beheben (siehe Abbildung 5.1). Selbst diese hohe RPZ liegt nicht in einer

FMEA (Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse) an der Starterbatterie

Größenordnung die sehr gravierende permanent auftretende Fehler anzeigt. Erst ab einer RPZ von 200 spricht man von einer hohen Risikolage, die Abstellmaßnahmen erfordert.

In der Praxis haben sich folgende Grenzen für die Risikoprioritätszahl als Richtwerte für Maßnahmen bewährt:

- $RPZ < 50$ Risiko gering, keine Abstellmaßnahme erforderlich
- $50 < RPZ < 200$ mittlere Risikolage, genauere Untersuchung nötig und Entscheidung über Vorgehen im Team
- $200 < RPZ$ hohes Risiko, Abstellmaßnahmen erforderlich

Diese Definition ist entnommen aus Quelle [45].

Die ermittelten Werte liegen alle unterhalb der Risikoprioritätszahlgrenze von 200 und sind in den Bereichen von einem geringen bis mittleren Risiko. Anhand dieser Zahlen sieht man, dass das Anfertigen der Starterbatterie keine hohen Qualitätsprobleme beinhaltet und die meisten dieser ermittelten Fehler kaum auftreten bzw. Probleme entstehen lassen.

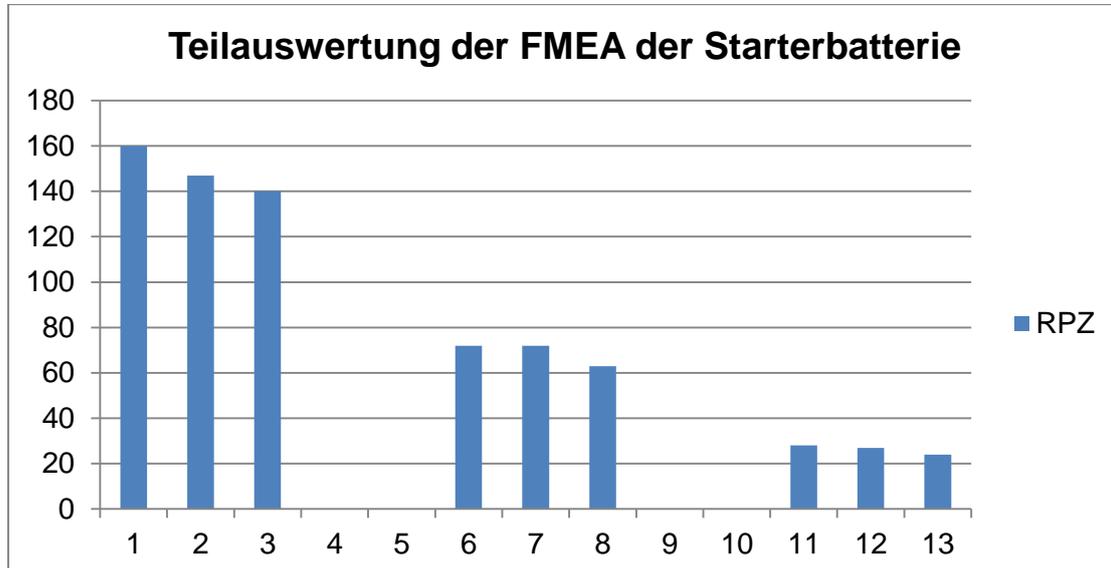


Abbildung 5.1: Teilauswertung der FMEA der Starterbatterie mit Auszügen der höchsten, mittleren und niedrigsten RPZ

FMEA (Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse) an der Starterbatterie

Die niedrigsten Risikoprioritätszahlen wurden beim Laden der Safety Unit ermittelt. Die befürchteten hohen Temperaturen beim Laden der Zellen wurden nicht bestätigt, allerdings wurden die Zellen nie in Grenzbereichen betrieben. Die maximale Temperaturerhöhung der Zellen lag bei ca. 6°C, dadurch befinden sich die Zellen in einem Temperaturbereich der unbedenklich ist und keine Kühlung erfordert. Nachfolgend die FMEA für die Starterbatterie: (Die Werte wurden geschätzt und müssen nach Erfahrung gegebenenfalls angepasst werden.)

FMEA (Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse) an der Starterbatterie

Funktion	Bauteil	Fehlerart	Fehlerfolge	Auftreten	Fehlerursache	Bedeutung	vorgesehene Prüfmaßnahmen	Entdeckung	RPZ
Laden	Traco (Enable)	nicht geschaltet	permanentes Laden	1	Kabelbruch	7	Kabelwiderstandsmessung	5	35
Laden	Traco (Enable)	nicht geschaltet	permanentes Laden	2	Generator-überwachung defekt	6	Generatorspannung messen	8	96
Laden	Traco (Enable)	geschaltet	kein Laden	2	Generator-überwachung defekt	8	Generatorspannung messen	8	128
Entladen	Mosfet	hochohmig	kein Starten	4	Safety Unit defekt	7	Ansteuerspannung am Treiber messen / Spannung vor und hinter dem Mosfet messen	3	84
Entladen	Mosfet	hochohmig	kein Starten	2	Mosfet defekt	7	Ansteuerspannung am Treiber messen / Spannung vor und hinter dem Mosfet messen	3	42
Entladen	Mosfet	hochohmig	kein Starten	2	Kabelbruch	7	Ansteuerspannung am Treiber messen / Spannung vor und hinter dem Mosfet am Kabel messen	2	28
Entladen	Mosfet	niederohmig	Kurzschluß des Mosfet	2	Safety Unit defekt	7	Ansteuerspannung am Treiber messen / Spannung vor und hinter dem Mosfet messen	3	42

FMEA (Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse) an der Starterbatterie

Funktion	Bauteil	Fehlerart	Fehlerfolge	Auftreten	Fehlerursache	Bedeutung	vorgesehene Prüfmaßnahmen	Entdeckung	RPZ
Entladen	Mosfet	niederohmig	Kurzschluß des Mosfet	2	Mosfet defekt	7	Ansteuerspannung am Treiber messen / Spannung vor und hinter dem Mosfet messen	3	42
Laden	Mosfet	hochohmig	kein Laden	3	Safety Unit defekt	7	Ansteuerspannung am Treiber messen / Spannung vor und hinter dem Mosfet messen	3	63
Laden	Mosfet	hochohmig	kein Laden	3	Mosfet defekt	7	Ansteuerspannung am Treiber messen / Spannung vor und hinter dem Mosfet messen	3	63
Laden	Mosfet	hochohmig	kein Laden	4	Kabelbruch	8	Ansteuerspannung am Treiber messen / Spannung vor und hinter dem Mosfet am Kabel messen	5	160
Laden	Mosfet	niederohmig	permanentes Laden	3	Safety Unit defekt	7	Ansteuerspannung am Treiber messen / Spannung vor und hinter dem Mosfet messen	3	63
Laden	Mosfet	niederohmig	permanentes Laden	3	Mosfet defekt	7	Ansteuerspannung am Treiber messen / Spannung vor und hinter dem Mosfet messen	3	63
Laden	Safety Unit	zu hohe Spannungswerte eingestellt	Überladung der Zellen	3	Programmierung falsche Werte übertragen	6	Register auslesen	4	72

FMEA (Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse) an der Starterbatterie

Funktion	Bauteil	Fehlerart	Fehlerfolge	Auftreten	Fehlerursache	Bedeutung	vorgesehene Prüfmaßnahmen	Entdeckung	RPZ
Laden	Safety Unit	zu niedrige Spannungswerte eingestellt	Zellen nicht vollständig aufgeladen	3	Programmierung falsche Werte übertragen	4	Register auslesen	4	48
Entladen	Safety Unit	zu hohe Spannungswerte eingestellt	Zellen nicht vollständig entladen	3	Programmierung falsche Werte übertragen	4	Register auslesen	5	60
Entladen	Safety Unit	zu niedrige Spannungswerte eingestellt	Zellen zu tief entladen	3	Programmierung falsche Werte übertragen	4	Register auslesen	4	48
Entladen	Safety Unit	zu hohe Stromwerte eingestellt	Zellen zu stark belastet	3	Programmierung falsche Werte übertragen	6	Register auslesen	4	72
Entladen	Safety Unit	zu niedrige Stromwerte eingestellt	Zellen nicht tief genug entladen	3	Programmierung falsche Werte übertragen	4	Register auslesen	4	48
Entladen	Safety Unit	Ansteuerung Mosfet defekt	kein Starten	3	Safety Unit defekt	7	Ansteuerspannung am Treiber messen	3	63
Entladen	Safety Unit	Ansteuerung Mosfet defekt	kein Starten	4	Kabelbruch	7	Ansteuerspannung am Treiber messen	5	140

FMEA (Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse) an der Starterbatterie

Funktion	Bauteil	Fehlerart	Fehlerfolge	Auftreten	Fehlerursache	Bedeutung	vorgesehene Prüfmaßnahmen	Entdeckung	RPZ
Laden	Safety Unit	Ansteuerung Mosfet defekt	permanentes Laden	3	Safety Unit defekt	5	Ansteuerspannung am Treiber messen	3	45
Entladen	Safety Unit	zu hohe Temperaturen der Zellen	kein Starten	2	defekter Temperatursensor	7	Temperatursensor / Widerstandsmessung	2	28
Entladen	Safety Unit	zu hohe Temperaturen der Zellen	kein Starten	3	zu hohe Umgebungstemperatur	7	Messen der Umgebungstemperatur	7	147
Laden	Safety Unit	zu hohe Temperaturen der Zellen	kein Laden	2	defekter Temperatursensor	6	Temperatursensor / Widerstandsmessung	2	24
Laden	Safety Unit	zu hohe Temperaturen der Zellen	kein Laden	3	zu hohe Umgebungstemperatur	2	Messen der Umgebungstemperatur	7	42
Entladen	Safety Unit	Anzeige der Safety Unit offene Zelle	keine Überwachung dieser Zelle	4	Kabelbruch	5	Auslesen der Safety Unit	5	100
Laden	Safety Unit	Anzeige der Safety Unit offene Zelle	keine Überwachung dieser Zelle	4	Kabelbruch	4	Auslesen der Safety Unit	5	80

FMEA (Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse) an der Starterbatterie

Funktion	Bauteil	Fehlerart	Fehlerfolge	Auftreten	Fehlerursache	Bedeutung	vorgesehene Prüfmaßnahmen	Entdeckung	RPZ
Entladen	Safety Unit	Ausfall der Safety Unit	kein Starten	4	Kabelbruch	7	Spannungen an den Ein und Ausgänge Safety Unit messen	5	140
Laden	Safety Unit	Ausfall der Safety Unit	kein Laden	4	Kabelbruch	7	Spannungen an den Ein und Ausgänge Safety Unit messen	5	140
Entladen	Lithium-Zelle	zu geringe Spannung an einer Zelle	kein Starten	2	Zellen zu tief entladen	7	Messen der Zellenspannung	3	42
Entladen	Lithium-Zelle	zu geringer Strom zum Starten	kein Starten	4	Kabelbruch	7	Messen der Strangspannung	5	140
Laden	Lithium-Zelle	zu hohe Spannung an einer Zelle	kein Laden	2	Zellen zu stark aufgeladen	5	Messen der Zellenspannung	5	50
Entladen	Lithium-Zelle	kein Ladestrom	kein Laden	4	Kabelbruch	5	Messen der Strangspannung	5	100
Entladen	Lithium-Zelle	zu hohe Temperaturen der Zellen	kein Starten	3	Zellen zu stark erhitzt	2	Messen der Zellentemperatur	7	42

FMEA (Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse) an der Starterbatterie

Funktion	Bauteil	Fehlerart	Fehlerfolge	Auftreten	Fehlerursache	Bedeutung	vorgesehene Prüfmaßnahmen	Entdeckung	RPZ
Laden	Lithium-Zelle	zu hohe Temperaturen der Zellen	kein Laden	3	Zellen zu stark erhitzt	2	Messen der Zellentemperatur	7	42
Entladen	Lithium-Zelle	zu niedrige Temperaturen der Zellen	kein Starten	3	Zellen zu stark abgekühlt	2	Messen der Zellentemperatur	7	42
Laden	Lithium-Zelle	zu niedrige Temperaturen der Zellen	kein Laden	3	Zellen zu stark abgekühlt	2	Messen der Zellentemperatur	7	42
	Lithium-Zelle	Beschädigung der Zellen	Änderung des Innenwiderstandes	3	Unsachgemäßer Transport	6	Sichten der Zellen	4	72
	Lithium-Zelle	Beschädigung der Zellen	Austreten des Elektrolyten	3	Unsachgemäßer Transport	6	Sichten der Zellen	4	72
Entladen	Lithium-Zelle	Beschädigung der Zellen	Zelle nimmt keinen Strom auf	3	Unsachgemäßer Transport	6	Sichten der Zellen	4	72
Laden	Lithium-Zelle	Beschädigung der Zellen	Zelle gibt keinen Strom ab	3	Unsachgemäßer Transport	7	Sichten der Zellen	4	84

FMEA (Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse) an der Starterbatterie

Funktion	Bauteil	Fehlerart	Fehlerfolge	Auftreten	Fehlerursache	Bedeutung	vorgesehene Prüfmaßnahmen	Entdeckung	RPZ
Entladen	Lithium-Zelle	unterschiedlich starke Spannungseinbrüche der einzelnen Zellen	schnellere Alterung der Batterie	5	unterschiedliche Innenwiderstände der Zellen	6	Messen des Innenwiderstandes durch Belastungstest	4	120
Laden	Lithium-Zelle	unterschiedlich starke Spannungsanstiege der einzelnen Zellen	Safety Unit schaltet den Ladestrom ab	5	unterschiedliche Innenwiderstände der Zellen	6	Messen des Innenwiderstandes durch Belastungstest	4	120
Laden	DC / DC-Wandler	keine Ausgangsspannung	kein Laden	3	defekte Sicherung	3	Widerstandsmessung der Sicherung	3	27
Laden	DC / DC-Wandler	Entladung der Bleibatterie	permanentes Laden	3	Generatorüberwachung defekt	4	Generatorspannung messen	9	108
Laden	DC / DC-Wandler	keine Ausgangsspannung	kein Laden	3	DC / DC-Wandler defekt	4	Ausgangsspannung vom Traco messen	4	48
Laden	DC / DC-Wandler	keine Ausgangsspannung	kein Laden	4	Kabelbruch	3	Ausgangsspannung vom Traco messen	5	60
Laden	Lüfter	keine Kühlung der Zellen	Überhitzung der Zellen	4	Kabelbruch	5	Probelauf	3	60

FMEA (Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse) an der Starterbatterie

Funktion	Bauteil	Fehlerart	Fehlerfolge	Auftreten	Fehlerursache	Bedeutung	vorgesehene Prüfmaßnahmen	Entdeckung	RPZ
Laden	Lüfter	keine Kühlung der Zellen	Überhitzung der Zellen	3	Lüfter defekt	5	Probelauf	3	45
Laden	Lüfter	keine Kühlung der Zellen	Überhitzung der Zellen	3	Ladeschalter defekt	5	Probelauf	3	45
Laden	Diode	kein Ladestrom	kein Laden	3	Diode hochohmig	6	Spannungsmessung vor und hinter der Diode	4	72
Laden	Diode	zu hohe Ladespannung	zu hohe Spannung an den Zellen	3	Diode niederohmig	5	Spannungsmessung vor und hinter der Diode	7	105
Laden	Diode	kein Ladestrom	kein Laden	4	Kabelbruch	6	Spannungsmessung am Kabel vor und hinter der Diode	5	120
Entladen	Diode	kein Entladestrom	kein Starten	3	Diode hochohmig	7	Spannungsmessung vor und hinter der Diode	3	63
Entladen	Diode	Ausgleichsströme in den anderen Strang	Beschädigung der Zellen in dem anderen Strang	3	Diode niederohmig	5	Spannungsmessung vor und hinter der Diode	7	105

FMEA (Fehler-Möglichkeits- und Einfluss-Analyse) an der Starterbatterie

Funktion	Bauteil	Fehlerart	Fehlerfolge	Auftreten	Fehlerursache	Bedeutung	vorgesehene Prüfmaßnahmen	Entdeckung	RPZ
Entladen	Diode	kein Entladestrom	kein Starten	4	Kabelbruch	7	Spannungsmessung am Kabel vor und hinter der Diode	5	140
Entladen	Shunt	kein Entladestrom	kein Starten	2	Shunt hochohmig	7	Widerstandsmessung des Shunts	3	42
Entladen	Shunt	kein Entladestrom	kein Starten	4	Kabelbruch	7	Widerstandsmessung der Shunt-Anschlusskabel	3	84
Entladen	Shunt	keine Strommessung im Strang	keine Stromüberwachung des Stranges	4	Kabelbruch	5	Widerstandsmessung der Shunt-Messkabel	5	100
Laden	Shunt	keine Strommessung im Strang	keine Stromüberwachung des Stranges	4	Kabelbruch	5	Widerstandsmessung der Shunt-Messkabel	5	100
Laden	Shunt	kein Ladestrom	kein Laden	2	Shunt hochohmig	4	Widerstandsmessung des Shunts	5	40
Laden	Shunt	kein Ladestrom	kein Laden	4	Kabelbruch	4	Widerstandsmessung der Shunt-Anschlusskabel	5	80

FMEA (Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse) an der Starterbatterie

Funktion	Bauteil	Fehlerart	Fehlerfolge	Auftreten	Fehlerursache	Bedeutung	vorgesehene Prüfmaßnahmen	Entdeckung	RPZ
Entladen	Haupt-sicherung	kein Entladestrom	kein Starten	3	Sicherung defekt	5	Widerstandsmessung der Sicherung	2	30
Entladen	Haupt-sicherung	kein Entladestrom	kein Starten	4	Kabelbruch	7	Widerstandsmessung der Sicherung-Anschlusskabel	3	84
Entladen	Haupt-schalter	kein Entladestrom	kein Starten	3	Hauptschalter defekt	8	Widerstandsmessung des Hauptschalters	2	48
Entladen	Haupt-schalter	kein Entladestrom	kein Starten	4	Kabelbruch	7	Widerstandsmessung der Hauptschalter-Anschlusskabel	3	84

6 Ausblick

Im Bereich der Starterbatterie auf Lithium-Eisen-Phosphat-Basis sind noch zahlreiche Verbesserungen möglich, deren Realisierung in einer einzigen Abschlussarbeit aus Zeitgründen nicht möglich ist. Im Nachfolgenden sollen ein paar dieser Verbesserungen genannt werden, um bei den nächsten Abschlussarbeiten im Vorwege Berücksichtigung zu finden.

Eine wichtige Verbesserung wäre, die Zellen zu Balancieren¹² (siehe Abbildung 6.1), damit ein Ausgleich des Ladezustandes erfolgen kann. Die verwendete Safety Unit besitzt eine Balancierung (Passiv), allerdings ist diese auf maximal 8 Stunden und maximal 50mA begrenzt (also insgesamt 400mAh). Bei der Starterbatterie sind diese Größenordnungen zu gering, um die Zellen sinnvoll zu Balancieren.

Am sinnvollsten wäre es, die Zellen aktiv zu Balancieren, damit die vorhandenen Kapazitäten der Zellen besser genutzt werden können. Das Balancieren kann während des Ladens im Ruhezustand und auch während des Entladens stattfinden.

Die Größe des Starterbatteriegehäuses orientierte sich an handelsüblichen Bleibatterien, da sie diese im Fahrzeug ursprünglich ersetzen sollte. Allerdings ist für einen Prototyp einer neuen Starterbatterie das Gehäuse zu klein gewählt worden, da im Nachhinein viele zusätzliche Bauteile im und am Gehäuse eingeplant wurden. Im Gehäuse ist zu wenig Platz, um an alle Kontakte für die Messungen heran zu kommen und um die Verdrahtung einfacher zu realisieren.

Für Ladeströme in diesen Dimensionen werden keine Lüfter im Gehäuse benötigt, da sich die Zellen um maximal 6°C erwärmen. Die Entladeströme sind von der Erwärmung auch unkritisch und benötigen ebenfalls keine Kühlung. Bei Entwicklung einer neuen Starterbatterie mit höheren Lade- bzw. Entladeströmen, sollte aber die Temperaturerwärmung der Zellen bedacht werden und gegebenenfalls für eine Temperaturabkühlung gesorgt werden.

¹² Balancieren bedeutet, dass die Zellen die voller sind als die anderen, entweder einen Strom durch einen Widerstand schicken (Passive Balancierung), um einen Teil ihrer Kapazität wieder abzubauen, oder dass die voller geladene Zelle die weniger geladene Zellen lädt (Aktive Balancierung).

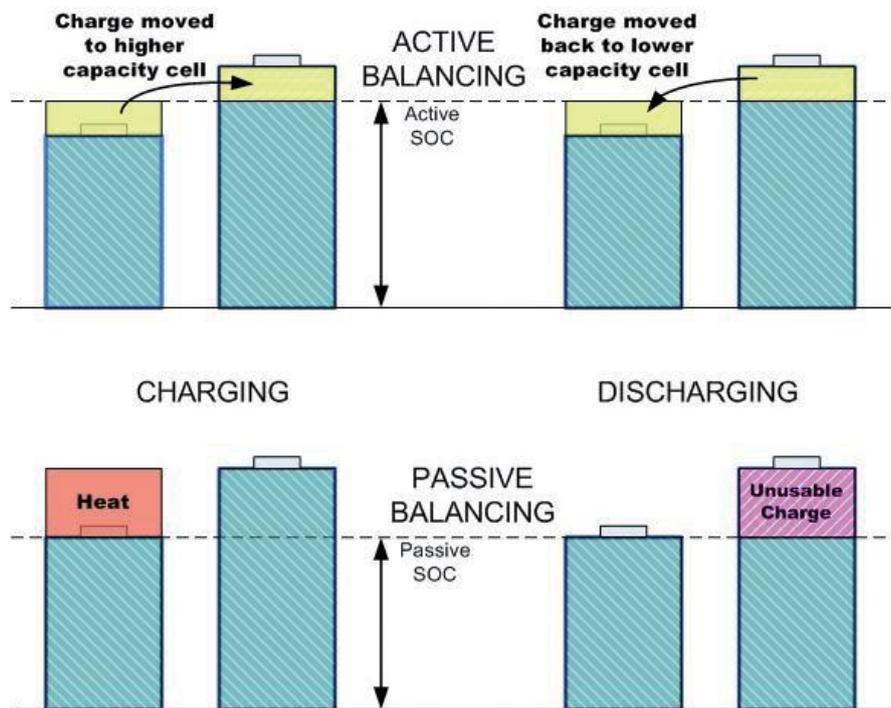


Abbildung 6.1: Passiver und aktiver Ladungsausgleich in der Gegenüberstellung (SOC = State of charge ist ein Kennwert für den Ladezustand von Akkus) [30]

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	: Abbildung
bzw.	: beziehungsweise
bzgl.	: bezüglich
d.h.	: das heißt
etc.	: et cetera
ggf.	: gegebenenfalls
s.	: siehe
S.	: Seite
Sp.	: Spalte
Tab.	: Tabelle
u.a.	: unter anderem
u.Ä.	: und Ähnliches
vgl.	: vergleiche
z.B.	: zum Beispiel
z.T.	: zum Teil

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: ADAC Pannenstatistik 2010 [1.1]	1
Abbildung 1.2: Lithium-Stücke in Paraffinöl zum Schutz vor Oxidation [1.2].....	4
Abbildung 1.3: Periodensystem der Elemente [2].....	5
Abbildung 1.4: Elementares Lithium bildet an der Luft langsam dunkles Lithiumnitrid [3] ..	6
Abbildung 1.5: weltweiter Lithiumbedarf für Batterien und andere Zwecke seit 1990 in Tonnen pro LCE [4]	7
Abbildung 1.6: Aufteilung des Bedarfs an Lithium auf Anwendungsbereiche (United States Geological Survey 2010) [5].....	8
Abbildung 1.7: Kennzeichnung von Lithium-Ionen-Akkus [12].....	10
Abbildung 1.8: Elektrochemische Spannungsreihe für einige Elemente [6].....	10
Abbildung 1.9: Vergleich der Leistungs- und Energiedichten einiger Energiespeicher [17]	13
Abbildung 1.10: Lithium-Systeme im Vergleich zu anderen bekannten Batteriesystemen [10]	13
Abbildung 1.11: Lithium-Ionen-Akku: Die Lithium-Ionen-Technologie besitzt im Vergleich zu den herkömmlichen Akkus wie NiCd oder NiMH die höchste spezifische Energie. (Quelle: Varta) [11]	16
Abbildung 1.12: Schematischer Aufbau einer Lithium-Ionen-Zelle (positive Elektrode: LiCoO ₂ ; negative Elektrode: Li-Graphit) [9]	18
Abbildung 1.13: Eisblumen an einer Fensterscheibe, als Beispiel für eine dendritische Form [16]	20
Abbildung 1.14: Lade- und Entladekurve eines Lithium-Eisen-Phosphat-Akkus 26650HP- Fe [27]	22
Abbildung 1.15: Entladekurven bei unterschiedlich starken Entladeströmen 26650HP-Fe [27]	23
Abbildung 1.16: Aufbau eines Lithium-Polymer-Akkumulators (Coffee Bag) [21]	25
Abbildung 1.17: Beispiel für einen Lithium-Polymer-Akkumulator [22].....	26
Abbildung 1.18: Bauformen von verschiedenen Lithium-Akkumulatoren [23], [24]	26
Abbildung 1.19: Abhängigkeit der Energiedichte und Leistungsdichte von der Bauform [28]	27
Abbildung 2.1: Verschaltungskonzepte der einzelnen Zellen	30
Abbildung 2.2: Ladekonzepte der Zellen für den Entwurf 3	31
Abbildung 2.3: Diode 80EPF02 423XA mit Kühlkörper und Anschlussleitungen für den Versuchsaufbau.....	33
Abbildung 2.4: Spannungsabfall 0,7V über der Leistungsdiode 80EPF02 423XA bei einem Stromfluss von ca. 10A	33

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.5: Diagramm zu dem Temperaturverlauf der Diode 80EPF02 423XA bei verschiedenen Stromstärken	34
Abbildung 2.6: Versuchsaufbau für den kleinen Schaltregler mit Messgeräten	35
Abbildung 2.7: Platine des kleinen DC/DC-Wandler mit Anschlüssen für den Versuchsaufbau.....	36
Abbildung 2.8: Temperaturverlauf des Schaltreglers bei einer Erhöhung des Stromes ...	37
Abbildung 2.9: Schaltplan für den Aufbau der Starterbatterie mit Fahrzeug Peripherie und Fahrzeugelektrik. Eine zweite Stützbatterie für die Versorgung der Fahrzeugelektronik wurde im Fahrzeug belassen. Der Bereich innerhalb der gestrichelten Linie entspricht der Starterbatterie.	39
Abbildung 2.10: Schaltplan für den Aufbau der Starterbatterie mit Fahrzeug Peripherie und Fahrzeugelektrik. Ohne zweite Stützbatterie sondern mit einer Diode die die Versorgung der Fahrzeugelektronik übernimmt. Der Bereich innerhalb der gestrichelten Linie entspricht der Starterbatterie.	40
Abbildung 2.11: Schaltplan für den Aufbau der Starterbatterie mit Fahrzeug Peripherie und Fahrzeugelektrik. Mit zweiter Stützbatterie für die Versorgung der Fahrzeugelektronik und einem Hauptschalter für das Entladen. Der Ladekreis hat ebenfalls einen Hauptschalter und kann durch Schalter an den Enableeingängen pro Strang geschaltet werden.....	42
Abbildung 2.12: Die realisierte Version des Schaltplans für die Starterbatterie mit den Anschlüssen an die Safety Unit und den externen Bauteilen der Leistungselektronik, hier erfolgt die Darstellung von einem Strang	48
Abbildung 2.13: Entwurf des Gehäuses der Starterbatterie mit Deckel und Boden aus Aluminium und Seitenteilen aus Acryl. Die Lüftungsschlitze werden durch Einsetzen kleinerer Platten als die Gesamtbreite an allen vier Seiten realisiert	49
Abbildung 2.14: Realisierter Entwurf des Gehäuses der Starterbatterie mit allen Teilen aus Makrolon und Realisierung der Belüftung des Gehäuses durch Lüftungslöcher	50
Abbildung 2.15: Lithiumzellen und Gehäuse mit Inventor Autodesk (Auto-CAD) erstellt und so die Maßhaltigkeit und Passgenauigkeit der Makrolonplatten bzw. vorgesehenen Löcher und Gewinde überprüft (Technische Zeichnungen siehe Anhang)	51
Abbildung 3.1: Überprüfung des Gehäuses und der Gewindebohrungen auf Maßhaltigkeit und Passgenauigkeit.....	52
Abbildung 3.2: Bearbeitung der Makrolonplatten und des Kühlkörpers für die Positionierung, Befestigung und Verdrahtung der einzelnen Bauteile und elektronischen Komponenten	53
Abbildung 3.3: Gehäuse der Starterbatterie mit positionierten Bauelementen und Batterieanschlusspole.....	54
Abbildung 3.4: Starterbatteriegehäuse mit eingesetzten Lithium-Eisen-Phosphat-Zellen, bestückten Gehäuseplatten und Kühlkörper sowie verdrahteten Bauteilen	54
Abbildung 3.5: Fertiges Model der Starterbatterie mit zusätzlichem Temperatursensor an den Zellen.....	55

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3.6: Rückseite vom Kühlkörper der Starterbatterie mit montierten elektronischen Bauteilen (1. Diode, 2. MOSFET, 3. Shunt).....	56
Abbildung 3.7: Rückseite der Safety Unit im Auslieferungszustand.....	56
Abbildung 3.8: Vorderseite der Safety Unit im Auslieferungszustand mit Wake Up Widerstand	57
Abbildung 3.9: Vorderseite der Safety Unit nach Modifikationen im Laufe der Schaltungsentwicklung	58
Abbildung 3.10: Ausschnitt aus dem Schaltbild der Safety Unit BQ 77910 (Texas Instruments) mit eingezeichneten Änderungen an der Platine bzw. dem Schaltbild [32].	59
Abbildung 3.11: Inbetriebnahme der Starterbatterie, links das Herstellen der Verbindungen der einzelnen Lithium-Eisen-Phosphat-Zellen und mittig Programmierung der Werte für die Safety Unit.....	60
Abbildung 3.12: Bildschirmanzeige Programmierprogramm von der Safety Unit.....	61
Abbildung 3.13: Abschaltzeit des Entlade-MOSFETs bei Kurzschluß (100ms)	62
Abbildung 3.14: Abschaltzeit des Entlade-MOSFETs bei Überlast (2000ms).....	63
Abbildung 3.15: Versuchsaufbau am Fahrzeug für die Aufzeichnungen der Spannungen und Ströme im Startmoment und dem Ladeschaltungsfunktionstest.....	64
Abbildung 3.16: Anschluss der Starterbatterie am Fahrzeug mit Kupferadapterbolzen und Starterbatterieladeanschlussleitung	64
Abbildung 3.17: Fehlersuche in der Ladeschaltung im Labor. Um die hohen Ladeströme zu realisieren wurde eine Bleibatterie mit 100Ah zum Aufladen benutzt	65
Abbildung 3.18: Stromverlauf beim Motorstarten von beiden Strängen (die Verläufe sind weitgehend übereinstimmend)	66
Abbildung 3.19: Spannungsverlauf von Strang 1 beim Starten	67
Abbildung 3.20: Spannungsverlauf von Strang 2	68
3.21: Strom und Spannungsverlauf von beiden Strängen mit gegenseitiger Beeinflussung der Schaltregler durch falsch angeschlossene Masse an den Batteriezellen. Die Abbildung stellt eine Fehlfunktion da, die später behoben wurde, siehe Kapitel 3.5 Seite 66	69
Abbildung 3.22: Stromverlauf bei zu gering aufgeladener Bleibatterie als Quelle zum Laden (Geräuschentwicklung nach ca. 400s). Fehlersituation in Kapitel 3.5 Seite 65 diskutiert.....	70
Abbildung 3.23: Stromverlauf beim Ladevorgang. Strang 1 mit eingestellter Hysterese von 200mV und Strang 2 ohne eingestellte Hysterese bis zum Wiedereinschalten des Lade-MOSFETs der Safety Unit. Stromeinbrüche entstehen durch das automatische Abschalten der Stromzangen.....	71
Abbildung 3.24: Spannungswerte von Strang 1 der Zellen 1 bis 4 und Strang 2 der Zelle 5. Aufladen von beiden Strängen bis zum Abschalten durch die Safety Unit (Überschreiten der eingestellten Ladeschlussspannung von 3,65V)	72
Abbildung 4.1: Fertige Lithium-Starterbatterie ohne Schutzfolien auf dem Makrolongehäuse	74

Abbildung 5.1: Teilauswertung der FMEA der Starterbatterie mit Auszügen der höchsten, mittleren und niedrigsten RPZ.....	82
Abbildung 6.1: Passiver und aktiver Ladungsausgleich in der Gegenüberstellung (SOC = State of charge ist ein Kennwert für den Ladezustand von Akkus) [30]	95

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1: Verschiedene Lithium-Ionen-Akku Materialien und die dazu gehörenden Kapazitäten [15], [18], [19]	12
Tabelle 1.2: Verschiedene Lithium-Ionen-Akku Materialien und die dazu gehörenden Spannungen [15]	14
Tabelle 1.3: Bauformen von verschiedenen Lithium-Batterien [20].....	24
Tabelle 2.2.1: Temperaturverlauf der Diode 80EPF02 423XA bei verschiedenen Stromstärken	34
Tabelle 2.2: Temperatur, Spannung und Stromverlauf des kleinen Schaltreglers bei verschiedenen Belastungen.....	36
Tabelle 2.3: Vergleich der Safety Units	44
Tabelle 2.4: Zusammenfassung des erfassbaren Spannungsbereichs und der Ansprechzeiten der Safety Unit mit den einstellbaren Bereichen Low und High sowie Slow und Fast [33]	45
Tabelle 4.1: Kostenaufstellung des Prototypen der Starterbatterie Teil 1	77
Tabelle 4.2: Kostenaufstellung des Prototypen der Starterbatterie Teil 2	78
Tabelle 4.3: Kostenabschätzung der Starterbatterie in Serienproduktion, bei einer Auflage von 100.000 bis 1 Million Stück.....	79

Quellenverzeichnis

[1.1] : www.adac.de (06.03.2012)

[1.2] : http://de.wikipedia.org/wiki/Lithium#cite_note-15 (20.05.2012)

[2] : <http://de.wikipedia.org/wiki/Periodensystem> (20.05.2012)

[3] : <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Lithiumnitrid.jpg&filetimestamp=20110720171842> (20.05.2012)

[4]: <http://www.rohstoff-welt.de/news/artikel.php?sid=27459> (20.05.2012)

[5] : http://www.zsw-bw.de/fileadmin/ZSW_files/Infoportal/Informationsmaterial/docs/Risikoanalyse%20Lithium_05_08_2010.pdf (20.05.2012)

[6] : <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/Elektrochemische-Spannungsreihe.html> (20.05.2012)

[7] : <http://www.varta-automotive.de/index.php?id=515&artikelNr=5454120403122&application=PKW&modellinetype=4613> (21.02.2012)

[8] : <http://shop.lipopower.de/LiNANOZ-16-Ah-32V-10C-Headway-40160SE> (20.05.2012)

[9] : [http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Li-Ion-Zelle_\(CoO2-Carbon,_Schema\).svg&filetimestamp=20090816163639](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Li-Ion-Zelle_(CoO2-Carbon,_Schema).svg&filetimestamp=20090816163639) (20.05.2012)

[10] : <http://www.aktuelle-wochenschau.de/2006/woche18b/wochenschau18b.html> (20.05.2012)

[11] : http://www.tecchannel.de/_misc/img/detail.cfm?pk=337561&fk=455661&id=il-76263804515454055 (21.02.2012)

[12] : <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/Lithiumionen-Akku-LiIon-lithium-ion.html> (20.05.2012)

[13] : <http://www.kosmos.ch/toshiba/Akkus/Li-Ionen%20Akkus%20%20Der%20richtige%20Umgang.htm> (20.05.2012)

Quellenverzeichnis

[14] : <http://de.wikipedia.org/wiki/Energie> (20.05.2012)

[15] : <http://de.wikipedia.org/wiki/Lithium-Ionen-Akkumulator> (21.02.2012)

[16] : <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/de/thumb/0/07/Dendriten.jpg/220px-Dendriten.jpg> (20.05.2012)

[17] : <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/cd/Energiespeicher2.svg/1000px-Energiespeicher2.svg.png> (20.05.2012)

[18] : http://www.haf.ch/images/2010_10_Batterien.pmd.pdf (20.05.2012)

[19] : <http://www.autobild.de/artikel/stromkasten-batterie-der-zukunft-2322603.html> (20.05.2012)

[20]: <http://www.elektroauto-tipp.de/modules.php?name=Battlithium&file=lithium3> (20.05.2012)

[21] : http://wiki.zimt.uni-siegen.de/fertigungsautomatisierung/index.php/Lithium-Ionen-Batterien_f%C3%BCr_Elektroautos_von_morgen_%E2%80%93_Zellenkonzepte_und_ihre_Herausforderungen_an_die_Fertigungstechnologien (20.05.2012)

[22] : <http://www.lipolbattery.de/image/polymer%20cell.JPG> (21.02.2012)

[23] : <http://www.sanyo-component.com/> (21.02.2012)

[24] : http://panasonic.net/energy/secondary_battery/index.html (20.05.2012)

[25] : David Linden und Thomas B. Reddy, " Handbook of Batteries 3rd Edition," McGraw-Hill Handbooks, 2002

[26] : http://de.wikipedia.org/wiki/K%C3%BChlk%C3%B6rper#_Dimensionierung_.26_Berechnung (01.05.2012)

[27] : BAK, Datasheet International Tianjin Limited Specification for Lithium-ion Rechargeable Cell26650HP-Fe

Quellenverzeichnis

[28] : Natalia Bramnik und Kristian Nikolowski, „Wiederaufladbare Lithium-Batterien,“
Praktikumsversuch, TU Darmstadt FB Materialwissenschaft FG Strukturforschung, SS06

[29] : Felix Andre, „Modellierung einer Li-Ionen Batterie für Hybridfahrzeug-Simulationen,“
kleines Projekt, Technische Universität Berlin Fakultät IV – Elektrotechnik und Informatik,
22. Oktober 2008

[30] : Jack Marcinkowski, „Aktiver Ladungsausgleich bei Lithium-Ionen-Akkusätzen,“
Automobil-Elektronik, Oktober 2010

[31] : <http://de.wikipedia.org/wiki/FMEA> (15.05.2012)

[32] : http://www.ti.com/ww/de/?DCMP=TI_Germany&HQS=Other+OT+de (19.05.2012)

[33] : www.ti.com (21.02.2012)

[34] : International Rectifier, Datasheets Diode Vishay 80 EPF 02 Gehäuseart TO 247,
<http://www.irf.com>

[35] : Tracopower, Datasheets DC/DC-Wandler TEN 25 Serie, www.traco-electronic.de

[36] : Ohmite, Datasheets TGHGCR0020FE WIDERSTAND SOT-227, www.ohmite.com

[37] : STMicroelectronics, Datasheets STPS16045TV Diode Schottky, <http://www.st.com>

[38] : STMicroelectronics, Datasheets STE250NS10 MOSFETN Kanal, <http://www.st.com>

[39]:Tracopower, Datasheets DC/DC-Wandler TEP 150-2413WI, www.traco-electronic.de

[40] : Texas Instruments, Datasheets BQ 77910, www.ti.com

[41] : Texas Instruments, Datasheets BQ 76 PL 536, www.ti.com

[42] : Texas Instruments, Datasheets BQ 24630, www.ti.com

[43] : Linear, Datasheets LTC6802-1, www.linear.com

Quellenverzeichnis

[44] : <http://www.meistersite.de/pdfs/methodenkoffer/FMEA.pdf> (26.05.2012)

[45] : Andreas Theis, „Die FMEA Erfolgsfaktor einer risikobasierten Instandhaltung,“ Präsentation, Institut für Instandhaltung und Korrosionsschutztechnik IFINKOR gGmbH Institut an der Fachhochschule Südwestfalen DKIN Fachkongress, 23.11.2007