

BEUTH HOCHSCHULE FÜR TECHNIK BERLIN
University of Applied Sciences

Fachbereich VII - Elektrotechnik - Mechatronik – Optometrie

Implementierung eines Batteriemanagement Systems in einem
Elektroauto kleiner Leistung und Entwicklung/Realisierung
eines Energiemanagement Systems

Bachelorarbeit

Von

Alexander Wegner

Zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Engineering (B.Eng.)

Im Studiengang
Elektronische Systeme

Matrikelnummer: 779563

Betreuer: Dipl.-Ing. Gregor Petsch
Siemens AG

Gutachter: Prof. Dr.-Ing Detlef Heinemann
Beuth Hochschule für Technik Berlin

Abgabetermin: 23. Oktober 2012

Ehrenwörtliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die eingereichte Bachelorarbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich versichere ferner, dass ich diese Bachelorarbeit bisher weder im In- noch im Ausland in irgendeiner Form als wissenschaftliche Arbeit vorgelegt habe.

Datum

Unterschrift

Inhaltsangabe

1	Einleitung	6
1.1	Motivation	6
1.2	Ziel und Aufbau der Arbeit	7
1.3	Danksagung	8
2	Chemische Energiespeicher.....	9
2.1	Batterien.....	11
2.2	Akkumulatoren allgemein.....	11
2.2.1	Begriffserklärungen.....	11
2.3	Lithiumakkumulatoren	15
2.3.1	Funktionsprinzip.....	16
2.3.2	Bauformen	17
2.3.3	Eigenschaften	18
2.3.4	Sicherheit	18
2.4	Lithium-Eisenphosphat (LiFePO ₄).....	20
2.4.1	Technische Spezifikationen von LiFePO ₄ Akkus.....	20
2.4.2	Kennlinien	21
2.4.3	Vorteile	21
2.4.4	Nachteile	22
2.5	Akkumulatorenarten ohne Lithium	22
3	Batteriemanagement / Energiemanagement.....	26
3.1	Sicherheit	27
3.1.1	Sicherung	27
3.1.2	Motorfreigabe	27
3.2	Batterie Modul Controller	28
3.3	Batteriemanagement System.....	29
3.4	Systemarchitekturen	29
3.4.1	Modulare Architektur.....	30
3.4.2	Zentrale Architektur	31
3.4.3	Dezentrale Architektur	32
3.5	Strommessung	33
3.6	Zellsymmetrierung	35
3.7	Ladezustandsbestimmung	38
3.7.1	State of Charge Bestimmung und Methoden	38
3.7.2	Direktmessung	39
3.7.3	Coulomb-Zählung	40
3.7.4	Open-circuit Voltage	40
3.7.5	Kalman Filter.....	41



3.7.6	Artificial Neural Network	41
4	Kommunikation im Auto.....	42
4.1	CAN Funktionsweise.....	43
4.2	CAN Frame	46
5	Umsetzung des Batteriemanagement Systems	47
5.1	Ausgangszustand.....	48
5.1.1	Systemstruktur.....	48
5.1.2	Motor.....	49
5.1.3	Motorsteuerung.....	49
5.1.4	Gaspedal.....	50
5.1.5	Batterien.....	50
5.1.6	Hauptschütz und Sicherung.....	51
5.1.7	Ladegerät.....	51
5.2	Anforderungen	52
5.3	Zielstruktur.....	52
5.4	Stromwandler mit CAN Knoten	55
5.4.1	Stromlaufplan.....	57
5.4.2	Programmablauf	58
5.4.3	Programmeinstellungen.....	59
5.4.4	Anschlüsse.....	61
5.5	Batterie Modul Controller	62
5.5.1	BMC Stromlaufplan.....	63
5.5.2	BMC Layout	65
5.5.3	Software	66
5.5.4	Verkabelung und Anschlüsse	68
5.5.5	CAN-Kommunikation mit dem Batteriemangement System.....	71
5.6	Batteriemanagement System.....	72
5.6.1	Hardware	72
5.6.2	Anschlüsse.....	76
5.6.3	Visualisierung.....	78
5.6.4	Kommunikation mit der VCU	82
5.6.5	Software	84
5.6.6	Schütztreiber	95
5.6.7	Sicheres Laden und Entladen.....	96
5.7	Einbau	97
5.7.1	Batterietrog	97
5.7.2	BMC und BMS	98
5.7.3	CAN Nachrichtenübersicht	99
6	Fazit	100
7	Anhang	101



8	Abkürzungen.....	102
9	Einheiten.....	103
10	Abbildungsverzeichnis.....	104
11	Formelverzeichnis	107
12	Tabellenverzeichnis.....	107
13	Quellen	108



1 Einleitung

1.1 Motivation

Im Zuge der Energiewende in Deutschland wird versucht eine nachhaltige Energieversorgung zu realisieren. Dabei werden sämtliche Sektoren der Energiewirtschaft betrachtet, Strom, Wärme und Mobilität.

Neben den herkömmlichen fossilen Energieträgern, wie Kohle, Gas und der umstrittenen Kernenergie, wird sich nun hauptsächlich auf erneuerbare Energien, wie Windenergie, Biomasse, Wasserkraft, Sonnenenergie und Geothermie fokussiert.

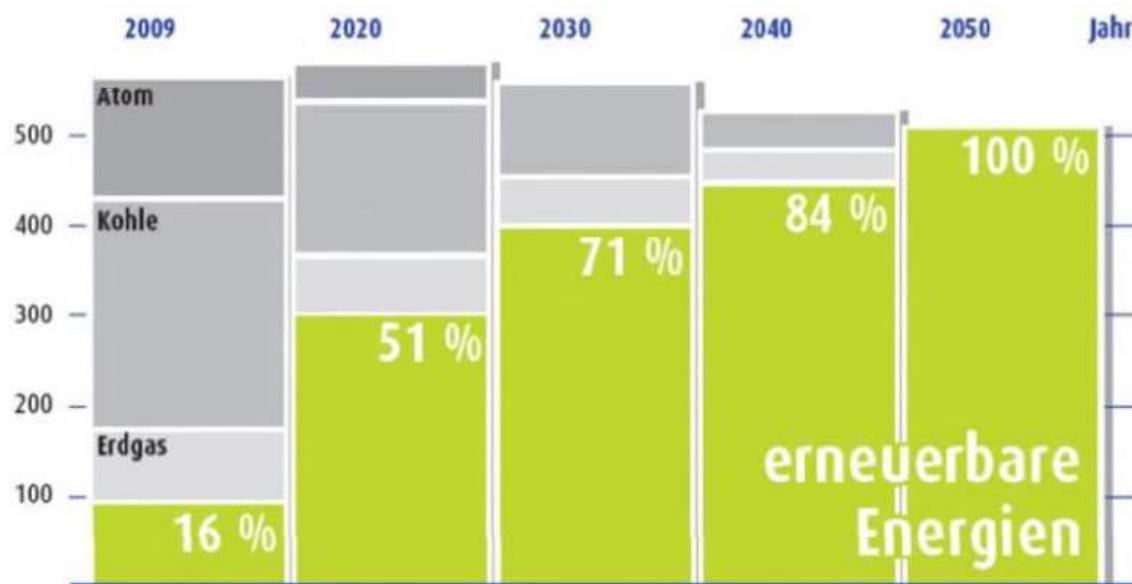


Abbildung 1: Brutto-Stromerzeugung in Tera Wh der zukünftigen Energiemixe [EneMana12]

Eine große Herausforderung hierbei ist es, die gewonnene Energie zu verteilen, da gerade die vielversprechenden alternativen Energiequellen, wie Wind- und Sonnenenergie, lokale Abhängigkeiten aufzeigen. So bläst der Wind stärker im Norden und die Sonne scheint länger und intensiver im Süden.

Eine Lösung für dieses Problem ist der Ausbau des Stromnetzes in Deutschland, um den Transport und die Verteilung der elektrischen Energie zu gewährleisten. Einen Schritt weiter geht hier die Idee des Smart Grids, das intelligente Stromnetz. Es umfasst nicht nur die Verteilung der Energie, sondern auch die kommunikative Vernetzung. Es wird versucht, Energieerzeuger, Verbraucher und Speicher zu vernetzen, um bestmöglich Bedarfe und Erzeugung von Energie abzuschätzen und steuern zu können.



Überschüssige Energie wird gespeichert, um bei Energiebedarf und Lastspitzen genutzt werden zu können. So ist es möglich am Tag produzierte Sonnenenergie in Form von Wärme und Elektrizität am Abend und in der Nacht zu nutzen.

Momentan kann jederzeit und an jedem Ort Energie erzeugt werden. Durch ein kompliziertes System aus Pipelines, Wasserstraßen und Gleisen können herkömmliche Energieträger wie Kohle und Gas überall hin transportiert werden. Die Kraftwerke können ohne Unterbrechung Tag und Nacht elektrische Energie erzeugen.

Die Problematik bei erneuerbaren Energiequellen, wie Wind und Sonne, ist eine andere. Die Erzeugung der Energie findet lokal und zeitlich begrenzt statt und bedarf daher optimalerweise einer Form der Speicherung. Möglich wäre es hierbei Wärme in Salzen zu speichern und Elektrizität in Form von Potentialenenergie (Wasserpumpspeicherwerk) oder chemischer Energie in Batterien.

Der Sektor Mobilität setzt auf chemische Speicher für die Speicherung von elektrischer Energie. Namhafte Automobilhersteller wie VW, BMW, Opel, Chevrolet und Mitsubishi zeigen mit ihren elektrisch angetriebenen Automobilen, wie die Zukunft aussehen könnte.

Die Designs der Karosserie reichen von klassisch bis futuristisch modern, jedoch ist das Antriebskonzept das Gleiche. Ein elektrischer Motor wird durch eine Traktionsbatterie, derzeit meist ein Lithiumderivat, versorgt.

Im Rahmen von Smart Grid fungiert das Elektroauto nicht nur als Fortbewegungsmittel, sondern viel mehr als Energiespeicher. Hierfür kann beispielsweise die Traktionsbatterie genutzt werden um kurzzeitige Lastspitzen abzufedern und überschüssige Energie zu speichern.

1.2 Ziel und Aufbau der Arbeit

Der Fokus meiner Bachelorarbeit liegt auf den Lithium-Eisenphosphat-Akkumulatoren und deren Management. Die Konzepte des Smart Grids stehen bei der Ausführung dieser Arbeit im Hintergrund. Nach den grundlegenden Aspekten werde ich auf den Entwurf, den Bau und die Implementierung eines Batteriemanagement Systems in einem Elektroauto kleiner Leistung und die Erweiterung zum Energiemanagement Systems eingehen.



1.3 Danksagung

Obwohl dies meine Arbeit ist, haben viele Personen geholfen und beigetragen. Ohne deren Anleitung, Hilfe und Rat wäre weder dieses Schriftstück noch die Technik entstanden. Ich möchte hier einige Personen herausheben, die besonderen Anteil tragen.

An erster Stelle sind meine Betreuer Gregor Petsch, firmenseitig, und Detlef Heinemann, universitätsseitig, zu erwähnen.

Beide haben mir stets mit ihrer technischen und moralischen Hilfe beigestanden. Keine Frage war zu banal und kein Zeitpunkt ungünstig. Weiteren Dank bedarf es zudem für Herrn Heinemann, der durch die Entwicklung der Batterie Modul Controller die Möglichkeit für diese Bachelorarbeit bildete.

Weiterer, besonderer Danksagung gilt Marcel Langner, den ich alle Fragen rund um Mikrocontroller stellen durfte und der stets mit einer kreativen Idee zu unkonventionellen Problemen aufwarten konnte.

Besonders möchte ich auch die Hilfe von Kay Duve und Hans Harte hervorheben, die trotz eigener Projekte ein offenes Ohr und viele Problemlösungen für mich hatten.

Rund um das Thema Bestellungen von Hardware und Verbrauchsmaterialien möchte ich mich bei Sybille Jüling bedanken, die keinen Versuch ausließ, um auch bei nichtverzeichneten Lieferanten bestellen zu können.

Auch der Firma Linear möchte ich Dank zusprechen. Hier besonders Hans-Jürgen Hergel und Alexander Edel, die mich kostenlos mit sehr teuren Bauteilen versorgt haben.

Natürlich gebührt auch meinen Kollegen im Smart Grid Team ein großer Dank, die immer mit einer helfenden Hand und geistigem Input zur Stelle waren. So bedanke ich mich bei Max Werner, Chris Hommel, Benjamin Frischmann, Martin Nagel, Robin Knop und den ehemaligen Kollegen Patrik Sachse und Kai Kuhr.

Diese Aufzählung ist bei weitem nicht vollständig und ich bitte um Entschuldigung bei den Personen, die ich nicht explizit erwähnt habe. Denen sei auch gesagt, dass ich mich herzlich bei ihnen bedanke möchte.



2 Chemische Energiespeicher

Eine Form des chemischen Energiespeichers ist die galvanische Zelle, die für die Umwandlung von chemischer Energie in elektrische Energie verwendet wird. Eine galvanische Zelle besteht aus zwei verschiedenen Elektroden und einem Elektrolyten.

Grundlegend basiert die Funktion der galvanischen Zelle auf einer Redoxreaktion, sprich einer Oxidation und einer Reduktion. Beide Reaktionen laufen räumlich getrennt in den beiden Halbzellen ab. Sind die Halbzellen durch einen Elektronenleiter und einem Ionenleiter verbunden, so kommt es zum Stromfluss (siehe Abbildung 2).

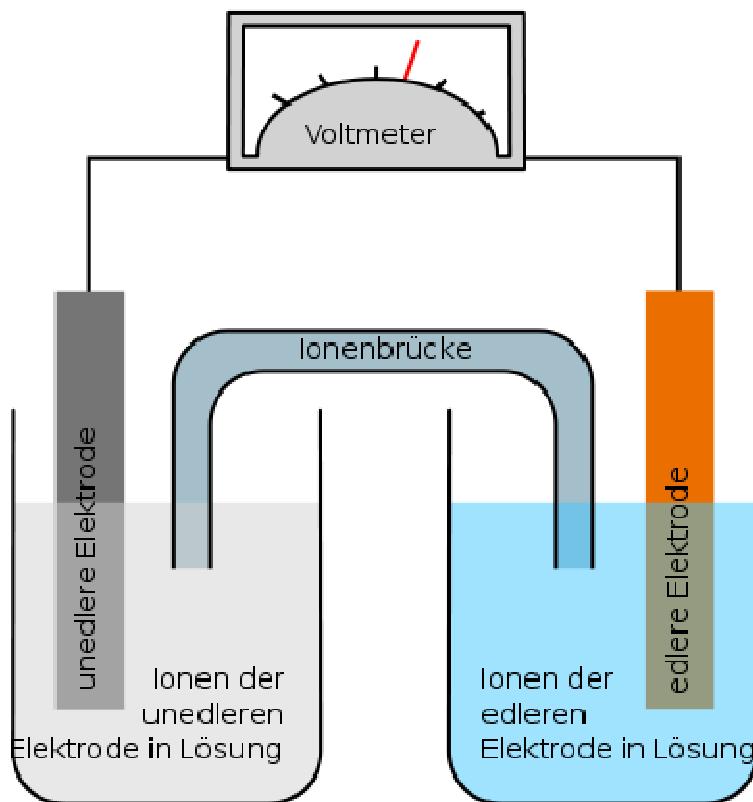


Abbildung 2: Galvanische Zelle [WikiGalZ]

Die Spannung der Zelle leitet sich von der elektrochemischen Spannungsreihe, der Temperatur und der Konzentration des Elektrolyten ab. Die Spannungsreihe ist eine Auflistung von Redox-Paaren nach ihrem Standardelektrodenpotential im Bezug auf Wasserstoff (siehe Abbildung 3).

Electrode reaction	E° (V)	Electrode reaction	E° (V)
$\text{Li}^+ + e \rightleftharpoons \text{Li}$	-3.01	$\text{Co}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Co}$	-0.27
$\text{K}^+ + e \rightleftharpoons \text{K}$	-2.92	$\text{Ni}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Ni}$	-0.23
$\text{Ba}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Ba}$	-2.92	$\text{Sn}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Sn}$	-0.14
$\text{Sr}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Sr}$	-2.89	$\text{Pb}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Pb}$	-0.13
$\text{Na}^+ + e \rightleftharpoons \text{Na}$	-2.71	$\text{H}^+ + e \rightleftharpoons 1/2\text{H}_2$	0.00
$\text{Mg}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Mg}$	-2.38	$\text{Cu}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Cu}$	0.34
$\text{Ti}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Ti}$	-1.75	$\text{Cu}^+ + e \rightleftharpoons \text{Cu}$	0.52
$\text{Al}^{3+} + 3e \rightleftharpoons \text{Al}$	-1.66	$\text{Ag}^+ + e \rightleftharpoons \text{Ag}$	0.80
$\text{Mn}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Mn}$	1.05	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4e \rightleftharpoons 2\text{H}_2\text{O}$	1.23
$\text{Zn}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Zn}$	-0.76	$\text{Cl}_2 + 2e \rightleftharpoons 2\text{Cl}^-$	1.36
$\text{Fe}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Fe}$	-0.44	$\text{F}_2 + 2e \rightleftharpoons 2\text{F}^-$	2.87

Abbildung 3: Elektrochemischen Spannungsreihe [LilonBat09]

Die galvanischen Zellen werden in drei systematischen Gruppen unterteilt:

- Die Primärzellen, auch Batterien genannt, sind Energiespeicher, bei denen die Entladung irreversibel abläuft. Ein Wiederaufladen ist durch anlegen einer äußeren Spannung nicht möglich.
- Die Sekundärzellen, auch Akkumulatoren genannt, sind Energiespeicher, bei denen die Entladung reversibel abläuft. Das Wiederaufladen ist durch einen gegen den Entladestrom laufenden Stromfluss im Rahmen der Zyklenzahl möglich.
- Die Tertiärzellen, auch Brennstoffzellen genannt, sind galvanische Zellen, bei denen der Energieträger extern zugeführt wird. Die Reaktion findet in der Zelle statt und kann bei konstanter Zuführung zeitlich unbegrenzt stattfinden.



2.1 Batterien

Eine Batterie ist eine Zusammenschaltung von mehreren gleicher galvanischer Zellen zur Erhöhung der Zellspannung (Serien schaltung) oder der Kapazität (Parallelschaltung). Dies wird in Abbildung 4 verdeutlicht.

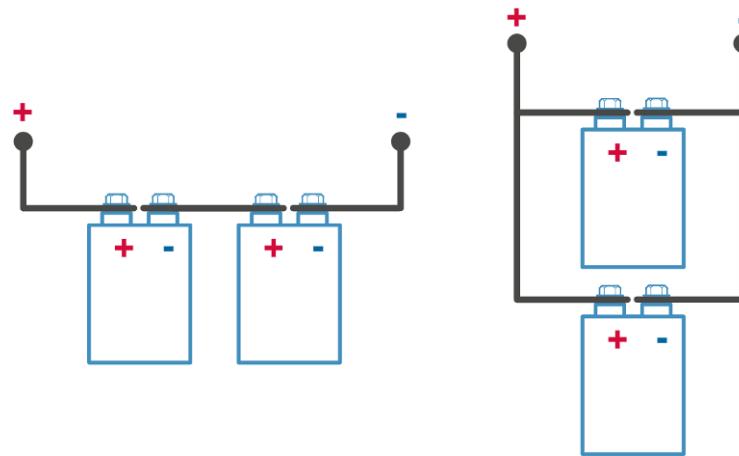


Abbildung 4: Parallelschaltung (l) und Serienschaltung von Batterien (r), nach [HEDLiBat10]

In der Konsumelektronik finden Batterien noch verbreitet Verwendung, sind jedoch aufgrund ihrer irreversiblen Entladung nicht von Interesse in der Elektromobilität.

2.2 Akkumulatoren allgemein

Umgangssprachlich wird bei Akkumulatoren von wieder aufladbaren Batterien gesprochen. Die chemischen Reaktionen sind reversibel und bilden somit die Grundlage für die Speicherung von elektrischer Energie.

2.2.1 Begriffserklärungen

In dem folgendem Abschnitt sollen kurz die wichtigsten Begriffe zum Thema Batterien und Akkumulatoren beschrieben werden.

Nennspannung

Die Nennspannung ist die Zellspannung im Normalbetrieb. Sie liegt etwas unter der Leerlaufspannung, da die Akkumulatoren/Batterien einen Innenwiderstand besitzen. Bei der Serienschaltung von Zellen entspricht die Gesamtnennspannung der Summe der einzelnen Nennspannungen.



Nennkapazität

Die Nennkapazität beschreibt die Energiemenge, die einem Akkumulator/Batterie entnommen werden kann, bis die Entladeschlussspannung erreicht ist. Die Entladung erfolgt unter Normalbedingung (20°C). Die Nennkapazität wird in Ah angegeben. Ein Hochleistungsakkumulator mit beispielsweise 180Ah kann über eine Stunde 180A liefern. Durch paralleles Verschalten mehrerer Zellen kann die Kapazität erhöht werden.

Leerlaufspannung

Die Leerlaufspannung beschreibt die Klemmspannung einer Spannungsquelle ohne angeschlossene Last. Da kein Strom fließt, kann keine Spannung über den Innenwiderstand abfallen.

Ladeschlussspannung

Die Ladeschlussspannung beschreibt die Klemmspannung des Akkulators/Batterie bis zu der, bei angeschlossenem Ladegerät, geladen werden darf, ohne die Zellen zu beschädigen.

Die Ladeschlussspannung ist dabei abhängig vom Elektrodenmaterial und somit der elektrochemischen Spannungsreihe. Bei einer Verletzung der Ladeschlussspannung spricht man von der Überladung.

Entladeschlussspannung

Die Entladeschlussspannung beschreibt die Klemmspannung, die nicht beim Entladen unterschritten werden darf. Auch diese ist abhängig von dem Elektrodenmaterial. Bei einer Unterschreitung der Entladeschlussspannung spricht man von der Tiefentladung und kann bei bestimmten Akkumulatoren zu irreversiblen Zuständen führen.

Energiedichte

Die Energiedichte eines Akkumulators beschreibt die Kapazität pro Masse oder Volumen und wird in Wattstunden je Kilogramm (Wh/kg) oder Wattstunde je Liter (Wh/l) angegeben. Die Energiedichte ist ein ausschlaggebender Faktor in der Automobilindustrie, da man bedacht ist, leichte und kleine Akkumulatoren mit viel Energieinhalt zu nutzen.



Leistungsdichte

Die Leistungsdichte eines Akkumulators beschreibt wie viel Leistung pro Masse oder Volumen entnommen werden kann und wird in Watt je Kilogramm (W/kg) oder Watt je Liter (W/l) angegeben. Die Leistungsdichte ist bei elektrisch angetriebenen Fahrzeugen indirektes Maß für die maximale Beschleunigung.

Innenwiderstand

Der Innenwiderstand eines Akkumulators begrenzt den maximalen Strom, der entnommen werden kann. Dabei kommt es zum Spannungsabfall an dem Innenwiderstand und die Klemmspannung sinkt je nach Ladezustand auf Nennspannungsniveau.

Der Innenwiderstand setzt sich aus einem statischen und einem dynamischen Teil zusammen. Der statische Widerstand entspricht einem ohmschen Widerstand. Der dynamische Widerstand ist abhängig vom Zustand des Akkumulators (Temperatur, Alter, Ladezustand) und kann nur modellhaft beschrieben werden.

Lade- und Entladestrom

Lade und Entladeströme werden mit Hilfe des C-Koeffizienten angegeben und beschreiben den maximalen Strom, mit dem der Akkumulator geladen respektive entladen werden darf.

Bei einer Angabe des Ladestroms von zwei C, darf ein Hochleistungsakku mit einer Kapazität von 180Ah mit 360A geladen werden. Das Laden mit 360A sollte bei Vernachlässigung jeglicher Verluste und idealer Betrachtung eine halbe Stunde dauern.

Lade- und Entladeverhalten

Lade- und Entladeverhalten beschreiben den Verlauf der Klemmspannung eines Akkumulators über die Zeit. Es werden dazu meist mehrere Kurven aufgenommen, typischerweise bei verschiedenen Ent- bzw. Ladeströmen, bei verschiedenen Temperaturen und verschiedenen Zyklenzahlen.



State of Health

State of Health, wörtlich „Gesundheitszustand“, ist der Zustand eines Akkumulators im Bezug auf den Idealzustand in Prozent. Ein fabrikneuer Akkumulator wird mit SoH von 100% angegeben und bei Gebrauch wird sich dieser verringern.

Dieser Zustand kann nicht explizit gemessen werden, sondern spiegelt eine Kombination aus Kapazität, Selbstentladung, Klemmspannung und Innenwiderstand wider. Oft werden Modelle genutzt, die mit empirischen Daten arbeiten (Vergleich mit neuwertigen Akkumulatoren).

State of Charge

State of Charge, wörtlich „Ladungszustand“, entspricht dem Tankfüllstand bei herkömmlichen Verbrennungsmotoren. Der SoC spiegelt die Menge an Energie wider, die dem Akkumulator entnommen werden kann.

Wie der SoH kann der SoC nicht explizit gemessen werden. Man bedient sich hierbei verschiedener physikalischer Größen des Akkumulators und kombiniert diese in einem Modell um den SoC zu errechen.

Es werden häufig Klemmspannung, Temperatur, Ladung, ferner auch chemische Eigenschaften gemessen und verarbeitet. Da die gemessenen Werte einer großen Toleranz unterliegen und stark vom SoH abhängig sind, erweist sich die genaue Berechnung des SoCs sehr schwer (siehe Abschnitt 3.7.1 bis 3.7.6).

Safe Operating Area

Die Safe Operating Area, wörtlich „Bereich des sicheren Betriebs“, beschreibt das Kennfeld aller Parameter in dem der Akkumulator betrieben werden darf, ohne das er Schaden nimmt. Hierbei spielen Temperatur, Spannung, und Stromfluss eine große Rolle. Die Angaben für den SOA finden sich im Datenblatt des Herstellers und müssen stets beachtet werden.

Der Betrieb außerhalb des SOAs kann zu Schaden am Akkumulator führen. Diese Schäden können sich durch eine schnelle Alterung, eine Verringerung der Kapazität oder in gefährlichen Zuständen (z.B. Brandgefahr) auswirken.



2.3 Lithiumakkumulatoren

Lithiumakkumulatoren bieten neben einer hohen Klemmspannung, bis zu 4V [EleInf11], auch eine hohe Energie- und Leistungsdichte.

Aus diesen Gründen sind Lithiumakkumulatoren von hohem Interesse für die Automobilindustrie (siehe Abbildung 5), die bedacht ist, möglichst viel Energie bei geringem Gewicht in elektrischen Fahrzeugen zu verbauen, um die Reichweite nicht bereits durch zusätzlichen Ballast zu verringern (siehe Abschnitt 2.2.1).

KFZ-Typ:	konventionell	Micro-hybrid	Mild-hybrid	Moderate-/Full-hybrid	PlugIn-Hybrid	Elektrisch
Funktion:	Start	Start-Stopp (Rekuperation)	Start-Stopp Rekuperation (Boost)	Start-Stopp Rekuperation Boost 2 km elektrisch	Start-Stopp Rekuperation Boost 20 km elektrisch	>100 km elektrisch
Leistung (elektrisch):	<2 kW	2–7 kW	4–12 kW	12–50 kW	25–100 kW	>75 kW
Energie (elektrisch):	<1,5 kWh	≈0,2 kWh	≈0,4 kWh	0,7–1,1 kWh	8–12 kWh	>30 kWh
Typische Spannung:	12 V	12–42 V	42 V	42–600 V	300–600 V	≥300 V
Geforderte Lebensdauer:	5 Jahre	8–10 Jahre	8–10 Jahre	8–10 Jahre	>10 Jahre	>10 Jahre
Technologien:	LA	LA, LA + Supercap	LA + Supercap, NiMH, LiIon	NiMH, LiIon	LiIon	LiIon?
Beispiele:	–	Peugeot 508 Citroën C4 Picasso	Honda Jazz Honda Insight	Honda Civic BMW ActiveHybr.X6 Mercedes S400 BH	Toyota Prius PHV Chevrolet Volt	Tesla Roadster i-MiEV

Abbildung 5: Anforderungen und Technologien [EleInf11]

Das Ragone-Diagramm (Abbildung 6) zeigt die Verteilung diverser Energiespeicher in einem kartesischen Koordinatensystem aus Leistungs- und Energiedichte. Wie bereits hervorgehoben, besitzen Lithiumakkumulatoren ein hohes Maß an Energiedichte bei gleichzeitig hoher Leistungsdichte.

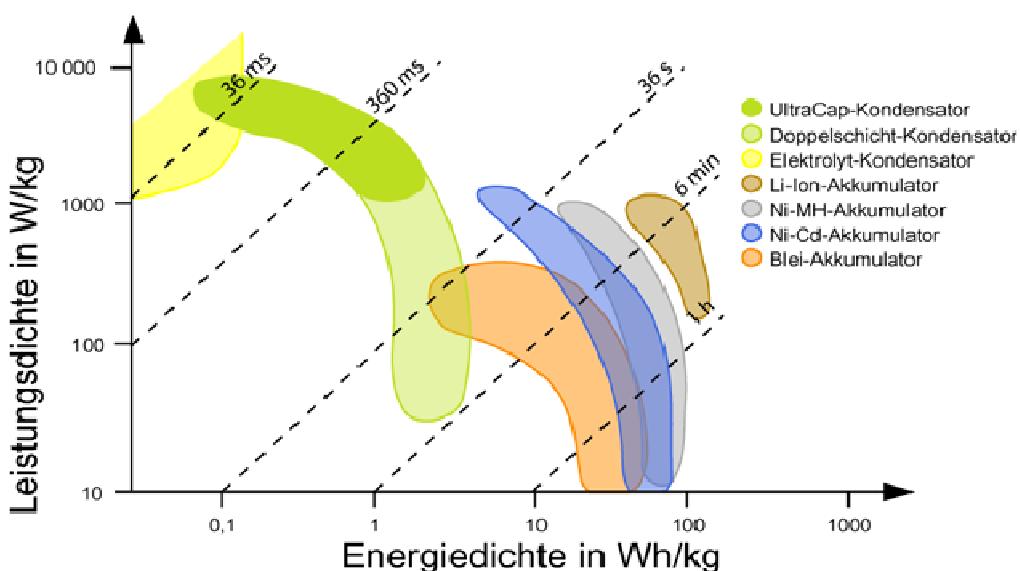


Abbildung 6: Ragone-Diagramm diverser Energiespeicher mit Isochrone [BUniW08]

2.3.1 Funktionsprinzip

Lithium hat das größte negative Standard Elektrodenpotential von -3.01V [LilonBat09] und eignet sich deshalb sehr gut für Zellen mit hoher Zellspannung. Des Weiteren besitzt es eine hohe spezifische Energiedichte von 3860Ah/kg [HEDLiBat10].

Lithiumakkumulatoren beruhen auf dem Prinzip (siehe Abbildung 7), dass Lithiumionen in Gitterstrukturen von Oxiden oder Graphit eingelagert werden können. Dieses Einlagern ist reversibel. Die relativ kleinen Lithiumionen wandern abhängig vom Stromfluss über einen elektrischen Leiter zwischen den Elektroden durch den Elektrolyten von einer Elektrode zur anderen. Deshalb spricht man auch von Lithium-Ionen-Akkumulatoren.

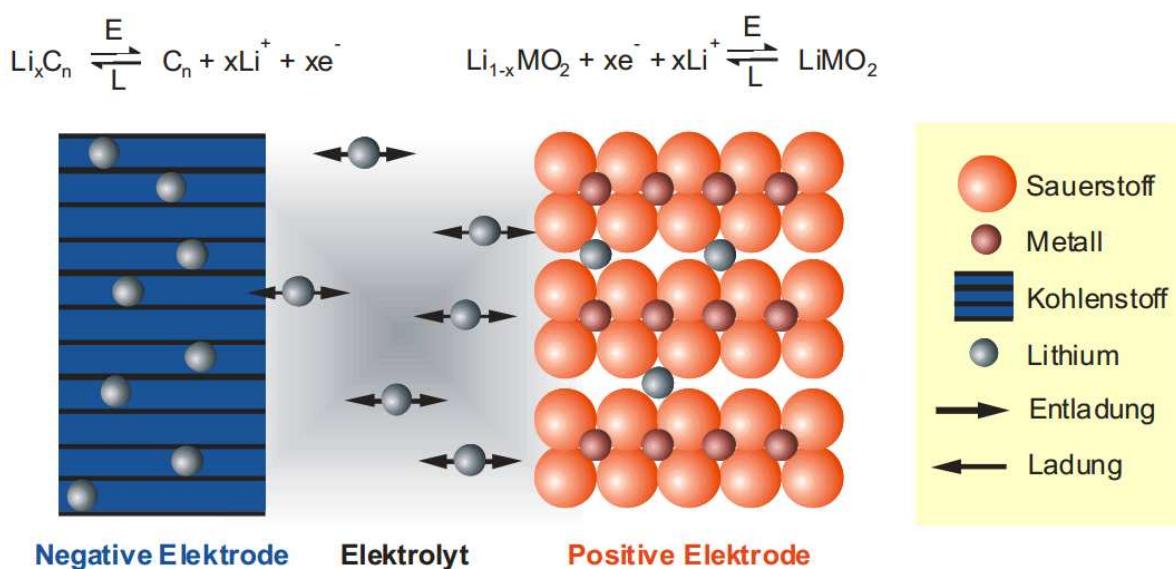


Abbildung 7: Prinzip der Entlade- und Ladereaktionen in Lithium-Ionen-Zellen [AChem05]

Bei Standardtypen besteht das aktive Material der negativen Elektrode aus Graphit. Die positive Elektrode enthält Lithiummetalloxide, welche auch für die Namensgebung der Zelle ausschlaggebend sind.

Typische Elektrodenmaterialien sind:

- LiCoO_2 Lithium-Kobalt-Oxid
- LiMnO_2 Lithium-Mangan-Oxid
- LiFePO_4 Lithium-Eisenphosphat
- LiNiO_2 Lithium-Nickel-Oxid

Als Elektrolyten wird meist ein wasserfreies Lösungsmittel oder Polymer benutzt, um Nebenreaktionen wie die Wasserelektrolyse zu verhindern, bei der Wasserstoff und Sauerstoff entstehen, die zu Druckanstieg führen können.

„Bei Lithium-Ionen-Akkumulatoren kommen weitaus reaktivere Aktivmassen mit stark negativem und/oder stark positivem Elektrodenpotential zur Anwendung. Eine wechselseitige elektrochemische und chemische Stabilität von Elektrolyt und Elektrodenmaterialien ist hier nur über den Einsatz nichtwässriger aprotischer Elektrolyte zu erreichen.“ [AChem05]

2.3.2 Bauformen

Die Bestandteile des Lithiumakkumulators entsprechen dem Aufbau einer galvanischen Zelle. In Abbildung 8 wird beispielhaft ein Lithiumakkumulator dargestellt. Der Akkumulator besteht aus zwei Elektroden die sich in einem Elektrolyt befinden. Ein Separator trennt dabei die Elektroden voneinander und ist lediglich für die Ionen passierbar. Die Klemmen an den Elektroden bilden die Terminals für den Elektronenfluss.

Die hauchdünnen Materialien werden geschichtet und verschweißt. Bei runden Bauformen werden die Pakete aufgerollt. Um höhere Spannungen bzw. Kapazitäten zu erzielen, können die Zellen in Serie bzw. parallel zusammengeschaltet werden.

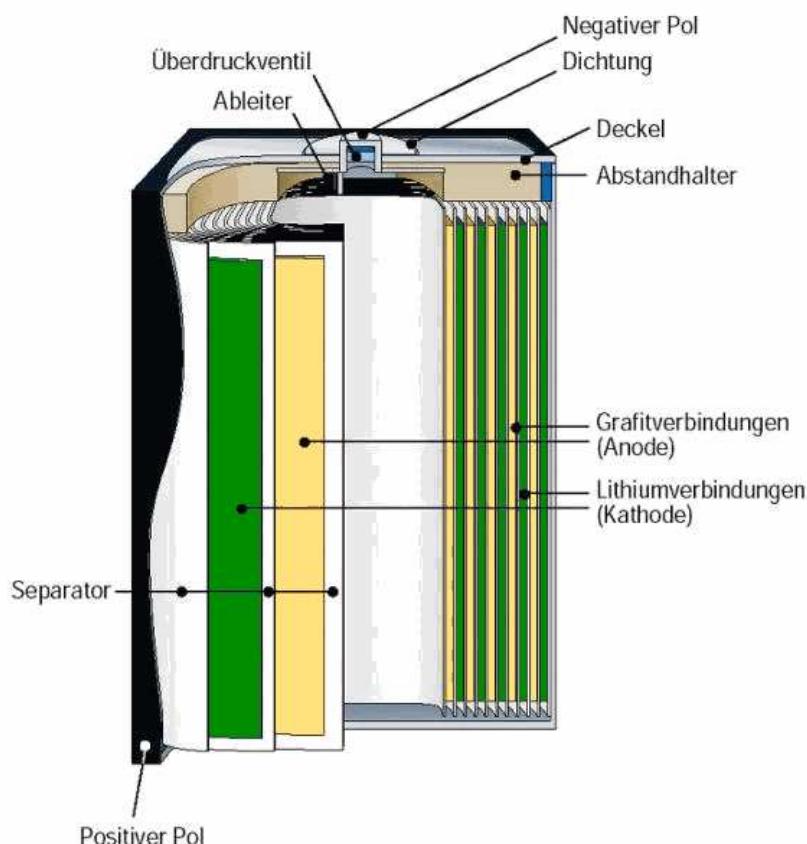


Abbildung 8: Lithiumakkumulator im Aufbau [BatInf]

Viele Zellen werden typischerweise parallel zusammengeschlossen und in runden (siehe Abbildung 9) oder quaderförmigen Formen (siehe Abbildung 10) verbaut. Diese Zellen werden dann extern in Serie geschaltet, um höhere Spannungslevel erreichen zu können.



Abbildung 9: Rundzelle [LiForm2]



Abbildung 10: Quaderzelle [LiForm1]

2.3.3 Eigenschaften

Auf Grund der verschiedenen Materialien für die einzelnen Bestandteile eines Lithiumakkumulators können nur wenige allgemeingültige Eigenschaften beschrieben werden. Deshalb wird ausschließlich in Kapitel 2.4 detailliert auf einzelne Eigenschaften eingegangen.

2.3.4 Sicherheit

Lithiumakkumulatoren bedürfen besonderer Schutzmaßnahmen, ohne die es zum thermischen Durchgehen kommen kann. Sie dürfen nur in dem SOA betrieben werden. Problematisch hierbei ist die hohe Energiedichte, die einerseits erwünscht ist, andererseits aber bei thermischer Freisetzung zu Zerstörungen an der Technik und zu Schaden an Mensch und Tier führen kann.

Insbesondere die Traktionsbatterien in der Fahrzeugtechnik benötigen hohe Kapazitäten für lange Reichweiten und könnte so bei einem Unfall oder Überhitzung große Mengen an Energie in kurzer Zeit freisetzen.

Eine mechanische Belastung von Außen kann zu Beschädigungen des Akkus führen, wodurch Kurzschlüsse zwischen Zellen eines Akkus auftreten können. Die Kurzschlussströme können zur Erhitzung, Schmelze oder gar Entzündung des Gehäuses führen.

Lithium selber ist ein hochreaktives Metall und sollte nicht in Verbindung mit Wasser geraten. Sollte ein Lithiumakkumulator brennen, so wird meist versucht mit Sand zu löschen respektive den Akku kontrolliert abbrennen zu lassen.



Bei Tiefentladung, Überladung und hohen Entladeströmen kann die Zelle instabil werden und sich erhitzen. Die Erwärmung kann zur Schmelze des Separators und schließlich zum Zellschluss führen. Hier kann es wiederum zum Abbrennen der Zelle kommen.

Verschieden Vorsichtsmaßnahmen können bereits bei der Herstellung der Zelle oder bei der Auswahl der Zellenart getroffen werden.

Ein Überdruckventil kann zum Ausgleich des Drucks zwischen der Atmosphäre (Luft) und der Zelle in das Gehäuse verbaut werden. Ebenso sind Sollbruchstellen denkbar, die zur kontrollierten Zerstörung der Zelle führen.

Bei der Wahl der Zellen können Akkumulatoren mit thermisch stabilen Separatoren genutzt werden, wie beispielsweise aus Keramiken.

Als besonders sicher gelten Akkumulatoren mit Eisenphosphat, die sogenannten Lithium-Eisenphosphat-Akkumulatoren oder kurz LiFePO₄.

Diese Akkus werden auf Grund ihrer hohen Eigensicherheit gerne als Traktionsbatterien eingesetzt. Da ich im Rahmen meiner Bachelorarbeit diese Akkus verwende, möchte ich in den folgenden Abschnitten kurz auf diese Energiespeicher eingehen.



2.4 Lithium-Eisenphosphat (LiFePO_4)

Die Idee FePO_4 als Kathodenmaterial zu verwenden ist recht jung und kam erstmal 1997 auf [WikiLiFePO]. Gründe für diesen Schritt gibt es zahlreiche und können allgemein durch verbesserte Sicherheit, besser Umweltverträglichkeit und günstigere Materialkosten zusammengefasst werden.

Bei der Überladung von Lithium-Eisenphosphat-Akkus kommt es zu keiner Abscheidung von metallischem Lithium oder der Freisetzung von Sauerstoff. Dieses führt hingegen bei anderen Zellentypen zur Erwärmung und schließlich zum thermischen Durchgehen, wodurch die Zelle in Brand geraten oder sogar explodieren kann.

LiFePO_4 Zellen sind in dieser Hinsicht sicher.

Das in Lithium-Eisenphosphat-Akkumulatoren gebundene Lithium kann im Gegensatz zu Lithium-Cobalt-Akkus komplett zur chemischen Speicherung von Energie genutzt werden. Deshalb benötigt man auch weniger Lithium in einer Zelle für die gleiche Kapazität.

2.4.1 Technische Spezifikationen von LiFePO_4 Akkus

- Zellspannung von 3.2 bis 3.3V [EneMana12]
- Energiedichte von 90 bis 120 Wh/kg [EneMana12]
- Leistungsdichte von 1800 bis zu 3000 W/kg [EneMana12]
- Ladeschlussspannung von 3.6 bis 3.8V [EneMana12], [DataWB]
- Entladeschlussspannung von 2.5 bis 2.8V [DataWB]
- Betriebstemperatur von -45 bis 85°C [DataWB]
- Ladestrom maximal von 3C [DataWB]
- Entladestrom von 3C [DataWB]
- Impulstrom von 20C [DataWB]
- Selbstentladung von 3% über einen Monat [DataWB]
- Zyklen von 3000 bis zu 5000 [DataWB]



2.4.2 Kennlinien

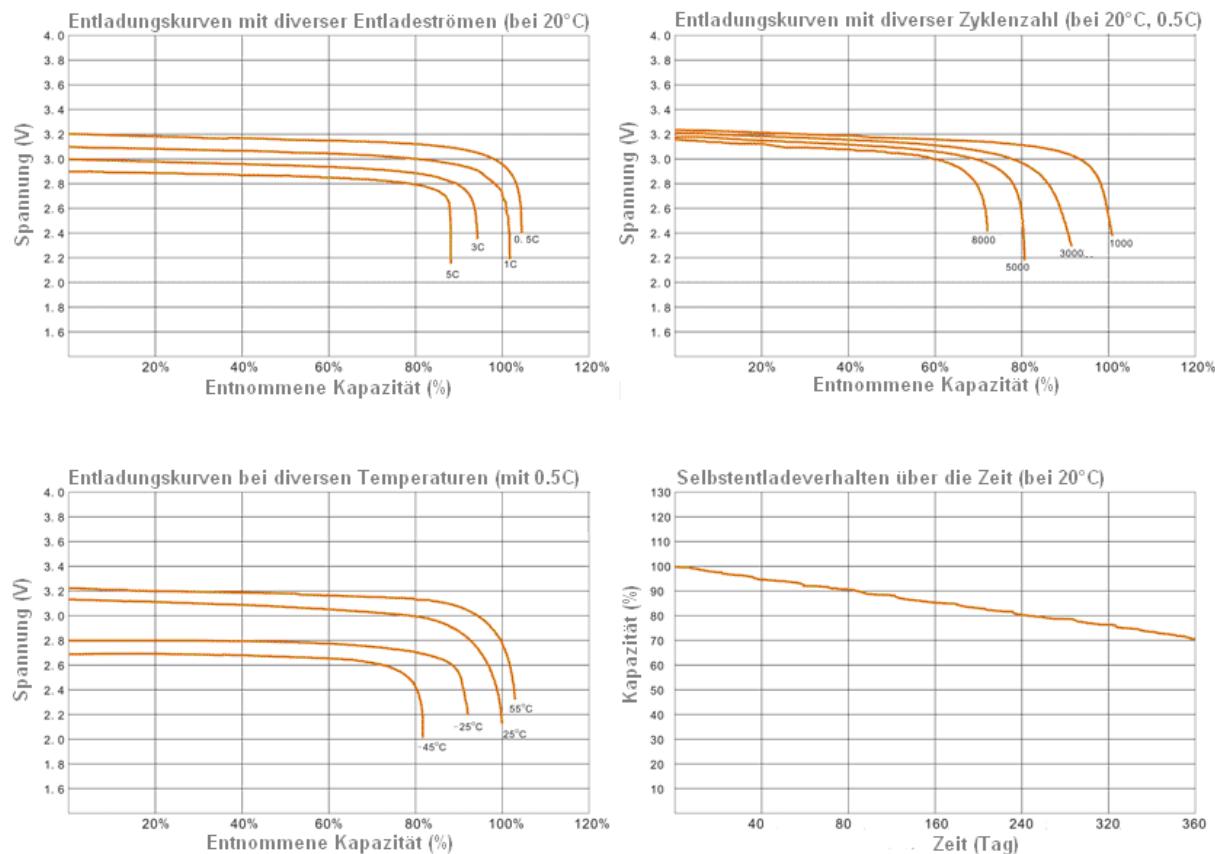


Abbildung 11: Kennlinien LiFePO4 [DataWB]

In der Abbildung 11 wird sehr gut die flache Charakteristik der Klemmspannung bei der Entladung deutlich. Zu dem wird sehr gut erkennbar, dass sich die Charakteristik bei unterschiedlichen Temperaturen, Entladeströmen und Alter der Batterien verändern.

2.4.3 Vorteile

- Eigensicher vor thermischen Durchgehen
- Hohe Leistungsdichte
- Hohe Entlade- und Ladeströme von 3C möglich [DataWB]
- Geringe Selbstentladung
- Hohe Zyklenfestigkeit
- Flacher/konstanter Spannungsverlauf beim Entladen

2.4.4 Nachteile

- Geringere Zellspannung im Vergleich zu anderen Lithium-Ionen-Akkus
- Geringe Energiedichte im Vergleich zu anderen Lithium-Ionen-Akkus
- Flacher Spannungsverlauf erschwert SoC-Bestimmung

2.5 Akkumulatorenarten ohne Lithium

Im Folgenden wird eine kleine Auswahl von Akkumulatoren vorgestellt. Hierbei wird sich auf die wirtschaftlich bedeutsamsten und meist genutzten Akkumulatoren beschränkt.

Blei

Die Blei-Zelle gehört wohl zu den ältesten heute noch genutzten Akkumulatoren. Bereits im Jahre 1860 wurde von R.G. Planté [EleInf11] die erste Zelle entwickelt und gebaut. Seither unterliegt die Blei-Zelle ständiger Weiterentwicklung und wird hauptsächlich als Starterbatterie in der Automobilindustrie verwendet.

1993 wurde durch eine Kooperation zwischen Siemens und VW der Golf 3 City-Stromer entwickelt, der Blei Akkumulator als Traktionsbatterie nutzte [GolStern10].

Chemische Reaktion an dem negativen Pol einer Bleisäure (LA) Batterie:



Formel 1: Blei-Säure-Reaktion negativer Pol [WikiBS]

Chemische Reaktion an dem positiven Pol einer Bleisäure Batterie:



Formel 2: Blei-Säure-Reaktion positiver Pol [WikiBS]

Chemische Gesamtreaktion einer Bleisäure Batterie:



Formel 3: Blei-Säure-Gesamtreaktion [WikiBS]



Vorteile:

- Relativ hohe Zellspannung
- Elektrischer Wirkungsgrad größer 70% [EleInf11]
- Geringer Preis
- Ladezustandskontrolle leicht möglich

Nachteile:

- Geringe Zyklenstabilität
- Hohes Gewicht
- Geringe Leistungs- und Energiedichte bezogen auf das Gewicht
- Blei ist ein giftiges Schwermetall

Nickel-Cadmium (NiCd)

Die NiCd Akkumulatoren, im Jahre 1899 von Waldemar Junger entwickelt [WikiNiCd], waren bis in den 1990er Jahren die meist genutzten Akkumulatoren in der Endverbraucherelektronik. Mit einer Nennspannung von 1.2V besitzt die Zelle eine recht geringe Klemmspannung im nominalen Betrieb.

Chemische Reaktion an dem negativen Pol:



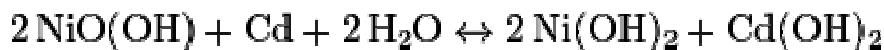
Formel 4: NiCd Reaktion negativer Pol [HaOBat01]

Chemische Reaktion an dem positiven Pol:



Formel 5: NiCd Reaktion positiver Pol [HaOBat01]

Chemische Gesamtreaktion:



Formel 6: Gesamtreaktion [HaOBat01]



Vorteile:

- Geringer Innenwiderstand und somit hoher Entladestrom möglich
- Hervorragendes Temperaturverhalten, auch bei niedrigen Temperaturen werden hohe Kapazitäten erreicht

Nachteile:

- Vertrieb und Nutzung von cadmiumhaltigen Akkumulatoren ist bis auf wenige Ausnahmen in Deutschland und der EU verboten [BattG09], da Cadmium zu Nieren- und Knochenschäden beim Menschen führen kann.

Nickel-Metalhybrid (NiMH)

Die NiMH Akkumulatoren sind weitverbreitet anzutreffen. Im Endverbraucherelektronikbereich haben sie die NiCd Akkumulatoren fast vollständig verdrängt und in der Automobilindustrie werden sie in Hybrid-Serienfahrzeuge eingesetzt. Erstmals wurden NiMH Akkumulatoren als Traktionsbatterie 1996 im EV1 von General Motors verbaut.

Chemische Reaktion an dem negativen Pol:



Formel 7: NiMH Reaktion negativer Pol [WikiNiMH]

Chemische Reaktion an dem positiven Pol:



Formel 8: NiMH Reaktion positiver Pol [WikiNiMH]

Chemische Gesamtreaktion:



Formel 9: NiMH Gesamtreaktion [WikiNiMH]



Vorteile:

- Relativ hohe Energiedichte von 80Wh/kg [EleInf11]
- Keine giftigen Schwermetalle
- Preiswerte Herstellung

Nachteile:

- Betriebstemperatur sollte über dem Gefrierpunkt liegen. Bei Abkühlung verringert sich die Elektronenbeweglichkeit und der Innenwiderstand steigt, dies führt zum Einbruch der Spannung und geringem Entladestrom.

Natrium-Nickelchlorid (ZEBRA)

Die ZEBRA Zelle wurde in den 1980er Jahren entwickelt und erhielt ihren Namen durch die an der Entwicklung beteiligten Firma Zebra Power Systems and Beta R&D Ltd. Hauptsächlich wird die ZEBRA Zelle in der Automobilindustrie und der Rüstungsindustrie eingesetzt.

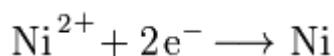
Das erste serienreife Elektroauto mit ZEBRA Zellen als Traktionsbatterie war der Mercedes-Benz Studie A aus dem Jahre 1994 [WikiZEBRA].

Chemische Reaktion an dem negativen Pol:



Formel 10: ZEBRA Reaktion negativer Pol [TabChem05]

Chemische Reaktion an dem positiven Pol:



Formel 11: ZEBRA Reaktion positiver Pol [TabChem05]

Chemische Gesamtreaktion:



Formel 12: ZEBRA Gesamtreaktion [TabChem05]



Vorteile:

- Günstige Elektrodenmaterialien
- Hohe Zellspannung von 2.58V [TabChem05]
- Sehr leicht recycelbar und umweltfreundlich

Nachteile:

- Betriebstemperatur liegt zwischen 270°C und 350°C, weshalb der ZEBRA Akkumulator vor Nutzung aufgeheizt werden muss [TabChem05]

3 Batteriemanagement / Energiemanagement

„Die hohen Energiemengen der großen Lithium-Ionen-Batterien werfen neue Fragestellungen zu den Problemkreisen Sicherheit und Lebensdauer auf und machen Methoden zur Überwachung des Alterungszustandes von Fahrzeugsbatterien notwendig. Durch die Beobachtung signifikanter Systemvariablen können in vielen Fällen bevorstehendes Versagen von Einzelzellen oder Batteriepaketen vorhergesagt und entsprechende Gegenmaßnahmen eingeleitet werden.“ [EleInf09]

Das Batteriemangement dient der Überwachung und Regelung verschiedener Parameter der Akkumulatoren, um einen sicheren Betrieb der Akkus zu gewährleisten und somit den Menschen und die Maschine zu schützen.

Sobald mehrere Zellen zu einem Akkupack (fortlaufend Stack genannt) zusammengeschlossen sind, muss dafür gesorgt werden, dass jede Zelle sich in ihrem SOA befindet. Hierbei werden Spannungen und Temperaturen der Einzelzellen und der Gesamtstrom überwacht.

Ein thermisches Durchgehen einer Zelle kann zu einer Kettenreaktion im Stack führen.

In der Realität unterliegen alle Zellen leichten Toleranzen im Aufbau und Zusammensetzung, sodass keine Zelle hundertprozentig der anderen im Verhalten gleicht. Verschiedene Innenwiderstände der Zellen können zu unterschiedlichem Entlade- und Ladeverhalten führen, wodurch die Kapazität jeder Zelle leicht unterschiedlich ist.

Beim Entladen eines Stacks kann es so zu Asymmetrien zwischen den Zellen kommen. Eine sich schneller entladene Zelle weiß eine geringe Zellspannung auf als eine sich langsam entladene.

Unter Berücksichtigung der Ladeschluss- und Entladeschlussspannung limitiert die Zelle mit der geringsten Zellspannung die Entladung und die Zelle mit der höchsten Zellspannung die Aufladung des Stacks. Dadurch kann es zu einer verminderten Gesamtkapazität des Stacks kommen.

Das Batteriemangement versucht durch sogenanntes Balancing diese Asymmetrien auszugleichen, sodass die Zellen gleichmäßig entladen und vor allem geladen werden können.



3.1 Sicherheit

Das BMS dient in erster Linie dem Schutz des Menschen, der Zellen und der Technik. Im Bezug auf Elektroautos muss dafür gesorgt werden, dass in einem Fehlerfall, wie z.B. die Überhitzung der Zellen, das Erreichen der Entladeschlussspannung oder zu hohen Entladeströme, die Last von den Zellen getrennt wird.

Dabei muss vorher die Kommunikation mit anderen Steuergeräten und dem Fahrer stattfinden, weil ein abruptes Lasttrennen in kritischen Situationen zu weit schlimmeren Unfällen führen kann als eine kaputte Zelle.

Die Lasttrennung erfolgt durch das Haupt- und ggf. die Nebenschütze. Das Hauptschütz liegt direkt im Hauptstromkreis und kann die gesamte Batterie vom Motor und anderen Systemen trennen. Denkbar sind auch Hilfsschütze, die es ermöglichen, einzelne Stacks vom Akkupack zu trennen. So können fehlerhafte Zellen abgekoppelt und dennoch eine Grundversorgung für die elektronischen Lasten aufrechterhalten werden.

Bei einem Elektroauto kann so beispielsweise in einem Fehlerfall noch die nächste Servicestation angefahren werden.

Flexibilität und Kosten steigen mit Anzahl der Hilfsschütze, ebenso der Verbrauch, da jeder zusätzliche Schütz einen Haltestrom benötigt und dieser wiederum die Zellen belastet. Deshalb werden Hilfsschütze meist stackweise und nicht zellenweise eingesetzt (vgl. modulare Architektur des BMS).

3.1.1 Sicherung

Eine reine mechanische Lösung des Überstromschutzes ist eine Schmelzsicherung. Diese wird wie das Hauptschütz in den Hauptstromkreis integriert und trennt den Laststromkreis von den Batterien im Falle eines zu hohen Stroms.

Denkbar sind hier auch Sicherungen je Stack, um eine modulare Bauweise zu gewährleisten.

3.1.2 Motorfreigabe

Das BMS gehört in einem Elektroauto zu einem der wichtigsten Steuergeräte und sollte auch direkt oder indirekt Zugriff auf die Motorfreigabe besitzen.

Die zentrale Steuereinheit ist die Vehicle Control Unit (VCU) und dient der übergeordneten Überwachung und Steuerung sämtlicher Fahrzeugsysteme. Sollte das BMS über eine indirekte Motofreigabe verfügen, so läuft die Steuerung über die VCU. Nur bei positiven Statusmeldungen des BMS (evtl. auch weiterer Systeme) wird die Motorfreigabe erteilt.



Sollte das BMS eine direkte Steuerkontrolle besitzen, so könnte die Motorfreigabe durch das BMS erteilt werden, nachdem es entsprechende Befehle der VCU erhält. Denkbar wäre auch eine logische Verknüpfung beider Steuersignale durch ein AND Gate am Motorcontroller.

Die Rücknahme der Motorfreigabe ermöglicht es den Motor, also die Hauptlast, vom System zu trennen ohne den Hauptschütz zu öffnen. So ist es möglich die Hilfssysteme, wie z.B. die Beleuchtung und die Warnblinkanlage, weiterhin mit Spannung zu versorgen.

Bei Anstieg der Temperatur und bevorstehender Überhitzung könnte das BMS auch für eine Drosselung des Motors sorgen, indem das elektronische Gas manipuliert wird. So kann einer kompletten Abschaltung entgegengewirkt werden, ohne die Hauptfunktionen groß zu beeinträchtigen.

3.2 Batterie Modul Controller

Der Batterie Modul Controller (BMC) ist die Steuer- und Messeinheit des Batteriemanagement. Je nach Systemstruktur obliegen ihm auch Entscheidungen über die Steuermaßnahmen.

Der BMC wird meist sehr nahe am Stack montiert, den er überwacht und steuert. In einem Gesamtsystem kann der gesamte Batteriestack von einem BMC kontrolliert werden, jedoch wird meist der Gesamtstack in Untereinheiten zerlegt, die jeweils von einem BMC gesteuert werden. Gerade in der Automobilindustrie verwendet man für die Traktionsbatterie eine Vielzahl von Zellen, die nicht in ihrer Gesamtheit überwacht werden können. So besteht z.B. die Traktionsbatterie des Tesla Roadstars aus 6831 Einzelzellen [Tesla12].

Der BMC versorgt sich oft durch den Stack mit Spannung. Die Kommunikation erfolgt über den Controller Area Network Bus (CAN, siehe Abschnitt 4.1).

Das Kernstück eines BMCs sind spezielle Integrated Circuits (IC), die speziell für die Überwachung von Akkumulatoren entwickelt wurden. Diese ICs dienen der Zellspannungsmessung, der Temperaturmessung und können auch Vorrichtungen zur Strommessung und zum Balancing enthalten. Die Kommunikation und die Steuerung werden von einem Mikrocontroller übernommen.



3.3 Batteriemanagement System

Das Batteriemanagement System (BMS) ist das den BMCs übergeordnete Steuergerät. Im BMS laufen je nach Systemstruktur die Informationen der einzelnen BMCs zusammen, anhand derer die Entscheidungen über Steuermaßnahmen und Freigaben getroffen werden.

Die Aufgaben des BMS beinhalten:

- Zellschutz durch Einhaltung des SOAs
- Zellsymmetrierung durch aktives/passives Balancing
- Bestimmung des SoCs
- Bestimmung des SoHs
- Thermomanagement
- Kommunikation mit anderen Steuergeräten im Automobil (z.B. mit der Vehicle Control Unit, dem Ladecontroller, Kühlung/Heizung für die Batterien etc.)
- Lastmanagement

3.4 Systemarchitekturen

Wie bereits beschrieben werden oft Zusammenschlüsse mehrerer Zellen in Untereinheiten, sogenannten Stacks, aufgeteilt, die dann jeweils von einem BMC kontrolliert werden. Es sind auch andere Strukturen denkbar, die im Folgenden kurz beschrieben werden.



3.4.1 Modulare Architektur

In der modularen Architektur (siehe Abbildung 12) verwaltet ein BMC mehrere Zellen und ein BMS Master Controller mehrere BMCs [ModBat02].

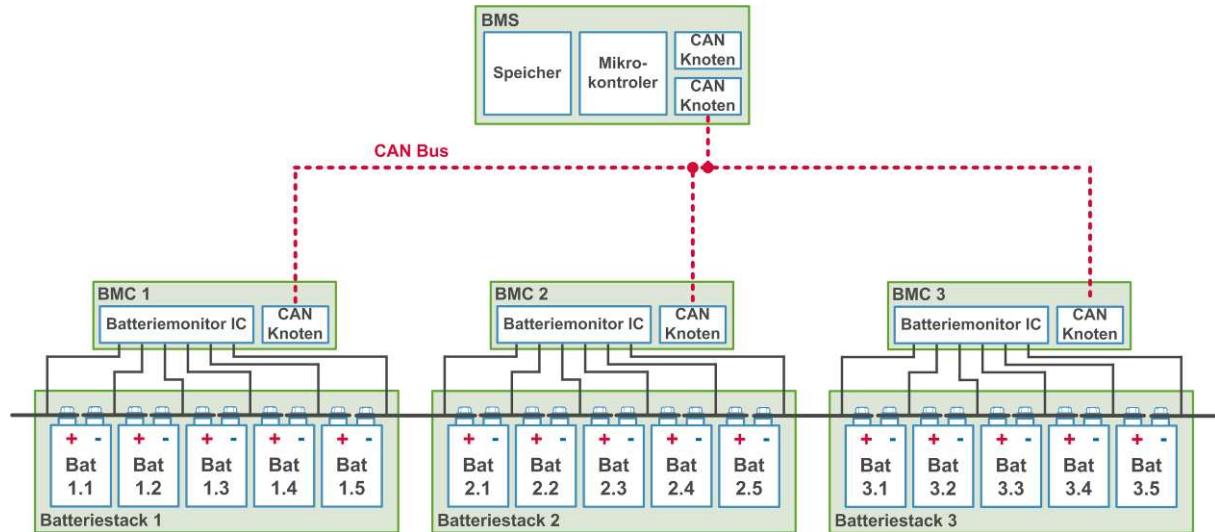


Abbildung 12: BMS modulare Architektur, nach [ModBat02]

Die modulare Bauweise lässt sich leicht erweitern und auf unterschiedlichen Größen skalieren. Sie wird gerne in der Automobilbranche genutzt.

Das BMS kann hier die komplette Steuerung übernehmen oder man verlagert einen Teil der Intelligenz in die BMCs.

Beim Ausfall eines BMCs kann der Zustand der Zellen interpoliert werden ohne das gesamte System abschalten zu müssen. Andere Aufbauten ermöglichen es die betroffenen Zellen mit Hilfe von Hilfsschützen vom Gesamtakkumulator trennen, um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten.

Der Verkabelungsaufwand hält sich in Grenzen, weil die BMCs meist direkt auf den Stack montiert werden und lediglich die Kommunikationsleitungen zum BMS verlegt werden müssen.

3.4.2 Zentrale Architektur

In der Zentralen Architektur (siehe Abbildung 13) verschmelzen BMC und BMS zu einem Steuergerät. Sämtliche Leitungen werden von den einzelnen Zellen zu dem BMS verlegt, was einen hohen Verkabelungsaufwand bedeutet.

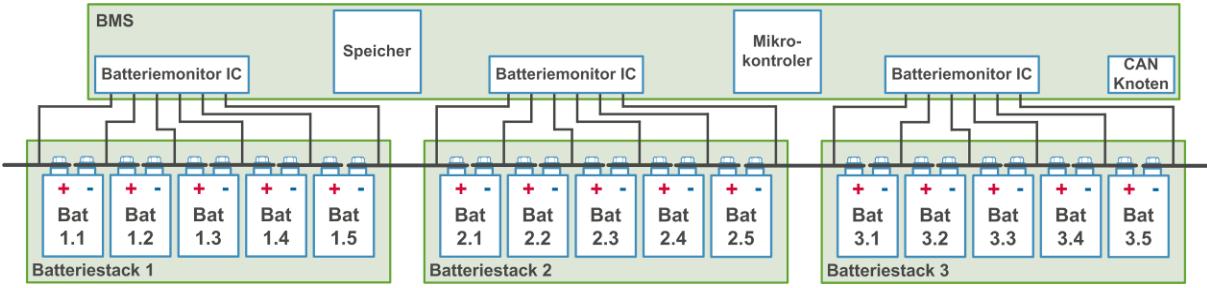


Abbildung 13: BMS zentrale Architektur, nach [BMSStruc11]

Im Gegensatz zur modularen Architektur benötigt man hier weniger ICs und Platinen, was den preislichen Aufwand minimiert. Da jedoch die Überwachung auf ein einzelnes Steuergerät reduziert wird, können Teilausfälle schwieriger kompensiert werden. Meist wird dann die ganze Batterie unbrauchbar.

3.4.3 Dezentrale Architektur

Die wohl aufwändigste Architektur ist die dezentrale Topologie, die in Abbildung 14 zu sehen ist. Hierbei werden für jede Zelle ein BMC benötigt.

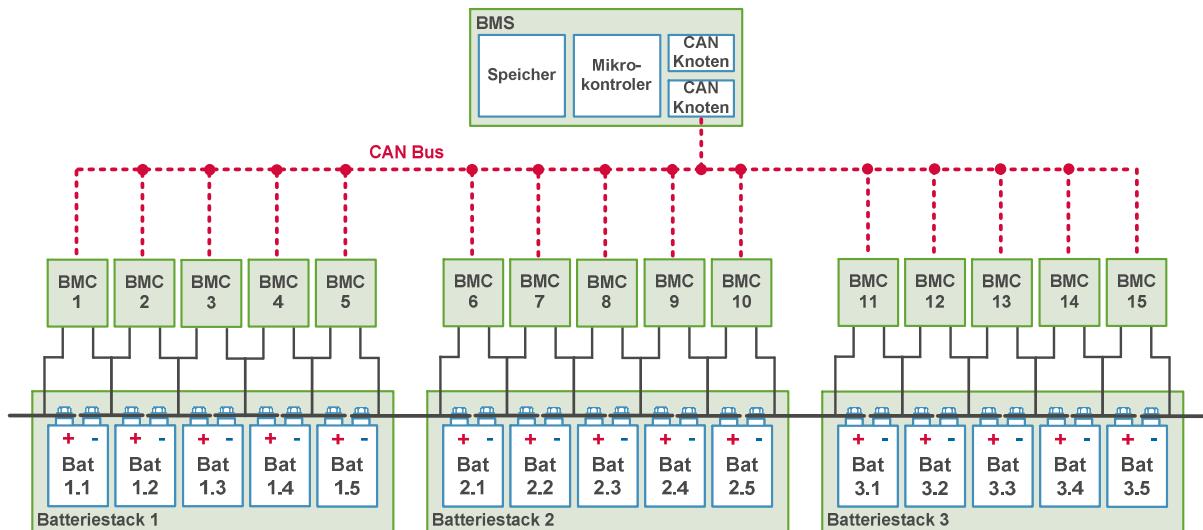


Abbildung 14: BMS dezentrale Architektur, nach [BMSStruc11]

Die BMCs kommunizieren die Messwerte über den CAN Bus an das BMS. Das Batteriemanagement System trifft Entscheidungen über die Sicherungsmaßnahmen und das Balancing und leitet diese Befehle wieder an die BMCs zurück.

Der Verkabelungsaufwand beschränkt sich auf die Verlegung der Busleitungen, jedoch benötigt man sehr viele BMCs und somit ist der Bauteileaufwand immens groß.

Da jede Zelle einzeln verwaltet wird, kann diese Struktur sehr leicht erweitert und skaliert werden.

Kommt es zu einem Ausfall eines BMCs, so kann die Zellspannung über die Einzelspannungen und der Gesamtspannung errechnet und bei mehreren Zellausfällen interpoliert werden.

Sollten die BMCs mit genügend Intelligenz ausgestattet sein, so können sogar die Aufgaben eines ausgefallenen BMS übernommen werden. Somit hätte man in jedem BMC eine Redundanz zum BMS und eine hohes Maß an Sicherheit erzielt.

3.5 Strommessung

Um die Lithiumakkumulatoren vor hohen Last- und Ladenströmen zu schützen, sollten diese Ströme vom BMS überwacht werden. Da meist die Zellen in Serie geschaltet sind, reicht es den Gesamtstrom zu messen.

Die Strommessung kann auf zwei verschiedene Wege durchgeführt werden. Entweder wird der Strom über einen Shunt-Widerstand bestimmt oder über einen Stromwandler.

Bei der Methode mit dem Shunt-Widerstand wird ein Messwiderstand, meist mit einem Widerstandswert im Bereich von Milliohm, seriell in den Laststrang verbaut (siehe Abbildung 15).

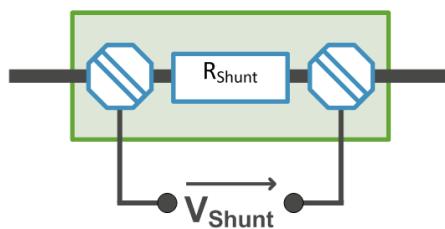


Abbildung 15: Strommessung mit einem Shunt-Widerstand

Da der Messwiderstand bekannt ist, kann so über dem Spannungsabfall am Shunt die Stromstärke bestimmt werden.

Da meist ein sehr kleiner Messwiderstand genutzt wird, um den Laststrom nicht zu verringern, kommt es zu kleinen Spannungsabfällen, die verstärkt werden müssen. Anschließend wird die Spannung über einen AD-Wandler bestimmt.

Die Genauigkeit des Messergebnisses hängt von der Genauigkeit des Messwiderstands, der Qualität des Verstärkers und der Präzision des AD-Wandlers ab.

Die Firma VISHAY stellt z.B. hochpräzise Messwiderstände im Bereich von $100\mu\Omega$ her (siehe Abbildung 16), die für solche Anwendungen gedacht sind [DataWAM12].

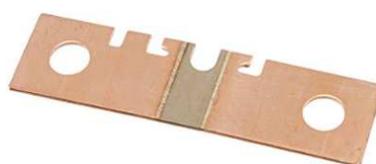


Abbildung 16: WSMS5515L3000JK Shunt Widerstand [DiKey12]

Die Strommessung mit einem Stromwandler erfolgt durch das Prinzip des Hall-Effekts. Diese Messung ist im Gegensatz zur Messung mit dem Shunt-Widerstand berührungslos und galvanisch getrennt. Somit ist die Installation einfacher, die Messung umkomplizierter und bei höheren Spannungen sicherer.

Die Messung beruht darauf, dass eine stromdurchflossener Leiter ein Magnetfeld um sich herum erzeugt. Der technische Aufbau wird prinzipiell in Abbildung 17 erläutert.

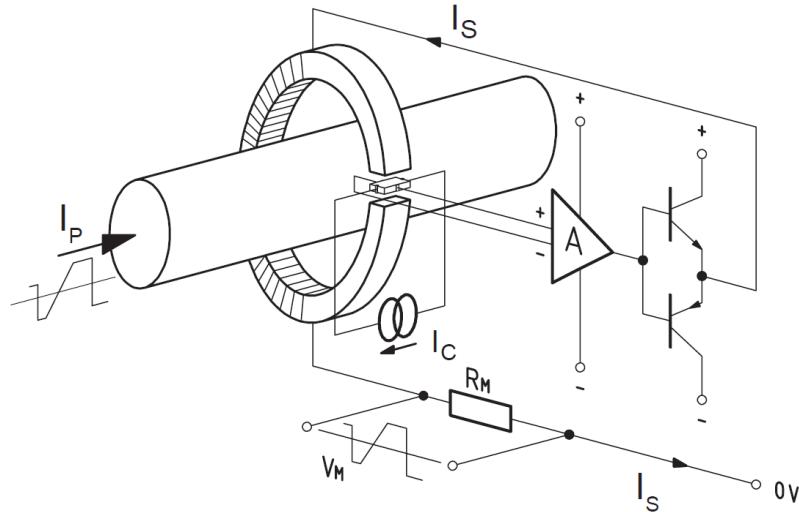


Abbildung 17: Closed loop tranducer [DataLEM04]

Das Magnetfeld um den Leiter wird durch den Eisenkern (höhere Permeabilität als Luft) geführt. Im Eisenkern befindet sich in einem dünnen Spalt eine Hallsonde, die durch ein Magnetfeld eine Hallspannung generiert. Durch einen Operationsverstärker kann diese Spannung dazu genutzt werden, über mehrere Windungen auf dem Eisenkern ein Gegenfeld zu erzeugen. Der Stromfluss durch den Messwiderstand kann dann als Spannungsabfall gemessen werden. Daher spricht man auch vom kompensierenden oder Null Flux Wandler.

Der dabei auftretende Strom I_s steht im Verhältnis zum Strom I_p unter Berücksichtigung des Windungsverhältnisses (siehe Formel 13).

$$I_s = I_p \cdot \frac{N_p}{N_s} \Leftrightarrow I_p = I_s \cdot \frac{N_s}{N_p}$$

Formel 13: Closed loop transducer Stromberechnung [DataLEM04]

Die Windungszahl N_p entspricht eins, falls der Leiter nur durch den Kern geführt wird. Der Strom I_s kann nun über den Spannungsabfall an einem Shunt-Widerstand berechnet und somit Rückschlüsse auf den Strom I_p geschlossen werden.

Zu beachten ist, dass bei dem Closed-loop Wandler ein Ruhestrom fließt, da interne Elektronik versorgt werden muss. Deshalb muss bei der Strommessung dieser Offset abgezogen werden.



Die Firma LEM ist auf dem Gebiet der Stromwandler führend und bietet eine breite Palette von Wandlern für die Strommessungen im Bereich von 2A bis hoch zu 500kA [DataLEM04] an.

Beide Messverfahren haben ihre Berechtigung. Zu beachten ist, dass beide einer Ungenauigkeit unterliegen. Ein LEM Wandler mit gutem Shunt-Widerstand kommt auf eine Genauigkeit von $\pm 0.5\%$ [DataLEM04].

Spezialisierte ICs für die Strommessung mit einem Shunt-Widerstand können eine Genauigkeit von bis zu 0.00066% erreichen [IsaHue12].

Je nach Anwendung und Kostenkalkulationen muss für jeden Fall die passende Methode und der passende IC gewählt werden.

3.6 Zellsymmetrierung

Die Zellsymmetrierung, auch gerne als „Balancing“ bezeichnet, ist eine wichtige Aufgabe eines BMSs. Meist besteht ein Akkupack aus einer Vielzahl von Einzelzellen. Jede Zelle ist ein chemischer Energiespeicher und unterscheidet sich leicht von baugleichen Zellen. So können Parameter, wie Innenwiderstand und chemische Abläufe leicht unterschiedlich sein. Dies führt zu unterschiedlich schnellem Entladen bzw. Laden der Zelle.

Abgesehen von den Unterschieden im Aufbau, können die Zellen auch durch unterschiedliche Anordnung im Stack und Einbauorte im System variieren. Eine Zelle in der Mitte eines Stacks erwärmt sich schneller als eine Zelle am Rand. Ein Stack, der näher an einer Wärmequelle eingebaut ist, wird schneller erhitzen als ein Stack, der direkt an der Lüftungszufuhr liegt.

Diese Abweichung, wenn auch nur klein, führen zur Asymmetrie der Zellen eines Stack und der Stacks untereinander.

Theoretisch kann der Asymmetrie mit verschiedenen Strategien entgegenwirken werden (siehe Abbildung 18).

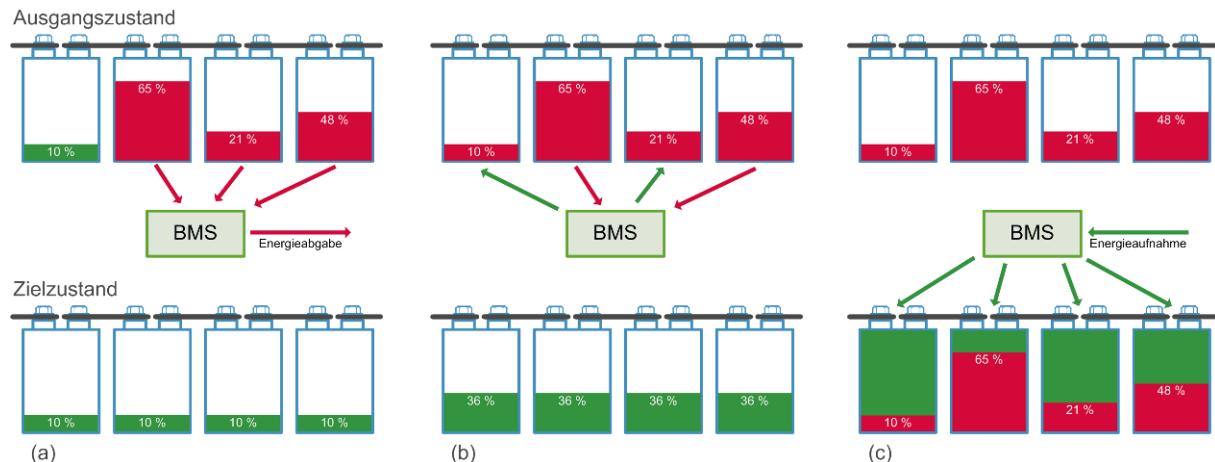


Abbildung 18: Zellsymmetrierung, nach [Eleknet09]

Bei Methode (a) wird die Zelle mit der geringsten Klemmspannung ermittelt. Den anderen Zellen wird nun soweit Energie entzogen, bis deren Klemmspannung gleich der Spannung der kleinsten Zelle entspricht. Dies wird meist über Bypasswiderständen realisiert, die parallel zu den Zellen geschaltet werden und die Energie in Wärme umsetzen. Man spricht hier vom passiven Balancing.

Methode (b) beschreibt die Ladungsumverteilung innerhalb eines Stacks. So können Zellen mit niedriger Klemmspannung von Zellen mit höherer Spannung geladen werden. Es gibt dabei drei Strategien, Zelle-zu-Batterie, Batterie-zu-Zelle und Zelle-zu-Zelle. Bei der Zelle-zu-Batterie-Methode wird die Zelle mit der höchsten Klemmspannung genutzt, um den Stack zu laden. Batterie-zu-Zelle beschreibt genau das Gegenteil. Der gesamte Stack lädt die Zelle mit der geringsten Spannung. Zelle-zu-Zelle beschreibt die Methode, bei der innerhalb der Zellen die Ladungen umverteilt werden können. Man spricht hier vom aktiven Balancing.

Bei Methode (c) werden die Zellen unterschiedlich stark geladen, um die Asymmetrie auszugleichen. Da meist die Zellen im Ganzen und in Serie geladen werden, muss Methode (a) oder (b) genutzt werden, um eine Überladung einer Zelle zu unterbinden. Falls möglich versucht man den gesamten Ladestrom an einer Zelle vorbeizuleiten. Dies kann durch Hilfsschütze realisiert werden.

Das passive Balancing, oder „Shunting“ (siehe Abbildung 19), ist das Verfahren, das den geringsten Aufwand mit sich bringt. Die Energie wird ohne großen Aufwand in Wärme umgesetzt, wodurch sie leider ungenutzt bleibt.

Bei großen Zellen und großen Asymmetrien muss eine Menge an Energie entzogen werden. Dies kann entweder durch kleine Widerstände erfolgen, wodurch der hohe Strom zu hoher Wärmeentwicklung führt und eventuell aktiv gekühlt werden muss, oder über verhältnismäßig große Widerstände, wodurch das Symmetrierung lange dauern kann.

Es empfiehlt sich, mit halbwegen balancierten Zellen zu beginnen (kalibrieren durch separates Laden). Das passive Balancing wird meist nur beim Laden angewandt, da es beim Entladen keinen großen Sinn ergibt. Die Zelle mit der niedrigsten Klemmspannung ist das limitierende Maß. Diese Spannung ändert sich auch mit passiven Balancing nicht.

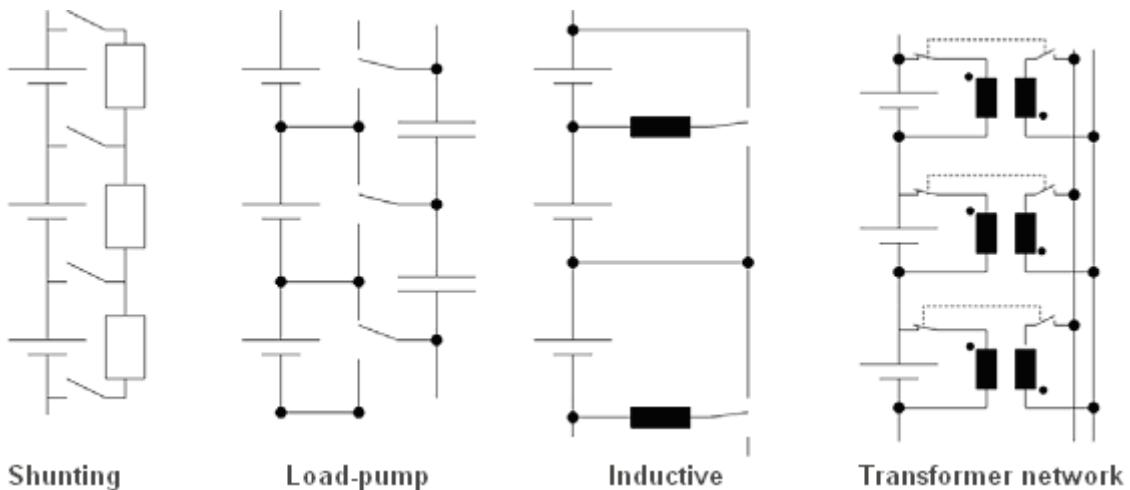


Abbildung 19: Balancingmethoden, nach [HyBatBre07]

Bei dem aktiven Balancing wird die Energie einer Zelle mit hoher Klemmspannung in einem Energiespeicher zwischengespeichert. Hierfür werden Bauelemente wie Kondensatoren (load pump), Spulen (inductive) und Transformatoren (transformer-network) verwendet.

Diese Energie kann nun genutzt werden um Zellen mit geringer Klemmspannung zu laden.

Der Verkabelungsaufwand und die Anzahl der Bauteile steigen immens bei hoher Zellenzahl in einem Stack. Zudem kommt hinzu, dass die Umverteilung nicht verlustfrei zu bewerkstelligen ist, da eine Vielzahl von passiven und aktiven Bauteilen beteiligt sind.

Der Steuerungsaufwand ist ebenso größer als bei passiven Balancing, was wiederum zum erhöhten Energieverbrauch führt.

Die Frage ist, ob sich das aktive Balancing lohnt. Das heißt, ob die eingesparten Verluste dem zusätzlichen Energieverbrauch im guten Verhältnis gegenüber stehen. Insbesondere steigen die Kosten für ein aktives System deutlich und müssen in die Beurteilung mit einfließen.

Die meisten Batteriemanagement ICs unterstützen das passive Symmetrieren. ICs, die aktive Verfahren unterstützen, sind eher selten und werden auch nicht verbreitet eingesetzt.

Im Ausblick verbesserter Batterietechnik wird es auch zukünftig nicht mehr nötig sein, große Energiemengen zu symmetrieren, da die Tolleranzen der Zellen bei der Herstellung immer kleiner werden. Kleinere Asymmetrien können dann passiv ausgeglichen werden.



3.7 Ladezustandsbestimmung

Unter Energiemanagement (EMS) versteht man im Bereich Batteriemanagement das Verteilen der Energie auf Subsysteme und das Ermitteln des SoCs.

Da für meine Bachelorarbeit nur die Bestimmung des SoCs von Relevanz ist, wird nur dieser Teil des Energiemanagements in den folgenden Absätzen beschrieben.

3.7.1 State of Charge Bestimmung und Methoden

Die State of Charge Bestimmung ist eine wichtige Aufgabe im Energie- bzw. Batteriemangement. Da es keine einheitlichen Definitionen über den Funktionsumfang eines BMSs gibt, ist es unklar, ob die Bestimmung des SoCs eher zum BMS oder zum EMS gehört. Diese Tatsache ändert aber nichts an der Aufgabe.

Es ist von entschiedener Wichtigkeit zu wissen, wie viel Energie noch in einem Akkumulator steckt. Gerade in Elektroautos kann man so ermitteln, wie viel Restreichweite in Kilometer die Akkuladung zulässt.

Der „Füllstand“ eines Akkumulators ist nicht zugänglich, anders als der Kraftstofftank bei einem herkömmlichen Automobil mit Verbrennungsmotor. Im Folgenden werden kurz einige Möglichkeiten vorgestellt, wie man den SoC eines chemischen Energiespeichers bestimmen kann.



3.7.2 Direktmessung

Die Direktmessung ist eine Möglichkeit für die SoC-Bestimmung. Hierbei werden versucht die Parameter einer Batterie zu bestimmen. Es werden Spannung, innere Impedanz, Spannungserholung nach einer Last und Temperatur bestimmt, um so Rückschlüsse auf den SoC zu ziehen. Diese Messungen können punktuell durchgeführt werden und werden meist genutzt um den SoC bei einer neuen Zelle zu bestimmen und dienen dann als Berechnungsgrundlage in anderen Methoden.

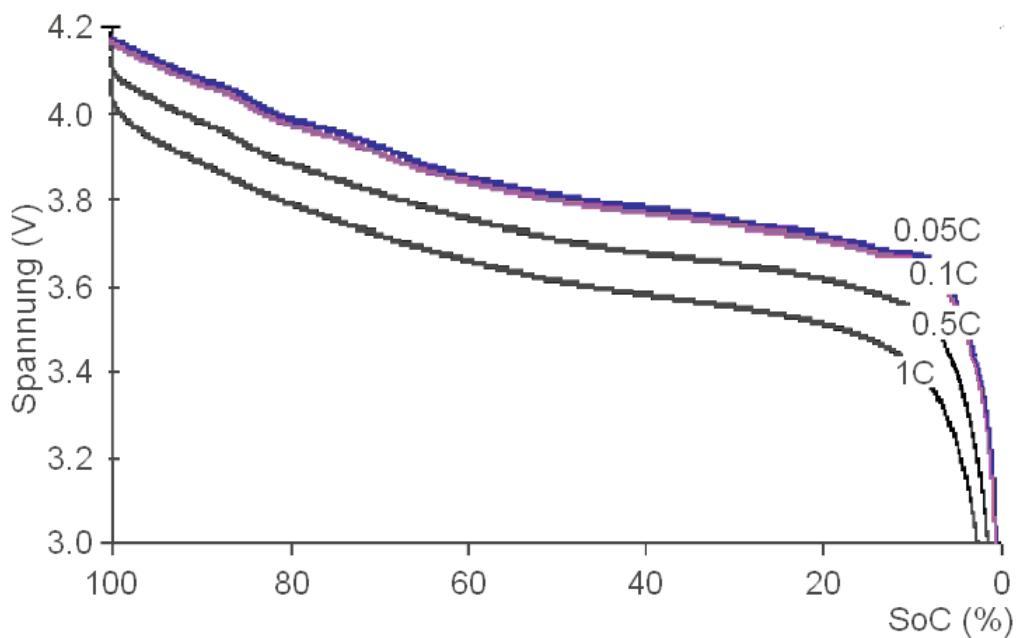


Abbildung 20: Entladeverhalten einer LiCoO_2 Zelle bei verschiedener C-Raten, nach [BatMan08]

Oft wird auch nur die Spannungsmessung als Grundlage einer durchgehenden SoC-Bestimmung genutzt. Diese Methode ist sehr einfach aber auch sehr ungenau. Der Spannungsverlauf eines Lithiums-Akkumulators ist stark abhängig vom SoH, von der Temperatur und vom Entladestrom (siehe Abbildung 20).

3.7.3 Coulomb-Zählung

Bei der Coulomb-Zählung, auch Ladungszählung genannt, wird versucht Lade- und Entladestrom einer Batterie zu messen und über der Zeit zu integrieren, um so die Kapazität zu bestimmen. Man spricht hier auch von der Ladungsbilanzierung, weil die hinzugefügte Energie der entnommenen Energie gegenübergestellt wird, um so den SoC zu bestimmen.

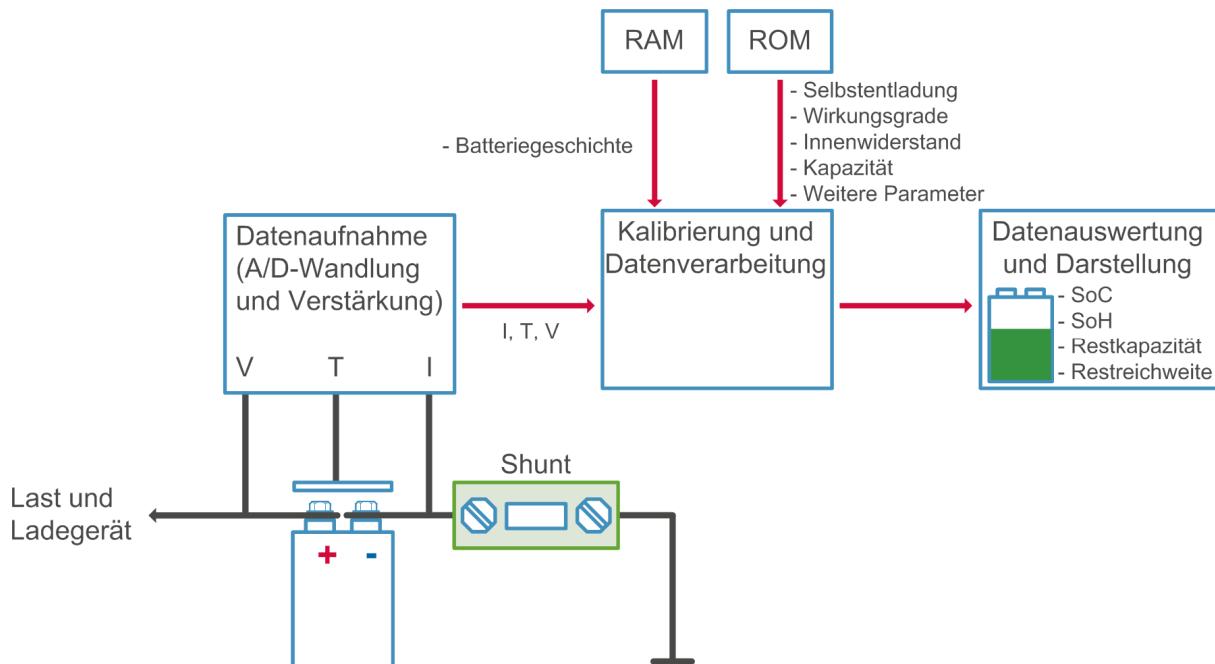


Abbildung 21: Darstellung einer SoC Bestimmung nach Coulomb-Zählung, nach [BatMan08]

In die Berechnung des SoCs fließen auch der SoH, die Temperatur, die Klemmspannung, die Selbstentladung, der Lade- und Entladewirkungsgrad und die Batteriehistorie mit ein, um möglichst genau zu sein. Bei einer vollständigen Aufladung werden die Messregister kalibriert und eine neue Bilanz aufgestellt (siehe Abbildung 21).

3.7.4 Open-circuit Voltage

Die Open-circuit Voltage (Leerlaufspannung) Methode beschreibt die Messung der Klemmspannung ohne Last. Von dieser Spannung kann über ein Kennfeld auf den SoC Rückschlüsse gezogen werden. Problematisch hierbei ist, dass diese Messung ohne Last und nach einer gewissen Erholungsphase durchgeführt werden muss. Im Betrieb ist dies nicht möglich. Zudem verändert sich der Spannungsverlauf der Batterie durch Alterung der Zellen.

3.7.5 Kalman Filter

Da sowohl die Zelle auch das Belastungsverhalten sehr variabel sein können, ist es nötig ein anpassungsfähiges Modell zur Bestimmung des SoCs zu verwenden. Der Kalman Filter ist ein Beispiel für solch eine Realisierung. Beim Kalman Filter wird anhand eines Batteriemodells und Messparameter eine mögliche Klemmspannung errechnet und anschließend mit dem tatsächlichem Messwert verglichen. Bei Fehlern reagiert der Filter adaptiv. Somit wird das interne Modell immer erneuert und die Vorhersage genauer. Parameter für das Batteriemodel sind zum Beispiel Temperaturverhalten, Innenwiderstand, Kapazität und Spannungsverhalten. Der Kalman Filter ist ein mathematisches Modell und wird meist im Mikrocontroller des BMS integriert.

3.7.6 Artificial Neural Network

Artificial Neural Network (ANN), in Deutsch „künstliche neuronale Netze“, sind auch adaptive Systeme, die der Vernetzung von Neuronen im Gehirn von Säugetieren nachgebildet sind.

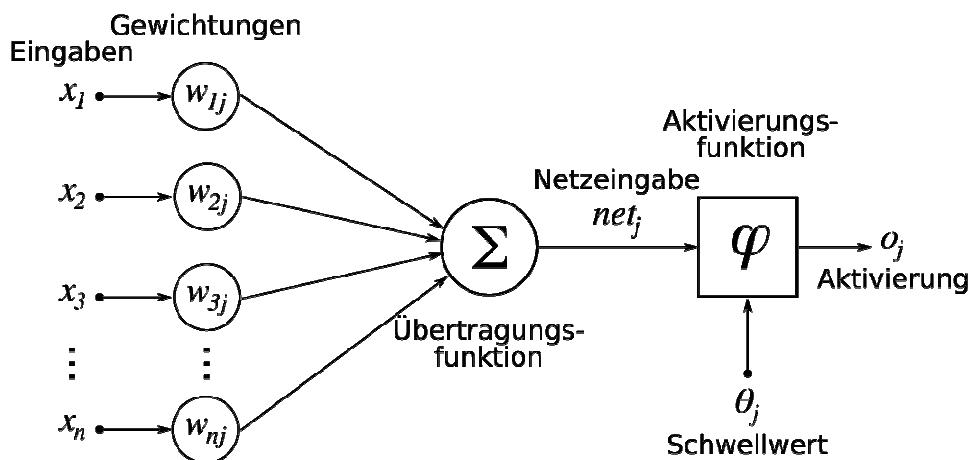


Abbildung 22: Künstliches Neuron eines neuronalen Netzwerks [WikiANN]

Wie in der Abbildung 22 dargestellt, laufen viele Parameter im künstlichen Neuron zusammen und werden anhand einer Übertragungsfunktion verarbeitet.

Das System ist adaptiv, weil es in der Lage ist, neue Neuronen zu generieren, Verbindungen zu löschen, die Vernetzung zu erweitern, Gewichtungen zu verändern und Schwellwerte anzupassen.

Artificial Neural Networks sind komplexe, mathematische Modelle, die einen großen Aufwand an Rechenleistung benötigen. Oft werden bei diesen Modellen externe Rechenzentren benutzt. Die Messdaten werden hierfür über das Internet versendet und die empfangenen Resultate am Endgerät umgesetzt. Die berechneten Werte weisen eine hohe Übereinstimmung mit der Realität auf.

Artificial Neural Networks benötigen zwei Phasen. In der Trainingsphase werden die Neuronen und Verknüpfungen gebildet, um dann in der Evaluationsphase überprüft zu werden [BatMan08].

4 Kommunikation im Auto

Die Anzahl der Steuergeräte in einem Auto nimmt stetig zu. In einem modernen Oberklassewagen werden bis zu 60 Steuergeräte verbaut [HBKFZ06]. Eine Übersicht der verbauten Steuergeräte ist in Abbildung 23 zu sehen.

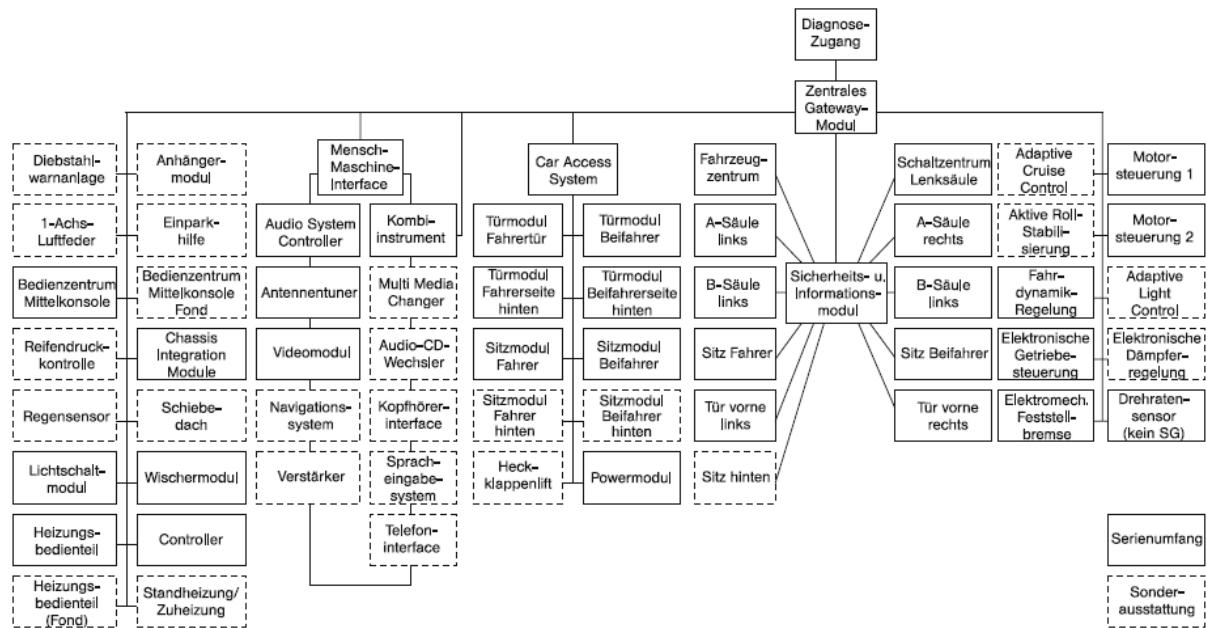


Abbildung 23: Steuergeräte in einem Oberklassefahrzeug [HBKFZ06]

Um den Verkabelungsaufwand zu minimieren wurde 1983 von den Firmen Bosch und Intel der Controller Area Network (CAN) Bus entwickelt. Der CAN-Bus ist einer von vielen Kommunikationssystemen, die im Automobil verwendet werden. Im Folgenden liegt der Fokus auf dem CAN-Bus.

4.1 CAN Funktionsweise

Der CAN-Bus ist ein asynchrones, serielles Bussystem. Ein Bus ist ein Datenübertragungssystem, bei dem mehrere Teilnehmer über einen gemeinsamen Übertragungsweg verbunden sind. Die Kommunikation findet ohne Zwischenstationen statt (siehe Abbildung 24, Darstellung a).

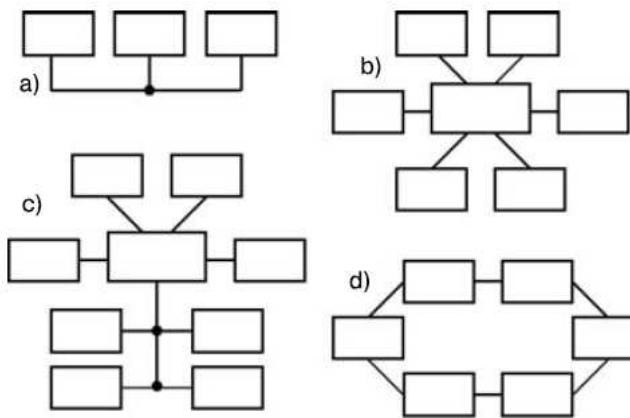


Abbildung 24: Topologien: a) Bus b) Stern c) Baum d) Ring [HBKFZ06]

Da bei einem Bussystem alle Teilnehmer an der gleichen Kommunikationsschnittstelle hängen, muss es eine Form der Zugriffserkennung und der Identifikation geben.

Beim CAN-Bus erfolgt die Zugriffserkennung über Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance (CSMA/CA), zu Deutsch Trägerprüfung Mehrfachzugriff und Kollisionsvermeidung. Dabei wird durch Arbitrierung die Kollision versucht zu vermeiden.

Die Identifikation erfolgt über eine Identifikationsnummer (ID) im Header des Datenframes.

Man unterscheidet bei den CAN-Bussen zwischen Low Speed CAN und High Speed CAN. Beide unterscheiden sich in der Datenübertragungsrate und der Pegelcharakteristiken der Steuerleitungen.

Der High Speed CAN erzielt eine Datenrate von bis zu 1 MBit/s und wird verbreitet in der Antriebskommunikation eingesetzt [HBKFZ06].

Der Low Speed CAN ist ein wenig langsamer und erzielt Datenraten von bis zu 125 kBit/s. Dieser wird bevorzugt bei der Kommunikation von Komfortsteuergeräten eingesetzt.

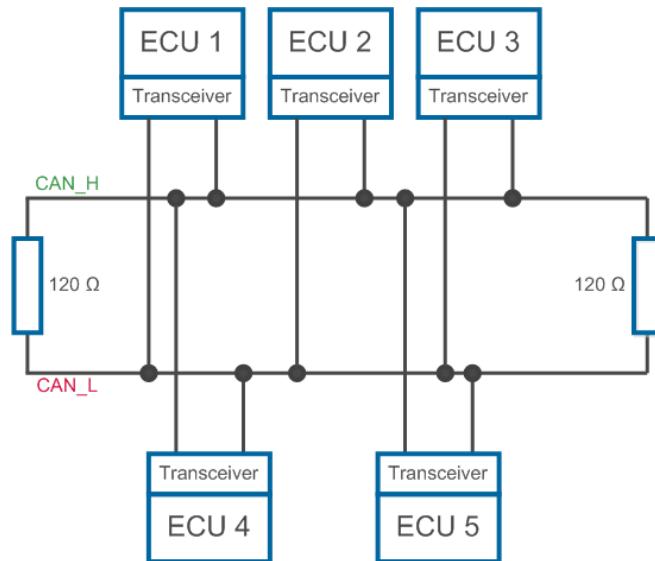


Abbildung 25: CAN Topologie, nach [HBKFZ06]

Die eigentliche Kommunikation bei CAN erfolgt über eine Zweidrahtleitung, CAN Low und CAN High, die mit einem Abschlusswiderstand von 120Ω abgeschlossen ist (siehe Abbildung 25). Dabei werden verschiedene Pegel für die digitale, bitweise Übertragung von Daten genutzt. Da es zu einer Differenzmessung innerhalb der Transceiver kommt, wir keine gemeinsame Masse benötigt.

Es wird auch ein Single-Wire-CAN im Automobil verwendet, der mit einer Steuerleitung und der Fahrzeugmasse auskommt. Dieser CAN-Bus wird im Folgenden nicht betrachtet.

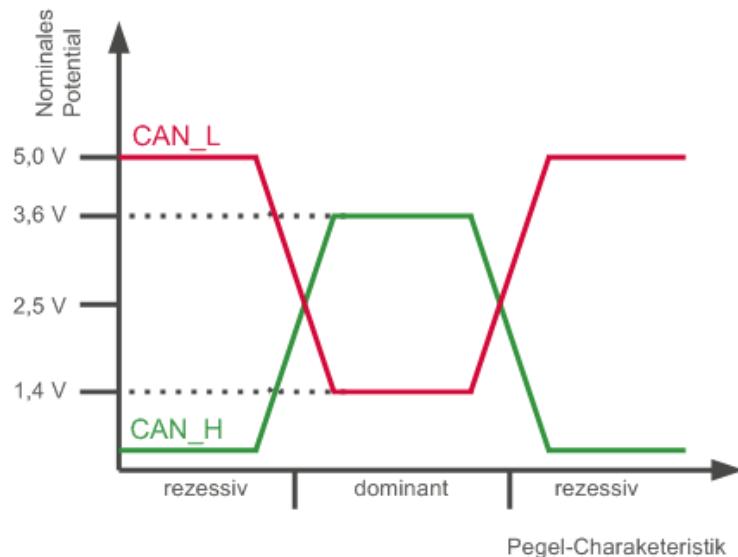


Abbildung 26: Pegel-Charakteristik für Low Speed CAN, nach [HBKFZ06]

Die verschiedenen CAN Systeme unterscheiden sich untereinander in den Pegelcharakteristiken. Wichtig hierbei ist, dass die Null als dominanter Pegel fungiert und den Pegel auf 1.4V zieht (siehe Abbildung 26). Dies ist besonders bei der Arbitrierung wichtig, da sich eine Null immer durchsetzt. Wenn mehrere Nachrichten auf den CAN-Bus liegen, setzt sich die Nachricht mit der niedrigsten ID durch, womit eine Priorisierung möglich ist.

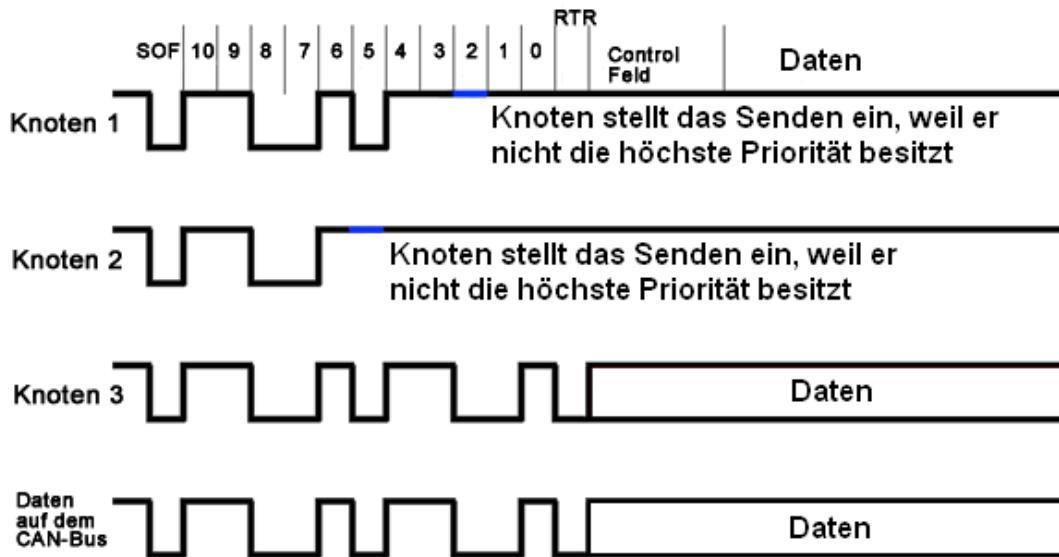


Abbildung 27: Arbitrierung bei CAN [PICCAN10]

Die Abbildung 27 zeigt ein kleines Beispiel, in dem sich Knoten 3 durchsetzt, weil die ID von der Nachricht geringer als die der anderen ist. Sobald ein Sender merkt, dass nicht mehr seine Bits auf dem Bus liegen, wird das Senden eingestellt und anschließend erneut gesendet. Im Ruhezustand ist der Pegel des Busses rezessiv. Der Start of Frame (SoF) ist ein dominanter Pegel.

Da die Kapazität des CAN-Busses bei vielen Teilnehmern schnell ausgeschöpft ist, werden mehrere CAN-Busse im Automobil verlegt. Dadurch wird das Kommunikationsaufkommen auf einem Bus reduziert.

4.2 CAN Frame

Die Sicherungsschicht (nach OSI-Schichtenmodell) des CAN-Protokolls beschreibt den Aufbau von Datenframes bei der CAN-Kommunikation. Dabei werden zwischen zwei unterschiedlichen Typen differenziert, der Standard-Frame und der Extended-Frame (siehe Abbildung 28).

Standard-Frame nach Standard CAN 2.0A:

Start	Identifier	RTR	IDE	r0	DLC	DATA	CRC	ACK	EOF+IFS
1 Bit	11 Bit	1 Bit	1 Bit	1 Bit	4 Bit	0...8 Byte	15 Bit	2 Bit	10 Bit

Extended-Frame nach Standard CAN2.0B:

Start	Identifier	SRR	IDE	Identifier	RTR	r1	r0	DLC	DATA	CRC	ACK	EOF+IFS
1 Bit	11 Bit	1 Bit	1 Bit	18 Bit	1 Bit	1 Bit	1 Bit	4 Bit	0...8 Byte	15 Bit	2 Bit	10 Bit

Abbildung 28: Aufbau des Standard- und Extended-CAN-Frames [GrdICAN11]

Der Frame setzt sich aus den folgenden Bestandteilen zusammen:

- Start: SoF der CAN-Nachricht
- Identifier: ID und Prioritätsinformation für die Busarbitrierung
- RTR: Remote Transmission Request, Sendeauflorderung für den Empfänger
- SRR: Substitute Remote Request, signalisiert mit IDE Bit eine Extended ID
- IDE: Identifier Extension Bit, signalisiert mit SRR Bit eine Extended ID
- DLC: Data Length Code, Länge der Daten in Bytes
- Data: Datenfeld, maximal acht Byte
- CRC: Cyclic Redundancy Check, Prüfsumme
- ACK: Acknowledgement, Bestätigungsfeld für Empfangsbestätigung
- EoF: End of Frame, Ende des CAN-Frames
- IFS: Intermission Frame Space, Abstand zwischen zwei Nachrichten

Der wichtigste Unterschied zwischen den beiden Standards ist die Länge der ID. Ein Standardtyp hat 11 Bits und ein Extendedtyp 29 Bits für die Identifizierung zur Auswahl. Somit ergeben sich auch unterschiedlich Anzahlen möglicher verschiedener Nachrichten.

Mit 11 Bit kann man $2^{11} = 2048$ unterschiedliche Nachrichten absetzen, wohingegen es bei dem Extendedtypen 29 Bit $2^{29} = 536870912$ Nachrichten sind.



5 Umsetzung des Batteriemanagement Systems

Im Rahmen eines Smart Grid Projekts an der Siemens Technik Akademie (STA) Berlin, wird ein Showroom entwickelt, der verschiedene Aspekte des intelligenten Stromnetzes aufzeigt. Anhand dieses Raumes können verschiedenste Experimente und Simulationen durchgeführt werden. Ein Akteur in diesem System ist ein Buggy, der von einem Antrieb mit Verbrennungsmotor auf elektrischen Antrieb umgebaut wurde. Es handelt sich hierbei um das Modell XYKD260-I der Firma Xingyue.



Abbildung 29: eBuggy an der STA Berlin - Front

Im Rahmen dieser Bachelor Thesis soll der eBuggy (siehe Abbildungen 29 und 30) mit einem Batteriemanagement System ausgerüstet werden.



Abbildung 30: eBuggy an der STA Berlin - Profil

5.1 Ausgangszustand

Der Ausgangszustand für diese Thesis ist der bereits auf elektrischen Antrieb umgebaute Buggy. Im Folgenden werden kurz die Systemstruktur und die einzelnen Komponenten vorgestellt.

5.1.1 Systemstruktur

Das Ausgangssystem beinhaltet nur die wichtigsten Komponenten, um ein Fahren zu ermöglichen (siehe Abbildung 31). Der Hauptlaststromkreis besteht aus dem Akkupack, einer Sicherung, einem Hauptschütz und der Powerelektronik (PE), die den Motor steuert.

Die VCU dient als zentrale Steuereinheit.

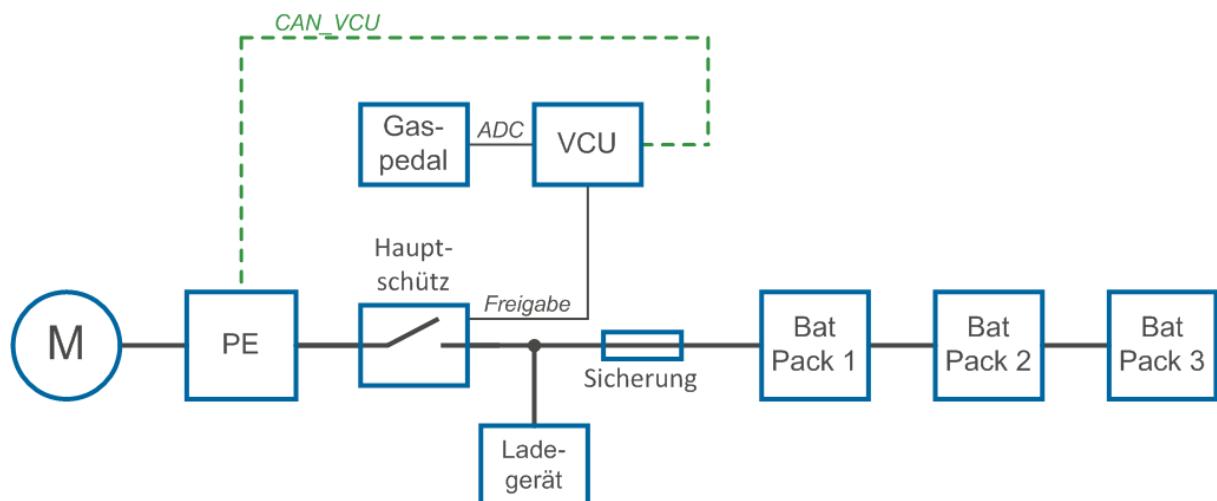


Abbildung 31: Systemstruktur des Ausgangszustands

Ersichtlich ist, dass es in der bisherigen Struktur noch keine integrierte Überwachung der Batterien gibt.

5.1.2 Motor

Bei dem Motor handelt es sich um einen Gleichstrommotor des Types 200-135 der Firma AGNI (siehe Abbildung 32).



Abbildung 32: AGNI Motor 200-135 [AGNI09]

Dieser Motor ist ein Scheibenmotor und hat folgende Spezifikationen [DataAGNI09]:

- Maximale Spannung: 80V
- Konstanter Strom bei 48V: 170A
- Konstante Leistung bei 48V: 7200W
- Konstante Leistung bei 80V: 12500W
- Maximale Leistung für 5s: 21000W
- Maximale Drehzahl: 4000rpm
- Gewicht: 10kg

5.1.3 Motorsteuerung

Bei der Motorsteuerung (PE) handelt es sich um einen Kelly Controller PM48501B der Firma Kelly Controls LLC (siehe Abbildung 33). Die Steuerung kann dauerhaft Ströme bis zu 200A schalten und besitzt einen eigenen Mikrocontroller der programmiert werden kann [DataKelly11].



Abbildung 33: Kelly Controller PM48501B [DataKelly11]



5.1.4 Gaspedal

Das Gaspedal beinhaltet ein analoges Potentiometer (Poti), welches eine analoge Spannung proportional zum Neigungswinkel an die VCU übermittelt. Die VCU codiert den Wert in eine CAN-Nachricht und schickt diese über den Fahrzeugbus (CAN_VCU) an die Motorsteuerung. An der Motorsteuerung ist weiteres Gerät montiert, welches die Nachricht der VCU decodiert und der Beschleunigungswert wieder in eine analoge Spannung (0 bis 5V) umwandelt und direkt an die Motorsteuerung gibt.

Die Motorsteuerung regelt die Motorgeschwindigkeit je nach Pedalstellung.

5.1.5 Batterien

Bei den verwendeten Akkumulatoren handelt es sich um Lithium-Eisenphosphat-Akkus der Firma CALB (China Aviation Lithium Battery, vorher Sky Energy) vom Typ SE180AHA (siehe Abbildung 34).



Abbildung 34: Lithium-Eisenphosphat Akku der Firm CALB [CALB11]

Diese Zellen haben folgen Spezifikationen [CALB11]:

- Leerlaufspannung: 3.4V
- Nennspannung: 3.2V
- Ladeschlussspannung: 3.6V
- Entladeschlussspannung: 2.5V
- Nennkapazität: 180Ah
- Innenwiderstand: $\leq 0.6\text{m}\Omega$
- Energie: 612Wh
- Maximaler Ladestrom: 3C
- Zyklenfestigkeit: > 2000
- Betriebstemperatur: Laden bei 0 bis 45°C, Entladen bei -20 bis 50°C
- Maße (Höhe x Breite x Tiefe): 283mm x 182mm x 71mm
- Gewicht: 5.6kg
- Gehäusematerial: Plastik
- Anschlussbolzen: M8



Insgesamt werden fünfzehn Zellen verwendet. Der Akkupack ist in drei Stacks zu je fünf Zellen organisiert. Die Zellen sind in Serie geschaltet, wodurch eine gesamte Nennspannung von 48V und eine Leerlaufspannung von 51V erzielt wird. Dabei bleibt die Kapazität mit 180Ah unverändert. Das Akkupack hat eine Gesamtenergie von bis zu 9180Wh. Das Eigengewicht beträgt 84kg (ohne Schrauben, Verbindungsstege, Kabel und Gehäuse).

5.1.6 Hauptschütz und Sicherung

Die Lasttrennung kann reversibel mit dem Hauptschütz oder irreversibel durch die Sicherung erfolgen. Der Hauptschütz wird durch die VCU über das 12V Bordnetz geschaltet.

Die Sicherung ist eine 200A Schmelzsicherung und löst bei Strömen höher 200A aus. Eine weitere Sicherheitsmaßnahme ist ein Notausschalter, der bei Betätigung den Hauptschütz öffnet. Weitere Sicherungsvorkehrungen sind nicht vorgesehen.

5.1.7 Ladegerät

Das Ladegerät ist so nicht im Fahrzeug vorgesehen. Der Funktionsblock in der Struktur beschreibt den Anschlusspunkt für ein externes Ladegerät. Benutzt wird ein primär getaktetes Schaltnetzteil vom Typ PSS18 der Firma CIE A+E GmbH (siehe Abbildung 35).



Abbildung 35: Ladergerät PSS18 [DataPSS02]

5.2 Anforderungen

Ausgehend von der Ausgangsstruktur soll ein Batteriemangement System entwickelt, gefertigt, integriert und programmiert werden. Hierzu werden Stromlaufpläne und Platinenlayouts eines Batterie Modul Controllers bereitgestellt.

Es soll möglich sein, alle Zellen mit Hilfe von drei BMCs überwachen und balancieren zu können. Dabei wird von jedem BMC ein Batteriestack von je fünf Zellen überwacht.

Das Zielsystem soll modular aufgebaut werden, sodass das BMS beliebig erweitert werden kann. So sollen entweder die Anzahlen der Zellen je BMC oder die Anzahl der BMCs an sich veränderbar sein. Abschließend soll eine Form der Ladezustandbestimmung (Energiemanagement) implementiert werden, die unter Berücksichtigung verschiedener Parameter die Berechnung der Restreichweite in Kilometer ermöglicht.

5.3 Zielstruktur

Die vorhandene Systemstruktur wird mit den folgenden Komponenten und Funktionen erweitert, um die Anforderungen zu erfüllen (siehe Abbildung 36, detaillierte Darstellung in Abbildung 37).

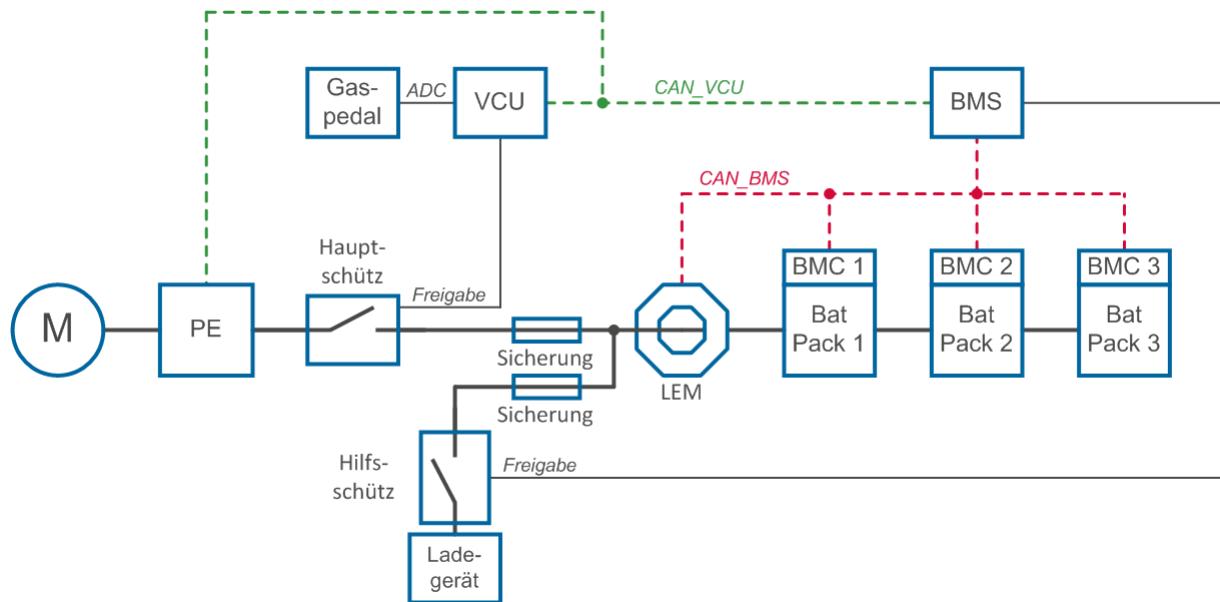


Abbildung 36: Zielstruktur des BMS

Jeder der drei Batteriestacks erhält ein BMC, der die Zellen überwacht und die Maßnahmen des BMS umsetzt. Die Kommunikation zwischen BMS und BMC erfolgt über einen separaten CAN-Bus (CAN_BMS). Die zentrale Steuereinheit ist das BMS, bei der alle Informationen zusammenlaufen und die Entscheidungen und Maßnahmen getroffen werden.

Das BMS ist auch die Schnittstelle zwischen dem CAN-Bus CAN_BMS und dem Fahrzeugbus (CAN_VCU). Das BMS entscheidet selbstständig, welche Informationen an die VCU weitergegeben werden.

Zur Strommessung wird ein Stromwandler der Firma LEM in den Hauptstromkreis integriert. Dieser Wandler ist mit einem CAN Knoten ausgerüstet und versendet die Messwerte über den CAN-Bus CAN_BMS an das BMS.

Das BMS erhält direkte Freigabekontrolle über das Hauptschütz und indirekte Kontrolle über die Motorfreigabe. Die Motorfreigabe darf nur durch die VCU erfolgen, wenn das BMS eine positive Statusmeldung über den CAN_VCU Bus sendet. Diese Meldung erfolgt kontinuierlich.

Zur Ladekontrolle wird ein Hilfsschütz in den Ladezweig implementiert. Die Steuerung obliegt dem BMS, welches auf Basis der Klemmspannungen und weiteren Parametern entscheidet, ob geladen werden darf. Bei Überschreitung der Ladeschlussspannung wird das Hilfsschütz geöffnet, um weiteres Laden zu verhindern. Eine optische Meldung für den Fahrer wird implementiert.

Die Visualisierung erfolgt über ein Display an dem BMS und zusätzlich über Bluetooth auf ein Tablet. Die Darstellung und die Kommunikation auf und mit dem Tablet ist nicht Teil dieser Arbeit, es werden lediglich die Informationen und die Schnittstellen bereitgestellt.



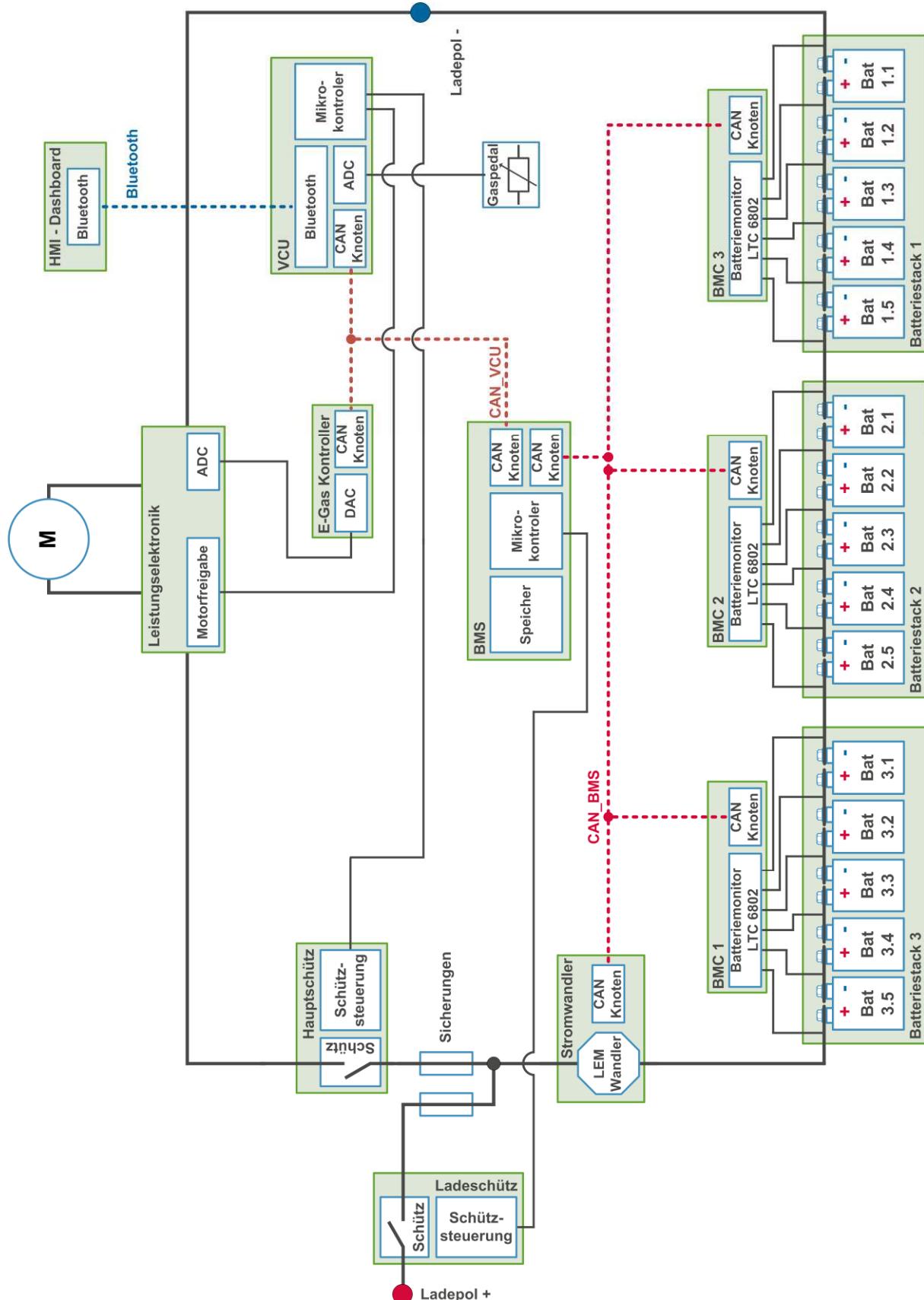


Abbildung 37: BMS Zielstruktur - Detailliert

5.4 Stromwandler mit CAN Knoten

Ein Stromwandler misst berührungslos und galvanisch getrennt den Strom durch einen Leiter. Benutzt wird hierbei ein Stromwandler vom Typ LF 305-S der Firma LEM.

Der Spannungsabfall an einem Shunt-Widerstand spiegelt die gemessene Stromstärke wider (siehe Kapitel 3.5 Strommessung).

Die Messung des Spannungsabfalls kann über eine Messleitung anderorts geschehen. Jedoch wurde im Rahmen dieser Arbeit der Stromwandler mit einem Mikrocontroller und einem CAN Knoten ausgestattet, sodass die Messergebnisse über den CAN_BMS Bus versendet werden können.

Ein Stromwandler kann negative und positive Ströme messen, was sich durch einen negativen respektive positiven Spannungsabfall am Messwiderstand zeigt. Damit auch negative Spannungen gemessen werden können, wurde ein bipolarer Analog-Digital-Wandler (ADC) des Typs MAX186 der Firma Maxim verwendet. Die Kommunikation erfolgt über die Serial Peripheral Interface (SPI) Schnittstelle des Chips.

Als Steuereinheit dient ein Developmentboard des Typs AVR-CAN der Firma OLIMEX mit einer AT90CAN128 Mikrocontroller der Firma Atmel (siehe Abbildung 38 und 39). Der AT90CAN128 besitzt eine CAN-Schnittstelle, die auch vom AVR-CAN Board unterstützt und herausgeführt wird.

Die Spannungsversorgung erfolgt über das 12V Boardnetz des eBuggys. Um die -15V und 15V Versorgung des Stromwandlers zu erzeugen, wird ein DC/DC-Wandler des Typs TEN 5-2423WI der Firma Traco Power verwendet.

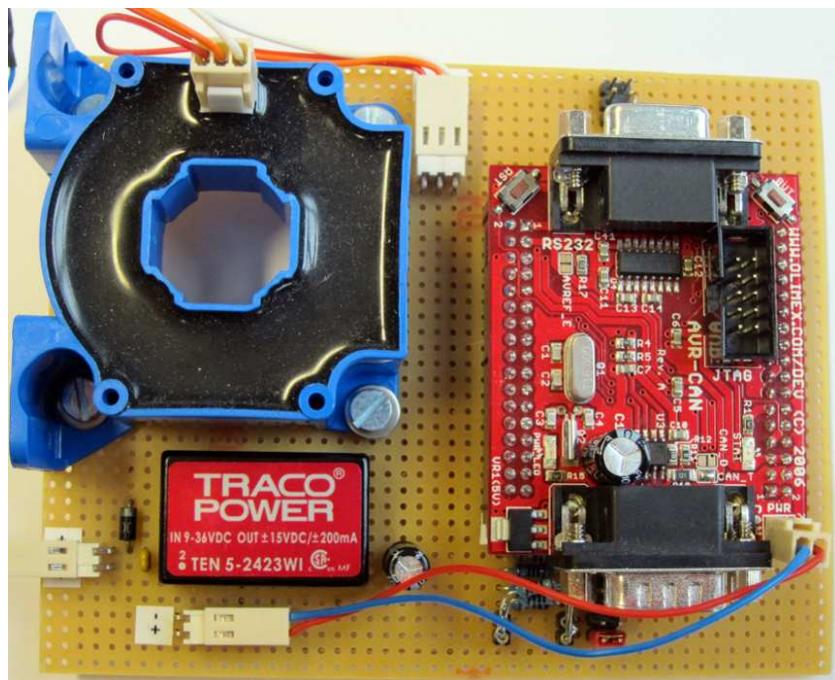


Abbildung 38: Stromwandlerplatine mit AVR-CAN Board - Oberseite

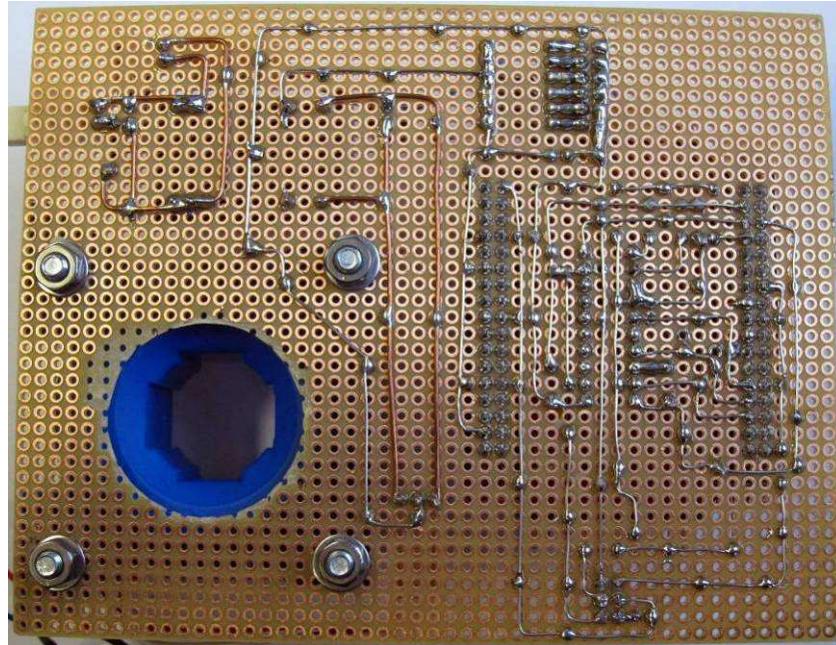


Abbildung 39: Stromwandlerplatine mit AVR-CAN Board - Unterseite

Die Stromwandlerplatine ist auch mit einer In-System-Programmierungs (ISP) Schnittstelle ausgerüstet, wodurch das direkte Flashen des Mikrocontrollers möglich ist.

Der MAX186 ist mit einem 12-Bit breiten ADC ausgestattet. Verwendet wird die interne Spannungsreferenz von 4.096V. Da auch negative Spannungen gemessen werden können, teilt sich der 12-Bit breite Wertebereich auf. Das höchstwertige Bit (MSB) symbolisiert das Vorzeichen und die restlichen elf Bits den Wertebereich. Die Auflösung erfolgt nach dem Prinzip des Zweierkomplements. Somit können Spannungen im Bereich von -2.048V bis 2.047V gemessen werden. Die Messung erfolgt ausschließlich am ersten Kanal des ADCs. Zur Gewährleistung eines stabilen Messwerts, wird der arithmetische Mittelwert aus zehn Messwerten gebildet.

Über die SPI Schnittstelle wird das entsprechende Register ausgewählt und der Messwert ausgelesen. Der AT90CAN128 verpackt den Messwert in eine CAN Nachricht mit Standard-ID. Der Zahlenwert wird im Binary Coded Decimal (BCD) Format mit einem Offset von 48 übertragen, d. h. jede Ziffer des Messwerts wird mit ihrem entsprechendem ASCII-Zeichen (American Standard Code for Information Interchange) übertragen. Das Vorzeichen wird ebenfalls als das entsprechende ASCII-Zeichen mit angeführt. Zum Beispiel:

Gemessen wurde: +1.099V → in BCD: 1 0 9 9 → in ASCII: „1“ „0“ „9“ „9“ „+“

Gemessen wurde: -0.913 → in BCD: 0 9 1 3 → in ASCII: „0“ „9“ „1“ „3“ „-“

Die fünf ASCII-Zeichen füllen die ersten fünf Datenbytes der CAN-Nachricht aus, die restlichen drei sind reserviert (r) und können zukünftig weitere Funktionen übernehmen (siehe Tabelle 1).

ID	Typ	DLC	Byte 1	Byte 2	Byte 3	Byte 4	Byte 5	Byte 6	Byte 7	Byte 8
0x060	TX	8	1000er	100er	10er	1er	Vorz.	r	r	r

Tabelle 1: CAN-Nachrichten des Stromwandlermoduls

Das Versenden der Nachricht mit dem gemittelten Messwert erfolgt alle 100ms. Das Ausbleiben von fünf aufeinander folgenden Nachrichten signalisiert dem BMS ein fehlerhaftes Arbeiten des Stromwandlers.

5.4.1 Stromlaufplan

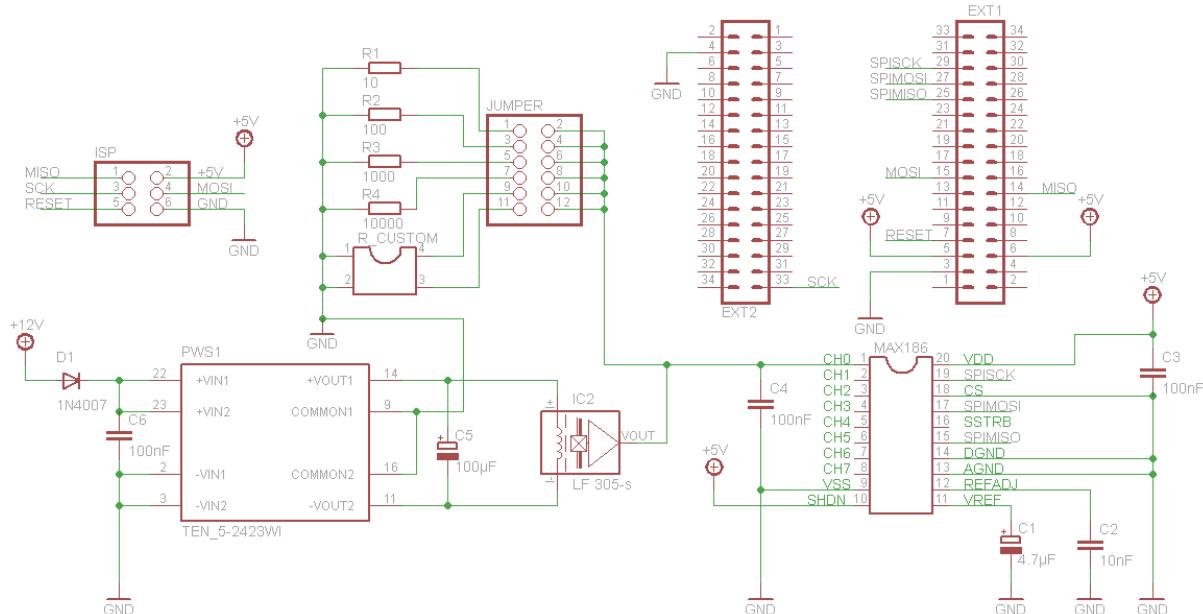


Abbildung 40: Stromlaufplan der Stromwandlerplatine mit CAN Knoten

In Abbildung 40 ist der Stromlaufplan des Stromwandlers zu sehen. Er wurde mit dem Programm Eagle erstellt. Mit den Verbindungsbuchsen EXT1 und EXT2 kann das AVR-CAN Board auf die Platine gesteckt werden. Der Shunt-Widerstand kann mit Hilfe von Jumpern aus vier fest installierten (10Ω , 100Ω , 1000Ω , 10000Ω) und zwei frei wählbaren Widerständen festgelegt werden. Es empfiehlt sich hochpräzise Messwiderstände zu verwenden, um die Toleranz der Messung gering zu halten.

Das AVR-CAN Board wird über einen Steckverbinder auf der Oberseite mit 12V vom Fahrzeugnetz versorgt. Der verbaute Linearregler generiert ein 5V Level, welches über den Verbinder EXT1 für die Versorgung des MAX186 verwendet wird.

Möglich wäre es, einen Schaltregler zu implementieren, damit das AVR-Board nicht über den Linearregler versorgt werden muss. Dies würde die Verluste der Platine reduzieren.

Ein Layout mit surface-mounted device (SMD) Bauteilen und ohne AVR-CAN Board ist angedacht, aber nicht Teil dieser Arbeit. Eine gefertigte Platine mit eigenem Mikrocontroller würde die Größe immens reduzieren.

5.4.2 Programmablauf

Das Programm für das AVR-CAN Board wurde mit Hilfe von Programmer's Notepad geschrieben. Als Compiler wurde der win-avr Compiler genutzt, der auf den win-gcc Compiler basiert. Das Flashen wurde mit Hilfe AVR Studio 5 und einem AVRISP mkII Adapter durchgeführt.

Sämtliche Quelldateien und weitere Datenblätter sind im Anhang auf der CD-Rom zu finden.

Die Programme werden im Folgenden nur anhand von Ablaufplänen beschrieben.

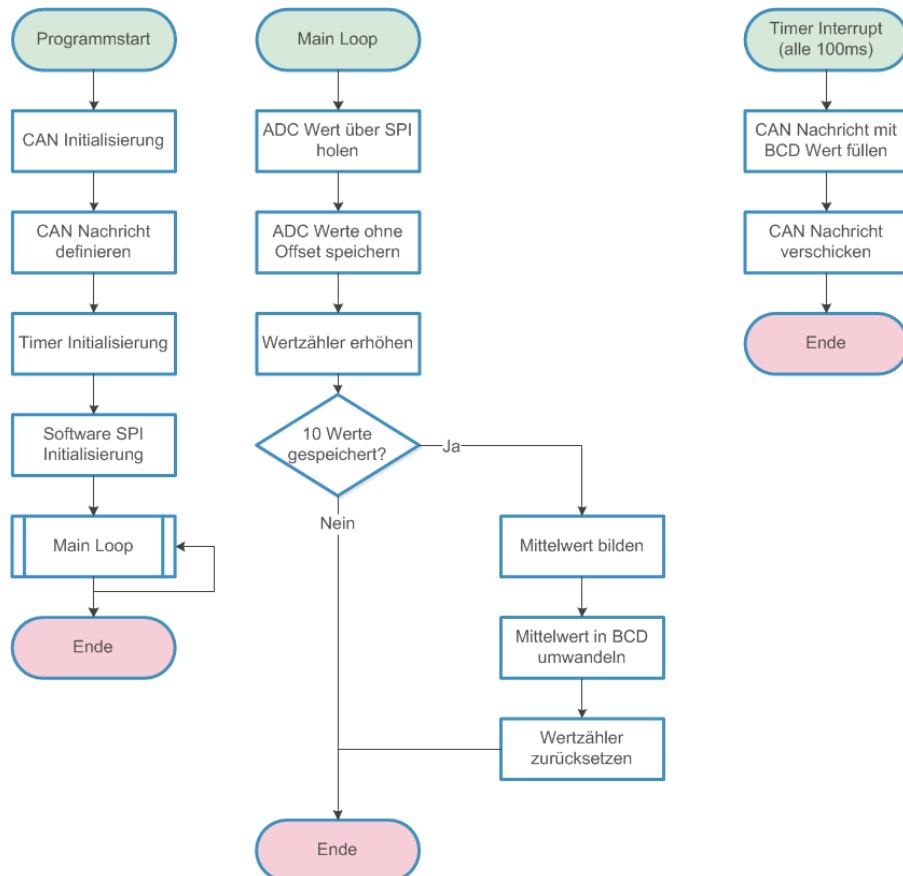


Abbildung 41: Ablaufplan Stromwandler

Der Programmablauf lässt sich in drei Phasen einteilen (siehe Abbildung 41). Die erste Phase ist die Initialisierungsphase, in der alle Schnittstellen, Register und Ports entsprechend ihrer Funktionen eingestellt werden.

Der CAN Knoten wird auf eine Übertragungsrate von 125kBits/s eingestellt, der Empfangs- und Sende-Interrupt wird ausgeschaltet und das Messageobjekt Null für das Sende der CAN-Nachricht mit den ADC Werten vorgesehen.

Im Folgenden wird die CAN-Nachricht definiert, d.h. es wird die ID auf 0x060, der ID-Typ auf Standard, die Nachrichtenlänge auf acht und die ID-Maske auf 0x7ff festgelegt.

Abschließend wird noch der Timer aktiviert, eingestellt und der Überlauf-Interrupt eingeschaltet.

Die zweite Phase ist der Main Loop, eine Endlosschleife, in der der ADC über SPI angesprochen und ausgelesen wird. Dabei wird nur der Kanal Null ausgelesen. Dies erfolgt zehnmal. Nachdem zehn Werte zwischengespeichert worden sind, wird das arithmetische Mittel daraus gebildet und das Ergebnis in das BCD-Format umgewandelt. Die BCD-Werte werden in einer globalen Variablen zwischengespeichert.

Die dritte Phase wird durch einen Interrupt gesteuert und läuft daher unabhängig vom Main Loop. Der Interrupt wird durch das Überlaufen eines Timers ausgelöst. Dadurch wird erzielt, dass im Abstand von 100ms ein Nachrichtenobjekt mit den BCD-Werten des Durchschnittsmesswerts gefüllt und über den CAN-Bus verschickt wird.

Bei der Bestimmung des Durchschnittswerts können auch bessere, mathematische Filter eingesetzt werden. Der gestutzte Mittelwert wäre eine denkbare Methode, um die Messgenauigkeit zu erhöhen. Bei diesem Verfahren werden von den beispielsweise zehn Werten die oberen und unteren Ausreißer gestutzt und aus den restlichen Werten der arithmetische Mittelwert gebildet. Der letzte Stand der Software beinhaltet nur den arithmetischen Mittelwert.

5.4.3 Programmeinstellungen

In der Datei main.h können folgende Einstellungen vorgenommen werden (siehe Tabelle 2 und 3).

SPI Pin-Konfigurationen

#define SPI_DDR DDRA	Data Direction Register für Port A, Konfigurationsregister
#define SPI_PORT PORTA	Port Register für Port A, Ausgaberegister
#define SPI_PIN PINA	Pin Register für Port A, Einleseregister
#define SPI_MOSI 3	Master Out Slave In, Datenfluss zum MAX186
#define SPI_SCK 5	Serial Clock, Taktsignal für die Kommunikation
#define SPI_MISO 1	Master In Slave Out, Datenfluss vom MAX186

Tabelle 2: SPI Konfiguration Stromwandler



MAX186 Konfigurationen

#define MAX186_START 7	Bitposition des Starbits, Startsignal der Übertragung
#define MAX186_SEL2 6	Bitposition des Selectbits 2, Kanalwahl für ADC
#define MAX186_SEL1 5	Bitposition des Selectbits 1, Kanalwahl für ADC
#define MAX186_SEL0 4	Bitposition des Selectbits 3, Kanalwahl für ADC
#define MAX186_UNI_BI 3	Bitposition des UNI/BIP Bits, Wahl zwischen uni-/bipolar
#define MAX186_SGL_DIF 2	Bitposition des SGL/DIF Bits, Differenzmessung/nach GND
#define MAX186_PD1 1	Bitposition des PD-Bits 1, Power- und Taktmodus
#define MAX186_PD0 0	Bitposition des PD-Bits 2, Power- und Taktmodus

Tabelle 3: MAX186 Konfiguration Stromwandler

Über SPI wird der MAX186 mit dem Befehl 0x087 angesprochen. Somit sind das Startbit, das SGL/DIF-Bit, und beide PD-Bits gesetzt. Dem zur Folge handelt es sich um eine unipolare Messung gegen Masse am Kanal Null im externem Taktmodus (siehe Abbildung 42).

Bit 7 (MSB)	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0 (LSB)
Bit	Name	Description					
7(MSB)	START	The first logic "1" bit after \overline{CS} goes low defines the beginning of the control byte.					
6	SEL2	These three bits select which of the eight channels are used for the conversion.					
5	SEL1	See Tables 3 and 4.					
4	SEL0						
3	UNI/ \overline{BIP}	1 = unipolar, 0 = bipolar. Selects unipolar or bipolar conversion mode. In unipolar mode, an analog input signal from 0V to VREF can be converted; in bipolar mode, the signal can range from -VREF/2 to +VREF/2.					
2	SGL/ \overline{DIF}	1 = single ended, 0 = differential. Selects single-ended or differential conversions. In single-ended mode, input signal voltages are referred to AGND. In differential mode, the voltage difference between two channels is measured. See Tables 3 and 4.					
1	PD1	Selects clock and power-down modes.					
0(LSB)	PD0	PD1 PD0 Mode					
		0 0 Full power-down ($I_Q = 2\mu A$)					
		0 1 Fast power-down ($I_Q = 30\mu A$)					
		1 0 Internal clock mode					
		1 1 External clock mode					

Abbildung 42: Kontrollbyte des MAX186 [MAX18696]



5.4.4 Anschlüsse

Die Stromwandlerplatine ist in ein Gehäuse untergebracht und im Fahrzeug verbaut. Auf Grund von Platzproblemen wurde der LEM-Wandler direkt in den Batterietrog und das Gehäuse mit der Platine außerhalb montiert. Durch den LEM-Wandler wurden eine Batterieleitung und eine Ladeleitung gefädelt. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Stromrichtungen entgegengesetzt sind. Bei einem Stromfluss von der Batterie zum Fahrzeug über die Batterieleitung wird ein positiver Strom gemessen, wohingegen beim Ladevorgang über die Ladeleitung ein negativer Strom festgestellt wird. Sollten beide Leitungen Strom führen, wird der Gesamstrom gemessen, wobei der Ladestrom von Entladestrom subtrahiert wird.

Das Gehäuse besitzt zwei Anschlüsse. Der neunpolige D-Sub-Stecker hat folgende Pinbelegung (siehe Abbildung 43).

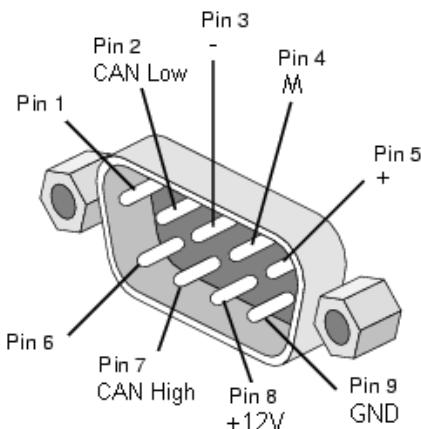


Abbildung 43: Pinbelegung des Stromwandlersteckers

Für die Programmierung ist ein ISP-Stecker vorgesehen, der folgende Pinbelegung hat (siehe Abbildung 44).

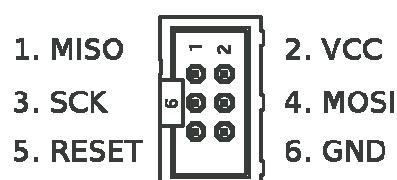


Abbildung 44: Pinbelegung für ISP-Stecker [Wann6]

5.5 Batterie Modul Controller

Die Entwicklung eines Batterie Modul Controllers (siehe Abbildung 45) ist nicht Teil dieser Arbeit. Die Stromlaufpläne und Platinenlayouts wurden aus externer Quelle bezogen. An dieser Stelle nochmals vielen Dank an Prof. Dr. Heinemann für seine Arbeit.

Im Rahmen dieser Thesis wurden die Platten bestückt, getestet, programmiert und in Betrieb genommen.

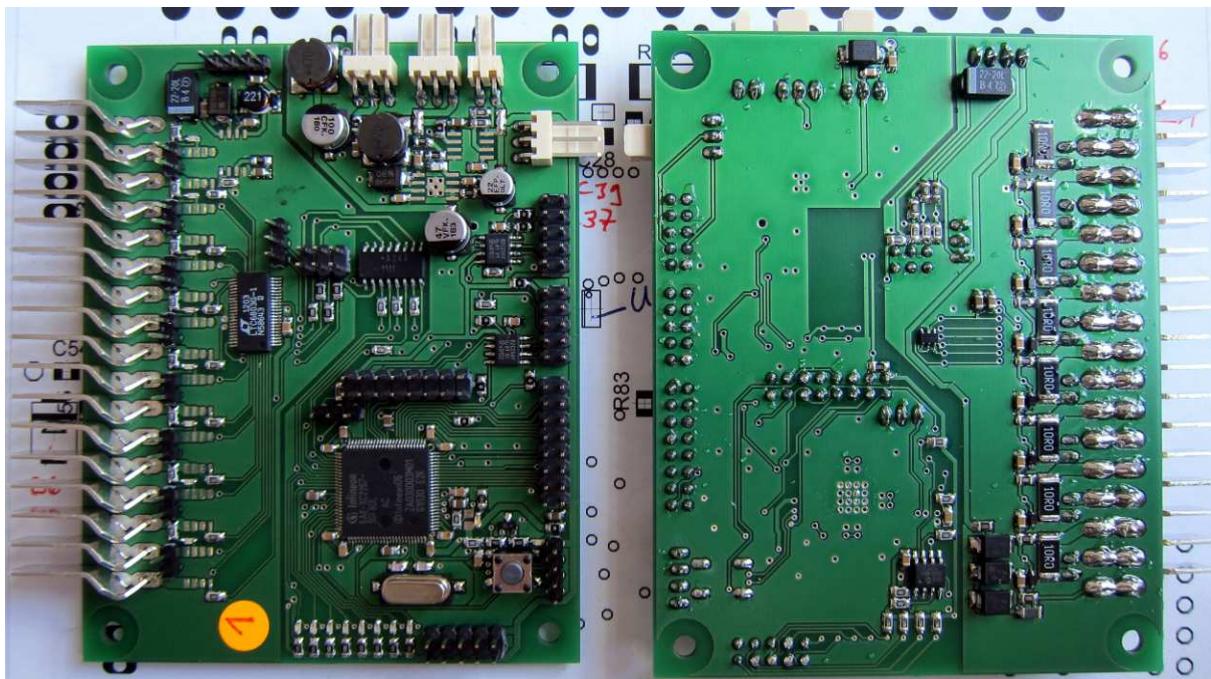


Abbildung 45: BMC gelötet - Oberseite (l), Unterseite (r)

Für die geplante Struktur werden drei Platten benötigt, die jeweils einen Stack von fünf Zellen überwachen und steuern.

5.5.1 BMC Stromlaufplan

Die Stromlaufpläne (siehe Abbildungen 46 und 47) sind zusätzlich im Anhang auf der beiliegenden CD-Rom zu finden.

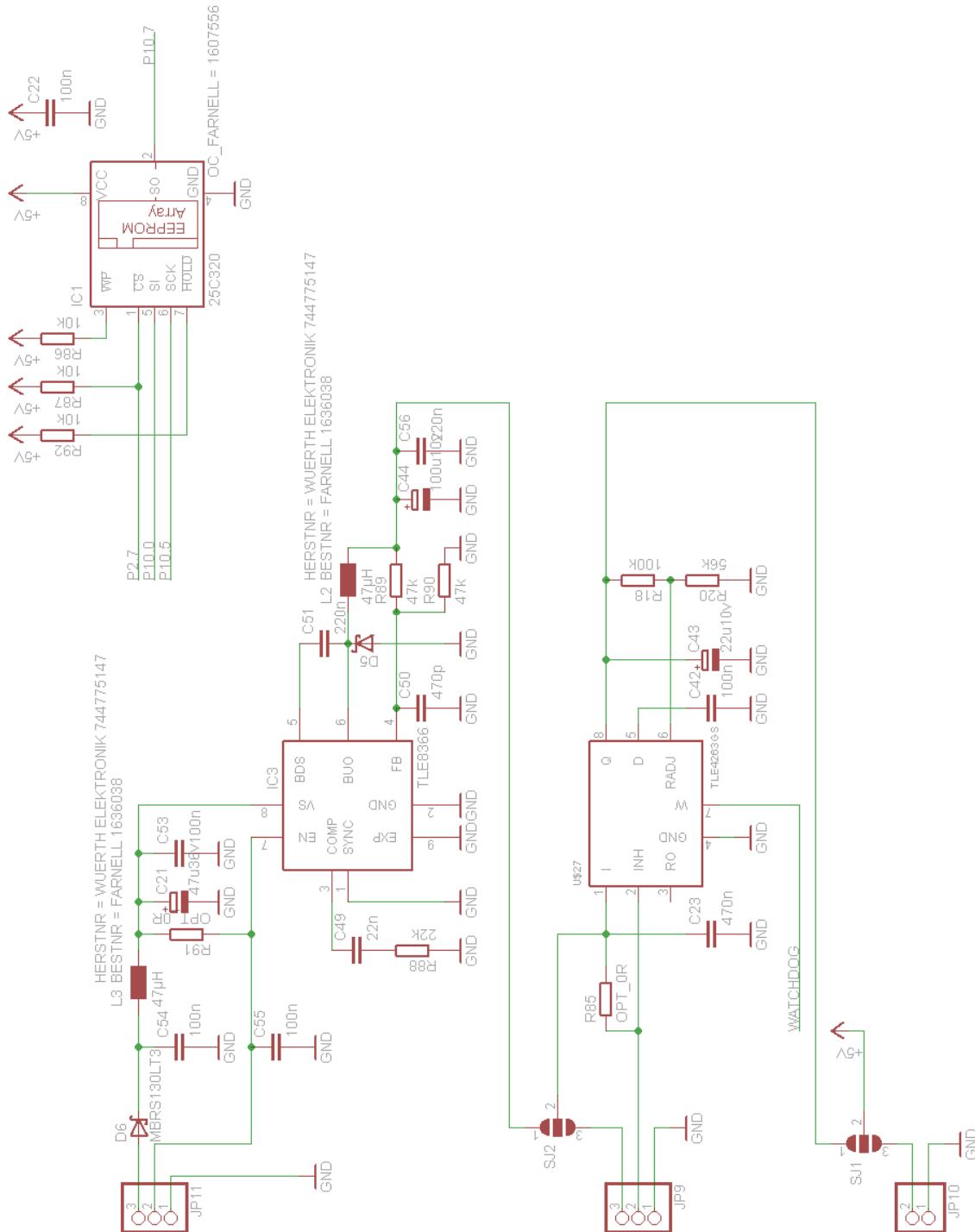
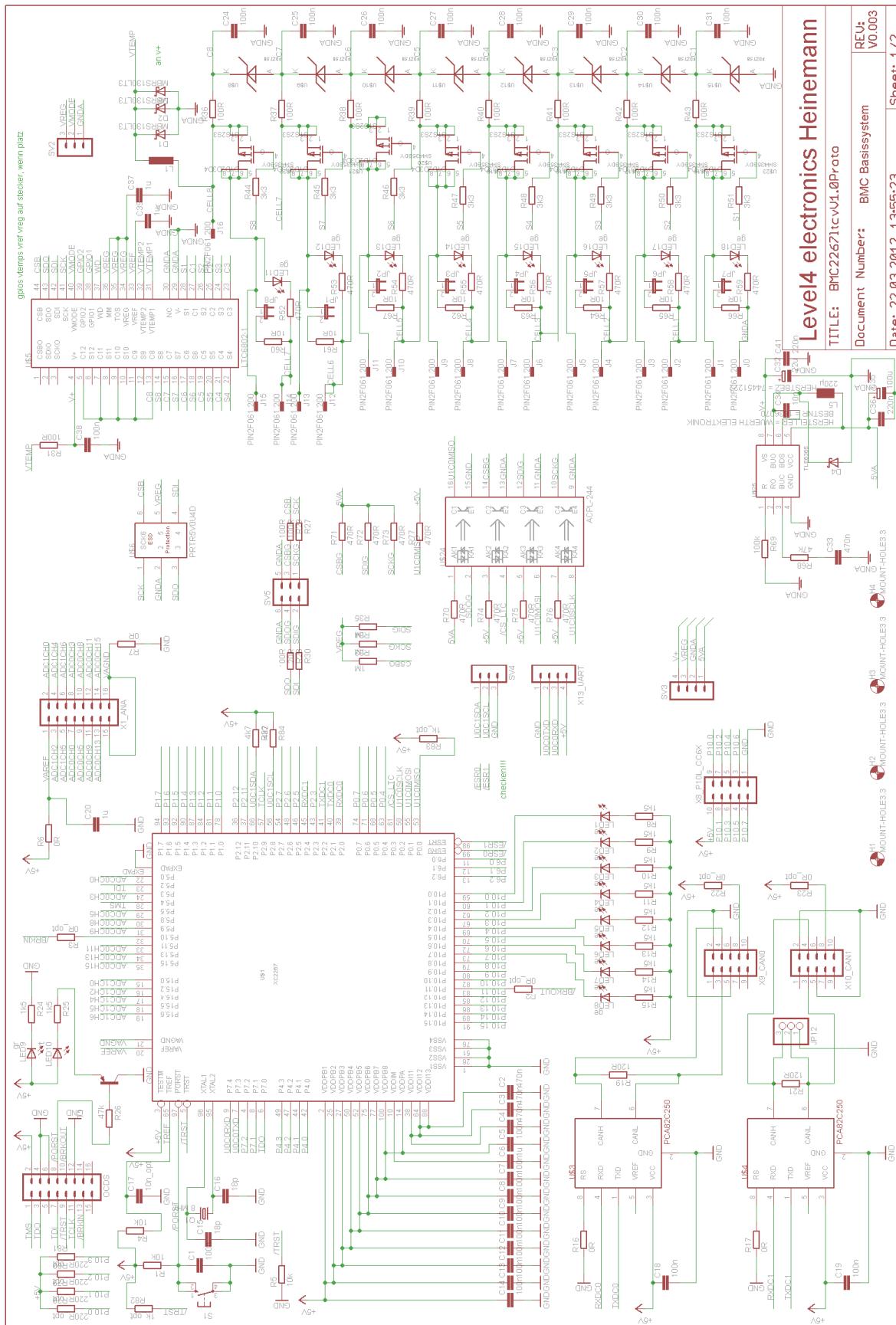


Abbildung 46: BMC Stromlaufplan - Spannungsversorgungen



5.5.2 BMC Layout

Die Platinenlayouts (siehe Abbildungen 48 und 49) können im Anhang auf der beiliegenden CD-Rom eingesehen werden.

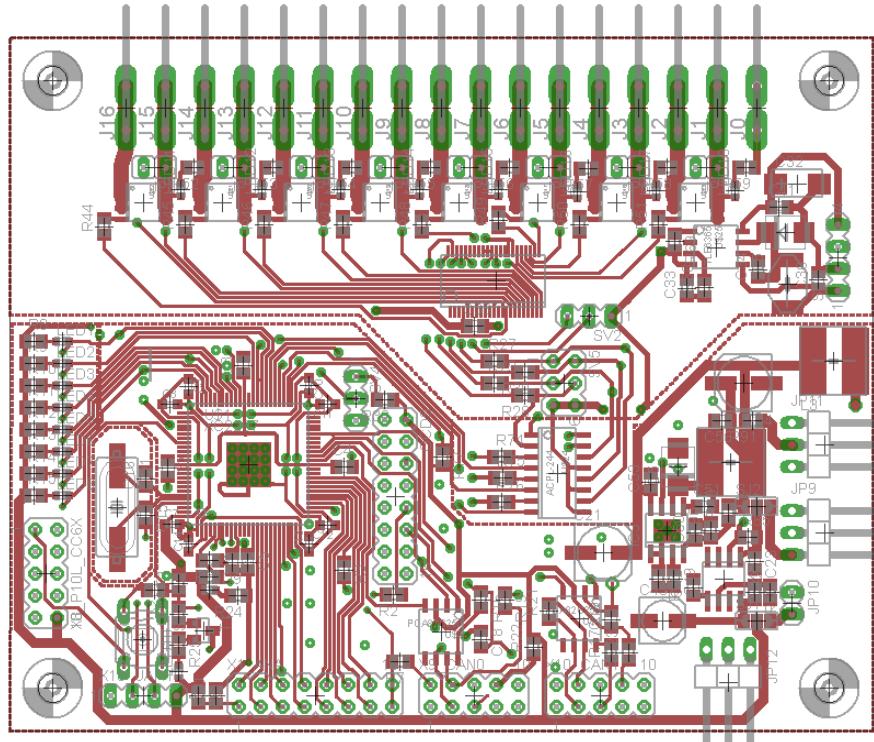


Abbildung 48: BMC Layout – Oberseite [Hei12]

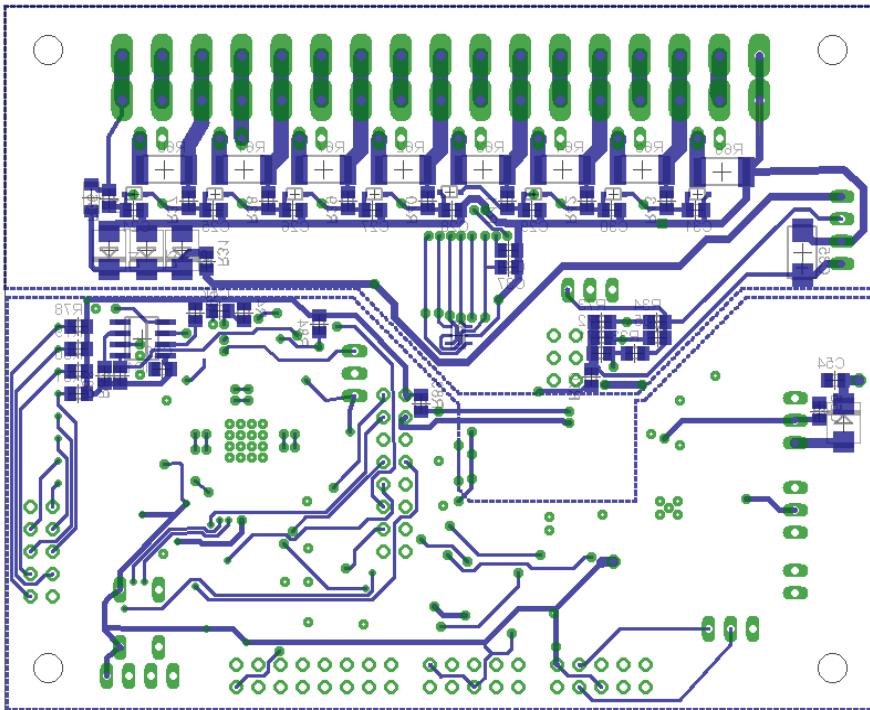


Abbildung 49: BMC Layout – Unterseite [Hei12]

5.5.3 Software

Die Erstellung der Software erfolgt über die Entwicklungsumgebung Tasking VX und kann auf der CD-Rom im Anhang eingesehen werden. Die Software wird anhand von Ablaufplänen beschrieben.

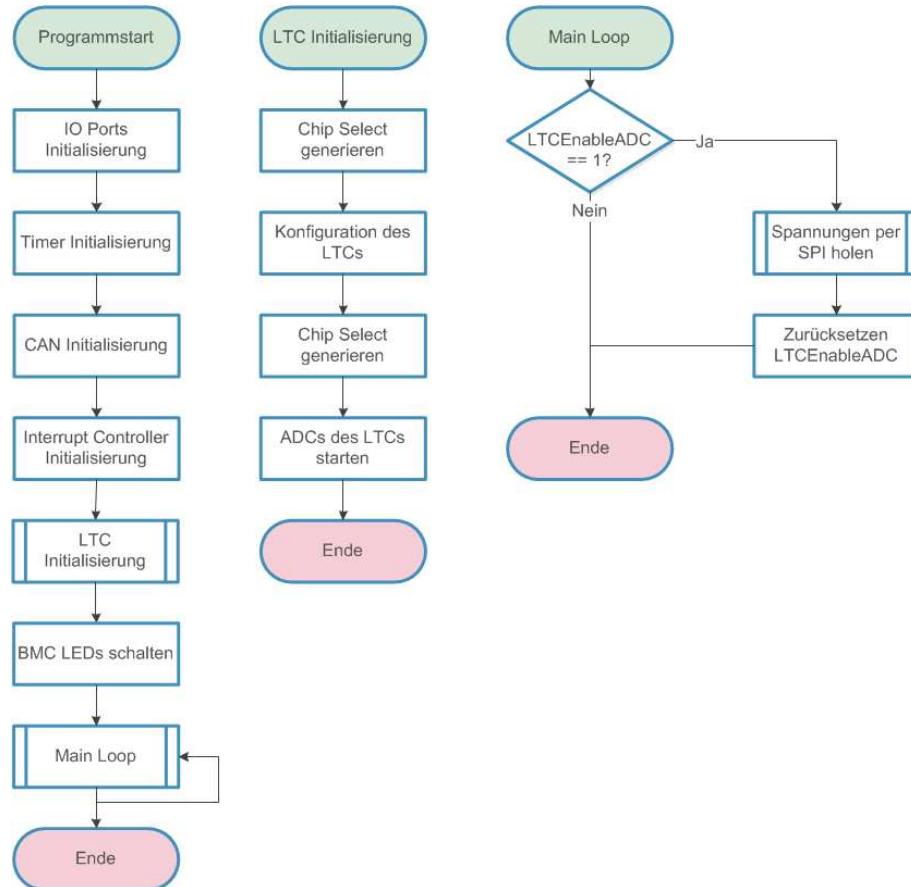


Abbildung 50: BMC Programmablauf - Teil 1

Das Programm (siehe Abbildungen 50 und 51) startet mit der Initialisierung der Peripherie und der Interrupt-Routinen. Der LTC6803-1 wird initialisiert, indem über die SPI-Schnittstelle die Konfigurationsregister beschrieben werden. Anschließend wird die Analog-Digital-Wandlung gestartet. Nachdem die Status LEDs entsprechend der binären BMC Nummer geschaltet sind, befindet sich das Programm in einer Endlosschleife. Innerhalb dieser Schleife wird der LTC6803-1 erneut konfiguriert und gestartet. Zusätzlich werden die Zellspannungen für die Zellen eins bis acht aus den entsprechenden Registern gelesen und zwischengespeichert. Dieser Vorgang wird alle 100ms wiederholt. Die regelmäßige Konfiguration ist nötig, da über eine CAN-Nachricht Informationen über das Balancieren der Zellen übermittelt werden, die eine Anpassung der Register mit sich ziehen. Neben diesem statischen Prozess laufen auch zwei Interrupt-Routinen. Der Timer-Interrupt wird alle 100ms ausgelöst und dient dem Laden der Spannungen in die CAN-Nachrichten und das anschließende Verschicken über den CAN-Bus CAN_BMS.



Der zweite Interrupt ist die CAN-Empfangsroutine. Beim Empfang einer CAN-Nachricht wird geprüft, ob eine Nachricht mit der ID 0x010 eingegangen ist. Ist dies der Fall, wird aus dem Datenbereich das entsprechende Datenbyte für den Batterie Modul Controller extrahiert und die entsprechenden Bits für die Balancierung gesetzt. Abschließend wird die Prüfsumme der Konfigurationsbytes neu berechnet.

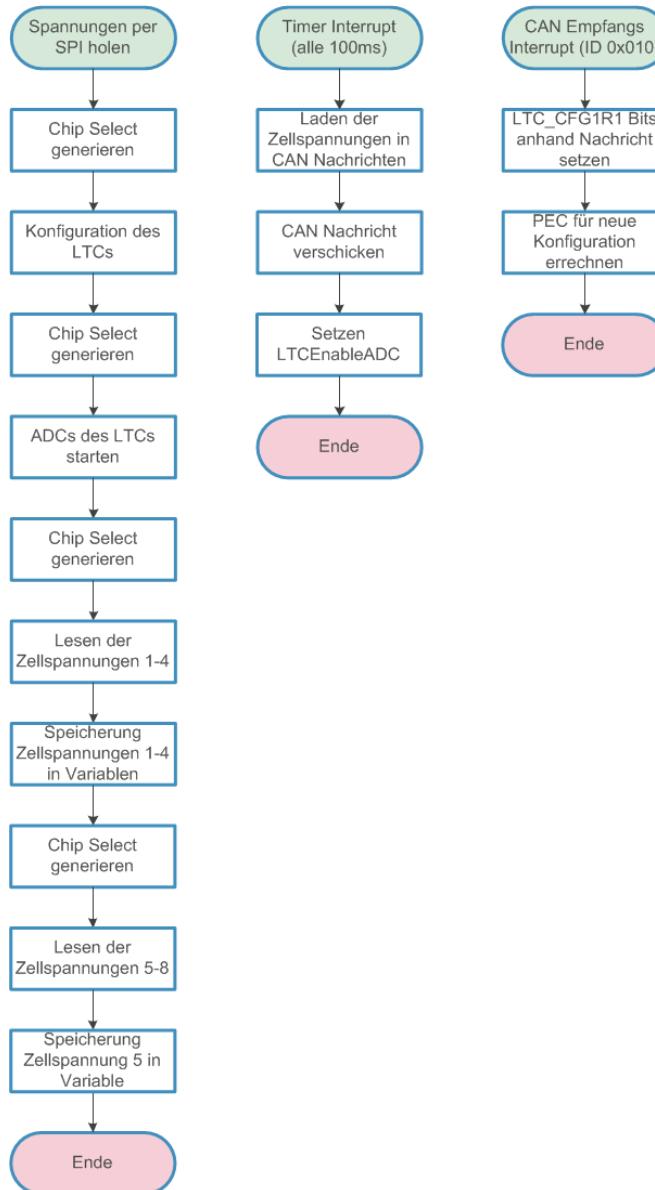


Abbildung 51: BMC Programmablauf - Teil 2

Programmeinstellungen

In der main.h können folgende Einstellungen für die Software vorgenommen werden (siehe Tabelle 4).

#define NUM_OF_CELLS	Anzahl der Zelle pro BMC, z. Zt. keine Auswirkungen
#define BMC_ID	BMC Nummer, Steuert individuelle Programmabschnitte je BMC

Tabelle 4: BMC Konfiguration



5.5.4 Verkabelung und Anschlüsse

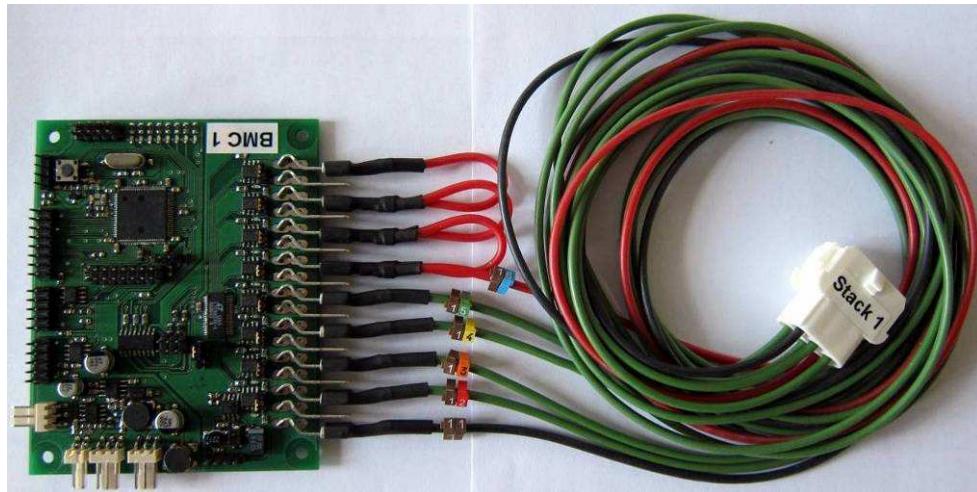


Abbildung 52: BMC 1 Verkabelung

Die Verkabelung (siehe Abbildung 52) erfolgt über hochflexible Silikonleitungen und verpolungssichere Steckverbinder. Im Folgenden werden die Pinbelegungen der Stecker und die Anschlüsse auf dem BMC beschrieben (siehe Abbildung 53 und Tabelle 5).

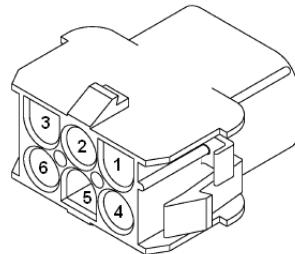


Abbildung 53: BMC – Pinbelegung [DataMNL04]

#	Farbe	Funktion
1	Schwarz	Masse, Anschluss an Klemme 1
2	Grün	Messleitung Zelle 1, Anschluss an Klemme 3
3	Grün	Messleitung Zelle 2, Anschluss an Klemme 5
4	Grün	Messleitung Zelle 3, Anschluss an Klemme 7
5	Grün	Messleitung Zelle 4, Anschluss an Klemme 9
6	Rot	VCC, Messleitung Zelle 5, Anschluss an Klemme 11

Tabelle 5: Pinbelegung des BMC-Steckers

Der Anschluss am BMC erfolgt über Kabelschuhe (siehe Abbildung 54). Zu beachten ist, dass die Kontakte vor Kurzschlägen geschützt werden müssen, da kein Vorwiderstand in die Messleitung eingearbeitet ist. Dies kann nicht erfolgen, da die Messleitung auch den Balancierstrom führt.

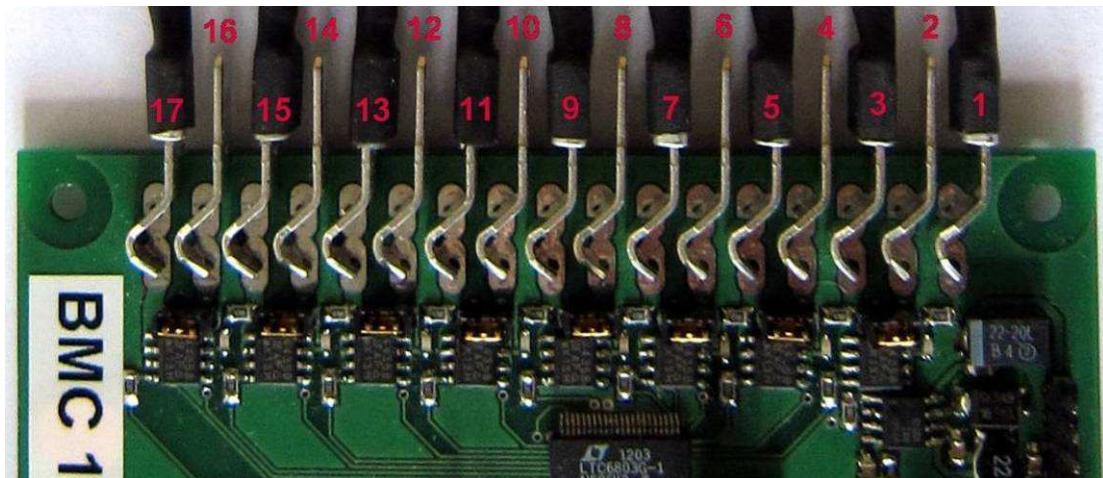


Abbildung 54: Klemmbelegung des BMCs

In dem letzten Stand der Arbeit wurden fünf Zellen je Stack und BMC verwendet. Deshalb müssen die Klemmen für die Zellen sechs bis acht überbrückt werden.

Der Anschluss für die Zelle fünf ist somit mit der Klemme für Zelle acht verbunden und dient als Spannungsversorgung des LTCs. Die Brücken sind schon in die Anschlusskabel eingebaut und müssen nur angeschlossen werden.

In diesem Setup werden auch keine externen Lastwiderstände verwendet, somit sind die Klemmen mit gerader Nummerierung nicht von Bedeutung. Die Belegung der Klemmen kann in Tabelle 6 nachvollzogen werden.

#	Funktion
1	Masse, Masseklemme der untersten Zelle des Stacks
2	Externe Balancingleitung Zelle 1, wird im letzten Stand dieser Arbeit nicht verwendet
3	Mess- und Balancingleitung Zelle 1
4	Externe Balancingleitung Zelle 2, wird im letzten Stand dieser Arbeit nicht verwendet
5	Mess- und Balancingleitung Zelle 2
6	Externe Balancingleitung Zelle 3, wird im letzten Stand dieser Arbeit nicht verwendet
7	Mess- und Balancingleitung Zelle 3
8	Externe Balancingleitung Zelle 4, wird im letzten Stand dieser Arbeit nicht verwendet
9	Mess- und Balancingleitung Zelle 4
10	Externe Balancingleitung Zelle 5, wird im letzten Stand dieser Arbeit nicht verwendet
11	Mess- und Balancingleitung Zelle 5
12	Externe Balancingleitung Zelle 6, wird im letzten Stand dieser Arbeit nicht verwendet
13	Mess- und Balancingleitung Zelle 6, wird mit Klemme 11 verbunden
14	Externe Balancingleitung Zelle 7, wird im letzten Stand dieser Arbeit nicht verwendet
15	Mess- und Balancingleitung Zelle 7, wird mit Klemme 11 verbunden
16	Externe Balancingleitung Zelle 8, wird im letzten Stand dieser Arbeit nicht verwendet
17	VCC, Mess- und Balancingleitung Zelle 8, wird mit Klemme 11 verbunden

Tabelle 6: Klemmbelegung des BMCs

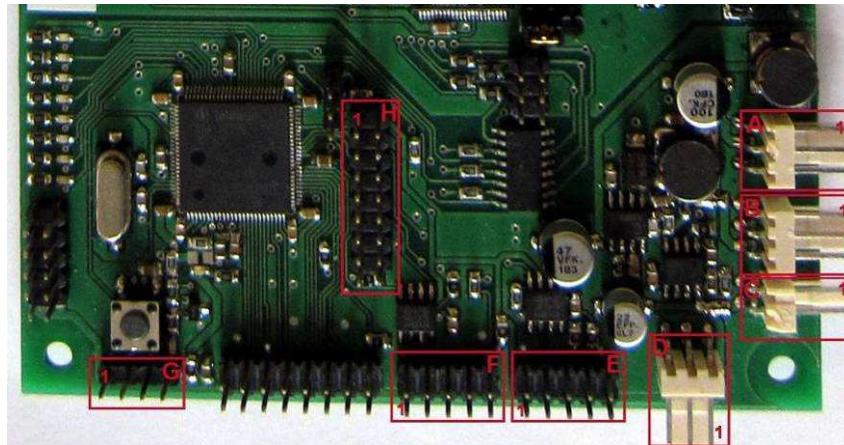


Abbildung 55: Anschlüsse und Pinbelegung des BMCs

Die Spannungsversorgung wird über das 12V-Boardnetz gewährleistet und über den Anschluss A zur Verfügung gestellt (siehe Abbildung 55 und Tabelle 7). Jeder BMC wird separat über einen Y-Stecker an das Netz angeschlossen. Die CAN-Kommunikation wird über den CAN Knoten Null bereitgestellt. Dafür wird der Stecker F benutzt.

#	Pin	Funktion
A	1	Spannungsversorgung, Masse
	2	Spannungsversorgung, Enable Pin des TLE8366
	3	Spannungsversorgung, VCC, 7 – 45V [DateTLE8366]
B	1	Spannungsversorgung, Masse
	2	Spannungsversorgung, Inhibit Pin des TLE4263GS
	3	Spannungsversorgung, VCC, wird vom TLE8366 gespeist (~6.4V)
C	1	Spannungsversorgung, Masse
	2	Spannungsversorgung, VCC, 5V vom TLE4263GS
D	1	CAN-Knoten 1, Masse
	2	CAN-Knoten 1, CAN Low
	3	CAN-Knoten 1, CAN High
E	2	CAN-Knoten 1, Masse
	3	CAN-Knoten 1, CAN Low
	4	CAN-Knoten 1, CAN High
	5	CAN-Knoten 1, Masse
	8	CAN-Knoten 1, 5V
F	2	CAN-Knoten 0, Masse
	3	CAN-Knoten 0, CAN Low
	4	CAN-Knoten 0, CAN High
	5	CAN-Knoten 0, Masse
	8	CAN-Knoten 0, 5V
G	1	UART 0, Masse
	2	UART 0, TX
	3	UART 0, RX
	4	UART 0, 5V
H	1-16	OCDS Stecker, Anschluss des Programmiergeräts

Tabelle 7: Anschlüsse und Pinbelegung des BMCs

5.5.5 CAN-Kommunikation mit dem Batteriemangement System

Die Kommunikation zwischen den BMCs und des BMSs erfolgt über den CAN-Bus CAN_BMS und dient dem Empfangen von Kommandos und das Versenden der Messwerte. Dabei werden die Folgenden Nachrichten ausgetauscht (siehe Tabelle 8).

ID	Typ	DLC	BMC	Byte 1	Byte 2	Byte 3	Byte 4	Byte 5	Byte 6	Byte 7	Byte 8
0x010	RX	8	1-3	Bal_1	Bal_2	Bal_3	r	r	r	r	r
0x020	TX	8	1	r	r	r	r	r	r	r	r
0x021	TX	8	2	r	r	r	r	r	r	r	r
0x022	TX	8	3	r	r	r	r	r	r	r	r
0x030	TX	8	1	C1_L	C1_H	C2_L	C2_H	C3_L	C3_H	C4_L	C4_H
0x031	TX	8	1	C5_L	C5_H	r	r	r	r	r	r
0x040	TX	8	2	C1_L	C1_H	C2_L	C2_H	C3_L	C3_H	C4_L	C4_H
0x041	TX	8	2	C5_L	C5_H	r	r	r	r	r	r
0x050	TX	8	3	C1_L	C1_H	C2_L	C2_H	C3_L	C3_H	C4_L	C4_H
0x051	TX	8	3	C5_L	C5_H	r	r	r	r	r	r

Tabelle 8: CAN-Nachrichten zwischen BMCs und BMS

Die Nachricht mit der ID 0x010 wird von jedem Batterie Modul Controller empfangen und dient der Zellsymmetrierung. Dabei wird vom BMC 1 das erste Datenbyte, von BMC 2 das zweite Datenbyte und von BMC 3 das dritte Datenbyte ausgewertet. Die acht Bits der jeweiligen Datenbytes enthalten Informationen, welche Zellen balanciert werden sollen. Eine logische Eins symbolisiert, dass die jeweilige Zelle balanciert werden soll, wohingegen eine logische Null das Balancieren abschaltet. Die Bitposition spiegelt die jeweilige Zelle im Stack wieder. Das LSB steht dabei für die erste und das MSB für achte Zelle. Beispielsweise würde eine Nachricht mit den Datenbytes 0xFF 0x01 0x14 dazu führen, dass alle Zellen des ersten Stacks, Zelle eins des zweiten Stacks und Zelle fünf und drei des dritten Stacks balanciert werden würden.

Die Nachrichten mit den IDs 0x020, 0x021 und 0x022 werden von jeweils einem BMC versendet und dienen der Statusübermittlung. Bis dato sind keine Informationen enthalten, lediglich das Ankommen der Nachricht führt dazu, dass der BMC als „online“ erkannt wird. Sollte diese Nachricht für länger als 500ms ausbleiben, wird der Status des BMCs auf „offline“ gesetzt.

Die Nachrichtenpaare 0x030/0x031 für BMC 1, 0x040/0x041 für BMC 2 und 0x050/0x051 für BMC 3 dienen der Übertragung der Zellspannungen. Die Messwerte sind mit 12bit codiert und werden in ein höherwertiges Byte und ein niederwertiges Byte getrennt. Das niederwertige Byte steht voran. Dabei werden die ersten vier Zellspannungen eines BMC in einer Nachricht und die fünfte Spannung in einer weiteren Nachricht verpackt. Demzufolge sind die Spannungen für die Zellen eins bis vier in der Nachricht 0x030, die Spannung der Zelle fünf in der Nachricht 0x031, die für die Zellen sechs bis neun in der Nachricht 0x040, die zehnte Zellspannung in 0x041, die Zellspannungen der Zellen zehn bis vierzehn in 0x050 und die Spannung der Zelle fünfzehn in der Nachricht 0x051 eingebunden.

5.6 Batteriemanagement System

Für die Anordnung und Hierarchie des Batteriemangement Systems wurde die modulare Architektur gewählt, bei der die Intelligenz im BMS lokalisiert ist. Die BMCs dienen ausschließlich der Aufnahme der Zellspannungen, der Weiterleitung der Messwerte über den CAN-Bus CAN_BMS und der Ausführung empfangener Befehle.

Alle Entscheidungen und Berechnungen werden im BMS durchgeführt. Das BMS dient weiterhin als Gateway zwischen den beiden CAN-Bussen CAN_BMS und CAN_VCU. Das BMS entscheidet welche Informationen an die VCU weitergeleitet respektive welche Instruktionen an die BMCs gesendet werden.

Durch die Erweiterung zum Energiemanagement System wird auch die Ladezustandsbestimmung im BMS durchgeführt. Dabei wird nach dem Prinzip der Coulomb-Zählung vorgegangen. Die Lade- und Entladeströme werden bilanziert.

5.6.1 Hardware

Als Basis des BMSs dient wieder das AVR-CAN Entwicklungsboard der Firma Olimex. Da der AT90CAN128 Mikrocontroller nur einen CAN-Controller besitzt, werden zwei Boards verwendet. Somit dient jeweils ein Board als CAN Knoten auf dem jeweiligen CAN-Bus. Die Kommunikation zwischen den Boards wird über die UART-Schnittstelle realisiert (siehe Abbildung 56).

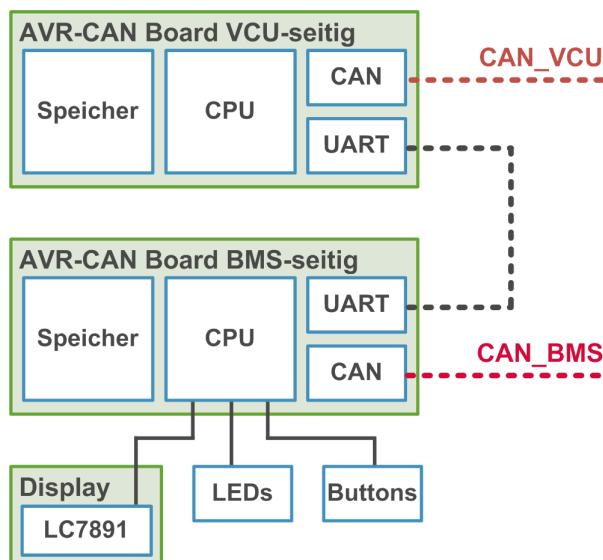


Abbildung 56: BMS-Struktur und Kommunikation

Für die Visualisierung wird ein graphisches Display der Größe 160x80 Pixel mit dem Chip LC7891 der Firma Samsung verwendet. Des Weiteren sind drei Status-LEDs verbaut. Für die Benutzereingabe sind zwei Taster und ein Kippschalter montiert.



Sämtliche Baugruppen sind auf eine Lochrasterplatine per Steckverbinder befestigt. Zum Schutz wurde die Elektronik in ein Gehäuse verbaut (siehe Abbildung 57). Alle Anschlüsse, LEDs und Schalter sind nach außen geführt und können auch durch Steckverbinder von der Platine getrennt werden.

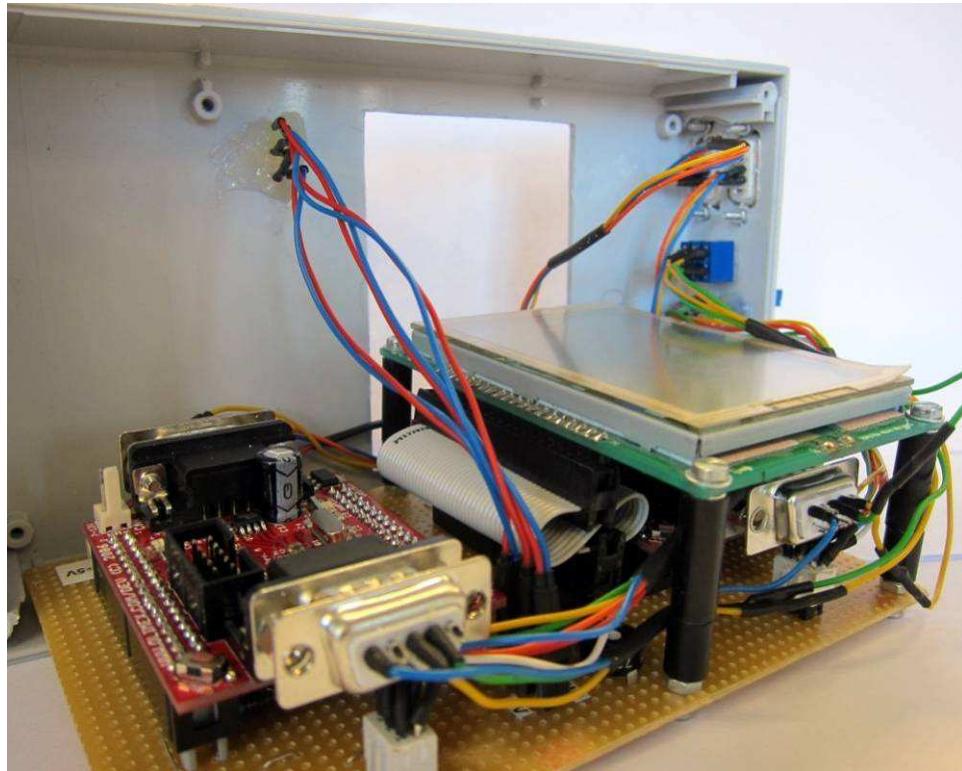


Abbildung 57: BMS-Platine und Gehäuse

Die Kommunikation der beiden Mikrocontroller erfolgt über eine asynchrone serielle Verbindung mit 250k Baud (Baud ist die Symbolübertragungsrate pro Sekunde), einem Stopbit und keinem Paritätsbit. Als Anschlüsse werden neunpolige D-Sub-Stecker verwendet mit der folgenden Pinbelegung:

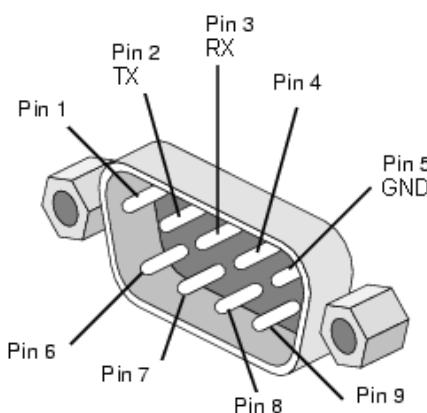


Abbildung 58: Pinbelegung des UART-Steckers [DSub9]

Die UART-Schnittstellen und die Transceiver beider Boards sind identisch aufgebaut, deshalb ist zu beachten, dass man ein gekreuztes Verbindungskabel (RX auf TX und TX auf RX gekreuzt) verwendet.

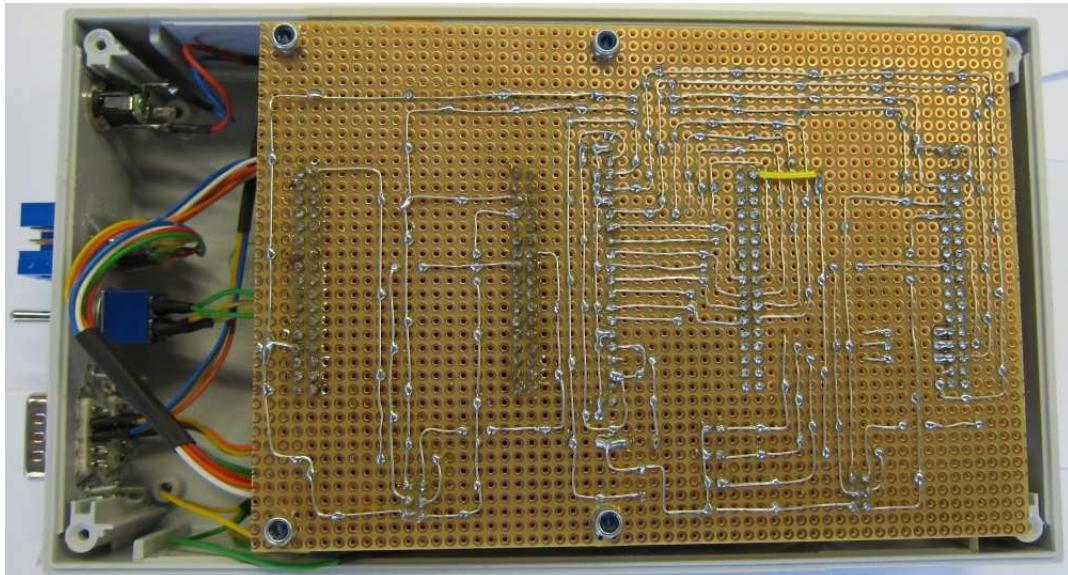


Abbildung 59: BMS-Platine rückseitig

Die Leiterbahnen wurden manuell auf der Lochrasterplatine gezogen und dabei wurde die Ober- und Unterseite verwendet (siehe Abbildung 59). Ein Platinenlayout wurde aus zeitlichen Gründen nicht erstellt.

Stromlaufplan

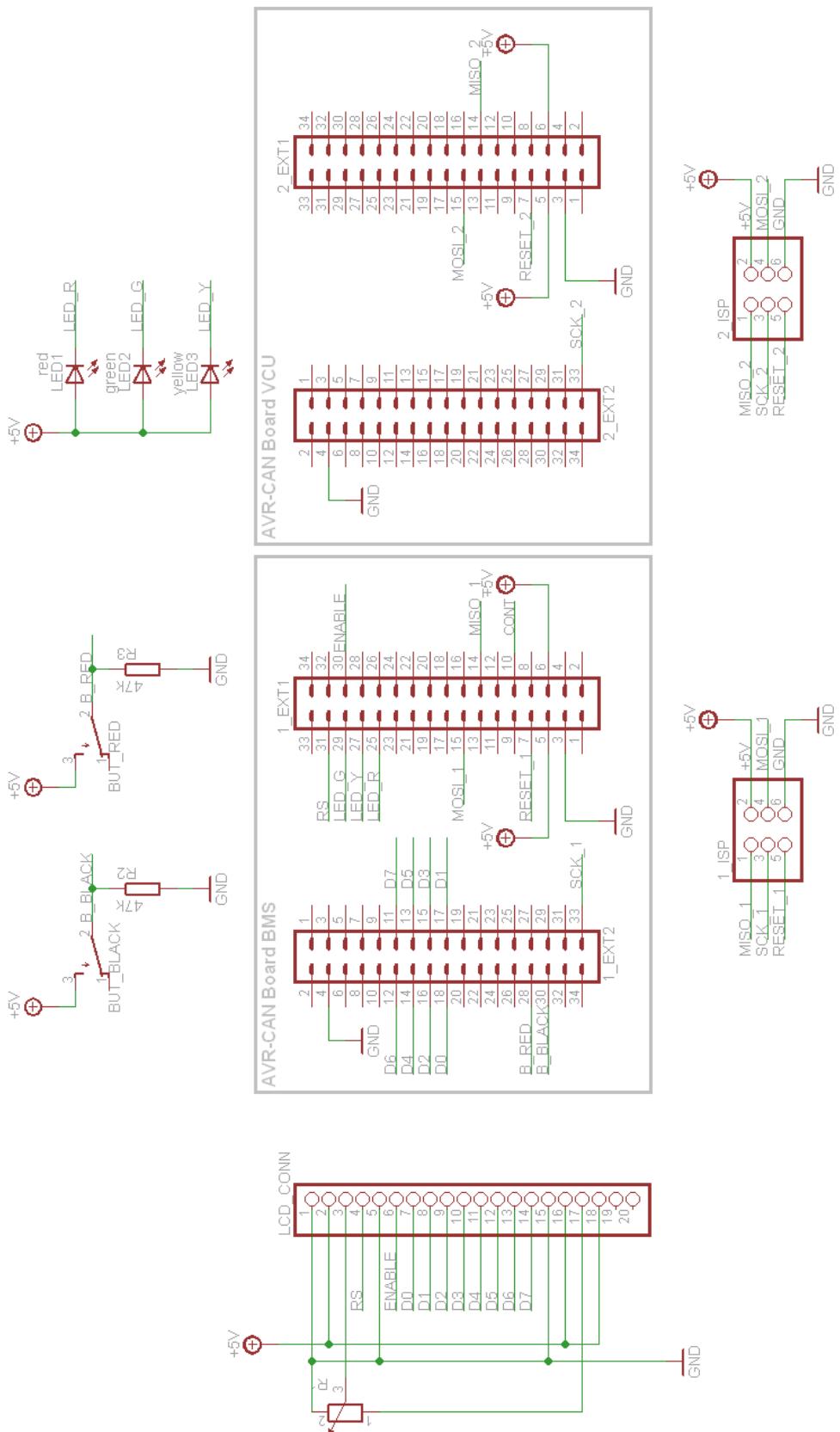


Abbildung 60: BMS-Stromlaufplan

5.6.2 Anschlüsse

An der Rückseite des Gehäuses ist eine Vielzahl von Anschlüssen zu finden (siehe Abbildung 61 und Tabelle 9).

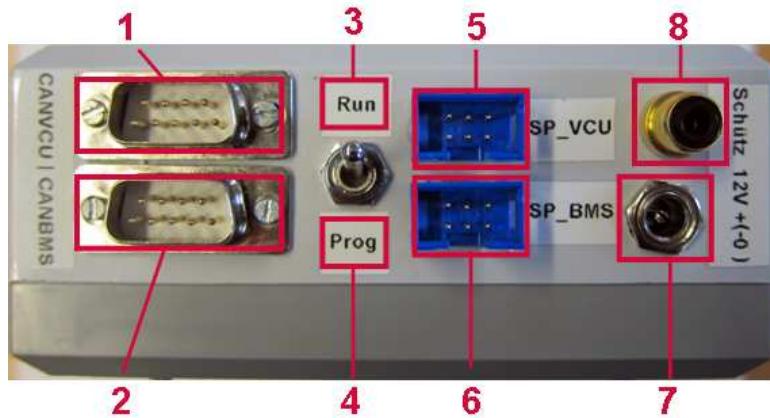


Abbildung 61: BMS-Anschlüsse

#	Name	Beschreibung
1	CANVCU	Neunpoliger D-Sub Verbinder zum Anschluss des Fahrzeugbusses
2	CANBMS	Neunpoliger D-Sub Verbinder zum Anschluss des Batteriebusses
3	Run	Schalterstellung für den normalen Betriebsmodus
4	Prog	Schalterstellung für den Programmierungsmodus
5	ISP_VCU	Sechspoliger Verbinder für einen ISP-Programmer, CAN_VCU Modul
6	ISP_BMS	Sechspoliger Verbinder für einen ISP-Programmer, CAN_BMS Modul
7	12V Anschluss	Hohlkammerbuchse für Spannungsversorgung, 12V außen, GND innen
8	Schütz	Steuerleitung des Ladeschutzes, 12V außen, GND innen

Tabelle 9: BMS-Anschlüsse

Anschluss eins und zwei sind D-Sub-Stecker und dienen dem Anschluss der CAN-Busse CAN_VCU und CAN_BMS. Die Pinbelegung ist wie folgt:

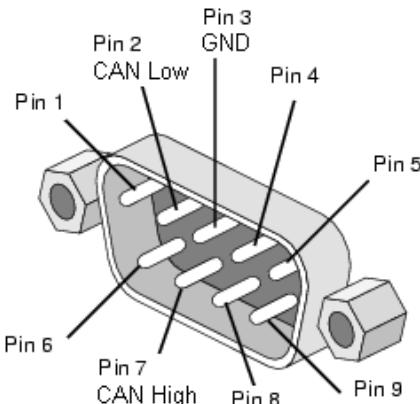


Abbildung 62: Pinbelegung des CAN-Steckers [DSub9]

CAN High und CAN Low liegen auf Pin 7 und 2. Die Masse liegt an Pin 3 an und kann zum Anschluss eines Schirms genutzt werden (siehe Abbildung 62). Da die Potentialerkennung über Differenzmessungen funktioniert, muss keine gemeinsame Masse vorliegen.

Die verlegten CAN-Busleitungen sind orange für CAN High, gelb für CAN Low und blau für die Masse. Die Abschlusswiderstände von 120Ω sind jeweils auf den Boards vorhanden.

Der Schalter dient dem Umschalten zwischen Programmiermodus und Betriebsmodus. Leider ist dieser Schalter von Nöten, da die TX- und RX-Leitungen der internen UART-Schnittstelle gleichzeitig für das Flashen des Mikrocontrollers verwendet werden.

Die Anschlüsse fünf und sechs sind ISP-Schnittstellen zum Anschluss eines Programmiergeräts für den jeweiligen Mikrocontroller. Die Pinbelegung ist wie folgt:

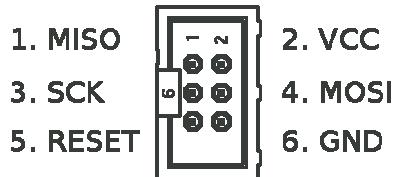


Abbildung 63: Pinbelegung für ISP-Stecker [Wann6]

Der Anschluss sieben ist eine Holsteckerbuchse und dient der Spannungsversorgung der beiden AVR-CAN-Boards und des Displays. Durch interne Steckverbinder können verschiedene Spannungslevel als Versorgung angeschlossen werden.

Über einen internen Linearregler ist es möglich, Spannungen von 6 bis 12V anzuschließen. Falls die Holsteckerbuchse intern mit der 5V Ebene verbunden ist, können auch 5V als Spannungsversorgung angeschlossen werden.

Im letzten Stand der Konfiguration wurde die Buchse direkt an den Linearregler angeschlossen, sodass eine Spannungsversorgung über das Boardnetz möglich ist. Dabei ist zu beachten, dass der Mantel des Steckers das höhere Potential trägt und der Kern die Masse (siehe Abbildung 64).



Abbildung 64: Pinbelegung für Holsteckerbuchse

Der Anschluss acht dient der Schaltung des Ladeschützes. Die Pinbelegung ist gleich der Pinbelegung der Holsteckerbuchse (siehe Abbildung 64).

5.6.3 Visualisierung

Die Visualisierung erfolgt über die Statusleuchten und einem Grafikdisplay, mit deren Hilfe verschiedene Informationen und Systemstatus dargestellt werden können.

Status-LEDs

Auf der Frontseite sind drei Leuchtdioden verbaut. Theoretisch können alle drei beliebig programmiert werden. Im letzten Stand der Software (siehe Tabelle 10) symbolisiert die rote LED einen Busfehler, d.h. es ist mindestens ein Teilnehmer offline. Offline bedeutet in diesem Fall, dass von einem Teilnehmer innerhalb der letzten 500ms keine Nachricht mehr eingegangen ist. Die Teilnehmer sind in diesem Fall die drei BMC-Platinen und der Stromwandler.

Sollten alle vier Teilnehmer erfolgreich Nachrichten senden, so liegt kein Busfehler vor und die rote Leuchtdiode erlischt.

Die orangefarbene LED zeigt die Busaktivität und toggelt ihren Zustand nach jedem erfolgreichem Empfang einer CAN-Nachricht.

Die grüne LED beschreibt den Zustand des Ladeschützes. Sollte es den Zustand „geschlossen“ haben, leuchtet die LED auf. Bei dem Zustand „offen“ wird die LED ausgeschaltet.

Leuchtdiode	Status
Rote LED an	Busfehler, einer oder mehrere Teilnehmer sind offline
Grüne LED an	Ladeschütz ist geschlossen
Orangefarbene LED blinkt	Busaktivität, Nachrichten werden erfolgreich empfangen

Tabelle 10: Status-LEDs



Display

Ein Grafikdisplay kann eine Vielzahl von Informationen darstellen. In dem letzten Stand der Software werden die folgenden Bildflächen dargestellt, zwischen denen durch den roten Taster umgeschaltet werden kann.

Zellspannungen

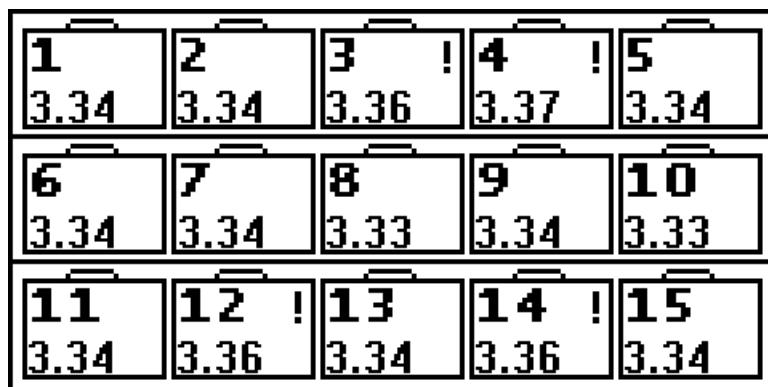


Abbildung 65: Bildfläche - Zellspannungen im Überblick

Auf dieser Darstellung (siehe Abbildung 65) werden die Einzelzellen und deren Spannungen angezeigt. Die Zellen sind von null bis fünfzehn durchnummieriert. Zelle eins ist die erste Zelle im untersten Stack und Zelle fünfzehn die fünfte im obersten Stack (siehe Abbildung 66). Dieser Bildschirm ist der Startbildschirm des BMSs.



Abbildung 66: Zellenanordnung

Die Teilspannungen werden in einem Intervall von 100ms gemessen und mit zwei Nachkommastellen angezeigt. Sobald eine Zelle balanciert wird, erscheint ein Ausrufezeichen in der entsprechenden Zelle. In der Abbildung 65 wird beispielhaft ein Zustand des Batteriepacks gezeigt. Dabei ist Zelle acht, die mit der geringsten Zellspannung, der Maßstab für das Balancing. Alle anderen Zellen, die über einen Toleranzbereich hinaus eine höhere Zellspannung aufweisen, werden passiv balanciert.



Gesamtsystem

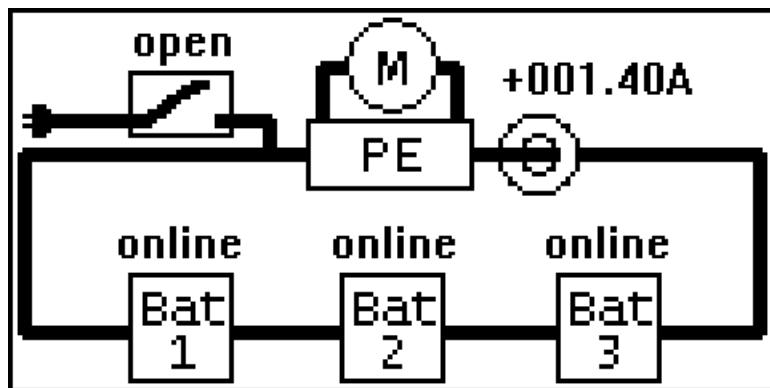


Abbildung 67: Bildfläche - Gesamtsystem im Überblick

Die Darstellung des Gesamtsystems (siehe Abbildung 67) beinhaltet alle Komponenten und deren CAN-Status. Es werden die drei BMCs (Symbolisiert durch Bat 1-3) und der Stromwandler (Oben rechts durch einen Ring symbolisiert) gezeigt. Sollte eines der Teilnehmer mit „offline“ überschrieben sein, so wurde mindestens seit 500ms keine CAN-Nachricht mehr empfangen.

Bei einwandfreien Betrieb werden den BMCs mit „online“ überschrieben und der Stromwandler mit dem aktuellen Strom. Der Strom wird in Ampere und mit zwei Nachkommastellen dargestellt. Ein positiver Strom symbolisiert den Entladestrom und ein negativer Strom den Ladestrom der Batterie.

Der Zustand des Ladeschützes wird dargestellt. Hierbei symbolisieren der Schriftzug „open“ und das Bild eines geöffneten Schalters den Schütz im nichtangezogenen Zustand. Ein angezogener Schütz wird durch „closed“ und einem geschlossenen Schalter dargestellt.

Bilanzierung

Ent-/Ladeschlussspannung:
3.10V / 3.50V
Max/Min Zellspannung:
04: 3.37V / 08: 3.33V
Gesamtstrom/-spannung:
+001.40A / 50.170V
Restkapazit./reichweite:
179.8Ah / 07876min

Abbildung 68: Bildfläche - Bilanzierung

Die Darstellung Bilanzierung (Abbildung 68) dient der Anzeige verschiedener Bilanzierungsparameter und ist in Textform gehalten.

In der BMS-Software können durch Defines verschiedene Parameter eingestellt werden. Dargestellt werden davon die Entlade- und Ladeschlussspannungen. Des Weiteren wird die Zelle mit den höchsten und niedrigsten Klemmspannungen ermittelt und ebenfalls angezeigt. Der Gesamstrom entspricht dem gemessenen Batteriestrom vom Stromwandler. Die Gesamtspannung ergibt sich durch Aufsummierung der einzelnen Zellspannungen.

Die Gesamtkapazität kann im Programm als Batterieparameter eingegeben werden. Dabei wird die entnommene Energie über den Entladestrom pro Sekunde berechnet und abgezogen. Hinzugefügte Energie wird nach dem gleichen Prinzip zur Gesamtkapazität addiert. Die Restreichweite wird in Minuten berechnet und dargestellt. Dabei wird der Entladestrom über ein bewegliches Fenster von zehn Sekunden gemittelt. Durch die Division von Restkapazität durch Durchschnittsstrom kann die Restlaufzeit bestimmt werden.

Alle Daten werden über den CAN-Bus CAN_VCU an die VCU und dann weiter über Bluetooth an das Tablet verschickt und können dann mit zusätzlichen Informationen aufbereitet werden. So könnte beispielsweise die Restlaufzeit mit der Fahrzeuggeschwindigkeit kombiniert und eine wirkliche Restreichweite in Kilometer ermittelt werden. Durch die höher Rechenleistung des Tablets und mit den Informationen des Global Positioning System (GPS) könnten auch komplizierte Berechnungen bezüglich des Fahrverhaltens durchgeführt werden.

Erstellung der Grafiken

Die Bildflächen wurden zum Teil mit einem separat entwickelten Programm erstellt (siehe Abbildung 69). Mit Hilfe des Programms ist es möglich, einfache Grafiken in Quelltext umzuwandeln. Somit ist eine Vielzahl von Darstellung denkbar.

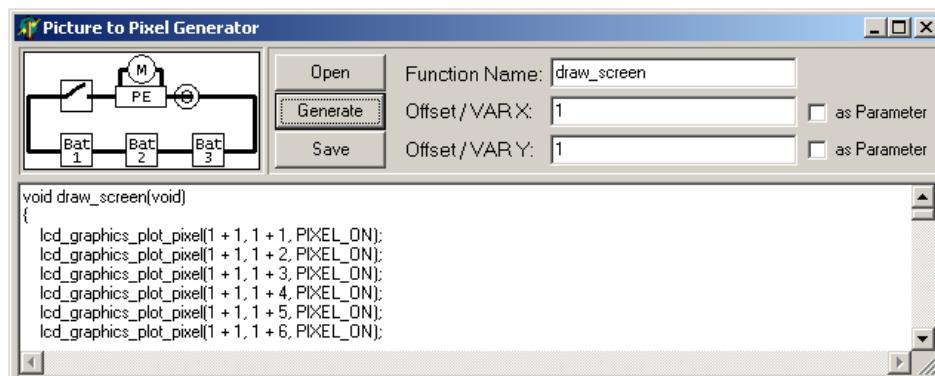


Abbildung 69: Picture to Pixel Generator

5.6.4 Kommunikation mit der VCU

Das BMS fungiert als Gateway zwischen den beiden CAN-Netzen CAN_BMS und CAN_VCU. Das BMS bereitet die Informationen auf und sendet sie weiter an die VCU. Die folgende CAN-Nachrichten werden versendet (siehe Tabelle 11).

ID	Typ	DLC	Byte 1	Byte 2	Byte 3	Byte 4	Byte 5	Byte 6	Byte 7	Byte 8
0x101	TX	8	Status	Bal_1	Bal_2	Bal_3	r	r	r	r
0x111	TX	8	10000r	1000er	100er	10er	1er	r	r	r
0x112	TX	8	Vorz.	100er	10er	1er	1/10r	r	r	r
0x130	TX	8	Z1_L	Z1_H	Z2_L	Z2_H	Z3_L	Z3_H	Z4_L	Z4_H
0x131	TX	8	Z5_L	Z5_H	r	r	r	r	r	r
0x140	TX	8	Z6_L	Z6_H	Z7_L	Z7_H	Z8_L	Z8_H	Z9_L	Z9_H
0x141	TX	8	Z10_L	Z10_H	r	r	r	r	r	r
0x150	TX	8	Z11_L	Z11_H	Z12_L	Z12_H	Z13_L	Z13_H	Z14_L	Z14_H
0x151	TX	8	Z15_L	Z15_H	r	r	r	r	r	r
0x160	TX	8	100er	10er	1er	1/10er	r	r	r	r
0x161	TX	8	10000r	1000er	100er	10er	1er	r	r	r
0x170	RX	8	Laden	r	r	r	r	r	r	r

Tabelle 11: CAN-Nachrichten zwischen VCU und BMS

Die Nachricht mit der ID 0x101 hat die höchste Priorität und beinhaltet im ersten Byte das Statusbyte des BMSs. Jedes Bit symbolisiert einen der folgenden Zustände (siehe Tabelle 12).

Bit	Zustand „0“	Zustand „1“
0	BMC 1 ist offline	BMC 1 ist online
1	BMC 2 ist offline	BMC 2 ist online
2	BMC 2 ist offline	BMC 2 ist online
3	Stromwandler ist offline	Stromwandler ist online
4	Ladeschlussspannung ist nicht erreicht	Ladeschlussspannung ist überschritten worden
5	Entladeschlusssp. ist nicht erreicht	Entladeschlusssp. ist unterschritten worden
6	Systemfunktionen normal	Systemfunktionen fehlerhaft, Notabschaltung
7	Ladeschütz ist geöffnet	Ladeschütz ist geschlossen

Tabelle 12: Bedeutung der Bits im Statusbyte

Im zweiten bis vierten Byte enthält die Nachricht Informationen über das Balancierungsverhalten, wobei das zweite Byte für den ersten Stack, das dritte Byte für den zweiten Stack und das vierte Byte für den dritten Stack stehen. Exemplarisch wird die Bitverteilung für den ersten Stack in Tabelle 13 dargestellt.



Bit	Zustand „0“	Zustand „1“
0	Zelle 1 wird nicht balanciert	Zelle 1 wird balanciert
1	Zelle 2 wird nicht balanciert	Zelle 2 wird balanciert
2	Zelle 3 wird nicht balanciert	Zelle 3 wird balanciert
3	Zelle 4 wird nicht balanciert	Zelle 4 wird balanciert
4	Zelle 5 wird nicht balanciert	Zelle 5 wird balanciert
5	Reserviert für Zelle 6	Reserviert für Zelle 6
6	Reserviert für Zelle 7	Reserviert für Zelle 7
7	Reserviert für Zelle 8	Reserviert für Zelle 8

Tabelle 13: Bedeutung der Bits im Balancierungsbyte

Die Nachricht mit der ID 0x111 beinhaltet die Gesamtspannung der Zellen und wird in Millivolt angegeben (Wertebereich von 1mV bis 99999mV). Die Spannung wird im BCD-Format als ASCII-Zeichen codiert übertragen. Die restlichen Bytes sind reserviert für spätere Funktionen.

Hinter der ID 0x112 verbürgt sich der aktuelle Gesamtstrom. Der Strom wird in Ampere mit einer Nachkommastelle angegeben. Zudem wird die Stromrichtung durch das Vorzeichen im ersten Datenbyte (ASCII '+' für Entladestrom und ASCII '-' für Ladestrom der Batterie) symbolisiert. Die Kodierung des Stroms erfolgt wie bei der Gesamtspannung über das BCD-Format und in ASCII-Zeichen. Das Komma wird nicht übertragen. Die restlichen Bytes sind reserviert für spätere Funktionen.

Die Einzelzellenspannungen werden auch über den CAN-Bus an die VCU weitergeleitet. Die Umrechnung in Millivolt findet in dem BMS statt. Es wird keine Kodierung in das BCD-Format oder in ASCII-Zeichen vorgenommen. Batteriestack eins wird durch die Nachrichten 0x130 und 0x131, Batteriestack zwei durch die Nachrichten 0x140 und 0x141 und Batteriestack drei durch die Nachrichten 0x150 und 0x151 repräsentiert. Eine Zellspannung wird durch zwei Bytes kodiert, wobei das niedrigerwertige Byte vor dem höherwertigen Byte in der Nachricht eingebunden ist. Für Stack eins werden beispielsweise die Zellspannungen eins bis vier in der Nachricht mit der ID 0x130 und die Zellspannung der fünften Zelle in der Nachricht 0x131 übertragen. Byte eins entspricht dem niedrigerwertigen Byte und Byte zwei dem höherwertigen Byte der ersten Zellspannung. Dieses Muster wird für die anderen Spannungen und den anderen Stacks beibehalten.

Die Nachricht mit der ID 0x160 enthält die Restkapazität in Deziamperestunden (drei Vorkommastellen und eine Nachkommastelle). Die Kodierung erfolgt wieder nach dem BCD-Prinzip und im ASCII-Format, wobei das Komma nicht versendet wird.

Die Restreichweite bzw. Restlaufzeit wird in der Nachricht mit der ID 0x161 eingebunden. Die Restlaufzeit wird in Minuten angegeben, nach dem BCD-Prinzip kodiert und im ASCII-Format verschickt.

Damit die VCU den Ladevorgang und zukünftig weitere Funktionen steuern kann, ist die Nachricht mit der ID 0x170 implementiert worden. Das erste Byte enthält im niedrigerwertigen Bit die Information, ob geladen werden soll. Eine logische Eins führt zum Anziehen und eine Null zum Öffnen des Ladeschützes. Dabei ist zu beachten, dass die VCU nicht die Sicherheitsbedingungen eines sicheren Ladens außer Kraft setzen kann.

5.6.5 Software

Software des AVR-CAN Boards VCU-seitig

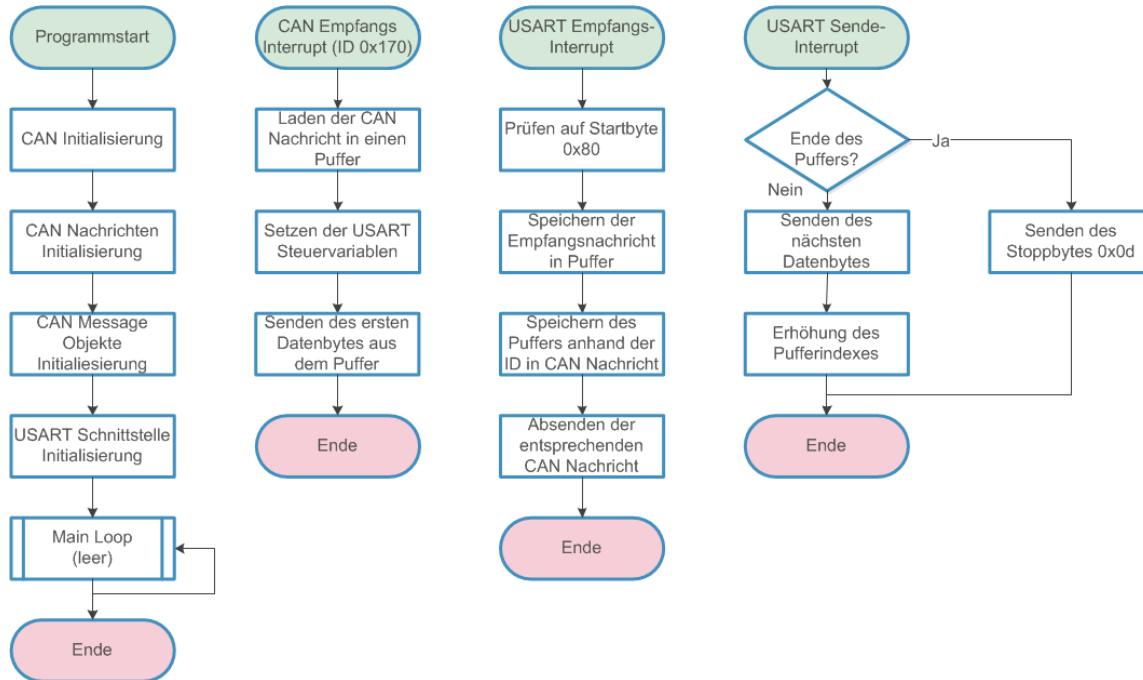


Abbildung 70: BMS Programmablauf - VCU-seitig

Das Programm des VCU-seitigen Boards ist einfach gehalten, weil es ausschließlich der Weiterleitung der CAN-Nachrichten dient (siehe Abbildung 70). Nachdem die Peripherie und die Interrupts eingestellt wurden, verbleibt das Programm in einer Endlosschleife und reagiert nur auf die Interrupts. Sobald ein Empfang auf der UART-Schnittstelle registriert wird und das erste Byte dem Startbyte entspricht, werden die Daten zwischengespeichert und nach einer definierten Länge ausgewertet. Die ID wird aus dem Datenkopf extrahiert, die Daten dann entsprechend in die jeweiligen CAN-Nachrichten verpackt und über den CAN-Bus CAN_VCU verschickt.

Bei dem Empfang einer CAN-Nachricht wird ebenfalls ein Interrupt ausgelöst und die ID der Nachricht überprüft. Sollte die ID vermerkt sein, so werden die Daten in die entsprechende UART-Nachricht verpackt und über die UART-Schnittstelle verschickt. Das Datenformat der UART-Nachrichten ist in beiden Richtungen das gleiche (siehe Tabelle 14).

Datenkopf					Datenfeld							
Startbyte	ID_H	ID	ID	ID_L	Byte1	Byte2	Byte3	Byte4	Byte5	Byte6	Byte7	Byte8

Tabelle 14: Datenformat der UART-Nachrichten

In der main.c können folgende Einstellungen für diese Software vorgenommen werden (siehe Tabelle 15).

#define BAUD	Baudrate entsprechend der Wertetabelle aus dem Datenblatt
#define F_CPU	Taktfrequenz des Mikrocontrollers in Hz

Tabelle 15: BMS Konfiguration - VCU-seitig

Software des AVR-CAN Boards BMS-seitig

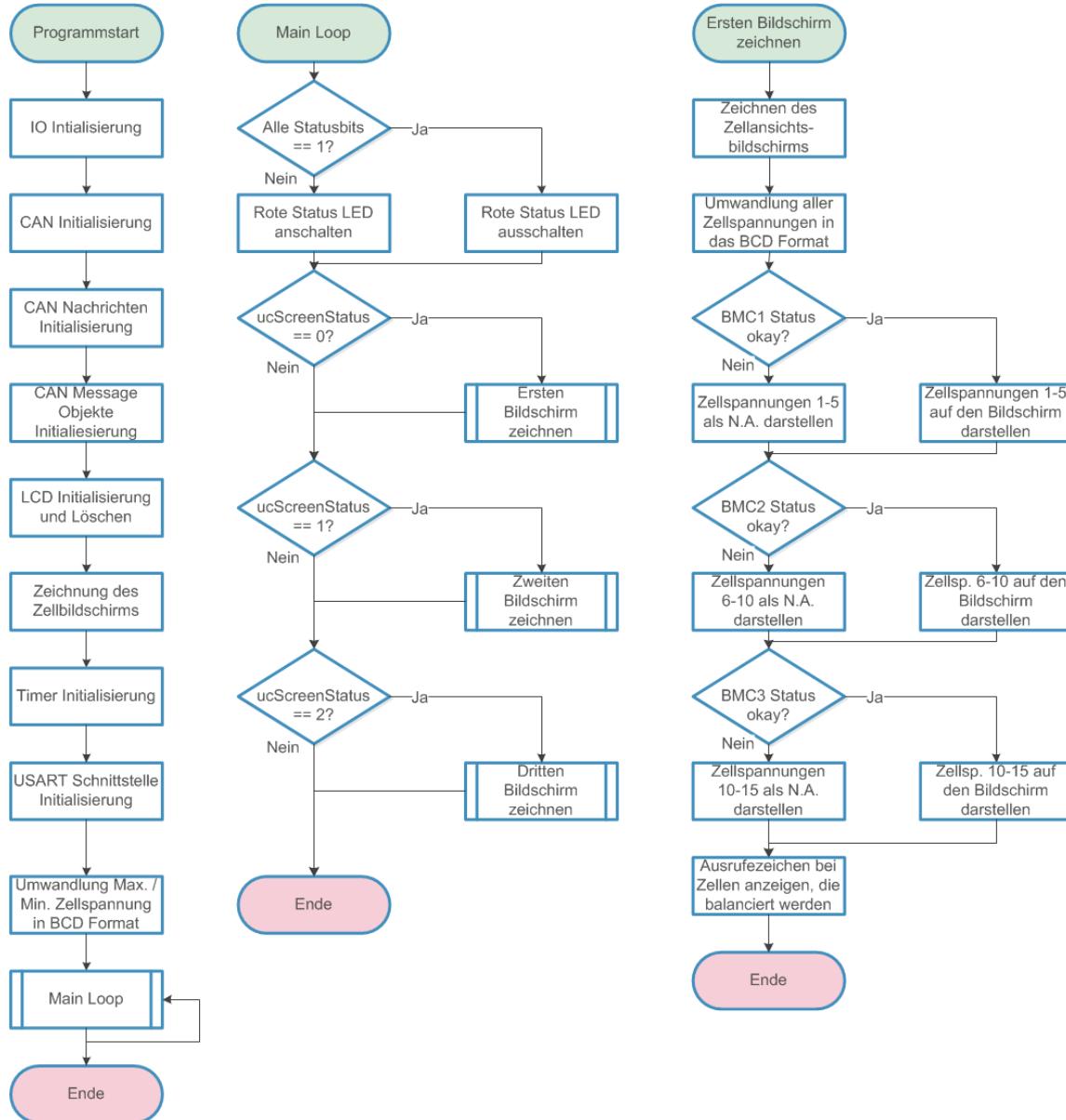


Abbildung 71: BMS Programmablauf - BMS-seitig (Teil 1)

Die Intelligenz des Batteriemangement Systems fokussiert sich im BMS-seitigen Board. Für die bessere Übersicht wurde der Ablaufplan in Teilprozesse unterteilt.

Das Programm startet mit der Initialisierung aller Komponenten, Peripherien und der Beschreibung der CAN/UART-Nachrichten (siehe Abbildung 71). Fortan befindet sich das Programm in einer Endlosschleife und wird nur durch Interrupts unterbrochen. Die Endlosschleife dient der kontinuierlichen Aktualisierung des LC Displays, der dargestellten Daten und der roten Status LED. Je nach gewähltem Bildschirm werden verschiedene Informationen angezeigt.

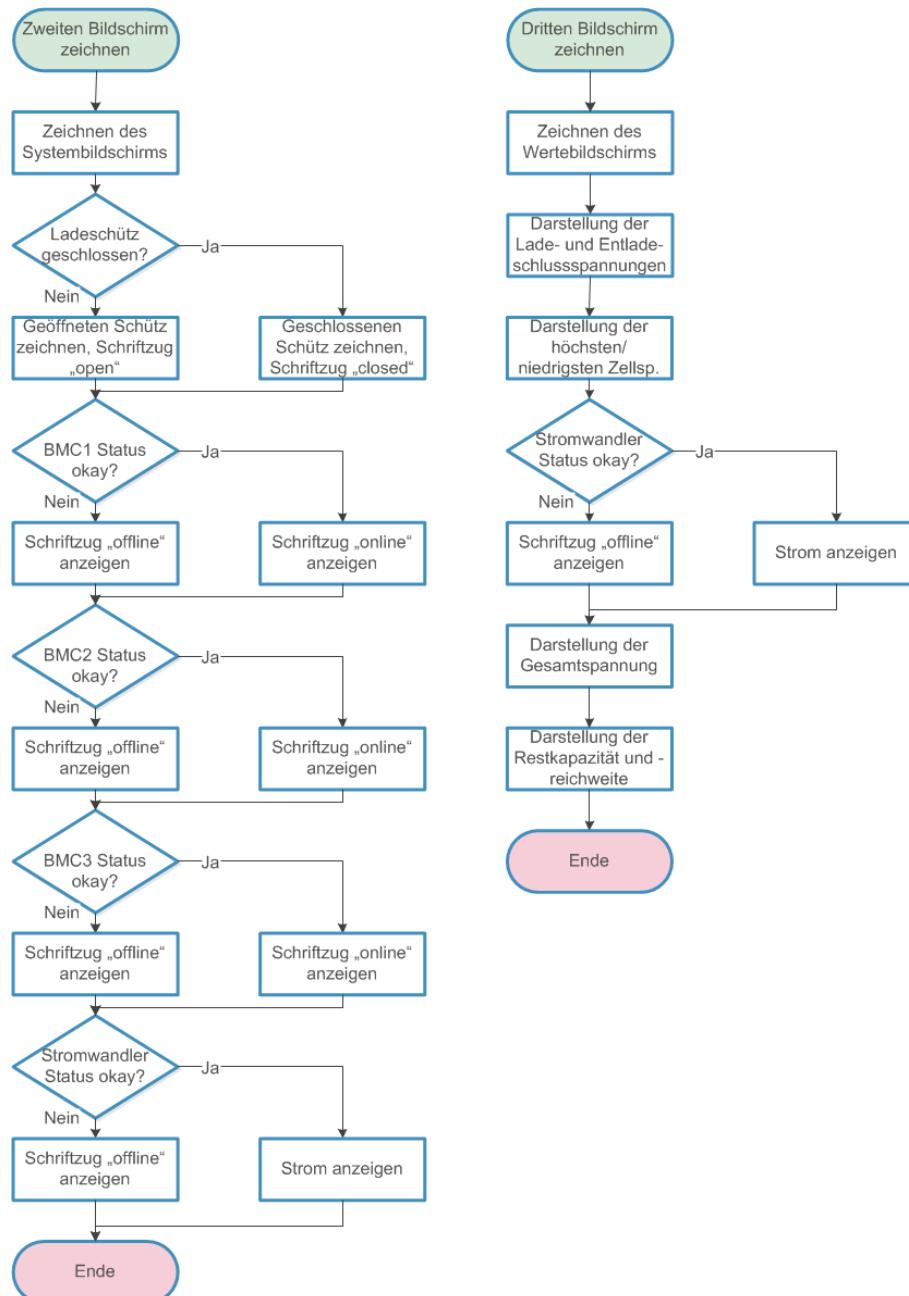


Abbildung 72: BMS Programmablauf - BMS-seitig (Teil 2)

Sollte der Bildschirm mit den Zellspannungen gewählt sein, so wird einmalig der Hintergrund gezeichnet (siehe Abbildung 71). Fortlaufend werden die Teilspannungen in das BCD Format umgewandelt und in der jeweiligen Zelle dargestellt. Ist ein Batterie Modul Controller offline, wird anstatt der Zahlenwerte der Schriftzug „N.A.“ (Not available) angezeigt. Falls das Define für die Balancierung der Zellen gesetzt ist, so wird zusätzlich in den Zellen, die gerade balanciert werden, ein Ausrufezeichen geschrieben.

Der zweite Bildschirm zeigt die Systemübersicht. Bei betreten dieses Status wird das Hintergrundbild auf dem Display dargestellt (siehe Abbildung 72). Nun werden fortlaufend die Status der Systemkomponenten angezeigt.

Im dritten Bildschirm werden die Bilanzierungsdaten beschrieben und stetig aktualisiert.

Der statische Ablauf des Programms kann nur durch anstehende Interrupts unterbrochen werden (siehe Abbildung 73). Die Kommunikation zwischen den beiden Olimex Boards erfolgt über die UART-Schnittstelle und wird durch Interrupts abgewickelt.

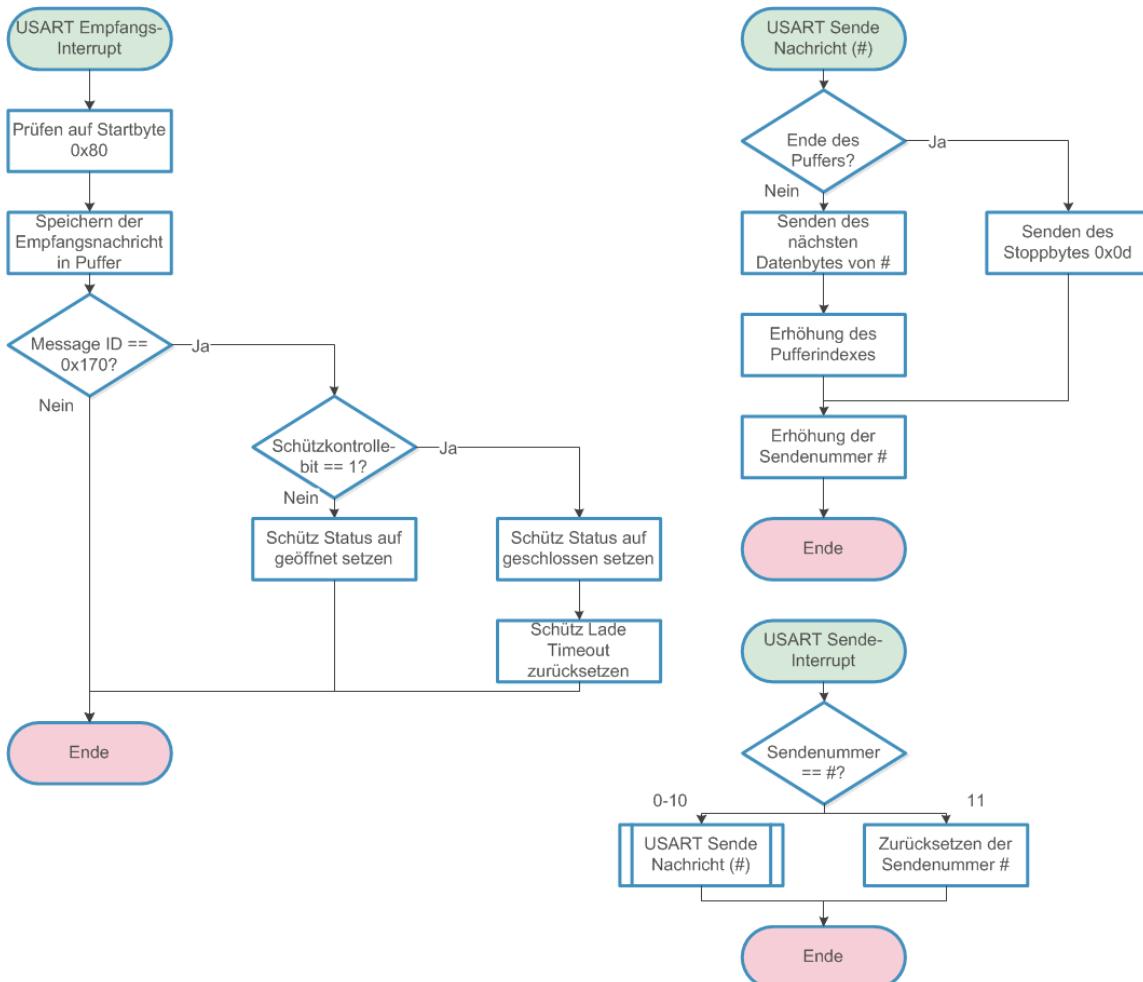


Abbildung 73: BMS Programmablauf - BMS-seitig (Teil 3)

Sobald eine gültige Nachricht über die UART-Schnittstelle empfangen wird, wird sie in einen Puffer zwischengespeichert und anschließend analysiert. Die ID im Datenkopf wird auf die ID 0x170 geprüft. Sollten diese gleich sein, wurde gerade die Befehlsnachricht von der VCU empfangen.



Im letzten Stand dieser Arbeit gibt es nur einen möglichen Befehl und dieser betrifft das Schalten des Ladeschützes. Ist das erste Bit des ersten Datenbytes gesetzt, so erfolgt die Statusänderung des Ladeschützes zu „geschlossen“. Ist dieses Bit nicht gesetzt, wird der Status auf „geöffnet“ gesetzt.

Für das Senden von UART-Nachrichten wird der Transmit-Interrupt genutzt, der nach jedem erfolgreichem Senden eines Bytes erneut auslöst. Angestoßen wird diese Kaskade durch den Timer-Interrupt, der später beschrieben wird. Sobald der Sendeprozess in die Wege geleitet wurde, werden alle Nachrichten nacheinander, Byte für Byte, versendet. Zwischen den Nachrichten gibt es ein Funktionsbyte mit dem Wert 0x0d, was dem „carriage return“ entspricht. Dieses wurde für die Fehleranalyse eingebaut, weil so die Nachrichten in einem Terminalprogramm untereinander stünden. Nachdem alle Bytes gesendet wurden, wird eine Kontrollvariable zurückgesetzt, damit die Kaskade unterbrochen wird.

Die CAN-Kommunikation Funktioniert ausschließlich über Interrupt-Routinen. Das Senden der CAN-Nachrichten wird über die Timer-Interrupt-Routine erledigt und das Empfangen über den CAN-Empfangs-Interrupt. Sobald eine CAN-Nachricht empfangen wurde, werden die Daten in einem Puffer zwischengespeichert und die ID überprüft. Es gibt zehn verschiedene Nachrichten die eine gültige ID besitzen (siehe Abbildung 74). Im Grunde lassen sie sich in drei Gruppen unterteilen. Die ersten Nachrichtengruppe beinhaltet die Zellspannungen der Batterie Modul Controller (IDs 0x030, 0x031, 0x040, 0x041, 0x050, 0x051). Die Spannungen werden aus den Nachrichten extrahiert und nach einer Formel aus dem Datenblatt des LTC6803 in Millivolt umgerechnet und gespeichert (siehe Formel 14).

$$V_C = (V_{CxV} - 512) * 1.5mV$$

Formel 14: Umrechnung des Messwerts in Millivolt

Anschließend werden die entsprechenden UART-Nachrichten mit den umgerechneten Messwerten beschrieben.

Die zweite Gruppe sind die Statusnachrichten der einzelnen Batterie Modul Controller (IDs 0x020, 0x021, 0x022). Im letzten Stand der Arbeit werden keine Informationen im Datenbereich übermittelt. Das Ankommen der Nachrichten hat nur zur Folge, dass die korrespondierende Komponente den Status „online“ erhält und der Timeout-Zähler zurückgesetzt wird. Diese Nachrichten können zukünftig genutzt werden, um weitere Informationen zu übermitteln.

Die letzte Gruppe beinhaltet nur eine Nachricht mit der ID 0x060 und wird von Stromwandler gesendet. Das Eintreffen der Nachricht dient auch hier der Funktionserkennung der Komponente. Der Status wird auf „online“ gesetzt und der Timeout-Zähler zurückgesetzt. Des Weiteren wird der gemessene Strom als BCD und als Integerwert gespeichert und die entsprechende UART-Nachricht beschrieben. Die Stromrichtung wird in einer Variable festgehalten.

Unabhängig von den Nachrichten wird der CAN-Controller abschließend wieder auf Empfang gesetzt und die Statusbits zurückgesetzt.



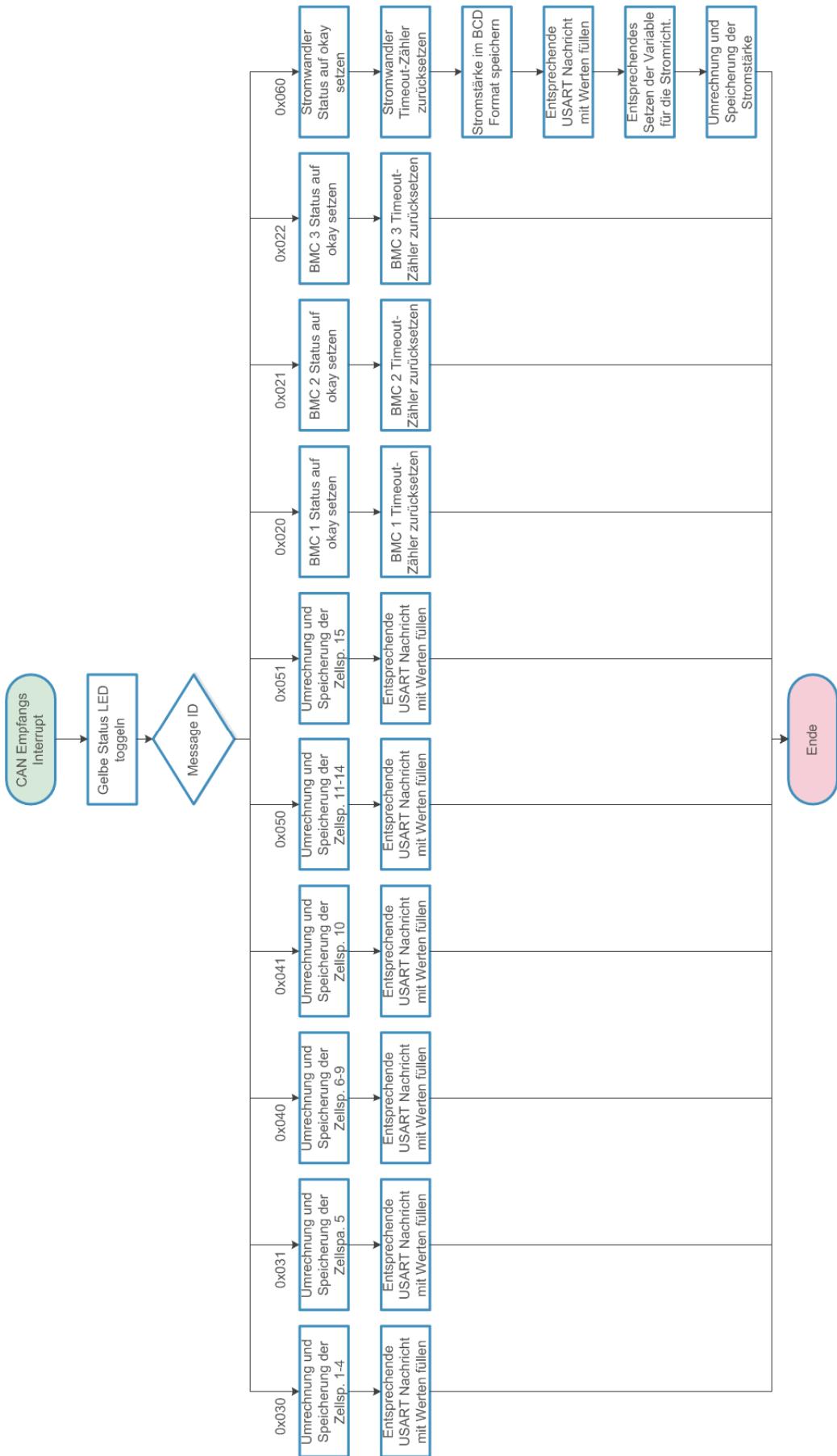


Abbildung 74: BMS Programmablauf - BMS-seitig (Teil 4)



Die Hauptfunktionen des Programms werden über den Timer-Interrupt gesteuert. Der Interrupt wird bei jedem Überlauf des Timers ausgelöst. Dies geschieht alle 4ms (siehe Abbildung 75). Durch eine Zählvariable können verschiedene Zeitebenen, die ein Vielfaches der 4ms sind, erreicht werden. In diesem Programm werden drei Zeitebenen verwendet.

Der erste Teilprozess wird einmal in der Sekunde aufgerufen. Die Hauptaufgabe besteht darin, die verbrauchte Energie in Amperesekunden zu ermitteln und entsprechend der Stromrichtung von der Restkapazität abzuziehen respektive aufzuaddieren. Weiterhin wird über einen gleitenden Mittelwert der Durchschnittsstrom der letzten zehn Sekunden berechnet. Nun kann mit Hilfe der Restkapazität und des Durchschnittstroms die Restlaufzeit in Minuten errechnet werden. Diese Daten werden in das BCD-Format umgewandelt, in Variablen gespeichert und in die entsprechenden UART-Nachrichten eingepflegt.

Der zweite Prozess wird alle 80ms ausgelöst. Dabei werden die Timeout-Zähler für die BMCs und für den Stromwandler inkrementiert. Sollten einer dieser Zähler 400ms überschreiten, so wird der Status dieser Komponente als „offline“ beschrieben. Der Timeout-Zähler für den Ladestrom wird auch erhöht und bei Erreichen von 3200ms wird der Schützstatus auf „geöffnet“ gesetzt. Sollte der Ladestrom größer als der Grenzwert sein, so wird der Zähler zurückgesetzt.

Weiterhin wird in diesem Prozess die Zelle mit der kleinsten und die Zelle mit der höchsten Zellspannung ermittelt, jeweils die Zellnummer und die Zellspannung gespeichert und in das BCD-Format umgewandelt. Anschließend wird die Gesamtspannung durch Aufsummierung der Einzelspannungen errechnet und im Integerformat und BCD-Format gespeichert.

Die Status der Komponenten werden bitweise im Statusbyte vermerkt und in der entsprechenden UART-Nachricht eingepflegt. Die Befehlbytes für die Batterie Modul Controller werden erst zurückgesetzt und falls das Define für die Zellsymmetrierung gesetzt ist, wird jede Zellspannung mit der kleinsten Zellspannung verglichen. Sollte eine Zellspannung den eingestellten Tolleranzbereich überschreiten, so wird der Status und das korrespondierende Bit im Statusbyte des Stacks auf balancieren gesetzt.

Abschließend wird die CAN-Nachricht mit den Befehlen für die Batterie Modul Controller über den CAN-Bus CAN_BMS verschickt.



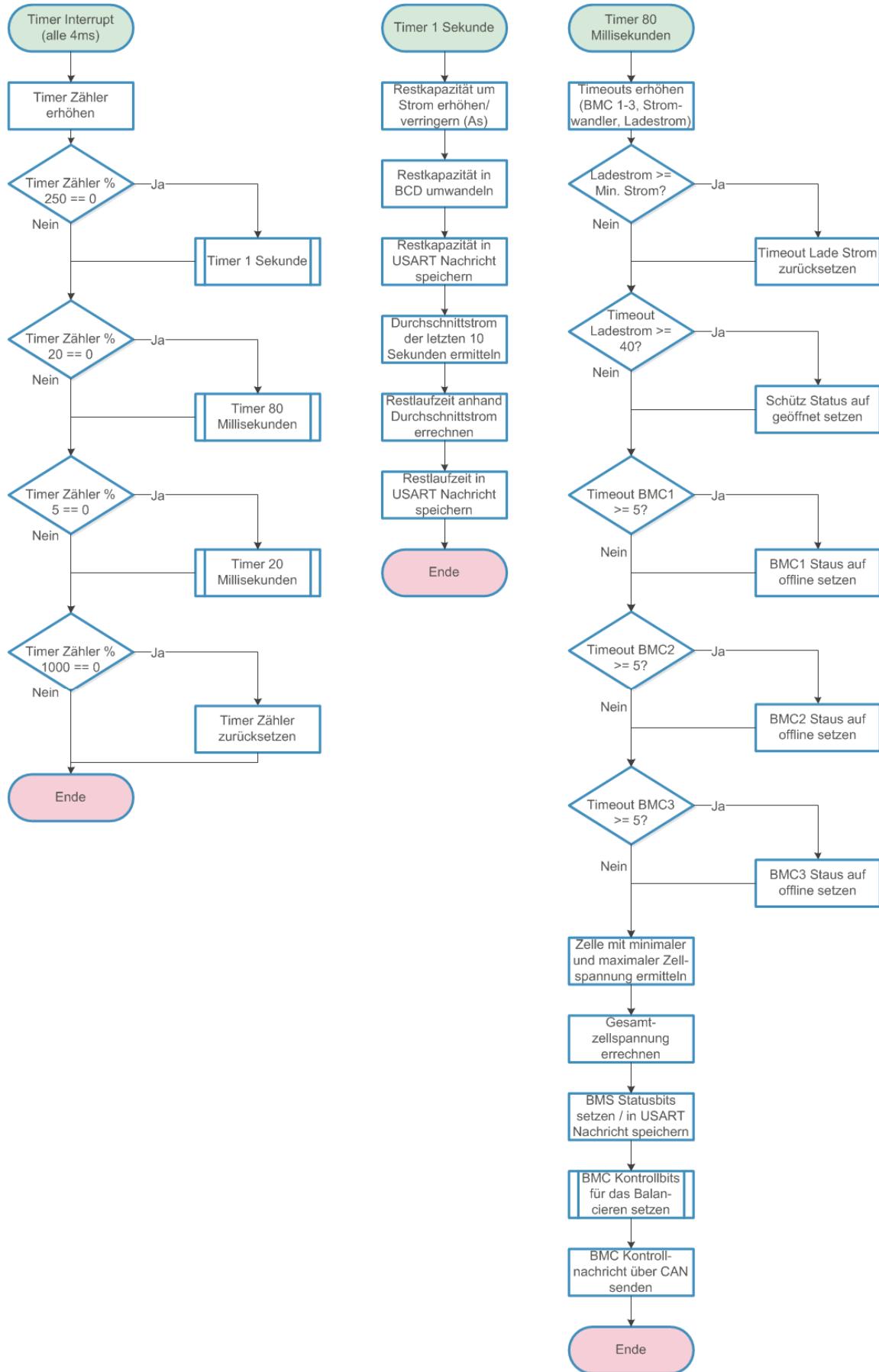


Abbildung 75: BMS Programmablauf - BMS-seitig (Teil 5)

Der dritte Teilprozess wird im Zeitrahmen von 20ms abgearbeitet und dient hauptsächlich der Zellüberwachung (siehe Abbildung 76). Die kleinste und größte Zellspannung wird mit dem jeweiligen Grenzwert für die Ladeschlussspannung respektive Entladeschlussspannung verglichen. Sollte der Grenzwert für die Ladeschlussspannung überschritten worden sein, so wird der Ladevorgang abgebrochen, indem das Ladeschütz den Status „geöffnet“ erhält. Des Weiteren werden die Fehlerbits und die Restkapazität auf den Ausgangszustand gesetzt. Problematisch ist hierbei, dass selbst bei symmetrischen Zellen, die ihre Ladeschlussspannung erreichen, nicht unbedingt die Nennkapazität zur Verfügung steht. Um eine möglichst genaue Prognose der Kapazität geben zu können, bedarf es weiterer Parameter, wie die Zellhistorie, Temperaturen, den State of Health und weitere Korrekturfaktoren.

Sollte die Entladeschlussspannung unterschritten worden sein, wird ein Statusbit im Statusbyte gesetzt. Auf diese Information kann die Vehicle Control Unit reagieren, indem sie beispielsweise eine Warnung an den Fahrer gibt oder die Batterie von dem System trennt, um die Zellen vor der Tiefenentladung zu schützen.

In diesem Prozess werden auch die Taster entprellt und danach deren Status abgefragt. Wechselt der Status des roten Tasters von „nicht gedrückt“ zu „gedrückt“, wird die Variable für den Bildschirmwechsel erhöht bzw. beim letzten Bildschirm auf Null zurückgesetzt. Bei einem Statuswechsel des schwarzen Tasters wird der Status des Ladeschützes getoggelt.

Sollte der Status des Ladeschützes „geschlossen“ sein, wird der Schütz geschlossen und die grüne Status LED illuminiert. Bei dem Status „geöffnet“ wird der Portpin, an dem die Treiberstufe für den Schütz hängt, zurückgesetzt und der Ladestromkreis unterbrochen. Das Erlöschen der grünen Status LED symbolisiert den geöffneten Schütz.

Der Prozess endet mit dem setzen der UART-Kommunikationsvariablen und dem Starten der UART-Kommunikation, indem das erste Byte gesendet wird.



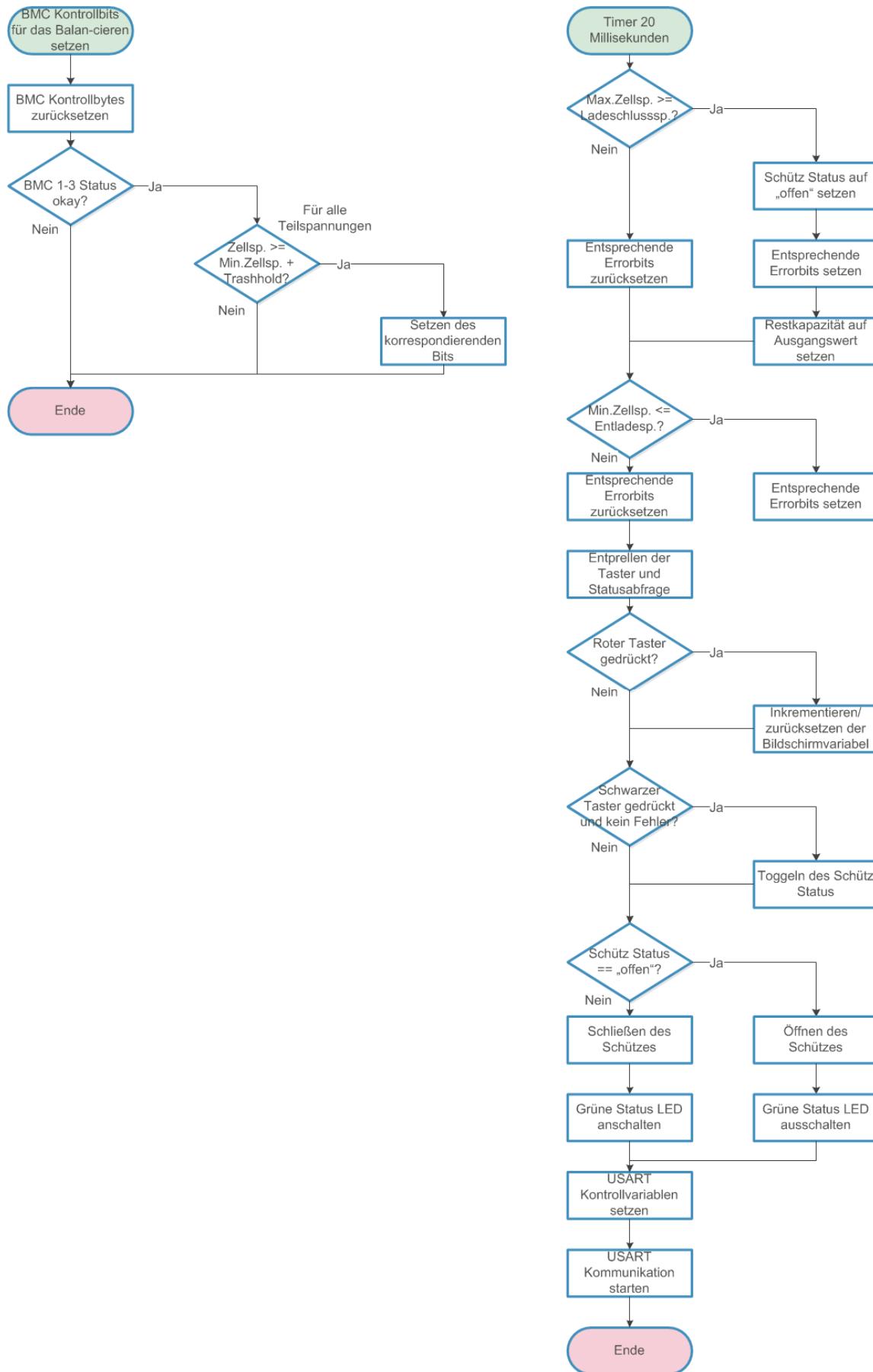


Abbildung 76: BMS Programmablauf - BMS-seitig (Teil 6)



Programmeinstellungen

In der main.c können folgende Einstellungen für diese Software vorgenommen werden (siehe Tabelle 16).

#define BAUD	Baudrate entsprechend der Wertetabelle aus dem Datenblatt
#define F_CPU	Taktfrequenz des Mikrocontrollers in Hz
#define CONT_DDR	Data Direction Register für die Schützsteuerung
#define CONT_PORT	Data Port Register für die Schützsteuerung
#define CONT_BIT	Pinnummer für die Schützsteuerung
#define BUT_DDR	Data Direction Register für die Taster
#define BUT_PIN	Data Port Register für die Taster
#define BUT_BLACK	Pinnummer für den schwarzen Taster
#define BUT_RED	Pinnummer für den roten Taster
#define LED_DDR	Data Direction Register für die LEDs
#define LED_PORT	Data Port Register für die LEDs
#define LED_RED	Pinnummer für den rote LED
#define LED_YEL	Pinnummer für den gelbe LED
#define LED_GRE	Pinnummer für den grüne LED
#define LCD_DATA_DDR	Data Direction Register für das LC Display (Daten)
#define LCD_DATA_PORT	Data Port Register für das LC Display (Daten)
#define LCD_DATA_PIN	Input Pins Address Register für das LC Display (Daten)
#define LCD_CTRL_DDR	Data Direction Register für das LC Display (Befehle)
#define LCD_CTRL_PORT	Data Port Register für das LC Display (Befehle)
#define LCD_CTRL_RS	Pinnummer für die RS Leitung (Daten- oder Befehlwahl)
#define LCD_CTRL_E	Pinnummer für die Enable Leitung
#define LCD_WIDTH	Breite des Displays in Pixels
#define LCD_HEIGHT	Höhe des Displays in Pixels
#define MAX_CELL_VOLTAGE	Ladeschlussspannung in mV
#define MIN_CELL_VOLTAGE	Entladeschlussspannung in mV
#define MIN_CHARGING_CURRENT	Minimaler Ladestrom in mA
#define CELL_CAPACITY	Nennkapazität einer Zelle in Ah
#define VOLTAGE_DIFF_TRASHHOLD	Max. Abweichung der Zellspannungen untereinander in mV
#define BALANCING_ON	Schaltet das passive Balancieren an
#define EEPROM_Version	Adresse der Versionsnummer im EEPROM
#define EEPROM_Energy_L	Adresse der Restkapazität im EEPROM (Low Byte)
#define EEPROM_Energy_M	Adresse der Restkapazität im EEPROM (Middle Byte)
#define EEPROM_Energy_H	Adresse der Restkapazität im EEPROM (High Byte)

Tabelle 16: BMS Konfiguration - BMS-seitig

5.6.6 Schütztreiber

Damit das BMS den Ladevorgang abbrechen kann, besitzt es direkten Zugriff auf die Steuerung des Ladeschützes. Damit das Hochleistungsschütz über eine 5V-Logik geschaltet werden kann, bedarf es einer Treiberstufe, die in Abbildung 77 schematisch dargestellt ist.

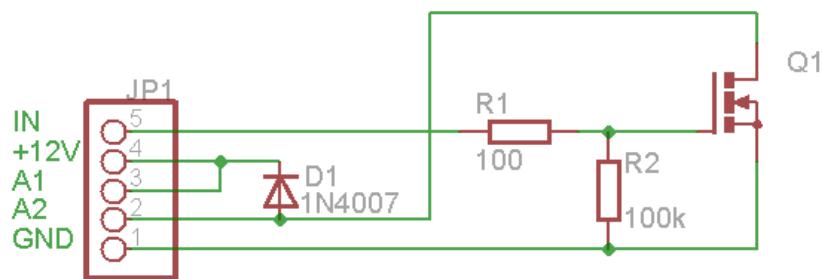


Abbildung 77: Stromlaufplan des Schütztreibers

Ein 5V Signal an dem Anschluss fünf schaltet den N-Kanal MOSFET, wodurch die Spule des Schützes mit 12V versorgt wird. Damit es beim Trennen der Induktivität nicht zu Spannungsspitzen kommt, ist eine Freilaufdiode eingebaut. Die Platine ist zusätzlich im Gehäuse des BMSs verbaut. Folgende Anschlüsse sind vorhanden (siehe Abbildung 78 und Tabelle 17).

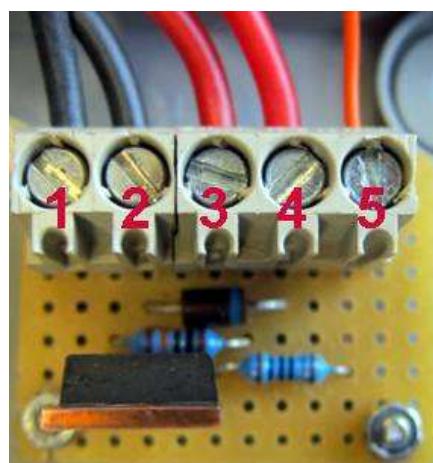


Abbildung 78: Anschlüsse des Schütztreibers

#	Name	Funktion
1	GND	Masse, Fahrzeugmasse
2	A2	A2 Anschlussklemme der Spule im Schütz, Massepol
3	A1	A1 Anschlussklemme der Spule im Schütz, Pluspol
4	+12V	Spannungsversorgung durch das 12V Boardnetz
5	IN	Digitaler Input, 5V Pegel schaltet 12V, 0V Pegel unterbricht der Spannungsversorgung

Tabelle 17: Anschlüsse des Schütztreibers

5.6.7 Sicheres Laden und Entladen

Das Laden der Akkumulatoren erfolgt über das Ladeschütz, welches ausschließlich durch das BMS kontrolliert wird. Das Batteriemanagement System schließt nicht selbstständig den Schütz, sondern wartet auf einen manuellen Input. Dies kann einerseits durch das Betätigen des schwarzen Tasters erfolgen oder andererseits durch eine empfange CAN-Nachricht, die von der VCU gesendet wird. Zukünftig wäre es denkbar, dass der Fahrer den Ladeschütz über das Tablet steuern kann. Erneutes Betätigen des Tasters oder das Senden einer weiteren Nachricht über den CAN-Bus führt zum Abschalten des Ladevorgangs (siehe Tabelle 19).

Obschon das BMS nicht selbstständig das Ladeschütz anzieht, so obliegt die sicherheitsrelevante Abschaltung ausschließlich dem Batteriemanagement System. Diese Funktion kann nicht von anderen Komponenten oder dem Fahrer umgangen werden.

Kriterien für das Laden sind in diesem Fall die eingestellte Ladeschlussspannung und der eingestellte, minimale Ladestrom. Unter dem Aspekt der Sicherheit für den Fahrer und den Batterien ist gerade die Ladeschlussspannung von Interesse. Sollte beim Laden eine oder mehrere Zellspannungen die Ladeschlussspannung erreichen, so wird der Ladeschütz geöffnet und der Ladevorgang abgebrochen. Die entsprechenden CAN-Nachrichten werden an die VCU gesendet und auf dem Tablet dargestellt.

Bei der Entladung ist vor allem die Entladeschlussspannung von Interesse. Das BMS vergleicht hierbei jede Zellspannung mit der eingestellten Entladeschlussspannung. Sollte eine oder mehrere Zellspannungen die Entladeschlussspannung erreichen, so wird eine CAN-Nachricht generiert und an die VCU geschickt. Da das BMS keinen direkten Zugriff auf das Hauptschütz hat, obliegt es der VCU die entsprechenden Maßnahmen einzuleiten. Wiederum können die Statusmeldungen am Tablet sichtbar gemacht werden.



5.7 Einbau

Im folgenden Kapitel wird auf den Einbau und die Anschlüsse der Komponenten eingegangen.

5.7.1 Batterietrog

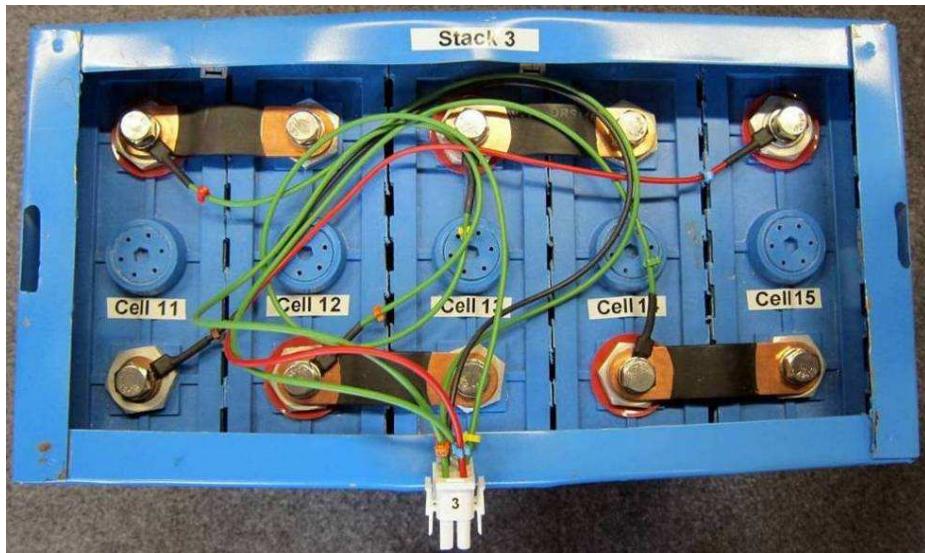


Abbildung 79: Batterietrog 3 mit Verkabelung

Für einfaches Ein- und Ausbauen der Batterieträger wurden die Messleitungen mit Steckverbinder ausgestattet (siehe Abbildung 79). Als Leitungen wurden hochflexible Silikonleitungen verwendet, um eine größtmögliche Bewegungsfreiheit zu gewährleisten. Die Stecker haben die folgende Pinbelegungen (siehe Abbildung 80 und Tabelle 18).

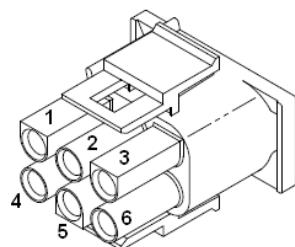


Abbildung 80: Batterietrog – Pinbelegung [DataMNL04]

#	Farbe	Funktion
1	Schwarz	Masse, Anschluss an der Masseklemme der niedrigsten Zelle des Stacks
2	Grün	Messleitung Zelle 1, Anschluss an Phasenklemme der Zelle 1
3	Grün	Messleitung Zelle 2, Anschluss an Phasenklemme der Zelle 2
4	Grün	Messleitung Zelle 3, Anschluss an Phasenklemme der Zelle 3
5	Grün	Messleitung Zelle 4, Anschluss an Phasenklemme der Zelle 4
6	Rot	VCC, Messleitung Zelle 5, Anschluss an Phasenklemme der Zelle 5

Tabelle 18: Pinbelegung des Batterietrogsteckers



5.7.2 BMC und BMS

Das Batteriemanagement System und die drei Batterie Modul Controller wurden auf eine 0.9cm dicken Photofilmplatte montiert. Die Platte selber wurde anschließend auf den Deckel des Batterietrogs befestigt (siehe Abbildung 81). Die Leitungen, die in den Innenraum des Troges führen, sind über einen Spalt unter dem Deckel verlegt. Da alle Leitungen mit Steckverbinder ausgestattet sind, kann der Deckel vom Trog entfernt werden.



Abbildung 81: Montageplatte mit BMS und BMCs

Die Spannungsversorgung aller Komponenten wird mit der 12V Boardnetzbatterie gewährleistet und kann mit Hilfe eines zweipoligen Steckers (siehe Abbildung 81, rechte obere Ecke) vom System getrennt werden.

5.7.3 CAN Nachrichtenübersicht

In der Tabelle 19 sind alle CAN-Nachrichten auf beiden Bussen aufgelistet

ID	Bus	Sender	Empfänger	DLC	Byte 1	Byte 2	Byte 3	Byte 4	Byte 5	Byte 6	Byte 7	Byte 8	Interval	Funktion	
0x010	CAN_BMS	BMS	BMC 1-3	8	Bal_1	Bal_2	Bal_3	r	r	r	r	r	~100ms	Steuerung der Zellbalancierung	
0x120	CAN_BMS	BMC 1	BMS	8	r	r	r	r	r	r	r	r	~100ms	BMC Status	
0x021	CAN_BMS	BMC 2	BMS	8	r	r	r	r	r	r	r	r	~100ms	BMC Status	
0x022	CAN_BMS	BMC 3	BMS	8	r	r	r	r	r	r	r	r	~100ms	BMC Status	
0x030	CAN_BMS	BMC 1	BMS	8	C1_L	C1_H	C2_L	C2_H	C3_L	C3_H	C4_L	C4_H	~100ms	Zellspannungen 1-4	
0x031	CAN_BMS	BMC 1	BMS	8	C5_L	C5_H	r	r	r	r	r	r	~100ms	Zellspannung 5	
0x040	CAN_BMS	BMC 2	BMS	8	C1_L	C1_H	C2_L	C2_H	C3_L	C3_H	C4_L	C4_H	~100ms	Zellspannungen 6-8	
0x141	CAN_BMS	BMC 2	BMS	8	C5_L	C5_H	r	r	r	r	r	r	~100ms	Zellspannung 10	
0x050	CAN_BMS	BMC 3	BMS	8	C1_L	C1_H	C2_L	C2_H	C3_L	C3_H	C4_L	C4_H	~100ms	Zellspannungen 11-14	
0x051	CAN_BMS	BMC 3	BMS	8	C5_L	C5_H	r	r	r	r	r	r	~100ms	Zellspannung 15	
0x060	CAN_BMS	Spannungsanwandler	BMS	8	1000er	1000er	100er	1er	Vorz.	Vorz.	r	r	~100ms	Batteriestrom mit Vorzeichen in Deciampere	
0x101	CAN_VCU	BMS	VCU	8	Status	Bal_1	Bal_2	Bal_3	r	r	r	r	~200ms	Status der Komponenten und	
0x111	CAN_VCU	BMS	VCU	8	10000er	10000er	100er	1er	1er	1er	r	r	~200ms	Gesamtspannung in Millivolt	
0x112	CAN_VCU	BMS	VCU	8	Vorz.	100er	10er	1er	1/10er	r	r	r	~200ms	Batteriestrom mit Vorzeichen in Deciampere	
0x130	CAN_VCU	BMS	VCU	8	Z1_L	Z1_H	Z2_L	Z2_H	Z3_L	Z3_H	Z4_L	Z4_H	~200ms	Zellspannungen 1-4	
0x131	CAN_VCU	BMS	VCU	8	Z5_L	Z5_H	r	r	r	r	r	r	~200ms	Zellspannung 5	
0x140	CAN_VCU	BMS	VCU	8	Z6_L	Z6_H	Z7_L	Z7_H	Z8_L	Z8_H	Z9_L	Z9_H	~200ms	Zellspannungen 6-8	
0x141	CAN_VCU	BMS	VCU	8	Z10_L	Z10_H	r	r	r	r	r	r	~200ms	Zellspannung 10	
0x150	CAN_VCU	BMS	VCU	8	Z11_L	Z11_H	Z12_L	Z12_H	Z13_L	Z13_H	Z14_L	Z14_H	~200ms	Zellspannungen 11-14	
0x151	CAN_VCU	BMS	VCU	8	Z15_L	Z15_H	r	r	r	r	r	r	~200ms	Zellspannung 15	
0x160	CAN_VCU	BMS	VCU	8	100er	10er	1er	1/10er	100er	100er	1er	1er	~200ms	Restkapazität in Deziamperestunden	
0x161	CAN_VCU	BMS	VCU	8	1000er	1000er	100er	1er	100er	100er	1er	1er	~200ms	Restlaufzeit in Minuten	
0x170	CAN_VCU	VCU	BMS	8	Laden	r	r	r	r	r	r	r	r	Auf Anfrage	Ladeinstruktion der VCU

Tabelle 19: CAN Nachrichten im Überblick



6 Fazit

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Batteriemanagement System für ein elektrisches Fahrzeug kleiner Leistung entwickelt, gebaut, programmiert, integriert und getestet. Das BMS besteht aus drei Batterie Modul Controllern, die jeweils fünf Lithium-Eisenphosphat-Zellen überwachen, einem Stromwandler, der den gemessenen Batteriestrom (Lade- und Entladestrom) über den CAN-Bus kommuniziert und einer zentralen Steuereinheit. Die Vernetzung der Komponenten im Fahrzeug erfolgt über zwei getrennte CAN-Busse, wobei die BMS-Steuereinheit als Schnittstelle fungiert. Die Teilnahme einer jeden Komponenten an der Kommunikation ist für das Funktionieren des Gesamtsystems von entschiedener Bedeutung, deshalb wurde ein Mechanismus eingebaut, der das fehlerhafte Funktionieren einer Komponente erkennt.

Die Zellen werden überwacht, indem die Zellspannungen und der Gesamtstrom ausgewertet werden. Bei erreichen der Entladeschlussspannung gibt das BMS eine Warnung an die Vehicle Control Unit, da es keinen direkten Zugriff auf das Hauptschütz hat. Im Falle einer Überschreitung der Ladeschlussspannung kann das BMS den Ladevorgang abbrechen, indem es aktiv den Ladeschütz öffnet und somit das Ladegerät von dem Batteriestromkreis trennt.

Der Gesamtstrom wird zurzeit nur während des Ladevorgangs berücksichtigt und dient ebenfalls einer Abschaltung beim Unterschreiten eines festgelegten Mindeststroms. Ein Schutz vor zu hohen Entladeströmen ist nicht implementiert, kann aber problemlos eingebaut werden. Dabei könnte das BMS wiederum nur eine Warnung an die VCU leiten, da die aktuelle Systemstruktur keine direkte Beeinflussung des Hauptschützes durch das BMS erlaubt.

Temperaturdaten werden bis dato weder berücksichtigt noch aufgenommen. Sollten zukünftig Temperatursensoren verbaut werden, so können die Zellen auch vor Überhitzung geschützt werden und die Bilanzierungs routinen mit Hilfe des weiteren Parameters genauer arbeiten.

Die Energiebilanzierung erfolgt mit Hilfe der Coulomb-Zählung, indem der Batteriestrom integrativ von der Gesamtkapazität abgezogen respektive aufaddiert wird. Im letzten Stand dieser Arbeit fließen keine weiteren Parameter oder Korrekturfaktoren in die Berechnung ein. In einer ausgiebigen Testreihe könnten Korrekturfaktoren bestimmt und implementiert werden, um eine genaue Berechnung der Restkapazität zu gewährleisten. Ebenso könnten zukünftig für ein genaueres Energiemanagement andere Bilanzierungsverfahren und -modelle verwendet werden.

Die Restreichweite wird anhand der Restkapazität und des Durchschnittsstrom berechnet und als Restlaufzeit angegeben, weil das BMS zurzeit keine Informationen über die Geschwindigkeit des Fahrzeugs hat.

Für die Zellsymmetrierung wird ein passives Verfahren mit Bypass-Widerständen verwendet. Dabei werden alle Zellspannungen mit der kleinsten Zellspannung verglichen. Sollte eine Zellspannung die Toleranz überschreiten, so wird diese Zelle balanciert.

Die Visualisierung aller Daten erfolgt über ein grafikfähiges Display am Batteriekasten. Ebenso werden alle Daten per CAN-Bus verschickt und können auf einem Tablet dargestellt werden.



7 Anhang

Auf der CD-Rom im Anhang sind die Schaltpläne, die Datenblätter, die Quelltexte und eine digitale Kopie dieser Arbeit zu finden. Die Quelltexte sind in folgende Dateien aufgeteilt.

Modul	Dateiname	Kommentar
Stromwandler	main.c	Funktionsdefinitionen
	main.h	Programmeinstellungen
	can_at90can128_AB_ID.c	Anangepasst CAN Library
	can_at90can128_AB_ID.h	Anangepasst CAN Library
BMS	main.c	Funktionsdefinitionen
	main.h	Programmeinstellungen
	can_at90can128_AB_ID.c	Anangepasst CAN Library
	can_at90can128_AB_ID.h	Anangepasst CAN Library
	lc7981.c	Library für das Display von Vanya A. Sergeev
	lc7981.h	Library für das Display von Vanya A. Sergeev
	graphics.h	Library für das Display von Vanya A. Sergeev
	font5x7.h	Library für das Display von Vanya A. Sergeev
	cells_pic.c	Zeichenfunktion für den Zellbildschirm
	contactor_closed.c	Zeichenfunktion für den geschlossenen Schütz
BMS - VCU	Contactor_open.c	Zeichenfunktion für den offenen Schütz
	Status_pic.c	Zeichenfunktion für den Systembildschirm
	main.c	Funktionsdefinitionen
	main.h	Programmeinstellungen
BMC	can_at90can128_AB_ID.c	Anangepasst CAN Library
	can_at90can128_AB_ID.h	Anangepasst CAN Library
	can.c	CAN Routinen
	can.h	CAN Routinen
	cstart.c	Startup Routinen
	cstart.h	Startup Routinen
	gpt1.c	General Purpose Timer Unit mit Interrupt
	gpt1.h	General Purpose Timer Unit
	gpt2.c	General Purpose Timer Unit mit Interrupt
	gpt2.h	General Purpose Timer Unit
	int.c	Interrupt Controller
	int.h	Interrupt Controller
	io.c	IO Ports
	io.h	IO Ports
	ltc_comm.c	Steuerroutine für den LTC6803-1
	ltc_comm.h	Steuerroutine für den LTC6803-1
	main.c	Funktionsdefinitionen
	main.h	Programmeinstellungen
	scs.c	Projekteinstellungen
	scs.h	Projekteinstellungen



8 Abkürzungen

1000er bis 1er	Zehntausender-, Tausender-, Hunderter-, Zehner- und Einerstelle
ACK	Acknowledgement, Bestätigung
ADC	Analog-Digital-Wandler
ANN	Artificial Neural Network
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
Bal_#	Byte mit Informationen über das Balancieren von Zellen für BMC #
BCD	Binary Coded Decimal
BMC	Batterie Modul Controller
BMS	Batteriemanagement System
C#_H	höherwertiges Byte der Zellspannung von Zelle #
C#_L	Niederwertiges Byte der Zellspannung von Zelle #
CAN	Controller Area Network
CAN_BMS	CAN-Bus des BMSs, Batteriebus
CAN_VCU	CAN-Bus der VCU, Fahrzeugbus
CRC	Cyclic Redundancy Check, Prüfsumme
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance
DLC	Data Length Code, Datenlänge
EMS	Energiemanagement / Energiemanagement System
EoF	End of Frame, Ende des Frames
GND	Ground, Masse
GPS	Global Positioning System
IC	Integrated Circuits
ID	Identifikationsnummer
IDE	Identifier Extension
IFS	Intermission Frame Space
ISP	In-System-Programmierung
LA	Lead-acid, Bleisäure
LED	Light emitting diode, Leuchtdiode
LiCoO ₂	Lithium-Kobaltoxid
LiFePO ₄	Lithium-Eisenphosphat
LSB	Niederwertigstes Bit
MSB	Höchstwertiges Bit
NiCd	Nickel-Cadmium
NiMH	Nickel-Metalhybrid
OCV	Open-circuit Voltage, Leerlaufspannung
OSI	Open Systems Interconnection Reference Model
PE	Powerelektronik, Motorsteuerung



Poti	Potentiometer
r	Reserviert
RTR	Remote Transmission Request
RX	Empfangsnachricht. Modul erwartet diese Nachricht
SMD	surface-mounted device
SOA	Safe Operating Area
SoC	State of Charge
SofF	Start of Frame
Soh	State of Health
SPI	Serial Peripheral Interface
STA	Siemens Technik Akademie
TX	Sendenachricht, Modul sendet diese Nachricht
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
VCC	Voltage at the common collector, Versorgungsspannung einer Schaltung
VCU	Vehicle Control Unit
Vorz	Vorzeichen
ZEBRA	Natrium-Nickelchlorid

9 Einheiten

°C	Grad Celsius, Maß der Temperatur
A	Ampere, Maß der elektrischen Stromstärke
Ah	Amperestunde, Maß der elektrischen Ladung / Kapazität
Baud	Schrittgeschwindigkeit, Maß der Symbolrate (Symbole pro Sekunde)
Hz	Hertz, Maß der Frequenz, gibt die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde an
kg	Kilogramm, Maß des Gewichts
MBit/s	Mega Bit pro Sekunde, Maß der Übertragungsgeschwindigkeit
mm	Millimeter, Maß der Länge
rpm	Umdrehung pro Minute, Maß der Umdrehungsgeschwindigkeit
s	Sekunde, Maß der Zeit
V	Volt, Maß der elektrischen Spannung
W	Watt, Maß der Leistung
W/kg	Watt je Kilogramm, Maß der Leistungsdichte im Bezug auf Gewicht
W/l	Watt je Liter, Maß der Leistungsdichte im Bezug auf Volumen
Wh/kg	Wattstunden je Kilogramm, Maß der Energiedichte im Bezug auf Gewicht
Wh/l	Wattstunden je Liter, Maß der Energiedichte im Bezug auf Volumen
Ω	Ohm, Maß des elektrischen Widerstands



10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Brutto-Stromerzeugung in Tera Wh der zukünftigen Energiemixe [EneMana12]	6
Abbildung 2: Galvanische Zelle [WikiGalZ]	9
Abbildung 3: Elektrochemischen Spannungsreihe [LilonBat09]	10
Abbildung 4: Parallelschaltung (l) und Serienschaltung von Batterien (r), nach [HEDLiBat10]	11
Abbildung 5: Anforderungen und Technologien [EleInf11].....	15
Abbildung 6: Ragone-Diagramm diverser Energiespeicher mit Isochrone [BUniW08].....	15
Abbildung 7: Prinzip der Entlade- und Ladereaktionen in Lithium-Ionen-Zellen [AChem05].....	16
Abbildung 8: Lithiumakkumulator im Aufbau [BatInf]	17
Abbildung 9: Rundzelle [LiForm2]	18
Abbildung 10: Quaderzelle [LiForm1].....	18
Abbildung 11: Kennlinien LiFePO4 [DataWB].....	21
Abbildung 12: BMS modulare Architektur, nach [ModBat02].....	30
Abbildung 13: BMS zentrale Architektur, nach [BMSStruc11]	31
Abbildung 14: BMS dezentrale Architektur, nach [BMSStruc11]	32
Abbildung 15: Strommessung mit einem Shunt-Widerstand.....	33
Abbildung 16: WSMS5515L3000JK Shunt Widerstand [DiKey12]	33
Abbildung 17: Closed loop tranducer [DataLEM04]	34
Abbildung 18: Zellsymmetrierung, nach [Eleknet09].....	35
Abbildung 19: Balancingmethoden, nach [HyBatBre07]	36
Abbildung 20: Entladeverhalten einer LiCoO ₂ Zelle bei verschiedener C-Raten, nach [BatMan08]	39
Abbildung 21: Darstellung einer SoC Bestimmung nach Coulomb-Zählung, nach [BatMan08]	40
Abbildung 22: Künstliches Neuron eines neuralen Netzwerks [WikiANN]	41
Abbildung 23: Steuergeräte in einem Oberklassefahrzeug [HBKFZ06].....	42
Abbildung 24: Topologien: a) Bus b) Stern c) Baum d) Ring [HBKFZ06]	43
Abbildung 25: CAN Topologie, nach [HBKFZ06]	44
Abbildung 26: Pegel-Charakteristik für Low Speed CAN, nach [HBKFZ06]	44
Abbildung 27: Arbitrierung bei CAN [PICCAN10].....	45
Abbildung 28: Aufbau des Standard- und Extended-CAN-Frames [GrdICAN11]	46
Abbildung 29: eBuggy an der STA Berlin - Front	47
Abbildung 30: eBuggy an der STA Berlin - Profil	47
Abbildung 31: Systemstruktur des Ausgangszustands	48
Abbildung 32: AGNI Motor 200-135 [AGNI09]	49
Abbildung 33: Kelly Controller PM48501B [DataKelly11].....	49
Abbildung 34: Lithium-Eisenphosphat Akku der Firm CALB [CALB11]	50
Abbildung 35: Ladergerät PSS18 [DataPSS02].....	51
Abbildung 36: Zielstruktur des BMS	52
Abbildung 37: BMS Zielstruktur - Detailliert.....	54



Abbildung 38: Stromwandlerplatine mit AVR-CAN Board - Oberseite	55
Abbildung 39: Stromwandlerplatine mit AVR-CAN Board - Unterseite	56
Abbildung 40: Stromlaufplan der Stromwandlerplatine mit CAN Knoten	57
Abbildung 41: Ablaufplan Stromwandler	58
Abbildung 42: Kontrollbyte des MAX186 [MAX18696]	60
Abbildung 43: Pinbelegung des Stromwandlersteckers	61
Abbildung 44: Pinbelegung für ISP-Stecker [Wann6]	61
Abbildung 45: BMC gelötet - Oberseite (l), Unterseite (r)	62
Abbildung 46: BMC Stromlaufplan - Spannungsversorgungen	63
Abbildung 47: BMC Stromlaufplan - Logik	64
Abbildung 48: BMC Layout – Oberseite [Hei12]	65
Abbildung 49: BMC Layout – Unterseite [Hei12]	65
Abbildung 50: BMC Programmablauf - Teil 1	66
Abbildung 51: BMC Programmablauf - Teil 2	67
Abbildung 52: BMC 1 Verkabelung	68
Abbildung 53: BMC – Pinbelegung [DataMNL04]	68
Abbildung 54: Klemmbelegung des BMCs	69
Abbildung 55: Anschlüsse und Pinbelegung des BMCs	70
Abbildung 56: BMS-Struktur und Kommunikation	72
Abbildung 57: BMS-Platine und Gehäuse	73
Abbildung 58: Pinbelegung des UART-Steckers [DSub9]	73
Abbildung 59: BMS-Platine rückseitig	74
Abbildung 60: BMS-Stromlaufplan	75
Abbildung 61: BMS-Anschlüsse	76
Abbildung 62: Pinbelegung des CAN-Steckers [DSub9]	76
Abbildung 63: Pinbelegung für ISP-Stecker [Wann6]	77
Abbildung 64: Pinbelegung für Holsteckerbuchse	77
Abbildung 65: Bildfläche - Zellspannungen im Überblick	79
Abbildung 66: Zellenanordnung	79
Abbildung 67: Bildfläche - Gesamtsystem im Überblick	80
Abbildung 68: Bildfläche - Bilanzierung	80
Abbildung 69: Picture to Pixel Generator	81
Abbildung 70: BMS Programmablauf - VCU-seitig	84
Abbildung 71: BMS Programmablauf - BMS-seitig (Teil 1)	85
Abbildung 72: BMS Programmablauf - BMS-seitig (Teil 2)	86
Abbildung 73: BMS Programmablauf - BMS-seitig (Teil 3)	87
Abbildung 74: BMS Programmablauf - BMS-seitig (Teil 4)	89
Abbildung 75: BMS Programmablauf - BMS-seitig (Teil 5)	91
Abbildung 76: BMS Programmablauf - BMS-seitig (Teil 6)	93
Abbildung 77: Stromlaufplan des Schütztreibers	95



Abbildung 78: Anschlüsse des Schütztreibers	95
Abbildung 79: Batterietrog 3 mit Verkabelung	97
Abbildung 80: Batterietrog – Pinbelegung [DataMNL04]	97
Abbildung 81: Montageplatte mit BMS und BMCs	98



11 Formelverzeichnis

Formel 1: Blei-Säure-Reaktion negativer Pol [WikiBS]	22
Formel 2: Blei-Säure-Reaktion positiver Pol [WikiBS].....	22
Formel 3: Blei-Säure-Gesamtreaktion [WikiBS]	22
Formel 4: NiCd Reaktion negativer Pol [HaOBat01]	23
Formel 5: NiCd Reaktion positiver Pol [HaOBat01]	23
Formel 6: Gesamtreaktion [HaOBat01]	23
Formel 7: NiMH Reaktion negativer Pol [WikiNiMH]	24
Formel 8: NiMH Reaktion positiver Pol [WikiNiMH]	24
Formel 9: NiMH Gesamtreaktion [WikiNiMH]	24
Formel 10: ZEBRA Reaktion negativer Pol [TabChem05].....	25
Formel 11: ZEBRA Reaktion positiver Pol [TabChem05]	25
Formel 12: ZEBRA Gesamtreaktion [TabChem05].....	25
Formel 13: Closed loop transducer Stromberechnung [DataLEM04]	34
Formel 14: Umrechnung des Messwerts in Millivolt.....	88

12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: CAN-Nachrichten des Stromwandlermoduls	57
Tabelle 2: SPI Konfiguration Stromwandler	59
Tabelle 3: MAX186 Konfiguration Stromwandler	60
Tabelle 4: BMC Konfiguration	67
Tabelle 5: Pinbelegung des BMC-Steckers.....	68
Tabelle 6: Klemmbelegung des BMCs	69
Tabelle 7: Anschlüsse und Pinbelegung des BMCs	70
Tabelle 8: CAN-Nachrichten zwischen BMCs und BMS	71
Tabelle 9: BMS-Anschlüsse	76
Tabelle 10: Status-LEDs.....	78
Tabelle 11: CAN-Nachrichten zwischen VCU und BMS	82
Tabelle 12: Bedeutung der Bits im Statusbyte	82
Tabelle 13: Bedeutung der Bits im Balancierungsbyte	83
Tabelle 14: Datenformat der UART-Nachrichten	84
Tabelle 15: BMS Konfiguration - VCU-seitig	85
Tabelle 16: BMS Konfiguration - BMS-seitig	94
Tabelle 17: Anschlüsse des Schütztreibers	95
Tabelle 18: Pinbelegung des Batterietrogsteckers.....	97
Tabelle 19: CAN Nachrichten im Überblick	99



13 Quellen

- [AChem05] Anorganisch-Chemische Technologie
Autoren: Dr. Kai-C. Möller, Prof. Dr. Martin Winter
TU Graz, 2005
-
- [AGNI09] The Electric Chronicles - AGNI Motor, 2009
<https://evmc2.wordpress.com/2009/07/07/my-new-favorite-motor-lem-200-d127-i-can-haz/>
-
- [BatInf] Batterie Info Seite
<http://batterie-info.de/Thema/der-lithium-ion-akku/>
-
- [BatMan08] BATTERY MANAGEMENT SYSTEMS - Accurate State-of-Charge Indication for Battery-Powered Applications
Autoren: Valer Pop, Henk Jan Bergveld, Dmitry Danilov, Paul P. L. Regtien, Peter H. L. Notten
Springer Verlag Netherlands, 2008
-
- [BattG09] Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Batterien und Akkumulatoren
Bundesgesetz vom 25. Juni 2009, Inkrafttreten am 1. Dezember 2009
-
- [BMSStruc11] EE Times Europe - How to structure a battery management system
Autor: Jon Munson, 2011
http://www.power-eetimes.com/en/how-to-structure-a-battery-management-system.html?cmp_id=71&news_id=222902910&vID=35
-
- [BUniW08] Bauhaus-Universität Weimar
<http://webuser.uni-weimar.de/~naco7693/stud/sem6/es.html>, 2008
-
- [CALB11] Firmenwebsite – CALB, 2011
<http://en.calb.cn/Product/?id-115.html>
-
- [DataAGNI09] Datenblatt zum AGNI Motor 200-135, 2009
-
- [DataKelly11] Datenblatt des Kelly Controllers PM48501B
Firma Kelly Controls LLC, 2011



- [DataLEM04] Applikationsnotiz der Firma LEM
Isolated current and voltage transducers, 2004
-
- [DataMNL04] Datenblatt von Mate-N-Lock Stecker und Buchse
Firma tyco electronics, 2004
-
- [DataPSS02] Datenblatt des Primär getaktetes Schaltnetzteil PSS18
Firma CIE A+E GmbH, 2002
-
- [DataWAM12] Datenblatt WSMS5515 - Power Metal Strip® Meter Shunt Resistor
Firma VISHAY, 2012
-
- [DataWB] Datenblatt zu Winston Battery WB-LYP160AHA
-
- [DateTLE8366] Datenblatt des TLE8366 Step-Down-Wandlers
Firma Infineon, 2009
-
- [DiKey12] DigiKey.com – Produktseite zum WSMS5515L3000JK, 2012
<http://www.digikey.com/product-detail/en/WSMS5515L3000JK/WSMSA-.0003-ND/2421973>
-
- [DSub9] D-Sub Stecker Pinbelegung
<http://www.db9-pinout.com/>
-
- [EleInf09] Elektrotechnik & Informationstechnik - Condition monitoring of Lithium-Ion Batteries for electric and hybrid electric vehicles
Heft Mai 2009, 126. Jahrgang
Autoren: Michael Sternad, Georg Brasseur, Martin Cifrain, Daniel Watzenig, Martin Winter
Springer-Verlag
-
- [EleInf11] Elektrotechnik & Informationstechnik
Heft Januar/Februar 2011, 128. Jahrgang
Autoren: Daniel Hrach und Martin Cifrain
Springer-Verlag
-
- [Eleknet09] Elektroniknet.de - Batterie-Management – Simulierte Lithium-Ionen-Akkus
Autor: Stephan Janouch, 2009
-



-
- [EneMana12] Energieeffizienz und Energiemanagement: Ein Überblick heutiger Möglichkeiten und Notwendigkeiten
Autoren: Franz Wosnitza, Hans Gerd Hilgers
Verlag: Springer Spektrum, Vieweg+Teubner Verlag, 2012
-
- [GolStern10] Stern.de: Golf City-Stromer – Der Flüster-Golf
28. Januar 2010, Autor: Sebastian Viehmann, press-inform
-
- [GrdICAN11] ME-Meßsysteme GmbH – CAN Bus Grundlagen
Firmenunterlagen, 2011
-
- [HaOBat01] Handbook of Batteries (McGraw-Hill Handbooks)
Autor: David Linden
Verlag: McGraw-Hill Professional; Auflage: 01003 (August 2001)
-
- [HBKFZ06] Handbuch Kraftfahrzeugelektronik
Autoren: Henning Wallentowitz, Konrad Reif
Friedrich Vieweg & Sohn Verlag, 1. Auflage, 2006
-
- [HEDLiBat10] High Energy Density Lithium Batteries: Materials, Engineering, Applications
Autoren: Katerina E. Aifantis, Stephen A. Hackney, R. Vasant Kumar
WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2010
-
- [Hei12] Eagle Stromlaufplan und Layout für ein BMC
Prof. Dr. Heinemann, 2012
-
- [HyBatBre07] Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge: Technik, Strukturen und Entwicklungen
Autor: Dietrich Naunin
Expert Verlag, 4. Auflage 2007
-
- [IsaHue12] Produktbeschreibung IMC- / IVT-BAUREIHE der Firma Isabellenhütte
<http://www.isabellenhuette.de/messtechnik/produkte/imc-ivt-baureihe/>
-
- [LiForm1] Ecvv.com Händlerseite
<http://www.ecvv.com/product/2174959.html>
-
- [LiForm2] MetaEfficient Online Blog
<http://www.metaefficient.com/rechargeable-batteries/innovative-lifepo4-batteries-electric-vehicles.html>
-



-
- [LilonBat09] Lithium Ion Rechargeable Batteries
 Autor: Kazunori Ozawa
 Verlag: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA 2009
-
- [MAX18696] Datenblatt MAX186 12bit ADC, mit 8 Kanälen
 Firma MAXIM, 1996
-
- [ModBat02] A Modular Battery Management System for HEVs
 Autoren: Thomas Stuart, Fang Fang, Xiaopeng Wang, Cyrus Ashtiani, Ahmad Pesaran
 Paper, University of Toledo, 2002
-
- [PICCAN10] PIC Mikrocontroller Seite – Grundlagen – CAN Bus, 2010
 <http://www.fernando-heimer.de/index.php/wiki/doku.php?id=grundlagen;schnittstellen;can/>
-
- [TabChem05] Taschenbuch der Chemie
 Autoren: Karl-Heinz Lautenschläger, Werner Schröte
 Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutsch GmbH, 20. Auflage 2005
-
- [Tesla12] Tesla Roadstar Spezifikationen, Batterie
 <http://www.teslamotors.com/roadster/specs>
-
- [Wann6] 6-poliger Wannenstecker zur ISP-Programmierung
 <http://www.hit-karlsruhe.de/eagle/Vorzugsliste.htm>
-
- [WikiANN] Wikipediaartikel Künstliche neuronale Netze
 http://de.wikipedia.org/wiki/K%C3%BCnstliches_neuronales_Netz
-
- [WikiBS] Wikipedia Bleiakkumulator
 <http://de.wikipedia.org/wiki/Bleiakkumulator>
-
- [WikiGalZ] Wikipedia: Galvanische Zelle
 http://de.wikipedia.org/wiki/Galvanische_Zelle
-
- [WikiLiFePO] Wikipediaartikel Lithium-Eisenphosphat-Akkumulator
 <http://de.wikipedia.org/wiki/Lithium-Eisenphosphat-Akkumulator>
-
- [WikiNiCd] Wikipedia Nickel-Cadmium-Akkumulator
 <http://de.wikipedia.org/wiki/Nickel-Cadmium-Akkumulator>
-



[WikiZEBRA]

Wikipedia Zebra-Batterie

<http://de.wikipedia.org/wiki/Zebra-Batterie>

