
Masterarbeit

**Messsystem mit Schutzkomponenten
zum durchgängigen Test von
ReUse-Lithium-Ionen-Hochenergiemodulen**

Thomas Klaus Winkler, BSc.

01/06/2016



Institut für Elektrotechnik
Institute of Electrical Engineering
Montanuniversität Leoben

A-8700 LEOBEN, Franz Josef Straße 18
Tel.Nr.: +43/(0)3842-402-2401
Fax: +43/(0)3842-402-2402
etechnik@unileoben.ac.at

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Masterarbeit/Bachelorarbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche erkenntlich gemacht habe.

Affidavit

I declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

Datum

Unterschrift

Aus Gründen der leichteren Lesbarkeit wird auf eine geschlechtsspezifische Differenzierung in dieser Arbeit, wie z.B. TeilnehmerInnen, verzichtet. Entsprechende Begriffe gelten im Sinne der Gleichbehandlung für beide Geschlechter.

Danksagung

Ich möchte mich sehr herzlich bei meinen Betreuern o. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Helmut Weiß und Dipl.-Ing. Dipl.-Ing. Herbert Ziegerhofer bedanken für die Unterstützung, die sie mir im Zuge des Studiums und insbesondere während dieser Masterarbeit zukommen ließen.

Des Weiteren möchte ich allen Mitarbeitern des Instituts für Elektrotechnik danken. In allen Belangen – technisch, wissenschaftlich und menschlich – konnte ich mich an sie wenden und war damit immer gut beraten.

Zuletzt danke ich meiner Familie und meinen Freunden, die mir in schwierigen Situationen stets mit Rat zur Seite standen.

Kurzfassung

Eine gute Möglichkeit zur Reduktion des energetischen Fußabdruckes von Lithium-Ionen-Zellen ist die Wiederverwendung – allgemein auch als ReUse bezeichnet. Werden Batterien aufgrund von Kapazitätsverlust aus dem Fahrbetrieb ausgemustert, so können diese in alternativen Anwendungsfeldern – bspw. stationär – wieder eingesetzt werden.

Um bereits verwendete Zellen wiederverwenden zu können, ist eine Prüfung dieser notwendig. Über einen Lade- und Entladezyklus können Tendenzen des tatsächlichen Kapazitätsverlusts und das Verhalten bei erneutem Einsatz ermittelt werden. Im Vordergrund steht bei solchen Messungen der Sicherheitsaspekt, da bei falscher Handhabung eine Zelle wesentliches Brandpotential besitzt.

Diese Masterarbeit behandelt den elektrotechnischen Entwurf und die Konstruktion eines Systems, mit dessen Hilfe Hochenergiemodule auf Lithium-Ionen-Basis vermessen werden können. Diese Module sollen nach ihrem ersten Einsatz wiederverwendet werden. Dabei sollen Größen wie Zellspannungen, Temperatur, Strom, die Lade- und Entladezeit gemessen und hierdurch Rückschlüsse auf die Qualität jeder einzelnen Zelle möglich gemacht werden. Die implementierten Schutzfunktionen wurden zumeist redundant ausgeführt und sollen unter allen Umständen einen Schaden an Modulen oder Bediener verhindern. Zusätzlich findet im Betrieb ein Spannungsausgleich statt, der auf dem passiven Balancing basiert.

Das Ergebnis der Arbeit ist ein voll einsatzfähiges Funktionsmuster, welches auf korrekte Erfüllung der Funktionsvorgaben und Beherrschung von Fehlerfällen getestet wurde. Aus praktischen Versuchen wurden Verbesserungsmöglichkeiten identifiziert. Die Dokumentation des Aufbaus wird in dieser Arbeit behandelt und soll helfen, Erkenntnisse des Entwicklungsprozesses in künftige Projektstadien miteinfließen zu lassen.

Schlagwörter: Lithium-Ionen, ReUse, Batteriemangement, passives Balancing, Datenverarbeitung

Abstract

A great opportunity for lowering the energy footprint of lithium-ion secondary cells is the re-use of those. Batteries that have been taken out from electric mobility due to their capacity loss are likely to find use in a different kind of application – e.g. stationary.

For the re-use of cells that have been in a battery application before, it is essential to test those cells. A charge and discharge cycle of the battery can provide information on the tendencies of the important parameters and the behaviour of said cell. One topic of special interest during this test is safety as cells have a significant potential of fire when mistreated.

The following master thesis aims towards electrical conception, planning and construction of a measurement system for high-energy lithium-ion battery modules. Those modules are to be re-used after their first application. Electrical dimensions such as cell voltage, temperature, charge / discharge current, charging time, and discharging time are measured thus providing information on the quality of each individual cell. The protective functions that have been implemented perform in redundant manner and must prevent harm to both the battery modules and the operator. Additionally, there is a possibility of balancing the voltage passively during operation.

Result of this project is a fully functional model that has been tested on fulfilment of agreed tasks and correct handling of errors. Potential improvements have been identified from practical implementation and tests. The documentation of the model device is part of this thesis. The discoveries and findings during the design process are expected to improve next-generation models on this project.

Keywords: Lithium-ion, re-use, battery management, passive balancing, data processing

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	II
Danksagung	III
Kurzfassung	IV
Abstract	V
Inhaltsverzeichnis	VI
1 Einleitung und Motivation	2
1.1 Einsatz von ReUse-Lithium-Ionen-Zellen	3
2 Aufgabenstellung	6
2.1 Anforderungen	6
2.1.1 Zu erfassende Größen und Schutzfunktionen	7
2.1.2 Balancing	8
2.2 Vorgaben	9
2.2.1 Vorhandene Hochenergiemodule	9
2.2.2 Datenerfassung	10
2.2.3 Leistungselektronik	11
2.2.4 Schutzfunktionen und Messwertumwandlung	12
3 Methode	14
3.1 Eingesetzte Geräte und Software	15
4 Lithium-Ionen-Sekundärzellen	17
4.1 Zellchemie	17
4.1.1 Negative Elektrode	18
4.1.2 Positive Elektrode	19
4.1.3 Elektrolyt	19
4.1.4 Separator	20
4.2 Eigenschaften	21
4.3 Chemische und elektrotechnische Sicherheitsaspekte	24
4.3.1 Temperatur	25
4.3.2 Spannung	27
4.3.3 Strom	27

4.3.4	IU-Ladeverfahren.....	28
4.3.5	Balancing.....	29
4.4	ReUse von Lithium-Ionen-Batterien.....	30
5	Elektrotechnische Grundlagen.....	32
5.1	Analoge Signalelektronik.....	32
5.1.1	Operationsverstärker und Grundsaltungen.....	33
5.1.2	Zeitglied.....	39
5.2	Digitale Signalelektronik.....	40
5.2.1	NOT-Verknüpfung.....	41
5.2.2	NAND-Verknüpfung.....	42
5.2.3	Flipflop / NAND-Latch.....	43
5.2.4	Datenselektor, Multiplexer, Demultiplexer.....	44
5.2.5	Digitale Datenerfassung.....	45
5.3	Leistungselektronik.....	47
5.3.1	MOSFET.....	47
5.3.2	Schottky-Diode.....	49
5.3.3	Koaxial-Shunt.....	49
5.4	Software.....	50
5.4.1	LabVIEW.....	50
5.4.2	TARGET 3001!.....	53
6	Technische Umsetzung.....	55
6.1	Konzept.....	55
6.2	Bestandsaufnahme.....	58
6.3	Planung.....	59
6.3.1	Über- / Unterspannungsschutz.....	60
6.3.2	Übertemperaturschutz.....	63
6.3.3	Überstromschutz.....	64
6.3.4	Temperaturmessung.....	65
6.3.5	Spannungsmessung.....	66
6.3.6	Strommessung.....	67
6.3.7	Balancing.....	68
6.3.8	Pegelwandler.....	71
6.3.9	Leistungselektronik.....	72
6.3.10	Spannungsversorgung.....	76
6.4	Ausführung.....	76

6.4.1	Schnittstellen	76
6.4.2	Schutzplatine	81
6.4.3	Hauptplatinen-Stack	84
6.4.4	Strommessung und Ansteuerung Leistungselektronik.....	94
6.4.5	Leistungselektronik.....	96
6.4.6	Software	97
6.4.7	Änderungen im Zuge des Projekts	100
7	Ergebnisse	104
7.1	Produktentwicklung.....	104
7.2	Funktion.....	105
7.3	Test-Ergebnisse.....	105
7.3.1	Präzision der aufbereiteten Spannungssignale	106
7.3.2	Koaxial-Shunt	107
8	Ausblick und Verbesserung des Systems	109
8.1	Mögliche Verbesserungen am vorhanden System	109
8.2	Ausblick	111
9	Literaturverzeichnis	113
10	Abbildungsverzeichnis	116
11	Tabellenverzeichnis	120
12	Abkürzungsverzeichnis	121
	Anhang Inhaltsverzeichnis.....	I
	Anhang.....	II

1 Einleitung und Motivation

Aufgrund der schlechten Speicherbarkeit von elektrischer Energie als solche – Kondensatoren haben eine geringe Energiedichte – wurden parallel zur elektrischen Energieerzeugung alternative Speichermethoden entwickelt. Dabei kann auf unterschiedliche Formen zurückgegriffen werden:

- Mechanische Energie: Schwungrad, Pump-Speicherkraftwerk
- Chemische Energie: Sekundärzelle (Akkumulator), Brennstoffzelle
- Magnetische Energie: Supraleitende Spule

Die Speicherung in chemischer Form wird in den letzten Jahrzehnten stetig ausgebaut. Diese Entwicklung beruht auf mehreren Ursachen: verstärkte Nutzung mobiler Geräte, die Energiewende, Elektromobilität.

- **Mobile Geräte**

Im Anwenderbereich eröffnen technologische Fortschritte einen breiteren Einsatz mobiler Elektronik. Bestes Beispiel hierfür ist das Mobiltelefon, das sich innerhalb weniger Jahrzehnte von einer Punkt-zu-Punkt-Gesprächsverbindung zu einem ganzheitlichen Planungsinstrument entwickelt hat. Um den neuen Anforderungen gerecht zu werden, ist es nötig, die für den Betrieb notwendige Batterie in Energiedichte (gespeicherte Energie bezogen auf das Raumvolumen) und spezifischer Energie (gespeicherte Energie bezogen auf die Masse) zu optimieren.

- **Energiewende**

Der aktuelle Trend hin zu erneuerbaren Energieformen birgt einige Herausforderungen. Unter anderem stehen erneuerbare Erzeuger häufig nur zu bestimmten Zeiten oder Bedingungen zur Verfügung. Photovoltaik erzeugt Elektrizität nur bei Lichteinfall, Windkraftanlagen lediglich bei ausreichend Wind. Problematisch hierbei ist die Synchronisation von Last- und Erzeugungskurve. Die Nutzung der Elektrizität ist der Erzeugung anzupassen. Differenzen zwischen den beiden müssen gespeichert oder einem Speicher entnommen werden. Bei verstärkter Entkopplung von Erzeugung und Nutzung ist eine hohe Speichkapazität nötig, um Differenzen ausgleichen zu können. Speichersysteme für Haushalte sollen helfen, den

Eigenverbrauch von privaten Photovoltaikanlagen zu steigern und so finanzielle Vorteile für den Besitzer zu schaffen.

- **Elektromobilität**

Verordnungen und Konkurrenz am freien Markt üben Druck auf Fahrzeughersteller aus, ihre Modelle in Bezug auf Verbrauch effizient und sparsam zu gestalten. Um Emissionsvorgaben zu entgehen, greifen daher einige Autohersteller bereits auf Elektroantriebssysteme zurück. Ein wesentlicher Aspekt ist hier wieder die spezifische Energie von Batteriesystemen. Der Treibstoff von Verbrennungsmotoren (in der Regel Benzin oder Diesel) besitzt durch den hohen Kohlenstoff- und Wasserstoffgehalt eine sehr hohe spezifische Energie. Überdies ist Kraftstoff in flüssiger Form schnell nachzufüllen und die Entsorgung geschieht über das Abgas unkompliziert. Bemühungen auf dem Sektor von Traktionsbatterien gehen daher in die Richtung der Optimierung von Energie- und Leistungsdichte.

Der erhöhte Bedarf an Speicherkapazität erfordert neue technologische Lösungen. Die Entwicklung der Lithium-Ionen-Zelle zum kommerziellen Produkt war maßgeblich für den Fortschritt der Speichertechnologien. Ihr Profil konnte den wachsenden Anforderungen der Elektronik bisher standhalten und wird zumindest kurzfristig noch ein Hauptbestandteil von Anwenderprodukten bleiben.

1.1 Einsatz von ReUse-Lithium-Ionen-Zellen

Sowohl in mobilen Anwendungen als auch in der Elektromobilität sind Masse und Volumen von gespeicherter Energie wesentliche Aspekte. Für Anwenderelektronik ist der Ersatz der Sekundärzelle oft einfach oder aufgrund eines Neukaufs nicht nötig. Im Fahrzeugsektor erschweren die größeren Kapazitäten und längeren Betriebszeiten den Ersatz und die Entsorgung von Batterien, deren Kapazitätsverlust – siehe Abbildung 1-1 – bereits ein Problem für die Fahrzeugreichweite darstellt.

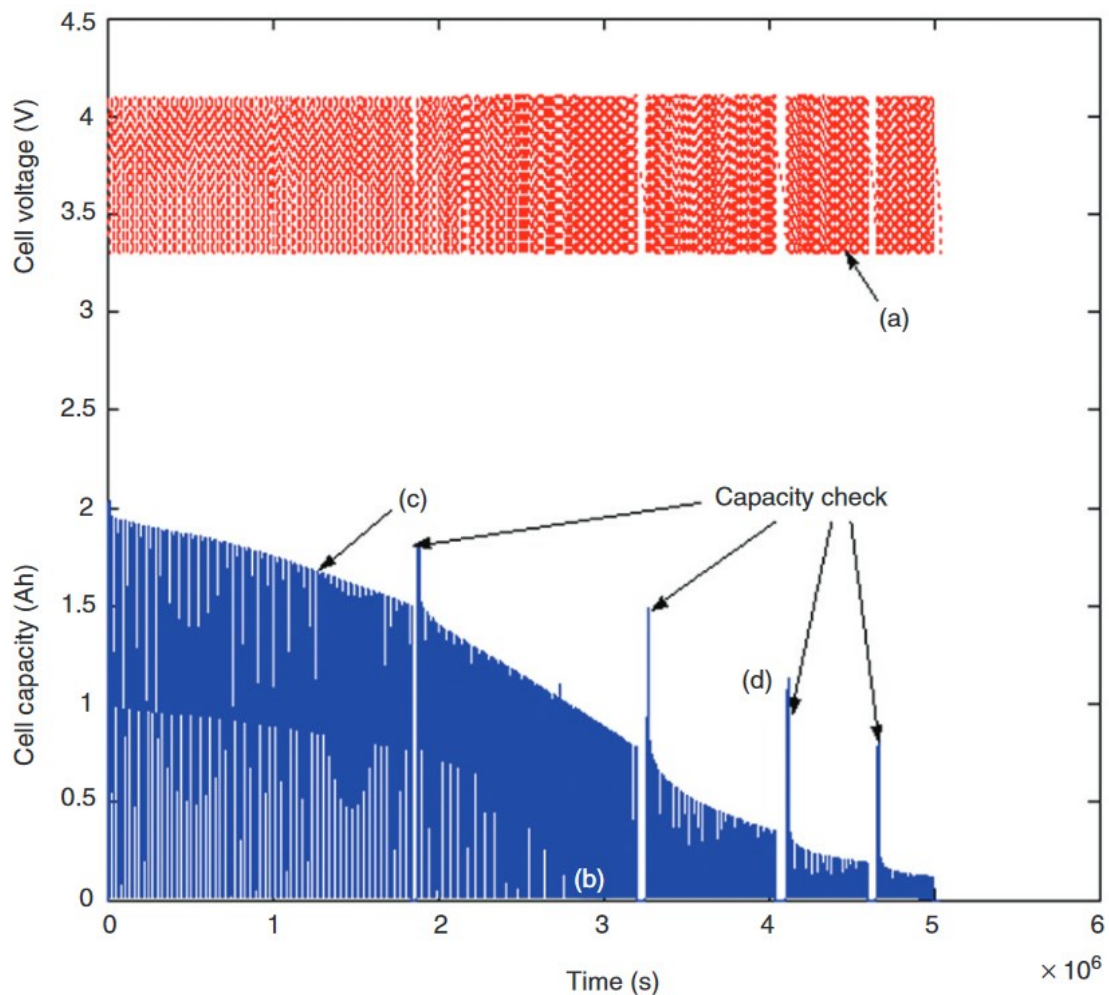


Abbildung 1-1: Abnahme der nutzbaren Kapazität einer Lithium-Ionen-Sekundärzelle bei Zyklierung [1]

Während der Lebenszyklus eines Bleiakкумуляtors ein näherungsweise geschlossener Kreislauf ist, erweist sich die Entsorgung von Lithium-Ionen-Zellen noch immer als Herausforderung. Inhaltstoffe solcher Sekundärzellen sind oft sehr wertvoll und eine Rückgewinnung der eingesetzten Rohstoffe daher wirtschaftlich profitabel. Lithium, Kobalt, Nickel, Kupfer und Aluminium stellen hierbei finanzielle Faktoren dar. Die Anatomie der Lithium-Ionen-Zelle erschwert jedoch den Recyclingprozess. Das organische Lösungsmittel des Elektrolyten in Kombination mit der Reaktivität von Lithium macht eine brandschutztechnisch einwandfreie Demontage der Batterie komplex.

Bevor jedoch eine Lithium-Ionen-Zelle dem Recycling bzw. der Entsorgung zugeführt wird, könnte in Betracht gezogen werden, intakte Zellen dort nochmals einzusetzen, wo Energiedichte und spezifische Energie weniger von Bedeutung sind. In stationären Anwendungen könnten geprüfte Zellen – sofern die Zellchemie

in Ordnung ist – einen zweiten Einsatz erleben und so Kosten, Material- und Energieaufwand sparen. Ein weiteres potentiell Anwendungsfeld ist die Elektromobilität in großen Dimensionen: Forschungsprojekte von Bahninfrastruktur-Betreibern beinhalten den Einbau von Batteriesystemen in Triebfahrzeuge. Diese würden bei einer Dienstmasse von über 80 t mit einem geringen Anteil ins Gewicht fallen. [2]

Auch im Bereich von Tagebauminen könnte der Einsatz batteriebetriebener Muldenkipper Kosten für Kraftstoffeinsatz und Wartungsaufwand signifikant senken. [3]

Die Wiederverwendung von Batteriezellen – die auch als ReUse bezeichnet wird – erfordert eine Prüfung der Batterie auf ihre Einsatzsicherheit. Das Gefahrenpotential einer wiederverwendeten Lithium-Ionen-Zelle liegt in der Möglichkeit, sie über elektrische, thermische oder mechanische Fehlbehandlung zu entzünden.

2 Aufgabenstellung

Projekte am Institut für Elektrotechnik (IET) der Montanuniversität Leoben (MUL) sehen unter anderem den Einsatz bereits erworbener gebrauchter Lithium-Ionen-Hochenergiemodule vor. Die Problematik der Verwendung solcher Module wird in Kapitel 1 sowie Kapitel 4 erläutert. Eine Prüfung der Zellen soll determinieren, ob eine Wiederverwendung dieser Batterien möglich ist und mit welcher Kapazität tendenziell zu rechnen ist.

Zu diesem Zweck soll ein Messsystem zur zyklischen Messung der Hochenergiemodule aufgebaut werden, dessen Schutzfunktionen das Risiko einer Beschädigung der Batterie während des Prüfvorgangs minimieren soll.

Das Projekt umfasst einen Hardwareteil, der Schutzfunktionen und Messwertaufbereitung beherbergt. Außerdem soll eine Software zur zyklischen Beschaltung und Messwernerfassung erstellt werden.

Zusätzlich soll diese Arbeit mögliche Lösungen liefern, eingesetzte Zellen im Betrieb zu überwachen. Im Speziellen kommt eine Verwendung als Teil eines netzautarken Betriebskonzepts einer Rangier-Lokomotive infrage. Dabei soll auf die Frage der galvanischen Trennung und einem geringen Energieverbrauch im Ruhezustand eingegangen werden.

2.1 Anforderungen

Es soll ein Funktionsmuster zur Messung von Lithium-Ionen-Hochenergiemodulen erstellt werden. Im Einsatz werden die zwölf Zellen je Hochenergiemodul sechsfach in Serie und jeweils paarweise parallel verschaltet.

Die Anforderungen an das System sind:

- Messung bestimmter Größen an den Zellen des Moduls selbst sowie gesamter Größen und Erfassung am Computer
- Schutzfunktionen zur automatischen Abschaltung
- Kontinuierliches passives Balancing an der Zelle

- Zyklischer Durchlauf von Messprogrammen und automatisches Schalten zwischen Laden und Entladen bzw. umgekehrt inklusive leistungselektronischer Ansteuerung
- Auslegung des Systems auf folgende Betriebsgrößen:
 - Temperaturbereich: 0 ... 60 °C
 - Spannungsbereich Batterie: 18 (= 6 · 3.0 V) ... 25,2 V (= 6 · 4.2 V)
 - Betriebsstrom: 0 ... 30 A

2.1.1 Zu erfassende Größen und Schutzfunktionen

- **Zellspannung**

Die Zellspannung soll für jedes Zellpaar gemessen und digital erfasst werden. Dabei ist auf die Verhinderung eines möglichen Zellkurzschlusses zu achten.

Die Präzision dieser Messung soll sich im Bereich unter 1 % befinden.

- **Maximaltemperatur**

Zur Messung der Temperatur wird an jedem Zellpaar ein temperaturabhängiger Widerstand angebracht. Im Zuge der Verarbeitung soll die maximale Zelltemperatur an die digitale Datenverarbeitung weitergegeben werden.

Die Präzision der Messung ist temperaturabhängig: Im Betriebsbereich sollte sich der Fehler der Messwertverarbeitung unter 1 % befinden. Unter 0 °C und über 60 °C ist eine größere Abweichung zulässig.

- **Betriebsstrom**

Der Betriebsstrom soll innerhalb der Grenzen im operativen Betrieb und bis zur Auslösung der Sicherung erfasst werden. Eine Messung auf Modulebene ist ausreichend.

Als Auslöser für die Schutzmechanismen dienen die Grenzwerte der beschriebenen Größen. Für eine unabhängige Beurteilung allerdings wird jede Größe nochmals separat erfasst. Die zweite Schutzebene stellt die Mess-Software dar. Die erfassten Werte werden darin ausgewertet und Übertretungen der operativen Limits lösen die Schutzabschaltung aus.

Die analogen Schutzfunktionen sollen folgende Anforderungen erfüllen:

- **Über- / Unterspannung**

Im Gegensatz zur Messwerterfassung soll Über- bzw. Unterspannungsschutz an jeder Zelle eingesetzt werden. Bei Über- bzw. Unterschreiten der Grenzwerte soll ein galvanisch ausgekoppeltes digitales Signal weitergegeben werden.

- **Übertemperatur**

Die Temperaturüberwachung soll ebenso auf Zellebene stattfinden. Die Messwerterfassung wird in Abschnitt 2.2.4 genauer ausgeführt.

- **Überstrom**

Für die Überwachung des Stromes soll zusätzlich zur Messung eine weitere Erfassung zur Anwendung kommen. Neben der Überwachung gegen thermische Überlast soll der Betriebsstrom auch bei Kurzschluss begrenzt werden können. Daher ist eine schnelle Messung der Stromänderung notwendig.

2.1.2 Balancing

Zur Angleichung der Zellspannungen soll ein Balancing-System auf Zellpaarebene zum Einsatz kommen. Das Balancing soll passiv und dissipativ ausgeführt werden. Dabei sind Grenzwerte der Elektronik und Leiterplatten bezüglich der Temperatur einzuhalten. Die Steuerung des Balancings soll softwareseitig programmierbar sein und im Fehlerfall – bspw. Software-Ausfall – in einen neutralen Zustand geleitet werden.

2.2 Vorgaben

Für die Entwicklung des Messsystems ist die Einhaltung von vorgegebenen Parametern wichtig, da es sich zum Teil auf bereits vorhandene Komponenten bezieht.

Teile der unveränderlichen Voraussetzungen sind:

- bereits vorhandene Hochenergiemodule
- Datenerfassung mittels USB 6009 und LabVIEW von National Instruments
- Leistungselektronik
- Schutzfunktionen und Messwertumwandlung

2.2.1 Vorhandene Hochenergiemodule

Die zur Verfügung gestellten Hochenergie-Speichermodule bestehen aus je zwölf Zellen. Die Nennspannung einer Zelle beträgt 3.7 V, die Ladeschlussspannung somit 4.2 V. Die Nennkapazität einer Zelle wird mit 50 Ah angegeben. Die Spannungsniveaus entsprechen den für diese Zellchemie üblichen.

Die prismatischen Zellen sind mit einem Stahlblech ummantelt und besitzen auf der Oberseite mittig eine Sollbruchstelle, die ähnlich einer Berstscheibe zur Druckentlastung dient.

Eine Zelle besitzt jeweils vier Anschlussmöglichkeiten auf zwei gegenüberliegenden Anschlussplatten – siehe Abbildung 2-1. Die leistungstragenden Anschlüsse sind als zwei M8-Schrauben an den äußeren Enden ausgeführt. Zu Messzwecken sind noch jeweils zwei M3-Innengewinde in die Anschlussplatten eingearbeitet.

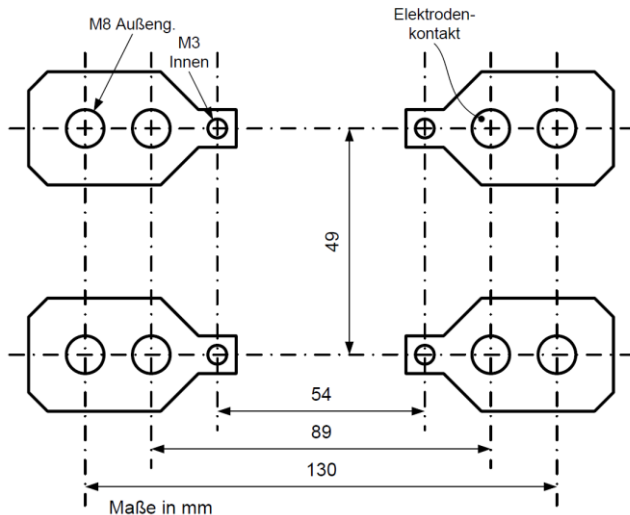


Abbildung 2-1: Skizze eines Zellpaares und seiner Abmessungen

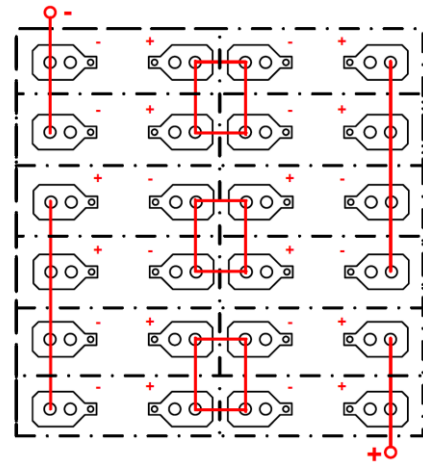


Abbildung 2-2: Darstellung eines verwendeten Hochenergiemoduls und seiner Verschaltung

Die Zellen werden wie in Abbildung 2-2 zu sehen paarweise parallelgeschaltet, die Paare in Serie verbunden. Somit befindet sich die Modulspannung stets zwischen 18 und 25.2 V bei einer Zellspannung zwischen 3 und 4.2 V.

2.2.2 Datenerfassung

Zur Datenerfassung sollen die Instrumente des Herstellers National Instruments verwendet werden. Das Interface zur Messwerterfassung ist das NI USB-6009. Über eine USB-Schnittstelle wird dieses Interface mit der Elektronik des Messsystems verbunden. Das USB-6009 besitzt insgesamt 8 single-ended Analogeingänge (bzw. 4 differential), 2 analoge Ausgänge sowie 8+4 digitale Ein- bzw. Ausgänge – siehe Abbildung 2-3.

Relevante Spezifikationen des USB-6009:

- Analogeingänge
 - 8-fach single-ended bzw. 4-fach differential
 - - 10 ... + 10 V Eingangssignal
 - Eingangswiderstand 144 k Ω
- Analogausgänge
 - 2-fach single-ended
 - 0 ... + 5 V Ausgangssignal
 - Innenwiderstand 50 Ω

- Digitalein- / -ausgänge
 - 8+4-fach (Ein- oder Ausgang selektierbar)
 - - 0.3 ... + 0.8 V LOW, + 2.0 ... 5.8 V HIGH Eingangssignale

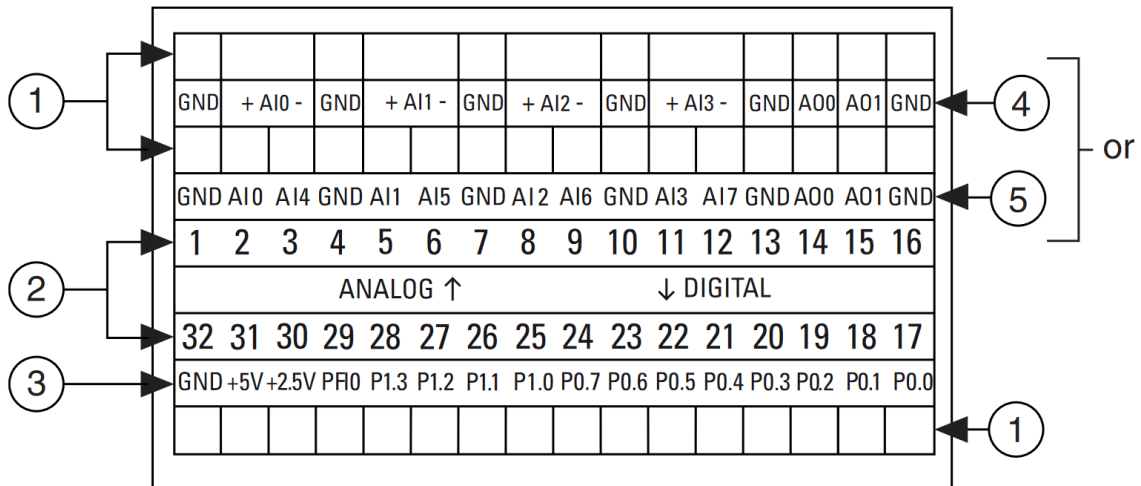


Abbildung 2-3: Die Pinbelegung des NI USB6009: 1. Benutzerspezifische Label, 2. Anschlussnummer-Label, 3. Digital-I/O-Label, 4. Analog-Eingang-Label differential, 5. Analog-Eingang-Label single-ended [4]

Weitere Spezifikationen können dem Datenblatt entnommen werden.

Die Verwendung des NI USB6009 beschränkt die einzusetzende Software auf National Instruments LabVIEW. LabVIEW ist eine graphische Programmierumgebung, die eine Datenerfassung mit Komponenten von National Instruments relativ einfach gestaltet. Es ist aus zwei Oberflächen aufgebaut: dem Frontpanel und dem Blockdiagramm. Die Programmierung mittels LabVIEW wird in Abschnitt 5.4.1 genauer behandelt.

2.2.3 Leistungselektronik

Die leistungselektronische Steuerung soll mittels Leistungs-MOSFET geschehen. Der hierfür verwendete Typ ist der N-Kanal MOSFET IRFP4468PbF von International Rectifier (IRF). Die maximale Drain-Source-Spannung $V_{DSS} = 100 \text{ V}$ mit einem Drain Strom von $I_D = 195 \text{ A}$. Wie Abbildung 2-4 zu entnehmen ist, muss für die Anwendung innerhalb der Betriebsparameter eine Schaltung des MOSFETs innerhalb 1 ms erfolgen, um thermische Überlast zu vermeiden.

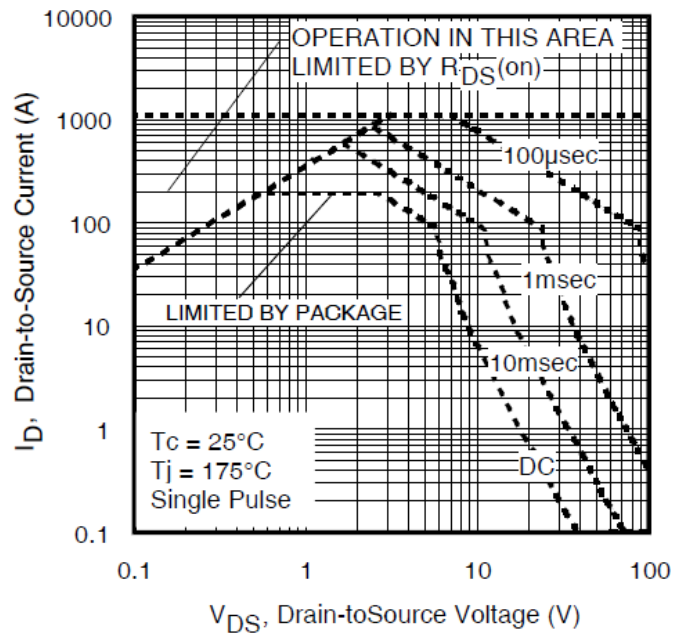


Abbildung 2-4: Auszug aus dem Datenblatt des IRFP4468PbF - Maximum Safe Operation Area [5]

Für eine bidirektionale Beschaltung des Leistungsstranges käme eine verhältnismäßig komplizierte Ansteuerung eines N-Kanal MOSFETs oder die Verwendung eines P-Kanal MOSFETs infrage. Die Verwendung eines PMOS ist aufgrund der höheren Kosten und der schlechteren Performance nicht wünschenswert. Auch auf Ansteuerung eines NMOS über den Leistungskreis selbst wird verzichtet. Das System arbeitet unidirektional und schaltet mittels KFZ-Relais den Modus zwischen Laden und Entladen um. Es kommen Relais vom Typ 8D0 951 253A mit einem Schaltvermögen von 40 A zum Einsatz.

2.2.4 Schutzfunktionen und Messwertumwandlung

Aufgrund vorhandener Komponenten unterliegt die Umsetzung der Schutzfunktionen gewissen Vorgaben:

- Die Spannungsüberwachung der Zellen soll mithilfe des Integrierten Schaltkreises (integrated circuit, IC) MAX9065 erfolgen. Dieser IC ist ein Fensterkomparator mit außerordentlich geringer Versorgungsspannung (auf Lithium-Ionen-Anwendungen angepasst) und geringem Ruhestrom.
- Die Temperaturüberwachung soll mithilfe eines Thermistors (positive temperature coefficient, PTC) erfolgen. Dabei soll auf eine Komponente

zurückgegriffen werden, die ihren Widerstand bei Überschreiten einer Grenztemperatur sprunghaft erhöht.

- Die Stromüberwachung soll auf dem Prinzip eines Koaxial-Shunts basieren, um schnelle Änderungen des Stromes im System, wie im Kurzschlussfall, detektieren zu können.
- Die Erfassung der Temperatur auf Zellpaarebene soll mithilfe eines temperaturabhängigen Widerstands des Typs KTY81 erfolgen. Die Linearisierung soll vor allem auf den Betriebstemperaturbereich ausgelegt werden.
- Die Erfassung des Stromes auf Modulebene soll mithilfe des Stromkompensationswandlers LEM LA205-S erfolgen. Dieser besitzt einen Messbereich von 0 ... 300 A mit einem Übersetzungsverhältnis von 1:2000. Der Nominalstrom liegt bei 200 A.

3 Methode

Der Projektablauf wird im Folgenden kurz dargelegt:

1. Erstellen des Anforderungskataloges
2. Erarbeiten der zur Projektdurchführung notwendigen Grundlagen
3. Konzepterstellung
4. Aufnahme der mechanischen Anforderungen
5. Planung unter Einhaltung der elektrotechnischen Anforderungen
6. Detailplanung
7. Durchführung
8. Funktions-Test
9. Validierung

Zusätzlich begleitet die Dokumentation jeden Prozessschritt. Nach den einzelnen Schritten ist eine Reflexion wichtig und bildet bei Bedarf mit einer Überarbeitung Rückkopplungsschleifen.

Eine Definition der Anforderungen an das System ist essentieller Bestandteil bei Projekten in Kooperation mit Dritten. Der Anforderungskatalog wurde bereits in Kapitel 2 behandelt. Die Aufgabenstellung wurde in Zusammenarbeit mit dem IET beschlossen.

Die erarbeiteten Grundlagen in elektrochemischen und elektrotechnischen Feldern sind den Kapiteln 4 und 5 zu entnehmen.

Die Konzepterstellung, die Aufnahme der mechanischen Anforderungen sowie der Planungsabschnitt werden in Kapitel 6 behandelt.

Kapitel 7 beschreibt Entwicklung sowie die Funktion des Produktes und die Validierung über Tests.

3.1 Eingesetzte Geräte und Software

In diesem Abschnitt werden Geräte und Software behandelt, die für die unterschiedlichen Aufgaben zum Einsatz kommen. Genaue Geräte-Nummern und Typen sind bei Messungen zusätzlich angegeben.

- **Strom- / Spannungsmessung**

Zur Bestimmung von Strömen und Spannungen kommen primär Multimeter der Marke LEM vom Typ Unigor 355 zum Einsatz.

- **Spannungsverläufe**

Zur Messung von Spannungsverläufen kommen, sofern nicht anders angegeben, Oszilloskope der Marke Tektronix zum Einsatz. Üblicherweise wurden 2-Kanal-Oszilloskope verwendet, in Ausnahmefällen 4-Kanal-Oszilloskope.

- **Impedanz- / Widerstandsmessungen**

Zur Messung von Widerständen und Impedanzen kommt, sofern nicht anders angegeben, das Agilent / Keysight U1733C zum Einsatz.

- **Datenerfassung**

Die Datenerfassung wird, wie in Abschnitt 2.2.2 beschrieben, mit dem USB6009 des Herstellers National Instruments realisiert.

- **Programmierung**

Die Programmierumgebung für die Datenerfassung ist LabVIEW Version 8.2 des Herstellers National Instruments (vgl. Abschnitt 2.2.2)

- **Schaltpläne**

Schaltpläne werden mithilfe der Software TARGET 3001! Version 18 vom Ing.-Büro FRIEDRICH erstellt.

- **Layout**

Für die Erstellung von Layouts kommt ebenso die Software TARGET 3001! Version 18 zum Einsatz. Des Weiteren kommt für die Dokumentation der Streifenrasterplatinen das Programm Lochmaster Version 4.0 des Herstellers ABACOM zum Einsatz

- **Skizzen**

Zur Skizzenerstellung wird mit dem Programm Visio 2013 von Microsoft gearbeitet.

4 Lithium-Ionen-Sekundärzellen

Seit dem kommerziellen Produktionsstart von Lithium-Ionen-Sekundärzellen – 1991 durch Sony – steigt die weltweite Nachfrage nach diesen Zelltypen an. [6]

Die hohe Energiedichte und spezifische Energie dieser Zellen sowie die Verfügbarkeit der Ausgangsrohstoffe ist mitunter verantwortlich für die rasche Verbreitung der Lithium-Ionen-Batterie. Im Vergleich zu Blei-Akkumulatoren sowie Nickel-Cadmium- (NiCd) und Nickel-Metallhydrid-Sekundärzellen (NiMH) ergeben sich viele Vorteile, die für eine Verwendung von Lithium-Ionen-Zellen sprechen. Unter anderem leidet die Lithium-Ionen-Technologie nicht unter dem bei Nickel-Zellen bekannten Memory-Effekt, der die Kapazität einknicken lässt, wenn Zellen nicht vollständig entladen und geladen werden. [7]

Negativ auf den Trend der Lithium-Ionen-Batterie wirken sich die Entsorgungskette und das vorhandene Gefahrenpotential bei Fehlbehandlung aus. So ist der Bleiakкумуляator nach wie vor das bevorzugte Produkt für Autobatterien. Der geschlossene Lebenszyklus der Bleibatterie macht diese im Verhältnis kosteneffizient und ökologisch weitestgehend ungefährlich. Letzteren Problemaspekt bestätigen immer wiederkehrende Berichte über sich selbstentzündende Batterien in mobilen Endgeräten wie Mobiltelefonen oder Laptops.

4.1 Zellchemie

Die Zellchemie charakterisiert die Eigenschaften von Lithium-Ionen-Sekundärzellen. Im Grunde laufen in der Lithium-Ionen-Sekundärzelle die gleichen elektrochemischen Prozesse ab wie in anderen galvanischen Zellen. Beim Laden werden Ionen von Lithium über den Elektrolyten von positiver Elektrode zur negativen Elektrode transportiert. Dabei werden an der positiven Elektrode Elektronen freigesetzt und über eine elektrische Verbindung außerhalb der Zelle zur negativen Elektrode geleitet.

Ein wesentlicher Aspekt der Lithium-Ionen-Zelle ist das Spannungsniveau von Lithium in der elektrochemischen Spannungsreihe. Tabelle 4-1 zeigt, dass Lithium

in der Reaktion mit seinem Ion das geringste Standardpotential besitzt. Somit ist die Zellspannung von Lithium-Ionen-Zellen gegenüber anderen etablierten Zelltypen grundsätzlich höher. Dies bedeutet, dass bei gleicher Ladungsträgerdichte in der Zelle höhere Energiedichten erreicht werden können.

Die Komponenten von Lithium-Ionen-Zellen – auch in Abbildung 4-1 ersichtlich – seien im Folgenden Abschnitt kurz beschrieben.

Reactions in acid media	Potential (V)
$\text{Li}^+ + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Li}$	- 3.045
$\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Zn}$	- 0.762 6
$\text{Cd}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Cd}$	- 0.402 5
$\text{PbSO}_4 + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Pb} + \text{SO}_4^{2-}$	- 0.350 5
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{H}_2$	0.000 0
$\text{AgCl} + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Ag} + \text{Cl}^-$	0.222 3
$\gamma\text{-MnO}_2 + \text{H}^+ + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{MnOOH}$	1.0
$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{H}_2\text{O}$	1.229
$\text{PbO}_2 + 4\text{H}^+ + \text{HSO}_4^- + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	1.698
Standard potentials in basic media	
$\text{Zn}(\text{OH})_4^{2-} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Zn} + 4\text{OH}^-$	- 1.225
$\text{NiOOH} + \text{H}_2\text{O} + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Ni}(\text{OH})_2 + \text{OH}^-$	0.324
$\gamma\text{-MnO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{MnOOH} + \text{OH}^-$	0.36
$\text{Ag}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{Ag} + 2\text{OH}^-$	0.342
$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightleftharpoons 4\text{OH}^-$	0.401
$2\text{AgO} + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Ag}_2\text{O} + 2\text{OH}^-$	0.946

Tabelle 4-1: Auszug aus der elektrochemischen Spannungsreihe mit der Reaktion von Lithium und seinem Ion [8]

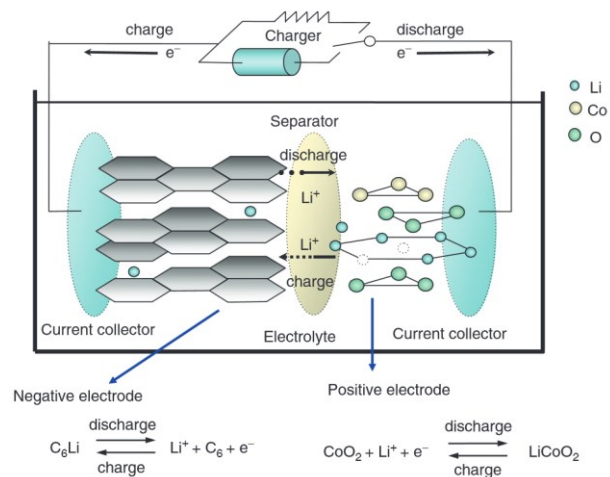


Abbildung 4-1: Innerer Aufbau und Zellreaktionen einer Lithium-Ionen-Sekundärzelle [9]

4.1.1 Negative Elektrode

Erste Zellen verwendeten als Werkstoff metallisches Lithium. Mittlerweile arbeiten die meisten Lithium-Ionen-Zellen mit einer Graphit-Elektrode zur Interkalation von Lithium. Diese bindet das Lithium in einer Form, in der es wesentlich stabiler in der Zelle arbeitet als reines Lithium, und behält dennoch ein Spannungsniveau, das unweit der - 3.04 V des reinen Lithiums liegt. Die Interkalation von Lithium beschreibt die Einlagerung des Lithiums in die Schichten des Graphits. Im Vergleich zur Verwendung von metallischem Lithium wird durch diesen Prozess eine Dendriten-Bildung innerhalb der Zelle weitestgehend unterbunden und so die Sicherheit gegen einen internen Kurzschluss erhöht. [9]

4.1.2 Positive Elektrode

Als Werkstoff kommen zumeist Oxid-Verbindungen von Lithium und Metallen (wie Kobalt, Aluminium, Mangan, Nickel oder Kombinationen daraus) zum Einsatz. Lithium-Kobalt-Dioxid ($\text{Li}_{1-x}\text{CoO}_2$) ist seit der Markteinführung 1991 eines der verbreitetsten Materialien für den Aufbau positiver Elektroden. In Kombination mit der negativen Graphit-Elektrode werden dabei Zellpotentiale zwischen 2.5 V (entladen) und 4.2 V (geladen) erreicht. Die Energiedichte sowie die spezifische Energie einer Zelle hängen stark von der Wahl des Materials ab. $\text{Li}_{1-x}\text{CoO}_2$ besitzt sehr gute Eigenschaften in Bezug auf das Spannungsniveau, die spezifische Dichte und die Schüttdichte. Jedoch begrenzt die Stabilität der positiven Elektrode den minimalen Lithium-Gehalt und somit die maximale Aufladung. Der Lithiumgehalt in der Elektrodenstruktur (1-x) sollte nie unter 0.5 sein. [10]

4.1.3 Elektrolyt

Der Elektrolyt in der Zelle dient zum Ladungsträger-Transport beim Laden und Entladen. Im speziellen Fall werden Lithium-Ionen zwischen negativer und positiver Elektrode transportiert. Für diesen Zweck ist eine entsprechende Ionen-Leitfähigkeit nötig. In der Regel gilt ein Elektrolyt als geeignet, wenn seine Ionenleitfähigkeit zumindest über 10^{-3} Scm^{-1} liegt. Um dies zu erreichen, wird ein Lösungsmittel mit einem Lithiumsalz angereichert. Wie bereits beschrieben, kommen keine wasserbasierten Lösungsmittel infrage, um Reaktionen mit Lithium zu unterbinden. Daher wird auf organische Lösungsmittel zurückgegriffen. Die darin enthaltenen Komponenten Sauerstoff, Wasserstoff und Kohlenstoff stellen allerdings einen weiteren Risikofaktor dar, weil durch sie eine entzündete Lithium-Ionen-Zelle nur noch schwer unter Kontrolle zu bringen ist. Oft müssen thermisch nicht-entkoppelte Zellen aufgegeben und auf den vollständigen Abbrand gewartet werden. Eine wichtige Anforderung an den Elektrolyten ist die elektrochemische Stabilität im Arbeitsbereich der Zelle. [11]

In den Aufgabenbereich des Elektrolyten fällt ebenso die Bildung des Solid Electrolyte Interfaces (SEI). In modernen Produktionsprozessen wird, wie in Abbildung 4-2 erkenntlich, ein SEI gebildet, indem der Elektrolyt mit der negativen Elektrode in Kontakt gebracht wird und diese dabei reagieren. Dabei spielen Additive eine wichtige Rolle. Die Anforderung an das SEI ist, eine weitere Reaktion

zwischen Elektrolyten und negativer Elektrode zu unterbinden, sodass keine weiteren irreversiblen Reaktionen ablaufen. [12]

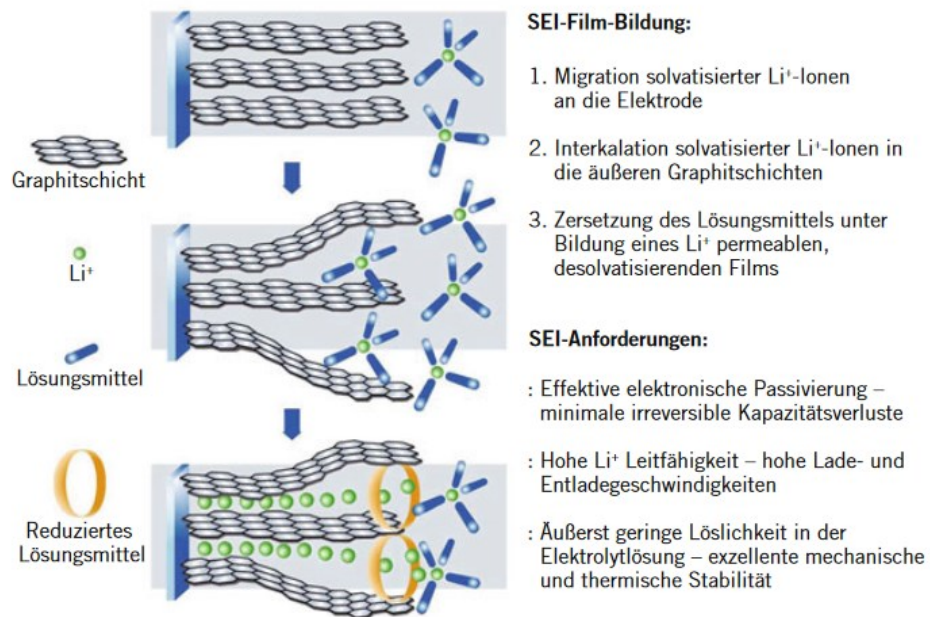


Abbildung 4-2: Bildung und Aufgaben eines Solid Electrolyte Interfaces (SEI) [12]

4.1.4 Separator

Der Separator dient zur physikalischen Trennung der beiden Elektroden. Er soll eine elektrisch leitende Verbindung, also einen Kurzschluss, zwischen den Elektroden verhindern. Oft kommen poröse Materialien auf Polyolefin-Basis zum Einsatz. Anforderungen an Separatoren beinhalten die Durchlässigkeit für den Elektrolyten und damit die Ionenleitfähigkeit sowie eine homogene Porenverteilung zur Gewährleistung einer gleichmäßigen Elektrodenalterung, die Resistenz gegen Durchstöße, d.h. mechanische Einflüsse von außen, und Dendriten-Bildung. Des Weiteren muss der Separator in gewissem Ausmaß elastisch sein, um Dichteunterschiede der Elektroden bei Ein- und Auslagerung von Lithium-Ionen und Temperaturschwankungen auszugleichen.

4.2 Eigenschaften

Der Erfolg der Lithium-Ionen-Zelle ist auf ihre hohe Energiedichte zurückzuführen. Seit ihrer Einführung in den Massenmarkt setzt die mobile Anwendungselektronik auf diesen Zelltypen und machte Entwicklungen wie Tablets oder Smartphones überhaupt erst möglich. Im Gegensatz zu nickelbasierten Sekundärzellen können Lithium-Akkumulatoren so kompakt produziert werden, dass sie den Anforderungen an moderne kommerzielle Mobiltelefone entsprechen.

Wie aus Abbildung 4-3 ersichtlich, ist die Lithium-Ionen-Zelle den etablierten Technologien in Bezug auf Energiedichte und spezifischer Energie überlegen.

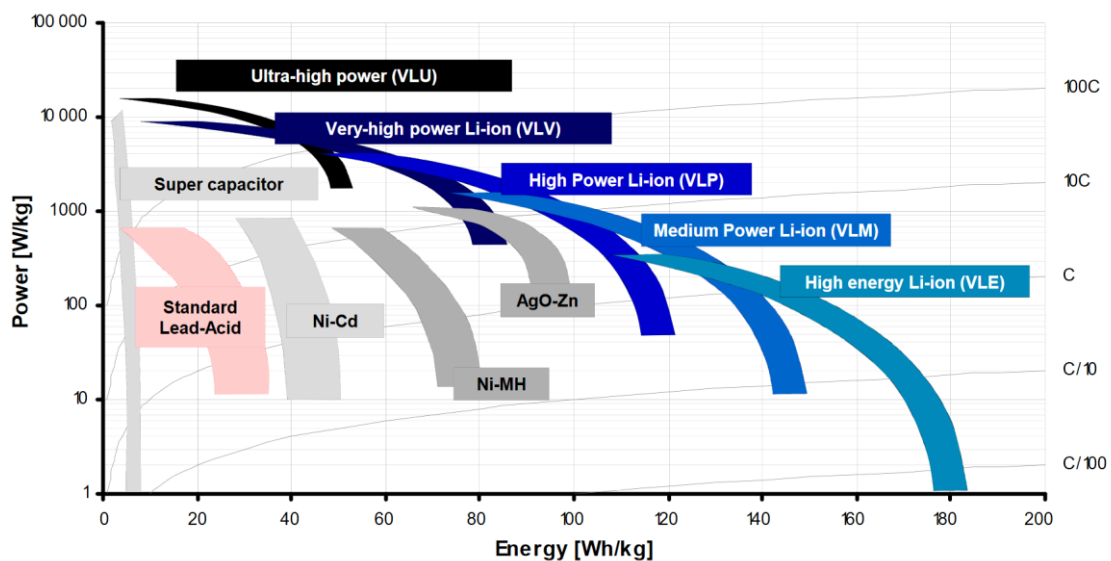


Abbildung 4-3: Ragone-Diagramm von aktuellen Speichertechnologien – Vergleich von spezifischer Energie und spezifischer Leistung [13]

Die Technologie machte in den vergangenen Jahren massive Fortschritte und erlaubt bereits volumetrische Energiedichten bis zu 600 Whl^{-1} – siehe Abbildung 4-4. [6]

In Bezug auf die gravimetrische Energiedichte erreichen moderne Lithium-Ionen-Zellen bis zu 250 Whkg^{-1} . [10]

Diese Kennwerte wirken sich direkt auf die Mobilität der Batterie selbst aus und sind deshalb für Anwendungen interessant, deren Kritikalität in Masse und Volumen von Speichersystemen liegt.

Die Leistungsdichte, die bei Lithium-Ionen-Zellen bei etwa $10,000 \text{ Wkg}^{-1}$ liegt (siehe Abbildung 4-3), suggeriert ebenso Einsätze, in denen die Batterie rasch entladen wird.

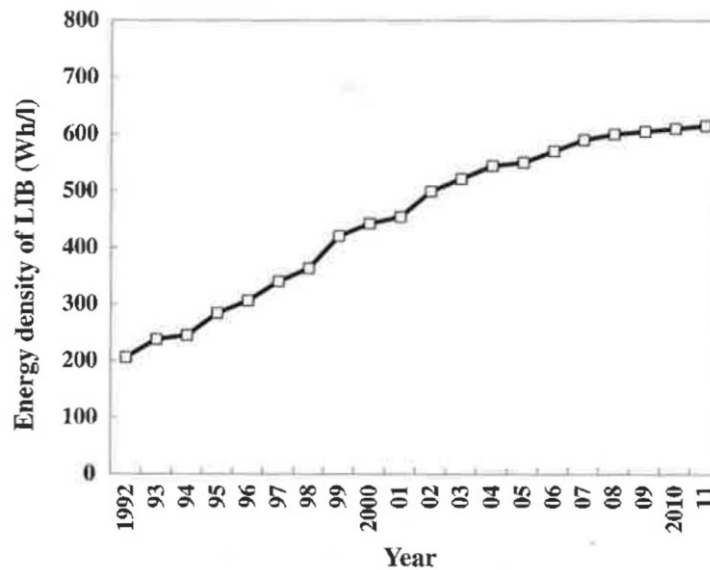


Abbildung 4-4: Historische Entwicklung der Energiedichte von Lithium-Ionen-Zellen [6]

Aus der in Abbildung 4-5 dargestellten Lade- / Entladekurve ist ersichtlich dass das Spannungsniveau solcher Batterien sehr lange auf relativ konstantem Niveau gehalten wird. Diese Eigenschaft bietet gewisse Vorteile, da der Ladezustand vor allem in oberen und unteren Grenzbereich sehr offensichtlich wird. So kann die Batterie vor Tiefentladung bzw. Überladung geschützt werden. Die Lade- / Entladekurve stellt die Zellspannung in V in Verhältnis zur Kapazität in Ah. Je größer also die Fläche unter der Kurve desto größer die zugeführte bzw. freigesetzte Energie.

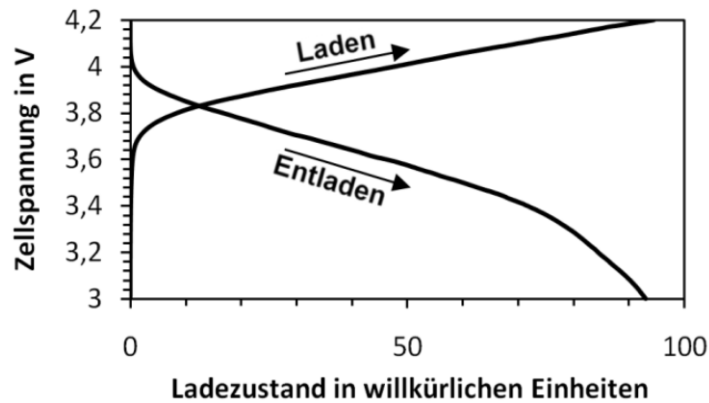


Abbildung 4-5: Typische Lade- bzw. Entladekurve einer Lithium-Ionen Batterie [14]

Weitere Aspekte für das Laden und Entladen von Lithium-Ionen-Batterien sind aus Abbildung 4-6 sowie Abbildung 4-7 ersichtlich. So hängt die Lebensdauer einer Batterie maßgeblich von der Entladetiefe (Depth of Discharge, DoD) ab. Sofern die Anwendung es erlaubt, ist eine Reduktion der genutzten Kapazität sinnvoll, um die Lebensdauer zu verlängern. Auch der entnommene / zugeführte Strom hat, wie bei allen galvanischen Zellen, wesentlichen Einfluss auf das Batterieverhalten hinsichtlich ihrer Kapazität. Zusätzlich hat die Temperatur Einfluss auf Eigenschaften einer Lithium-Zelle: Niedrige Temperaturen senken nicht nur die Kapazität der Zelle, sondern ebenso die Ionen-Leitfähigkeit, was sich auf den Innenwiderstand der Batterie und so auf die Leistung auswirkt. Typischerweise liegt der zulässige Temperaturbereich zwischen -20 °C ... $+60\text{ °C}$ für das Entladen und von 0 °C ... 40 °C für das Laden.

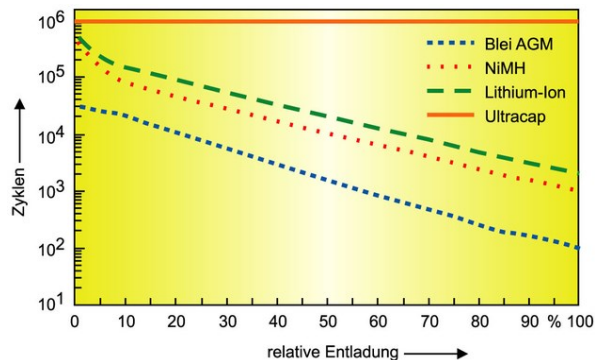


Abbildung 4-6: Erreichbare Zyklenzahl im Verhältnis zur relativen Entladetiefe verschiedener Speichertechnologien [15]

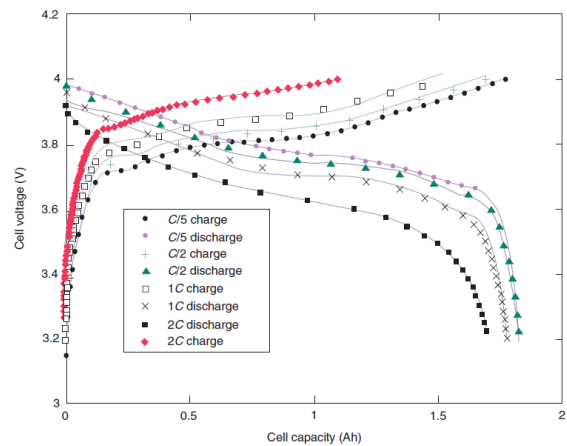


Abbildung 4-7: Spannung in Relation zur entnommenen Kapazität in Abhängigkeit des Zellstromes für Lithium-Ionen-Sekundärzellen [1]

Eine genaue Bestimmung des Ladezustands wird durch solche Effekte zusätzlich erschwert und kann daher nicht immer über die aktuelle Leerlaufspannung der Zelle ermittelt werden.

4.3 Chemische und elektrotechnische Sicherheitsaspekte

Die richtige Handhabung von Lithium-Ionen-Batterien ist nicht nur der Lebensdauer zuträglich, sondern ein wesentlicher Sicherheitsaspekt für ihren Einsatz. Die Gefahr eines Feuers liegt vor allem im Einsatz eines organischen Elektrolyten. Die Reaktivität von Lithium in Verbindung mit Wasser verhindert den Einsatz von wassergelösten Salzen als Elektrolyt. Stattdessen werden Salze in organischen Verbindungen gelöst. Diese sind häufig leicht entzündlich und reagieren selbst unter Luftabschluss weiter. Dadurch wird das Löschen einer brennenden Zelle wesentlich erschwert.

In Abbildung 4-8 sind die Ursachen und Folgen diverser Fehlerszenarien in Zusammenhang gebracht. Daraus wird ersichtlich, dass durch externen Fehlgebrauch Lithium-Ionen-Zellen bis zum Abbrand gebracht werden können. Interessant ist, dass mechanischer, aber auch elektrotechnischer Fehlgebrauch zu folgenschweren Schäden führen kann.

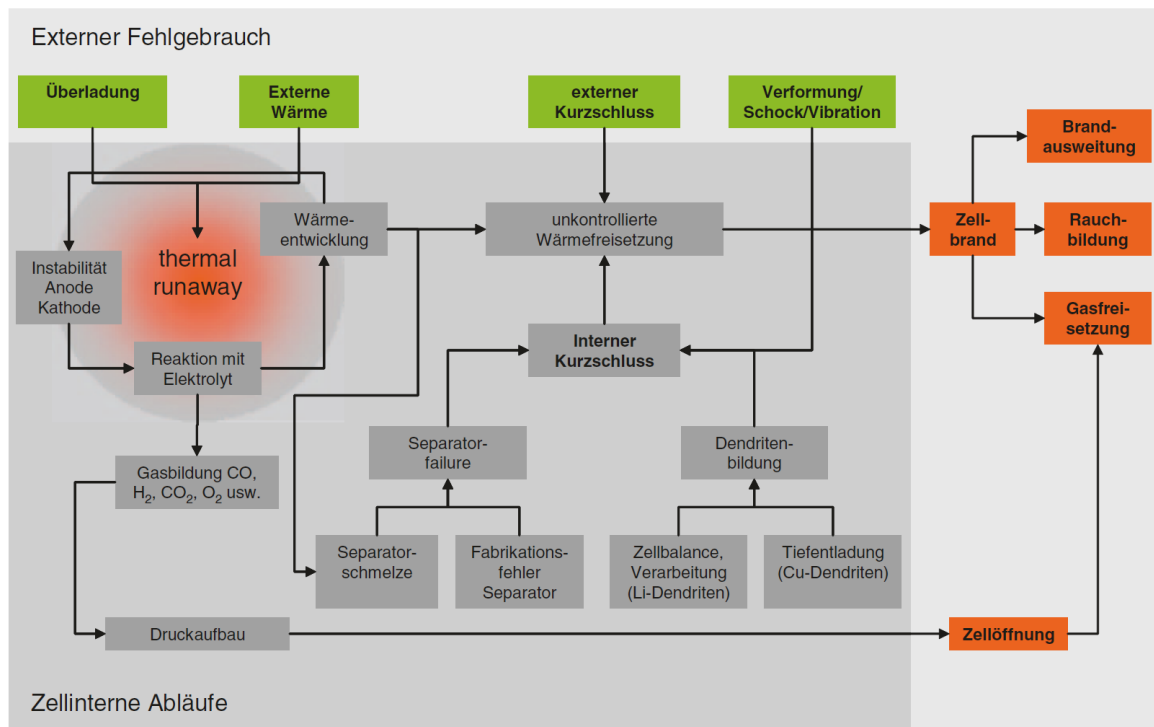


Abbildung 4-8: Sicherheitsaspekte und Fehlerursachen von Lithium-Ionen Batterien [10]

4.3.1 Temperatur

Wie oben beschrieben sind Verhalten und Eigenschaften einer Lithium-Ionen-Sekundärzelle temperaturabhängig. Zu normalen Raumbedingungen variieren mit der Temperatur lediglich die Lebensdauer und die Kapazität. Über- oder unterschreitet die Zelltemperatur jedoch ein bestimmtes Limit, kann dies schwere Folgen haben. Aus diesem Grund sind eine Temperaturüberwachung bzw. temperaturbezogene Schutzfunktionen an der Zelle unerlässlich.

Bei Temperaturen unter 0 °C kommt es in Zellen verstärkt zu Alterungsprozessen. Einen nennenswerten Einfluss hat das Lithium-Plating. Es handelt sich hierbei um ein Abscheiden metallischen Lithiums an der negativen Elektrode. Dieser Effekt tritt hauptsächlich beim Laden der Zelle in kalten Umgebungen auf. Über die Lithium-Abscheidung können Dendriten gebildet werden, die im schlimmsten Fall einen internen Kurzschluss verursachen.

Auch bei Übertemperatur treten Alterungserscheinungen der Zelle auf. Diese basieren primär auf der Arrhenius-Gleichung. Dabei kann angenommen werden, dass 10 K Abweichung von der höchsten zulässigen Betriebstemperatur die

Lebensdauer auf die Hälfte herabsetzt. Eine Betriebstemperatur zwischen 20 und 40 °C ist anzustreben (siehe Abbildung 4-9).

	-20 °C	0 °C	20 °C	40 °C	60 °C
Leistung:	< 70 % hoher R_i	90 %	100 %	100 % → 0 % Abregelung	
Lebensdauer:	Zellalterung beim Laden		ideale Temperatur	Zellalterung → Thermal Runaway	

Abbildung 4-9: Temperaturbereich für den Betrieb von Lithium-Ionen-Zellen, nach [10]

Ein Sonderfall von Übertemperatur ist der Thermal Runaway, eine Kettenreaktion, die zellintern exotherme Reaktionen nacheinander freisetzt. Die Gefahr liegt darin, dass das System wie eine Mitkopplung funktioniert und, einmal ausgelöst, nicht mehr gestoppt werden kann. Zum Thermal Runaway kommt es definitionsgemäß, wenn die intern freigesetzte Wärme nicht mehr in die Umgebung abgeführt werden kann. Diese Kettenreaktion wird bei den meisten kommerziellen Zellen bei Zelltemperaturen über 150 °C ausgelöst. Da die thermische Stabilität mit der Lebenszeit der Batterie abnehmen kann, ist dieser Grenzwert allerdings mit Vorsicht zu behandeln.

Das Modell des Thermal Runaways beschreibt nach derzeitigem Stand die Schritte in folgendem Ablauf:

1. Reaktion des Elektrolyten mit der negativen Elektrode
2. Thermische Zersetzung des Elektrolyten
3. Oxidation des Elektrolyten an der positiven Elektrode
4. Thermische Zersetzung der negativen Elektrode
5. Thermische Zersetzung der positiven Elektrode

Zusätzlich können noch das Aufschmelzen des Separators und ein damit verbundener interner Kurzschluss zur Freigabe erheblicher Wärmemengen beitragen. [16]

4.3.2 Spannung

Bei Unterspannung laufen in der Zelle an der positiven Elektrode irreversible Reaktionen ab. Kapazitätsverlust der Zelle ist die Folge.

Bei Überladung ist ein Thermal Runaway möglich. Beim Laden werden Lithium-Ionen aus dem Kristall der positiven Elektrode ausgelagert (Deinterkalation). Ist der Anteil an Lithium im Kristall zu gering, so kann dieser instabil werden und Sauerstoff freisetzen. Dieser wiederum dient zur Oxidation des Elektrolyten und löst die bereits erklärte Kettenreaktion aus. [10]

4.3.3 Strom

Überstrom kann einerseits Beschädigungen der Elektronik und der elektrotechnischen Einrichtungen verursachen, andererseits haben hohe Betriebsströme Auswirkungen auf die galvanischen Zellen.

Die höchsten Ströme fließen im Kurzschlussfall. Dabei kann – bei großen Batterien – der Strom von und durch die Batterie innerhalb von Millisekunden auf über 10,000 A steigen. Ein solcher Strom verursacht aufgrund des ohmschen Widerstands von Batterie und der elektrischen Verkabelung hohe thermische Leistungen. Lokale Temperaturmaxima innerhalb der Zelle können dabei den Separator beschädigen und so einen zellinternen Kurzschluss verursachen. Es muss also darauf geachtet werden, dass sowohl der Betriebsstrom sich stets innerhalb der zulässigen Grenzen befindet (bspw. Stromsensor, Kompensationswandler) als auch ein Kurzschlussstrom sicher abgeschaltet werden kann (bspw. Schmelzsicherung). [10]

In Abbildung 4-10 ist der Betriebsbereich von Lithium-Ionen-Zellen grafisch dargestellt. Dieser muss unbedingt eingehalten werden, um Zellschäden und deren Folgen zu verhindern.

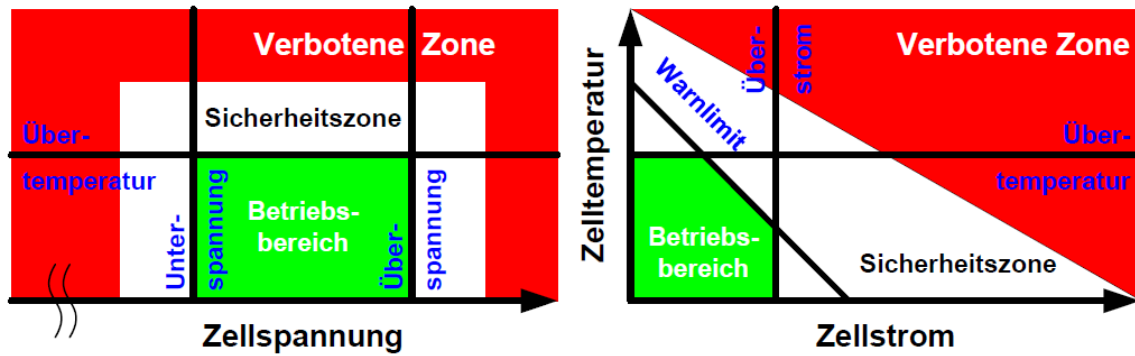


Abbildung 4-10: Betriebsparameter von Lithium-Ionen-Zellen, nach [10]

4.3.4 IU-Ladeverfahren

Das Konstantstrom-Konstantspannungs-Ladeverfahren (IU-Ladeverfahren, constant current, constant voltage, CC-CV) ist häufig das bevorzugte Ladeverfahren für Lithium-Ionen-Zellen. Es garantiert, dass die Zelle möglichst rasch, vollständig und innerhalb ihrer Betriebsgrenzen aufgeladen wird. [10]

Abbildung 4-11 beschreibt graphisch das CC-CV-Ladeverfahren:

1. Die Zelle wird mit konstantem Strom geladen. Die Zellspannung darf dabei nicht die Ladeschlussspannung überschreiten.
2. Ist die Ladeschlussspannung erreicht, wird die angelegte Spannung konstant gehalten. Dabei sinkt der Strom aufgrund des Innenwiderstands und der zellchemischen Vorgänge ab.
3. Sinkt der Strom unter einen Minimalwert, so ist der Ladeschluss erreicht und die Zelle gilt als geladen.

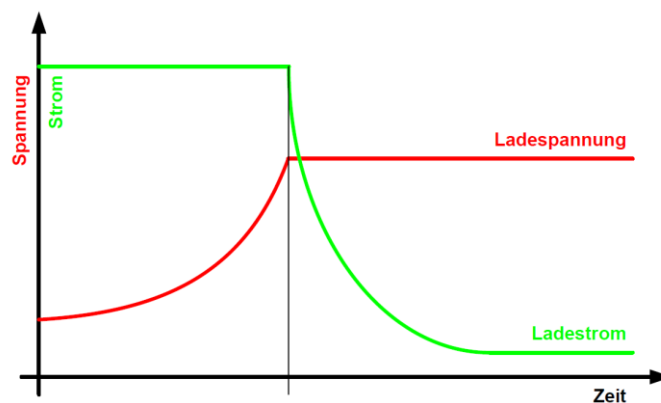


Abbildung 4-11: Spannungs- und Stromverlauf im IU-Ladeverfahren, nach [17]

4.3.5 Balancing

Die Lade- / Entladekurve von Lithium-Ionen-Zellen wurde bereits vorgestellt. Ein Problem, das bei Lithium-Ionen-Batterien (also dem Verbund mehrerer Zellen) auftritt, liegt in der unterschiedlichen Charakteristik der einzelnen Zellen. Nicht jede Zelle hat die exakt gleiche Kapazität, jedoch darf keine Zelle die Ladeschlussspannung überschreiten. Schaltet man Zellen in Serie, so lädt man alle mit demselben Ladestrom. Ist eine der Zellen nahe ihrer maximalen Kapazität, so steigt die Spannung laut Charakteristik stärker an als bei den weiteren Zellen im Verbund. Da Überladung keine Option ist, muss daher der Ladevorgang ausgesetzt werden und die weiteren Zellen bleiben unter ihrer maximalen Kapazität. Analog zum Laden findet sich diese Variation der Zellspannungen auch beim Entladen des Batteriemoduls. Um alle Zellen auf demselben Spannungsniveau zu halten, muss eingegriffen werden. Dazu greift man auf eine der zwei folgenden Methoden zurück: [10]

- **Passives Balancing**

Das passive Balancing arbeitet mit der Dissipation überschüssiger Energie. Beim Laden wird jene Zelle, die der Ladeschlussspannung am nächsten ist, so lange elektrisch belastet, bis ihre Spannung sich an jene der anderen Zellen angepasst hat. Aufgrund der Wärmeentwicklung büßt das Batteriesystem beim passiven Balancing an Effizienz ein, ist jedoch die einfachere Lösung.

- **Aktives Balancing**

Beim aktiven Balancing wird die Ladung von der Zelle mit der höchsten Spannung über DC/DC-Konverter und elektronische Schalter auf jene Zelle mit der niedrigsten Spannung übertragen. Diese Methode wäre grundsätzlich effizienter, da die Ladung nicht zwangsläufig dissipiert wird. Jedoch ist der elektronische Aufwand unverhältnismäßig höher als beim passiven Balancing und die Verluste über elektronische Schalter auch nicht zu vernachlässigen.

4.4 ReUse von Lithium-Ionen-Batterien

Aktuell werden gebrauchte Lithium-Ionen-Batterien, die den Anforderungen nicht mehr entsprechen, als Abfall behandelt. Abgesehen von der Entsorgung giftiger Inhaltsstoffe und der Aufbereitung von Metallen ist der Materialeinsatz zu berücksichtigen. Wertvolle Grundstoffe von „verbrauchten“ Zellen wiederzugewinnen ist somit nicht nur ein ökologisches Anliegen, sondern ebenso eine Kostenfrage. Eine Alternative zur kompletten Demontage der Zellen bietet das ReUse, die Weiterverwendung von Batterien nach ihrem ersten Einsatz.

Vor allem Hochenergiezellen kommen für die Wiederverwendung infrage, da diese trotz ihres Kapazitätsverlustes noch große Mengen an Energie speichern können. ReUse-Batterien könnten unter Einschränkungen der Betriebsparameter – Lade- und Entladeschlussspannung, Betriebsstrom, maximale und minimale Betriebstemperatur – weiter operieren und somit ihre energetische Rücklaufzeit in Bezug auf ihre Lebensdauer verkürzen.

Um sie als leistungsfähiges Produkt wiederverwenden zu können, bedarf es einer Feststellung des Batteriezustandes. Dabei sind einige Parameter von großer Bedeutung:

- **Nutzbare Kapazität**

Die Kapazität sinkt aufgrund irreversibler Zellreaktionen mit der Lebenszeit und der Zyklenzahl der Batterie. Häufig wird für gewichtskritische Anwendungen eine minimale Kapazität von etwa 80 % des Ursprungswertes – State of Health (SoH) – festgelegt, bis die Batterien ausscheiden. Für weniger kritische Anwendungen könnte die noch nutzbare Kapazität dennoch ausreichend sein. [18]

- **Innenwiderstand**

Der Innenwiderstand einer Zelle wirkt sich stark auf ihre Leistungsfähigkeit aus. Diese sinkt reziprok zum Innenwiderstand, der aufgrund von Alterungsprozessen wie dem Lithium plating mit der Lebenszeit bzw. der Zyklenzahl einer Zelle steigt. Zusätzlich wirkt sich jeder Widerstand auf die später beschriebene Effizienz der Zelle aus.

- **Selbstentladerate**

Die Selbstentladerate beschreibt den Verlust der Kapazität über lange Standzeiten (Perioden ohne Lade- / Entladezyklus). Sie ist ein Maß für die Güte einer Zelle. Die Selbstentladeraten von positiver und negativer Elektrode sollten in einer ähnlichen Größenordnung sein, um die Sicherheit der Batterie zu gewährleisten. [19]

Eine Messung der Selbstentladerate ist oft schwierig oder zeitaufwändig. Aktueller Stand der Technik ist das Laden / Entladen der Zelle, die folgende Lagerung über z.T. Monate und ein erneutes Laden und Entladen. Zur Berechnung der Selbstentladerate werden dann die Kapazitäten verglichen und die Differenz in Relation zur Standzeit gesetzt. [18]

- **Ladewirkungsgrad**

Der Ladewirkungsgrad gibt an, welcher Teil der während der Ladung zugeführten Energie bei Entladung nutzbar gemacht werden kann. Geringe Ladungswirkungsgrade weisen auf hohe Innenwiderstände sowie irreversible Prozesse in der Zellchemie hin. Des Weiteren ist zu beachten, dass jener Energieanteil, den die Zelle nicht mehr zur Verfügung stellt, dissipiert und damit die Effizienz des Systems verringert.

Für eine Wiederverwendung von Lithium-Ionen-Zellen ist eine Messung der genannten Parameter relevant. Das Ergebnis dient vor allem zur Beurteilung der Güte einer Zelle. Die Degradation von Lithium-Ionen-Zellen lässt sich grundsätzlich einteilen in kalendarische und zyklische Alterung. Den meisten Ursachen für Zellalterung liegen Reaktionen zwischen dem SEI und der negativen Elektrode zugrunde. Die genauen Prozesse hinter den Alterungserscheinungen zu beobachten, ist nicht Teil dieser Masterarbeit.

5 Elektrotechnische Grundlagen

Zur Umsetzung der angeforderten Funktionen des Messsystems ist die Kenntnis einiger elektrotechnischer und elektronischer Grundsaltungen notwendig. Grundsätzlich kann zwischen analoger und digitaler Signalelektronik unterschieden werden. Während bei der analogen Signalelektronik das Signal zwischen oberen und unteren Pegel jeden Wert annehmen kann, wird in der digitalen Signalelektronik zumeist zwischen LOW und HIGH unterschieden. Ausnahmen bildet bspw. die Tri-State-Schaltungstechnik.

In der Digitaltechnik besitzt ein Signal den zugeordneten Pegel, wenn ein bestimmter Grenzwert über- oder unterschritten wird. Ein Pegel außerhalb der zulässigen Grenzwerte darf nur bei Übergängen von HIGH auf LOW oder in Gegenrichtung eingenommen werden. In diesem Kapitel sollen die für die Umsetzung nötigen Schaltungen dieser beiden Signaltechnik-Sparten behandelt werden. Zusätzlich soll die für den Leistungsstrang verwendete Elektronik sowie die Programmier-Umgebung erläutert werden.

5.1 Analoge Signalelektronik

Signale in der Elektronik dienen zum Transfer von Daten. Auf diese Weise können gemessene Größen elektronisch erfassbar gemacht, aufbereitet und verarbeitet werden.

In der analogen Signalelektronik kann das Signal jeden Wert innerhalb der Grenzen einnehmen. Die Grenzen sind in der Regel von der Versorgungsspannung bzw. dem Versorgungsstrom der signalverarbeitenden Komponenten vorgegeben. [20]

Analoge Signale werden grundsätzlich in Stromsignale und Spannungssignale unterteilt. Zum Zwecke dieser Arbeit wurden vornehmlich Spannungssignale eingesetzt. Lediglich der übersetzte und gemessene Strom kommt als Stromsignal vom Kompensationswandler. Das Signal wird danach allerdings ebenfalls über einen ohmschen Widerstand in ein Spannungssignal gewandelt.

5.1.1 Operationsverstärker und Grundschaltungen

Ein Operationsverstärker (OPV), dargestellt in Abbildung 5-1, ist ein mehrstufiger Spannungsverstärker. Er besitzt einen invertierenden (I-) und einen nicht-invertierenden Signaleingang (I+) und verstärkt die daran anliegende Spannungsdifferenz bis an seine Grenzen. Diese sind durch Versorgungsspannung (U_{S+} , U_{S-}), welche an zwei weiteren Eingängen anliegt, und die innere Beschaltung gegeben. Je nach Typ ist eine Ausgangsspannung (U_O) bis zu den Versorgungsspannungen möglich (Rail-to-Rail).

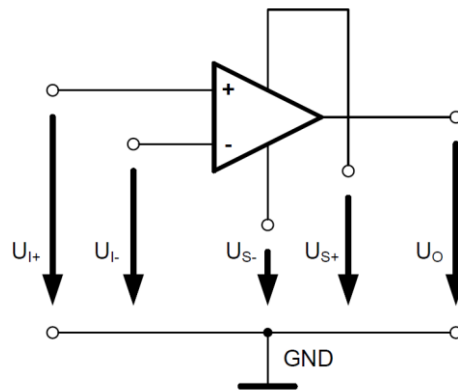


Abbildung 5-1: Darstellung eines Operationsverstärkers als Schaltsymbol

Der ideale OPV ist ein Modell, das zur Berechnung von elektronischen Netzwerken dient. Die Eingangsdifferenzspannung wird in vielen idealisierten Schaltungen als 0 V angenommen. Zwischen dem idealen Operationsverstärker und realen OPVs gibt es maßgebliche Unterschiede, die vor allem bei kleinen Signalen spürbar werden: [21]

Parameter	Idealer OPV	Realer OPV
Eingangswiderstand	$R_i = \infty$	$R_i < \infty$
Eingangsstrom	$I_i = 0 \text{ A}$	$I_i \neq 0 \text{ A (nA)}$
Eingangskapazität	$C_i = 0 \text{ F}$	$C_i > 0 \text{ F (pF)}$
Ausgangswiderstand	$R_o = 0 \Omega$	$R_o > 0 \Omega$
Offset-Spannung	$U_{OS} = 0 \text{ mV}$	$U_{OS} \neq 0 \text{ mV}$
Gleichtaktverstärkung	$V_{CM} = 0$	$V_{CM} \neq 0$

Tabelle 5-1: Vergleich: idealer und realer OPV

Für die Analogtechnik ist die Beschaltung des OPVs wesentlich. Aus diesem Grund werden in diesem Abschnitt die Grundsaltungen des OPVs erläutert:

- **Invertierender Verstärker**

In Abbildung 5-2 ist der OPV als invertierender Verstärker beschaltet. Unter Berücksichtigung der Kirchhoff'schen Gesetze und vereinfachenden Annahmen ($U_{Di} = 0 \text{ V}$, $I_i = 0 \text{ A}$) kann die Ausgangsspannung berechnet werden zu:

Es ist leicht erkennbar, dass das Ausgangssignal dem verstärkten und um das Bezugspotential gespiegelten Eingangssignal entspricht.

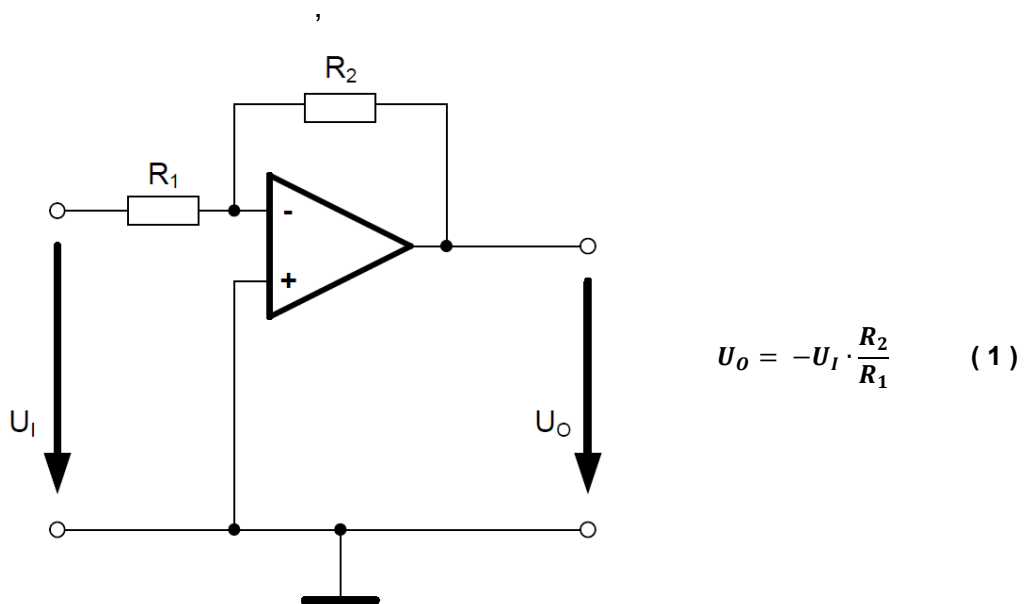


Abbildung 5-2: Schaltbild eines invertierenden Verstärkers, nach [22]

- **Nicht-invertierender Verstärker**

Auch der nicht-invertierende Verstärker führt als Ausgangsspannung das verstärkte Eingangssignal. Allerdings wird das Signal in diesem Fall, wie der Name suggeriert, nicht umgekehrt. Abbildung 5-3 stellt die Beschaltung eines OPVs als nicht-invertierenden Verstärker dar. Dabei verhält sich die Ausgangsspannung wie in Formel (2):

Die Verstärkung der Eingangsspannung entspricht also nicht direkt dem Widerstandsverhältnis – wie es beim Invertierer der Fall ist.

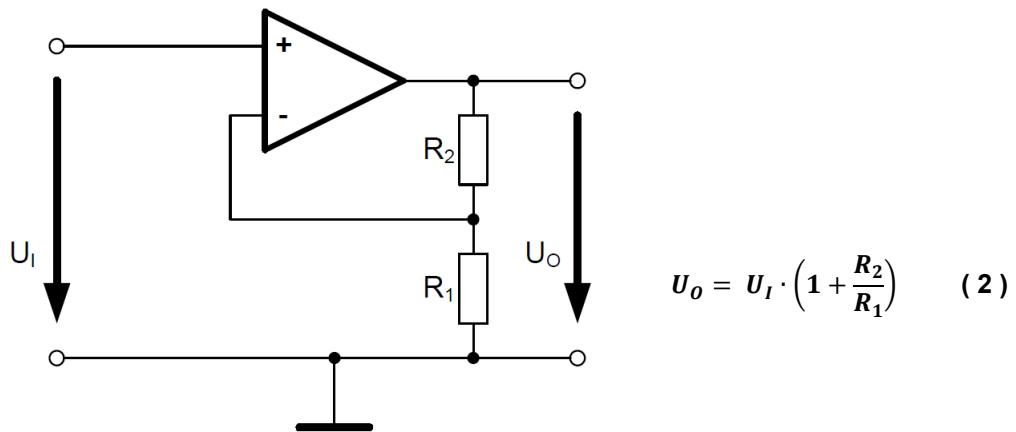


Abbildung 5-3: Schaltbild eines nicht-invertierenden Verstärkers, nach [22]

- **Impedanzwandler – Spannungsfolger**

Abbildung 5-4 zeigt, dass der Impedanzwandler ein Sonderfall des nicht-invertierenden Verstärkers ist. Dabei wird $R_2 = 0$ und $R_1 = \infty$. Das Ausgangssignal entspricht somit dem Eingangssignal:

$$U_o = U_I$$

Einsatz findet der Impedanzwandler vor allem dort, wo eine Messung unbeeinflusst bleiben soll, der Eingangswiderstand der Messwerterfassung jedoch nicht ausreichend groß ist, um die Messung nicht zu belasten.

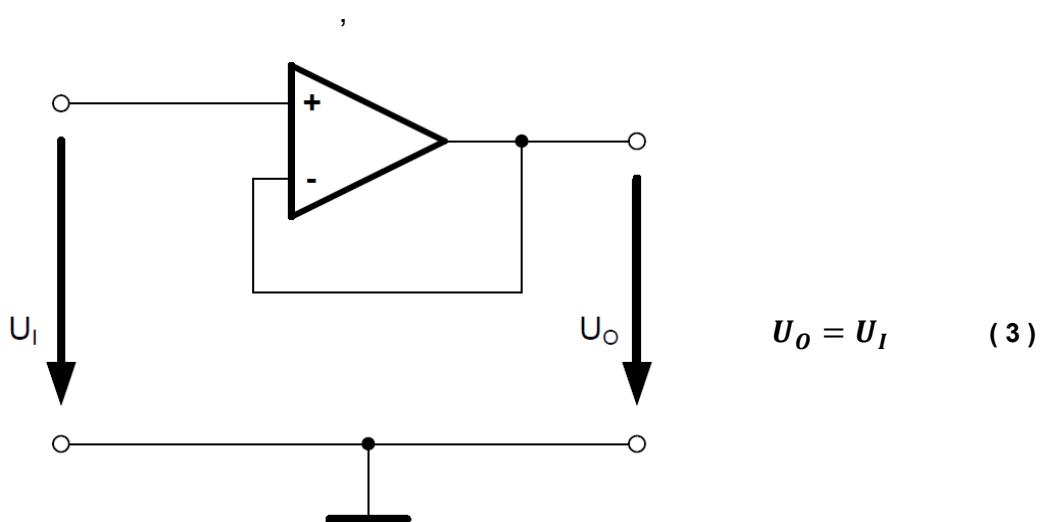


Abbildung 5-4: Schaltbild eines Impedanzwandlers bzw. Spannungsfolgers, nach [21]

- **Differenzverstärker**

Die Ausgangsspannung des Differenzverstärkers, der auch als Subtrahierer bezeichnet wird, ist die verstärkte Differenz der anliegenden Eingangsspannungen. Abbildung 5-5 zeigt die Beschaltung. Meist wird ein Sonderfall des Differenzverstärkers realisiert. Die Widerstandsverhältnisse an den Eingangswiderständen entsprechen einander dabei: $\frac{R_3}{R_1} = \frac{R_4}{R_2}$. Ist dies der Fall, wird die Ausgangsspannung berechnet zu:

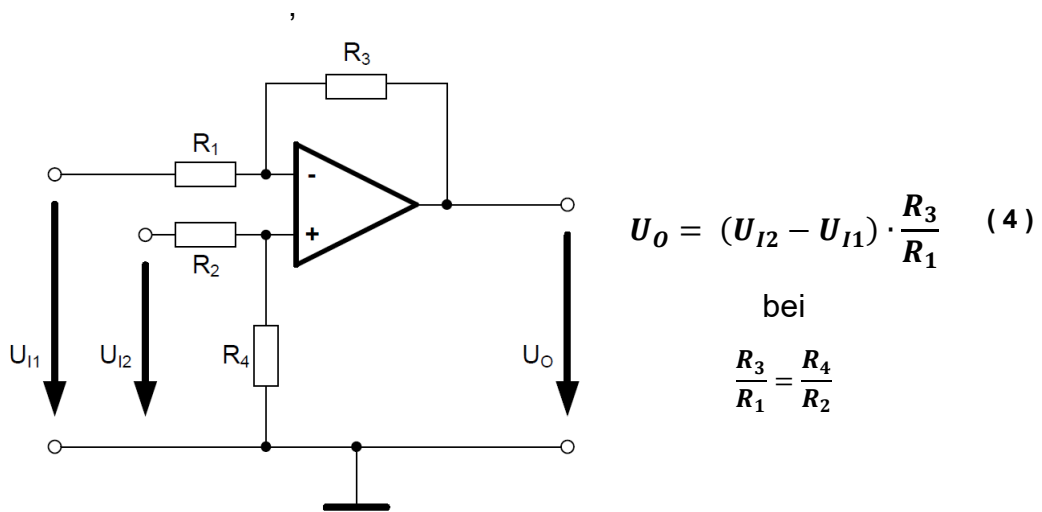


Abbildung 5-5: Schaltbild eines Differenzverstärkers, nach [22]

- **Maximal-Schaltung**

Der Ausgang der Maximal-Schaltung bildet den Maximalwert der eingehenden Signale ab. Dabei kommen Spannungsfolger zum Einsatz, deren Abgriff der Rückkopplung erst einer Diode am Ausgang nachgeschaltet ist. Wie Abbildung 5-6 zeigt benötigt man für jedes Eingangssignal einen Impedanzwandler und eine Diode.

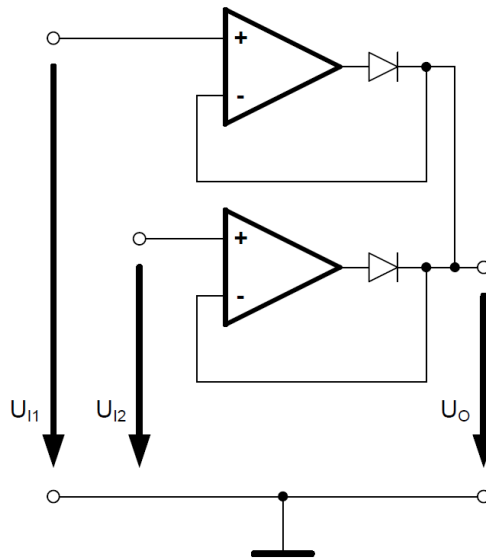


Abbildung 5-6: Schaltbild der Maximal-Schaltung, nach [21]

- **Schmitt-Trigger**

Der Schmitt-Trigger ist eine nicht-lineare Schaltung des OPVs. In der Beschaltung wie in Abbildung 5-7 wird darauf abgezielt, den OPV bewusst in seine Grenzen auszusteuern. Das Funktionsprinzip entspricht dabei jenem eines Komparators mit springender Schaltschwelle:

1. Überschreitet die Eingangsspannung die obere Schaltschwelle U_{TS+} , springt der Ausgang des Schmitt-Triggers auf seinen Minimalwert – LOW.
2. Durch die am Ausgang anliegende Spannung verschiebt sich die Schaltschwelle des Komparators.
3. Der Ausgang springt erst wieder auf seinen Maximalwert, wenn die untere Schaltschwelle U_{TS-} unterschritten wird.

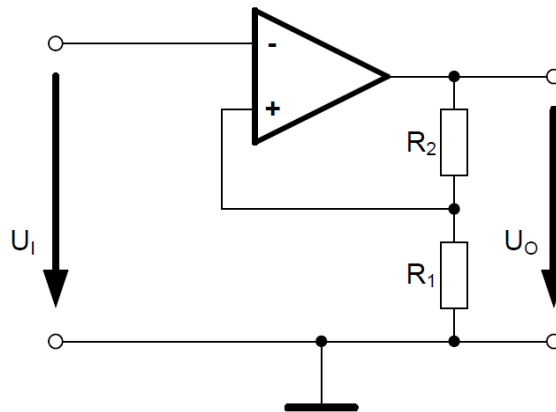


Abbildung 5-7: Schaltbild eines Schmitt-Triggers, nach [21]

- **Fenster-Komparator**

Der Fensterkomparator ist – wie in Abbildung 5-8 dargestellt – aus zwei OPVs aufgebaut. Auch hier wird der OPV nicht-linear betrieben und an seine Grenzen angesteuert. Je nach Beschaltung kann man die Ausgangssignale so kombinieren, dass der Ausgang aufs Maximum oder aufs Minimum schaltet, wenn sich die Eingangsspannung im Spannungsfenster befindet. Dieses wird über den Eingangsspannungsteiler eingestellt. Der Wert des Widerstands R_2 gibt dabei die Fensterbreite an.

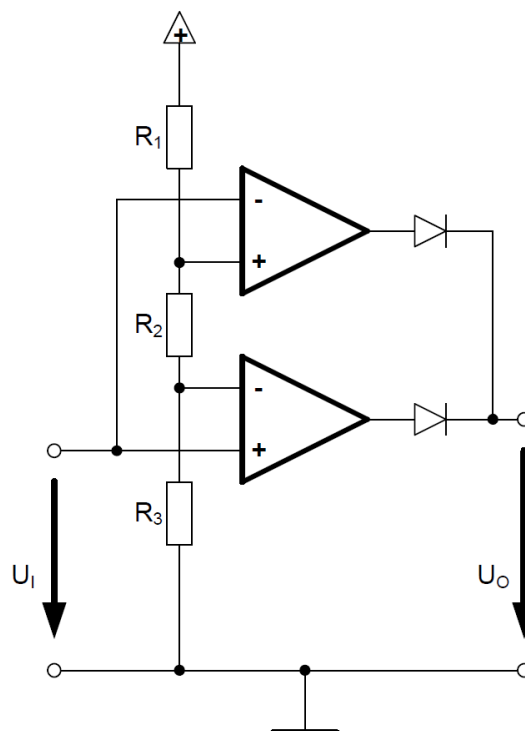


Abbildung 5-8: Schaltbild eines Fenster-Komparators, nach [21]

Die zuletzt vorgestellten, nicht-linearen OPV-Schaltungen dienen häufig zur einfachen Digitalisierung analoger Signale (AD-Umsetzung). Auf diese Weise können diese Signale die nötigen Pegel für eine digitale Weiterverarbeitung einhalten.

5.1.2 Zeitglied

Ein Zeitglied ist im einfachsten Fall aus einem Widerstand und einem Kondensator aufgebaut. Dabei wird der Kondensator über den Widerstand geladen. Die Zeitkonstante $\tau = R \cdot C$ bestimmt dabei, wie schnell der Kondensator geladen wird. Die Spannung am Kondensator ist beim Laden definiert als:

$$U_C = U_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (5)$$

In Verbindung mit einem Schmitt-Trigger kann so bspw. eine Zeitverzögerung oder ein Oszillator aufgebaut werden. Dabei schaltet der Schmitt-Trigger erst, wenn die Spannung am Kondensator den Schwellwert passiert.

Um ein asymmetrisches Zeitglied zu erstellen, können Dioden verwendet werden. In Abbildung 5-9 ist die Funktion eines solchen Zeitgliedes dargestellt. Laden und Entladen erfolgt mittels zweier unterschiedlicher Zeitkonstanten – $\tau_{\text{Laden}} = R_1 \cdot C_1$, $\tau_{\text{Entladen}} = R_2 \cdot C_1$.

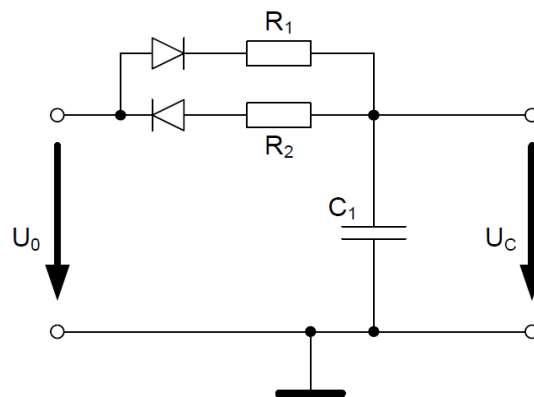


Abbildung 5-9: Schaltbild eines asymmetrischen Zeitgliedes

5.2 Digitale Signalelektronik

Digitale Schaltungskomponenten arbeiten typischerweise mit zwei Pegeln: HIGH und LOW. Dies wird auch als binäre digitale Schaltungstechnik bezeichnet. Dabei sind für digitale Komponenten die Eingangspegel genau definiert. Zwischen diesen Pegeln befindet sich das Signal in einem undefinierten Zustand. [20]

Die digitale Schaltungstechnik basiert auf Verknüpfungen von Eingangssignalen. Das bedeutet, dass die Zustände der Eingangssignale Einfluss auf das Ausgangssignal haben. Je nach Art der Verknüpfung verhält sich der Ausgang unterschiedlich zu den Eingangssignalen. Beispiele für Verknüpfungen sind in Abbildung 5-10 und Abbildung 5-11 zu sehen.

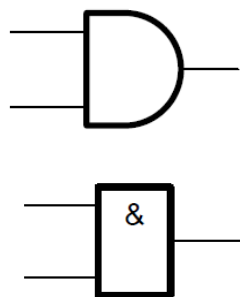


Abbildung 5-10: Symbol ANSI (oben) und IEC (unten) einer AND- Verknüpfung

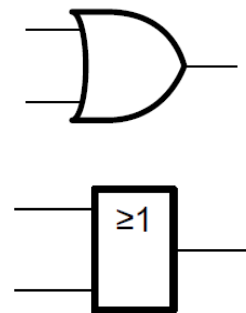


Abbildung 5-11: Symbol ANSI (oben) und IEC (unten) einer OR- Verknüpfung

Zur Veranschaulichung der Funktion einer Verknüpfung dienen Wahrheitstabellen – beispielhaft für eine AND- (UND) und eine OR-Verknüpfung (ODER) in Tabelle 5-2. Diese weisen jedem Zustand der Eingangssignale einen Ausgangszustand zu. Ein Eingang kann zwei unterschiedliche Zustände einnehmen, zwei Eingänge ergeben 4 unterschiedliche Zustände.

Zustand	I ₁	I ₂	O _{AND}
1	0	0	0
2	0	1	0
3	1	0	0
4	1	1	1

Zustand	I ₁	I ₂	O _{OR}
1	0	0	0
2	0	1	1
3	1	0	1
4	1	1	1

Tabelle 5-2: Wahrheitstabelle einer AND (a) und einer OR-Verknüpfung (b)

Pull-Up- und Pull-Down Widerstände sind der erste Schritt von der analogen Schaltungstechnik hin zur digitalen Weiterverarbeitung. Die Ausgangsspannung

von OPVs im nicht-linearen Betrieb springt normalerweise zwischen Minimum und Maximum. Um Zwischenzustände zu verhindern, muss auf die richtige Beschaltung der OPV-Ausgänge geachtet werden. Eine Variante ist das Wired-AND wie in Abbildung 5-12 zu sehen.

Die Wahrheitstabelle einer AND-Verknüpfung ist Tabelle 5-2 zu entnehmen. Dabei liegt am Ausgang lediglich ein HIGH-Pegel an, wenn alle OPV-Ausgänge ins Maximum ausgelenkt sind. Liegen beide Eingangssignale auf HIGH so zieht der Pull-Up-Widerstand am Ausgang das Signal auf HIGH. Schaltet eines der Eingangssignale auf LOW, so wird das Ausgangssignal auf LOW gezogen – die Spannung fällt am Widerstand ab. Es ist darauf zu achten, dass die Stromsenke entsprechende Ströme treiben kann – bei 12 V und 47 k Ω wären dies 255 μ A.

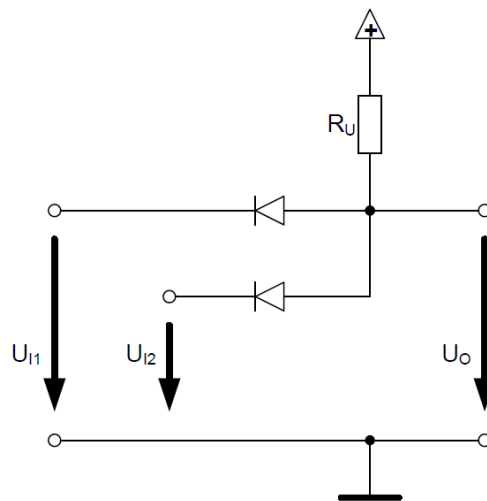


Abbildung 5-12: Schaltbild einer Wired-AND-Verknüpfung, nach [23]

5.2.1 NOT-Verknüpfung

Zu den Grundgliedern der digitalen Schaltungstechnik gehören die AND-, die OR- und die NOT-Verknüpfung. Das Verhalten der Verknüpfungen ist aus den Wahrheitstabellen in Tabelle 5-2 und Tabelle 5-3 ersichtlich. Die NOT-Verknüpfung (NICHT) – in Abbildung 5-13 zu sehen – besitzt eine einfachere Funktion: ein eingehendes digitales Signal wird invertiert.

Zustand	I ₁	O _{NOT}
1	0	0
2	1	1

Tabelle 5-3: Wahrheitstabelle einer NOT-Verknüpfung

Häufig sind NOT-Verknüpfungen in Kombination mit anderen Verknüpfungen zu finden. Dabei wird es als Kreis bei Ein- oder Ausgang der jeweiligen Verknüpfung dargestellt – siehe Abbildung 5-14.

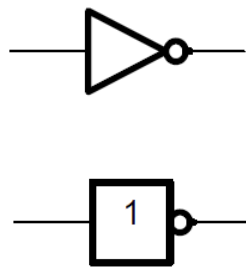


Abbildung 5-13: Symbol ANSI (oben) und IEC (unten) einer NOT-Verknüpfung

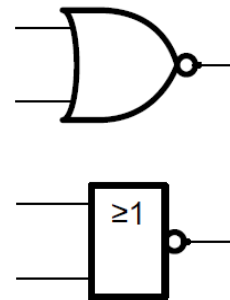


Abbildung 5-14: Symbol ANSI (oben) und IEC (unten) einer NOR-Verknüpfung

Im diesem Projekt kommt für diese Anwendung der CMOS-Baustein 40106 zum Einsatz, ein 6-fach-Inverter mit Schmitt-Trigger an den Eingängen. Der Baustein besitzt 14 Pins und kann mit Spannungen zwischen 3 und 15 V versorgt werden.

5.2.2 NAND-Verknüpfung

Eine NAND-Verknüpfung erstellt man, indem man einer AND-Verknüpfung eine NOT-Verknüpfung nachschaltet – Abbildung 5-15. Dadurch wird der Ausgang des UND-Gliedes stets invertiert weitergegeben. Dies ist aus der Wahrheitstabelle in Tabelle 5-4 erkennbar.

NAND-Verknüpfungen werden in der digitalen Schaltungstechnik häufig eingesetzt, da sich alle Grundschaltungen mit ihnen realisieren lassen und ihr innerer Aufbau selbst relativ einfach ist.

Zustand	I ₁	I ₂	O _{NAND}
1	0	0	1
2	0	1	1
3	1	0	1
4	1	1	0

Tabelle 5-4: Wahrheitstabelle einer NAND-Verknüpfung

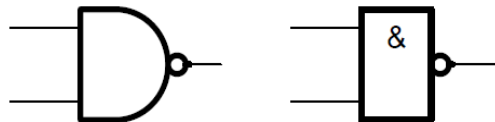


Abbildung 5-15: Symbol ANSI (links) und IEC (rechts) einer NAND-Verknüpfung

In der praktischen Schaltungselektronik wird häufig auf den CMOS-Baustein 4093 zurückgegriffen. Als 4-fach-NAND mit Schmitt-Trigger Eingängen besitzt er ähnliche Eigenschaften wie der Baustein 40106: 14 Pins, 3 ... 15 V Versorgungsspannung. Die Schmitt-Trigger an den Eingängen dienen dazu unzulässige Pegel zu vermeiden und werden wie in Abbildung 5-16.

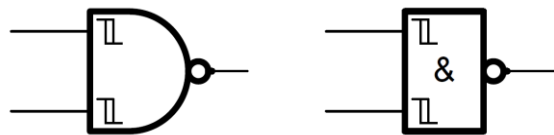


Abbildung 5-16: Symbol ANSI (links) und IEC (rechts) einer NAND-Verknüpfung mit Schmitt-Trigger-Eingängen

5.2.3 Flipflop / NAND-Latch

Ein Flipflop (FF) ist eine 1Bit-Speicherschaltung bzw. eine bistabile Kippstufe. Das Flipflop ist somit in der Lage einen Zustand am Eingang zu speichern und zu halten. Es besitzt grundsätzlich zwei Eingänge – Setzen und Rücksetzen des Flipflops – und zwei Ausgänge – nicht-invertierend und invertierend. Ist ein Flipflop zeitgesteuert, so wird der Zustand bis zum nächsten Takt gespeichert und dann der an den Eingängen detektierte Zustand übernommen. Ist ein Flipflop ereignisgesteuert wird der neue Zustand erst übernommen, wenn sich die Eingangssignale ändern (Latch). Die Funktion des Flipflops kann der Wahrheitstabelle in Tabelle 5-5 entnommen werden.

Eine sehr einfache Methode ein ereignisgesteuertes Flipflop, aufzubauen ist das NAND-Latch. Die Verschaltung von NANDs zum Aufbau eines NAND-Latches ist in Abbildung 5-17 ersichtlich. Die Funktion des NAND-Latches ist aus seiner Wahrheitstabelle – Tabelle 5-5 – ersichtlich. Ein wesentlicher Punkt ist die Dominanz der Eingänge. Je nach Schaltungsart ist einer der Eingänge dem anderen gegenüber höhergestellt. Im Falle des NAND-Latches wird ein LOW-Signal am I_2 -Eingang immer ein HIGH-Signal am Ausgang O_{FF2} hervorrufen. Bedingung dafür ist, dass sich das Flipflop zuvor in einem definierten Zustand befunden hat. Um ein Flipflop in einen definierten Zustand zu bringen, ist es wesentlich, einen Eingang mit einer Hochfahrerschaltung – bspw. einem Zeitglied – zu beschalten.

Zustand	I_1	I_2	O_{FF2}	O_{FF1}	Funktion
1	0	0	1	1	unzulässig
2	0	1	0	1	Rücksetzen
3	1	0	1	0	Setzen
4	1	1	$O_{FF2}(t-1)$	$O_{FF1}(t-1)$	Speichern

Tabelle 5-5: Wahrheitstabelle eine NAND-Latches

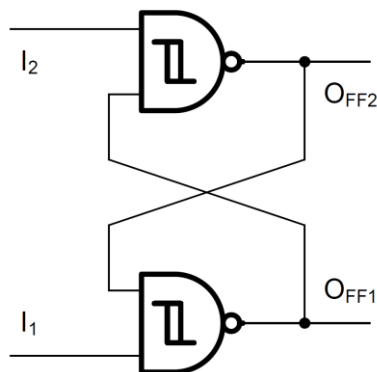


Abbildung 5-17: Verschaltung zweier NAND-Verknüpfungen zu einem Latch / Flipflop, nach [20]

5.2.4 Datenselektor, Multiplexer, Demultiplexer

Ein Datenselektor ist eine elektronische Komponente, die dazu dient, mehrere Signale auf einer Leitung zu transportieren. Es liegen sämtliche Signale am Eingang des Datenselektors an. Über Adressierung wird jener Eingang ausgewählt, der auf den Ausgang durchgeschaltet werden soll. Erfolgt diese Umschaltung periodisch, so spricht man von Multiplexing. Es werden also sämtliche Eingangssignale zeitlich nacheinander auf einer Leitung übertragen.

Um diese Signale wieder aufzugliedern ist das Demultiplexing nötig. Ein Demultiplexer formt aus dem neu erzeugten Eingangssignal wiederum mehrere Signale, die an den Ausgängen anliegen. Den Ausgang, an dem ein bestimmtes Signal anliegt, bestimmt wiederum die Adressierung am Demultiplexer.

Eine einfache Anwendung des (De-)Multiplexings ist die Ansteuerung unterschiedlicher Eingänge über Adressleitungen. So können mithilfe von drei Adressleitungen acht Signalleitungen beschaltet werden ($2^3 = 8$). Der Eingangswert bleibt dabei stets derselbe. Dies hat den Vorteil, dass die Anzahl von Leitungen zwischen Adressquelle und Signalsenke reduziert wird.

5.2.5 Digitale Datenerfassung

Bei der digitalen Datenerfassung geht es um die Aufnahme von Signalen in ein digitales System. Allgemein wird unter Datenerfassung die Messung der gewünschten Größen und ihre Speicherung verstanden. Dabei können Signale bereits in digitaler Form oder als Analogsignale vorliegen.

Da Geräte zur Datenerfassung meist vorgegebene Pegel verwenden, kann es unter Umständen nötig sein, Pegelwandler einzusetzen. Deren Aufgabe ist die Umwandlung des gegebenen Signals auf die für die Erfassung nötigen Spannungsniveaus.

Zur Erfassung analoger Größen müssen diese Signale zuerst in digitale Form gebracht werden. Zu diesem Zweck kommen Analog-Digital-Wandler (ADC) zum Einsatz. ADCs sind Schaltungen, die periodisch den Analogwert abtasten und digital codiert weitergeben. Bei einer AD-Wandlung geht stets Information verloren. Unterschiedliche Parameter klassifizieren AD-Wandler:

- **Verfahren**

Es gibt unterschiedliche Verfahren zur AD-Wandlung. Diese unterscheiden sich grundsätzlich in Aufbau, technischem Aufwand, erreichbarer Präzision und Abtastrate.

In diesem Abschnitt soll nur das „Successive Approximation“-Verfahren erklärt werden. Es wird aufgrund des geringen Aufwandes häufig angewandt.

- **Abtastrate**

Wie erwähnt arbeitet ein ADC periodisch. Die invertierte Dauer der Erfassung eines Messwertes ist die Abtastrate eines ADC. Diese ist ein maßgeblicher Parameter. Nach dem Nyquist-Theorem muss die Abtastrate zur Digitalisierung mehr als doppelt so hoch sein wie dessen maximale Frequenz.

- **Auflösung**

Die Auflösung von ADC und DAC wird häufig in Bit angegeben. Dabei handelt es sich um die Anzahl an Stellen, die ein ADC binär darstellen kann. Ist eine Änderung des analogen Signals kleiner als ein Digit – die aus der Auflösung und dem Messbereich resultierende minimale Spannungsänderung – so erfasst der ADC diese Signalschwankung nicht. Im Extremfall besitzt ein ADC lediglich ein Bit. Er kann also nur beschreiben, ob sich ein analoges Signal über oder unter einem festgelegten Schwellwert befindet.

Der umgekehrte Prozess, also die Wandlung von digitalen in analoge Signale nennt sich Digital-Analog-Wandlung (DAC)

Ablauf einer AD-Wandlung per „Successive Approximation“:

1. Eine Sample-and-Hold-Schaltung hält das Signal für die Dauer der AD-Wandlung konstant
2. Der Signalwert wird mit einem Referenzwert, der von einem internen DAC zur Verfügung gestellt wird, verglichen. Das Ergebnis – größer oder kleiner – ergibt eine Stelle im binären Wert für die digitale Erfassung des Signals.
3. Je nach erfasstem Wert – 1 oder 0 –, wird die Referenzspannung durch den internen DAC erhöht oder gesenkt.
4. Schritte 2 und 3 wiederholen sich n-Mal. n steht dabei für die Auflösung des ADC. Die Spannungsänderung in Schritt 3 beträgt dabei die Hälfte der Differenz im vorangegangenen Schritt. Nachdem der Wert n-Mal verglichen wurde, wird das Signal in digitaler Form weitergegeben und der Vorgang wiederholt sich.

Bei ADC auf Successive-Approximation-Basis ist die Abtastrate direkt von der Auflösung abhängig. Die Genauigkeit hängt stark von der vom DAC gelieferten Spannung ab.

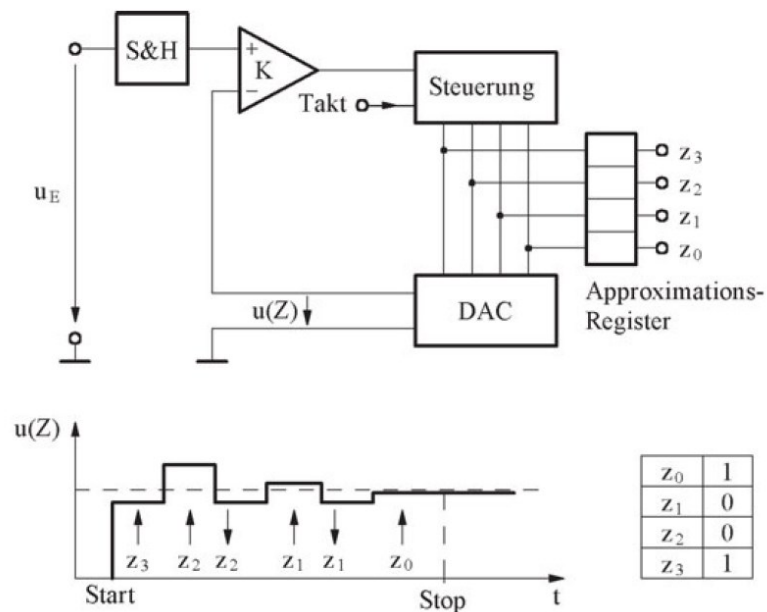


Abbildung 5-18: Aufbau (a) und Ablauf (b) einer 4bit-AD-Wandlung per Successive Approximation [24]

5.3 Leistungselektronik

Die Leistungselektronik ist ein Teilgebiet der Elektronik, das sich mit dem Schalten und Regeln hoher Ströme bzw. hoher Spannungen auseinandersetzt. In den letzten Jahrzehnten hat diese Sparte bemerkenswerte Fortschritte gemacht. Die Herstellung leistungsfähiger Halbleiter-Komponenten hat einen Einsatz in der Starkstrom-Technik möglich und die industrielle Fertigung wirtschaftlich gemacht. Diese Entwicklung beeinflusst weitere Gebiete der Elektrotechnik wie bspw. die elektrische Antriebstechnik. Die kosteneffiziente Fertigung von Frequenzumrichtern mit Halbleiter-Ventilen brachte unter anderem die Asynchron-Maschine auf ihre vorherrschende Stellung in der Antriebstechnik der Kraftmaschinen.

5.3.1 MOSFET

Metalloxidhalbleiter-Feldeffekttransistoren (metal oxide semiconductor field effect transistor, MOSFET) erfreuen sich aufgrund Ihrer einfachen Ansteuerung, ihrer

hohen Schaltfrequenz und der hohen Schaltströme großer Popularität. Der MOSFET arbeitet auf dem Prinzip des elektrischen Feldes. Dabei wird ein Ladungsträgerkanal gebildet, sobald eine ausreichende Steuerspannung anliegt.

MOSFET-Typen können unterschieden werden durch:

- Kanal-Typ
 - P-Kanal
 - N-Kanal
- Elektrische Eigenschaft im Ruhezustand
 - Anreicherungstyp (enhancement type) – selbstsperrend
 - Verarmungstyp (depletion type) – selbstleitend

Der typische MOSFET besitzt – wie in Abbildung 5-19 dargestellt – drei Anschlusspins – Gate, Drain und Source. Die Steuerspannung wird zwischen Gate und Source angelegt. Überschreitet U_{GS} einen Schwellwert – üblicherweise im Bereich von etwa 4.5 V –, verliert der Drain-Source-Strang den Großteil seines hohen Widerstandes. Ein kleiner $R_{DS,On}$ – im $m\Omega$ -Bereich (abhängig von Kanal-Typ und maximalem Drain-Strom) – bleibt vorhanden und verursacht Verluste. Zusätzlich ist aus dem Schaltsymbol des MOSFETs erkenntlich, dass antiparallel zum Drain-Source-Strang eine weitere Diode geschaltet ist. Diese Diode, auch Body-Diode genannt, wird vom inneren Aufbau des MOSFETs vorgegeben. Sie begrenzt den Einsatz des MOSFETs als Schalter in eine Stromrichtung.

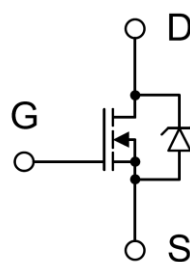


Abbildung 5-19: Schaltsymbol eines n-Kanal MOSFETs (enhancement type) mit Gate (G), Drain (D) und Source (S) sowie Body-Diode

Da der MOSFET mithilfe des elektrischen Feldes schaltet, besitzt er parasitäre Kapazitäten zwischen Gate und Source sowie zwischen Gate und Drain. Bei leistungstreibenden MOSFET-Schaltern ist hierbei auf die sichere Operation während des Schaltvorganges zu achten. Dauert der Schaltvorgang zu lange, verursacht die anliegende Spannung in Verbindung mit dem Drain-Strom eine

Leistungsdissipation, die den Halbleiterübergang aufheizt und im schlimmsten Fall thermisch zerstört. Daher muss der Schaltvorgang möglichst schnell durchgeführt werden. Um die Kapazität des MOSFETS schnell zu laden, werden Treiber-ICs eingesetzt, die den nötigen Strom zur Verfügung stellen können.

5.3.2 Schottky-Diode

Wie übliche Signaldioden lassen Schottky-Dioden – siehe Abbildung 5-20 – den Strom nur in einer Richtung passieren. Allerdings haben sie aufgrund ihrer Anatomie gegenüber herkömmlichen Signal-Dioden eine kürzere Schaltzeit sowie einen geringeren Spannungsabfall. Letztere Eigenschaft lässt einen Einsatz im Leistungskreis zu. Bei hohen Strömen steigt die abfallende Spannung an. Das Produkt aus dem Spannungsabfall und dem Strom durch die Diode ist die dissipierte Leistung. Über Kühlkörper muss diese abgeführt werden, andernfalls würde sich der Halbleiterübergang bis zur Zerstörung erwärmen. [23]

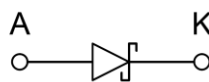


Abbildung 5-20: Schaltsymbol einer Schottky-Diode mit Anode (A) und Kathode (K)

5.3.3 Koaxial-Shunt

Die Detektion von Fehlerströmen – wie im Kurzschlussfall – stellt die Datenverarbeitung vor gewisse Herausforderungen. Problematisch bei stark ansteigenden Strömen ist die Trägheit des Systems wegen des induktiven Einflusses. Wird die Strommessung über Shunts realisiert, so können induktive Einkopplungen die Messung stören. Die Shunt-Impedanz steigt mit der Frequenz, da die Anschlüsse des Shunts eine Induktivität darstellen.

Grundsätzlich werden Shunts bei hohen Strömen mit der Vierleiter-Methode gemessen, um eine möglichst genaue Messung zu ermöglichen und Übergangswiderstände auszuschließen. [25]

Koaxial-Shunts sind zusätzlich so aufgebaut, dass sich die Magnetfelder von zu und Ableitung des Stromes ausgleichen. Dabei sind Widerstand, Rückleiter und Messleitungen koaxial aufgebaut.

Ein einfacherer und kostengünstigerer Aufbau ist in Abbildung 5-21 zu sehen. Bei diesem Aufbau ist die Feldfreiheit nach außen hin nicht gegeben. Somit besitzt der Shunt eine gewisse induktive Rückwirkung auf das Gesamtsystem. Durch den koaxialen Aufbau von Shunts und Messwertaufnahme um die Achse eines Koaxialkabels ist dieser Bereich jedoch weitestgehend feldfrei. Auf diese Weise können induktive Einkopplungen wesentlich reduziert und eine schnelle und störarme Messung realisiert werden.

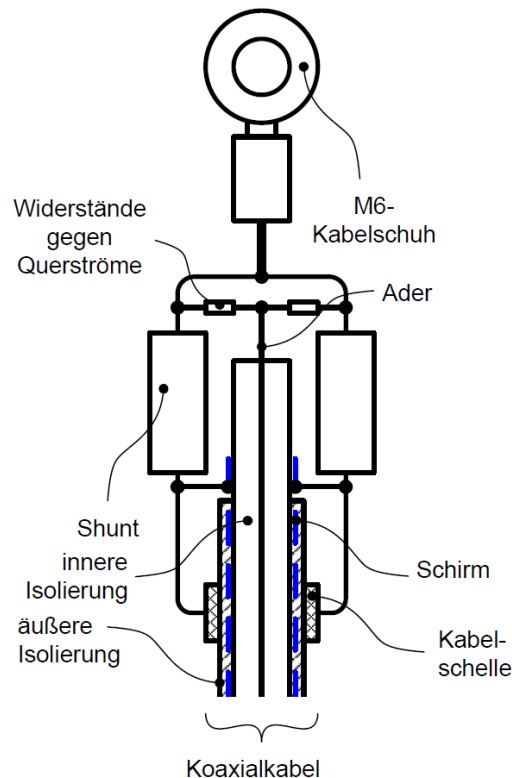


Abbildung 5-21: Kostengünstiger Aufbau eines Koaxial-Shunts

5.4 Software

Im folgenden Abschnitt wird ein Überblick über die eingesetzte Software gegeben. Es wird jene Software behandelt, die für die technische Umsetzung relevant ist.

5.4.1 LabVIEW

Die Software LabVIEW des Herstellers National Instruments ist eine grafische Programmierumgebung. LabVIEW bietet eine einfache und schnelle Möglichkeit, Programme mit Benutzeroberfläche zu erstellen – „What you see is what you get“.

Nicht nur das User-Interface ist dabei grafisch editierbar, auch die Programmierung erfolgt über grafische Elemente. Neben dem einfachen Einstieg in das Programmieren mit LabVIEW bietet National Instruments viele kompatible Hardware-Komponenten zur Datenerfassung und Messung an.

Ein Programm wird in einem sogenannten virtuellen Instrument (VI) aufgebaut. Dem übergeordneten VI können SubVIs zugeteilt werden, die wie Funktionen innerhalb des „Mutter“-VIs ausgeführt werden können.

Wie aus Abbildung 5-22 ersichtlich, ist LabVIEW grundsätzlich aus zwei Oberflächen aufgebaut: dem Frontpanel und dem Blockdiagramm. Diese können jedem VI zugeteilt werden.

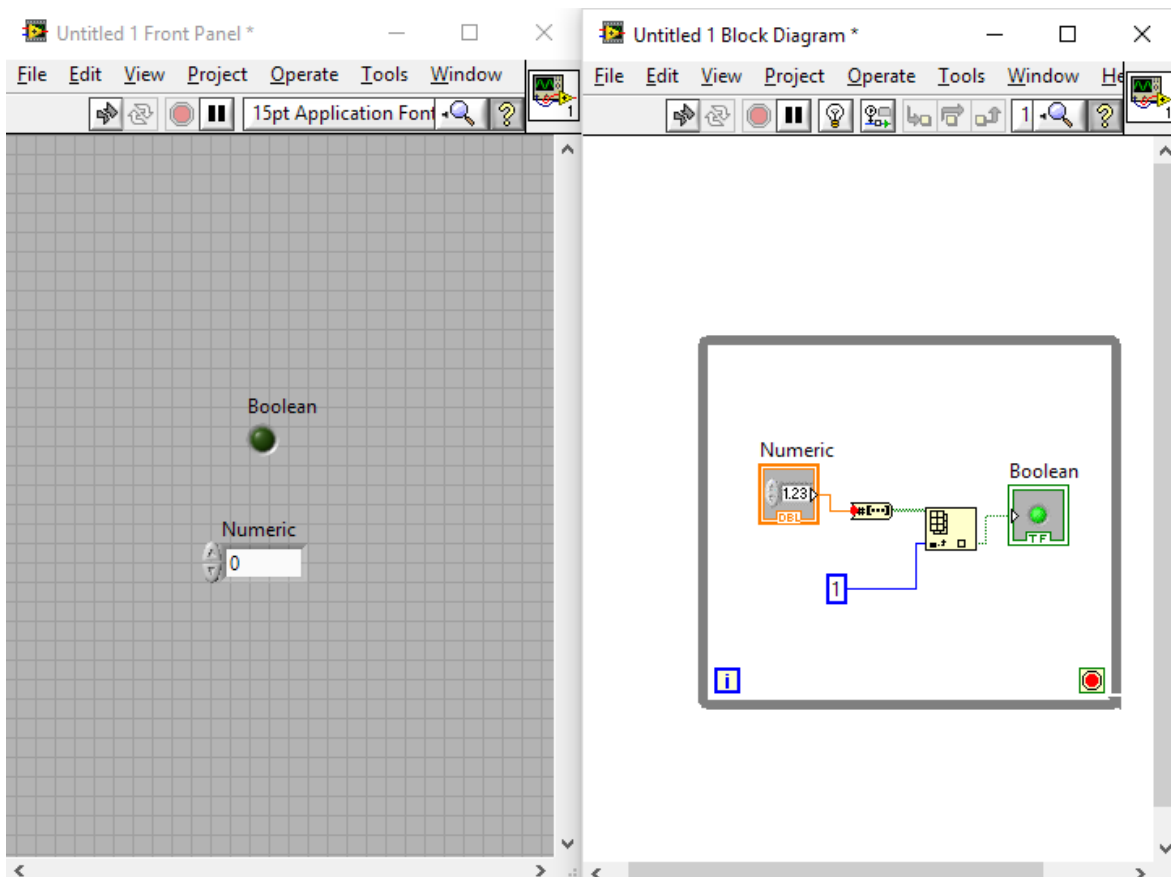


Abbildung 5-22: Front Panel und Blockdiagramm von National Instruments LabVIEW

Das Frontpanel ist die Benutzeroberfläche und lediglich im Betrieb aktiv. Elemente des Frontpanels können beliebig verschoben und bearbeitet werden. Dabei kann zwischen Anzeige- und Bedienelementen unterschieden werden. Während Anzeigeelemente Informationen an den Benutzer weiterleiten, kann dieser mithilfe von Bedienelementen in den Programmablauf eingreifen.

Im Blockdiagramm erfolgt die logische Programmierung der gewünschten Funktionen der Frontpanel-Elemente. Dabei unterscheidet man [26]:

- **Knoten**

Knoten sind mit Operationen vergleichbar. Ein „+“-Knoten etwa addiert angeschlossene Datenströme und gibt das Ergebnis zurück.

- **Anschlüsse / Terminals**

Um Daten in einem Knoten verarbeiten zu können, benötigt dieser Anschlüsse. An den Anschlüssen müssen die nötigen Daten zur Verfügung gestellt bzw. können generierte Daten übergeben werden.

- **Verbindungslinien / Drähte**

Drähte verbinden Terminals. Sie übertragen Daten von Element zu Element. Dabei ist einem Draht immer ein bestimmter Datentyp zugeordnet. Eine Mischung von Datentypen ist nicht möglich. Daher ist immer darauf zu achten, welche Terminals mit Drähten verbunden werden.

- **Funktionen**

Funktionen sind Unterprogramme, die der weiteren Datenverarbeitung dienen. Mithilfe von Funktionen können unterschiedliche Ziele erreicht werden. So kann beispielsweise einem Datenstrom ein ganz bestimmter Wert entnommen werden oder der Maximalwert eines Arrays bestimmt werden.

- **Strukturen**

LabVIEW stellt grundsätzlich drei unterschiedliche Strukturarten zur Verfügung: Schleifen, Alternative / Auswahl und Sequenz.

Schleifen werden wie in der herkömmlichen Programmierung eingesetzt. Dabei wird der Teil des Programms, der wiederholt werden soll, in den Rahmen der Schleife geschrieben.

Die Alternativ-Struktur „Case“ kann wie eine Auswahl bzw. eine Bedingung in der herkömmlichen Programmierung gesehen werden.

Die Sequenz ist als vorgegebene Reihenfolge im Programmablauf zu verstehen. Während in anderen Programmiersprachen Befehl für Befehl abgearbeitet wird, ist dies in LabVIEW nicht immer der Fall. Aus diesem Grund kann man über Sequenzen einen Ablauf vorgeben.

LabVIEW orientiert sich sehr stark an den verwendeten Datentypen. So ist die Struktur des Elemente-Menüs im Blockdiagramm in unterschiedliche Datenformen – wie Numerisch, Arrays, Cluster, Boolesch und String – eingeteilt. Diese Datenformen können untereinander nicht direkt verbunden werden. Für Verbindungen zwischen unterschiedlichen Datenarten stehen viele Funktionen zur Konversion zur Verfügung.

5.4.2 TARGET 3001!

TARGET 3001! vom Ing.-Büro Friedrich ist eine Software zur Schaltplan- und Layout-Erstellung.

Bereits bei der Erstellung des Schaltplans – siehe Abbildung 5-23 – ist die Auswahl der Elektronikkomponenten von Bedeutung, da diese später im Layout mit dem gewählten Gehäuse eingefügt werden. Die eingesetzten Bauteile können aus einer Bibliothek entnommen werden. Diese Bibliothek kann durch herstellerspezifische Bibliotheken erweitert werden. Bauteile, die nicht in der Bibliothek enthalten sind, können vollständig neu generiert oder aus bestehenden Bauteilen zusammengestellt werden.

Ein Layout kann ein-, zwei- oder mehrlagig aufgebaut sein. Layer, die zu- oder weggeschaltet werden können, dienen zur besseren Übersicht bei der Erstellung eines Layouts. In Abbildung 5-24 ist das Programm im Layout-Entwurfsmodus zu sehen. Im Bild ist der blaue TOP-Layer der Platine zu sehen, d.h. jene Bereiche, die bei Fertigung elektrisch leitend auf der Oberseite der Platine sind. Dabei ist zu beachten, dass der fertige TOP-Layer der Platine ebenso aus einzelnen Layern in TARGET 3001! aufgebaut ist.

Ein fertiges Layout kann in gängige Produktionsformate konvertiert werden.

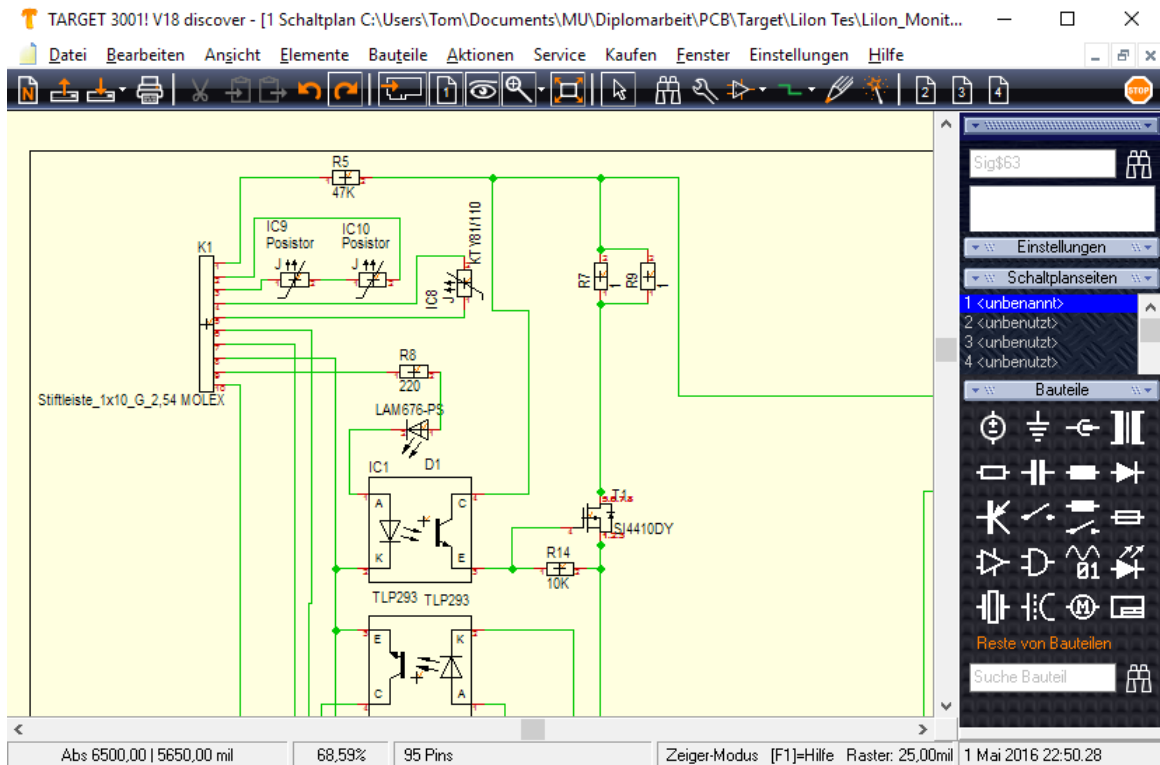


Abbildung 5-23: TARGET 3001! im Modus zur Erstellung von Schaltplänen

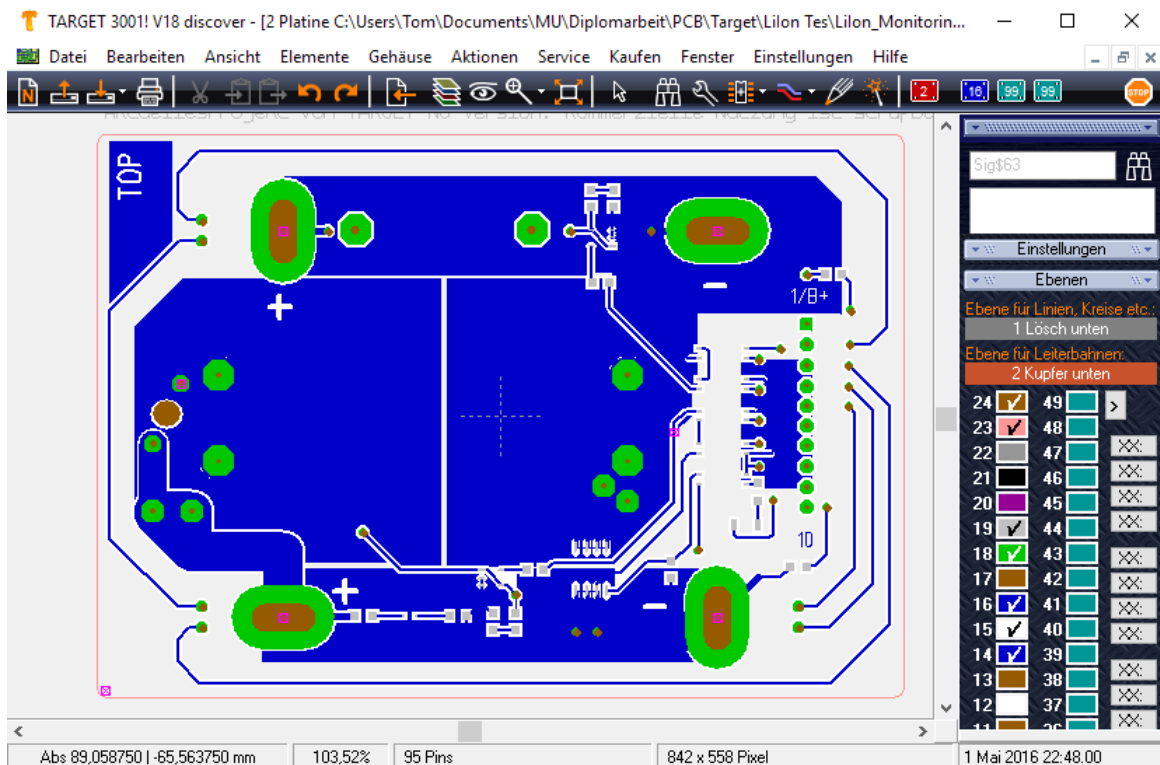


Abbildung 5-24: TARGET 3001! im Entwurfsmodus für Layouts

6 Technische Umsetzung

Das folgende Kapitel behandelt die technische Umsetzung des Messsystems. Dabei wird näher auf die Erarbeitung eines Konzepts, den bereits erreichten Status und die eingesetzten Komponenten und Schaltungen eingegangen. Die Anforderungen sowie Vorgaben für die Umsetzung des Projekts können Kapitel 2 entnommen werden.

6.1 Konzept

Da die Zellen in einem Modul zweifach parallel und sechsfach in Serie geschaltet sind, bedeutet dies bei richtiger Kontaktierung, dass jeweils an zwei Zellen dieselbe Zellspannung anliegt. Die Spannung an einem Zellpaar sollte über Messwerterfassung aufgenommen und mittels Balancing beeinflusst werden können. Daher muss eine Realisierung des Systems zumindest den Abgriff der Kontakte eines Zellpaares vorsehen.

Eine weitere Aufgabenstellung ist der Schutz jeder einzelnen Zelle in Bezug auf Übertemperatur sowie Über- und Unterspannung. Auf dieser Prämisse basiert die Notwendigkeit, jede Zelle individuell thermisch und elektrisch zu kontaktieren.

Um das Messsystem möglichst rasch bedienen zu können, ist die Verdrahtung jeder einzelnen Zelle mit Temperatursensor und Spannungsabgriff zu optimieren. Zusätzlich suggeriert der spätere Einsatz in Fahrzeugen eine galvanische Trennung einzelner Zellmodule. Dies basiert auf den Spannungspegeln von Elektronik – zumeist zwischen 3 und 18 V – und jenen, die bei serieller Verschaltung von 24 Modulen erreicht werden – zwischen 430 und 600 V. Innerhalb eines Hochenergiemoduls schwankt der Spannungspegel zwischen 18 und 25.2 V.

Als Lösungsvorschlag wurde ein teilzentrales Konzept erarbeitet, das modular aufgebaut ist und dessen Baugruppen bei Bedarf oder Verbesserung ersetzt werden können. In Abbildung 6-1 ist das fertige Konzept visuell dargestellt. Im Folgenden sollen die Komponenten und Funktionen nochmals erklärt werden.

- Jedes Zellpaar erhält eine Schutzplatine mit jeweils 10 gesammelten Signalleitungen. Die Funktion der Platine enthält:
 - die Ausführung des passiven Balancings über Dissipation
 - die galvanische Trennung aller digitalen Signale
 - die Weiterführung des analogen Zellspannungssignals
 - die Beherbergung des Thermistors zur Detektion von Übertemperatur je Zelle sowie des Temperatursensors zur Temperaturmessung je Zellpaar
 - die Zellspannungsüberwachung und Weiterleitung eines Signals bei Über- bzw. Unterschreitung

- In einer zentralen Stelle werden alle Signalkabel der Schutzplatinen zusammengefasst und verarbeitet. Des Weiteren soll diese Hardwarekomponente die Schnittstelle zum Datenerfassungsgerät USB6009 sowie zur Strommessung und der Leistungselektronik enthalten. Die Funktionen dieser Komponente soll enthalten:
 - Versorgung der Komponenten des Platinen-Stacks mit einer konstanten bipolaren Spannung von + / - 12 VDC aus + / - 15 ... 18 VDC
 - Verarbeitung der Signale für die Schutzfunktionen
 - Temperatur
 - Strom
 - Spannung
 - deren Speicherung
 - Benutzer-Interface (LEDs und Taster) zum Zurücksetzen nach Fehlerbehebung
 - Verarbeitung und Maximalwertbildung der Temperatursignale und Umsetzung auf kompatible Pegel – für USB6009
 - Verarbeitung der Spannungssignale und Umsetzung auf kompatible Pegel – für USB6009

- Übergabe der Signale an das USB6009
- Pegelumsetzung der digitalen Signale vom USB6009
- Verarbeitung des Balancing-Signals vom USB6009 und Übergabe an einzelne Schutzplatinen.
- Eine weitere Komponente dient zur Signalverarbeitung der Strommessung und der Ansteuerung der Leistungselektronik. Aufgaben dieses Hardware-Teils sind:
 - Versorgung der Komponenten der Platine mit einer konstanten bipolaren Spannung von $+ / - 12 \text{ VDC}$ aus $+ / - 15 \dots 18 \text{ VDC}$
 - Speicherung von Fehlern in einem separaten Speicher und manuelle Freigabe des Leistungsteils
 - Schutzabschaltung bei Überstrom
 - Verarbeitung des Stromsignals und Umsetzung auf kompatible Pegel – für USB6009
 - Ansteuerung der Relais und leistungselektronischer Bauteile
 - Beherrschung der Treiber für leistungselektronische Bauteile
- Die Leistungselektronik beinhaltet die stromtragenden Komponenten sowie die Messwerterfassung des Stroms. Aufgaben der Leistungselektronik sind:
 - Versorgung der Komponenten der Relais mit einer konstanten Spannung von $+ 12 \text{ VDC}$ aus $+ / - 15 \dots 18 \text{ VDC}$
 - Relaischaltung zum Umschalten zwischen Laden und Entladen der Batterie
 - Schalten des Stroms
 - Beherrschung von Fehlerströmen
 - Leistungstragender Anschluss von Batterie, Last und Ladegerät

Ähnliche Konzepte zum Batteriemangement finden in kommerziellen Anwendungen Einsatz. [10]

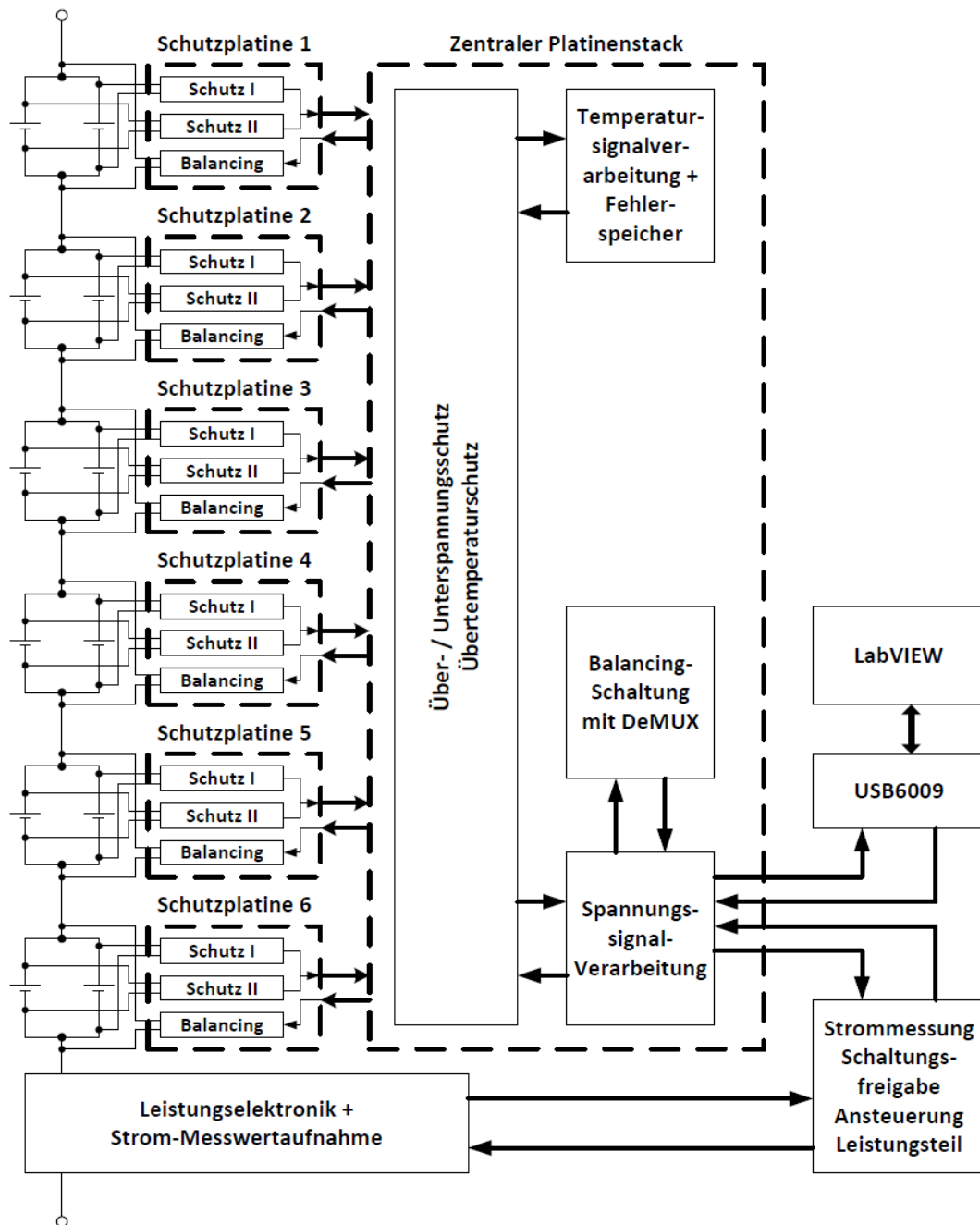


Abbildung 6-1: Grafische Darstellung des Gesamtkonzepts für das Messsystem

6.2 Bestandsaufnahme

Auf dem Gebiet des Balancings und des Batteriemangements von Lithium-Ionen-Batterien wurden am IET bereits einige Arbeiten durchgeführt. Viele dieser Arbeit behandeln dieselbe Art von Lithium-Ionen-Hochenergiezellen, die bereits im Abschnitt 2.2.1 behandelt wurden. Eine Masterarbeit basiert ebenfalls auf dem passiven Balancing dieses Zelltyps. [27]

Im Unterschied zu dieser Masterarbeit wurde dabei die Balancing-Einheit auf nur eine Zelle montiert. Problematisch kann hierbei eine schlechte Kontaktierung der zweiten Zelle – des Zellpaares – sein. So kann eine der Zellen bereits die Ladeschlussspannung erreicht haben, während die andere noch im zulässigen Bereich operiert.

Weitere Arbeiten am IET setzen sich mit unterschiedlichen Problematiken in Bezug auf Lithium-Ionen-Batterien auseinander, behandeln jedoch nicht genau diesen Zelltyp. [28]

Die Bestandsaufnahme besteht darin, diese Arbeiten auf ihren Inhalt zu prüfen und gewonnene Erkenntnisse in diese Masterarbeit einfließen zu lassen. Erster Fall bietet die Grundlage für die elektrotechnische Schaltungsentwicklung, da das entwickelte System Ähnlichkeiten zu dem Messsystem dieser Arbeit aufweist.

Zweite Quelle bietet Grundlagen zu den Sicherheitsaspekten von Lithium-Ionen-Sekundärzellen. Diese wurden in Abschnitt 4.3 behandelt.

Ein weiterer Teil der Bestandsaufnahme ist das Erfassen der Vorgaben, die in Abschnitt 2.2 eingesehen werden können.

6.3 Planung

Der folgende Abschnitt enthält Details zu der Ausführung der folgenden Schaltungen:

- Über- / Unterspannungsschutz
- Übertemperaturschutz
- Überstromschutz
- Temperatur-Messwertverarbeitung
- Spannungs-Messwertverarbeitung
- Strom-Messwertverarbeitung
- Balancing-Adressierung
- Pegelumsetzung

- Leistungselektronik

In diesem Kapitel seien jeweils nur Teilschaltungen beschrieben. Die Schaltbilder für sämtliche Platinen in ihrer endgültigen Form sind im Anhang zu finden.

6.3.1 Über- / Unterspannungsschutz

Abbildung 6-2 zeigt den ersten Teil des Über- bzw. Unterspannungsschutzes. Zum Schutz gegen Überladung oder Tiefentladung kommt ein Fensterkomparator zum Einsatz, der mit gleitender Versorgungsspannung arbeitet. Der IC MAX9065 legt ein HIGH-Signal knapp unter dem Versorgungspegel auf den Ausgang, solange die Spannung der Zelle innerhalb der vorgeschriebenen Grenzen – 3 bis 4.2 V – liegt. Damit fließt ein den Gut-Zustand aktiv anzeigender Strom durch die LED von IC3 – vorausgesetzt der Transistor von IC2 leitet. Befindet sich die Spannung außerhalb der Grenzwerte, wird geht das Ausgangssignal auf LOW.

Das Ausgangssignal des Fensterkomparators geht über einen Vorwiderstand auf einen Optokoppler (IC3). Dessen Ausgang wird auf LOW gezogen, solange sich die Spannung im erlaubten Bereich befindet.

Um den batterieseitigen Energiebedarf im Standby so gering wie möglich zu halten, wird das Ausgangssignal des MAX9065 über einen weiteren Optokoppler (IC2) deaktiviert, sobald die Schutzplatine vom Hauptplatinen-Stack abgesteckt ist. Der batterieseitige Strombedarf befindet sich im Standby im μA -Bereich und im aktivierten Zustand im unteren mA-Bereich.

Zusätzlich ist die gesamte Schaltung eingangsseitig abgesichert, um auftretende Kurzschlüsse aufgrund von Leiterbahnschäden, Kontaktfehler oder halbleiterbezogenen Fehlern zu unterdrücken. Eine Störunterdrückung der Eingangsspannung erfolgt über das RC-Glied R_1 und C_2 .

Da sich ein Teil der Schaltung dezentral auf den Schutzplatinen befindet sind Klemmen bzw. Kabel zur Verbindung nötig.

Mit einem Pull-Up-Widerstand (R_4) wird das Signal im Fehlerfall auf HIGH gezogen. Die Pegelwandlung erfolgt mithilfe des Optokopplers.

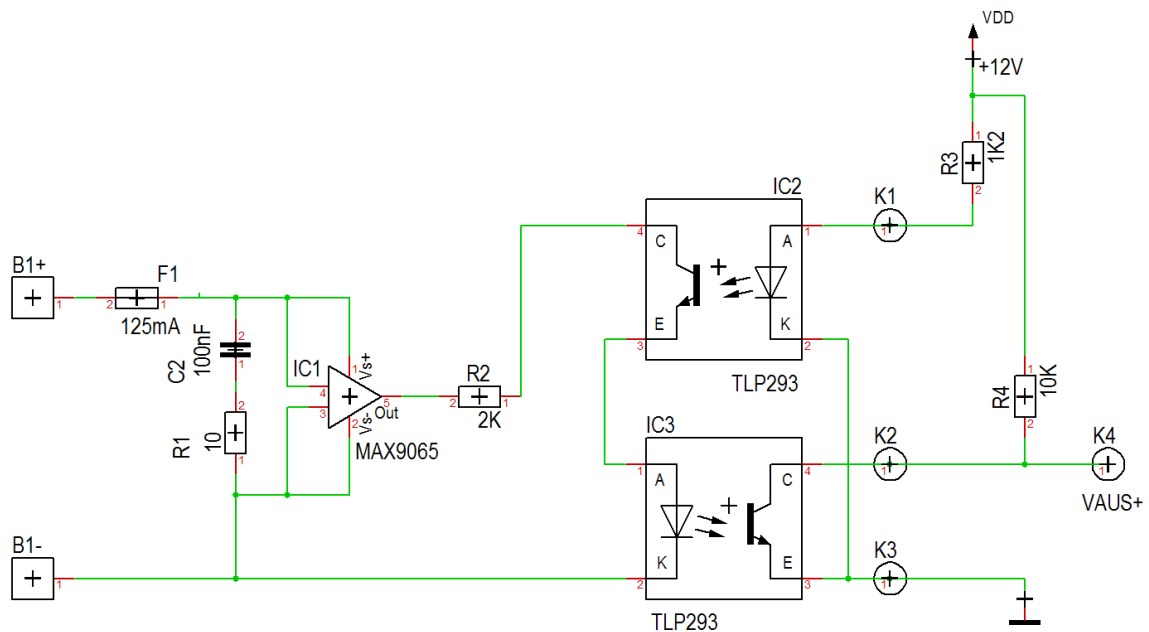


Abbildung 6-2: Teilschaltung 1 von 3 des Über- / Unterspannungsschutz

Zur weiteren Verarbeitung werden die Signale sämtlicher Zellen gekoppelt. Auf Zellpaarebene funktioniert dies über die serielle Verschaltung der Optokoppler. Unterbricht ein Optokoppler die Verbindung springt das Ausgangssignal auf HIGH → Fehlerfall.

Für die Kombination der Fehlersignale auf Modulebene wurde das Wired-AND verwendet – siehe Abbildung 6-3. Springt eines der Signale von den Zellpaaren auf HIGH, so wird über den Invertierer 40106 ein LOW-Signal erzeugt, das den Ausgang auf LOW zieht.

In weiterer Folge wird ein NAND-Latch angesteuert, das auftretende Fehler speichern soll und manuell – per Taster – rückgesetzt werden kann – siehe Abbildung 6-4. Der zweite Eingang des NAND-Latches wird für das sichere Hochfahren verwendet, sodass das Latch in einem definierten Zustand startet.

An den nicht-invertierenden Ausgang gekoppelt ist ein MOSFET, der als Treiber für eine Leuchtdiode (LED) dient. Schaltet dieser durch, leuchtet die rote LED → Fehlerfall. Ist der MOSFET inaktiv, wird der Parallel-Strang leitend und die grüne LED leuchtet.

Der invertierende Ausgang des Latches gibt im Fehlerfall ein LOW-Signal aus, das in weiterer Folge die Schaltungsfreigabe auf der Platine zur Ansteuerung der Leistungselektronik blockiert.

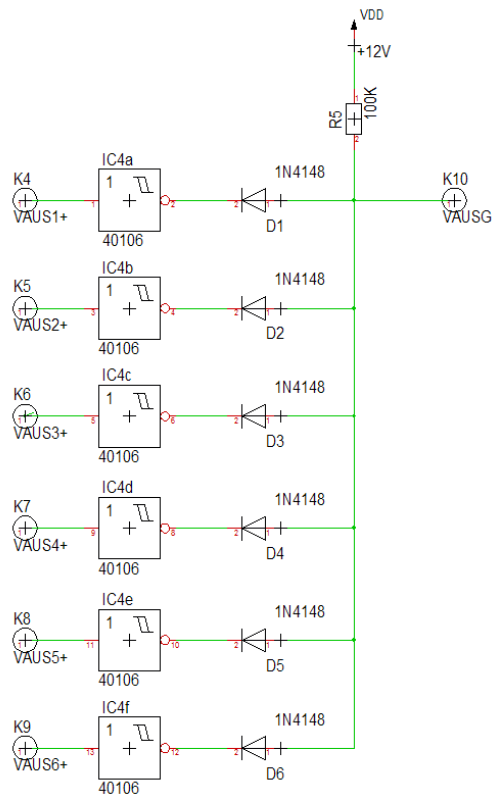


Abbildung 6-3: Teilschaltung 2 von 3 des Über- / Unterspannungsschutz

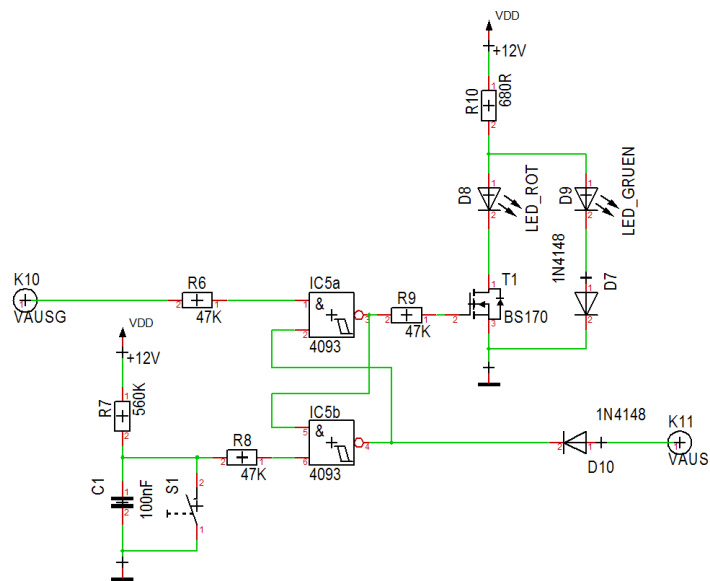


Abbildung 6-4: Teilschaltung 3 von 3 des Über- / Unterspannungsschutz

6.3.2 Übertemperaturschutz

Für die Schutzfunktion gegen Übertemperatur kommen PTC-Thermistoren mit nicht-linearer Kennlinie zum Einsatz – siehe Abbildung 6-5. Diese Widerstände zeichnen sich durch ihr temperaturabhängiges Verhalten aus. Überschreitet die Temperatur einen bestimmten Schwellwert – in diesem Fall 65 °C – so springt der Widerstand auf einen signifikant höheren Wert. Dieses Verhalten macht wird in der Schaltung als Spannungsteiler und einem nachgeschalteten Schmitt-Trigger zu Nutze gemacht – siehe Abbildung 6-5.

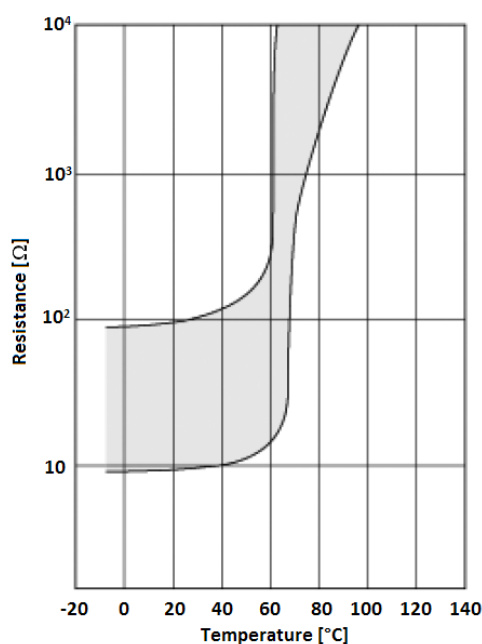


Abbildung 6-5: Widerstandskennlinie des eingesetzten Thermistor-Typs PTFL04BG471Q2N34B0 in Abhängigkeit der Temperatur, modifiziert [29]

Aus dem Schaltbild ist ersichtlich, dass jeweils zwei Thermistoren in Serie geschaltet sind. Dies findet seinen Ursprung darin, dass eine Schutzplatine jeweils ein Zellpaar abdeckt. Um zu garantieren, dass keine der beiden Zellen die Grenztemperatur überschreitet, werden auf eine Platine je zwei Thermistoren eingesetzt. Die Abstimmung auf den richtigen Schwellwert findet im Schmitt-Trigger – der aus OPVs des Typs LM324 aufgebaut ist – statt.

Eine galvanische Trennung über Optokoppler ist in diesem Fall nicht nötig, da die Temperatur-Sensorik lediglich thermisch und nicht elektrisch mit dem Batteriemodul gekoppelt ist. Die galvanische Trennung wird so über Einhaltung der

Schutzabstände sowie der Isolierung mit Wärmeleitfolie und Polyimid-Isolierband erreicht.

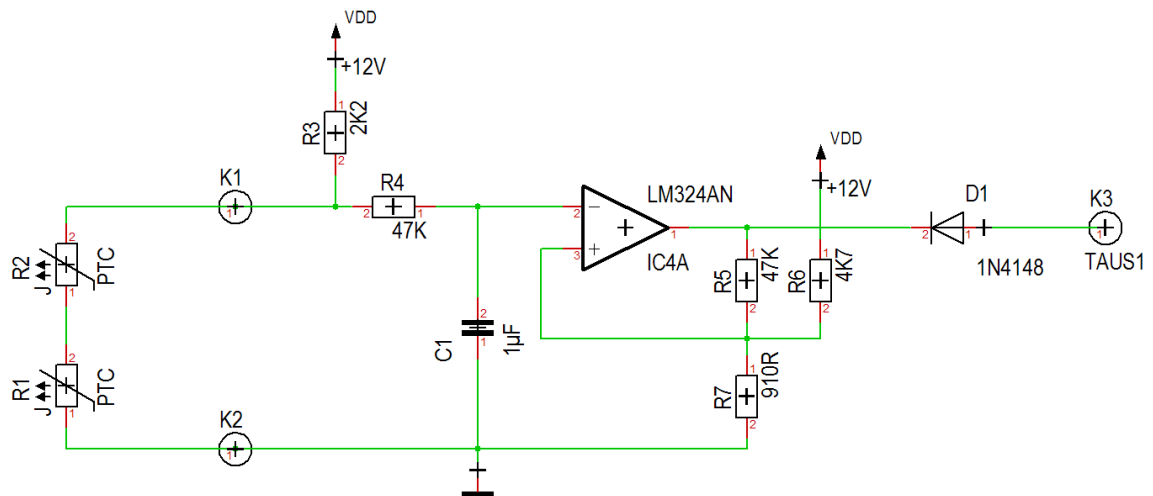


Abbildung 6-6: Schaltbild des Übertemperaturschutzes für ein Zellpaar

Der Aufbau des Speicher-Latches für den Fehler-Speicher der Übertemperatur und die manuelle Rücksetzung entspricht jenem der Spannungsüberwachung. Der Pull-Up-Widerstand beträgt im Unterschied zu jenem der Spannungsüberwachung 47 k Ω .

6.3.3 Überstromschutz

Die Überwachung gegen Über- und Fehlerströme ist auf der Platine zur Ansteuerung der Leistungselektronik untergebracht. Um diese Ströme detektieren zu können, ist eine Sensorik nötig, die schnelle Stromänderungen erfassen kann. Zu diesem Zweck wird ein Koaxial-Shunt nach Abschnitt 5.3.3 gebaut und eingesetzt.

Abbildung 6-7 zeigt die Grundsätzliche Funktion des Überstromschutzes. Der durch den Shunt fließende Strom verursacht einen Spannungsabfall an diesem. Dieser Spannungsabfall wird an einem Differenzverstärker eingangsseitig gefiltert und mit einem Faktor $V = 5$ verstärkt. Ausgehend von einem Betriebsstrom von 30 A würde am Ausgang des Differenzverstärkers 0.75 V anliegen. Der Fensterkomparator wird mit einer Spannung von $+ / - 12$ V versorgt. Sein symmetrisches Fenster hat demnach eine Breite von $+ / - 1$ V. Dies entspricht einem Strom von etwa 43 A. Wird dieser überschritten, zieht der Fensterkomparator die Ausgangsspannung gegen

0 V. Dies unterbricht einerseits den Ansteuerungskreis für den MOSFET-Treiber – für eine kurze Reaktionszeit – andererseits wird die Schaltung gesperrt und der Fehler gespeichert.

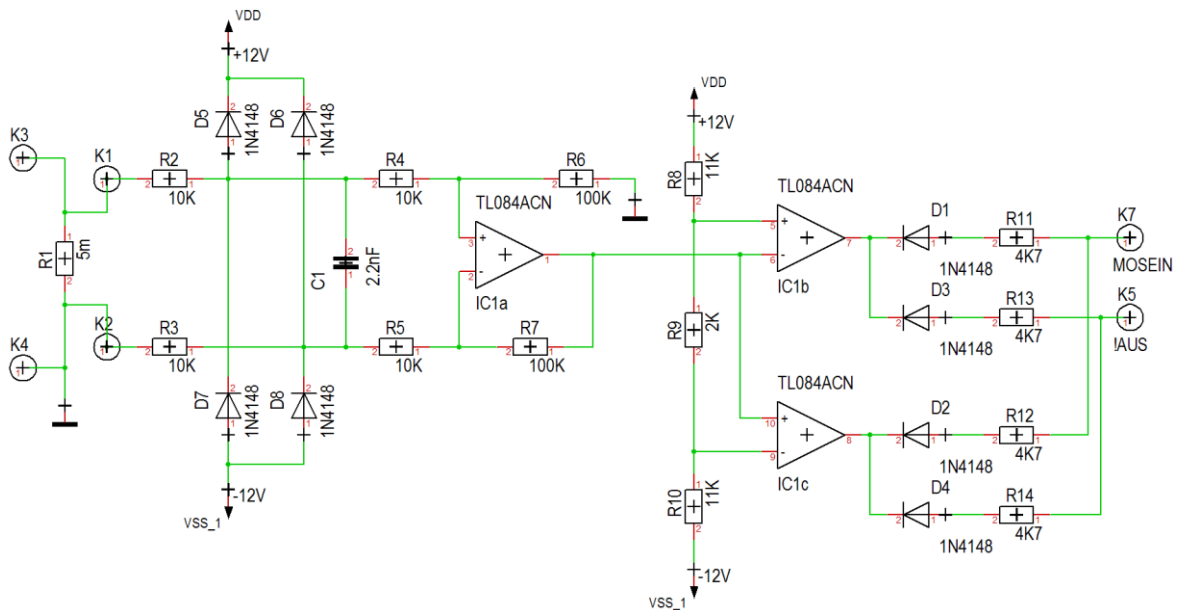


Abbildung 6-7: Schaltbild des Überstromschutzes auf Modulebene

6.3.4 Temperaturmessung

Die Temperaturmessung basiert laut Vorgaben (Abschnitt 2.2.4) auf dem temperaturabhängigen Widerstand KTY81/121. Der Widerstandswert bei 25 °C beträgt etwa 990 Ω und steigt mit der Temperatur. Zur Linearisierung werden 2.2 kΩ vorgeschlagen. Dies ist jedoch schwer realisierbar, da der fließende Strom eine nicht zu vernachlässigende Eigenerwärmung verursachen würde. Eine Berechnung über den zu nutzenden Temperaturbereich ergab, dass die Genauigkeit mit der Beschaltung in Abbildung 6-8 ausreicht – laut Anforderungen in Abschnitt 2.1.1. Für die Erfassung des Widerstands und der weiteren Aufbereitung wird eine Wheatstone-Brücke mit Differenzverstärker gewählt. Die Selektion der Widerstände ist möglichst präzise zu halten, um eine Abweichung auf ein Minimum zu reduzieren. Für diese Selektion wird eine Messreihe von Widerständen mit den angegebenen Nominalwerten erstellt. Über ein zuvor erstelltes Skript in „Visual Basic for Applications“ (VBA) in Excel werden dann die Widerstandverhältnisse so gewählt, dass die geforderte Genauigkeit eingehalten wird.

Nach dem Differenzverstärker wird das Signal in einer zweiten Stufe gefiltert und über eine Maximalschaltung ausgegeben. Mit den weiteren Kanälen parallel am selben Ausgangssignal wird so immer nur die höchste gemessene Temperatur weitergegeben.

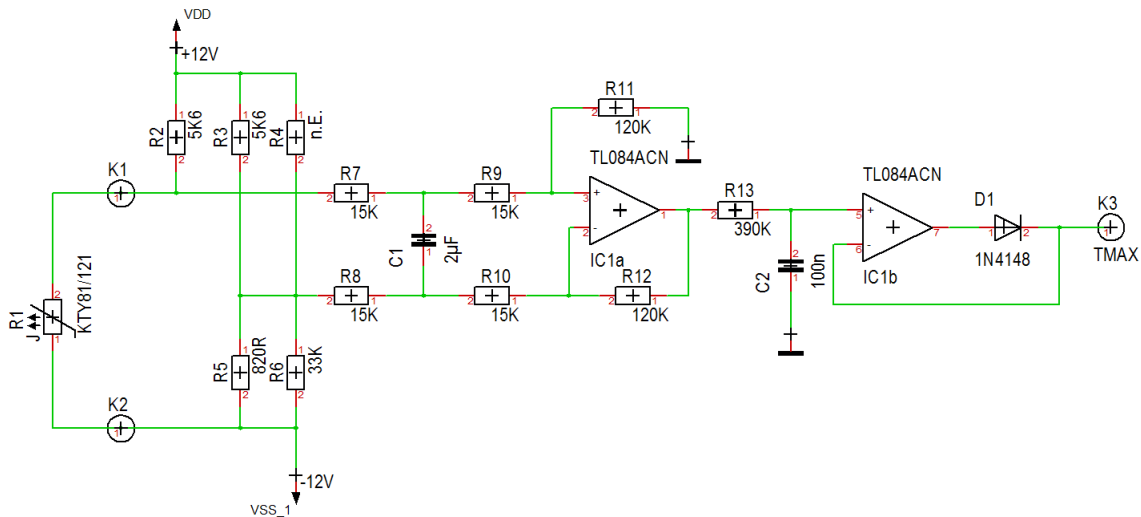


Abbildung 6-8: Schaltbild der Messwertaufnahme und Maximalwertbildung der Temperatur

6.3.5 Spannungsmessung

Die Zellspannung ist die einzige gemessene Größe – von der Strommessung als Schutzfunktion abgesehen –, die nicht vom Batteriemodul galvanisch getrennt ist. Dies hat insofern Einfluss auf den Schaltungsaufbau, dass eingangsseitig anliegende Spannungen die zulässigen Grenzen überschreiten können. Um eine Spannung von 0 ... 5 V dennoch auf 0 ... 10 V verstärken zu können, wird die Spannungsaufbereitung als zweistufige Verstärkung ausgeführt. Abbildung 6-9 zeigt den Aufbau der Signalaufbereitung der Spannung. Die erste Stufe – ein Differenzverstärker – besitzt aufgrund dieser Problematik eine Verstärkung von $V = 0.5$. Des Weiteren sind die Eingangssignale mit Dioden auf die Pegel der Versorgungsspannung begrenzt. Ein weiterer Sicherheitsaspekt ist die Aufteilung der Widerstände der ersten Verstärkerstufe. Da ein Teil des Eingangswiderstandes bereits auf der Schutzplatine verbaut ist, werden hohe Kurzschlussströme im Falle einer Fehlkontaktierung verhindert. Die zweite Verstärkerstufe – mit $V = 4$ – ist als invertierender Verstärker aufgebaut.

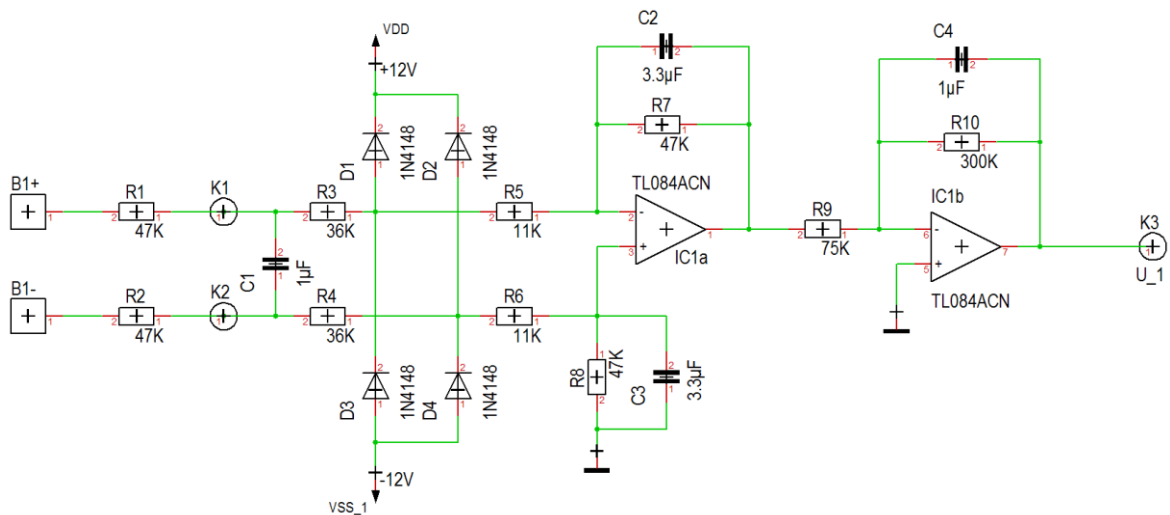


Abbildung 6-9: Schaltbild der Spannungssignalverarbeitung

6.3.6 Strommessung

Moderne kommerzielle Stromsensoren sind häufig als Kompensationswandler aufgebaut. Dabei wird das Messsignal durch einen Eisenkern mit Luftspalt geleitet. Der Ringkern besitzt außerdem noch eine sekundäre Spule mit definierter Windungszahl. Entsteht im Luftspalt ein Magnetfeld so wird dieses durch einen Hallensensor erfasst. Ein mit dem Hallensensor gekoppelter Treiber steuert den Strom durch die Sekundärspule die somit das Magnetfeld, des Messsignals kompensiert. Der Strom durch die Sekundärspule ist somit proportional zum Messsignal – das Verhältnis entspricht dem Übersetzungsverhältnis zwischen Primär- und Sekundärspule. Für die Messung mit dem Stromsensor LA 205-S von LEM entspricht dieses Verhältnis 1:2000. Der nominale Primärstrom des Kompensationswandlers liegt bei 200 A und der maximale Messbereich beträgt + / - 300 A. Der Messwandler arbeitet mit einer bipolaren Versorgung von + / - 12 ... 15 V.

Der große Vorteil dieser Messmethode ist einerseits die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) des Stromsignals, andererseits die galvanische Trennung des Messsignals von der Signalverarbeitung.

Wie in Abbildung 6-10 zu sehen ist, wird das Stromsignal über einen möglichst präzisen Widerstand (R_1) in ein Spannungssignal gewandelt und in weiterer Folge mit einem nicht-invertierenden Verstärker auf einen geeigneten Pegel gebracht.

Außerdem dient auch dieses Signal in Verbindung mit einem Fensterkomparator der Abschaltung im Fehlerfall bzw. bei Überlast.

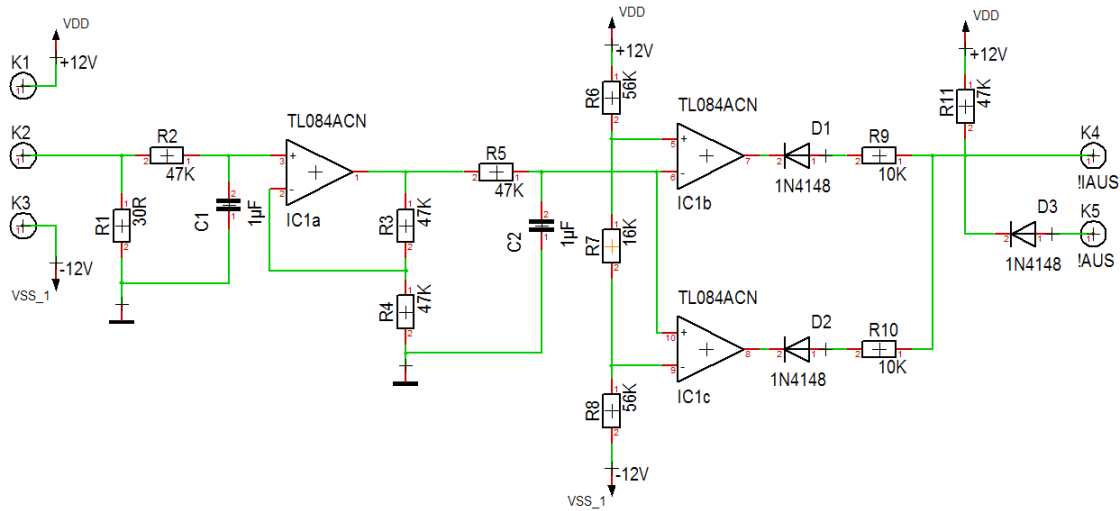


Abbildung 6-10: Schaltbild der Stromsignalverarbeitung

6.3.7 Balancing

Für das Balancing wird kommt eine Methode zu Einsatz, die dem Multiplexing ähnlich ist. Aufgrund der begrenzten Anzahl an Digitalausgängen des USB6009 wird ein Balancing-Signal als Adresse ausgegeben und muss decodiert werden. Dazu wird der CMOS-Baustein 4051 mit Multiplexing- und Demultiplexing-Eigenschaften verwendet. Auf diese Weise können mit drei Signalleitungen insgesamt 6 Balancing-Kanäle angesteuert werden. Aufgrund der Struktur ist auch bei Software-Ausfall ein permanentes Balancing unmöglich.

Die Funktion des Bausteins 4051 ist in Abbildung 6-11 erkennbar – Bezeichnung MC14051B. Je nach Adressierung an den Eingängen A, B oder C wird ein Kanal X_n auf einen gemeinsamen Kanal X geschaltet. Der Widerstand sinkt dabei auf etwa 120 Ω ab.

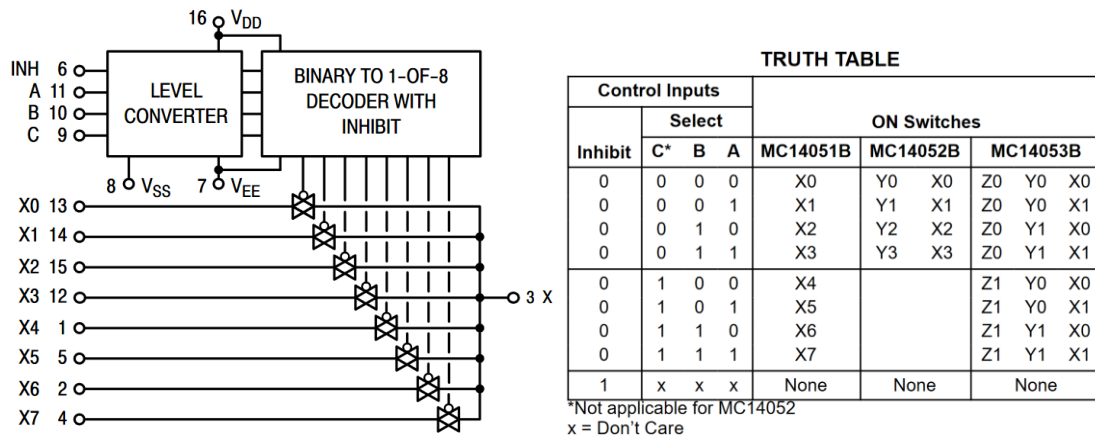


Abbildung 6-11: Funktionelles Schaltbild (a) und Wahrheitstabelle (b), Auszug aus dem Datenblatt MC14051B [30]

In Abbildung 6-12 ist die Adressierung der Kanäle für die Aktivierung des Balancings für Kanal 1 zu sehen. Eingangsseitig befinden sich Pull-Down-Widerstände und Widerstände zum Schutz der CMOS-Eingangsdioden. Die Adressierung über drei Leitungen schaltet ein HIGH-Signal auf den jeweiligen Kanal. Am Kanal selbst wird ein Kondensator über einen Widerstand geladen. Die Zeitkonstante τ beträgt dabei – bei Vernachlässigung von R_3 :

$$\tau_C = (R_1 + R_{4051}) \cdot C_1 = 94 \mu s \quad (6)$$

Beim Entladen wirkt – im Idealfall – lediglich R_3 . Somit erhöht sich die Zeitkonstante auf:

$$\tau_D = R_3 \cdot C_1 = 47 ms \quad (7)$$

Bei Belegung von sechs Ausgängen und der Reservierung des Kanals 0 für den inaktiven Zustand bleibt ein Kanal als Trigger – Kanal 7. Erst wenn Kanal 7 ebenso auf HIGH gelegt wird, springt der Ausgang des NAND 4093 auf 0 und steuert den PNP-Transistor an. Dieser wiederum entlädt den Elektrolytkondensator. Am Ausgang des Invertierers 40106 liegt solange ein HIGH Signal an, bis die Spannung am Kondensator den oberen Schwellwert überschreitet. Die Zeitkonstante für das Laden des Elektrolyt-Kondensators berechnet sich nach:

$$\tau_{EL} = R_6 \cdot C_3 = 1 s \quad (8)$$

In der Praxis dauert das Balancing etwa 0.5 s. Danach müssen über die Programmierung erneut die Kanal-Adresse sowie das Trigger-Signal gesendet werden.

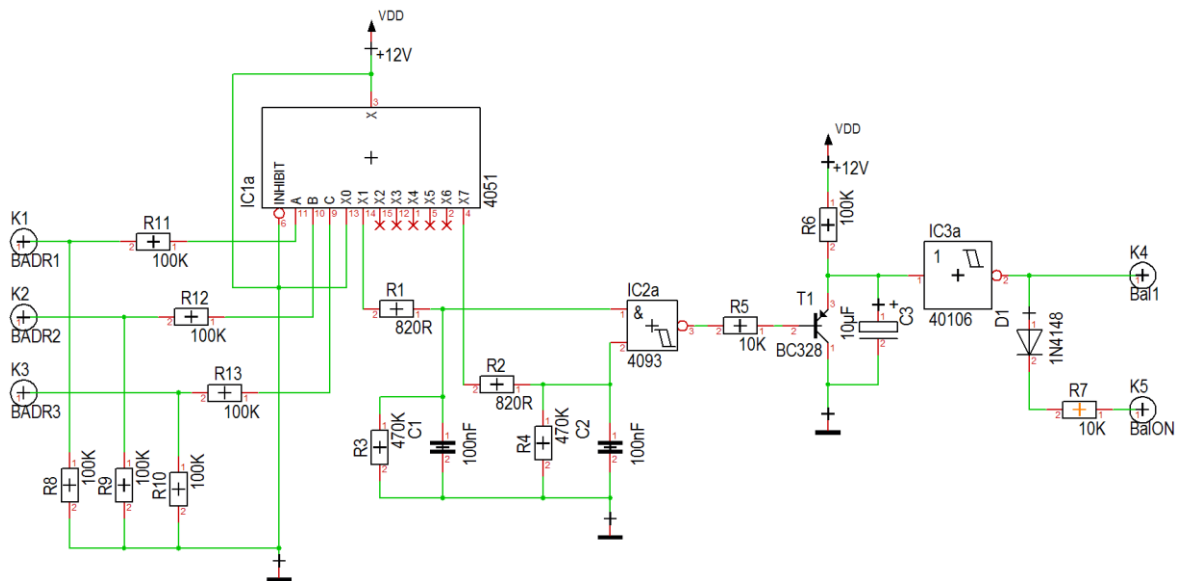


Abbildung 6-12: Teilschaltung 1 von 2 des Balancings, Adressierung

Das generierte Balancing-Signal wird über Signalkabel zur Schutzplatine übertragen. Eine gelbe LED soll die Aktivität des Balancings anzeigen. Ein Optokoppler erfüllt die Auflage der galvanischen Trennung. Bei Aktivierung fließt ein Strom über die Sekundärseite des Optokopplers und verursacht einen Spannungsabfall am Widerstand. Dieser reicht aus, um den MOSFET zu aktivieren und die überschüssige Energie über die Widerstände R₃ und R₄ zu dissipieren.

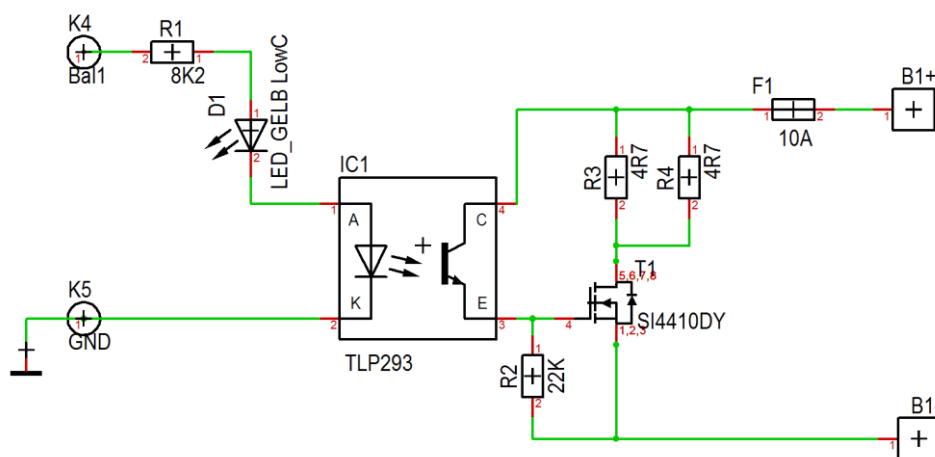


Abbildung 6-13: Teilschaltung 2 von 2 des Balancings, Ausführung

6.3.8 Pegelwandler

Die Pegelwandlung ist ein essentieller Aspekt für den Signalaustausch zwischen dem Hauptplatinen-Stack und der Datenerfassung mit dem USB6009. Da die Analogsignale bereits über Operationsverstärker aufbereitet wurden, entfällt für sie die Pegelwandlung.

Das USB6009 arbeitet grundsätzlich mit TTL-Pegel – + 5 V / 0 V. Um Signale zwischen USB6009 und den weiteren CMOS-Bausteinen – + / - 12 V / 0 V – austauschen zu können, müssen diese Signale aufbereitet werden. Für die Pegelwandlung sind drei Signaltypen von Bedeutung:

- **12 VDC-CMOS auf USB6009 Digital-Eingang**

Aufgrund der inneren Verschaltung der Digitaleingänge des USB6009 ist eine Pegelwandlung relativ einfach zu realisieren. Intern wird das Eingangssignal mit einem Pull-Up-Widerstand mit 4.7 k Ω gegen HIGH gezogen. Ein einzelner MOSFET des Typs BS170 reicht aus, um das Signal auf einen ausreichend niedrigen Pegel zu ziehen.

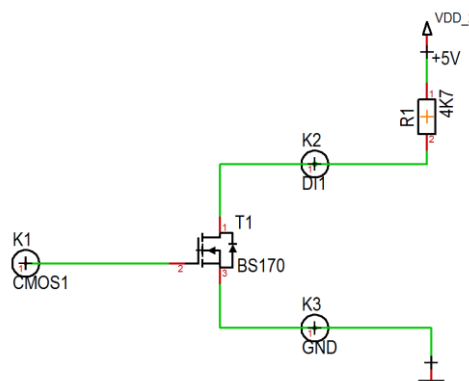


Abbildung 6-14: Pegelwandlung von + 12 V / 0 V auf + 5 V / 0 V (USB6009)

Bei Verwendung dieser Schaltung sei Vorsicht geboten, da nicht nur der Pegel gewandelt sondern auch das Signal invertiert wird.

- **USB6009 Digital-Ausgang auf 12 VDC-CMOS**

Wie in Abbildung 6-15 ersichtlich kommt eine Kombination aus NPN-Transistoren und Pull-Up-Widerstände zum Einsatz. Wie in der ersten Schaltung zur Pegelwandlung wird dabei der Wert des Signals invertiert – HIGH wird zu LOW.

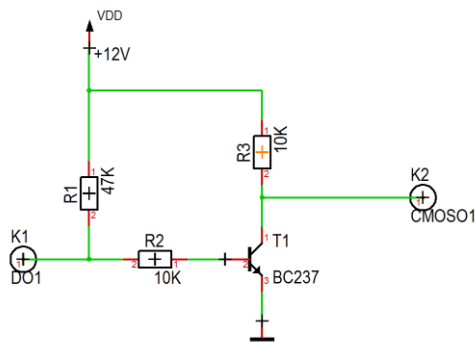


Abbildung 6-15: Pegelwandlung von + 5 V / 0 V (USB6009) auf + 12 V / 0 V

- **USB6009 Analog-Ausgang auf 12 VDC-CMOS**

Die Pegelwandlung ist an jene der Digitalausgänge des USB6009 angelehnt. Die Diode soll einen Strom in das Datenerfassungsgerät verhindern. Auch hier wird das Signal invertiert übergeben.

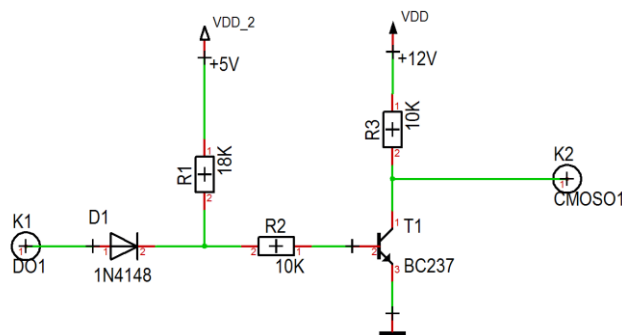


Abbildung 6-16: Pegelwandlung von 0 ... + 5 V Analogausgang (USB6009) auf + 12 V / 0 V

6.3.9 Leistungselektronik

In diesem Abschnitt wird einerseits der batteriestromführende Teil der Schaltung behandelt, andererseits seine Ansteuerung. Die Ansteuerung beinhaltet wiederum sowohl den MOSFET-Treiber als auch die korrekte Schaltung der Relais.

Für die Ansteuerung sind mehrere Fälle zu betrachten. Hintergrund dabei ist die richtige Schaltreihenfolge von Relais und MOSFET.

- Einschalten (regulär)
 - Freigabe der Schaltung im Freigabe-Flipflop
 - Lade- / Entladerelais schalten ein
 - Aktivieren des Lade-Entlade-Zyklus – Software
 - MOSFET schaltet ein

- Ausschalten (ohne Fehlerfall)
 - MOSFET schaltet aus
 - Sperre des Freigabe-Flipflops
 - Lade- / Entladerelais schalten aus
- Fehlerstrom
 - MOSFET schaltet aus
 - Fehler wird im Freigabe-Flipflop gespeichert
 - Lade- / Entladerelais schalten aus
- Überspannung
 - Freigabe der Schaltung im Freigabe-Flipflop
 - Lade- / Entladerelais schalten ein
 - MOSFET Schaltung wird unterdrückt

Abbildung 6-17 zeigt die Ansteuerung des MOSFETs im Leistungskreis. Eingangs ist eine asymmetrische Verzögerung zu erkennen. Diese garantiert, dass bei Schaltungsfreigabe der MOSFET erst nach den Relais einschaltet. Die Zeitkonstante berechnet sich zu:

$$\tau_{MOS} = R_1 \cdot C_3 = 14,96 \text{ s} \quad (9)$$

In der Praxis wurde ein Schalten nach etwa 3s festgestellt. Für das Ausschalten wird Diode D1 aktiv, um den MOSFET sofort abzuschalten. Mehrere Einflüsse – Überspannung, Schaltungsfreigabe nicht gegeben – können das Zuschalten des MOSFETs unterdrücken. Die Detektion eines Fehlerstroms greift direkt in das Signal zum MOSFET-Treiber ein, um ein schnelles Abschalten zu garantieren.

Die Funktion des Signals zum Laden bzw. Entladen ist im aktuellen Projekt als Erweiterungsmöglichkeit vorgesehen. Die Ausführung wurde jedoch noch nicht vorgenommen.

Als Treiber kommt der Baustein 4426 zum Einsatz, der einen zum Eingangssignal invertierenden Steuerstrom ausgibt.

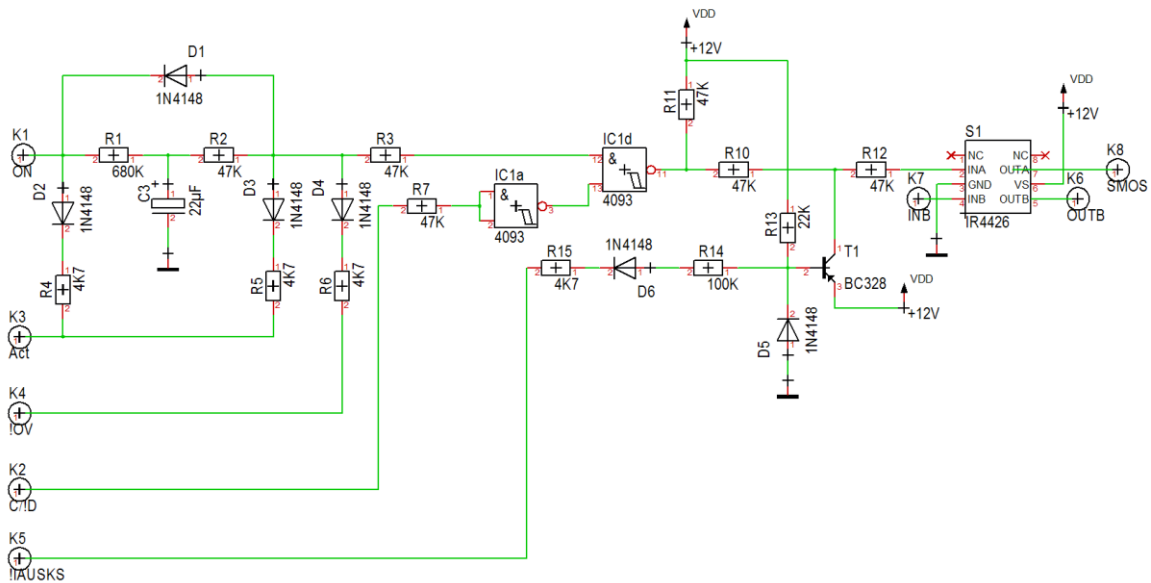


Abbildung 6-17: Schaltbild der Ansteuerung des MOSFET

Die Ansteuerung der Relais zur Auswahl des Zyklus – Laden – oder Entladen – hängt lediglich von den zwei Signalen Schaltungsfreigabe (Act) und Laden / Entladen (C/ID) ab. Die Kombination der Signale erfolgt in NAND-Verknüpfungen – in Abbildung 6-18 ersichtlich. Eine asymmetrische Zeitkonstante soll verhindern, dass beide Relaisgruppen gleichzeitig aktiv sind – Kurzschlussgefahr. Der zweite Kanal des MOSFET-Treiberbausteins dient zur Invertierung des Signals. Zum Schutz gegen gleichzeitiges Aktivieren der Relaisgruppen wurde zusätzlich eine Diode als gegenseitige Verriegelung eingebaut.

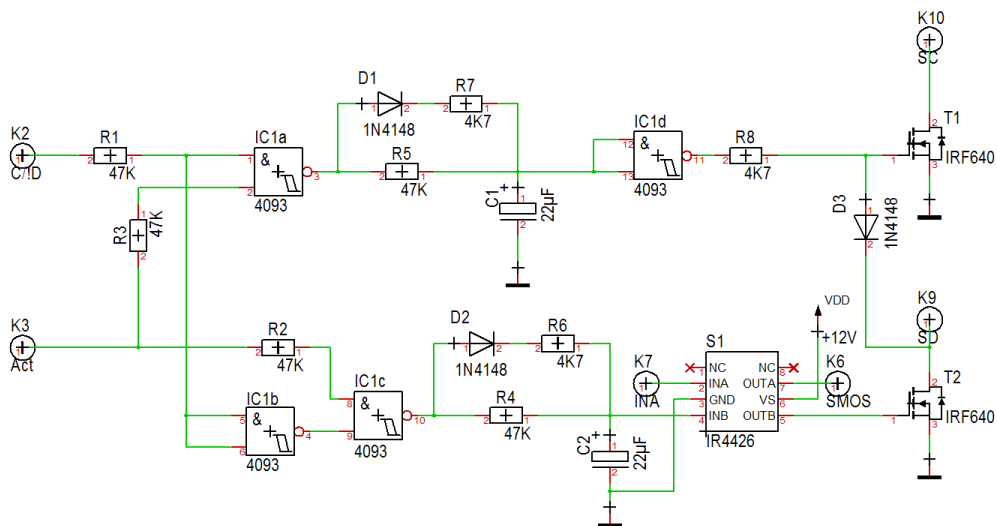


Abbildung 6-18: Schaltbild der Relais-Ansteuerung

6.3.10 Spannungsversorgung

Um möglichst stabile Versorgungsspannungen bereitzustellen, wird die Platine mit + / - 15 ... 18 VDC betrieben. Auf den Platinen selbst befinden sich Linearregler mit + / - 12 V. Um Schwankungen und Einkopplungen zu verhindern, werden ein- und ausgangsseitig Elektrolyt-Kondensatoren zur Stabilisierung eingebaut.

6.4 Ausführung

Der folgende Abschnitt beinhaltet die Dokumentation der Ausführung. Dabei werden die hergestellten Platinen und ihre Funktion näher erläutert. Die vollständigen Schaltbilder aller hergestellten Komponenten sind im Anhang zu finden.

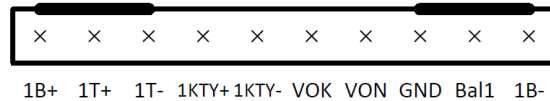
6.4.1 Schnittstellen

Die Definition der Schnittstellen dient zur korrekten Übergabe der Signale an benachbarte Komponenten. Die Notwendigkeit liegt in der Aufteilung der Funktionen des Gesamtsystems. Einerseits ist der Hauptplatinen-Stack über mehrere Ebenen verteilt, andererseits sind weitere Systemkomponenten – wie Schutzplatinen, Signalerfassung, Strommessung und Leistungselektronik – vom Hauptplatinen-Stack entfernt aufgebaut.

- **Verbindung von Schutzplatinen und Hauptplatinen-Stack**

Die Schnittstelle zwischen den sechs Schutzplatinen und dem Hauptplatinen-Stack mündet in der Platine für die Auswertung der Schutzschaltungen für Temperatur und Spannung (zweite Lage).

Für die Verbindung wird ein 10-poliger Molex-Stecker verwendet. Belegung und Beschreibung der Signale sind in Abbildung 6-20 zu sehen.



1B+ ... Teil des Differentialsignals der Thermistoren für Zellpaar 1
 1T+ ... Teil des Differentialsignals der Spannungsmessung für Zellpaar 1
 1KTY+ ... Teil des Differentialsignals der Temperaturmessung für Zellpaar 1
 VON ... Signal zur Aktivierung der Schutzplatine
 VOK ... Signal der Zellspannungsüberwachung
 GND ... Ground
 Bal1 ... Balancingsignal für Zellpaar 1

Abbildung 6-20: Belegung der Schnittstelle zwischen Schutzplatinen und Hauptplatinen-Stack

- **Schnittstellen am Hauptplatinen-Stack**

Aus der Darstellung des Gesamtkonzepts ist zu sehen, dass der Hauptplatinen-Stack aus mehreren Lagen von Platinen aufgebaut ist. Die Funktionen der vier Lagen sind – von unten nach oben:

- Fehlerspeicherung und Anzeige und Auswertung der Temperturmesswerte mit Maximalwertbildung
- Sammeln der Signale von den Schutzplatinen und Auswertung der Schutzsignale für Temperatur und Spannung
- Stromversorgung des Hauptplatinen-Stack, Kommunikation mit dem USB6009, Anschluss der Platine „Strommessung und Ansteuerung der Leistungselektronik“ und Signalverarbeitung für die Spannungsmessung
- Decodierung der Balancing-Adressen und Erzeugung der Balancing-Signale

Die richtige Übergabe der Signale ist Voraussetzung für die korrekte Funktion der Schaltung. Die Schnittstellen zwischen den einzelnen Platinen sind zweireihige Stiftleisten mit Rastermaß 2.54 mm – auf der Oberseite – und dazugehörige Stecker – Unterseite.

Zwischen erster (oberster) und zweiter Lage beinhaltet die Schnittstelle – Abbildung 6-21 – die Spannungsversorgung, die differentiellen Anschlüsse der Temperatursensoren, die Maximaltemperatur als Spannungssignal, das Signal „Balancing aktiv“, Fehlersignale und das Sperrsignal.

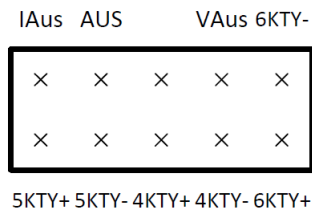
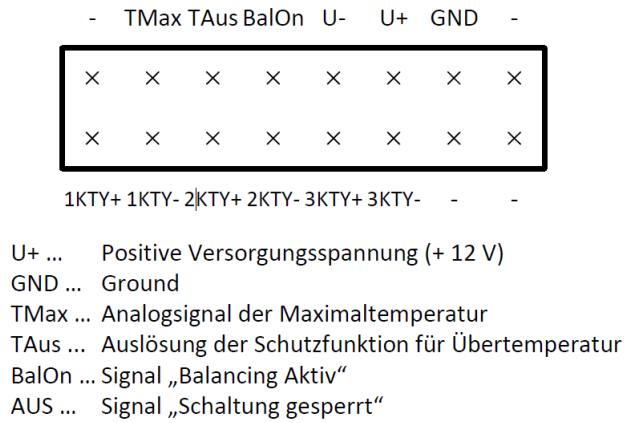


Abbildung 6-21: Belegung der Schnittstelle zwischen oberster und zweiter Lage des Hauptplatten-Stacks

Die Verbindung von zweiter und dritter Lage – siehe – besteht aus der Spannungsversorgung, den differentiellen Zellspannungen, den Balancing-Signalen, Fehlersignalen und dem Sperrsignal.

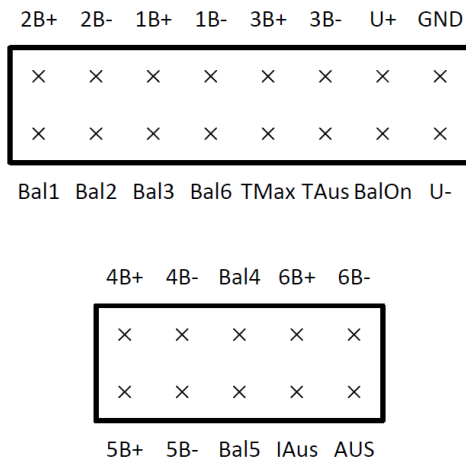


Abbildung 6-22: Belegung der Schnittstelle zwischen zweiter und dritter Lage des Hauptplatten-Stacks

In der Schnittstelle zwischen dritter und vierter (unterster) Lage des Hauptplatten-Stack sind die Spannungsversorgung, die Balancing-Adressierung, die Balancing-Signale sowie das Signal „Balancing aktiv“ enthalten – vgl. Abbildung 6-23.

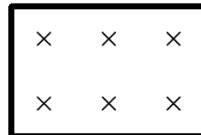
Bal1 Bal2 Bal3 Bal6 BalOn



- - BAdr1 BAdr2 BAdr3

BAdr1 ... Erster Bit der Adressierung des Balancing-Kanals

Bal4 - Bal5



U- GND U+

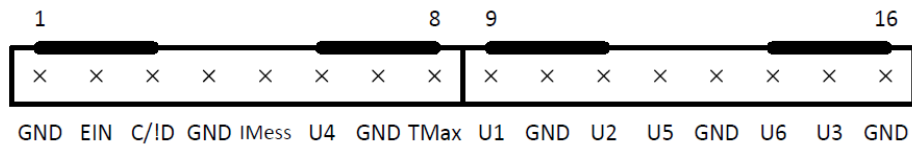
Abbildung 6-23: Belegung der Schnittstelle zwischen dritter und vierter Lage des Hauptplatinen-Stacks

- **Verbindung von Hauptplatinen-Stack und USB6009**

Die Verbindung zwischen USB6009 und der dritten Lage des Hauptplatinen-Stacks ist durch die Pinbelegung des Datenerfassungsgeräts gekennzeichnet. Der Anschluss am Gerät erfolgt über Mini-Phoenix-Stecker, jener an der Platine über vier 8-polige Molex-Steckverbinder. Am USB6009 selbst ist die Verbindung in zwei Gruppen unterteilt: Analogsignale und Digitalsignale.

Die Schnittstelle der Analogsignale – siehe Abbildung 6-24 – besteht aus den aufbereiteten Spannungssignalen, dem aufbereiteten Stromsignal, der Maximaltemperatur sowie den Signalen für das Einschalten des elektronischen Schalters und der Umschaltung zwischen Laden und Entladen.

Die digitalen Signale des USB6009 bestehen aus zwei Ports, die als Ein- oder Ausgänge definiert werden können – Port 0 wird als Eingang für die Fehlersignale definiert. Port 1 sind vier Digitalausgänge: drei zur Balancing-Adressierung und einer für die Sperre der Schaltung. Zusätzlich stünden noch Referenzspannungen zur Verfügung. Diese bleiben ungenutzt.



U1 ... Zellspannungssignal für Zellpaar 1 (bezogen auf GND)
 EIN ... Signal zur Aktivierung des elektronischen Schalters
 C/!D ... Signal zur Umschaltung zwischen Laden und Entladen

Abbildung 6-24: Belegung der Schnittstelle zwischen dem Hauptplatten-Stack und den Analogein- und Analogausgängen des USB6009

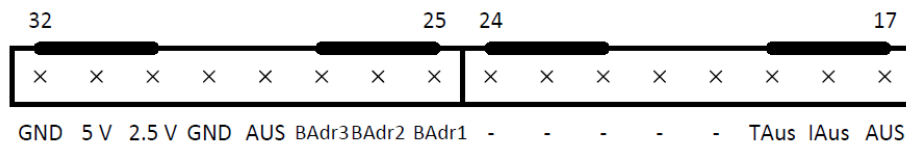
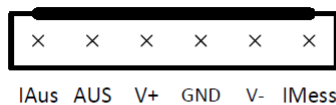


Abbildung 6-25: Belegung der Schnittstelle zwischen dem Hauptplatten-Stack und den Digitalein- und Digitalausgängen des USB6009

- **Verbindung von Hauptplatten-Stack und Strommessung**

Die Schnittstelle – in Abbildung 6-26 dargestellt – zwischen Hauptplatten-Stack und der Platine „Strommessung und Ansteuerung der Leistungselektronik“ besteht aus zwei Molex-Steckverbindern: einem 6-poligen und einem 2-poligen.

Die Versorgungsspannung wird hierbei als + / - 15 ... 18 V geführt. Des Weiteren werden das Fehlersignal bei Überstrom, das Sperrsignal, der aufbereitete Strommesswert sowie die Signale für das Einschalten des elektronischen Schalters und der Umschaltung zwischen Laden und Entladen übertragen.



V+ ... Positive Versorgungsspannung (+ 15 ... 18 V)
 IMess ... Analogsignal der Strommessung

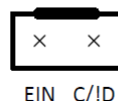
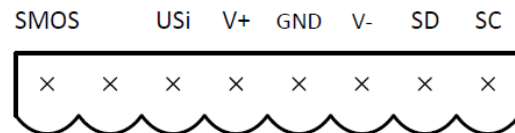


Abbildung 6-26: Belegung der Schnittstelle zwischen dem Hauptplatten-Stack und der Platine „Strommessung und Ansteuerung der Leistungselektronik“

- **Verbindung von Strommessung und Leistungselektronik**

Die Ansteuerung der Leistungselektronik ist in Abbildung 6-27 dargestellt. Sie beinhaltet die Versorgungsspannung als + / - 15 ... 18 V, die Schaltungen für den MOSFET und die Relais sowie dem Spannungssignal über der Sicherung.



SMOS ... Schaltung für den elektronischen Schalter
USi ... Signalleitung der Spannung über der Sicherung
SD ... Schaltung für die Relais zum Entladen

Abbildung 6-27: Belegung der Schnittstelle zwischen der Platine „Strommessung und Ansteuerung der Leistungselektronik“ und der Leistungselektronik

Zusätzlich zu dieser Schnittstelle wird der Koaxial-Shunt über ein Koaxial-Kabel und eine BNC-Steckverbindung mit der Strommessung verbunden.

6.4.2 Schutzplatine

Für die Fertigung der Schutzplatine wird aufgrund der Stückzahl, der Komplexität und der geforderten Kompaktheit ein eigenes Layout erstellt, welches von einem Leiterplattenhersteller anschließend gefertigt wird.

Für die Bestückung der Schutzplatinen werden oberflächenmontierte Bauteile (surface mounted device, SMD) verwendet, um die Platine so kompakt wie möglich zu halten. Dennoch kommen einige Bauteile zum Einsatz, die eine Durchsteckmontage erfordern: Sicherungshalter, Molex-Header, Leistungswiderstände, Temperatursensor, PTC-Thermistor.

Ausgangspunkt für die Erstellung eines Platinen-Layouts ist das Schaltbild, das in Abbildung 6-28 zu sehen ist.

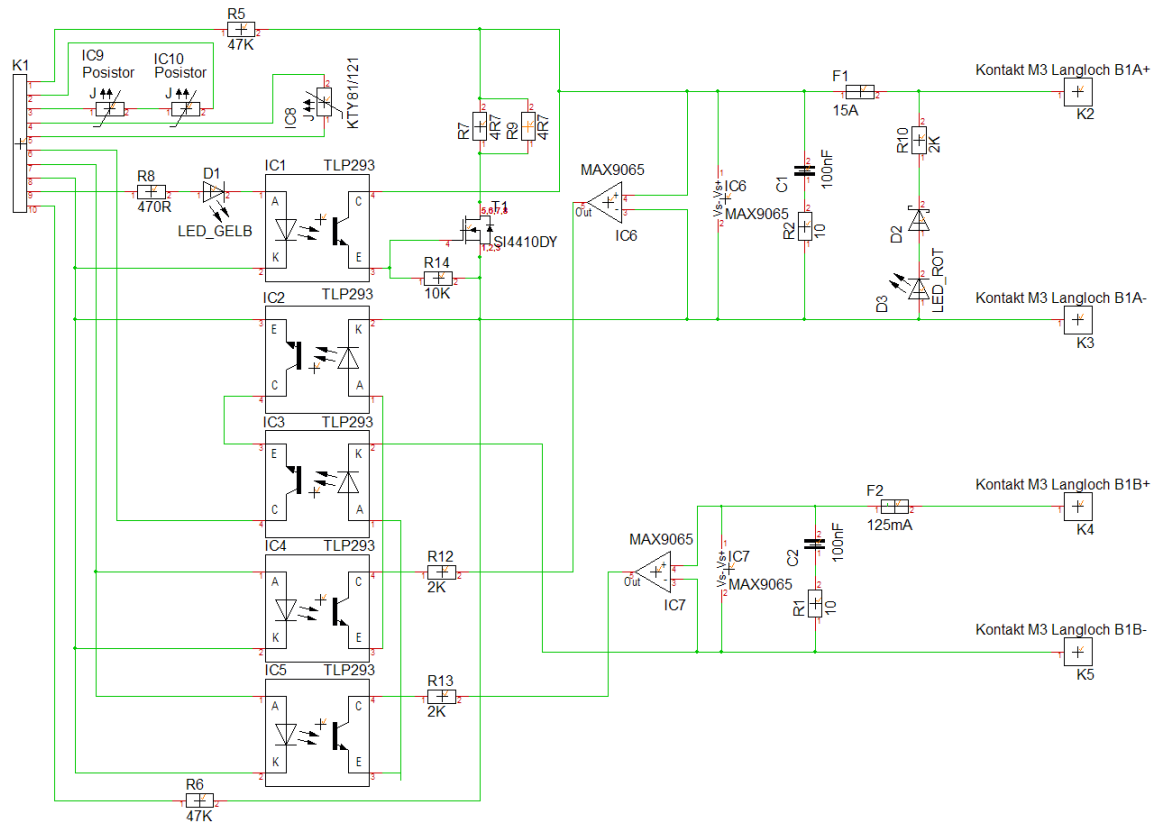


Abbildung 6-28: Schaltbild der Schutzplatine

Es ist leicht zu erkennen, dass die einzigen elektrisch gekoppelten Signale jene der Zellspannung auf Zelle A (oben) sind. Sämtliche anderen Signale sind durch Optokoppler von der Batterie galvanisch getrennt.

Außerdem sieht man, dass zwar beide Zellen eine separate Spannungsüberwachung mit dem IC MAX9065 besitzen, jedoch nur Zelle A im Balancing involviert ist. Bei korrekter Kontaktierung sollten die Potentiale der Zellen außen verbunden sein und somit beide Zellen am Balancing teilnehmen.

Die beiden Widerstände R₅ und R₆ sind Präzisionswiderstände (Toleranz unter 0.1 %) und dienen drei Zwecken:

- Der Energieverbrauch durch die Spannungsmessung belastet die Batterie sehr gering.
- Sie stellen einen Teil der Eingangsbeschaltung der Differenzverstärkerstufe dar – siehe auch Abbildung 6-9.

- Sollte durch falsches Verbinden der Anschlüsse bzw. über Fehler in der Messwertverarbeitung der Spannung ein Kurzschluss verursacht werden, kann wird der Strom durch die hohen Widerstände begrenzt.

Aus dem Schaltplan kann in TARGET 3001! Ein Layout erstellt werden. Dieses ist in Abbildung 6-29 zu sehen.

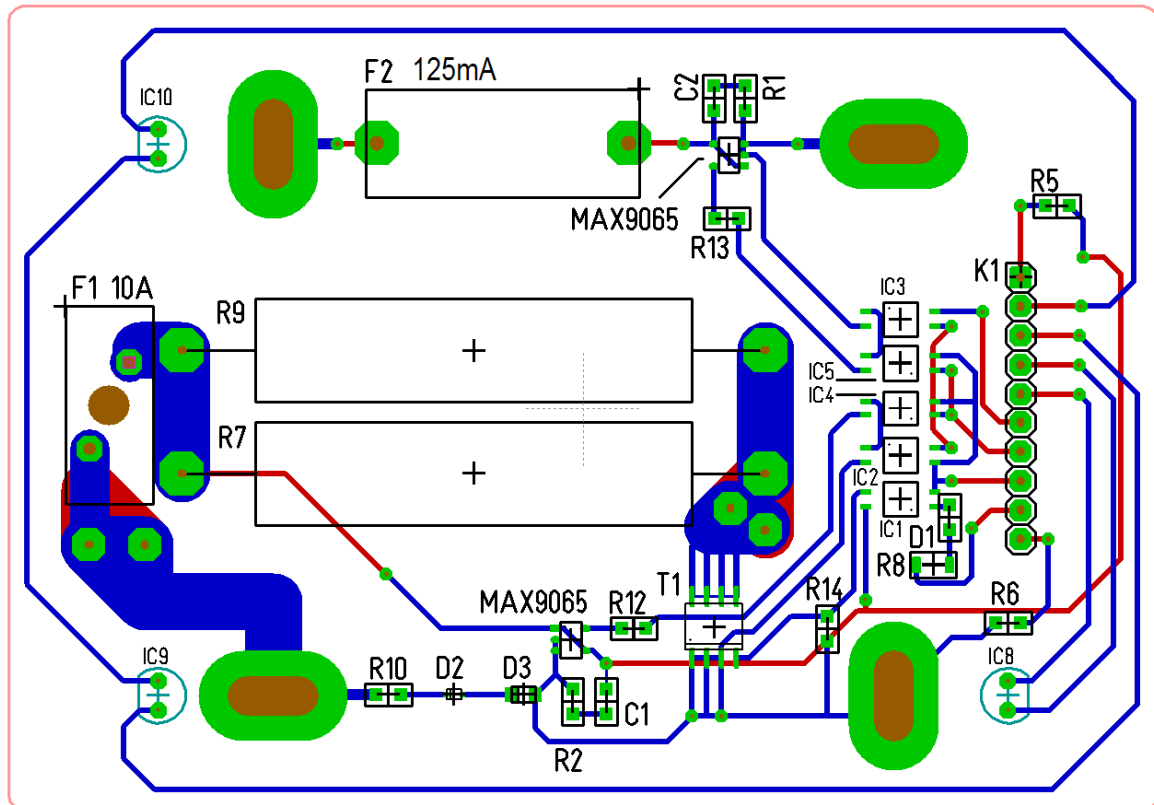


Abbildung 6-29: Layout der Schutzplatine

Die Abmessungen und Abstände zwischen den Montagebohrungen sind vom Aufbau des Batteriemoduls gegeben. Die Bohrungen werden als Langlöcher ausgeführt, um Toleranzen des mechanischen Aufbaus ausgleichen zu können. Die Montage der Schutzplatine auf das Zellpaar erfolgt mithilfe von M3-Schrauben.

Um die thermische Kopplung von Temperatursensor und PTC-Thermistoren mit den Zellanschlüssen zu gewährleisten, werden diese auf die Kontaktflächen aufgedrückt. Dabei wird Wärmeleitfolie und Polyimid-Isolierband eingesetzt, um eine leitende Verbindung zu verhindern.

Wie in Abschnitt 5.4.2 erwähnt arbeitet TARGET 3001! mit Layer. Die Leiterbahnen auf der Platinen-Oberseite sind blau gezeichnet, Rot steht für jene auf der Platinen-Unterseite. Die Bauteile sind schwarz (Oberseite) bzw. Türkis (Unterseite)

dargestellt. Grüne Flächen sind Bereiche, die nicht mit Lötstopplack überzogen sondern verzinnt werden. Zugunsten der Übersichtlichkeit wurde auf die Darstellung der Masseflächen verzichtet.

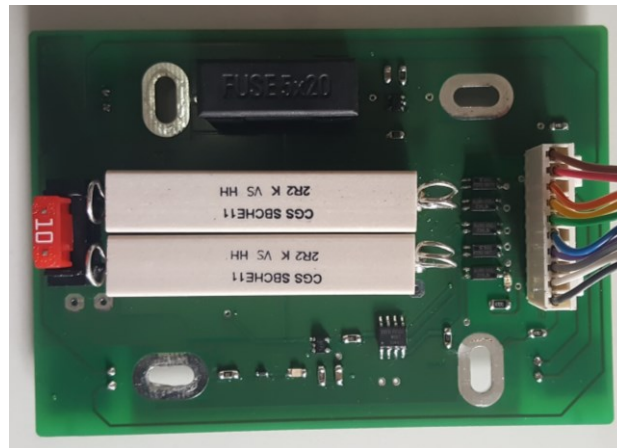


Abbildung 6-30: Vollständig bestückte Schutzplatine

6.4.3 Hauptplatinen-Stack

Für die Erstellung der weiteren Komponenten – die Leistungselektronik ausgenommen – werden Streifenrasterplatinen mit dem Rastermaß 2.54 mm (0.1 Zoll) verwendet. Aufgrund der Vielfalt an geforderten Funktionen des Hauptplatinen-Stacks und dem damit verbundenen Platzbedarf muss dieser aus mehreren Lagen aufgebaut werden.

Die Nomenklatur für die Komponenten ist in Tabelle 6-1 zu sehen. Die vollständigen Stücklisten können dem Anhang entnommen werden.

Im folgenden Abschnitt sind des Weiteren die Platinen-Designs zu sehen. Einige Bauteile sind auf der Platine über Lötstützpunkte über anderen geführt. Diese werden im Layout aus der Unterseite der Platine eingezeichnet. Außer der Stiftleisten, die als Schnittstellen zur nächsten Lage dienen befinden sich auf der Platinen-Unterseite keine Bauteile.

Bez.	Beschreibung	Bez.	Beschreibung
Nach Bauteilart		Kanal nicht zuordenbar	
R	Widerstand	R0xx	Spannungsversorgung
C	Kondensator	R00x	positiv
D	Diode, LED	R01x	negativ
T	Transistor	R8xx	Schutzfunktion Flipflops
U	Spannungsregler	R80x	Schutz-Flipflop Temperatur
IC	Integrierter Schaltkreis	R81x	Schutz-Flipflop Spannung
X	Klemme, Stiftleiste	R82x	Schutz-Flipflop Strom
Nach Platine		R9xx	Weitere Funktionen
Rxxx	Hauptplatinen-Stack	R93x	Balancing Vor- und Pull-Up-Widerstände
R1xxx	Strommessung	R90x	Pegelumsetzung - Pull-Up-Widerstände (prim.)
		R91x	Pegelumsetzung - Vorwiderstände
		R92x	Pegelumsetzung - Pull-Up-Widerstände (sek.)
Kanal zuordenbar		R180x	Freischalt-Flipflop
R1xx	Für CH1	R181x	
R6xx	Für CH6	R182x	Strommessung (Kompensationswandler)
		R183x	
Nach Funktion		R184x	Strommessung (Koaxial-Shunt)
Rx0x	Spannungs-Schutzkreis	R185x	
Rx1x	Thermistor-Schutzkreis	R186x	Überspannung (Batterie-Verpolung)
Rx3x	Balancing-Funktionen	R190x	Ansteuerung MOSFET
Rx4x	Spannungs-Verarbeitung	R191x	
Rx6x	Temperaturverarbeitung	R192x	
Rx7x			

Tabelle 6-1: Nomenklatur der Bauteile auf den Platinen

- **Erste Lage: Fehler-Speicher, Rücksetzung und Temperaturmessung**
Abbildung 6-31 zeigt das Layout der obersten Platine vom Hauptplatinen-Stack.

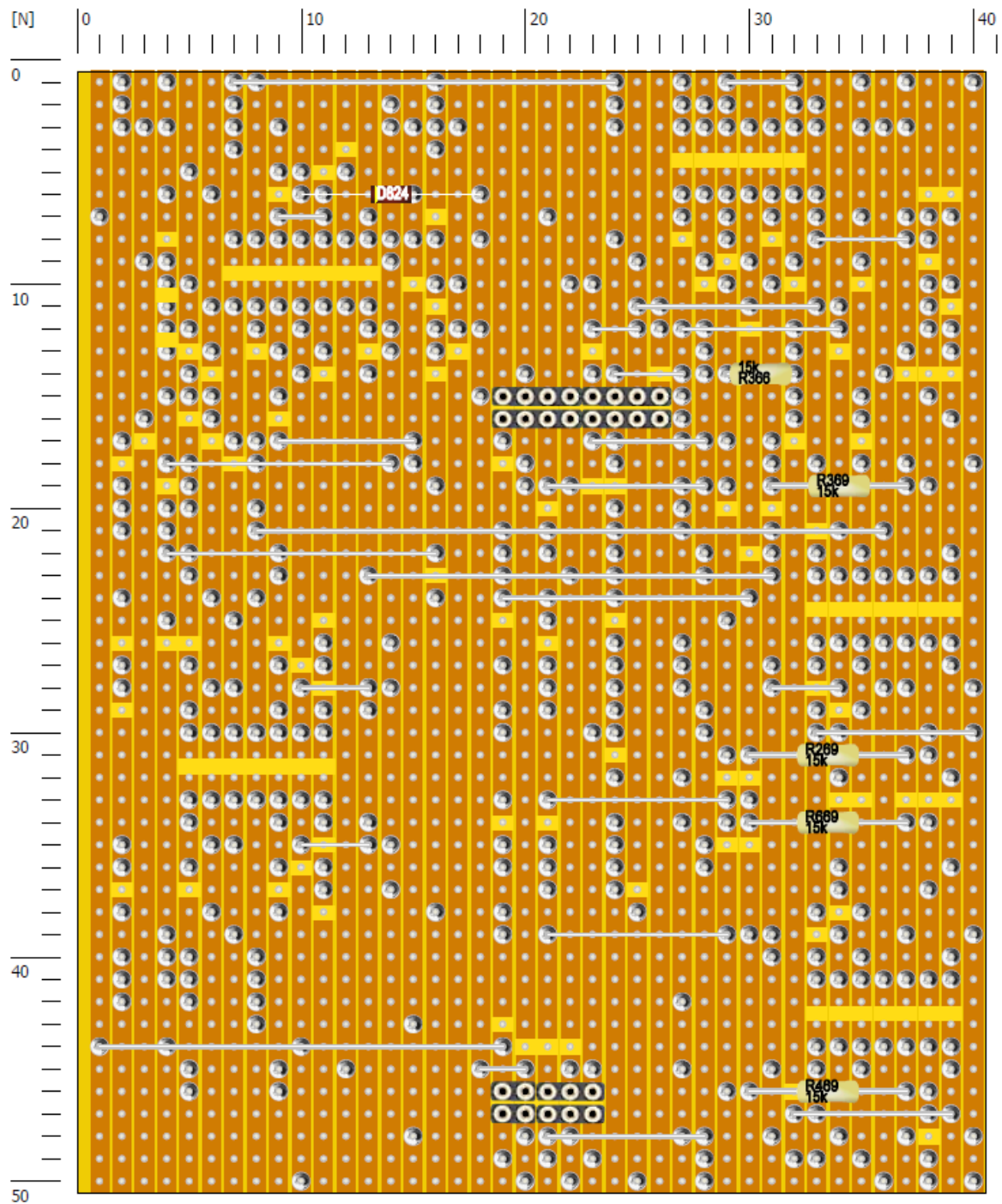


Abbildung 6-32: Layout der ersten Lage des Hauptplatten-Stacks – Unterseite

- **Zweite Lage: Verbindung mit den Schutzplatten, Schutzfunktionen Temperatur und Spannung**

Die Platinen-Oberseite der zweiten Lage im Hauptplatten-Stack ist in Abbildung 6-33 zu sehen.

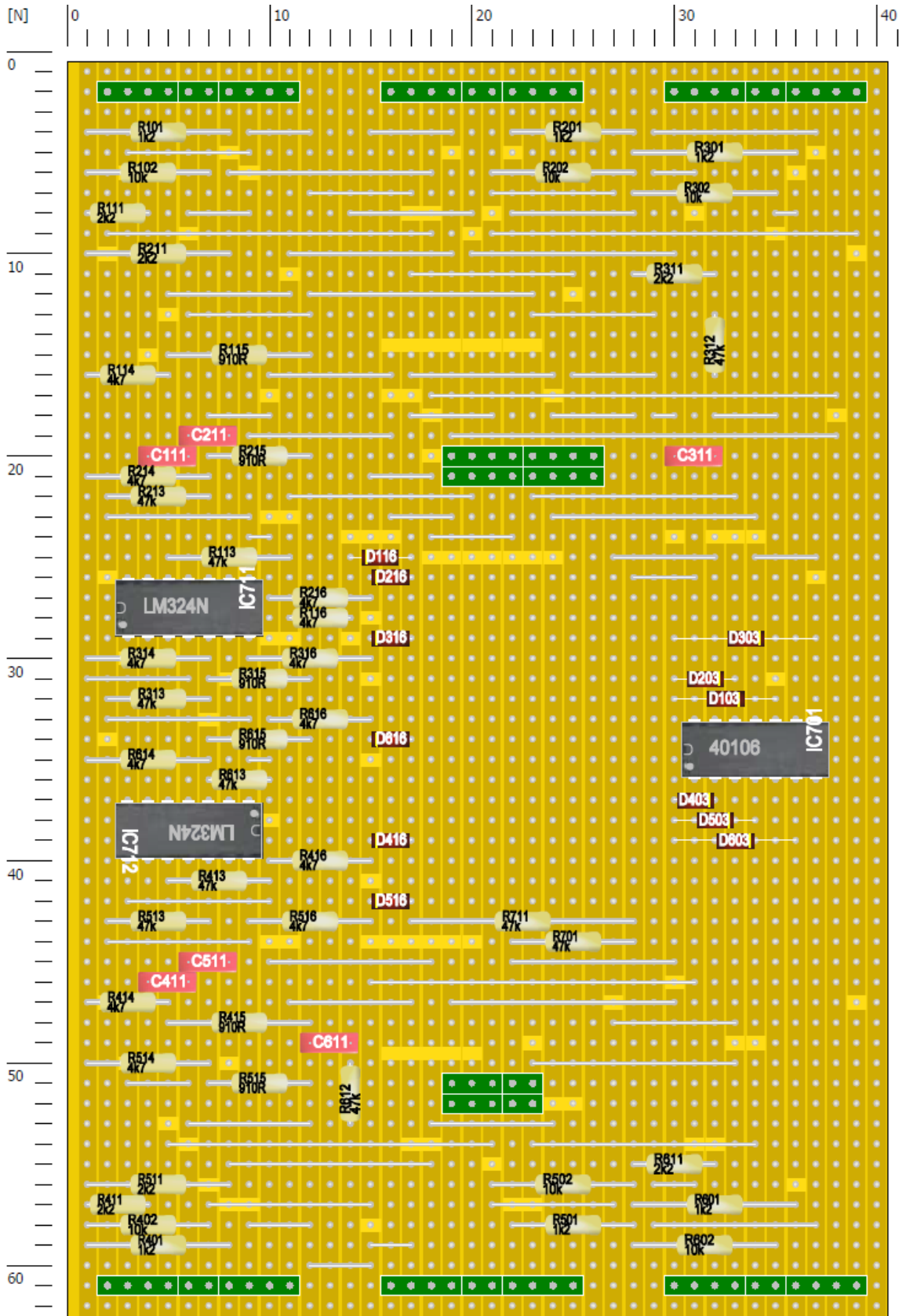


Abbildung 6-33: Layout der zweiten Lage des Hauptplatten-Stacks – Oberseite

Die gespiegelte Unterseite der Platine ist in Abbildung 6-34 dargestellt.

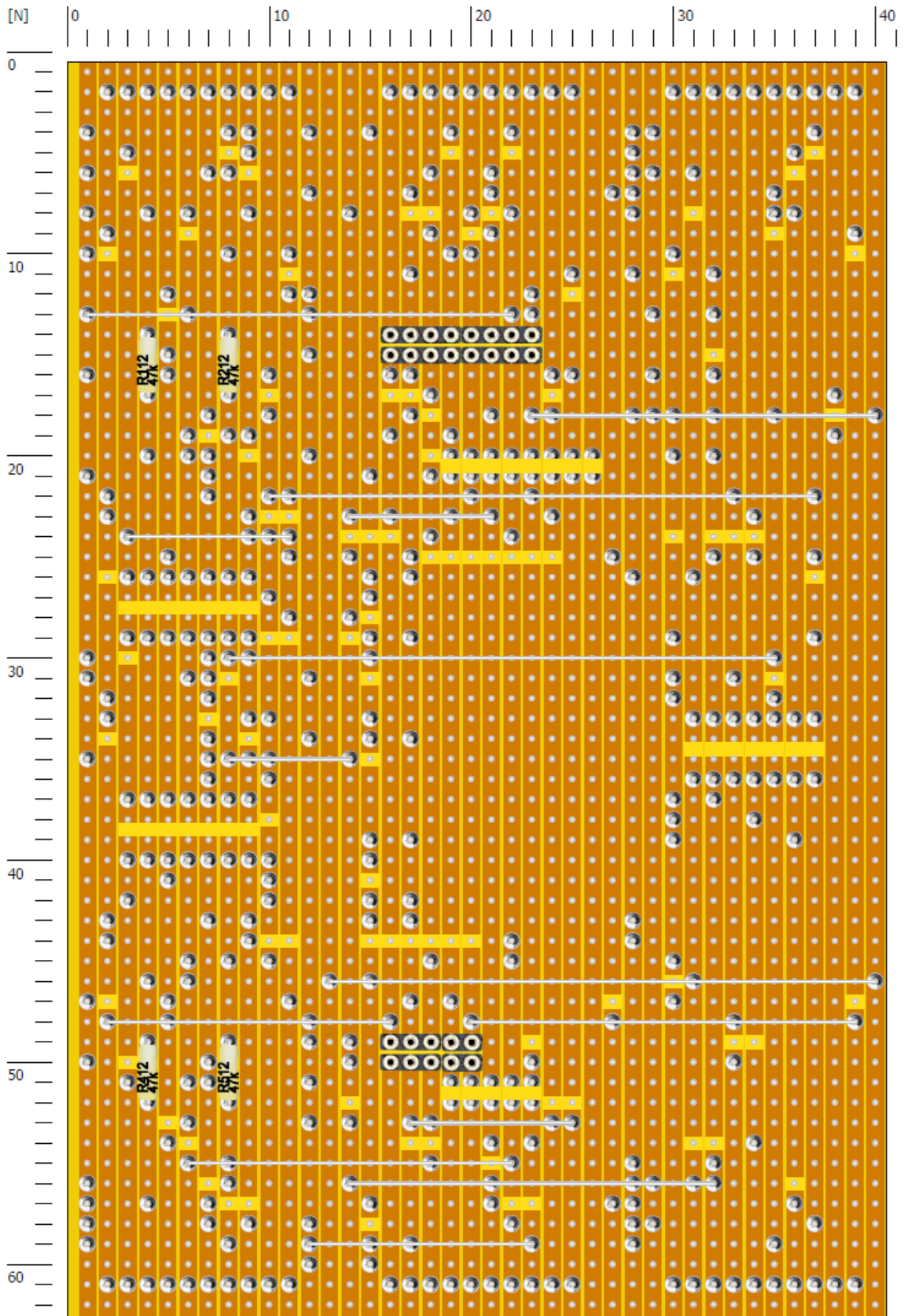


Abbildung 6-34: Layout der zweiten Lage des Hauptplatten-Stacks – Unterseite

- Dritte Lage: Verbindung mit USB6009, mit der Platine „Strommessung und Ansteuerung der Leistungselektronik“ und Aufbereitung der Spannungssignale

Abbildung 6-35 zeigt die Platinen-Oberseite der dritten Lage.

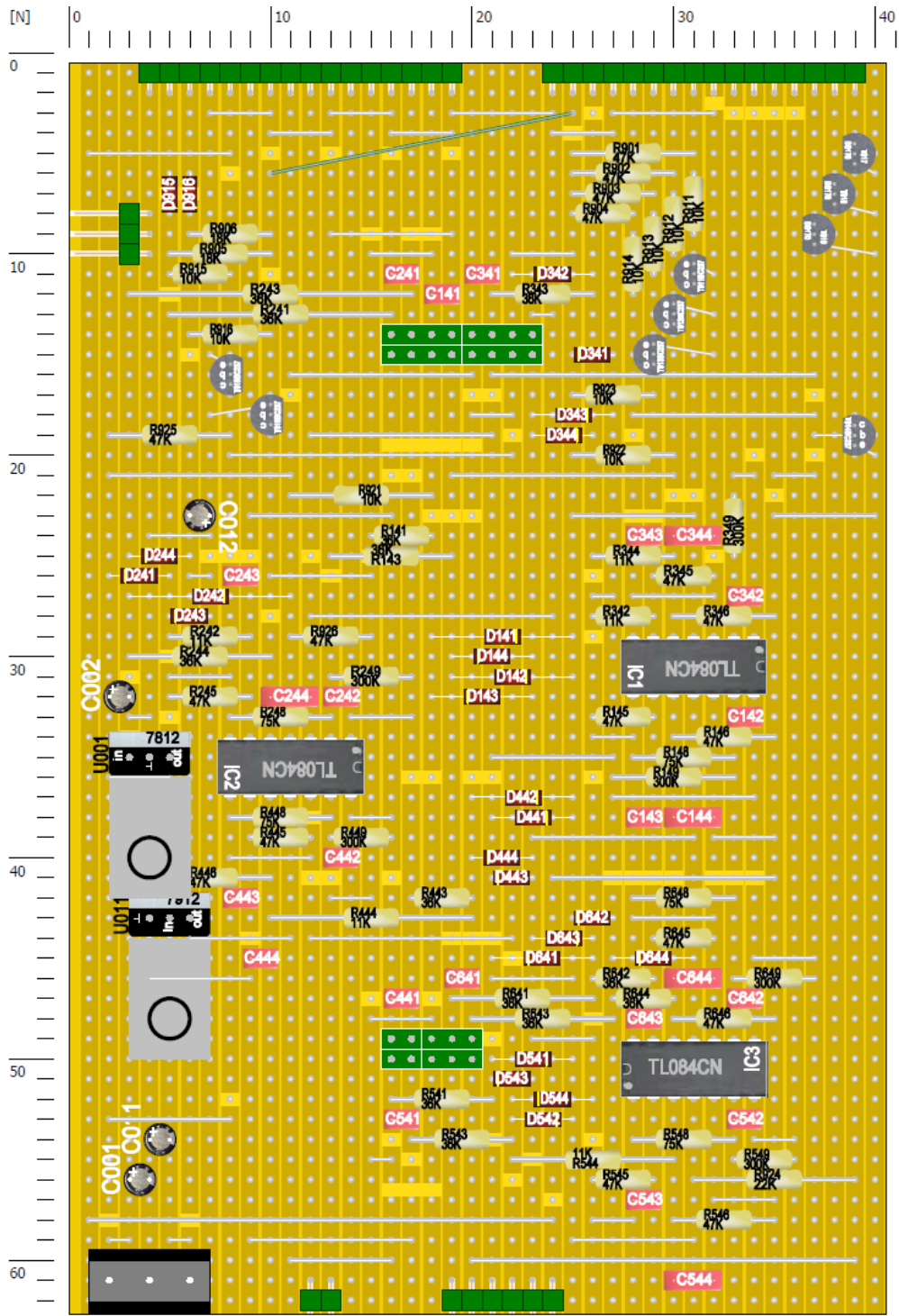


Abbildung 6-35: Layout der dritten Lage des Hauptplatinen-Stacks – Oberseite

Die Unterseite dieser Platine ist in Abbildung 6-36 zu sehen.

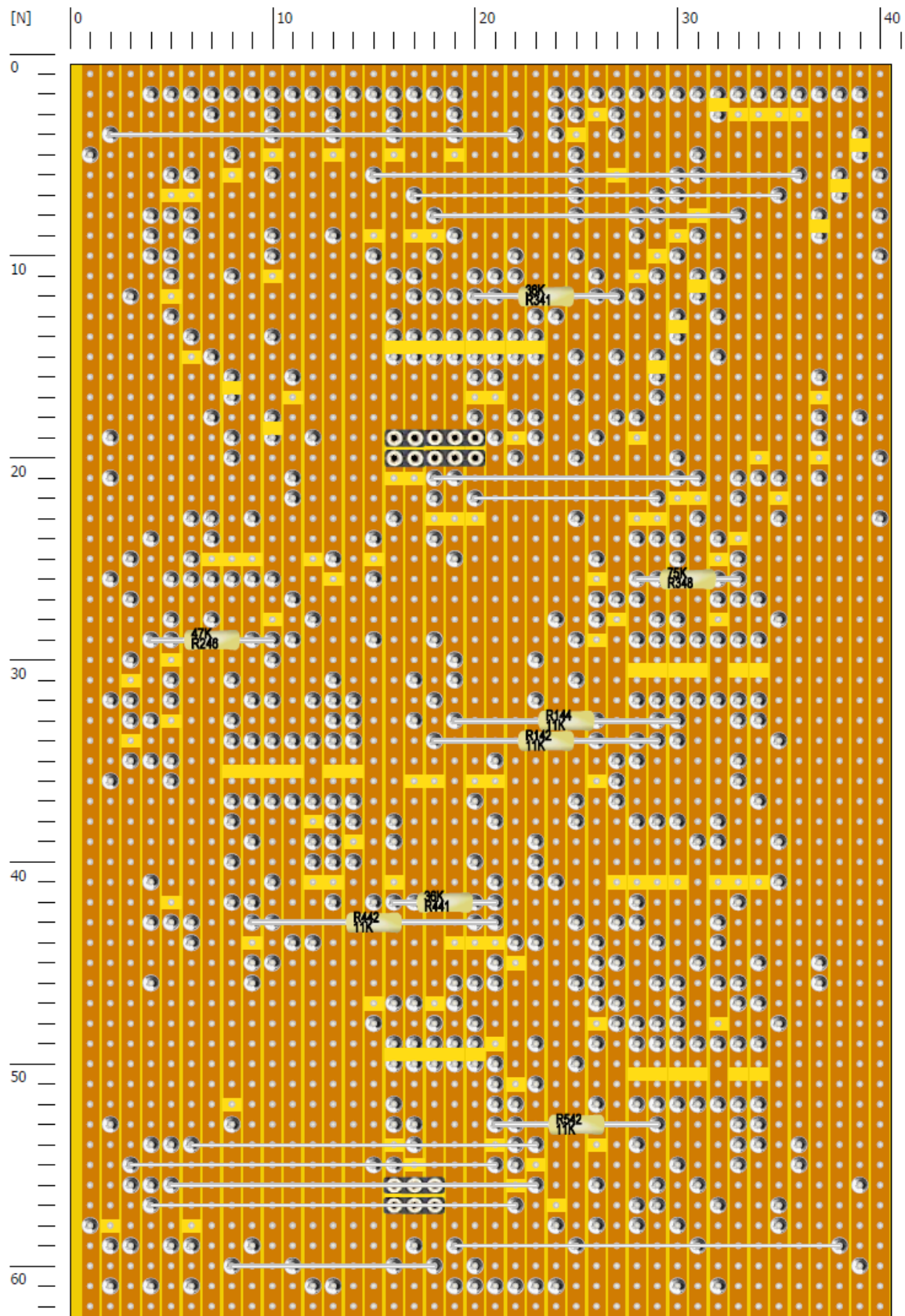


Abbildung 6-36: Layout der dritten Lage des Hauptplatten-Stacks – Unterseite

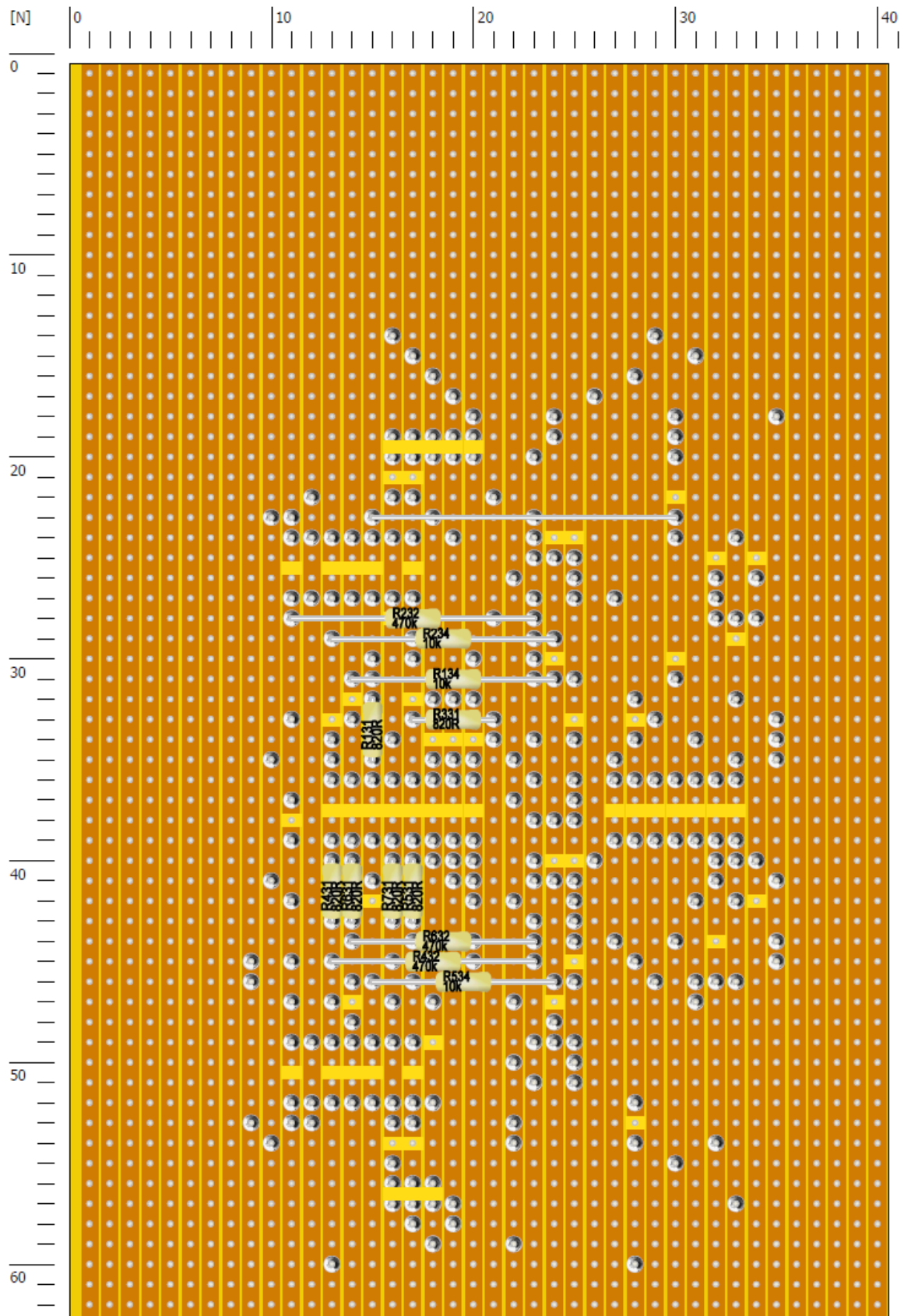


Abbildung 6-38: Layout der vierten Lage des Hauptplatten-Stacks – Unterseite

6.4.4 Strommessung und Ansteuerung Leistungselektronik

Abbildung 6-39 zeigt die Oberseite der Platine „Strommessung und Ansteuerung der Leistungselektronik.“

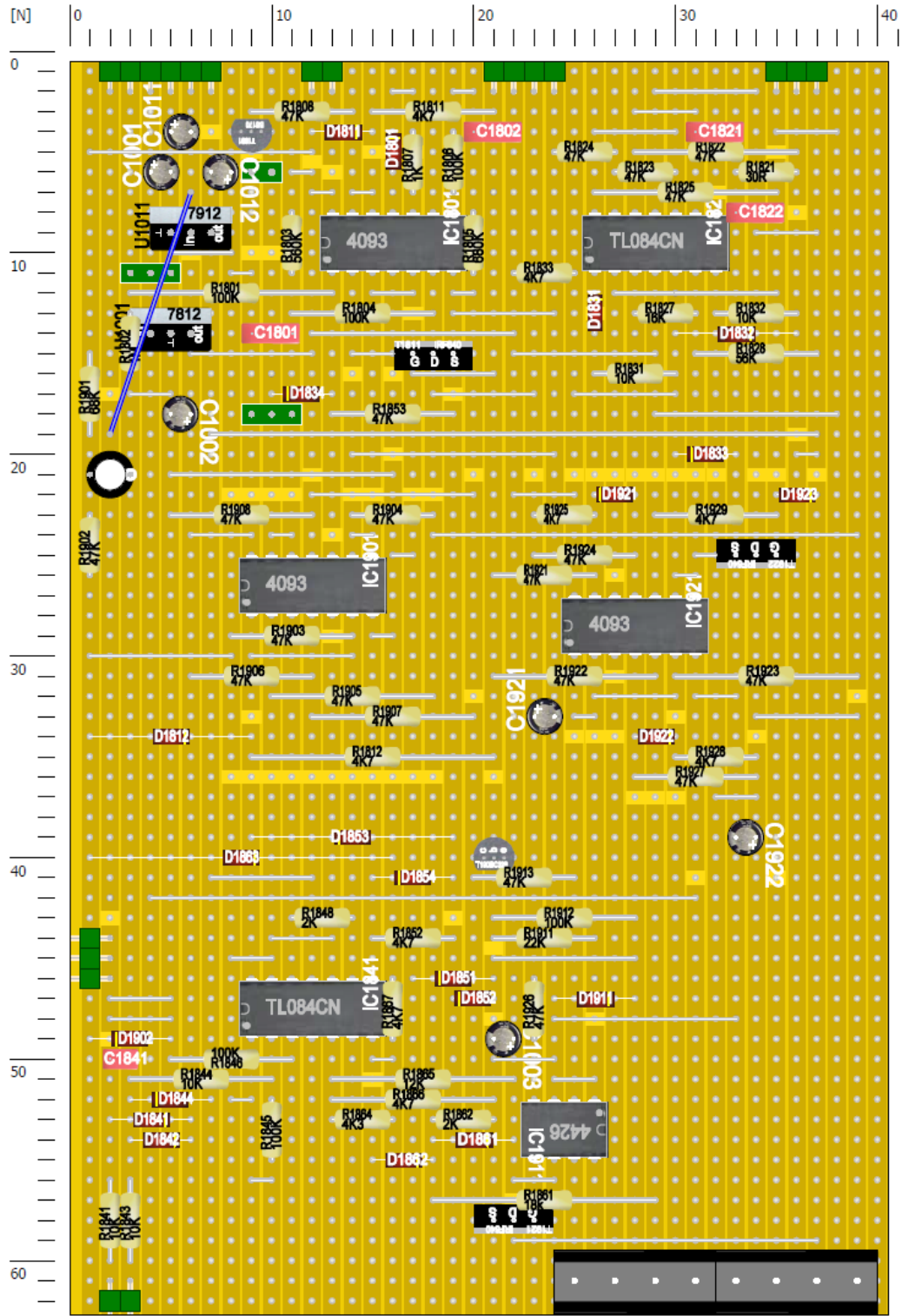


Abbildung 6-39: Layout der Strommessplatine – Oberseite

Die gespiegelte Unterseite ist in Abbildung 6-40 zu sehen.

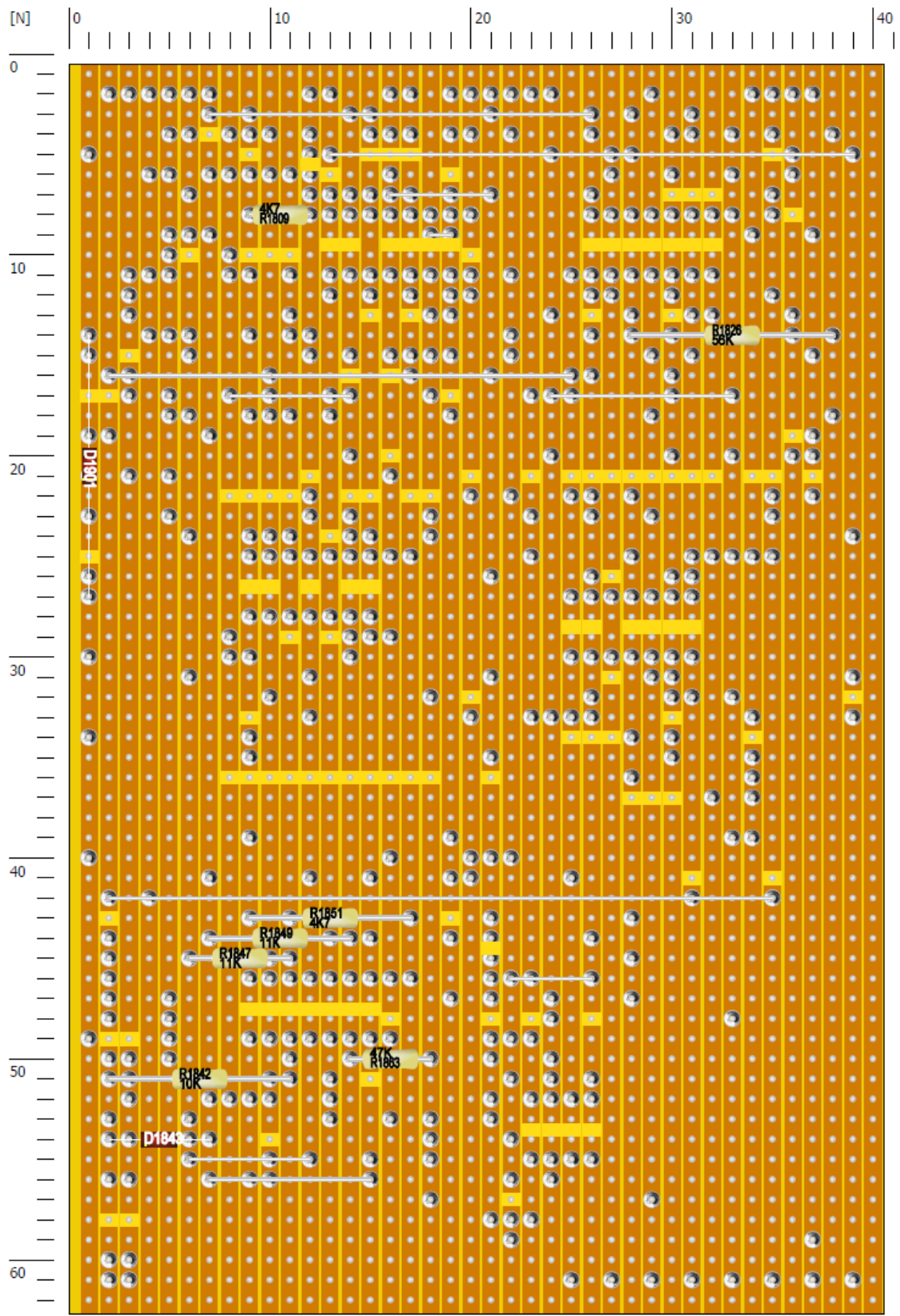


Abbildung 6-40: Layout der Strommessplatine – Unterseite

6.4.5 Leistungselektronik

Der Aufbau des leistungselektronischen Teils ist in Abbildung 6-41 zu sehen. Sämtliche Komponenten wurden auf eine Trägerplatte aus Aluminium geschraubt. Zur Abführung der dissipierten Leistung von Schottky-Diode und Leistung-MOSFET wurden diese Komponenten auf einen Kühlkörper montiert und mit einem Wärmeleitpad galvanisch davon getrennt. Für die KFZ-Relais wurde eine Haltevorrichtung konstruiert. Der gesamte Leistungsteil wurde mit Kabeln des Querschnitts 6 mm² verdrahtet. Am rechten Rand ist die Klemmenleiste zu sehen, über der Anschluss von Batterie, Last und IU-Ladegerät erfolgt. Der Kompensationswandler zur Strommessung ist unten im Bild zu erkennen.

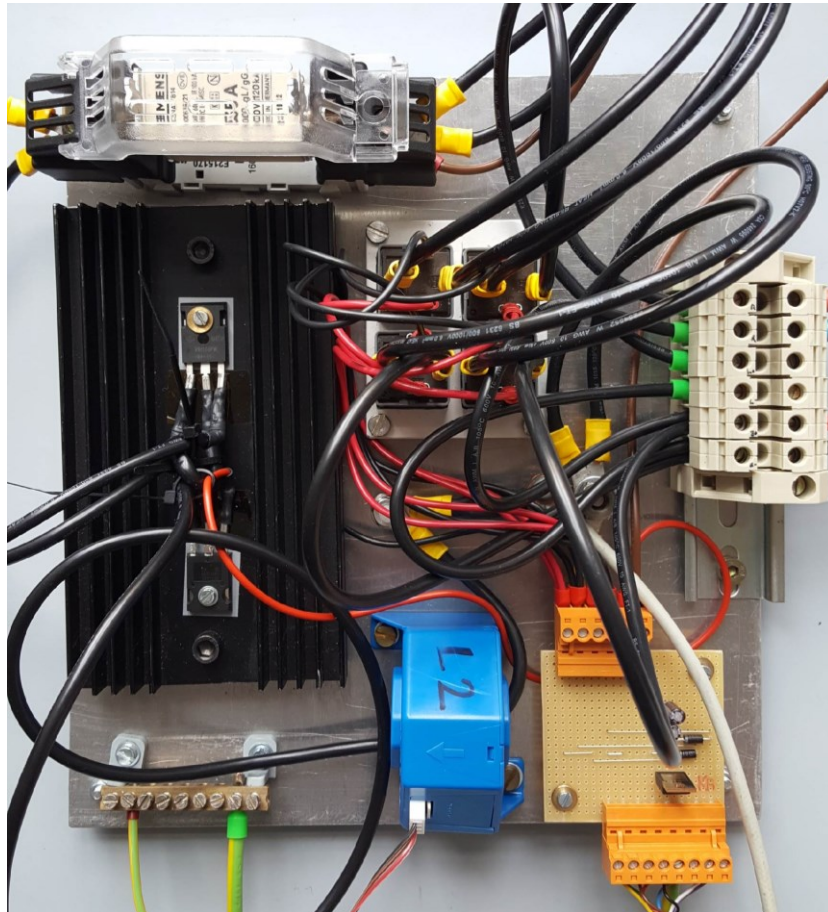


Abbildung 6-41: Aufbau der Leistungselektronik, der Umschaltrelais sowie der Anschlussklemmen

6.4.6 Software

Die in LabVIEW erstellte Software des Messsystems basiert auf einer vom IET erstellten Temperaturmessung mittels USB6009.

Nach Start des Programms läuft eine Sequenz ab, die die Zuteilung von Werten zu bestimmten Variablen übernimmt. Dies soll eine sichere Operation des Systems im Ruhezustand zu gewährleisten.

Der nächste Teil der Sequenz beinhaltet eine Schleife deren Abschaltkriterium nur bei Benutzerinteraktion mit dem Programm erfüllt ist („Programm beenden“). Das Frontpanel, wie in Abbildung 6-42 zu sehen, dient zum Verständnis der Interaktionen mit dem Benutzer. Die Schleife wird in einem Intervall von 100 ms ausgeführt. Innerhalb der Schleife bestimmt eine Case-Struktur den Status des Programms.

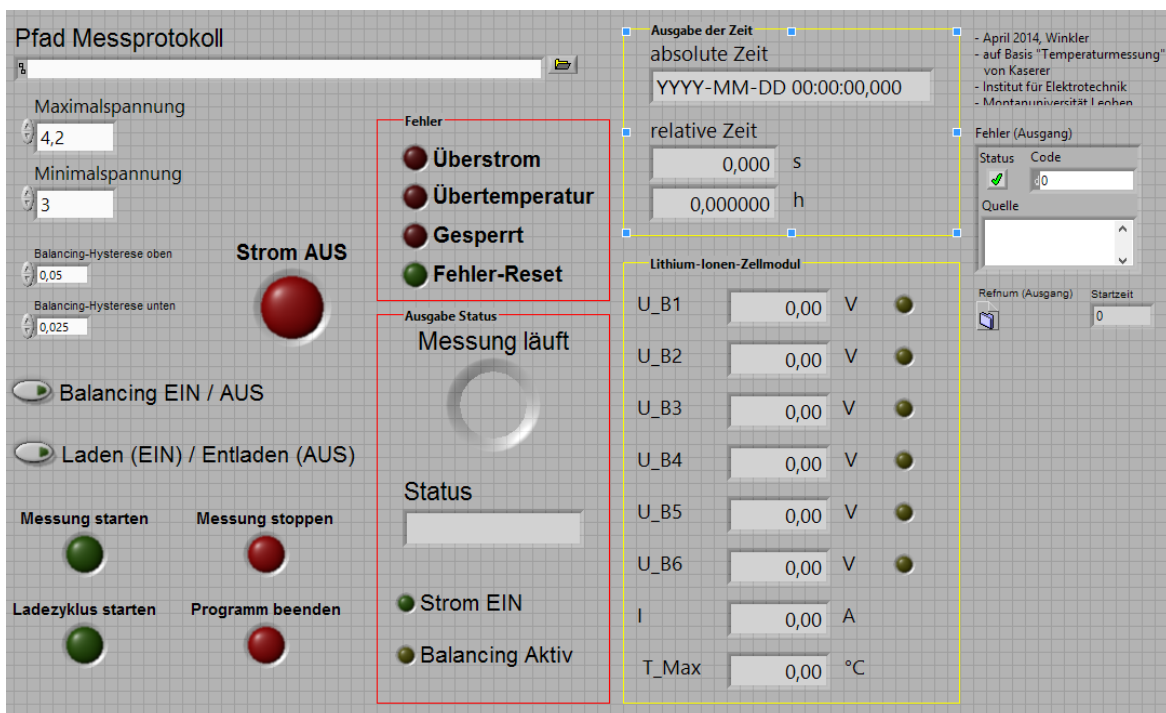


Abbildung 6-42: LabVIEW – Frontpanel des Messprogramms

Nach Start des Programms wird automatisch der Case „Initialisierung“ ausgeführt. Dabei wird unter anderem eine Datei zur Speicherung der Messwerte erstellt.

Nachdem die Initialisierung abgeschlossen ist geht das Programm führt das Programm den Case „Bereit“ aus und befindet sich im Ruhemodus. Erst bei Benutzerinteraktion („Messung starten“) wird der Case „Messung“ aktiviert. Dieser

Case beinhaltet den Großteil der Software für den Betrieb des Messsystems. Es werden unter anderem:

- die Messwerte aufgenommen
- in eine Datei geschrieben
- am Frontpanel dargestellt
- die Balancing-Kriterien ausgewertet
- die Balancing-Funktion aktiviert
- Fehler ausgelesen
- auf Fehlerfälle reagiert
- zwischen Laden und Entladen umgeschaltet
- die Schaltbefehle für den elektronischen Schalter generiert

Übergeordnete Abschaltkriterien sind vor allem die Limits der Zellspannungen. Überschreitet eine Zellspannung die Ladeschlussspannung, wird sofort der elektronische Schalter deaktiviert. Dasselbe tritt ein, wenn eine Zellspannung unter Minimalspannung fällt. Die Grenzwerte können, im Gegensatz zum Fensterkomparator auf den Schutzplatinen, definiert werden.

Weitere Kriterien zur Abschaltung des elektronischen Schalters sind Übertemperatur und Überstrom oder die Sperre der Schaltung. Die Erfassung dieser Signale ist in Abbildung 6-43 zu sehen.

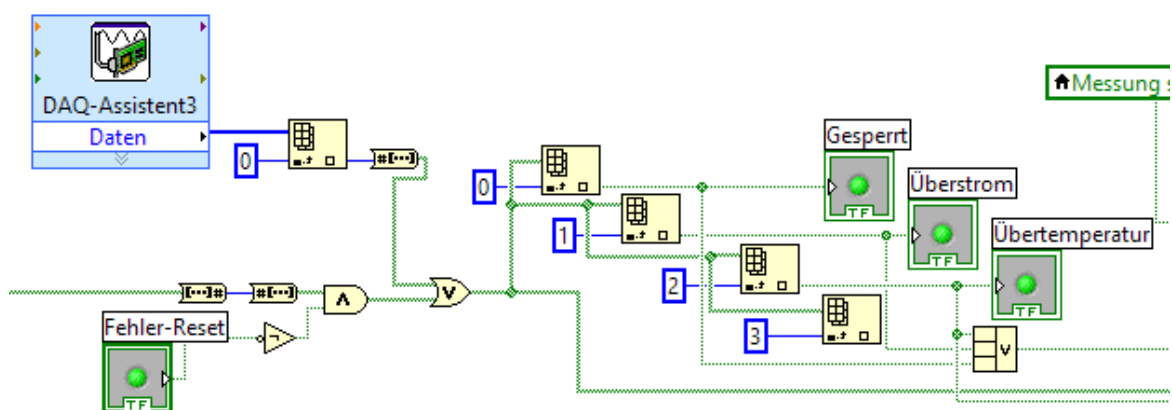


Abbildung 6-43: LabVIEW – Erfassung und Anzeige der Fehlersignale

Wie in Abbildung 6-44 zu sehen ist, wird für die Auswertung der Balancing-Kriterien jede Zellspannung in einer vergleichenden Logik verarbeitet. Dabei wird auf die

Einhaltung der Minimalspannung geachtet. Für das Balancing wird eine Hysterese definiert. D.h. ist die Differenz zwischen einer Zellspannung und der kleinsten Zellspannung größer als der obere Schwellwert, so wird das Balancing für diese Zelle aktiviert. Das Balancing bleibt solange aktiv, bis die Differenz unter den unteren Schwellwert sinkt. Die Auswertung des Balancings wird in einem Booleschen Array zusammengefasst und an ein Unterprogramm, einem SubVI, übergeben.

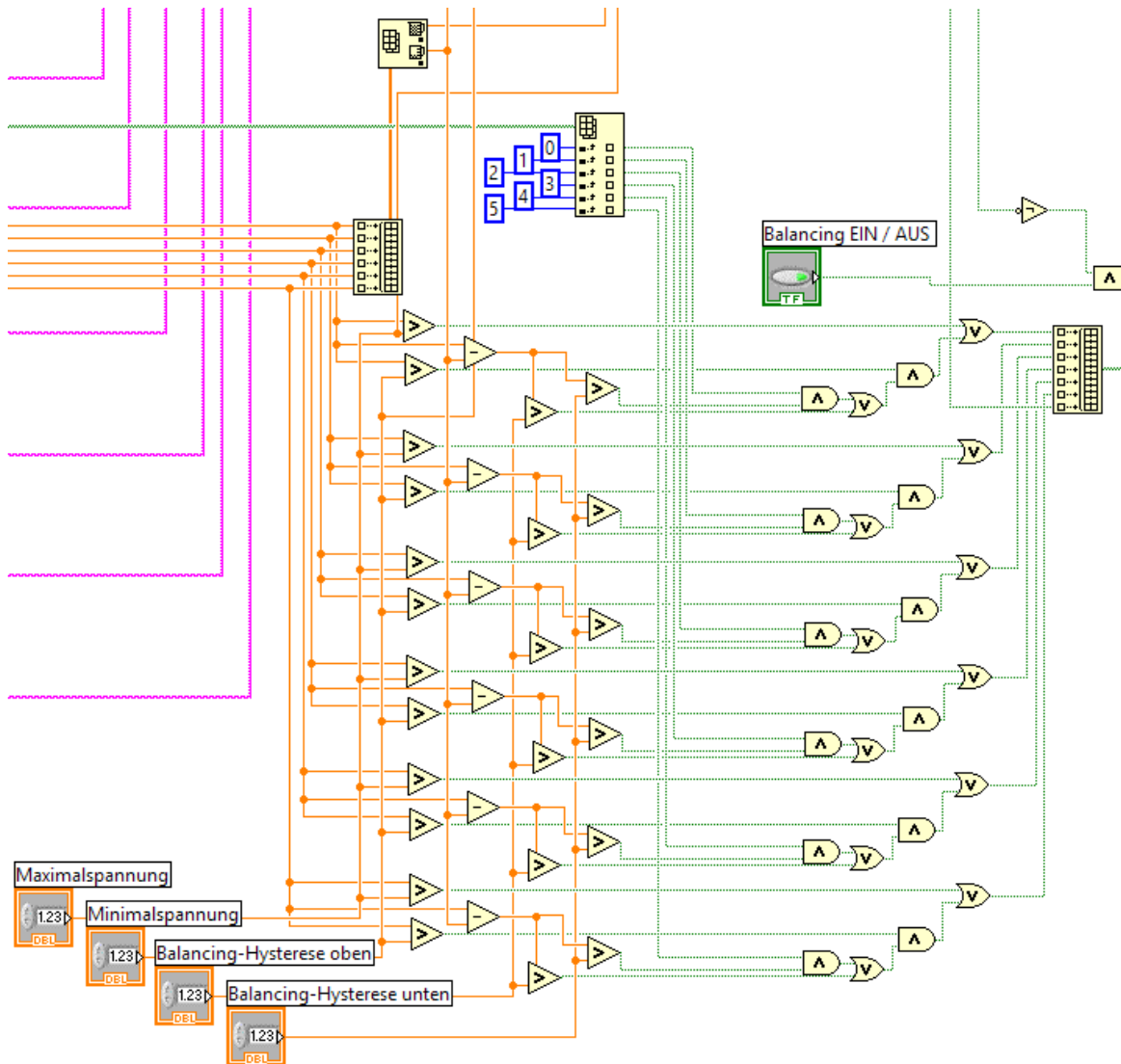


Abbildung 6-44: LabVIEW – Balancing-Logik

Das Balancing-SubVI, zu sehen in Abbildung 6-45, besteht aus einer Schleife, die für jeden Kanal einmal durchlaufen wird. Die Aufgabe besteht darin, die Signalpegel der drei Adressleitungen so zu legen, dass zuerst der Kanal und danach die Auslösung (siebter Kanal, binär: 111) adressiert wird. Danach werden alle Pegel

wieder auf 0 gelegt. Auf diese Weise wird verhindert, dass bei einem Software-Timeout ein ständiges Balancing-Signal ausgegeben wird.

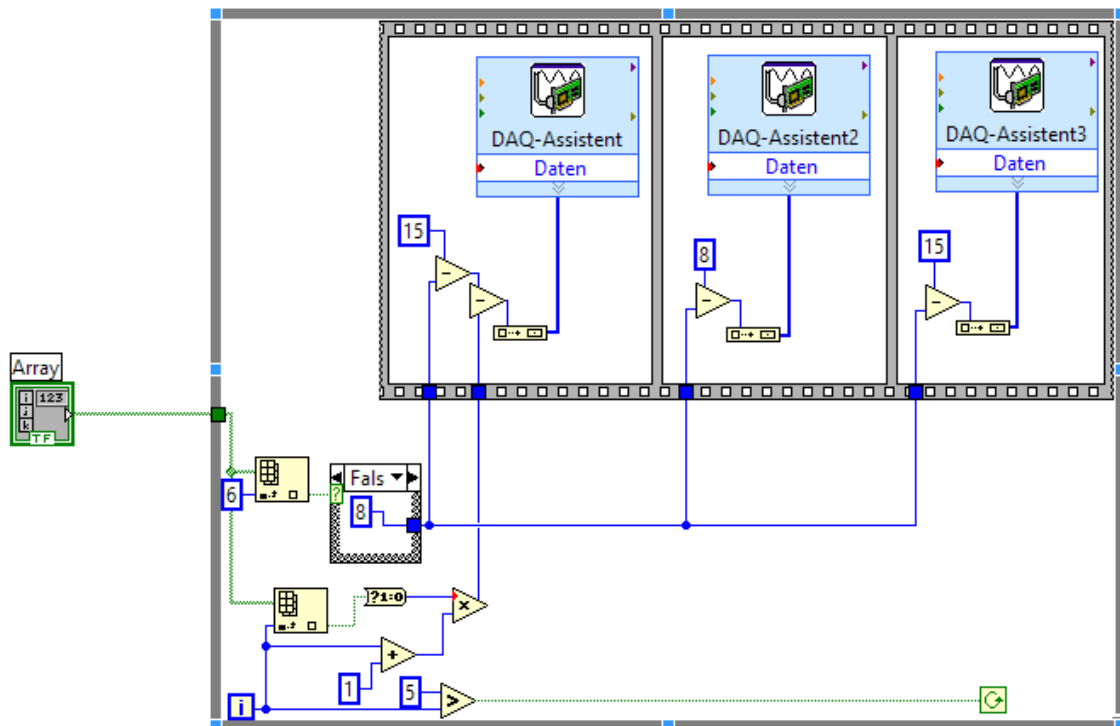


Abbildung 6-45: LabVIEW – SubVI zur Erzeugung der Balancing-Signale

6.4.7 Änderungen im Zuge des Projekts

Beim Aufbau eines Funktionsmusters sind häufig die Möglichkeiten und Probleme im Zuge der Durchführung unklar. Dadurch kann es zur Änderung von Projektbestandteilen während der Umsetzung kommen.

Ursachen für die Umgestaltung von Projektteilen beinhalten:

- Änderung der Anforderungen
- Erweiterung der Funktionen
- Inkompatibilität von Komponenten
- Ausgehen von falschen Annahmen
- Fehlendes Wissen
- Fehler im Design

Grundsätzlich gilt: Je früher eine Änderung absehbar ist, desto billiger ist ihre Umsetzung. Die Umgestaltung von Komponenten in der Design-Phase ist relativ

einfach, während die Manipulation des fertigen Produkts häufig teuer und aufwändig ist.

Im Zuge des Aufbaus des Messsystems wurden einige Änderungen durchgeführt, welche in diesem Abschnitt behandelt werden sollen:

- **Pegelwandlung**

Die Pegelwandlung für die Verbindung zwischen Hauptplatinen-Stack und USB6009 musste nachgerüstet werden. Dies zeigt sich vor allem im Design der Schaltung auf der Platine. Dabei wurden mehrere Designs getestet um den Anforderungen gerecht zu werden. Ursache für das Problem war zum einen die Unkenntnis über die verwendeten Pegel des USB6009 (TTL), andererseits Probleme mit der geräteinternen Beschaltung der Ein- und Ausgänge.

- **Pull-Up- und Vorwiderstände**

Im Zuge der ersten Funktionstests als Gesamtsystem offenbarten sich Probleme mit den Pegeln der digitalen Signale. Da viele Signale über Komparatoren und Schmitt-Trigger digitalisiert werden, sind häufig Schaltungen wie das Wired-AND im Einsatz. Dabei tritt das Problem auf, dass OPVs und Digitalbausteine limitierte Stromquellen bzw. Stromsenken sind. Wurden mehrere Signale zusammengefasst, so kam es zum Teil zu undefinierten Pegeln. Die Problematik konnte mit der richtigen Auswahl von Pull-Up- und Vorwiderständen behoben werden.

- **Änderungen an der Schutzplatine**

An der Schutzplatine musste mehrere Änderungen vorgenommen werden um ein sicheres und korrektes Operieren möglich zu machen.

Ein grobes Problem war ein Kurzschluss zwischen den positiven und negativen Zellanschlüssen. Der Ursprung dieses Fehlers liegt in der Kontaktierung von negativer Massefläche und dem positiven Abgriff am Langloch. Die Kontaktstelle sollte nur auf der Oberseite kontaktierbar sein, war jedoch als Durchkontaktierung ausgeführt. Der Fehler konnte behoben werden, indem die negative Massefläche im Bereich des positiven Kontakts weggefräst wurde. Des Weiteren war die Isolierung der offenen Kupferfläche mit Epoxidharz notwendig.

Ein weiteres Problem lag in der Beschaltung eines Optokopplers für den Über- / Unterspannungsschutz. Aufgrund der Änderung des Bauteildesigns in TARGET 3001! wurden bestimmte Anschlüsse vertauscht. Der Fehler blieb bis zum Funktionstest der Schutzplatine unentdeckt. Die Fehlerbehebung bestand darin, die Leiterbahnen des umgekehrt beschalteten Optokopplers aufzufräsen und die korrekte Verbindung mit Lackdraht herzustellen.

Die gewählten Leistungswiderstände mit 2.2Ω sollten beim Balancing einen ausreichend hohen Strom tragen. Die Auslegung erfolgte auf die Nennleistung der Keramikwiderstände. Im Funktionstest wurden festgestellt, dass sich die Widerstände nach einigen Minuten auf Temperaturen bis zu $200 \text{ }^\circ\text{C}$ erwärmen. Dies kann einerseits eine Beschädigung der Platine zur Folge haben, andererseits beeinflusst die Temperatur die Lebensdauer der räumlich nahen Optokoppler negativ. Um die Temperatur in Grenzen zu halten werden die Widerstandswerte auf Kosten der möglichen Balancing-Leistung erhöht.

In zukünftigen Design-Stadien sind die genannten Probleme zu beheben.

- **Eingesetzter OPV Typ für die Spannungssignalverarbeitung**

Für die Aufbereitung der Spannungssignale wurden OPVs gewählt die einen Kompromiss zwischen Kosten und Präzision darstellen. Der Typ MC33079 des Herstellers ON Semiconductor schien geeignet da seine Offset-Spannung kleiner ist als die der Typen LM324 bzw. TL084 und die Kosten etwa in Zehntel des Typs OP400 betragen. Im Einsatz zeigt sich jedoch, dass eine Abweichung von etwa 40 mV auftrat. Eine Verbindung mit der gemessenen Schwingung im Bereich einiger hundert kHz am invertierenden Eingang ist wahrscheinlich.

Mit dem Ersetzen den OPVs durch den Typ TL084 konnte einerseits die geforderte Präzision eingehalten und andererseits Kosten gespart werden.

- **Umschaltung zwischen Laden und Entladen**

Die Umschaltung zwischen Laden und Entladen war ursprünglich als manueller Schalter geplant. Der zyklische Betrieb der Messung der Batteriemodule machte allerdings eine Erweiterung des Systems notwendig.

Die Nutzbarmachung der Analogsignale und deren Pegelwandlung waren Teil dieser Änderungen. Zudem wurden die Schnittstelle zwischen Hauptplatinen-Stack und der Platine „Strommessung und Ansteuerung der Leistungselektronik“ um einen 2-poligen Molex-Steckverbinder erweitert.

7 Ergebnisse

In Abbildung 7-1 ist das fertige Funktionsmuster im Test am Batteriemodul zu sehen. Im Vordergrund rechts ist der Hauptplatinen-Stack zu sehen. Auf der linken Seite befindet sich die Platine zur Strommessung, dahinter die leistungselektronische Baugruppe. Im Hintergrund befindet sich der Computer zur Messwerterfassung. Als Last wurde ein Anlasswiderstand verwendet. Dieser befindet sich unter dem Messsystem.

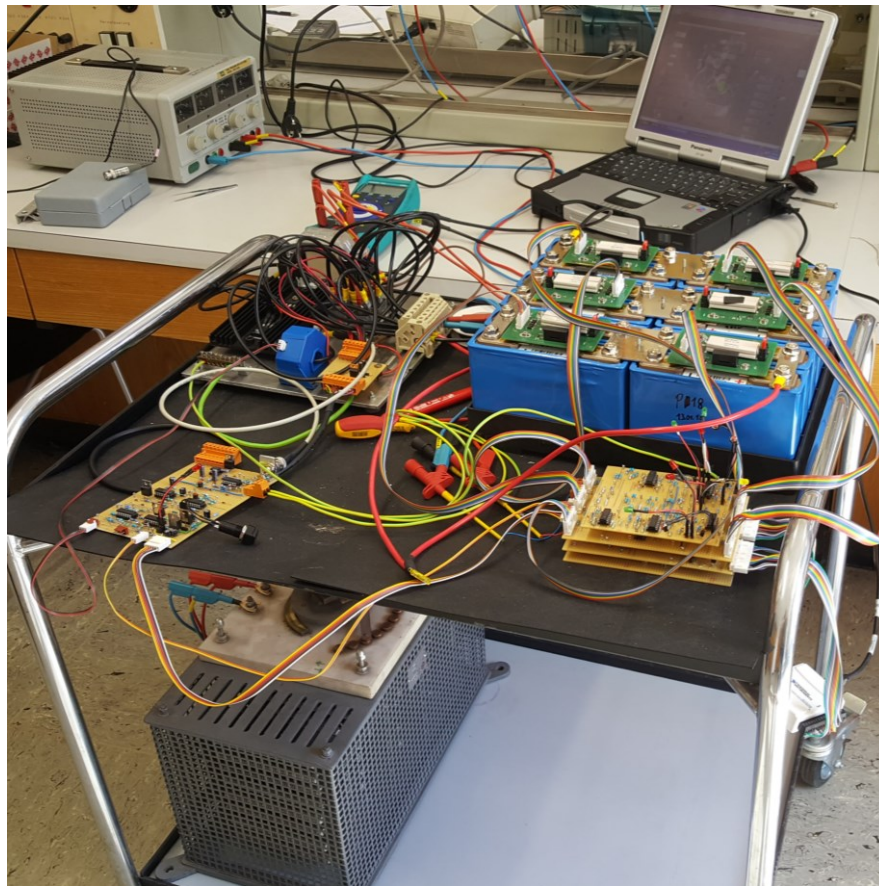


Abbildung 7-1: Testaufbau des Messsystems am Batteriemodul

7.1 Produktentwicklung

Im Zuge des Projekts wurde ein Funktionsmuster erstellt, das seinen Anforderungen gerecht wird. Es wurden Schaltungen zur Messwertverarbeitung entworfen und umgesetzt, die in weiteren Projekten Verwendung finden können. Die geforderten Toleranzen konnten eingehalten werden und sämtliche Komponenten sind für den

vorgegebenen Betriebsbereich ausgelegt. Zusätzlich wurden Erkenntnisse in der Umsetzung des Projekts gesammelt, die in weitere Entwicklungsstufen miteinfließen können.

7.2 Funktion

Das erstellte Funktionsmuster wurde testweise mit in Serie geschalteten Labornetzteilen in Betrieb genommen. Es konnte gezeigt werden, dass das Balancing wie geplant funktioniert. Problematisch war der Test unter Realbedingungen, da der gelieferte Strom der verwendeten Labornetzteile nicht ausreichend hoch war.

Ein Problem für das Messsystem stellen elektromagnetische Einflüsse dar. Sowohl die Einkopplung von Störsignalen als auch das Erzeugen solcher ist ein Thema, das weitere Aufmerksamkeit benötigt. Die elektromagnetische Verträglichkeit des Messsystems ist zum Teil aufgrund der Ausführung auf Streifenrasterplatten eingeschränkt und durch Realisierung als gedruckte Platine sicher zu verbessern.

Ein zweiter Funktionstest an der Batterie zeigte die Funktion unter Realbedingungen. Dabei wurde das Batteriemodul mit Strömen bis zu 10 A betrieben. Da alle Zellen des Moduls etwa den gleichen Ladezustand hatten, war ein Test der Balancing-Funktion nicht möglich.

Ein Dauerbetriebstest ist vorgesehen würde jedoch den Rahmen dieser Masterarbeit sprengen.

7.3 Test-Ergebnisse

Neben der Funktionsprüfung des Systems wurde das System auf weitere Parameter untersucht. So wurde sowohl die Präzision der Verarbeitung der Spannungssignale als auch die Ansprechzeit des Koaxial-Shunts untersucht.

7.3.1 Präzision der aufbereiteten Spannungssignale

Der Messaufbau der Gleichtaktverstärkung ist in Abbildung 7-2 zu sehen. Er bestand aus zwei in Serie geschalteten Labornetzteilen die auf das Massepotential der Signalverarbeitung gelegt wurden. Auf Spannungsquelle U_{Q1} konnte der Gleichspannungsanteil eingestellt werden. Spannungsquelle U_{Q2} definierte die Spannungsdifferenz an den Kontakten der Schutzplatine. Im Zuge des Tests wurden die Fehler aller Kanäle in Abhängigkeit des Gleichspannungsanteils ermittelt.

Zur Messung wurden Multimeter des Typs Unigor 355 verwendet. Es wurden die Spannungen an den Kontakten der Schutzplatine sowie das Spannungssignal an der Schnittstelle zum USB6009 gemessen.

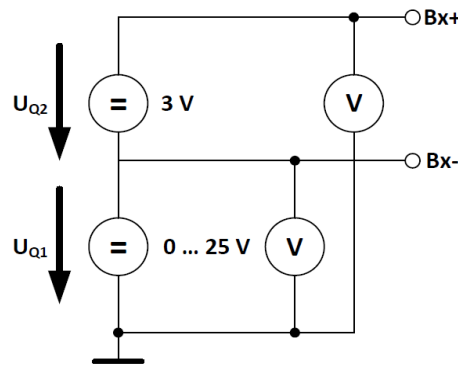


Abbildung 7-2: Schaltbild des Testaufbaus zur Bestimmung der Gleichtaktverstärkung

Es wurden zwei unterschiedliche OPV-Typen untersucht: MC33079 und TL084.

Abbildung 7-3 a und b zeigt die Abhängigkeit des Fehlers der Messwertaufbereitung mit beiden OPV-Typen. Trotz der geringeren Offset-Spannung des OPVs MC33079 ist der relative Fehler bei Verwendung vom Typ TL084 geringer. Mögliche Ursachen dafür wurden im Abschnitt 6.4.7 erläutert.

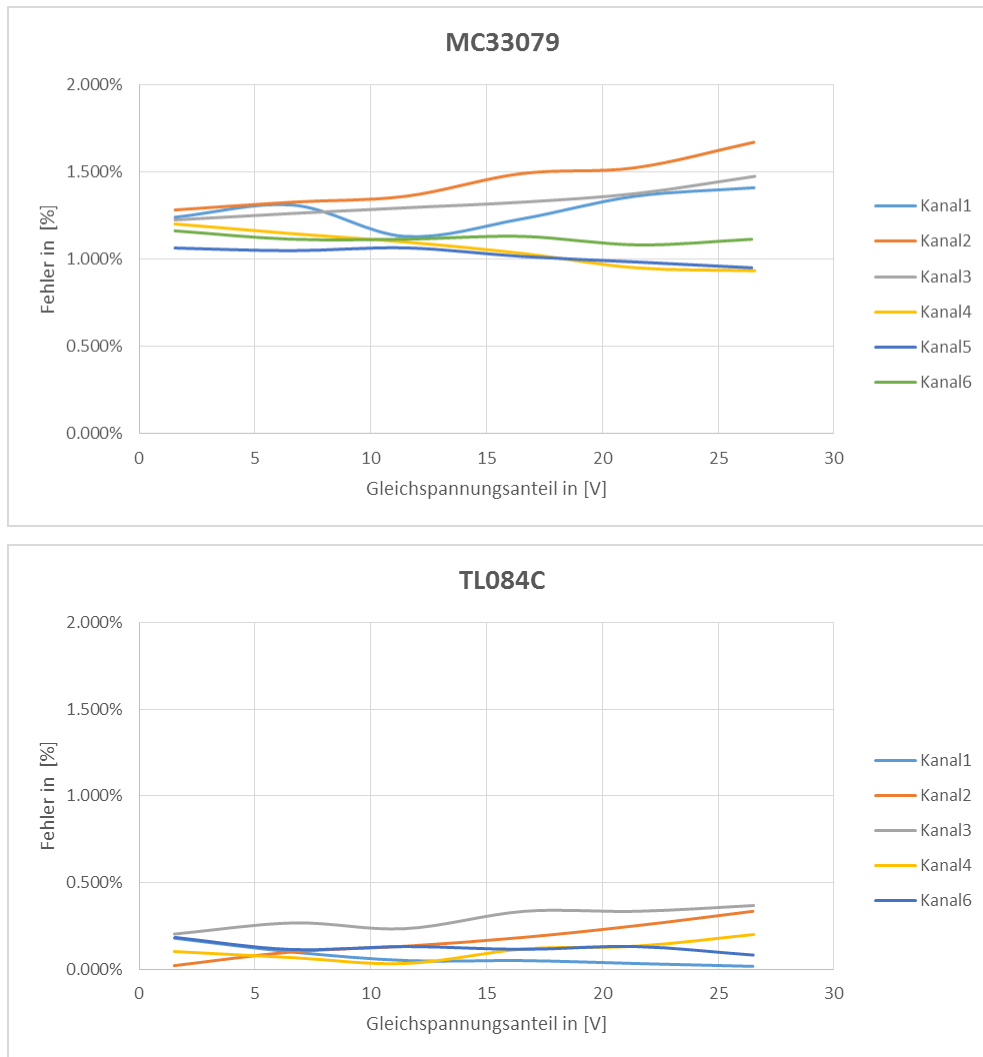


Abbildung 7-3: Messdatenauswertung für die Gleichtaktverstärkung bei Verwendung von OPV MC33079 (a) und TL084 (b)

Des Weiteren wurde mit dieser Messung gezeigt, dass der Fehler der Messwertaufbereitung bei Verwendung eines kompatiblen OPV-Typs innerhalb der Toleranz liegt.

7.3.2 Koaxial-Shunt

In Abbildung 7-4 ist der Messaufbau zur Untersuchung der Ansprechzeit des Koaxial-Shunts dargestellt. Dafür wurde eine Spannungsquelle an den Leistungsteil des Messsystems geschaltet und über Kondensatoren stabilisiert. Der elektronische Schalter wurde über einen Funktionsgenerator angesteuert und anschließend die Spannungsverläufe an Koaxial-Shunt und MOSFET ermittelt.

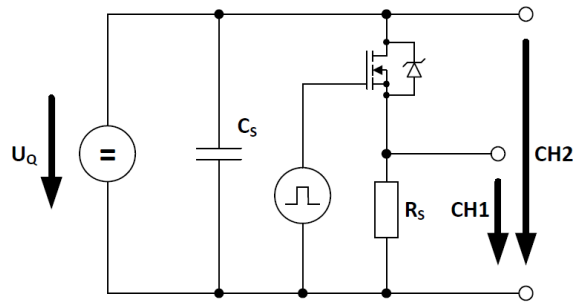


Abbildung 7-4: Schaltbild zur Untersuchung der Ansprechzeit des Koaxial-Shunts

Im Zuge dieser Messung wurde ermittelt, dass die Ansprechzeit des Koaxial-Shunts unter $10 \mu\text{s}$ liegt. Bei Optimierung des Messaufbaus könnten Fehlerströme noch vor Schädigung der Sicherung abgeschaltet werden.

8 Ausblick und Verbesserung des Systems

Parallel zu dem beschriebenen Projekt wurde vom IET eine zweite Anlage nach einfacherer Methode aufgebaut. Dabei wird die Modulspannung zur Auslösung des Schutzes herangezogen. Die Kontaktierung erfolgt zwischen den Zellen. Ein Spannungsniveau dient als Potential für zwei Zellen. Somit kann der Aufwand für die Verdrahtung wesentlich reduziert werden. Die Erfassung der Spannungen erfolgt über definierte Spannungsteiler.

Im Vergleich zum System des IET bietet das in dieser Arbeit behandelte Messsystem mehr Informationen über die Zelle und ihren Zustand. Die Modularität, Anpassungsfähigkeit und Erweiterbarkeit ist ebenfalls ein Vorteil.

Die Nachteile gegenüber dem einfacheren Messsystem liegen im deutlich höheren Aufwand und der Komplexität. Der Vergleich der Anzahl an Komponenten und der Baugröße gibt Auskunft über den ersten der beiden Aspekte. Je nach geplanter Anwendung muss abgewogen werden, ob Mehrkosten in Form von Materialkosten und Arbeitsstunden gerechtfertigt sind. Die Komplexität wiederum wirkt sich auf die Fehleranfälligkeit des Systems aus. Je mehr Komponenten ein System beinhaltet desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine davon ausfällt.

8.1 Mögliche Verbesserungen am vorhanden System

Um das entwickelte Messsystem für die Prüfung der vorhandenen Batteriemodule einzusetzen wären einige Verbesserungen interessant:

- **Gehäuse und Aufbau**

Die Komponenten des Systems liegen im aktuellen Zustand frei. Für den Einsatz als Prüfgerät ist ein Gehäuse zu konstruieren, um die Komponenten vor äußeren Einflüssen zu schützen. Um die operativen Eigenschaften zu verbessern, könnte das System auf engerem Raum aufgebaut werden.

- **Schnittstellen**

Für eine einfache Bedienung ist die Verwendung von geeigneten Schnittstellen empfehlenswert. Der verwendete Molex-Steckverbinder eignet sich, wenn die Verbindungen permanent bestehen bleiben. Sollten diese regelmäßig ein- und ausgesteckt werden, könnte sich eine andere Schnittstelle besser eignen.

- **Erdungskonzept und elektromagnetische Verträglichkeit**

Das aktuelle System ist hinsichtlich elektromagnetischer Verträglichkeit noch verbesserungsfähig. Die Komponenten besitzen keine Schirmung gegen äußere Störeinflüsse und können so in einer Umgebung, in der hohe Ströme zu erwarten sind, leicht beeinflusst werden.

Die Filterung von hochfrequenten Einkopplungen auf Signalleitungen bietet ebenso Verbesserungspotential. Vor allem der Entstörung von digitalen Signalen wurde bisher wenig Beachtung geschenkt.

Auch die Umsetzung eines sinnvollen Erdungskonzepts könnte in den Verbesserungsprozess mit einfließen.

- **Verbesserung an der Schutzplatine**

Verbesserungen an der Schutzplatine beinhalten:

- räumliche Distanzierung der Optokoppler von „heißen“ Zonen.
- leistungsfähigere Balancing-Widerstände
- bessere thermische Entkopplung der Balancing-Widerstände
- größere Kriechstrecke bei galvanischer Trennung – vor allem bei Leiterplatten-Header (RM 2.54 mm)
- Integrierung der Vorwiderstände für das Aktivierungssignal
- Größeres Package für die Schottky-Diode im Verpolungspfad
- Optimieren des Leiterplattenroutings – bspw. Differential pair für PTC-Thermistoren
- Glättungskondensatoren gegen Störeinkopplungen

8.2 Ausblick

Eine Fortsetzung dieses Projekts könnte die Entwicklung eines Prototyps sein. Für diesen Schritt soll der vorangegangene Abschnitt eine Hilfestellung bieten. Schritte hin zu einem Prototyp gehen in Richtung Vereinfachung. Eine präzisere Definition der Anforderungen in Begleitung eines verbesserten Designs wäre für ein neues Produkt von Vorteil. Auch auf die Benutzerfreundlichkeit sollte im Zuge eines weiteren Entwicklungsstadiums eingegangen werden.

Die durchgängige Prüfung von Batteriemodulen erfordert das zyklische Laden und Entladen. Dabei wird eine wesentliche Menge an Energie umgesetzt. Sollte eine größere Anzahl Batteriemodule geprüft werden, ist ein Konzept für die Belastung bzw. Ladung der Batterie notwendig. Es könnte als sinnvoll erachtet werden, die der Batterie entnommene Ladung zu speichern und im nächsten Ladezyklus wieder einzusetzen. Auf diese Weise würden nur noch die Verluste aufgrund des Batteriewirkungsgrades und des Balancings als Wärme dissipiert. Eine Möglichkeit wäre eine Pufferbatterie in Verbindung mit einem Tief- bzw. Hochsetzsteller um Energie aufzunehmen und wieder zur Verfügung zu stellen.

Ein weiterer Weg, die Erkenntnisse dieser Arbeit zu nutzen, liegt in der Entwicklung eines Batterie-Monitorings. Für den Einsatz von Lithium-Ionen-Zellen in leistungsstarken kommerziellen Systemen, wie die Elektromobilität, ist ein Batteriemanagementsystem von großer Bedeutung. Die Risiken, die der Einsatz von Lithium-Ionen-Modulen mit sich bringt, können dadurch wesentlich vermindert werden.

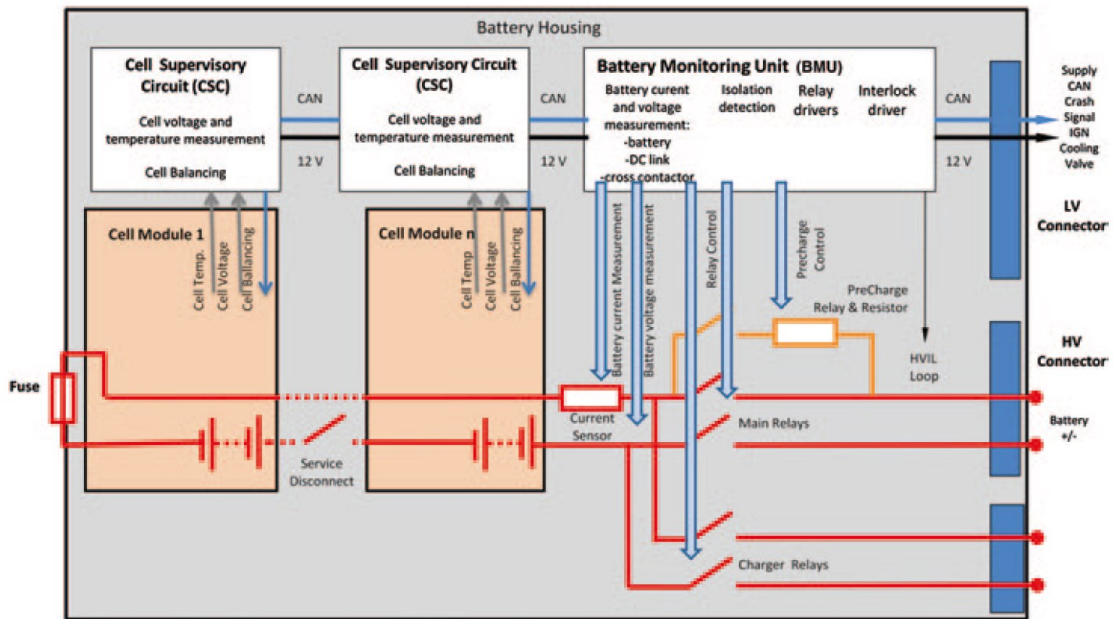


Abbildung 8-1: Aufbau eines Batteriemanagementsystems für Lithium-Ionen-Module [10]

Um die am IET vorhandenen Batteriemodule wieder einsetzen zu können, muss daher ein Batteriemangement für die jeweilige Anwendung aufgebaut werden. Auf dieser Arbeit aufbauend könnte ein solches System entwickelt werden. In dem Fall könnten Teile der Arbeit übernommen werden und die Erkenntnisse zur Fehlervermeidung dienen.

Ein weiterer Schritt nach der Prototypenentwicklung wäre ein ganzheitliches Testsystem für ReUse-Lithium-Ionen-Batterien. Für eine genauere Betrachtung der verbleibenden Kapazität und der zu erwartenden Lebensdauer von ReUse-Batteriemodulen ist die Messung weiterer Größen notwendig. Zellspannung, Batteriestrom, Temperatur und Lade- bzw. Entladezeit lassen eine Tendenz erkennen, ob Zellen noch brauchbar sind. Eine ganzheitliche Abschätzung über die Zellgesundheit jedoch benötigt weitere Größen wie etwa die Selbstentladerate und den Innenwiderstand der Zelle. Ein System zum vollständigen Test und zur Auswertung des Status der Zelle ist eine denkbare Entwicklung sofern die Wiederverwendung von Lithium-ionen-Batterien sich als wirtschaftlich profitabel erweist.

9 Literaturverzeichnis

- [1] S. Santhanagopalan, J. Stockel, and R.E. White, "SECONDARY BATTERIES – LITHIUM RECHARGEABLE SYSTEMS – LITHIUM-ION | Lifetime Prediction," in *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, J. Garche, Ed, Amsterdam: Elsevier, 2009, pp. 418–437.
- [2] Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft and Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, *Ausschreibung "Mobilität der Zukunft": Vorkommerzielle Beschaffung (PCP) für eine elektrisch betriebene Lokomotive im Verschub ohne Oberleitung*. Ausschreibungsleitfaden. Wien.
- [3] H. O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Weiß, *Einsatz von ReUse-Lithium-Ionen-Batterien in Muldenkippern in Tagebauminen und Umbau*. Leoben Institutsinterne vertrauliche Unterlagen – UNVERÖFFENTLICHT, Einsichtnahme nur für den Zweck der Anfertigung dieser Masterarbeit.
- [4] National Instruments, *USER GUIDE - NI USB-6008/6009: Bus-Powered Multifunction DAQ USB Device*. Austin, Texas, USA. Available: <http://www.ni.com/pdf/manuals/371303n.pdf>.
- [5] International Rectifier, *Data sheet - IRFP4468PbF: HEXFET(R) Power MOSFET*. El Segundo, California, USA.
- [6] G. Pistoia, *Lithium-Ion Batteries: Advances and applications*, 1st ed. Amsterdam u. a.: Elsevier, 2014.
- [7] G. Neumann, "Lithium-Akkumulatoren: Stand der Technik und zukünftige Entwicklungen: Lithium Ion Secondary Batteries: State of the Art and Future Developments," *Chemie Ingenieur Technik*, vol. 83, no. 11, pp. 2042–2050, <http://dx.doi.org/10.1002/cite.201100075>, 2011.
- [8] R.J. Brodd, "SECONDARY BATTERIES | Overview," in *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, J. Garche, Ed, Amsterdam: Elsevier, 2009, pp. 254–261.
- [9] J. Yamaki, "SECONDARY BATTERIES – LITHIUM RECHARGEABLE SYSTEMS – LITHIUM-ION | Overview," in *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, J. Garche, Ed, Amsterdam: Elsevier, 2009, pp. 183–191.
- [10] R. Korthauer, *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*. Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [11] X. Yuan, Ed, *Lithium-ion batteries: Advanced materials and technologies*. Boca Raton u.a.: CRC Press Taylor & Francis Group, 2012.

- [12] M. Schmidt and M. Neuschütz, "Lithium-Ionen-Batterien: Energieeffiziente Antriebstechnologien: Hybridisierung - Downsizing - Software und IT," in *Energieeffiziente Antriebstechnologien: Hybridisierung – Downsizing – Software und IT*, W. Siebenpfeiffer, Ed, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013, pp. 234–239.
- [13] A. d. Guibert, *Advances of Li-ion use in industrial applications*. Available: <http://congresses.icmab.es/iba2013/images/files/Tuesday/Morning/Anne%20de%20Guibert.pdf> (2016, Apr. 29).
- [14] B. Ketterer, U. Karl, D. Möst, and S. Ulrich, "Lithium-Ionen Batterien: Stand der Technik und Anwendungspotential in Hybrid-, Plug-In Hybrid- und Elektrofahrzeugen," Institut für Materialforschung - Angewandte Werkstoffphysik, Karlsruhe, 2010.
- [15] A. Dipl.-Ing. Scharf, *Neue Leistungshalbleiter für Hybridantriebe*. Available: <http://www.elektroniknet.de/automotive/sonstiges/artikel/328/1/> (2016, Apr. 29).
- [16] S. Tobishima, "SECONDARY BATTERIES – LITHIUM RECHARGEABLE SYSTEMS – LITHIUM-ION | Thermal Runaway," in *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, J. Garche, Ed, Amsterdam: Elsevier, 2009, pp. 409–417.
- [17] D. Schulz, *Akkus und Ladetechniken: Das Praxisbuch für alle Akku-Typen, Ladegeräte und Ladeverfahren*. Haar bei München: Franzis, 2014.
- [18] J. P. Schmidt, A. Weber, and E. Ivers-Tiffée, "A novel and fast method of characterizing the self-discharge behavior of lithium-ion cells using a pulse-measurement technique," *Journal of Power Sources*, vol. 274, pp. 1231–1238, 2015.
- [19] Takashi Utsunomiya, Osamu Hatozaki, Nobuko Yoshimoto, Minato Egashira, and Masayuki Morita, "Influence of particle size on the self-discharge behavior of graphite electrodes in lithium-ion batteries," *Journal of Power Sources*, vol. 196, no. 20, pp. 8675–8682, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775311013073>, 2011.
- [20] K. Beuth, *Digitaltechnik*, 10th ed. Würzburg: Vogel, 1998.
- [21] P. F. Orłowski, *Praktische Elektronik: Analogtechnik und Digitaltechnik für die industrielle Praxis*. Berlin, Heidelberg: Imprint: Springer Vieweg, 2013.
- [22] W. Tenten, *Analoge Schaltungstechniken der Elektrotechnik*. München: Oldenbourg, 2012.
- [23] R. Weißel and F. Schubert, *Digitale Schaltungstechnik*, 2nd ed. Berlin u.a.: Springer-Verl, 1995.

- [24] R. Lerch, *Elektrische Messtechnik: Analoge, digitale und computergestützte Verfahren ; mit 65 Tabellen sowie DVD ; [Extras im Web]*, 6th ed. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2012.
- [25] K. Schon, "Messung von Stoßströmen: Stoßspannungs- und Stoßstrommesstechnik: Grundlagen - Messgeräte - Messverfahren," in Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010, pp. 179–221.
- [26] W. Georgi and E. Metin, *Einführung in LabVIEW: Mit 157 Aufgaben ; [Studentenversion inklusive]*, 5th ed. München: Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl, 2012.
- [27] Z. Tian, "Balancing-System für ein 6-Zellen-Lithium-Ionen-Batteriemodul mit Schutz-, Anzeige- und Steuereinrichtungen," Masterarbeit, Institut für Elektrotechnik, Montanuniversität Leoben, Leoben, 2014.
- [28] H. Dipl.-Ing. Dipl.-Ing. Ziegerhofer, "Wirkungsgradoptimierung einer Hochstromladeschaltung einer Lithium-Ionen-Zelle," Institut für Elektrotechnik, Montanuniversität Leoben, Leoben, Masterarbeit.
- [29] L. Murata Manufacturing Co, *Product Search Data Sheet - PTFL04BG471Q2N34B0*. Available: <http://www.mouser.com/ds/2/281/TFL04BG471Q2N34B0-792997.pdf> (2016, May. 09).
- [30] ON Semiconductor - Semiconductor Components Industries, LLC, *Data sheet - MC14051B, MC14052B, MC14053B Analog Multiplexers/Demultiplexers*. Available: http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/MC14051B-D.PDF (2016, May. 10).

10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Abnahme der nutzbaren Kapazität einer Lithium-Ionen-Sekundärzelle bei Zyklierung [1]	4
Abbildung 2-1: Skizze eines Zellpaars und seiner Abmessungen	10
Abbildung 2-2: Darstellung eines verwendeten Hochenergiemoduls und seiner Verschaltung	10
Abbildung 2-3: Die Pinbelegung des NI USB6009: 1. Benutzerspezifische Label, 2. Anschlussnummer-Label, 3. Digital I/O Label, 4. Analog-Eingang-Label differential, 5. Analog-Eingang-Label single-ended [4]	11
Abbildung 2-4: Auszug aus dem Datenblatt des IRFP4468PbF - Maximum Safe Operation Area [5].....	12
Abbildung 4-1: Innerer Aufbau und Zellreaktionen einer Lithium-Ionen-Sekundärzelle [9].....	18
Abbildung 4-2: Bildung und Aufgaben eines Solid Electrolyte Interfaces (SEI) [12]	20
Abbildung 4-3: Ragone-Diagramm von aktuellen Speichertechnologien – Vergleich von spezifischer Energie und spezifischer Leistung [13]	21
Abbildung 4-4: Historische Entwicklung der Energiedichte von Lithium-Ionen-Zellen [6]	22
Abbildung 4-5: Typische Lade- bzw. Entladekurve einer Lithium-Ionen Batterie [14]	23
Abbildung 4-6: Erreichbare Zyklenzahl im Verhältnis zur relativen Entladetiefe verschiedener Speichertechnologien [15]	24
Abbildung 4-7: Spannung in Relation zur entnommenen Kapazität in Abhängigkeit des Zellstromes für Lithium-Ionen-Sekundärzellen [1]	24
Abbildung 4-8: Sicherheitsaspekte und Fehlerursachen von Lithium-Ionen Batterien [10]	25
Abbildung 4-9: Temperaturbereich für den Betrieb von Lithium-Ionen-Zellen, nach [10]	26
Abbildung 4-10: Betriebsparameter von Lithium-Ionen-Zellen, nach [10].....	28
Abbildung 4-11: Spannungs- und Stromverlauf im IU-Ladeverfahren, nach [17] .	28
Abbildung 5-1: Darstellung eines Operationsverstärkers als Schaltsymbol.....	33
Abbildung 5-2: Schaltbild eines invertierenden Verstärkers, nach [22].....	34

Abbildung 5-3: Schaltbild eines nicht-invertierenden Verstärkers, nach [22]	35
Abbildung 5-4: Schaltbild eines Impedanzwandlers bzw. Spannungsfolgers, nach [21]	35
Abbildung 5-5: Schaltbild eines Differenzverstärkers, nach [22].....	36
Abbildung 5-6: Schaltbild der Maximal-Schaltung, nach [21]	37
Abbildung 5-7: Schaltbild eines Schmitt-Triggers, nach [21]	38
Abbildung 5-8: Schaltbild eines Fenster-Komparators, nach [21].....	38
Abbildung 5-9: Schaltbild eines asymmetrischen Zeitgliedes	39
Abbildung 5-10: Symbol ANSI (oben) und IEC (unten) einer AND- Verknüpfung.	40
Abbildung 5-11: Symbol ANSI (oben) und IEC (unten) einer OR- Verknüpfung...	40
Abbildung 5-12: Schaltbild einer Wired-AND-Verknüpfung, nach [23].....	41
Abbildung 5-13: Symbol ANSI (oben) und IEC (unten) einer NOT-Verknüpfung..	42
Abbildung 5-14: Symbol ANSI (oben) und IEC (unten) einer NOR-Verknüpfung .	42
Abbildung 5-15: Symbol ANSI (links) und IEC (rechts) einer NAND-Verknüpfung	43
Abbildung 5-16: Symbol ANSI (links) und IEC (rechts) einer NAND-Verknüpfung mit Schmitt-Trigger-Eingängen.....	43
Abbildung 5-17: Verschaltung zweier NAND-Verknüpfungen zu einem Latch / Flipflop, nach [20]	44
Abbildung 5-18: Aufbau (a) und Ablauf (b) einer 4bit-AD-Wandlung per Successive Approximation [24]	47
Abbildung 5-19: Schaltsymbol eines n-Kanal MOSFETS (enhancement type) mit Gate (G), Drain (D) und Source (S) sowie Body-Diode	48
Abbildung 5-20: Schaltsymbol einer Schottky-Diode mit Anode (A) und Kathode (K)	49
Abbildung 5-21: Kostengünstiger Aufbau eines Koaxial-Shunts.....	50
Abbildung 5-22: Front Panel und Blockdiagramm von National Instruments LabVIEW	51
Abbildung 5-23: TARGET 3001! im Modus zur Erstellung von Schaltplänen	54
Abbildung 5-24: TARGET 3001! im Entwurfsmodus für Layouts	54
Abbildung 6-1: Grafische Darstellung des Gesamtkonzepts für das Messsystem	58
Abbildung 6-2: Teilschaltung 1 von 3 des Über- / Unterspannungsschutz	61
Abbildung 6-3: Teilschaltung 2 von 3 des Über- / Unterspannungsschutz	62
Abbildung 6-4: Teilschaltung 3 von 3 des Über- / Unterspannungsschutz	62

Abbildung 6-5: Widerstandskennlinie des eingesetzten Thermistor-Typs PTFL04BG471Q2N34B0 in Abhängigkeit der Temperatur, modifiziert [29]	63
Abbildung 6-6: Schaltbild des Übertemperaturschutzes für ein Zellpaar	64
Abbildung 6-7: Schaltbild des Überstromschutzes auf Modulebene.....	65
Abbildung 6-8: Schaltbild der Messwertaufnahme und Maximalwertbildung der Temperatur.....	66
Abbildung 6-9: Schaltbild der Spannungssignalverarbeitung	67
Abbildung 6-10: Schaltbild der Stromsignalverarbeitung	68
Abbildung 6-11: Funktionelles Schaltbild (a) und Wahrheitstabelle (b), Auszug aus dem Datenblatt MC14051B [30]	69
Abbildung 6-12: Teilschaltung 1 von 2 des Balancings, Adressierung	70
Abbildung 6-13: Teilschaltung 2 von 2 des Balancings, Ausführung	70
Abbildung 6-14: Pegelwandlung von + 12 V / 0 V auf + 5 V / 0 V (USB6009).....	71
Abbildung 6-15: Pegelwandlung von + 5 V / 0 V (USB6009) auf + 12 V / 0 V	72
Abbildung 6-16: Pegelwandlung von 0 ... + 5 V Analogausgang (USB6009) auf + 12 V / 0 V.....	72
Abbildung 6-17: Schaltbild der Ansteuerung des MOSFET.....	74
Abbildung 6-18: Schaltbild der Relais-Ansteuerung	74
Abbildung 6-19: Schaltbild des Leistungskreises	75
Abbildung 6-20: Belegung der Schnittstelle zwischen Schutzplatinen und Hauptplatinen-Stack	77
Abbildung 6-21: Belegung der Schnittstelle zwischen oberster und zweiter Lage des Hauptplatinen-Stacks	78
Abbildung 6-22: Belegung der Schnittstelle zwischen zweiter und dritter Lage des Hauptplatinen-Stacks	78
Abbildung 6-23: Belegung der Schnittstelle zwischen dritter und vierter Lage des Hauptplatinen-Stacks	79
Abbildung 6-24: Belegung der Schnittstelle zwischen dem Hauptplatinen-Stack und den Analogein- und Analogausgängen des USB6009	80
Abbildung 6-25: Belegung der Schnittstelle zwischen dem Hauptplatinen-Stack und den Digitalein- und Digitalausgängen des USB6009.....	80
Abbildung 6-26: Belegung der Schnittstelle zwischen dem Hauptplatinen-Stack und der Platine „Strommessung und Ansteuerung der Leistungselektronik“	80

Abbildung 6-27: Belegung der Schnittstelle zwischen der Platine „Strommessung und Ansteuerung der Leistungselektronik“ und der Leistungselektronik	81
Abbildung 6-28: Schaltbild der Schutzplatine	82
Abbildung 6-29: Layout der Schutzplatine	83
Abbildung 6-30: Vollständig bestückte Schutzplatine	84
Abbildung 6-31: Layout der ersten Lage des Hauptplatinen-Stacks – Oberseite .	86
Abbildung 6-32: Layout der ersten Lage des Hauptplatinen-Stacks – Unterseite.	87
Abbildung 6-33: Layout der zweiten Lage des Hauptplatinen-Stacks – Oberseite	88
Abbildung 6-34: Layout der zweiten Lage des Hauptplatinen-Stacks – Unterseite	89
Abbildung 6-35: Layout der dritten Lage des Hauptplatinen-Stacks – Oberseite .	90
Abbildung 6-36: Layout der dritten Lage des Hauptplatinen-Stacks – Unterseite.	91
Abbildung 6-37: Layout der vierten Lage des Hauptplatinen-Stacks – Oberseite.	92
Abbildung 6-38: Layout der vierten Lage des Hauptplatinen-Stacks – Unterseite	93
Abbildung 6-39: Layout der Strommessplatine – Oberseite	94
Abbildung 6-40: Layout der Strommessplatine – Unterseite	95
Abbildung 6-41: Aufbau der Leistungselektronik, der Umschaltrelais sowie der Anschlussklemmen	96
Abbildung 6-42: LabVIEW – Frontpanel des Messprogramms.....	97
Abbildung 6-43: LabVIEW – Erfassung und Anzeige der Fehlersignale.....	98
Abbildung 6-44: LabVIEW – Balancing-Logik.....	99
Abbildung 6-45: LabVIEW – SubVI zur Erzeugung der Balancing-Signale	100
Abbildung 7-1: Testaufbau des Messsystems am Batteriemodul	104
Abbildung 7-2: Schaltbild des Testaufbaus zur Bestimmung der Gleichtaktverstärkung.....	106
Abbildung 7-3: Messdatenauswertung für die Gleichtaktverstärkung bei Verwendung von OPV MC33079 (a) und TL084 (b).....	107
Abbildung 7-4: Schaltbild zur Untersuchung der Ansprechzeit des Koaxial-Shunts	108
Abbildung 8-1: Aufbau eines Batteriemanagementsystems für Lithium-Ionen-Module [10].....	112

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1: Auszug aus der elektrochemischen Spannungsreihe mit der Reaktion von Lithium und seinem Ion [8].....	18
Tabelle 5-1: Vergleich: idealer und realer OPV	33
Tabelle 5-2: Wahrheitstabelle einer AND (a) und einer OR-Verknüpfung (b).....	40
Tabelle 5-3: Wahrheitstabelle einer NOT-Verknüpfung	42
Tabelle 5-4: Wahrheitstabelle einer NAND-Verknüpfung	43
Tabelle 5-5: Wahrheitstabelle eine NAND-Latches	44
Tabelle 6-1: Nomenklatur der Bauteile auf den Platinen	85

12 Abkürzungsverzeichnis

AD	Analog-Digital
ADC	Analog-Digital-Wandler (Analog digital converter)
CCCV	Konstantstrom-Konstantspannungs-Ladeverfahren (constant current, constant voltage)
CMOS	Complimentary metal oxide semiconductor
DA	Digital-Analog
DeMUX	Demultiplexer
DoD	Entladetiefe (Depth of Discharge)
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
FF	Flipflop
IC	Integrierter Schaltkreis (Integrated Circuit)
IET	Institut für Elektrotechnik
IRF	International Rectifier (Halbleiter-Hersteller)
LED	Leuchtdiode
LiCoO ₂	Litium-Kobalt-Dioxid-Elektrode
MOSFET	Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor (metal oxide semiconductor field effect transistor)
MUL	Montanuniversität Leoben
MUX	Multiplexer
NI	National Instruments
NiCd	Nickel-Cadmium
NiMH	Nickel-Metallhydrid
OPV	Operationsverstärker
PTC	Kaltleiter (positive temperature coefficient)
SEI	Solid Electrolyte Interface
VI	Virtuelles Instrument

Anhang Inhaltsverzeichnis

1. Schaltbilder

- Hauptplatinen-Stack
 - Erste Lage II - III
 - Zweite Lage IV - V
 - Dritte Lage VI - VII
 - Vierte Lage VIII
- Platine „Strommessung und Ansteuerung der Leistungselektronik“ IX - XI

2. Stücklisten

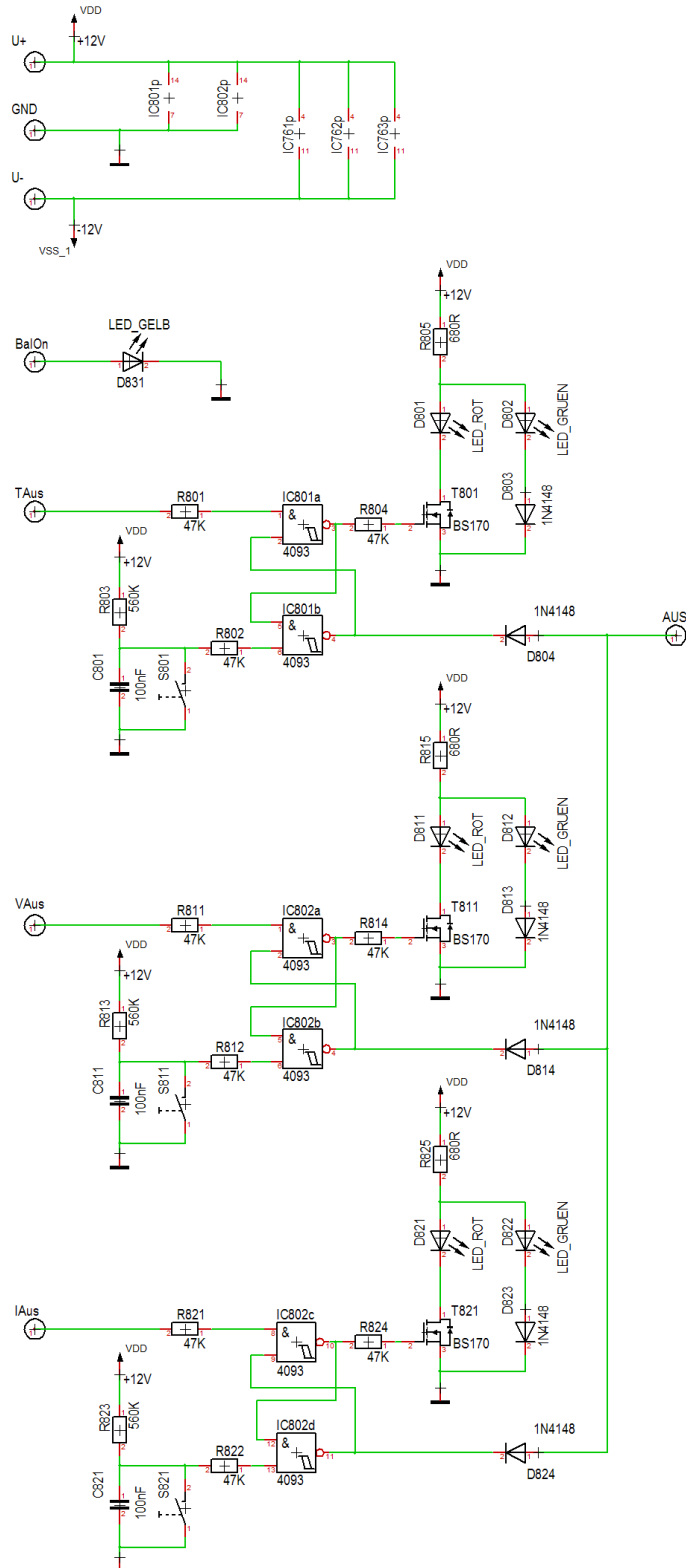
- Hauptplatinen-Stack
 - Erste Lage XII
 - Zweite Lage XIII
 - Dritte Lage XIV
 - Vierte Lage XV
- Platine „Strommessung und Ansteuerung der Leistungselektronik“ XVI

Anhang

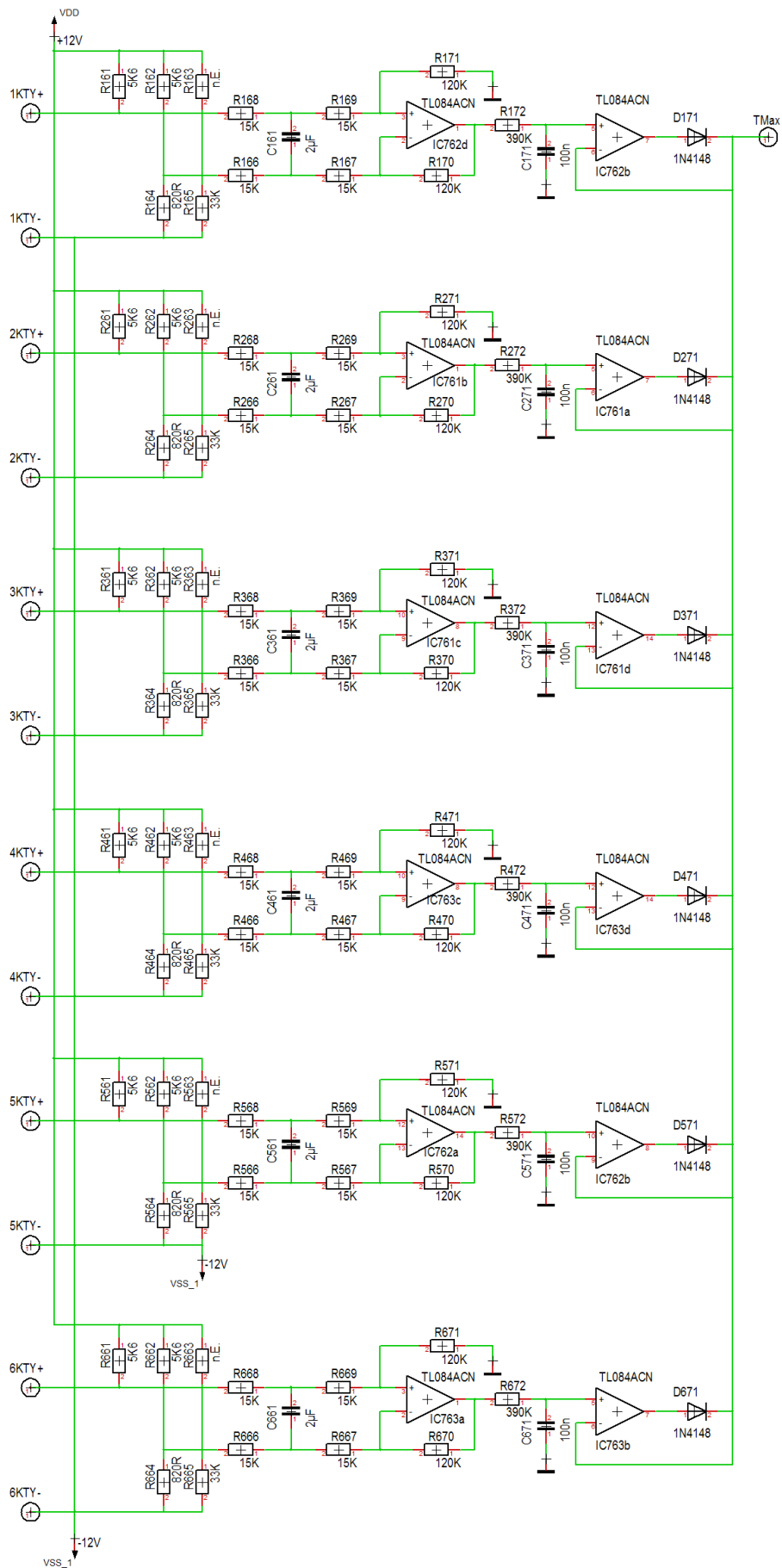
1. Schaltbilder

a. Erste (oberste) Lage des Hauptplatten-Stacks

i. Erste Teilschaltung

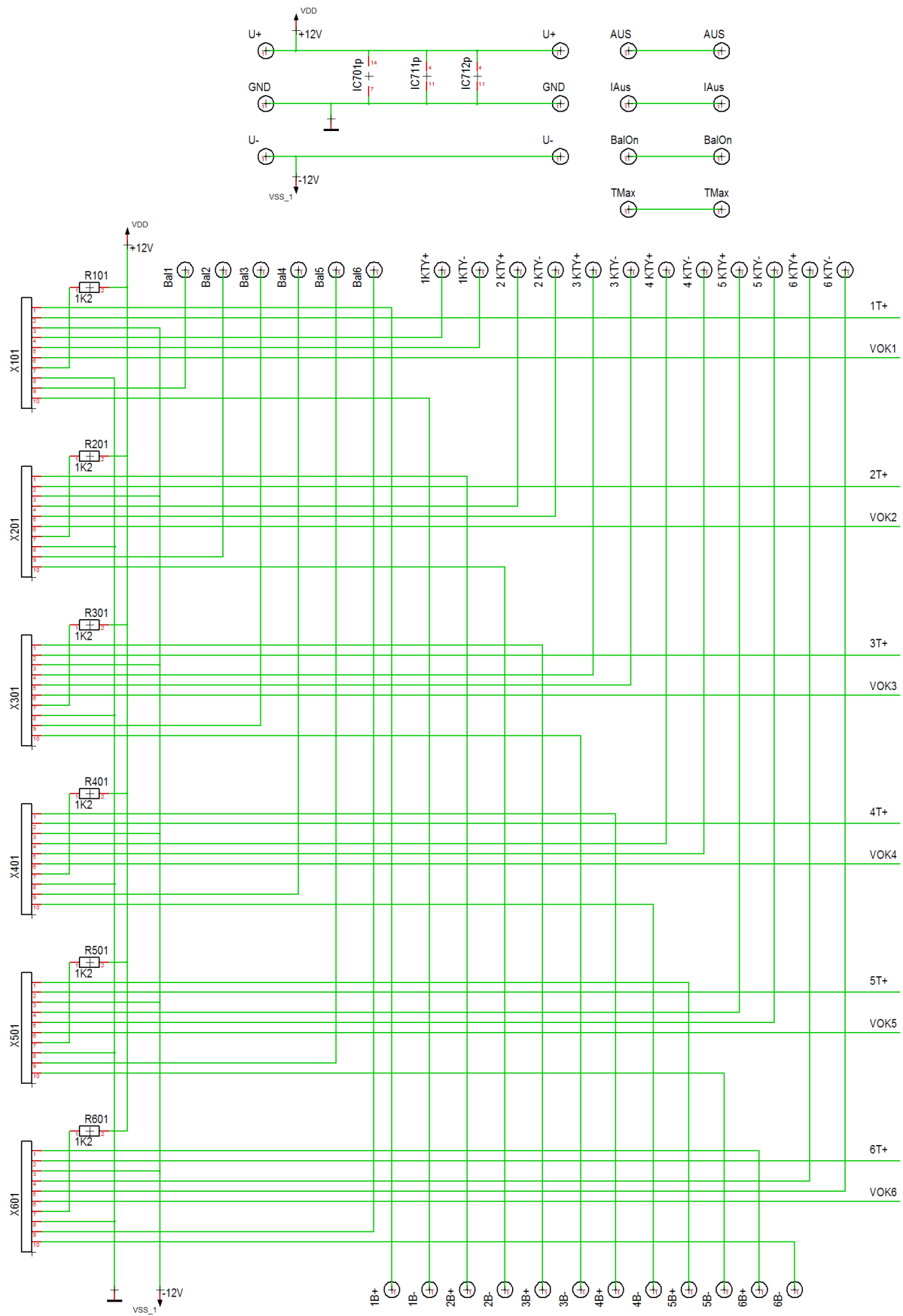


ii. Zweite Teilschaltung

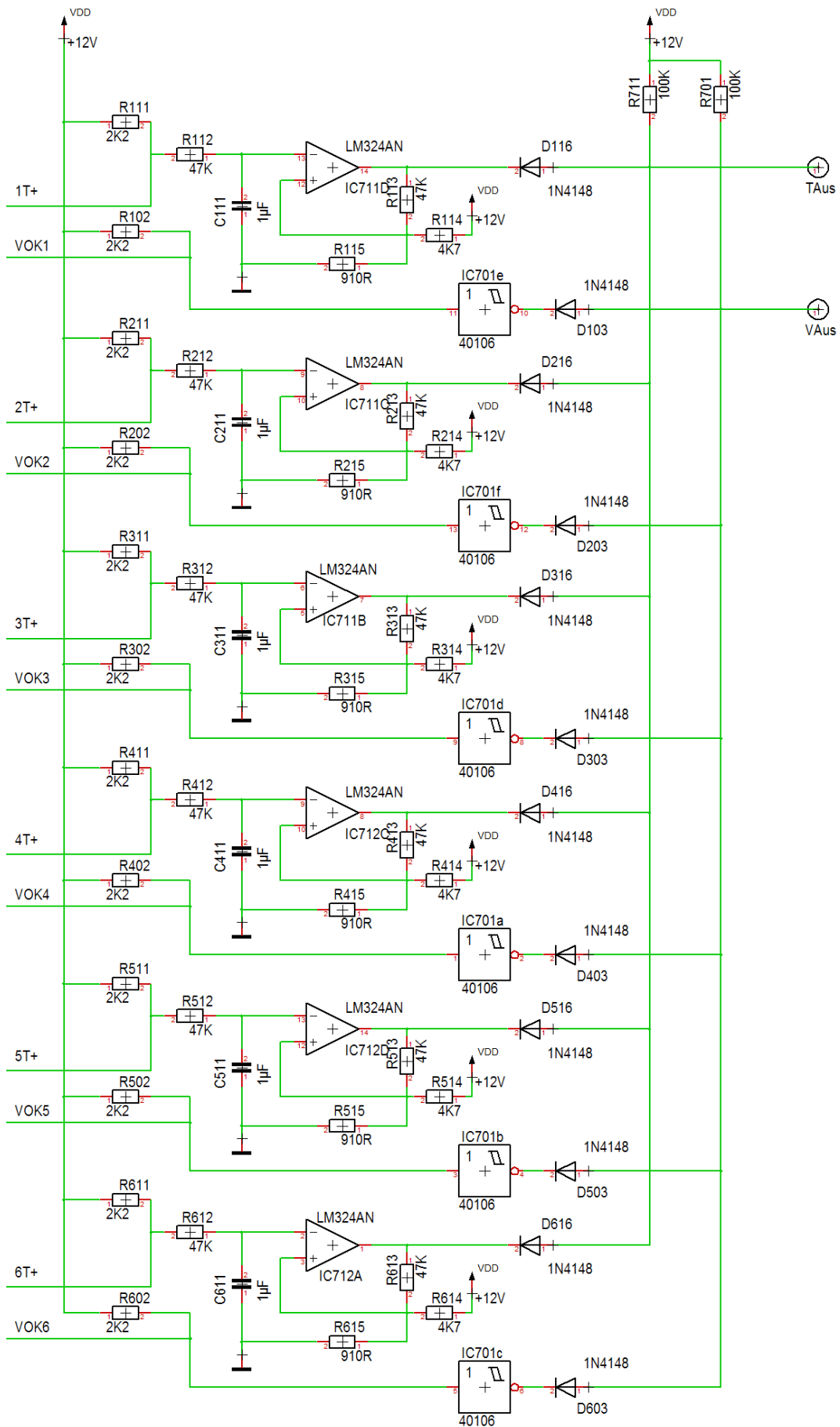


b. Zweite Lage des Hauptplatinen-Stacks

i. Erste Teilschaltung

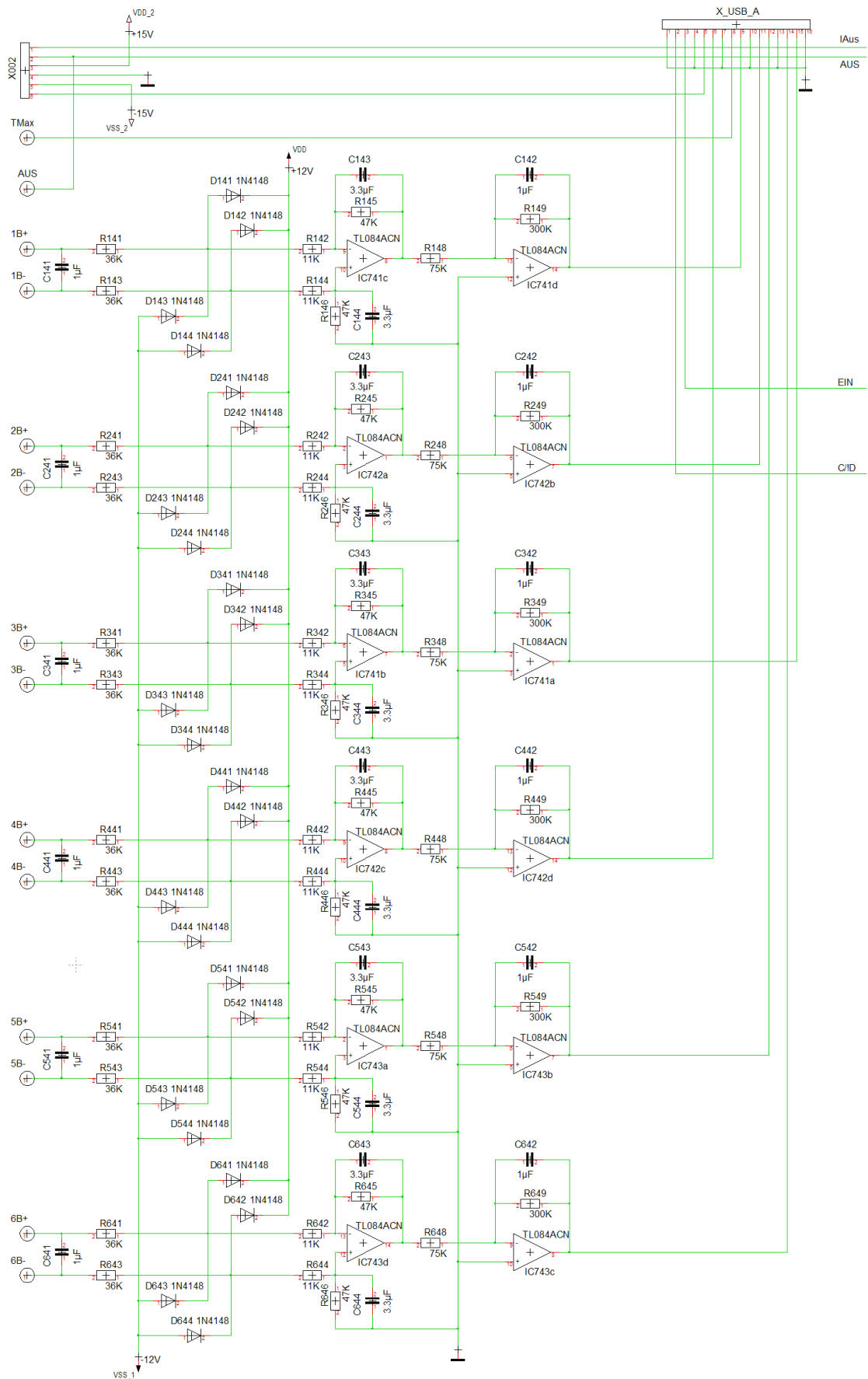


ii. Zweite Teilschaltung

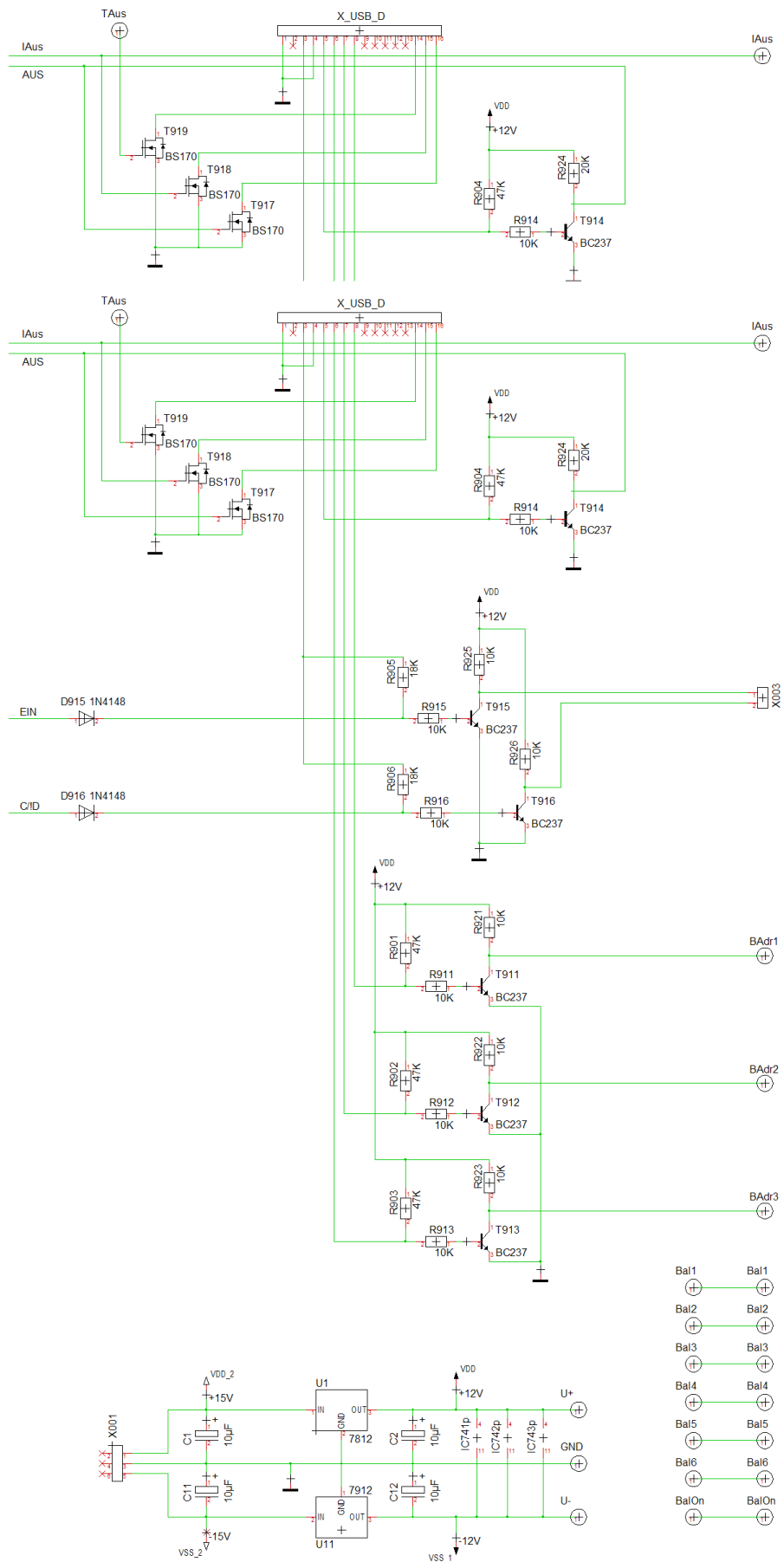


c. Dritte Lage des Hauptplatten-Stacks

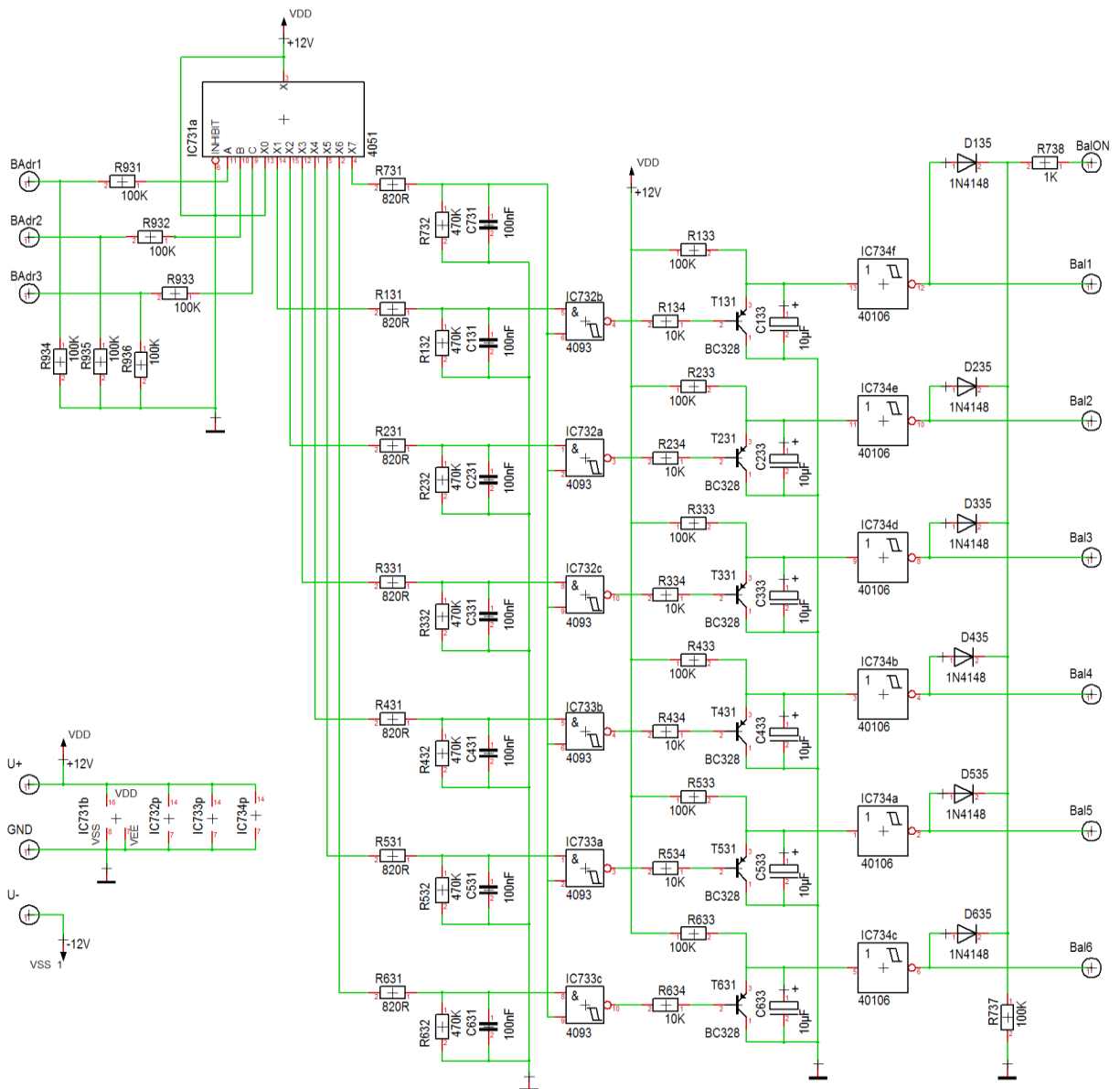
i. Erste Teilschaltung



ii. Zweite Teilschaltung

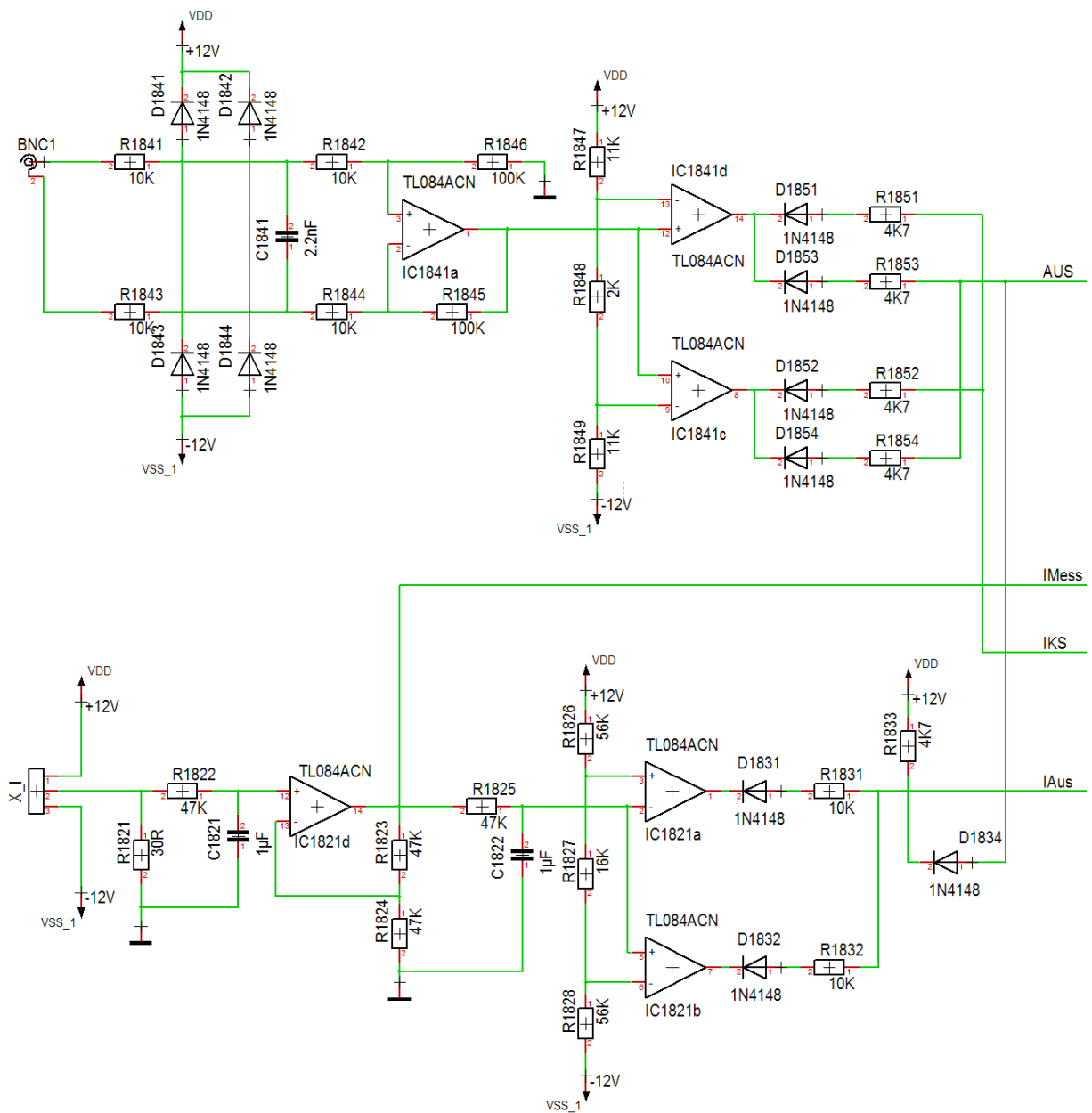


d. Vierte Lage des Hauptplatten-Stacks

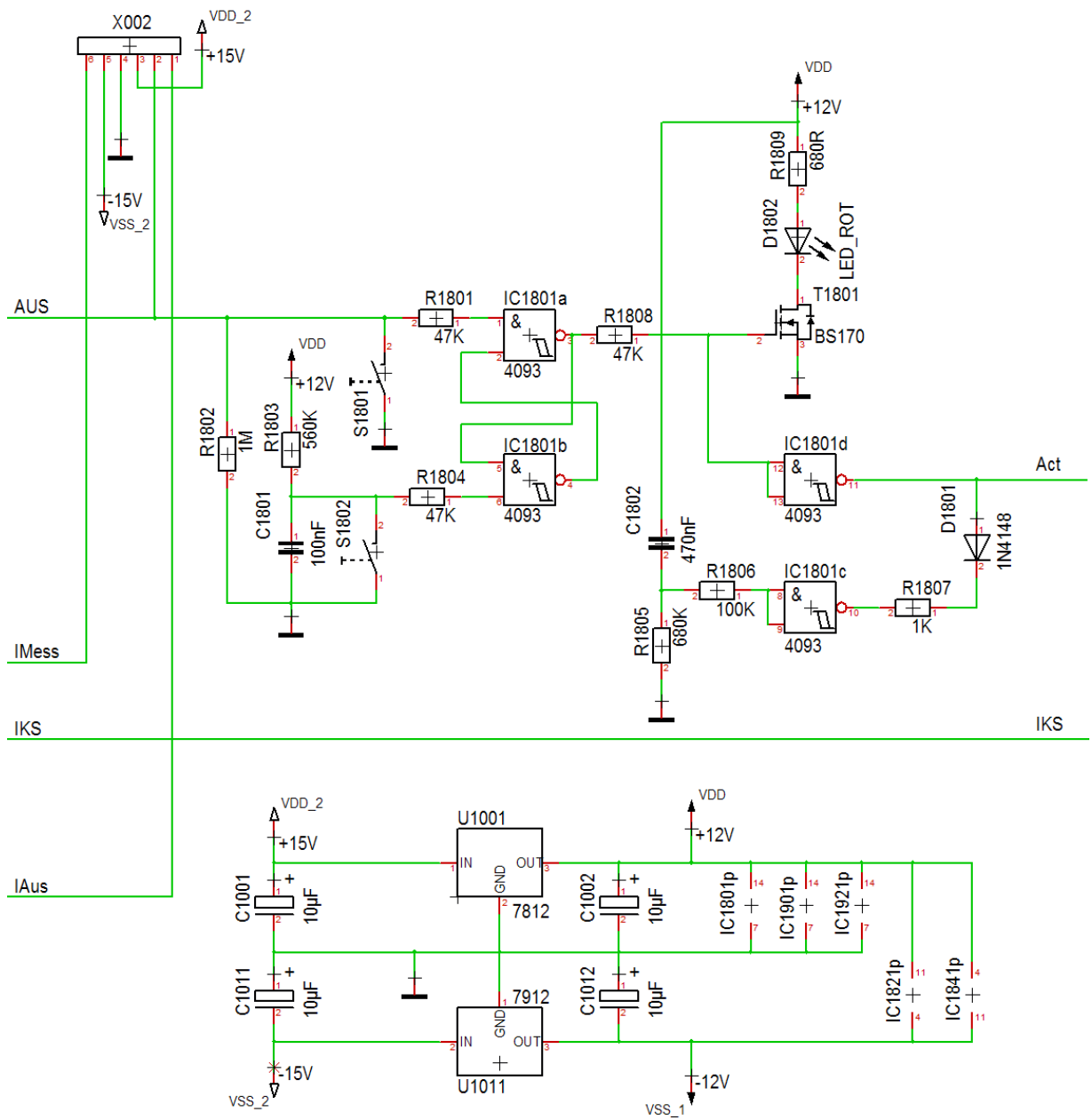


e. Platine „Strommessung und Ansteuerung der Leistungselektronik“

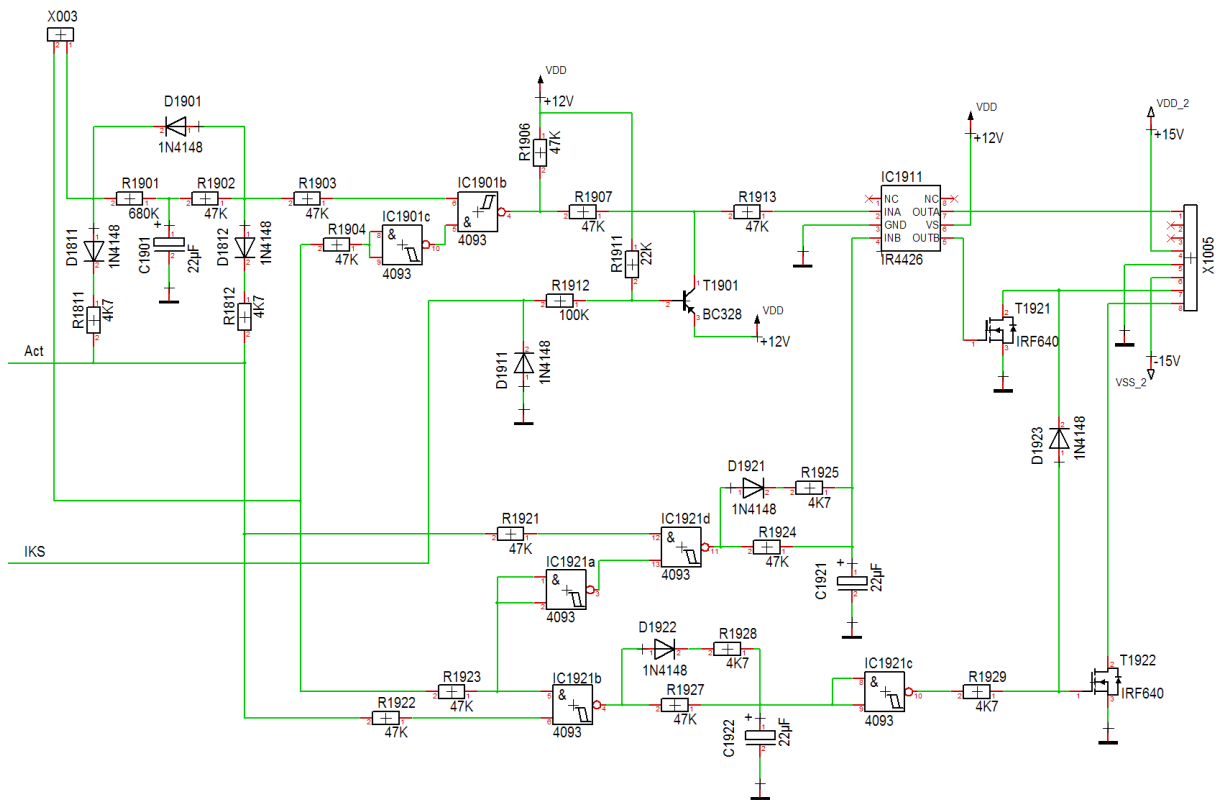
i. Erste Teilschaltung



ii. Zweite Teilschaltung



iii. Dritte Teilschaltung



2. Stücklisten

a. Erste (oberste) Lage des Hauptplatinen-Stacks

Kennung	Wert
C161	1 μ F
C162	1 μ F
C171	100nF
C261	1 μ F
C262	1 μ F
C271	100nF
C361	1 μ F
C362	1 μ F
C371	100nF
C461	1 μ F
C462	1 μ F
C471	100nF
C561	1 μ F
C562	1 μ F
C571	100nF
C661	1 μ F
C662	1 μ F
C671	100nF
C801	100nF
C811	100nF
C821	100nF
D171	1N4148
D271	1N4148
D371	1N4148
D471	1N4148
D571	1N4148
D671	1N4148
D801	2-polig
D802	2-polig
D803	1N4148
D804	1N4148
D811	2-polig
D812	2-polig
D813	1N4148
D814	1N4148
D821	2-polig
D822	2-polig
D823	1N4148
D824	1N4148
D831	2-polig
IC761	TL084CN
IC762	TL084CN
IC763	TL084CN
IC801	4093
IC802	4093

Kennung	Wert
R161	5k6
R162	5k6
R163	N.E.
R164	820
R165	33k
R166	15k
R167	15k
R168	15k
R169	15k
R170	120k
R171	120k
R172	390k
R261	5k6
R262	5k6
R263	N.E.
R264	820R
R265	33k
R266	15k
R267	15k
R268	15k
R269	15k
R270	120k
R271	120k
R272	390k
R361	5k6
R362	5k6
R363	N.E.
R364	820R
R365	33k
R366	15k
R367	15k
R368	15k
R369	15k
R370	120k
R371	120k
R372	390k
R461	5k6
R462	5k6
R463	N.E.
R464	820R
R465	33k
R466	15k
R467	15k
R468	15k
R469	15k
R470	120k
R471	120k
R472	390k

Kennung	Wert
R561	5k6
R562	5k6
R563	N.E.
R564	820R
R565	33k
R566	15k
R567	15k
R568	15k
R569	15k
R570	120k
R571	120k
R572	390k
R661	5k6
R662	5k6
R663	N.E.
R664	820R
R665	33k
R666	15k
R667	15k
R668	15k
R669	15k
R670	120k
R671	120k
R672	390k
R801	47k
R802	47k
R803	560k
R804	47k
R805	680R
R811	47k
R812	47k
R813	560k
R814	47k
R815	680R
R821	47k
R822	47k
R823	560k
R824	47k
R825	680R
R841	4k7
S801	3-polig
S811	3-polig
S821	3-polig
T801	BS170
T811	BS170
T821	BS170

b. Zweite Lage des Hauptplatinen-Stacks

Kennung	Wert
C111	1μF
C211	1μF
C311	1μF
C411	1μF
C511	1μF
C611	1μF
D103	1N4148
D116	1N4148
D203	1N4148
D216	1N4148
D303	1N4148
D316	1N4148
D403	1N4148
D416	1N4148
D503	1N4148
D516	1N4148
D603	1N4148
D616	1N4148
IC701	40106
IC711	LM324N
IC712	LM324N
R101	1k2
R102	10k
R111	2k2
R112	47k
R113	47k
R114	4k7
R115	910R
R116	4k7
R201	1k2
R202	10k
R211	2k2
R212	47k
R213	47k
R214	4k7
R215	910R
R216	4k7

Kennung	Wert
R301	1k2
R302	10k
R311	2k2
R312	47k
R313	47k
R314	4k7
R315	910R
R316	4k7
R401	1k2
R402	10k
R411	2k2
R412	47k
R413	47k
R414	4k7
R415	910R
R416	4k7
R501	1k2
R502	10k
R511	2k2
R512	47k
R513	47k
R514	4k7
R515	910R
R516	4k7
R601	1k2
R602	10k
R611	2k2
R612	47k
R613	47k
R614	4k7
R615	910R
R616	4k7
R701	47k
R711	47k
X101	10-polig
X201	10-polig
X301	10-polig
X401	10-polig
X501	10-polig
X601	10-polig

c. Dritte Lage des Hauptplatinen-Stacks

Kennung	Wert
C001	10µF
C002	10µF
C011	10µF
C012	10µF
C141	1µF
C142	1µF
C143	3.3µF
C144	3.3µF
C241	1µF
C242	1µF
C243	3.3µF
C244	3.3µF
C341	1µF
C342	1µF
C343	3.3µF
C344	3.3µF
C441	1µF
C442	1µF
C443	3.3µF
C444	3.3µF
C541	1µF
C542	1µF
C543	3.3µF
C544	3.3µF
C641	1µF
C642	1µF
C643	3.3µF
C644	3.3µF
D141	1N4148
D142	1N4148
D143	1N4148
D144	1N4148
D241	1N4148
D242	1N4148
D243	1N4148
D244	1N4148
D341	1N4148
D342	1N4148
D343	1N4148
D344	1N4148
D441	1N4148
D442	1N4148
D443	1N4148
D444	1N4148
D541	1N4148
D542	1N4148
D543	1N4148
D544	1N4148

Kennung	Wert
D641	1N4148
D642	1N4148
D643	1N4148
D644	1N4148
D915	1N4148
D916	1N4148
IC741	TL084CN
IC742	TL084CN
IC743	TL084CN
R141	36K
R142	11K
R143	36K
R144	11K
R145	47K
R146	47K
R148	75K
R149	300K
R241	36K
R242	11K
R243	36K
R244	36K
R245	47K
R246	47K
R248	75K
R249	300K
R341	36K
R342	11K
R343	36K
R344	11K
R345	47K
R346	47K
R348	75K
R349	300K
R441	36K
R442	11K
R443	36K
R444	11K
R445	47K
R446	47K
R448	75K
R449	300K
R541	36K
R542	11K
R543	36K
R544	11K
R545	47K
R546	47K
R548	75K
R549	300K

Kennung	Wert
R641	36K
R642	36K
R643	36K
R644	36K
R645	47K
R646	47K
R648	75K
R649	300K
R901	47K
R902	47K
R903	47K
R904	47K
R905	18K
R906	18K
R911	10K
R912	10K
R913	10K
R914	10K
R915	10K
R916	10K
R921	10K
R922	10K
R923	10K
R924	22K
R925	47K
R926	47K
T911	BC237
T912	BC237
T913	BC237
T914	BC237
T915	BC237
T916	BC237
T917	BS170
T918	BS170
T919	BS170
U001	7812
U011	7912
X_E	2-polig
X_USB_A	16-polig
X_USB_D	16-polig
X001	3-polig
X002	6-polig
X003	2-polig

d. Vierte Lage des Hauptplatinen-Stacks

Kennung	Wert	Kennung	Wert
C131	10n	R331	820R
C133	10 μ F	R332	470k
C231	10n	R333	100k
C233	10 μ F	R334	10k
C331	10n	R431	820R
C333	10 μ F	R432	470k
C431	10n	R433	100k
C433	10 μ F	R434	10k
C531	10n	R531	820R
C533	10 μ F	R532	470k
C631	10n	R533	100k
C633	10 μ F	R534	10k
C731	10n	R631	820R
D135	1N4148	R632	470k
D235	1N4148	R633	100k
D335	1N4148	R634	10k
D435	1N4148	R731	820R
D535	1N4148	R732	470k
D635	1N4148	R737	100k
IC731	4051	R738	1k
IC732	4093	R931	100k
IC734	4093	R932	100k
IC734	40106	R933	100k
R131	820R	R934	100k
R132	470k	R935	100k
R133	100k	R936	100k
R134	10k	T131	BC328
R231	820R	T231	BC328
R232	470k	T331	BC328
R233	100k	T431	BC328
R234	10k	T531	BC328
		T631	BC328

e. Platine „Strommessung und Ansteuerung der Leistungselektronik“

Kennung	Wert	Kennung	Wert	Kennung	Wert
BNC1	2-polig	R1801	100K	R1901	68K
C1001	10 µF	R1802	1M	R1902	47K
C1002	10 µF	R1803	560K	R1903	47K
C1003	47 µF	R1804	100K	R1904	47K
C1011	10 µF	R1805	680K	R1905	47K
C1012	10 µF	R1806	100K	R1906	47K
C1801	470nF	R1807	1K	R1907	47K
C1802	470nF	R1808	47K	R1908	47K
C1821	1µF	R1809	4K7	R1911	22K
C1822	1µF	R1811	4K7	R1912	100K
C1841	2.2nF	R1812	4K7	R1913	47K
C1901	22 µF	R1821	30R	R1921	47K
C1921	22 µF	R1822	47K	R1922	47K
C1922	22 µF	R1823	47K	R1923	47K
D1801	1N4148	R1824	47K	R1924	47K
D1802	2-polig	R1825	47K	R1925	4K7
D1811	1N4148	R1826	56K	R1926	47K
D1812	1N4148	R1827	16K	R1927	47K
D1831	1N4148	R1828	56K	R1928	4K7
D1832	1N4148	R1831	10K	R1929	4K7
D1833	1N4148	R1832	10K	S1801	Schalter
D1834	1N4148	R1833	4K7	S1802	Schalter
D1841	1N4148	R1841	10K	T1801	BS170
D1842	1N4148	R1842	10K	T1811	IRF640
D1843	1N4148	R1843	10K	T1901	BC328
D1844	1N4148	R1844	10K	T1921	IRF640
D1851	1N4148	R1845	100K	T1922	IRF640
D1852	1N4158	R1846	100K	U1001	7812
D1853	1N4148	R1847	11K	U1011	7912
D1854	1N4148	R1848	2K	X_E	3-polig
D1861	1N4148	R1849	11K	X_I	3-polig
D1862	1N4148	R1851	4K7	X1002	6-polig
D1863	1N4148	R1852	4K7	X1003	2-polig
D1901	1N4148	R1853	47K	X1005	8-polig
D1902	1N4148	R1861	18k		
D1911	1N4148	R1862	2K		
D1921	1N4148	R1863	47K		
D1922	1N4148	R1864	4K3		
D1923	1N4148	R1865	12K		
IC1801	4093	R1866	4K7		
IC1821	TL084CN	R1867	4K7		
IC1841	TL084CN				
IC1901	4093				
IC1911	4426				
IC1921	4093				