



Institut für Elektrotechnik

Photovoltaik-Laderegler und Balancer zum Einsatz von Lithium-Ionen-Hochenergiezellen

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades Diplom-Ingenieur

Eingereicht von

Ing. Stefan Volgger, B.Eng.

Betreuer:

Dipl.-Ing. Rudolf Krall

Betreuer und Gutachter:

O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Weiß

Ehrenwörtliche Erklärung

„Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt und die den Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.“

Leoben, Juni 2014

Stefan Volgger

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

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich in der Entstehungsphase der vorliegenden Masterarbeit begleitet haben.

Ich bedanke mich vor allem bei

Helmut Weiß, der mich als mein Betreuer und Gutachter sowohl mit seinem Wissen als auch mit seinem Engagement stets bei meiner Arbeit unterstützt hat.

Weiters möchte ich mich bei meinem zweiten Betreuer

Rudolf Krall bedanken, der mich bei der Ausfertigung der Masterarbeit stets mit wertvollen Ratschlägen unterstützt hat.

Abschließend bedanke ich mich bei den weiteren Mitarbeitern des Instituts für Elektrotechnik

Andreas Schmid, Johanna Rabel, Franz Aschenbrenner, Günther Kaserer, Johann Krenn und Wenzel Maier. Ohne ihre verschiedenste Mithilfe wäre die Ausfertigung dieser Masterarbeit in vorliegender Form nicht möglich gewesen.

Kurzfassung

In der Masterarbeit wird ein Laderegler realisiert, welcher die sichere Ladung einschließlich Überladeschutz eines Lithium-Ionen-Akkumulators mit sehr hoher Kapazität mittels eines Photovoltaikmoduls mit hohem Ladestrom ermöglicht. Weiters sind die einzelnen, seriell zu gegenständlichem Akkumulator verschalteten Zellen mittels eines Balancers spannungsmäßig zu vergleichmäßigen, sodass in allen Zellen praktisch der gleiche Ladezustand herrscht. Dies beinhaltet weiters eine Kontrolle der Zellen auf Unter- und Überspannung. Letztere stellt für einen Lithium-Ionen-Akkumulator eine besondere Gefahr dar, da damit zu rechnen ist, dass die Zelle durch Feuer zerstört wird (Thermal Runaway) und benachbarte Zellen in gleicher Form defekt werden und die Umgebung stark gefährdet wird. Eine weitere Sicherheitsmaßnahme beinhaltet den Schutz vor einem Kurzschluss auf der Versorgungsseite des Akkumulators. Die einzelnen Betriebszustände, sowie Akkumulatorspannung und Ladestrom sind mit Hilfe einer Anzeigeeinheit abzulesen.

Die Ausführung soll mit Analogbauteilen erfolgen, da dies eine höhere Ausfallsicherheit als programmierbare Einrichtungen wie z.B. Microcontroller bietet und ein ausfallsicheres Programm einen sehr hohen Aufwand ergeben würde. Die Analogtechnik stellt eine preiswerte und zuverlässig arbeitende Alternative dar.

Der vorhergehende Versuch, handelsübliche Einzelkomponenten wie Laderegler, Balancer, Anzeige- und Sicherheitseinrichtungen für die vorliegende Situation zu finden, gestaltete sich bereits schwierig bis unmöglich. Eine Kombination von Geräten mit den gewünschten Eigenschaften ist auch nicht von der Industrie beziehbar, womit auch die Veranlassung für die gegenständliche Masterarbeit genannt ist.

Schlagwörter:

Laderegler, Balancer, Lithium-Ionen-Akkumulator, Photovoltaik, Inselversorgung, Schutzeinrichtungen

Abstract

This Master's thesis is to construct a charge controller for safe charging a lithium-ion battery with overload protection by a solar cell panel with high charging current. A balancing unit has to equalize voltage for equal charge condition of the individual battery-cells which are connected in series to guarantee equal charge of the individual battery cells. A further supervision is needed to detect under-voltage over-voltage. Over-voltage leads to defective cells and in particular can cause hazardous situations if the overstressed cell would catch fire (thermal runaway). Nearby cells also can catch fire and are able to endanger surroundings. Protection is also necessary to avoid the danger of a short circuit at the supply side. The different operation modes, the voltage of the battery and the charge current have to be displayed in an appropriate way.

To guarantee reliability, the whole unit shall be constructed by using analog electronic elements like operational amplifiers, transistors etc. Microcontrollers would not be a good choice because of their error rate in software and hardware. Analog electronic elements are also cheaper in purchase and more reliable in operation.

The previous attempt to purchase the single components like charge controller, balancer, display unit and protection unit, to fulfill the requirements was difficult respectively not possible. To find a complete system with the needed features was impossible. These reasons lead to the implementation of this Master's thesis.

Key words:

Charge controller, balancer, lithium-ion battery, photovoltaics, stand-alone electrical supply, protection devices

Inhaltsverzeichnis

Ehrenwörtliche Erklärung	II
Vorwort, Widmung, Danksagung	III
Kurzfassung	IV
Abstract	V
Inhaltsverzeichnis	VI
1 Aufgabenstellung	1
2 Grundlegendes	3
2.1 Photovoltaikanlagen im Netzbetrieb	3
2.1.1 Überschusseinspeisung	5
2.1.2 Volleinspeisung	5
2.2 Photovoltaikanlagen im Inselbetrieb	6
2.3 Lithium-Ionen-Batterien	8
2.3.1 Re-Use von Lithium-Ionen Batterien	9
2.3.2 Balancing von Lithium-Ionen Batterien	10
2.4 Grundsaltungen für Laderegler und Balancer	15
2.4.1 Transistorschaltungen	15
2.4.2 Operationsverstärkerschaltungen	21
2.5 Eingesetzte Bauteile	28
2.5.1 Operationsverstärker	28
2.5.2 Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor	28
2.5.3 Optokoppler	29
2.5.4 Logik-IC 40106	29
3 Anforderungen	31
3.1 Lastenheft	31
3.2 Anzeigeeinrichtungen	32
3.3 Laderegler	32
3.4 Balancer	33
3.5 Sicherheitseinrichtungen	33
4 Ausführung	34
4.1 Pflichtenheft	34
4.2 Anzeigeeinrichtungen	34
4.3 Laderegler	39

4.4	Balancer	46
4.5	Sicherheitseinrichtungen	54
5	Auswirkungsanalyse	57
6	Inbetriebsetzung und Prüfung	58
6.1	Messergebnisse	60
7	Entwicklungsmöglichkeiten	63
8	Zusammenfassung	65
9	Literaturverzeichnis	67
10	Abbildungsverzeichnis	69
11	Tabellenverzeichnis	71
12	Abkürzungsverzeichnis	72
13	Symbole und Formelzeichen	73
Anhang A – Stromlauf-, Bestückungs- und Layoutpläne		I
Anhang B – Datenblätter der eingesetzten Bauteile		II
Anhang C – FMEA		III

1 Aufgabenstellung

Am Institut für Elektrotechnik der Montanuniversität Leoben wird intensive Forschung über die praktische Verwendung von Akkumulatoren (sekundäre Batterien) betrieben. Besonders Lithium-Ionen-Batterien (Li-Ion-Batterien) stehen hierbei im Mittelpunkt des Interesses. Mehrere Diplom- und Projektarbeiten wurden im Bereich dieses Themenschwerpunktes bereits verfasst. Besonders die Verwendung von Sekundärbatterien für den Betrieb von Automobilen liegt hierbei im Fokus der derzeitigen Forschungsarbeiten. Ebenfalls wird das Re-Use gegenständlicher Li-Ionen-Zellen untersucht. Auch der Einsatz von Sekundärbatterien für diverse Off-Grid- bzw. Inselversorgungen wurde bereits behandelt.

Die Summe oben angeführter Anstrengungen stellt die Basis für die gegenständliche Arbeit dar. Grundsätzlich sollte eine Apparatur gefertigt werden, welche die von einem Photovoltaikmodul gelieferte Energie in einen Re-Use-Lithium-Ionen-Akkumulator lädt. Die Ladung sollte hierbei so erfolgen, dass die einzelnen Akkuzellen den gleichen Ladungszustand und somit die gleiche Spannung aufweisen. Als bereits bestehende Anlagenteile waren ein Photovoltaikpanel (Spannung $U_{MPPT}=17V$; Leistung $P_{MPPT}\approx 300W$), eine dreizellige Lithium-Ionen-Sekundärbatterie (Kapazität $C=1600Ah$) und ein Wechselrichter zur Umsetzung von 12V Gleichspannung auf 230V Wechselspannung vorhanden. Diese Elemente sollten über die in der Masterarbeit herzustellende Einheit miteinander verbunden werden, sodass eine gleichmäßige Ladung der Batterie, wie in Abbildung 1 dargestellt ist, bei entsprechender Sonneneinstrahlung, erfolgt.

Zunächst war geplant, lediglich einen Laderegler zur Ladung der Akkumulatoren im Zuge einer Projektarbeit herzustellen. Diese Projektarbeit wurde jedoch insofern ausgeweitet, dass ein Balancer und zusätzliche Anzeige- und Sicherheitseinrichtungen hinzugefügt wurden, welche den Umfang einer Masterarbeit ergaben. Der Balancer sollte hierbei eine Überwachung der Batterie übernehmen und optimale Lade- und Entladebedingungen schaffen, um so eine lange Lebensdauer des Akkumulators sicherzustellen. Die Anzeigeeinrichtungen sollten es ermöglichen, den jeweiligen Status der Anlage ablesen zu können und

Betriebsabweichungen (Über- oder Unterspannung) von Batteriezellen zu visualisieren. Die Vermeidung von versorgungsseitigen Batteriekurzschlüssen sollte wiederum der Sicherheitseinrichtung zufallen, um Gefahrensituationen vorzubeugen.

Eine weitere Vorgabe bestand darin, die einzelnen Geräte aus Analog-Bauteilen aufzubauen, d.h. auf den Einsatz eines Microcontrollers sollte verzichtet werden. Die Ausführung der einzelnen Funktionen wäre zwar mit einem Microcontroller erheblich leichter herzustellen gewesen, jedoch ist anzunehmen, dass ein analoger Aufbau die Ansteuerung der Sicherheitselemente zuverlässiger durchführen kann. Softwarefehler, die den Microcontroller zu Fehlfunktionen verleiten könnten, sind somit von vornherein auszuschließen. Zusätzlich ist festzuhalten, dass sich eine wirtschaftliche Sinnhaftigkeit für den Einsatz eines Microcontrollers erst bei umfangreicherer Aufgabenstellung ergibt.

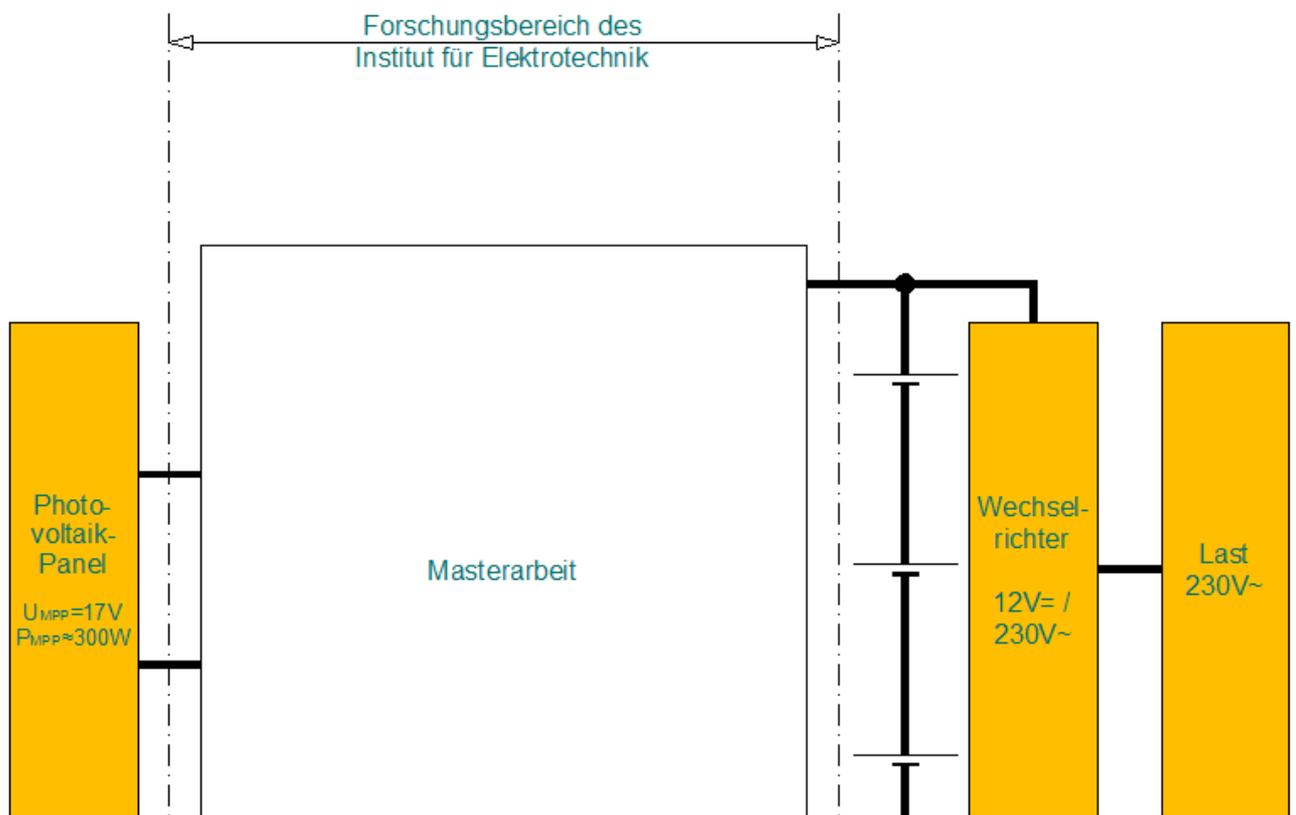


Abbildung 1: Blockschaltbild Aufgabenstellung

2.3 Lithium-Ionen-Batterien

Für portable Anwendungen, wie z.B. Mobiltelefone, Notebooks, etc. sind Lithium-Ionen-Sekundärbatterien bereits weit verbreitet und stellen einen großen Anteil am Markt dar. Auch der Einsatz als Energiespeicher in Elektrofahrzeugen gewinnt immer mehr an Bedeutung. Die hohe Energiedichte und ein kaum vorhandener Memory-Effekt [7] tragen zur Bedeutung dieser Akkumulatoren bei. Der chemische Aufbau soll im Folgenden in groben Zügen beschrieben werden.

Eine Lithium-Ionen-Zelle besteht aus einer Anode mit aktivem Li_xC_6 -Material, einem Separator und der Kathode, die sich aus aktiven Lithium-Metalloxiden (z.B. LiCoO_2) zusammensetzt. Der Separator hat einen Elektronenfluss zwischen Kathode und Anode zu unterbinden und darf nur für Ionen leitend sein. Beim Entladevorgang gibt das Lithium an der Anode ein Elektron ab, welches über den externen Stromkreis zur Kathode einen Stromfluss erzeugt. Das nunmehr ionisierte Lithium begibt sich im Elektrolyt der Zelle durch den ionenleitenden Separator zur Kathode. [14]

Beim Ladevorgang bestreiten die Lithium-Ionen aufgrund des eingeleiteten Stromes (Elektronenfluss) entsprechend den umgekehrten Weg. An der Anode nehmen sie ein Elektron auf und lagern sich als ladungsfreies Lithium-Atom im Graphitsubstrat ein.

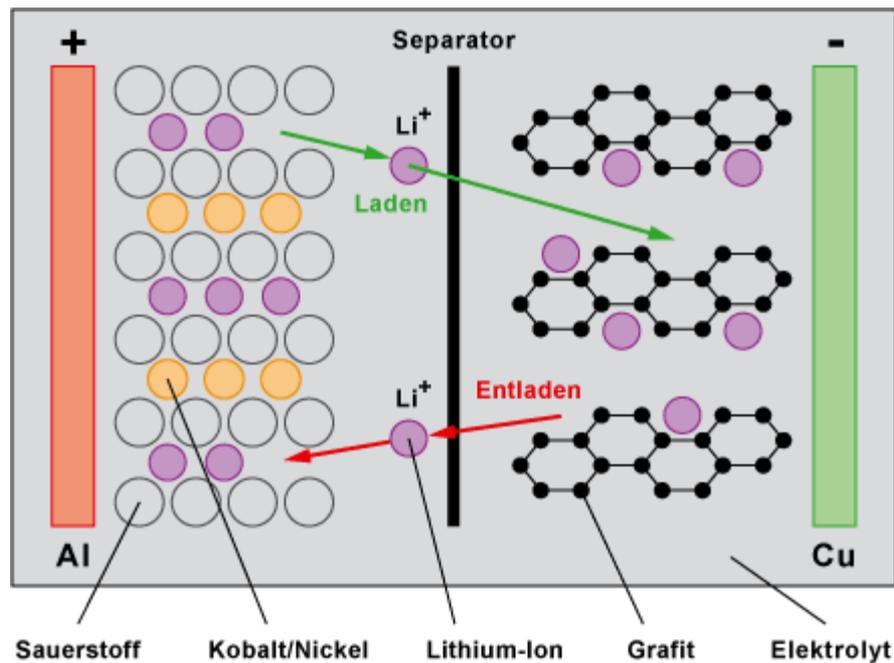


Abbildung 6: Aufbau einer Lithium-Ionen-Zelle;
 Quelle: Lithium-Ionen-Akkus < <https://www.elektronikkompodium.de/sites/bau/0810281.htm> > [zitiert am 10.04.2014]

2.3.1 Re-Use von Lithium-Ionen Batterien

Wie oben bereits erwähnt, wird eine immer höhere Zahl von Li-Ionen-Akkumulatoren hergestellt. Ihre Eigenschaften prädestinieren diese Batterietype für den Einsatz in Elektrofahrzeugen. Li-Ionen-Akkus werden dort mit Batteriemanagementsystemen überwacht, um deren Kapazität bestmöglich auszunutzen, eine möglichst lange Lebensdauer zu gewährleisten und ein hohes Maß an Sicherheit zu erreichen. Trotz dieser optimalen Bedingungen können diese Akkumulatoren nach langer und intensiver Nutzung den gestellten Anforderungen nicht mehr gerecht werden. Dies geschieht, wenn der Kapazitätsverlust des Akkumulators so groß wird, dass die Reichweite des Elektrofahrzeugs deutlich geringer ist, als im Neuzustand. Wird die Batterie nun gegen ein neues Fabrikat ausgetauscht, ist die Frage der weiteren Nutzung des Energiespeichers zu behandeln. [18]

Eine Möglichkeit ist hierbei die sekundäre Nutzung des Akkumulators in einer stationären Anlage. Die Überlegung hierbei gestaltet sich derartig, dass in Zeiten hohen Energiedargebots (z.B. bei intensivem Sonnenschein) die Ladung des

Akkus erfolgt. Während der Spitzenzeit oder in Zeiten geringem oder fehlendem Energiedargebots (z.B. nachts) kann dann gespeicherte Energie aus der Batterie entnommen werden. Die ökologischen und ökonomischen Vorteile liegen vor, indem Lastspitzen überbrückt und Kraftwerke, welche zur Abdeckung solcher Spitzen entlastet werden können. [18]

Es ist zwar möglich, stationäre Anlagen mit fabrikneuen Akkumulatoren auszustatten, Re-Use-Batterien stellen jedoch eine gute Alternative dar, da mit einem zukünftigen hohen Anteil von Altbatterien von Elektrofahrzeugen zu rechnen ist und deren Kapazitätsgehalt ausreicht. Der damit geringere Verbrauch an Rohstoffen für die Herstellung neuer Akkumulatoren kann sich ebenfalls positiv auswirken. Dies könnte wiederum zu kostengünstigeren Neubatterien führen. [18] [19]

Natürlich drängen sich solche Akkumulatoren mit ihrer zweiten Nutzungsphase auch für Inselversorgungen wie unter Kapitel 2.2 angeführt auf. Die deutlich niedrigeren Anschaffungskosten sprechen für sich und zumeist ist es bei solchen stationären Anlagen nicht von Bedeutung, ob zur Erreichung der erforderlichen Speicherkapazität mehr oder weniger Batteriemasse bzw. Platzbedarf bereitgestellt werden muss.

2.3.2 Balancing von Lithium-Ionen Batterien

Um höhere Kapazitäten und Ausgangsspannungen zu erhalten, werden Lithium-Ionen-Zellen seriell und parallel verschalten. Während die Parallelschaltung keine Probleme aufwirft, ist die Serienschaltung diffiziler zu handhaben. Fabrikneue Zellen werden so ausgewählt und zu Batterien verbaut, dass die Einzelkapazitäten möglichst gleich sind und eine gleiche Zellspannung vorhanden ist. Mit zunehmender Zahl an Lade- und Entladezyklen driften die Zellen in ihren Kapazitäten jedoch auseinander. Gründe hierfür sind geringfügige Unterschiede in der Fertigung, welche unterschiedliche Innenwiderstände zu Folge haben oder auch die ungleiche Alterung der Zellen, welche durch unterschiedliche Betriebstemperaturen der in Akkupacks verschalteten Zellen hervorgerufen

werden. Sind die Kapazitäten der Zellen unterschiedlich, divergieren auch die Zellspannungen bei der Ladung. Dies führt dazu, dass bei einer unkontrollierten Ladung, eine Zelle schon die Ladeschlussspannung erreicht hat, während andere Zellen noch eine Ladung benötigen würden. [16] Die folgende Abbildung zeigt eine solche Problematik anhand einer Lithium-Ionen-Batterie.

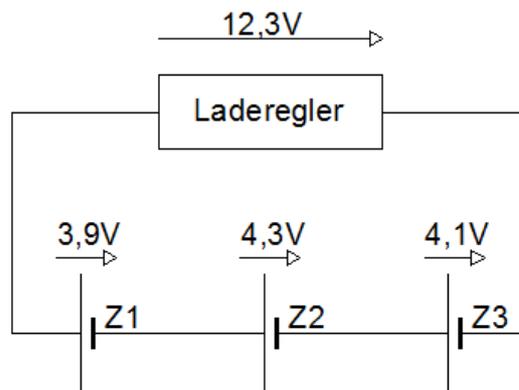


Abbildung 7: Überladung einer Zelle

Wie in obiger Abbildung zu erkennen ist, beträgt die Gesamtspannung des Akkumulators, welcher vom Ladegerät geladen wird, eine Spannung von 12,3V. Während Zelle 2 (Z2) bereits über der Ladeschlussspannung liegt, haben die Zellen 1 und 2 diese noch nicht erreicht. Die Ladung des Gesamtakkumulators würde also fortgesetzt werden und die Zelle 2 würde eine noch höhere Zellspannung erreichen.

Damit Li-Ionen-Batterien eine hohe Lebensdauer erlangen können, muss die Ladung des Akkumulators überwacht und gesteuert werden. Im Vergleich dazu, werden Blei-Säure-Akkumulatoren durch eine Überladung nicht dauerhaft beschädigt. Wird überschüssige Energie in die Blei-Akkumulatoren eingeleitet, erfolgt ein sogenanntes Ausgasen. Hierbei findet eine elektrolytische Zersetzung von Wasser statt. Nach entsprechender Nachfüllung ist der Blei-Säure-Akkumulator wieder normal einsetzbar. [15] Ähnliches gilt für Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren. Eine Überladung führt bei ihnen noch nicht zu einer dauerhaften Schädigung. [14]

Erfolgt bei Li-Ionen-Zellen bereits eine geringfügige Überladung, führt dies zu irreparablen Schäden. Nimmt die Überladung zu, kann dies zu gefährlichen thermischen Situationen, Explosionen etc. führen. [16] Die folgende Abbildung

zeigt eine Li-Ionen-Zelle nach einer Überladung mit anschließender thermischer Zerstörung.



Abbildung 6: zerstörte Li-Ionen-Zelle nach massiver Überladung

Damit obiger Fall nicht eintreten kann, empfiehlt sich der Einsatz eines Balancers. Dieser überwacht zuerst die einzelnen Zellen auf ihre jeweilige Spannung. Sofern die Spannungsunterschiede der einzelnen Zellen nur marginal sind, greift der Balancer (Abbildung 8, blau dargestellt) nicht in die Ladung ein.

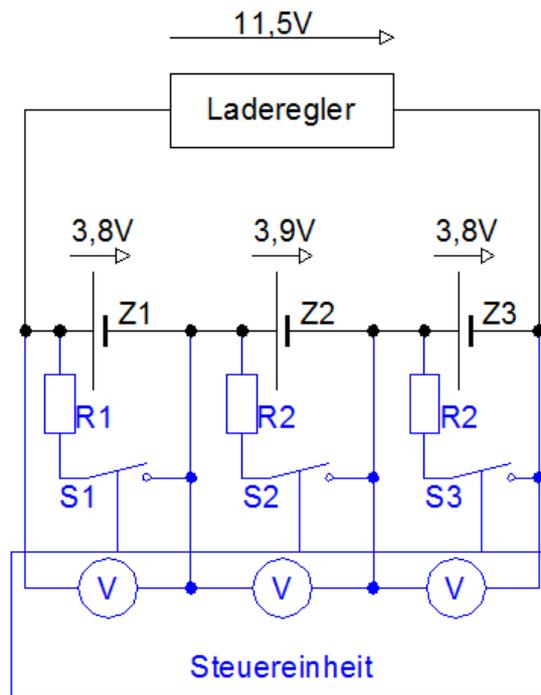


Abbildung 8: Batterieladung ohne Eingriff des Balancers

Wird die Spannung an einer Zelle merklich überschritten, greift der Balancer ein, indem der jeweilige Schalter zu dem parallel geschalteten Balancierwiderstand geschlossen wird und die überschüssige Energie am Widerstand in Wärme umgesetzt wird. Das unkontrollierte, schnellere Vollladen einer Zelle wird somit unterbunden. [17] Das Eingreifen des Balancer ist in folgender Darstellung illustriert.

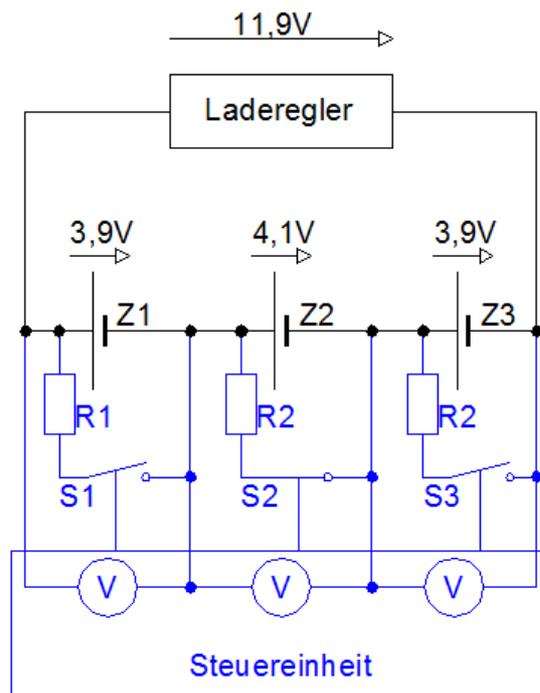


Abbildung 9: Akkumulator zu Beginn des Balancing-Vorganges

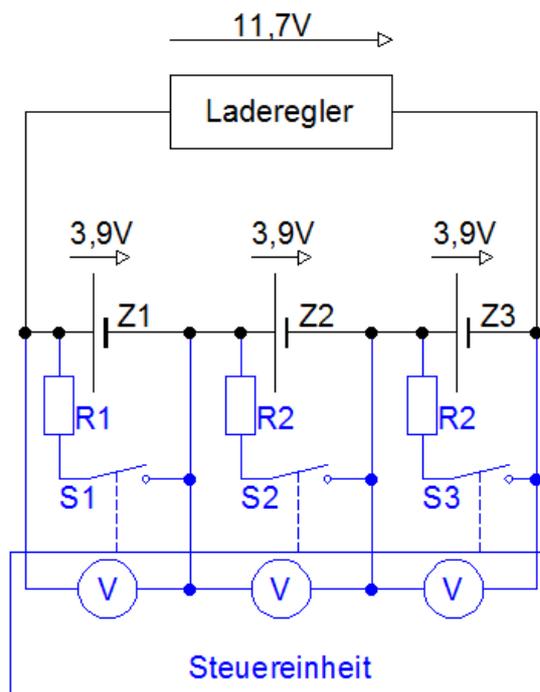


Abbildung 10: Akkumulator nach Abschluss des Balancing-Vorganges

Dieses Verfahren der Umsetzung von überschüssiger Ladeenergie in Wärme an einem Widerstand wird als passives Balancing bezeichnet. Des Weiteren gibt es das Verfahren des aktiven Balancing, bei dem die überschüssige Energie einer

vollgeladenen Zelle in andere Zellen mit niedrigerem Energiegehalt umgeschichtet wird. Betrachtet man die Energiebilanz der beiden Varianten, ist natürlich das aktive Balancing vorzuziehen. Der technische Aufwand zur Umsetzung hierfür ist jedoch ungleich höher, wodurch auch die Gefahr eines Fehlers ebenfalls größer wird. Im Normalfall und wenn regelmäßig eine balancierte Ladung erfolgt, sollte der Balancing-Aufwand so gering sein, dass die in Wärme umgesetzten Verluste bei der passiven Methode nicht signifikant sind. Aus diesem Grund wurde für die gegenständliche Arbeit das passive Balancing favorisiert.

2.4 Grundsaltungen für Laderegler und Balancer

Die im Zuge der Ausführung der gegenständlichen Arbeit verwendeten Grundsaltungen von Transistoren und Operationsverstärkern sind in diesem Kapitel aufgeführt.

2.4.1 Transistorschaltungen

2.4.1.1 Emitterschaltung

Die Emitterschaltung stellt die häufigste Art der Beschaltung für einen Transistor dar. Der prinzipielle Aufbau ist der folgenden Abbildung zu entnehmen, welche einen Detailausschnitt aus Anhang A – Plannummer S2.1 darstellt.

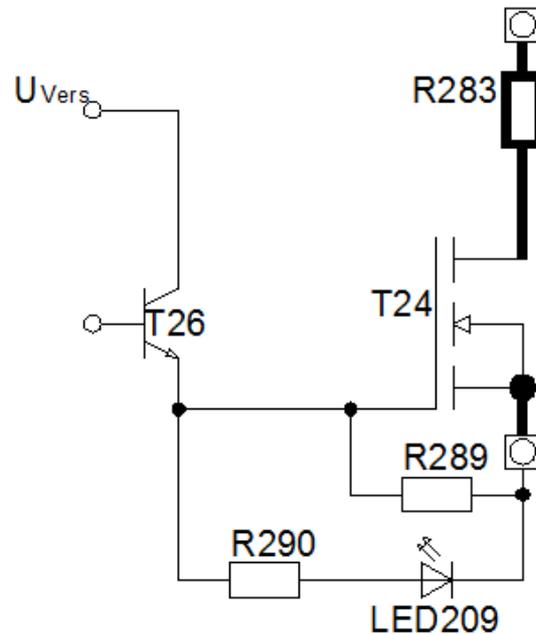


Abbildung 11: Bipolartransistor T26 in Emitterschaltung

Ein Transistor kann in der Emitterschaltung für zwei Funktionen genutzt werden, zum einen als Stromverstärker und zum anderen als Schalter. Bei der Verwendung als Stromverstärker werden Änderungen des Basisstromes I_B zu vielfachen Änderungen des Kollektorstromes I_C verstärkt. Der mathematische Zusammenhang ist mit

$$I_C = B \cdot I_B \quad (2)$$

gegeben. Der Faktor B stellt hierbei die Stromverstärkung dar. Bei der gegenständlichen Arbeit wurden Transistoren vorwiegend als Schalter eingesetzt. Analog dazu wird bei entsprechendem Anlegen einer an der Basis ein Basisstrom I_B fließen, welcher dazu führt, dass die Kollektor-Emitter-Strecke leitend wird. Es fließt ein deutlich höherer Kollektorstrom I_C und der Halbleiterschalter ist sozusagen geschlossen. [6]

Für die in Abbildung 11 dargestellte Situation bedeutet dies, dass ein Steuersignal am Gate G des Feldeffekttransistors $T24$ anliegt. Im Folgenden ist das Ausgangskennlinienfeld für den Transistor BC237 dargestellt. Dieser wurde bei der Herstellung der diversen Platinen für diese Arbeit mehrmals eingesetzt.

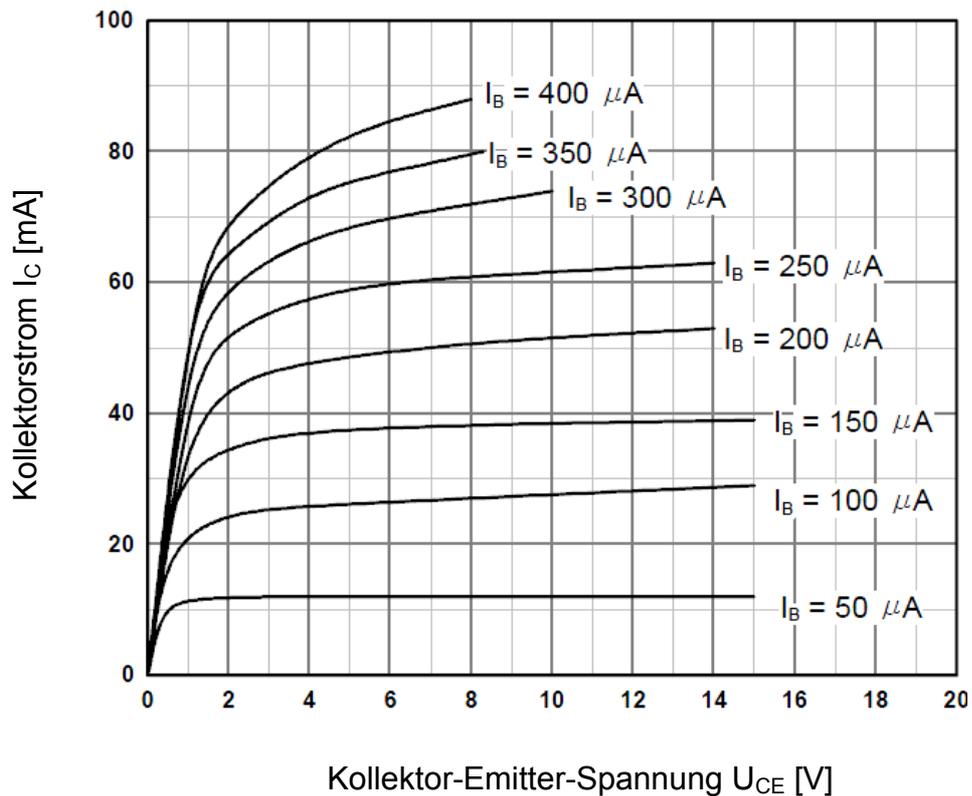


Abbildung 12: Ausgangskennlinienfeld des Transistors BC237;
 Quelle: vgl. BC237 Datasheet (PDF) < [http:// www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/50722/FAIRCHILD/BC237.html](http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/50722/FAIRCHILD/BC237.html) > [zitiert am 07.04.2014]

Wie in Abbildung 12 zu erkennen ist, sind mit dem Anlegen eines geringen Basisstromes I_B deutlich höhere Kollektorströme I_C erreichbar.

Detaillierte Ausführung zur Emitterschaltung und dem Verhalten von Transistoren können der Literaturquelle [8] entnommen werden.

2.4.1.2 Darlingtonschaltung

Stromverstärkungen, die mit einem Transistor in Emitterschaltung generiert werden, können für manche Anwendungen zu geringe Werte erreichen. Um den Stromverstärkungsfaktor B zu erhöhen, bietet sich die Möglichkeit der Darlington-Schaltung an. In Abbildung 13 ist ein Ausschnitt aus Anhang A – Plannummer S3 dargestellt, in welcher die Anordnung zweier Transistoren zu einer Darlington-Schaltung illustriert. [8]

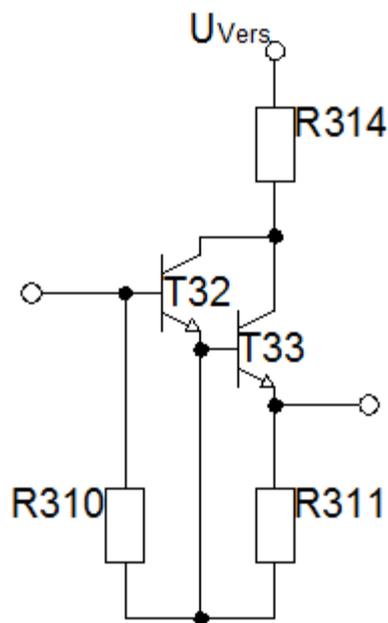


Abbildung 13: Transistoren T32 und T33 in Darlington-Schaltung

Die erreichbare Stromverstärkung der Gesamtschaltung ergibt sich dabei als Näherung der Multiplikation der beiden Einzel-Stromverstärkungen. [8]

$$N \approx \beta_{T32} \cdot \beta_{T33} \quad (3)$$

Wird die Darlington-Schaltung in einem Gerät umgesetzt, wird dies als Darlington-Transistor bezeichnet. [8] Die Widerstände R310 und R311 in Abbildung 13 dienen zur Ableitung von Ladungen an den jeweiligen Basen und somit zur Verbesserung des Schaltverhaltens.

Weitere Details zur Darlington-Schaltung können der Literaturquelle [8] entnommen werden.

2.4.1.3 Hochsetzsteller für Gateansteuerung

Für die Umsetzung einer Gateansteuerung eines MOSFETs wurde es im Zuge dieser Arbeit notwendig, die Spannung einer Batteriezelle auf ein höheres Niveau zu heben. Hierzu wurde ein sogenannter Hochsetzsteller verwendet. Abbildung 14 zeigt den grundsätzlichen Aufbau eines Hochsetzstellers, bestehend aus einer Spule L21, einer Diode D217, einem Kondensator C26 und einem Schalter S.

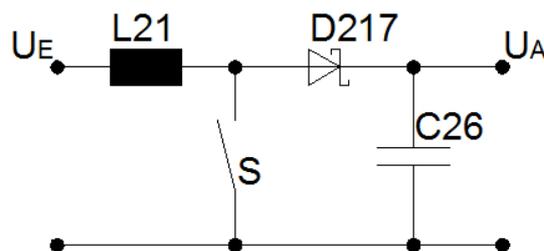


Abbildung 14: Grundsätzlicher Aufbau eines Hochsetzstellers

Ist beim Anlegen einer Eingangsspannung U_E der Schalter geschlossen, wird Energie in der Induktivität gespeichert. Das anschließende Öffnen des Schalters führt dazu, dass ein Strom über die Diode fließt und den Kondensator C26 auflädt, der wiederum sein, durch die stetige Aufladung, höheres Spannungspotential an den Ausgang U_A abgibt. Durch die Diode wird vermieden, dass bei geschlossenem Schalter Energie vom Kondensator an die Spule abgegeben wird. [8]

Die praktische Umsetzung eines Hochsetzstellers ist Abbildung 15 – roter Kasten - zu entnehmen. Dieses Element – Fabrikat: Linear Technology – Type: LT1615 – wurde in die erwähnte Schaltung zur Gateansteuerung eingebaut. Dem IC kommt dabei die Aufgabe des Schaltens und des Regels zu. Die Ausführung des Schalters erfolgt grundsätzlich mit Halbleiter-Schaltelementen. Beim

gegenständlichen Fabrikat ist dies ein Transistor, gekennzeichnet in der Grafik mit Q3.

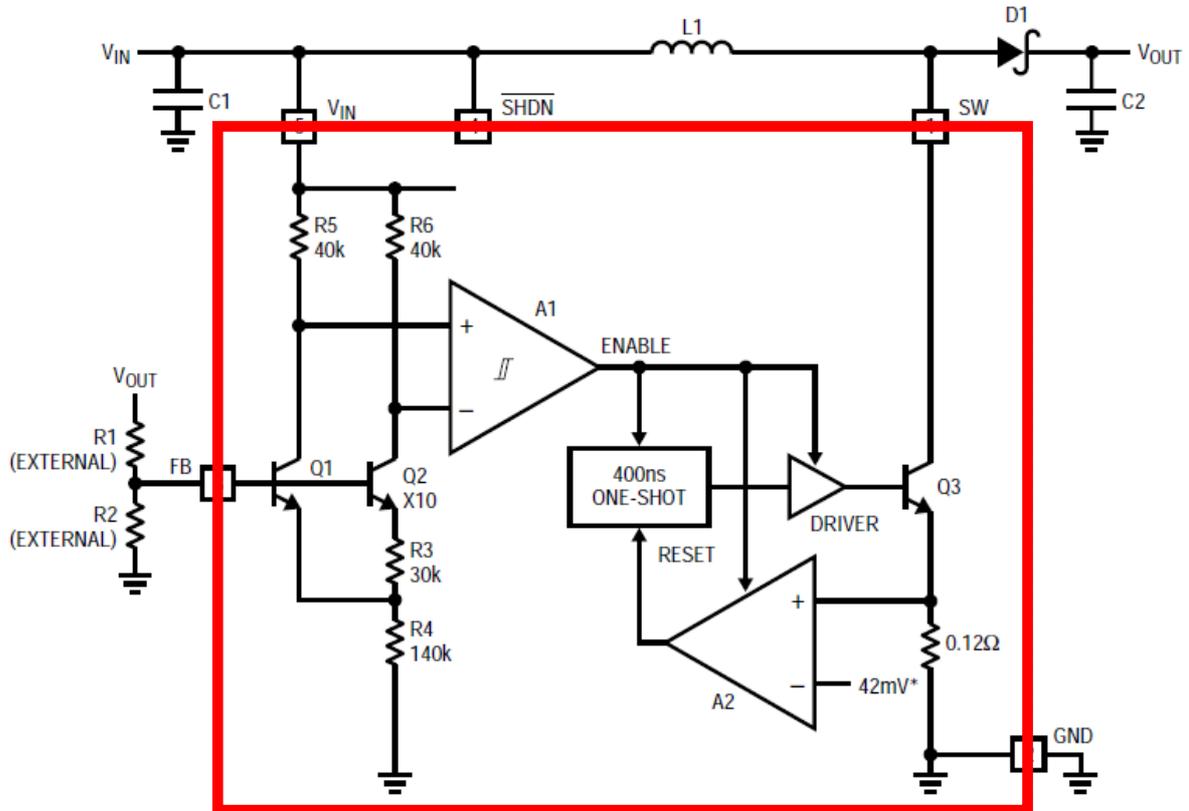


Abbildung 15: Stromlaufplan des Hochsetzsteller-ICs LT1615;
 Quelle: vgl. LT1615/LT1615-1 Micropower Step-Up DC/DC Converters in ThinSOT
 < <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/16151fas.pdf> > [zitiert am 08.04.2014]

Durch Variierung der externen Widerstände R1 und R2 in Abbildung 15 wird das Ausgangsspannungsniveau eingestellt. Weitere Details sind dem Datenblatt unter Anhang B zu entnehmen.

2.4.1.4 Thyristor

Zur besseren Vorstellung kann ein Thyristor in ein Ersatzschaltbild bestehend aus einem pnp- und einem npn-Thyristor zerlegt werden. Hierbei werden die Übergänge der vier Dotierungsschichten – pnpn – klarer verständlich. Die gegenständliche Anordnung ist der folgenden Grafik, mitsamt dem Schaltsymbol für einen Thyristor, zu entnehmen. [10]

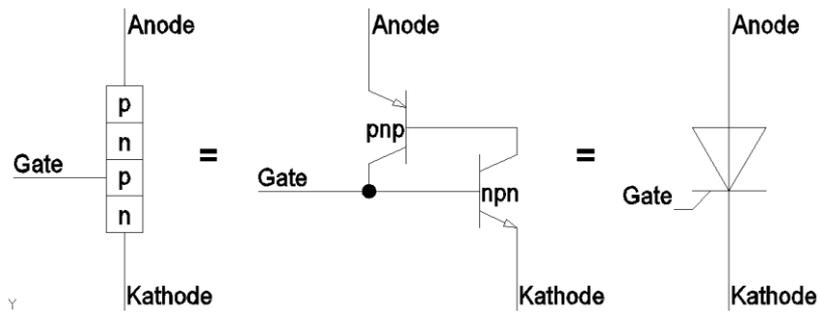


Abbildung 16: Dotierungsschema und Ersatzschaltbild eines Thyristors

Durch die Anordnung der Dotierungsschichten ist der Thyristor den steuerbaren Halbleiterelementen zuzurechnen. Wird am Gate ein Steuerstrom angelegt, erfolgt die sogenannte Zündung. Die somit erfolgte Leitbarkeit des Thyristors ändert sich auch nicht, nachdem der Steuerstrom am Gate entfernt wurde. Die Leitstrecke bleibt solange erhalten, bis der vom Thyristor geführte Strom unter einen bestimmten Wert sinkt, auch als Haltestrom bezeichnet. Praktisch erfolgt dies in der Leistungselektronik durch externes Abschalten oder Umpolen der anliegenden Spannung. Dies stellt einen typischen Betrieb beim Einsatz als Gleichrichter dar. [10]

2.4.2 Operationsverstärkerschaltungen

Es werden nun einige Operationsverstärkerschaltungen (OPV-Schaltungen) abgehandelt, welche für die hergestellten Platinen der Masterarbeit von essentieller Bedeutung sind. Das Verhalten eines OPVs wird durch die äußere Beschaltung mit Widerständen bzw. anderen Bauelementen bestimmt. Für die gegenständlichen Anwendungen erfolgt stets eine Rückkopplung des Ausgangssignals auf den invertierenden oder nicht invertierenden Eingang. Bei einer Gegenkopplung wird die Ausgangsspannung des OPV auf den invertierenden Eingang rückgeführt. Die Ausgangsspannung wird somit zu der am invertierenden Eingang anliegenden Spannung subtrahiert. Erfolgt die Rückkopplung auf den nicht invertierenden Eingang, erfolgt eine Addition der Ausgangs- mit der Eingangsspannung. Hierbei spricht man von einer Mitkopplung. [11]

Die sachliche Betrachtung von OPVs und deren Eigenschaften geht zunächst von einem idealen Verhalten aus. Dies bedeutet z.B. eine Differenzspannung zwischen invertierendem und nicht invertierendem Eingang von $U_{\text{Diff}}=0\text{V}$, einen unendlichen hohen Eingangswiderstand und somit keinen Stromfluss in die Eingänge, sowie einen Ausgangswiderstand $R_A=0\Omega$. Im realen Aufbau der Komponenten ist jedoch auch ein reales Verhalten zu berücksichtigen, dass von dem eben genannten idealen Verhalten abweicht. Da der Unterschied von idealem zu realem Verhalten eine Abweichung bedeutet, welche jedoch geringer ist als die Toleranzen anderer eingesetzter Bauteile (Widerstände, Kondensatoren etc.), wird nicht auf Diskrepanzen zwischen idealem und realem OPV eingegangen.

Die folgenden Ausführungen betrachten nur eine grundlegende Behandlung. Tiefer gehende Details sind der Literaturquelle [11] zu entnehmen.

2.4.2.1 Invertierender Verstärker

Zunächst wird die einfachste Verstärkerschaltung betrachtet. Die folgende Abbildung ist dem Anhang A – Plannummer S2 entnommen und zeigt die Beschaltung des invertierenden Verstärkers. Über den Widerstand R206 erfolgt eine Rückkoppelung des Ausgangs auf den invertierenden Eingang, an welchem über den Widerstand R205 das Eingangssignal anliegt.

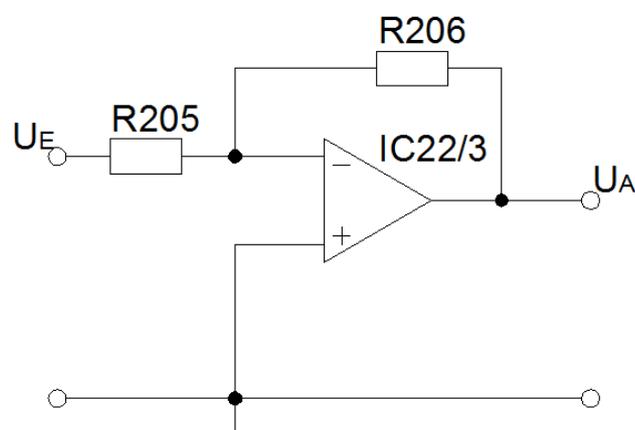


Abbildung 17: Schaltung des invertierenden Verstärkers

Wie der Name schon ausdrückt, kehrt der invertierende Verstärker die Polarität des anliegenden Eingangssignals um. Durch die Rückführung einer negativen Ausgangsspannung auf den positiven Eingang erfolgt eine Abschwächung des Eingangssignals, bis die Differenzspannung zwischen invertierendem und nicht invertierendem Eingang Null wird. [11]

Die Verstärkung v des Eingangssignals wird über die äußeren Widerstände R205 und R206 festgelegt und ist durch Formel (3) definiert. [11]

$$v = -L \frac{Y_{\text{E}}}{Y_{\text{A}}} = -L \cdot F \frac{V_{64}}{V_{649}} \quad (4)$$

2.4.2.2 Summierverstärker

Grundsätzlich ist der Summierverstärker eine Erweiterung des invertierenden Verstärkers. Zusätzlich zu einem Spannungseingang wird mindestens ein weiterer auf den invertierenden Eingang angehängt. Die folgende Abbildung, entnommen aus dem Anhang A – Plannummer S2, illustriert den Aufbau eines Summierverstärkers.

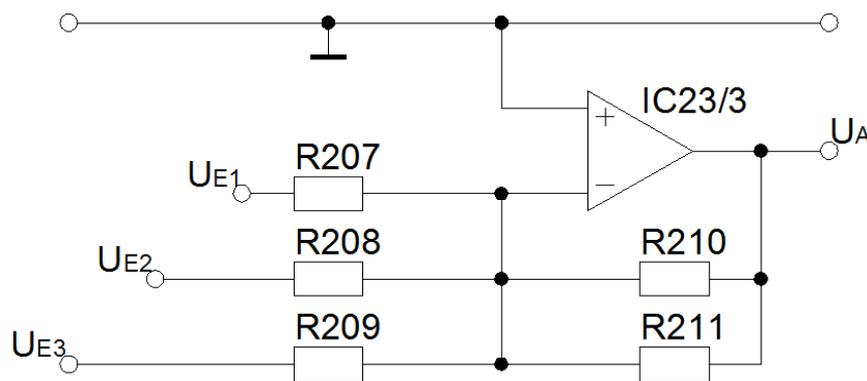


Abbildung 18: Aufbau eines Summierverstärkers

Die jeweilige Eingangsspannung bewirkt aufgrund der Widerstände R207, R208 und R209 einen entsprechenden Stromfluss. Im gemeinsamen Knotenpunkt mit den Widerständen R210 und R211 werden die Eingangsströme aufsummiert und fließen anschließend durch die Parallelschaltung von R210 und R211. [11] Der

ergänzte Widerstand R211 hat in diesem Schaltbild die Aufgabe, eine Anpassung des Rückkoppelwiderstandes vorzunehmen. Bei der Ausführung mit Widerständen aus der Normreihe ist auf dergleichen Hilfsmittel zurückzugreifen.

Entsprechend dem invertierenden Verstärker liegt auch beim Summierverstärker die Ausgangsspannung U_A über dem parallelen Widerstandspaar R210 und R211 an und ergibt sich wie folgt. [11]

$$U_A = -U_{E1} \frac{R_{210} + R_{211}}{R_{211}} - U_{E2} \frac{R_{210}}{R_{211}} \quad (5)$$

2.4.2.3 Differenzverstärker

Der Differenzverstärker ist wiederum eine Erweiterung des invertierenden Verstärkers. Der Unterschied liegt am nicht invertierenden Eingang in Form eines Spannungsteilers mit den Widerständen R330 und R331 vor. Zur Veranschaulichung zeigt Abbildung 19 ein Planausschnitt aus Anhang B – Plannummer S2.

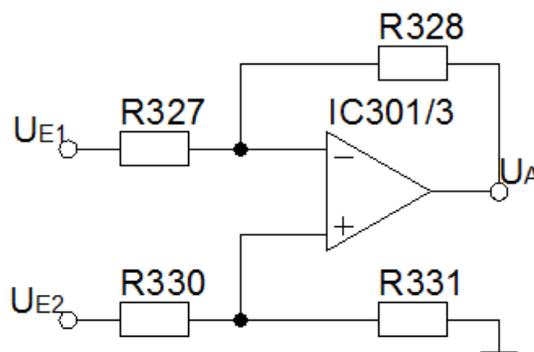


Abbildung 19: Schaltung des Differenzverstärkers

Aufgrund des vorgenannten Spannungsteilers ergibt sich für den invertierenden Eingang folgendes Spannungspotential.

$$U_{-} = -U_{E1} \frac{R_{328}}{R_{327} + R_{328}} - U_{E2} \frac{R_{328}}{R_{327} + R_{328}} \quad (6)$$

Bekanntlich ist idealerweise das Potential am nicht invertierenden Eingang gleich mit dem Potential am invertierenden Eingang. Dies führt zu einer komplexeren Gleichung für die Ausgangsspannung U_A .

$$U_A = U_{Ref} \cdot \left(1 + \frac{R_{109}}{R_{108}} \right) \quad (7)$$

Wird Formel (5) gleich null gesetzt, also der nicht invertierende Eingang auf Masse geschaltet, ergibt sich wieder Formel (3) für den invertierenden Verstärker. [11]

2.4.2.4 Schmitt-Trigger

Für die gegenständliche Masterarbeit wurde die nicht invertierende Variante des Schmitt-Triggers eingesetzt und wird deshalb auch im Folgenden behandelt. Der unten abgebildete Schaltungsaufbau ist einem Detailausschnitt aus Anhang A – Plannummer S1 entnommen.

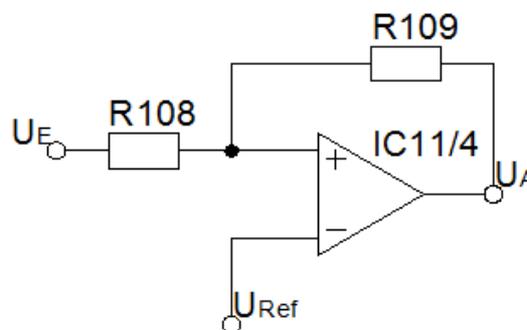


Abbildung 20: Schaltung eines nicht invertierenden Schmitt-Triggers

Wie bereits aus Abbildung 20 zu erkennen ist, weist der Schmitt-Trigger eine Mitkopplung auf. Das Verhalten von Schmitt-Triggern ähnelt dem von Komparatoren, mit dem Unterschied, dass Ein- und Ausschaltpegel nicht ident sind. Die Schaltzustände High und Low sind um eine Hysterese verschieden. Die Schalthysterese liegt um die einstellbare Referenzspannung U_{Ref} . [8] In folgender Abbildung ist die Schalthysterese eines nicht invertierenden Schmitt-Triggers schematisch dargestellt.

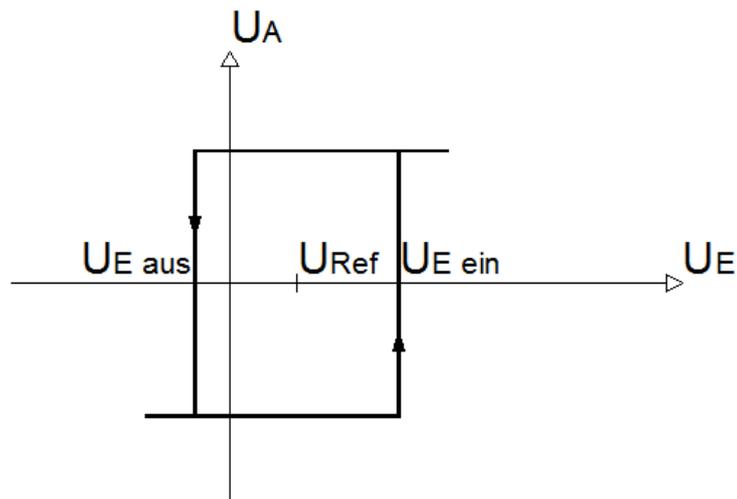


Abbildung 21: Schalthysterese eines nicht invertierenden Schmitt-Triggers

Die Maxima der Hysterese in den vertikalen Richtungen sind durch die Aussteuergrenzen des OPVs begrenzt. Die Formeln für die Dimensionierung der Hysterese sind wie folgt. [8]

$$\text{Einschaltpegel: } U_{E \text{ ein}} = U_{Ref} + \frac{U_{A \text{ max}} - U_{A \text{ min}}}{1 + \frac{R_1}{R_2}} \quad (8)$$

$$\text{Ausschaltpegel: } U_{E \text{ aus}} = U_{Ref} - \frac{U_{A \text{ max}} - U_{A \text{ min}}}{1 + \frac{R_1}{R_2}} \quad (9)$$

$$\text{Schalthysterese: } \Delta U_E = \frac{U_{A \text{ max}} - U_{A \text{ min}}}{1 + \frac{R_1}{R_2}} \quad (10)$$

2.4.2.5 Programmierbare Referenzspannung

Ein weiteres Einsatzgebiet eines OPVs bei der gegenständlichen Masterarbeit ist die Umsetzung einer stabilen Referenzspannung. Hierfür wurde das Bauteil TL431 (Datenblatt liegt dem Anhang B bei) eingesetzt. Folgende Abbildung zeigt das Schaltzeichen, sowie ein Blockschaltbild des TL431.

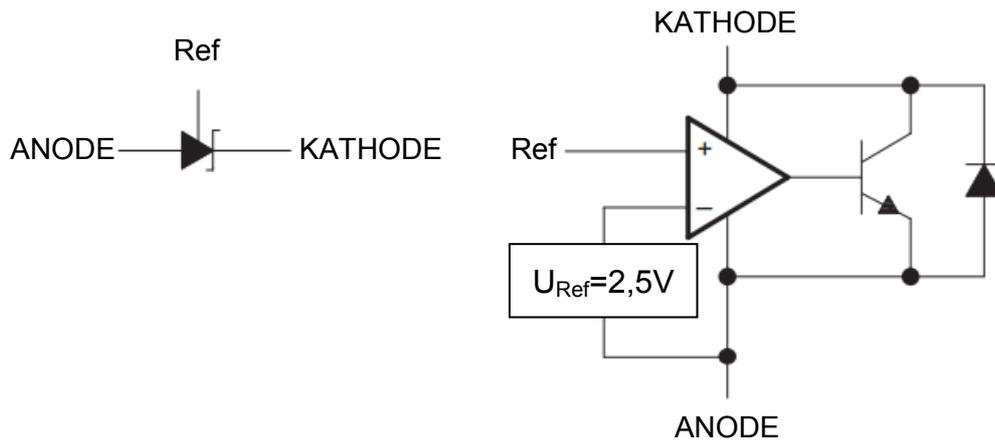


Abbildung 22: Schaltzeichen und Stromlaufplan des Referenzspannungs-ICs TL431;
Quelle: vgl. TL431 Precision Programmable Reference
 < <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl431.pdf> > [zitiert am 08.04.2014]

Der eingesetzte OPV fungiert bei dieser Schaltung als Verstärker mit Stromausgang in die Basis des npn-Transistors. Steigt der Potentialunterschied zwischen Anode und Referenz über die interne Referenzspannung von 2,5V, geht der Ausgang des OPV in Richtung High. Dabei wird der nachgeschaltete Transistor durchlässig und die Strecke zwischen Kathode und Anode beginnt zu leiten. Die im Stromlaufplan abgebildete Diode wird als Freilaufdiode eingesetzt.

2.5 Eingesetzte Bauteile

2.5.1 Operationsverstärker

Für die im Zuge der Masterarbeit hergestellten Platinen wurde der Operationsverstärker TL064CN verwendet. Grund hierfür war im Besonderen der niedrige Versorgungsstrom des OPVs. Bei vier OPVs pro IC, benötigt jeder der vier Einzelverstärker eine Leistung von 6mW. Da es sich um eine Inselversorgungsanlage handelt und die Versorgung der Elektronik aus dem Akkumulator sicher zu stellen ist, sollte der Energiebedarf der einzelnen Bauteile möglichst gering sein.

Die sonstigen Parameter entsprechen den Eigenschaften, welche auch vergleichbare OPV-ICs aufweisen. Nähere Details können dem Datenblatt unter Anhang B entnommen werden.

2.5.2 Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor

Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistoren, im Englischen metal-oxide-semiconductor field-effect transistor (MOSFET) genannt, werden in vielfältiger Weise als Schalter eingesetzt. Der Vorteil gegenüber dem Bipolartransistor liegt in der Art der Ansteuerung. Ist beim Bipolartransistor ein Basisstrom zur Ansteuerung notwendig, reicht beim MOSFET das Anlegen einer Steuerspannung am Gate zum Durchschalten der Drain-Source-Strecke. Dementsprechend sind die Ansteuerverluste von MOSFETs deutlich geringer. Des weiteren weist der MOSFET im eingeschalteten Zustand einen niederohmigen Widerstand ($R_{DS,on}$) auf und keine Schwellspannung wie bipolarer Transistor. Der MOSFET hat wesentlich geringere Verluste im eingeschalteten Zustand.

Die folgende Tabelle zeigt eine Aufstellung der bei der gegenständlichen Arbeit eingesetzten MOSFETs. Details sind den unter Anhang B beiliegenden Datenblättern zu entnehmen.

Tabelle 1: Auflistung der eingesetzten MOSFETs

Anlagenteil	Bauteilnummer	Type
Laderegler	T11	IRFP4468
Balancer	T21	RFD16N05SM
Balancer	T22	IRFP9622
Balancer Leistungsteil	T23, T24, T25	BUZ344

2.5.3 Optokoppler

Optokoppler stellen eine Kombination aus einer Leuchtdiode mit einem Fototransistor dar [8], welche gemeinsam in einem lichtundurchlässigen Gehäuse verbaut sind. Durch ihre Eigenschaft, Licht als Schaltmedium einzusetzen, sind Optokoppler ein probates Mittel zur galvanischen Trennung (= Potentialtrennung) von Schaltkreisen. [8] Im Folgenden ist das Schaltzeichen eines Optokopplers anhand eines Planausschnittes von Anhang A – Plannummer S2.1 abgebildet.

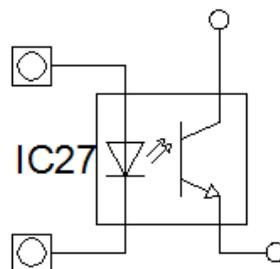


Abbildung 23: Schaltzeichen eines Optokopplers

2.5.4 Logik-IC 40106

Gegenständlicher IC besteht aus Schmitt-Triggern mit invertierendem Eingang. Als Schmitt-Trigger weist jeder Kreis eine Schalthysterese auf. Die

Schaltswellen sind abhängig von der anliegenden Versorgungsspannung. Die Schaltzeiten von Low auf High bzw. umgekehrt liegen im zweistelligen Nanosekundenbereich. Eingesetzt werden diese ICs im Allgemeinen als Schaltpräzisierung von flachen Kurven und Impulsen, sowie durch die Hysterese für astabile und monostabile Multivibratoren. [13]

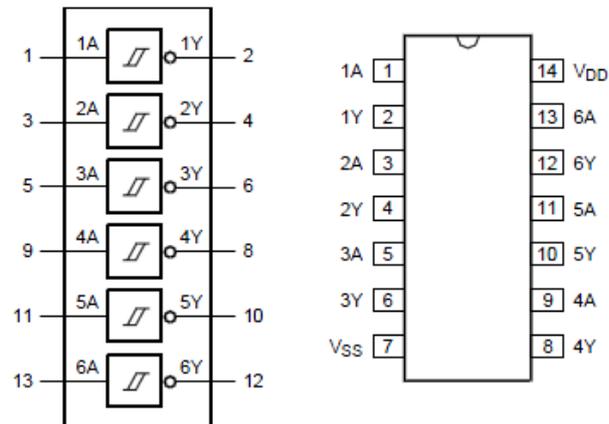


Abbildung 24: Funktionsdiagramm und Pinbelegung des Logik-IC HEF40106B, vgl. [13]

Detailliertere Eigenschaften sind dem Datenblatt im Anhang B zu entnehmen.

3 Anforderungen

3.1 Lastenheft

Dem Vorgehen in der Industrie entsprechend, wurden die groben, mündlich formulierten Vorgaben für dieses Projekt in einem Lastenheft zusammengestellt. Abbildung 25 zeigt das Blockschaltbild, das den Umfang der Arbeit zu Beginn darstellt.

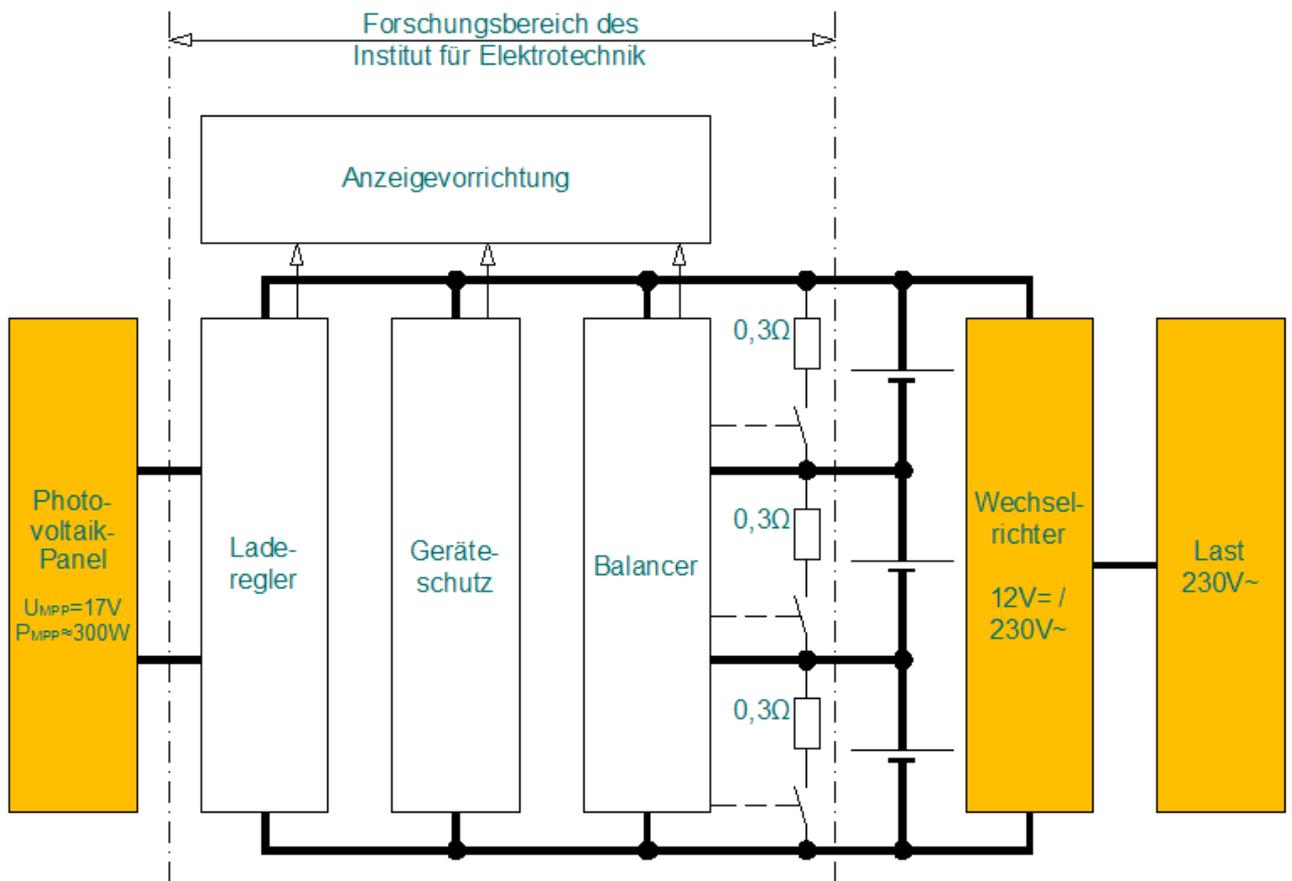


Abbildung 25: Blockschaltbild des Lastenheftes

In den nachfolgenden Punkten sind die Anforderungen für die Systembestandteile dargestellt.

3.2 Anzeigeeinrichtungen

Um den Status der Anlage zu erfassen, sind mehrere Anzeigeeinrichtungen herzustellen. Zunächst soll am Gerät abgelesen werden, ob der Akkumulator aktuell geladen wird oder dieser bereits vollgeladen ist. Weiters ist anzuzeigen, ob die Spannung einzelner Batteriezellen über- bzw. unterhalb des erlaubten Arbeitsbereiches liegt (3,3 – 4,1V). Wenn sich eine Zelle spannungsmäßig von den beiden anderen unterscheidet (größer oder kleiner), wird der Balancer aktiviert. Das Balancieren einer Zelle ist visuell mittels einer jeweils zugehörigen LED anzuzeigen. Abschließend ist es wünschenswert den aktuellen Ladestrom, welcher vom PV-Modul zum Akkumulator fließt, sowie die Batteriespannung anzuzeigen. Hierbei sind LCD-Panels zu wählen.

3.3 Laderegler

Die Funktion des Ladereglers ist der Art zu gestalten, dass dieser die vom PV-Modul zur Verfügung stehende Spannung mit der Akku-Spannung vergleicht. Ist der Akkumulator nicht vollgeladen und die Modulspannung höher als die Batteriespannung soll ein Ladestrom in die Batterie fließen. Wenn der Akku vollgeladen oder die Spannung des PV-Moduls geringer als die Akku-Spannung ist, soll das PV-Modul kurzgeschlossen werden. Da sich ein Photovoltaikmodul wie eine Stromquelle verhält und im Maximum-Power-Point einen Strom generiert, der nahe am Kurzschlussstrom liegt, stellt dies eine zuverlässige Möglichkeit dar, das Modul in einen sicheren Bereich zu führen. Durch den Einsatz einer geeigneten Diode wird sichergestellt, dass ein Stromfluss nur vom Modul zum Akkumulator erfolgen kann, wodurch eine Entladung des Akkumulators über das nicht bestrahlte Panel verhindert wird.

Die Herstellung eines Ladereglers ohne zusätzliche Funktionen (Balancer, Anzeige- und Sicherheitseinrichtungen) erfolgte bereits im Zuge einer Projektarbeit des Autors.

3.4 Balancer

Der Balancer ist der integrale Projektteil zur Gewährleistung einer hohen Zyklus- und Lebensdauer des Lithium-Ionen-Akkumulators. Welche Aufgaben er zu erfüllen hat, ist in Kapitel 2.3.2 aufgeführt. Die gegenständliche Ausführung soll sich so gestalten, dass zunächst aus den drei Zellspannungen ein Mittelwert gebildet wird, um anschließend festzustellen, ob die Spannung einer Zelle darüber liegt. Besteht eine solche Abweichung, wird mittels Optokoppler ein Signal an das Leistungsteil übermittelt, bei welchem über einen MOSFET der jeweilige Balancierwiderstand parallel zur spannungsüberhöhten Zelle geschaltet wird. Wenn zwei Zellen Spannungserhöhungen aufzeigen, werden beide Zellen balanciert.

Weiters ist vom Balancer zu überwachen, ob sich eine der Zellen außerhalb des Sollzustandes (3,3 – 4,1V) befindet. Hierzu soll beim Auftreten von Überspannung bei einer oder mehreren Zellen eine LED als Sammelanzeige leuchten. In gleicher Form wird eine LED für die Anzeige einer Zellenunterspannung ausgeführt.

3.5 Sicherheitseinrichtungen

Die Ergänzung von Sicherheitseinrichtungen hat sicher zu stellen, dass keine Überspannungen an einzelnen Zellen bzw. dem Akkumulatoren auftreten können. Weiters umfasst dieser Systemteil die Absicherung eines Kurzschlusses an der Versorgungsseite. Tritt ein Kurzschluss in der Leistungsverkabelung auf, so ist die Batterie über eine entsprechende Sicherung abzutrennen. Diese Abtrennung gilt aber nur für den Bereich zwischen Akkumulator und PV-Anlage. Der Kurzschlussschutz zwischen Akkumulator und Last bzw. dem Wechselrichter liegt nicht im Bereich der gegenständlichen Arbeit.

4 Ausführung

4.1 Pflichtenheft

In diesem Kapitel wird nun die Ausführung der Gesamteinheit, separiert auf die einzelnen Systemteile beschrieben. Dieses Kapitel in Verbindung mit Anhang A (Pläne und Bauteillisten) und B (Bauteil-Datenblätter) stellt gleichzeitig die Dokumentation für die Gesamteinheit dar.

4.2 Anzeigeeinrichtungen

Für die Ausführung der Anzeigeeinrichtungen wurden sieben LEDs verbaut, welche folgende Anzeigen darstellen:

- Akkuladung
- Akku voll
- Unterspannung
- Überspannung
- Balancing Zelle 1
- Balancing Zelle 2
- Balancing Zelle 3

Weiters wurden zwei LCD-Panels eingebaut, welche die aktuelle Batteriespannung, sowie den Ladestrom anzeigen.

Abbildung 26 zeigt die fertige Ansicht des Gehäuses mit den Anzeige-LEDs.

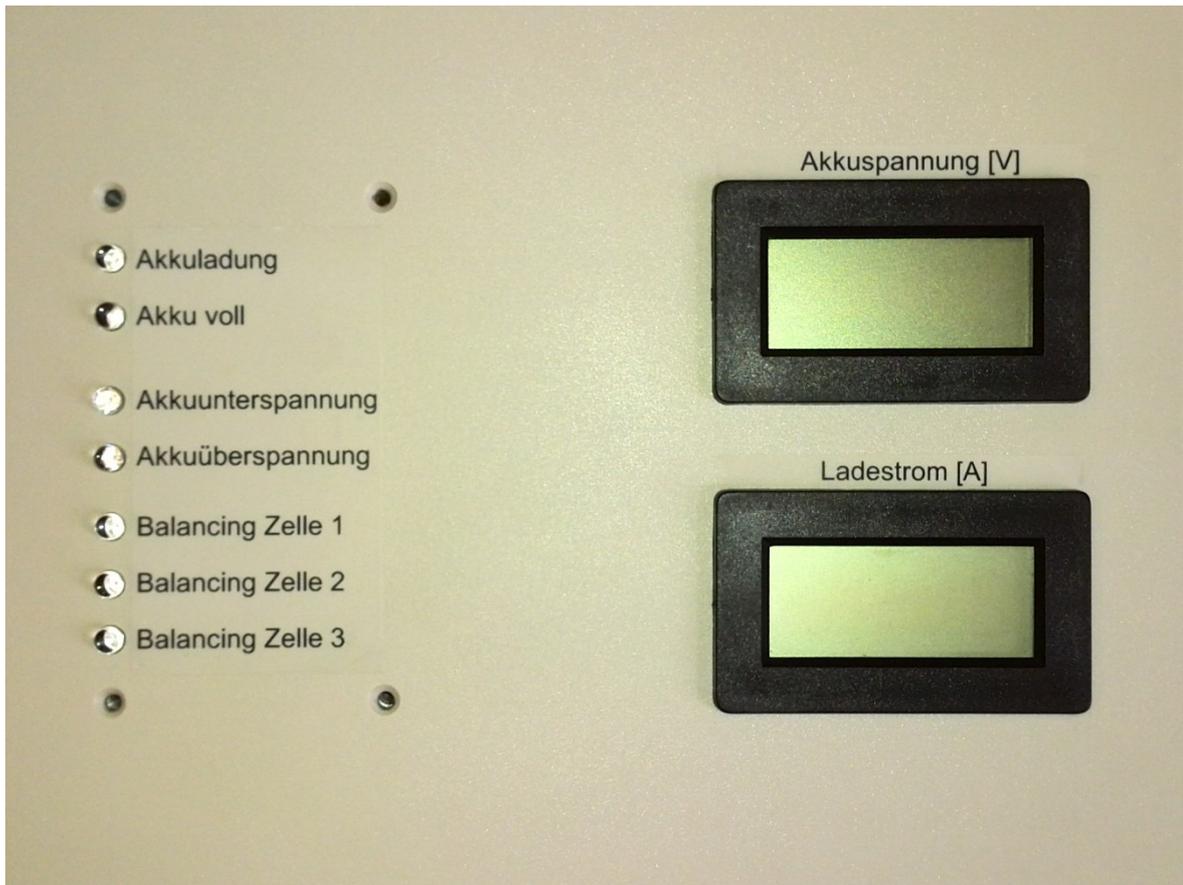


Abbildung 26: Frontansicht des Gehäuses mit Anzeigeeinrichtungen

Die obersten beiden LEDs geben die Statusanzeige des Ladereglers wieder. Hierbei handelt es sich um die Elemente LED101 (Akkuladung) und LED 102 (Akku voll). Die Schaltung zur jeweiligen Ansteuerung der LED ist im Kapitel 4.3 erklärt.

Die nächsten beiden LEDs stellen die Unter- bzw. Überspannungsanzeige dar. Weist eine oder mehrere der Zellen eine Unterspannung ($U_{\text{Zelle}} < 3,3\text{V}$) bzw. Überspannung ($U_{\text{Zelle}} > 4,1\text{V}$) auf, wird dies über die jeweilige Leuchtdiode angezeigt. Die Bezeichnung im Stromlaufplan lautet LED207 (Unterspannung) bzw. LED205 (Überspannung).

Die verbleibenden drei LEDs stellen die Anzeige dar, ob ein Balancing-Vorgang an einer der Zellen stattfindet. Die Bezeichnung der LEDs lautet LED201 (Zelle 1), LED202 (Zelle 2) und LED203 (Zelle 3).

Die Abgangskontakte der LEDs von der Laderegler- und Balancer-Platine zur Anzeigeplatine sind in Tabelle 2 aufgeführt. Die Versorgung der LEDs erfolgt über Steckanschlüsse mit Verdrahtung auf die Platine von Laderegler und Balancer.

Tabelle 2: Anzeigen Laderegler – Kontaktbezeichnungen und Funktion

LED-Bezeichnung	Anschlusskontakte		Anzeige
LED101	X1.5 (LED101-1)	X1.6 (LED101-2)	Akkuladung
LED102	X1.6 (LED102-1)	X1.7 (LED102-2)	Akku voll
LED205	X2.18 (LED205-1)	X2.19 (LED205-2)	Akkuunterspannung
LED207	X2.20 (LED207-1)	X2.21 (LED207-2)	Akkuüberspannung
LED201	X2.22 (LED201-1)	X2.23 (LED201-2)	Balancing Zelle 1
LED202	X2.24 (LED202-1)	X2.25 (LED202-2)	Balancing Zelle 2
LED203	X2.26 (LED203-1)	X2.27 (LED203-2)	Balancing Zelle 3

Weiters wurden zwei Digitalvoltmeter eingebaut, um die Batteriespannung und den Ladestrom anzuzeigen. Für die Batteriespannung ist hierbei das Gerät DVM31 zuständig. Da die zu messende Spannung auch über dem Thyristor T31 anliegt, wird sie aus Gründen der Einfachheit auch dort abgegriffen. Entsprechend dem Datenblatt darf am Messeingang des LCD-Panels eine maximal zu messende Spannung von 200mV anliegen. Somit wurde festgelegt, dass bei einer Batteriespannung von 10V eine Messeingangsspannung von 100mV vorliegen sollte. Dementsprechend wurde ein Differenzverstärker (IC301/4) mit einem Verstärkungsfaktor von 0,01 entsprechend einem Abschwächungsverhältnis von 100:1 ausgelegt. Der Messabgriff erfolgt an den Klemmen X3.6 (+U_{Batt}) bzw. X3.7 (-U_{Batt}).

Zur Messung des Ladestromes am Digital Voltmeter DVM32 wurde ein Shunt eingesetzt. Hierzu wurden vier parallel geschaltete Messwiderstände (R336, R337, R338, R339) mit jeweils 10mΩ in die Leitung eingebaut. Der Spannungsabfall am Gesamtwiderstand von ca. 2,5mΩ ist direkt proportional zum fließenden Strom. Aufgrund der Beschaltung des Differenzverstärkers mit den Widerständen R327, R328, R330 und R331 wird ein Verstärkungsfaktor von ca. 4 erreicht. Das somit aufbereitete Messsignal war nach dem Differenzverstärker mit einem geringen Offset behaftet. Um diesen zu kompensieren, wurden die nachgeschalteten Widerstände R329, R332, R333, R334, R335 hinzugefügt.

Diese sorgen für die Stabilisierung des Messsignals gegenüber dem com-Eingang des Digital Voltmeter und der Offsetkompensation (siehe Datenblatt im Anhang C).

Die Spannungsversorgung für die LCD-Displays ist mit dem Bauteil IC33 - ein TL431 (programmierbare Referenzspannung) umgesetzt. Dieses stellt an der Basis des Transistors T34 eine konstante Spannung zur Verfügung, woraus sich am Emitter eine um etwa 0,6V niedrigere Spannung ergibt, welche die LCD-Anzeige korrekt versorgt. Die Stromverstärkung des Transistors sorgt für Bereitstellung ausreichender Leistung zum Betrieb der Anzeigeeinheiten DVM31 und DVM32.

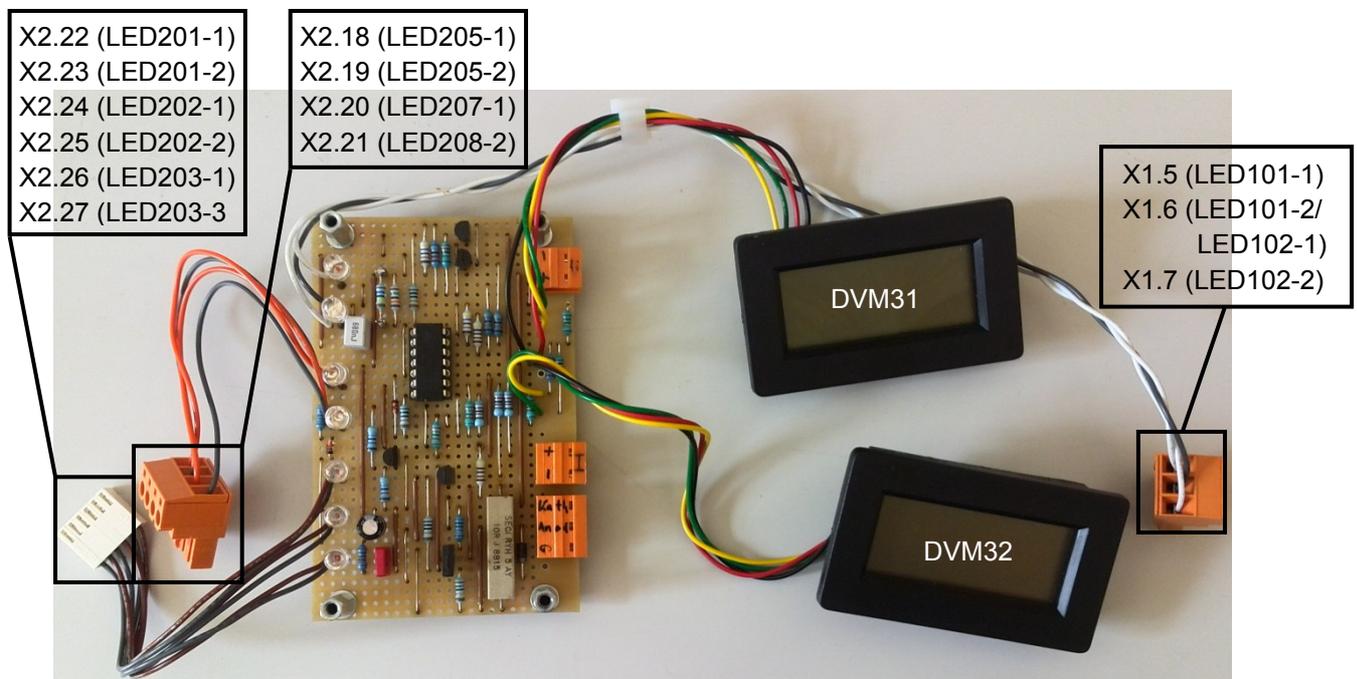


Abbildung 27: Platine Anzeige und Ansteuerung Thyristor - Bestückungsseite

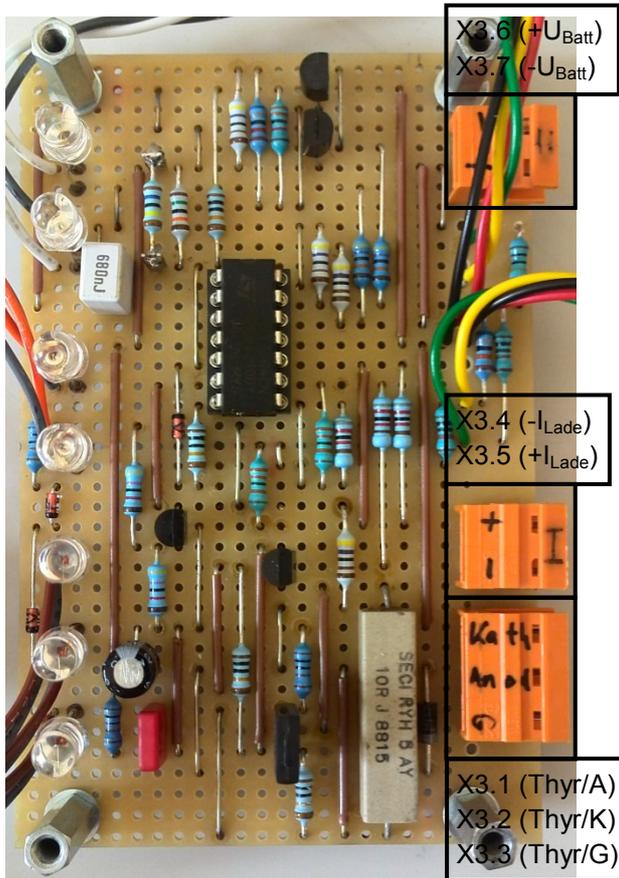


Abbildung 28: Platine Anzeige und Ansteuerung Thyristor - Bestückungsseite

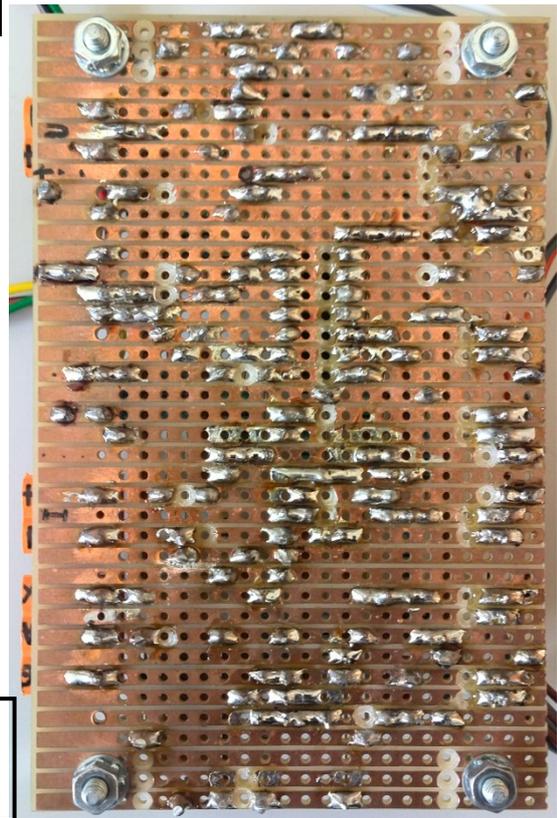


Abbildung 29: Platine Anzeige und Ansteuerung Thyristor - Layoutseite

4.3 Laderegler

Ein bestehender Laderegler, der im Zuge einer Projektarbeit vom Autor gefertigt wurde, stellt die Basis für den Laderegler des Gesamtsystems dar. Der Plan für diesen Laderegler-Prototyp ist Anhang A – Plannummer S0 zu entnehmen. Diese Ladeeinheit wurde auf eine passende Platine realisiert und stellte sich nach der Funktionsprüfung in dieser Form dar (Abbildung 30, Abbildung 31).

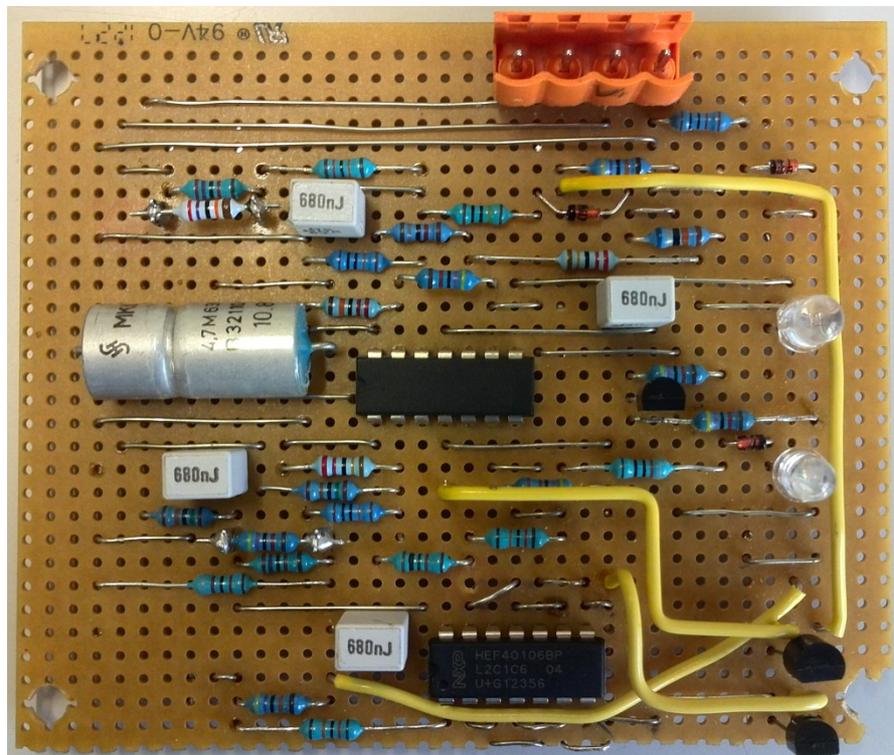


Abbildung 30: Prototyp der Ladereglerplatine - Bestückungsseite

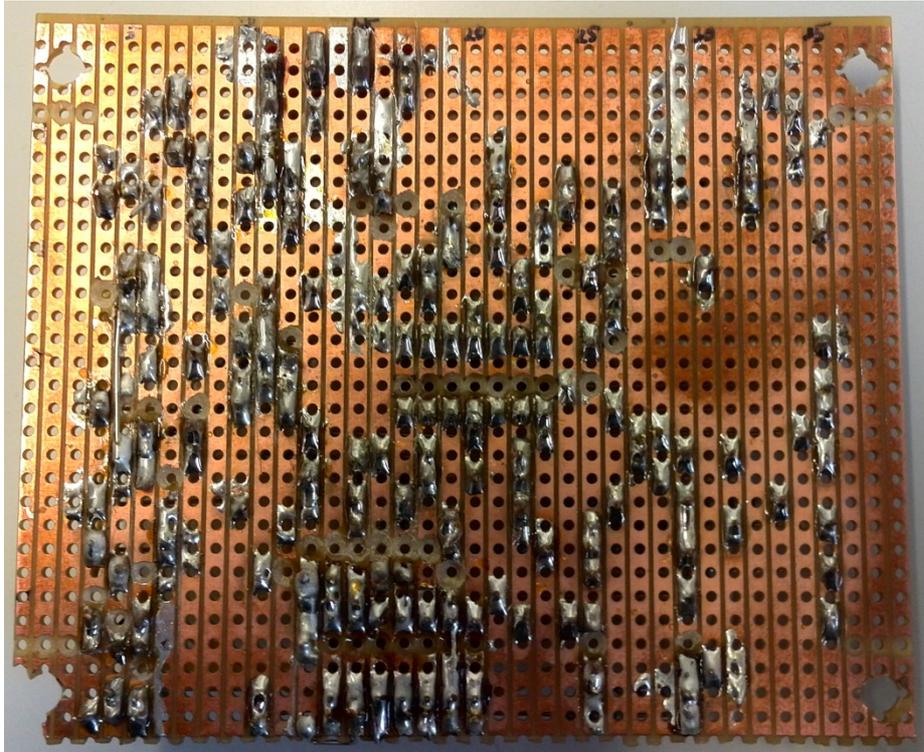


Abbildung 31: Prototyp der Ladereglerplatine – Layoutseite

Die fertige Platine wurde schließlich in ein passendes Gehäuse eingebaut. Mit entsprechenden Anschlüssen für PV-Modul und Batterie ergaben sich folgende Bilder (Abbildung 32, Abbildung 33, Abbildung 34).

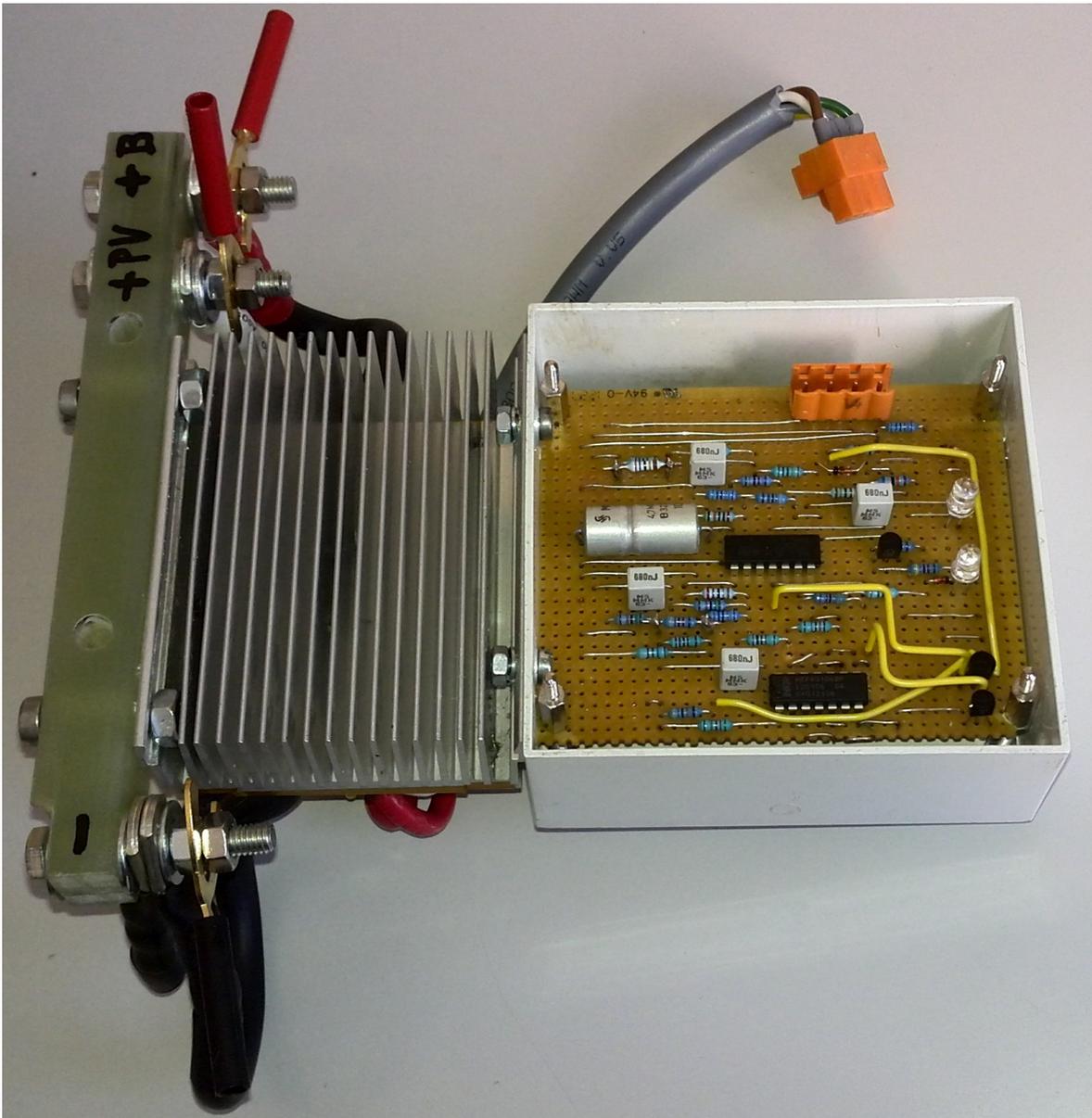


Abbildung 32: Prototyp der Ladereglers – Platine eingebaut im Gehäuse



Abbildung 33: Prototyp des Laderegler - Vorderseite

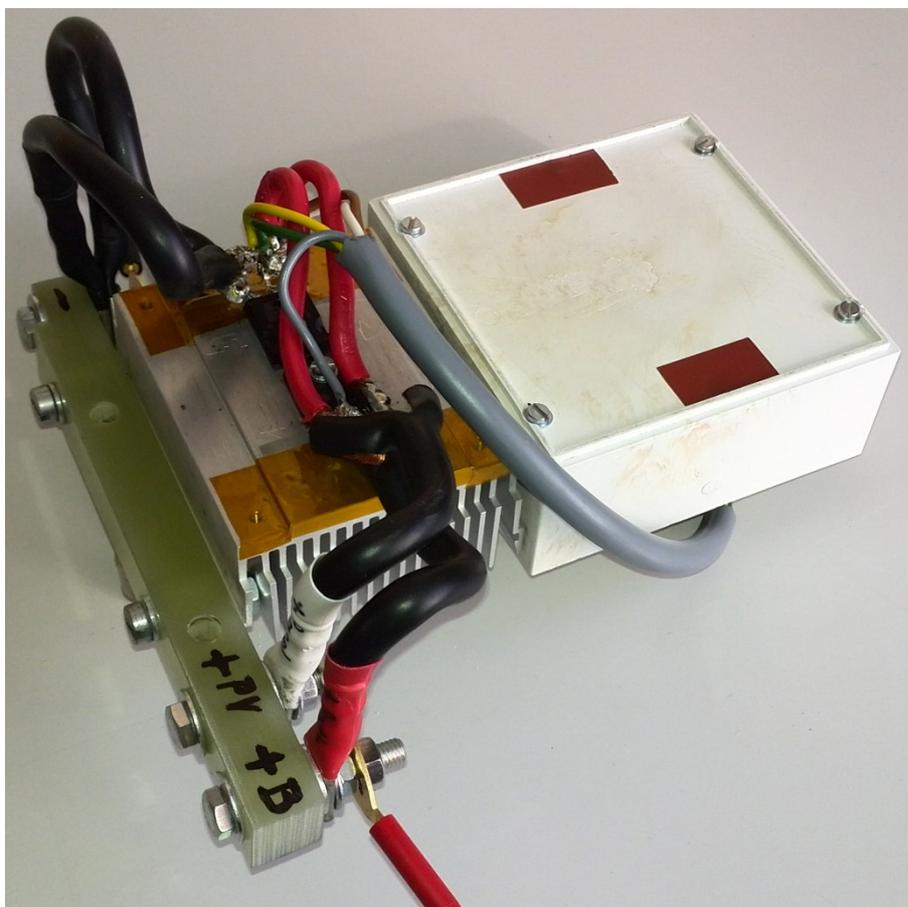


Abbildung 34: Prototyp des Laderegler – Rückseite

Im Folgenden wird nun die Schaltung des Ladereglers, welcher in Kombination mit dem Balancer eingesetzt wird, erklärt. Der Aufbau des Laderegler-Einzelgerätes ist bis auf zwei Baugruppen ident. Welche Unterschiede bestehen, wird später im Detail diskutiert. Der Stromlaufplan ist dem Anhang A – Plannummer S1 zu entnehmen.

Zunächst erfolgt ein Vergleich der Spannung, welche vom Photovoltaik-Modul zur Verfügung steht und der Batteriespannung. Hierzu kommt der Differenzverstärker IC11/1 zum Einsatz. Um das Ergebnis des Vergleiches in ein Digitalsignal umwandeln zu können und somit eine LED zum Leuchten zu bringen, ist dem Verstärker ein Schmitt-Trigger (IC11/4) nachgeschaltet. Ist die PV-Spannung um einen durch Widerstandsbeschaltung definierten Wert höher als die Batteriespannung, steht am Schmitt-Trigger ein High-Signal am Ausgang zur Verfügung. Sinkt die PV-Spannung unter die Batteriespannung, liegt dementsprechend ein Low-Signal an.

Gleichzeitig wird überprüft, ob die Ladeschlussspannung des Akkumulators erreicht ist. Hierzu ist es notwendig, dass eine konstante Spannung zur Verfügung steht. Dies wird erreicht mit dem Bauteil IC12 – einem TL431, welches mit den Widerständen R118 und R119 extern beschalten wird, dass eine Spannung von rund 5V an der Kathode von IC12 zur Verfügung steht. Wiederum erfolgt der Einsatz eines Differenzverstärkers (IC11/2). Der Ausgang des Differenzverstärkers wird wiederum auf einen Schmitt-Trigger (IC11/3) geführt. Die Beschaltung der OPVs und Widerstände führt dazu, dass bei einer Batteriespannung ab ca. 12,3V (Batterie vollgeladen) der Ausgang des Schmitt-Triggers IC11/3 von High auf Low schaltet.

Zwischen den Ausgängen der Schmitt-Trigger IC11/4 und IC11/3 befindet sich LED101. Ist der Ausgang von IC11/4 auf High und der Ausgang von IC11/3 auf Low, wird diese orange LED durch diese richtig gepolte Spannungsdifferenz von Strom durchflossen, leuchtet und zeigt somit den Ladevorgang an. Zwischen dem Ausgang von IC11/3 und dem Massepotential befindet sich wiederum LED102. Ist der Akkumulator vollgeladen und der Ausgang IC11/3 dementsprechend auf High, leuchtet die grüne LED102.

Dem Ausgang von IC11/3 ist ein Zeitglied, bestehend aus R111 und C15 nachgeschaltet. Dessen Ausgang führt über den Widerstand R124 auf die

Kombination von drei Schmitt-Triggern (IC13/1-3). Diese Anordnung wurde gewählt, um ein eindeutiges Schaltsignal auf den Eingang des Gate-Treibers, bestehend aus T12 und T13 zu leiten. Der Gate-Treiber steuert dementsprechend den MOSFET T11 an, welcher das PV-Modul kurzschließt.

Beim Versuchsaufbau mit einem Li-Ionen-Akku stellte sich heraus, dass die Schalthysterese des Schmitt-Triggers, welcher für die Ansteuerung der orangen LED zuständig ist, ein Problem bei der Endladung ergab. Durch die angelegte Spannung aus dem Panel (simuliert durch ein Netzgerät) wurde die Spannung des Akkumulators auf ein höheres Niveau gehoben (bei einem Ladestrom $I_{Lade}=1,50A \rightarrow \Delta U_{Batt}=0,23V$ bzw. bei $I_{Lade}=4,72A \rightarrow \Delta U_{Batt}=0,07V$). Sobald nun die Batteriespannung den Schwellwert für die Ansteuerung des MOSFETs (T11) für den Kurzschluss des PV-Moduls erreichte, führte dies zum Versiegen des Ladestromes und somit wiederum zum Abfall der Batteriespannung unter den Schwellwert. Es ergab sich somit ein Pendeln zwischen Ansteuerung und Nichtansteuerung des Kurzschluss-MOSFETs. Optisch war dies zu erkennen, in dem die orange und die grüne LED abwechselnd aufleuchteten.

Behoben wurde dieses unerwünschte Verhalten durch Hinzufügen einer Hilfsbeschaltung (R126, R127, R128, D104), welche dazu führen sollte, dass beim Anliegen des Steuersignals am Kurzschluss-MOSFET eine höhere Batteriespannung am Vergleichs-IC IC11/2 vorgetäuscht wird. Diese zusätzliche Beschaltung stellt den ersten Unterschied zum Laderegler-Prototyp dar.

Die zweite Ergänzung betrifft eine Sicherheitseinrichtung. Wird vom Balancer eine Überspannung an einer der Zellen detektiert, liegt am Kontakt X1.8 ein Low-Signal an. Dies führt über die Widerstände R125 und R129 zur Ansteuerung des Transistors T14, welcher den Eingang des Schmitt-Triggers IC13/1 auf High setzt. Hiermit erfolgt schlussendlich der Kurzschluss des PV-Moduls und die Batterieladung wird unterbunden, auch wenn die Summenspannung noch nicht den Abschaltwert erreicht hat.

X1.1 (+UBatt)	X1.5 (LED101-1)	X2.22 (Thyr/A)
X1.2 (-UBatt)	X1.6 (LED101-2/ LED102-1)	X2.23 (Thyr/K)
X1.3 (T11/D)	X1.7 (LED102-2)	
X1.4 (T11/G)		

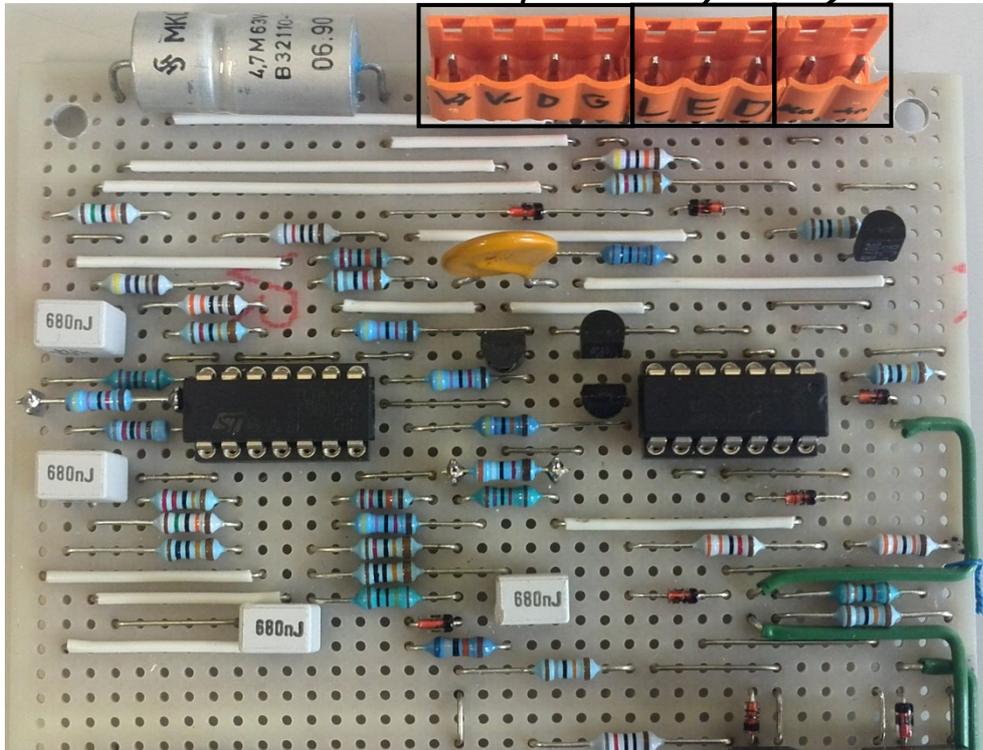


Abbildung 35: Laderegler Bestückungsseite

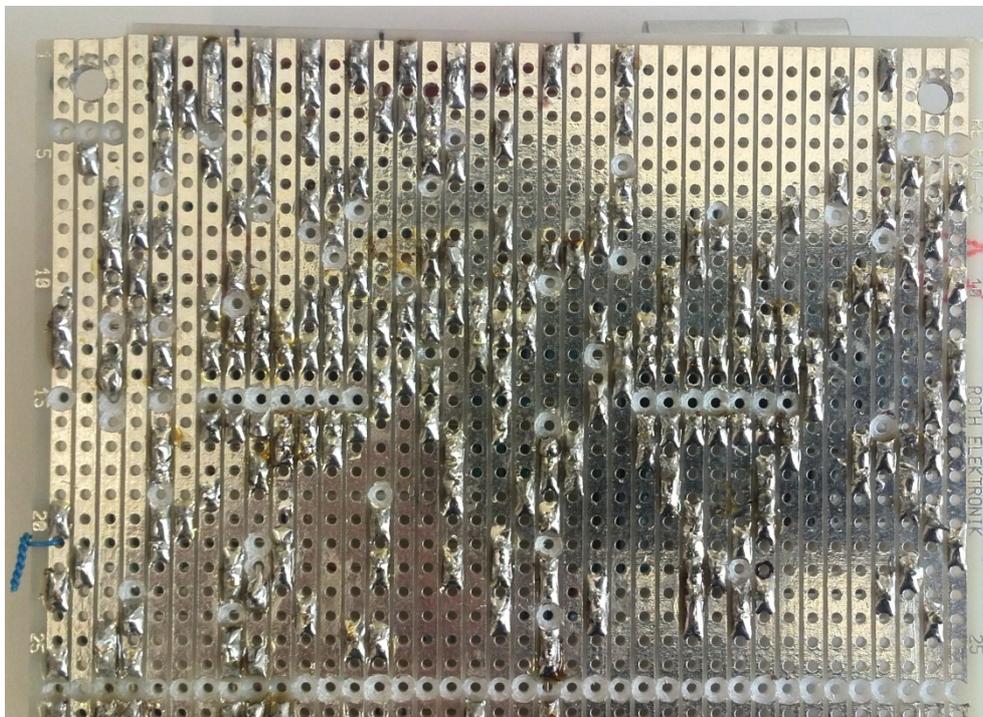


Abbildung 36: Laderegler Layoutseite

4.4 Balancer

Dem Anhang A – Plannummer S2 ist der Stromlaufplan des Balancers zu entnehmen, dessen Elemente nun im Detail erklärt werden.

Der Balancer greift über vier Kontakte (X2.1, X2.2, X2.3, X2.4) die Plus- bzw. Minuspole der drei Batteriezellen ab. Der verbundene Minuspol von Zelle 2 und Pluspol von Zelle 3 wird als interne Masse definiert (Bezugspotential Null). Um die Spannung von Zelle 1 gegen Masse zu erhalten, wird der Differenzverstärker IC21/4 mit einer Verstärkung von 1 eingesetzt. Dieses Zellenpotential steht am Punkt x zur Verfügung. Weiters wird der Verstärker IC22/3 benötigt, um die Zellspannung für eine weitere Verwendung aufzubereiten. Hierzu wird ein invertierender Verstärker eingesetzt. Dieser invertiert die Spannung von Zelle 3 gegenüber dem Massepotential. Somit stehen an den Punkten x, y und z die jeweilige Zellspannung als positiver Wert gegenüber dem Massepotential zur Verfügung. Über die Widerstände R207, R208 und R209 werden diese Potentiale an den Summierverstärker IC23/3 übertragen. Dieser Verstärker bildet eine Summe aus den drei Eingängen und stellt über die Widerstände R210 und R211 am Ausgang eine Spannung zur Verfügung, die ungefähr dem halben, invertierten Mittelwert der Eingänge entspricht. Dieses Potential wird am Schmitt-Trigger IC21/3 mit der halben Spannung von Zelle 1 verglichen. Liegt die halbe Zellspannung hierbei über dem Wert des halben Mittelwertes, schaltet der Schmitt-Trigger den Ausgang von High auf Low. Hierdurch kommt es zum Stromfluss durch LED201 und die LED des Optokoppler IC25, welcher sich auf dem Balancer-Leistungsteil befindet. Dies führt zum Balancen von Zelle 1. Eine nähere Erklärung ist der Beschreibung des Balancer-Leistungsteils zu entnehmen. Der Funktion von IC21/3 entsprechend sind die Schmitt-Trigger 23/4 für Zelle 2 und IC22/4 für Zelle 3 ausgeführt.

Weiters ist eine Überspannungsdetektion auf der Balancer-Platine untergebracht. Hierbei wird überprüft, ob eine der Batteriezellen eine unzulässige Überspannung ($U_{\text{Zelle}} > 4,1\text{V}$) aufweist. Die Ladeschlussspannung einer Lithium-Ionen-Zelle liegt bei 4,2V. Der Schwellwert von 4,1V wurde jedoch gewählt, um eine geringere Belastung der Zellen sicherzustellen und somit eine höhere Zyklenzahl

ermöglichen zu können. Um den Vergleich einer Zellspannung mit einem konstanten Spannungswert vornehmen zu können, ist es wiederum notwendig eine konstante Spannungsquelle zur Verfügung zu haben. Dies wird mit Bauteil IC24 – einem TL431 erreicht. Die im Plan S3 abgebildete Beschaltung von IC24 stellt eine konstante Spannung (ca. -2,5V) an der Anode zur Verfügung. Mittels Schmitt-Trigger IC21/1 erfolgt die Überprüfung, ob die Spannung der Zelle 1 über dem zulässigen Wert liegt. Ist dies der Fall, steuert der Ausgang des Schmitt-Triggers von High auf Low. Dies führt zum Leuchten der LED205. Über den Jumper J21 wird gleichzeitig der Ausgang von IC21/3 auf Low gesetzt. Somit ist sichergestellt, dass automatisch mit der Feststellung einer Überspannung die Zelle balanciert wird. Entsprechend der Ausführung von IC21/2 für Zelle 1, sind IC 23/1 für Zelle 2 und IC22/2 für Zelle 3 beschalten.

Zusätzlich zur Überspannung sollte auch die Unterspannung einer Zelle angezeigt werden, um so einer Tiefentladung entgegenwirken zu können. Analog zum Vorgehen der Überspannungsüberwachung wurde wiederum die Zellspannung mit der konstanten Spannung (-2,5V) verglichen. Bei Unterschreiten der Mindestspannung ($U_{\text{Zelle}} > 3,3\text{V}$) schaltet der Ausgang des jeweiligen Schmitt-Trigger (IC21/2, IC 23/2 oder IC22/1) von Low auf High. Aufgrund dessen leuchtet LED207. Für LED206 wurden auf der Platine Steckkontakte ausgeführt, um diese zu Wartungs- oder Reparaturzwecken einsetzen zu können. Um jedoch Energie zu sparen ist diese im Normalbetrieb nicht montiert. Gleiches gilt für LED204, welche eine Zellenüberspannung anzeigen soll.

Die weiteren Elemente (T21, T22, IC13/4-IC13/6, R277-R281, D210, D214-D216), die dem Stromlaufplan für den Balancer zu entnehmen sind, werden im Kapitel 4.5 erklärt. Die folgenden Abbildungen zeigen Bestückungs- und Layoutseite der Balancer-Platine.

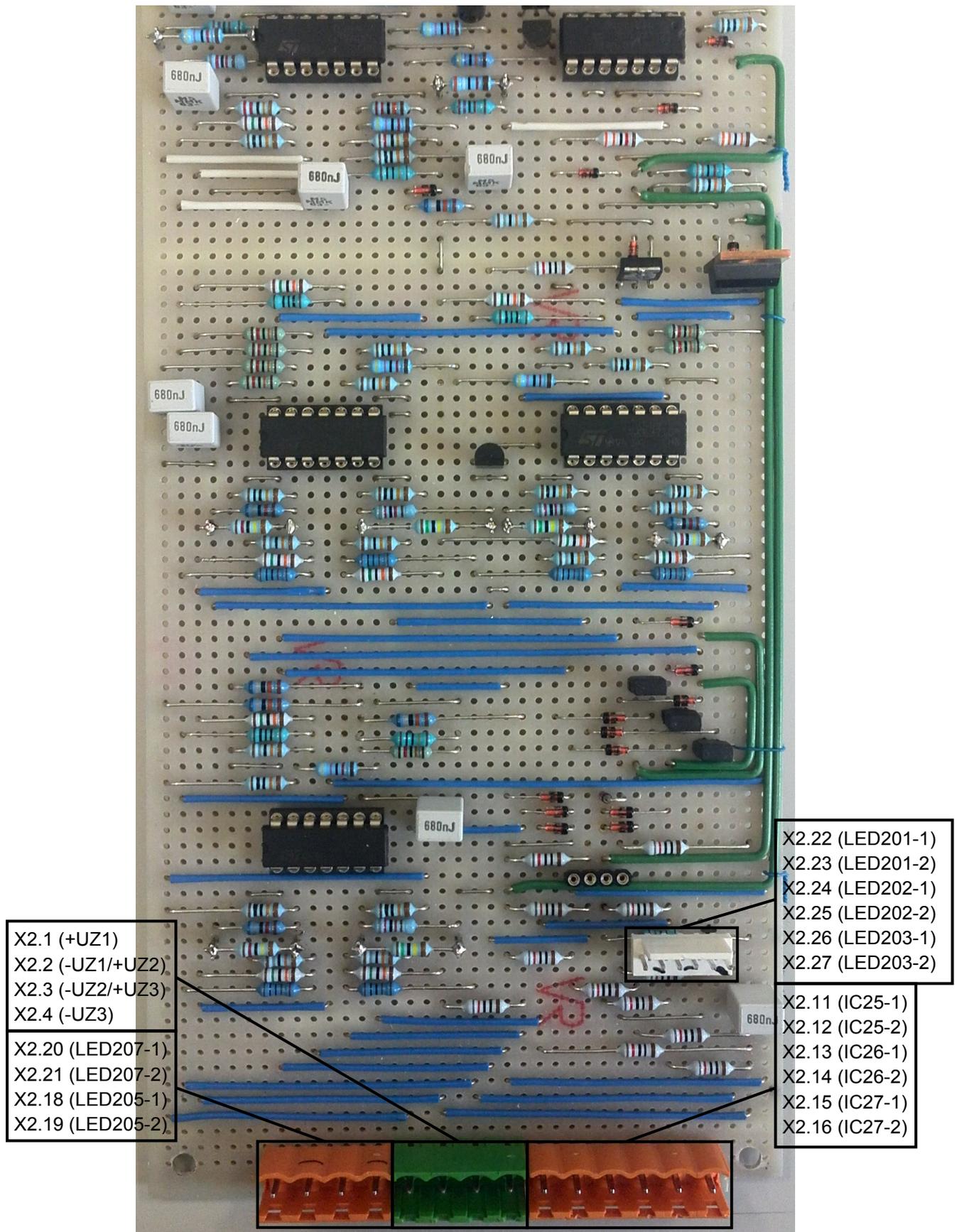


Abbildung 37: Balancer Bestückungsseite

Zum Balancer gehört zusätzlich noch das Leistungsteil, welches überschüssige Energie an Widerständen in Wärme umsetzt. Der Stromlaufplan ist dem Anhang A – Plannummer S2.1 zu entnehmen. Die funktionelle Beschreibung ist im Folgenden aufgeführt.

Die grundsätzliche Funktion des Leistungsteils ist es, einen Widerstand an eine Zelle mit höherer Spannung zuzuschalten, damit beim Ladevorgang überschüssige Energie für die Ladung dieser Zelle in Wärme umgesetzt wird. Die restlichen Zellen werden weiterhin geladen, bis der Ladungsunterschied ausgeglichen ist. Selbiges gilt bei der Entladung. Wird eine Zelle schneller entladen als die beiden anderen Zellen, schaltet sich jeweils ein Widerstand zu den Zellen mit höherer Spannung parallel, um so das Spannungsniveau für alle Zellen auf den gleichen Wert zu bringen.

Wie in Kapitel 4.2 angeführt, wird das Balancieren über Leuchtdioden (LED201, LED202, LED203) angezeigt. Seriell zu diesen Leuchtanzeigen sind Optokoppler-LEDs (IC25, IC26, IC27) zugeschaltet, welche sich direkt auf der Platine des Leistungsteils befinden. Anhand dieser Optokoppler wird das Schaltsignal von der Balancer-Platine auf den Leistungsteil übertragen.

Als Schalter für die Zuschaltung der Balancierwiderstände wurden MOSFETs (T23, T24, T25) gewählt. Diese benötigen laut Datenblatt (siehe Anhang B) als Schaltsignal eine Gate-Source-Spannung von mindestens 3V, jedoch ist es sinnvoll eine Steuerspannung von mindestens 5V anzulegen, um ein sicheres Durchschalten zu gewährleisten. [20] Für die Ansteuerung von T24 und T25 ist dies unproblematisch, da Gate-Source-Spannungen von mindestens 5,9V ($3,3V+3,3V-0,7V$) am MOSFET T24 bzw. 8,9V ($3,3V+3,3V+3,3V-0,7V$) am MOSFET T25 zu erwarten sind. Da vom Pluspol der Gesamtbatterie zum Source-Kontakt von T23 jedoch maximal 4,1V anliegen können, ist es erforderlich die Gate-Source-Spannung mit einer Hilfsschaltung zu erhöhen.

Zunächst werden jedoch noch die Beschaltungen für die Zellen 2 und 3 erklärt. Durch Ansteuerung des Optokopplers IC26 fließt ein Basisstrom in den Transistor T26, welcher somit die am Kollektor anliegende Spannung durchschaltet und ein Steuersignal am MOSFET bereitstellt. Der zu Basis und Source parallel anliegende Widerstand R289 sorgt für die Ableitung von kapazitiven Ladungen. Die wiederum parallel geschaltete Leuchtdiode LED209 zeigt einen Balancing-

Vorgang optisch auf der Platine des Leistungsteils an. Äquivalent dazu läuft ein Balancing-Vorgang an Zelle 3 ab.

Das Ansteuersignal für das Balancing der Zelle 1 wird ebenfalls mittels Optokoppler (IC25) bereitgestellt. Der Emitter von IC25 ist über den Widerstand R296 auf den Betätigungseingang („Enable“) von IC28 geschaltet und aktiviert diesen bei Anliegen eines Balancing-Signals. Die Energieversorgung für IC28 wird über den Transistor T29 zugeschaltet, welcher ebenfalls von T28 angesteuert wird. Die Funktion von IC28 ist, wie in Kapitel 2.4.1.3 beschrieben, das Erhöhen einer Eingangsspannung auf einen einstellbaren Wert. Die Auslegung der Bauteile (Spule, Diode, Widerstände) erfolgte entsprechend dem Datenblatt. Mit den Widerständen R286 und R287 wird die Ausgangsspannung eingestellt. Die hierzu verwendende Formel aus dem Datenblatt lautet wie folgt. [21]

$$U_A = U_{in} \cdot \left(1 + \frac{R_{286}}{R_{287}} \right) \quad (11)$$

Dementsprechend ergibt sich bei einer gewünschten Ausgangsspannung von $U_A \approx 8,5V$ und der Verwendung eines 100k-Widerstandes für R287 ein Widerstandswert $R_{286} \approx 560k\Omega$. Der Kondensator C26 hat die Aufgabe, die hochgesetzte Spannung zu glätten und eine möglichst gleichmäßige Gleichspannung abzugeben. Die 13V-Zenerdiode D218 hat eine Sicherheitsfunktion, falls die Ausgangsspannung des Hochsetzstellers auf über 13V steigt, wird die gegenständliche Diode leitend und begrenzt das Spannungspotential am Gate auf ca. 13V. Die folgende Beschaltung, bestehend aus R288, R293 und LED208, entspricht dem der beiden anderen Zellen. Der Aufbau der Platine für das Balancer-Leistungsteil ist den folgenden beiden Abbildungen zu entnehmen.

Zu Testzwecken des Gesamtgerätes (Laderegler, Balancer, Sicherheits- und Anzeigeeinrichtungen) wurde eine Vorrichtung konstruiert, auf der die 0,3Ω-Balancierwiderstände, die MOSFETs zur Inbetriebnahme der Balancierwiderstände und die Platine des Balancer-Leistungsteils montiert sind.

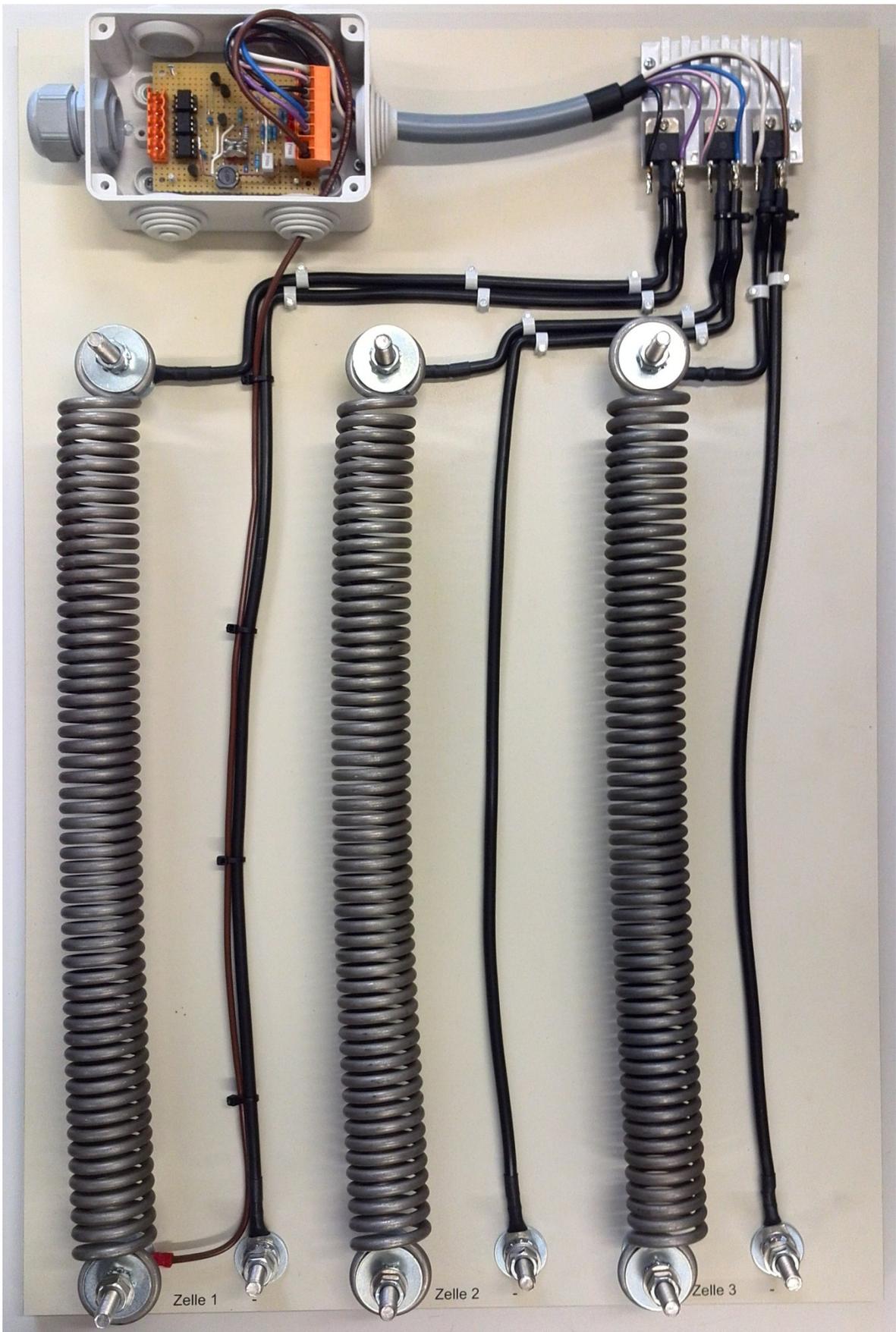


Abbildung 39: Balancer-Leistungsteil, MOSFETs und Balancierwiderständen

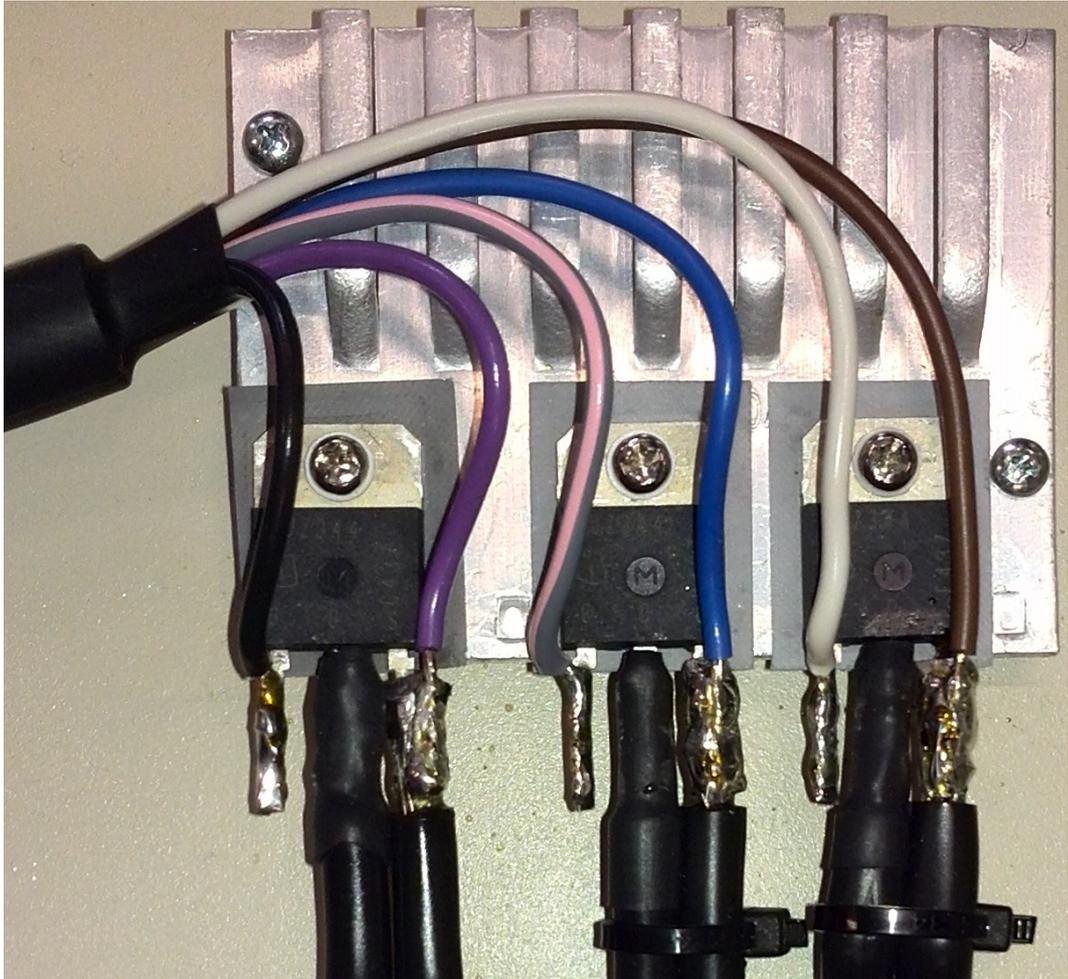


Abbildung 40: MOSFETs am Balancer-Leistungsteil



Abbildung 41: Platine des Balancer-Leistungsteils

4.5 Sicherheitseinrichtungen

Einen wesentlichen Bestandteil bei der gegenständlichen Arbeit stellte die Wahrung der Sicherheit für das Umfeld und den Betrieb dar. Die Verwendung von Lithium-Ionen-Akkumulatoren setzt die strikte Überwachung der Zellen auf Überladung voraus, um so gefährliche Situationen zu vermeiden. Grundsätzlich sollte es nicht zu solchen Systemzuständen kommen, da der Laderegler bei einer Batteriespannung von 12,3V und den daraus folgenden Zellspannungen von 4,1V das Laden beendet. Das Auftreten von unbekanntem Fehlern kann dies jedoch beeinträchtigen. Aus diesem Grund wurden gleich mehrere Vorrichtungen eingebaut, um solche Risiken zu vermeiden.

Die erste Maßnahme stellt hierbei der Kurzschluss des PV-Moduls dar. Wird auf der Balancer-Platine Überspannung an mindestens einer Zelle detektiert (die Ausgänge der OPVs IC21/1, IC23/1 oder IC22/2 gehen dabei auf Low), wird am Laderegler der Transistor T14 angesteuert, welcher wiederum über die Schmitt-Trigger (IC13/1, IC13/2 und IC13/3) und die Transistoren T12 und T13 den Kurzschluss-MOSFET T11 betätigt. Eine weitere Ladung wird somit verhindert und über den Balancierwiderstand die jeweilige Zellenüberspannung abgebaut.

Eine weitere Sicherheitsmaßnahme ist beim Balancer integriert und wurde bereits in Kapitel 4.4 erklärt. Hierbei werden die Ausgänge der die Überspannung detektierenden OPVs (IC21/1, IC23/1 oder IC22/2) auf die jeweiligen Ausgänge der Balancer-Schmitt-Trigger (IC21/3, IC23/4 oder IC22/4) zurückgeführt. Eine Überspannung an einer Batteriezelle führt somit zum Balancieren der jeweiligen Zelle.

Sollten sämtliche oben angeführte Vorrichtungen versagen, wird als letzte Schutzmaßnahme ein kontrollierter Kurzschluss der Batterie erzeugt, welcher die Sicherung F1 auslöst und den Akkumulator von der Versorgungseinheit trennt. Verwendet wird hierzu ein Leistungsthyristor der Firma AEG. Ein Stromlaufplan mit der Ansteuerung des Thyristors ist Anhang A – Plannummer S3 zu entnehmen, eine eingehende Beschreibung ist im folgenden Absatz abgefasst.

Die Spannungsversorgung wird zunächst über die Diode D301 geführt, um so Gefahr durch Verpolung auszuschließen. Da die die aktuelle Batteriespannung mit einem konstanten Wert zu vergleichen ist, wird wiederum Bauteil TL431 als Referenzspannung eingesetzt. Die Beschaltung von IC32 mit den Widerständen R304, R305 und R306 ergibt eine an der Kathode abgreifbare Spannung von ungefähr 5V. Über die Widerstände R301, R302 und R303 wird die Batteriespannung so geteilt, dass ein sinnvoller Vergleich mit der Referenzspannung möglich ist. Dementsprechend sind die Spannungen auf die Eingänge des Schmitt-Triggers IC31/2 geführt, welcher so eingestellt ist, dass bei einer Batteriespannung von 12,6V der Ausgang von Low auf High wechselt und über den Widerstand R309 und die Dioden D303, D304 die Darlington-Einheit (T32 und T33) ansteuert. Dadurch fließt über den Leistungswiderstand R314 ein Strom von ca. 1A ins Gate des Thyristors und zündet diesen somit. Der leitende Thyristor führt zu einem Kurzschluss der Batterie. Der auftretende Kurzschlussstrom löst die Sicherung F1 aus, die ein Abschaltvermögen von mehreren zehn Kiloampere hat. Die Batterie ist somit sicher von der Versorgungsseite getrennt. Die Bauteile für die Ansteuerung des Thyristors sind gemeinsam mit den Anzeigevorrichtungen auf eine Platine montiert. Abbildung 28 und Abbildung 29 zeigen die Bestückungs- und Layoutseite der gefertigten Platine.

Um zu überprüfen, ob der Thyristor angeschlossen ist, wurde eine weitere Beschaltung am Balancer vorgenommen. Über den Kontakt X2.22 wird die Anode auf den Widerstand R277 und über X2.23 die Kathode auf R279 verbunden. Durch die vorhandene Beschaltung der Widerstände R279, R280, R281 und Dioden D215, D216 liegt am Schmitt-Trigger IC13/5 ein Low-Signal am Eingang an. Dieses führt zu einem High-Signal am MOSFET T22 bzw. über den Schmitt-Trigger IC13/4 zu einem Low-Signal am MOSFET T21. Dementsprechend stellen beide MOSFETs einen nicht geschlossenen Schalter dar. Ist jedoch einer der beiden Kontakte vom Thyristor nicht angeschlossen, werden letztgenannte MOSFETs leitend und entsprechend dem Stromlaufplan leuchten sowohl Unter- als auch die Überspannungsanzeige und vermitteln dem Bediener so eine nicht funktionsfähige Schutzeinrichtung.

Folgende Abbildung zeigt die Rückseite des gesamten Gerätes, mit der Leistungsdiode und dem Kurzschluss-MOSFET des Ladereglers, den Messwiderständen der Ladestromanzeige und dem Kurzschlussthyristor als Sicherheitseinrichtung.

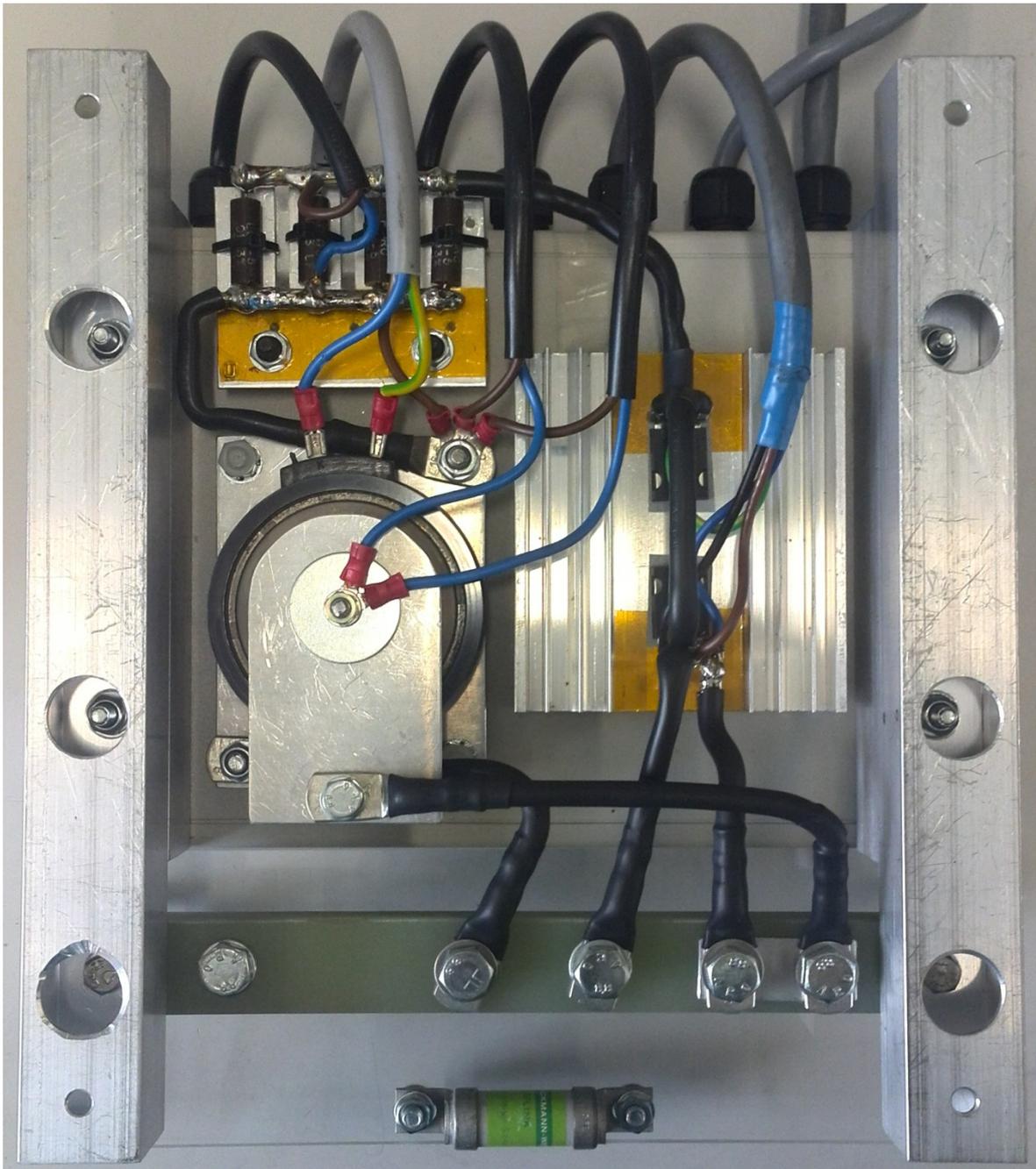


Abbildung 42: Rückansicht der gefertigten Einheit

5 Auswirkungsanalyse

Um die Entwicklung der Lade- und Balancer-Einheit zu unterstützen und Schwachstellen bzw. Fehlerauswirkungen festzustellen, wurde eine Fehler-Möglichkeiten und Einfluss Analyse (FMEA) durchgeführt. Mit ihrer Hilfe können potentielle Fehler in einem frühen Entwicklungsstadium erkannt und vermieden werden. Das Instrument der FMEA stellt in heutiger Zeit ein geeignetes und verbreitetes Mittel der Risikoanalyse dar. [12]

Das bearbeitete Formblatt der FMEA ist dem Anhang C zu entnehmen. Wie zu erkennen ist, stellt die Möglichkeit der Überladung des Akkumulators bzw. einer Zelle die größte Fehlerauswirkung dar. Aus diesem Grund wurden die in Kapitel 4.5 erklärten Sicherheitseinrichtungen ergänzt. Mithilfe dieser zusätzlichen Einrichtungen war es möglich, das Risiko einer Überladung auf ein minimales Restrisiko zu senken (gleichzeitiges Versagen mehrerer voneinander unabhängiger Schutzeinrichtungen).

6 Inbetriebsetzung und Prüfung

Im Folgenden sind die Schritte zur Inbetriebsetzung der Anlage aufgeführt. Zunächst sind die Laderegler- und Balancer-Platine, sowie die Anzeige- und Sicherheitseinrichtungenplatine ins Gehäuse einzusetzen und die Anschlüsse entsprechend anzustecken.

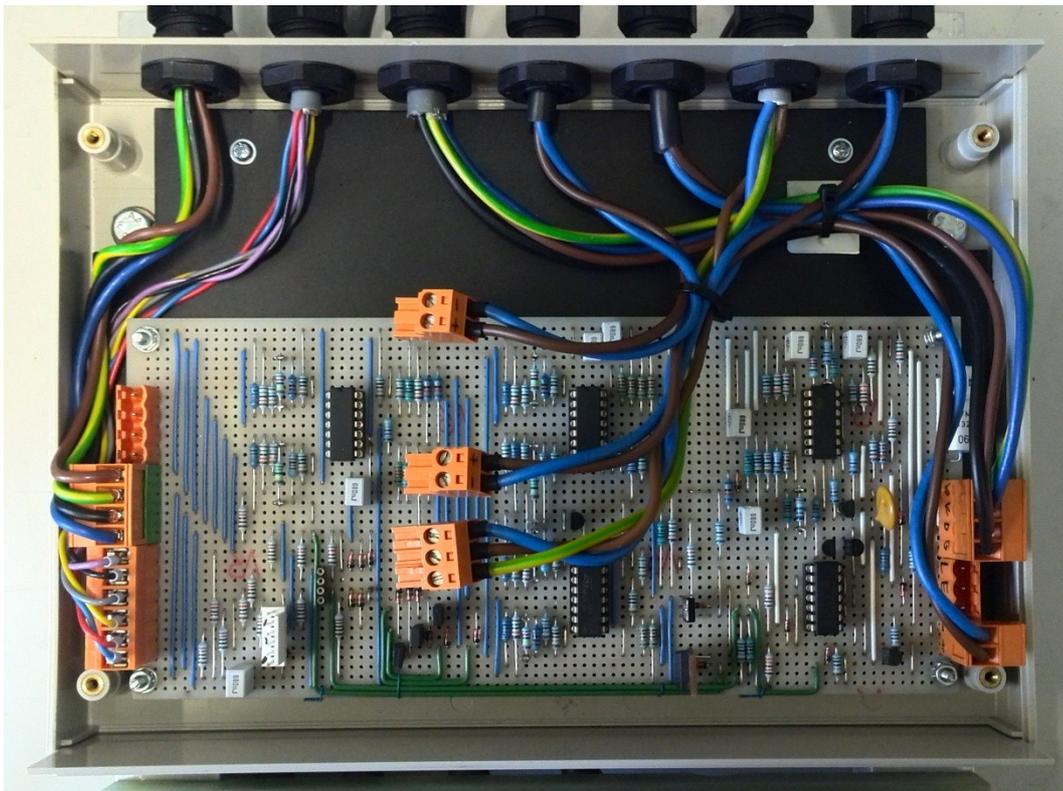


Abbildung 43: Ins Gehäuse eingesetzte Laderegler-Balancer-Platine

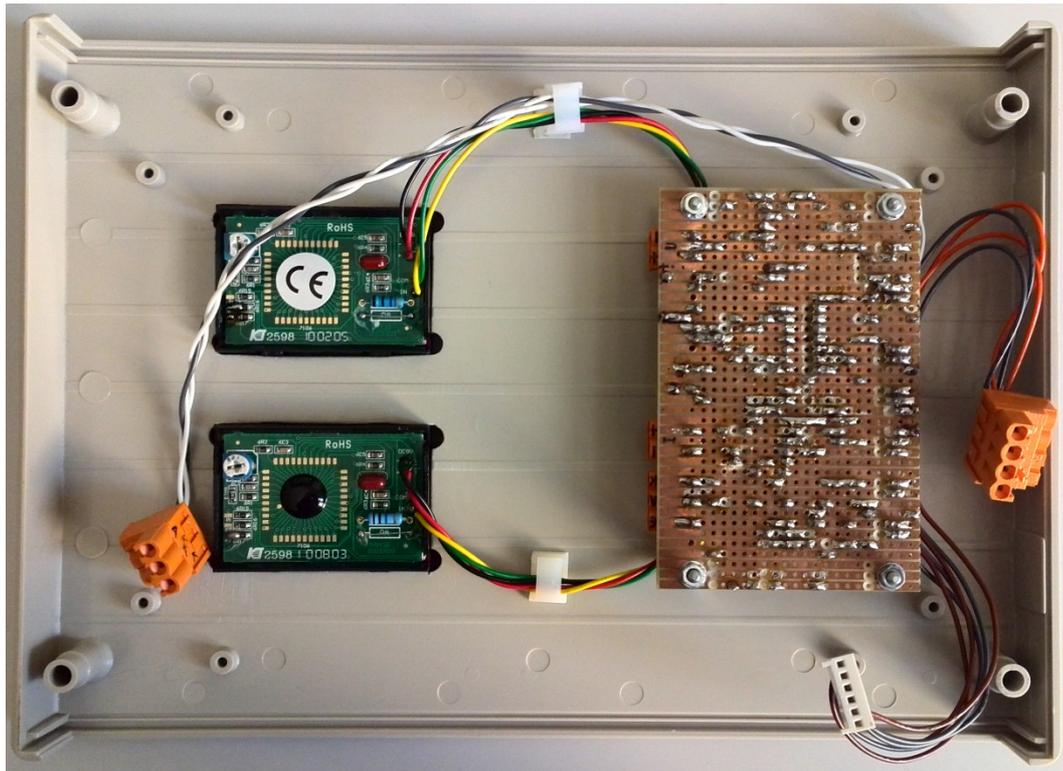


Abbildung 44: Ins Gehäuse eingesetzte Platine für Anzeige und Ansteuerung Thyristor

Nach der Montage des Deckels ist das Gerät bereit für die Herstellung der externen Anschlüsse von PV-Modul, Batterie, Balancer und Balancer-Leistungsteil. Hierfür wurden die Anschlussschrauben und Ösen entsprechend beschriftet.

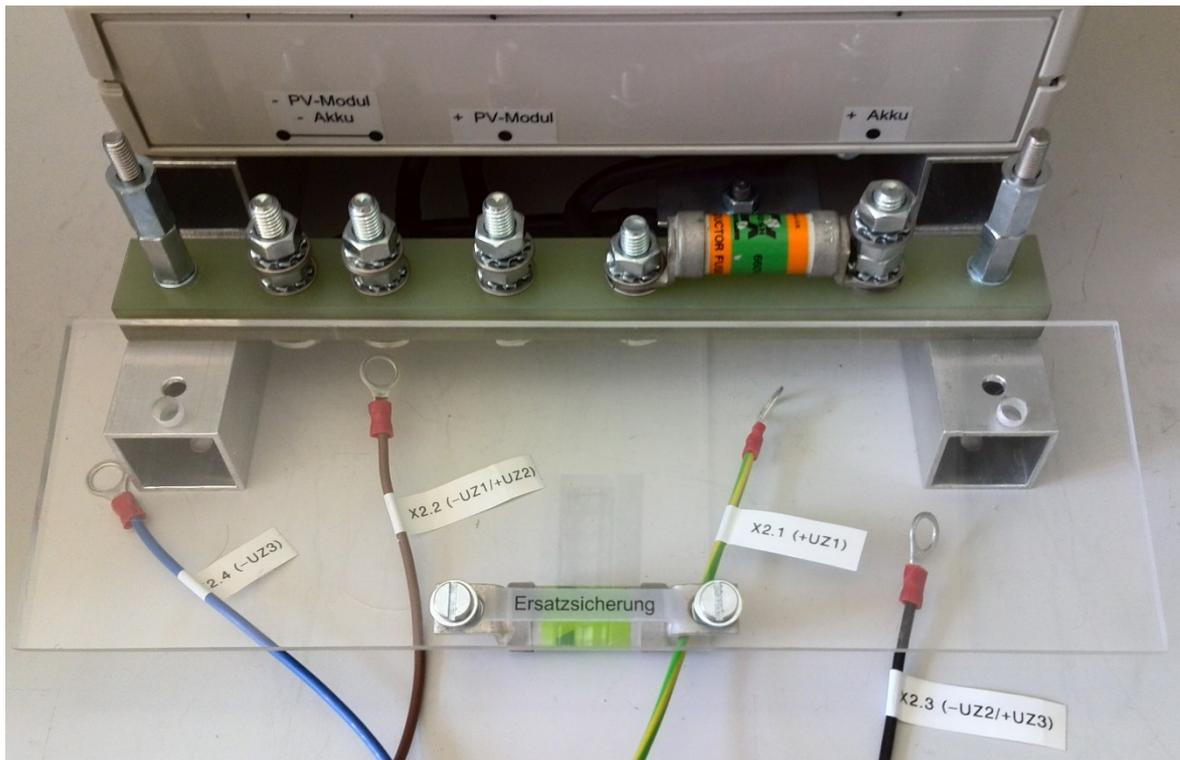


Abbildung 45: Anschlussleiste mit Kunststoffabdeckung und Ersatzsicherung; beschriftete Anschlüsse für Balancer

6.1 Messergebnisse

Abschließend erfolgte eine intensive Prüfung des fertig zusammengesetzten Gerätes. Das PV-Modul wurde hierbei durch ein Labornetzgerät simuliert. In gleicher Weise erfolgte bei der ersten Abschlussüberprüfung die Simulation der Batteriezellen. Hierzu wurden drei Labornetzgeräte mit jeweils parallel geschaltetem $4,7\Omega$ -Balancierwiderstand eingesetzt. Die Parallelschaltung der Widerstände erfolgte, um das Verhalten der Netzgeräte dem der aufladbaren (und damit Strom aufnehmenden) Akkuzellen anzunähern. Abbildung 46 zeigt den verwendeten Prüfaufbau.

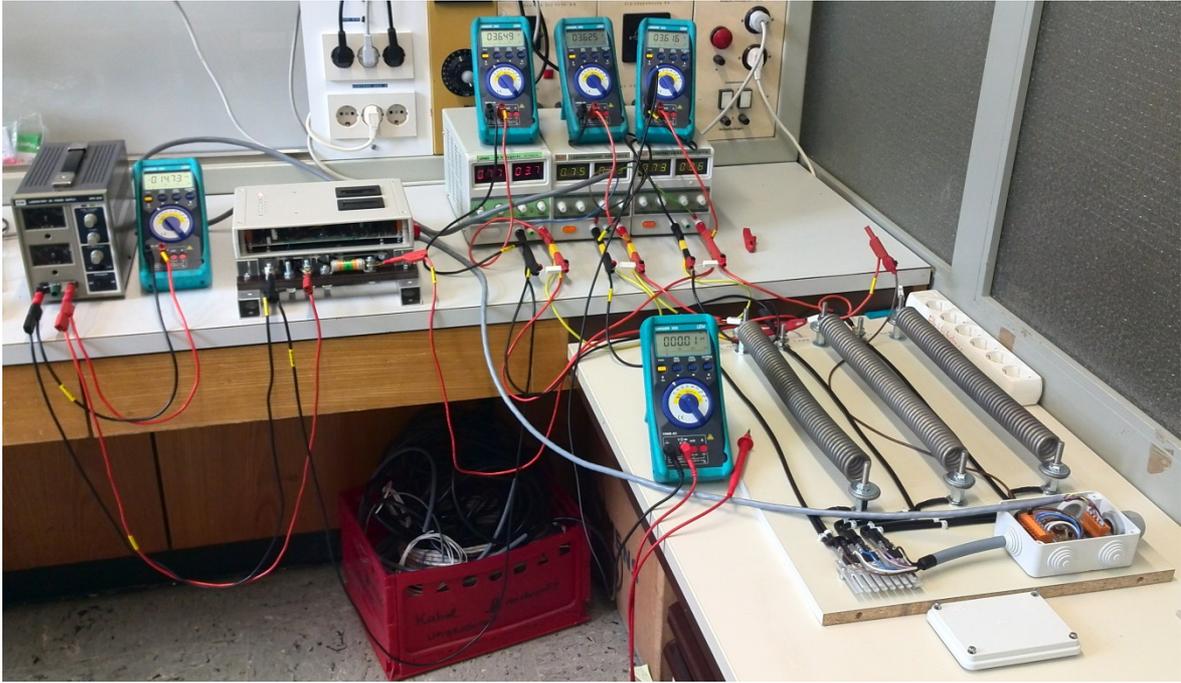


Abbildung 46: Prüfaufbau mit Netzgeräten

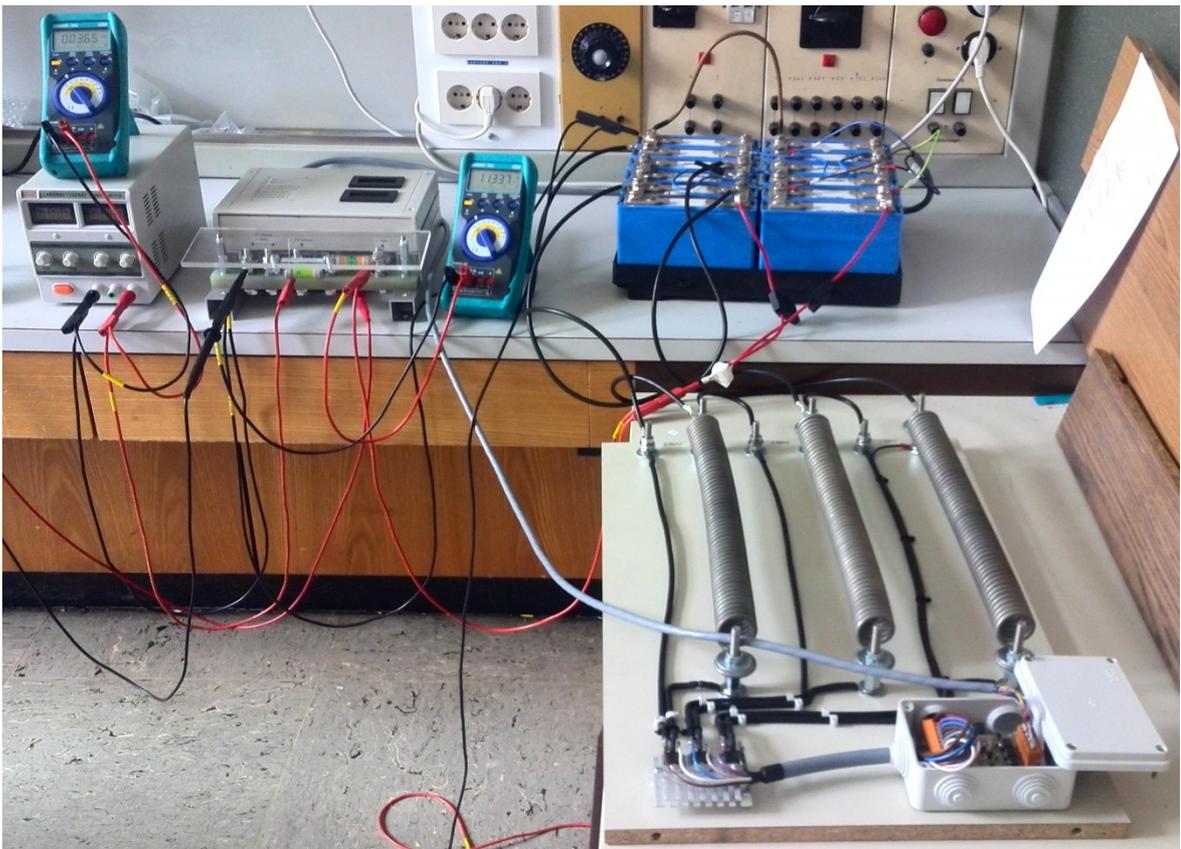


Abbildung 47: Prüfaufbau mit Akkuzellen

Anschließend erfolgt eine Messung mit gleichen Akkuzellen, wie bei der vorgesehenen Verwendung (Abbildung 47). Die ermittelten Werte sind folgender Tabelle zu entnehmen.

Tabelle 3: Messergebnisse

		$\Delta U_{PV\text{-Batterie}} [V]$
orange LED ein		0,267
orange LED aus		0,181
		$U_{Batterie} [V]$
grüne LED ein		12,250
grüne LED aus		12,001
		$U_{zelle} [V]$
Zelle 1	Überspannungs-LED ein	4,153
	Überspannungs-LED aus	4,066
	Unterspannungs-LED ein	3,309
	Unterspannungs-LED aus	3,407
Zelle 2	Überspannungs-LED ein	4,144
	Überspannungs-LED aus	4,055
	Unterspannungs-LED ein	3,306
	Unterspannungs-LED aus	3,406
Zelle 3	Überspannungs-LED ein	4,154
	Überspannungs-LED aus	4,072
	Unterspannungs-LED ein	3,323
	Unterspannungs-LED aus	3,421
		$\Delta U_{Zelle\text{-Mittelwert}} [mV]$
Zelle 1	Balancing-LED ein	25
	(jeweilige Abweichung zum Mittelwert Z1, Z2, Z3)	
Zelle 2	Balancing-LED ein	45
	(jeweilige Abweichung zum Mittelwert Z1, Z2, Z3)	
Zelle 3	Balancing-LED ein	29
	(jeweilige Abweichung zum Mittelwert Z1, Z2, Z3)	
		$U_{Batterie} [V]$
Kurzschluss Thyristor		12,69

7 Entwicklungsmöglichkeiten

Der Zustand des Gesamtsystems bei Abschluss der Masterarbeit stellt eine gute Basis für den sicheren Betrieb des PV-Moduls mit dem bestehenden Akkumulator dar. Nichtsdestotrotz gibt es Möglichkeiten, das hergestellte System weiterzuentwickeln.

- Eine Variante wäre es, die Sicherheitseinrichtung des Thyristors, welcher bei einer deutlichen Überspannung der Batterie einen Kurzschluss der selbigen hervorruft, vom restlichen System zu trennen. Zurzeit ist die Ansteuerung des Thyristors mit den Anzeigevorrichtungen auf einer Platine verbaut und es werden OPVs vom selben IC beschalten. Eine komplette Trennung der Baugruppen könnte eventuell zu einer höheren Ausfallsicherheit führen, da Fehler der Anzeigeeinrichtung somit keinen Einfluss auf die Thyristoransteuerung bewirken.
- Die Ergänzung eines Speichers von diversen Anzeigen stellt eine interessante Möglichkeit der Systemerweiterung dar. Anzeigen, welche bis dato nur im Echtzeitbetrieb abgelesen werden, stünden auch nach dem Auftreten dem Betreiber als Information zur Verfügung. Besonders das Vorkommen von Über- bzw. Unterspannungen steht hier im Mittelpunkt. Für den Fall, dass eine Zelle in solch einen Zustand gerät und aus diesem wieder herausgeführt wird, ist es für den Systembetreiber eine wertvolle Information, um so vor einer dauerhaften Schädigung von Batteriezellen erforderliche Maßnahmen ergreifen zu können. Die Umsetzung eines solchen Speichers könnte durch Ergänzung von entsprechenden Speicher-Flipflops erfolgen.
- Eine sinnvolle Erweiterung der Anlage würde ein MPPT darstellen. Zurzeit ist das PV-Modul direkt am Laderegler angeschlossen. Ein MPPT könnte das PV-Modul im optimalen Lastpunkt betreiben und somit zu maximaler Energieausbeute führen. Die Ausführung eines MPPT wäre jedoch schwierig ohne Einbeziehung eines Microcontrollers auszuführen, da konventionelle Ausführungen mit Analogbauteilen einen äußerst komplexen Schaltungsaufwand ergeben.

- Das Einsetzen eines aktiven Balancers stellt ebenfalls eine Variante der Ergänzung dar. Jedoch ist der Schaltungsaufwand hierfür ungleich größer und die Fehleranfälligkeit steigt ebenfalls mit der Schaltungskomplexität. Weiters sind bei gegenständlicher Anlage die Verluste, welche durch den passiven Balancer entstehen, vernachlässigbar, da es sich um eine Inselanlage handelt und im Normalbetrieb genügend Energie zur Verfügung steht.
- Abschließend erscheint es sinnvoll, zusätzlich zur versorgungsseitigen, eine lastseitige Sicherung gegen Kurzschluss einzubauen, um gefährliche thermische Zustände der Batterie zu vermeiden. Hierbei müsste es sich jedoch um ein Gerät handeln, welches direkt zwischen Batterie und der Last, dementsprechend dem Wechselrichter, liegt. Eine Verbindung mit der vorliegenden Arbeit ist nicht möglich, da diese ausschließlich den versorgungsseitigen Teil zwischen PV-Modul und Batterie behandelt.

Die aufgeführten Varianten stellen lediglich Möglichkeiten und Anstöße zu weiteren Gedanken dar. Eine jeweilige Umsetzung würde in jedem Fall einen zusätzlichen Aufwand an Material erfordern und der Einbau der zusätzlichen Gerätschaften in das Gehäuse könnte sich aus Mangel an genügend Raum schwierig gestalten. Eine genaue Betrachtung für folgende Projekte wäre jedoch sicherlich erstrebenswert.

8 Zusammenfassung

Die Aufgabenstellung für die gegenständliche Arbeit umfasste die Herstellung eines Laderegler und Balancers für die Ladung eines Lithium-Ionen Akkumulators. Die umfangreichen Anforderungen an das Gerät wurden zunächst in einem Blockschaltbild erfasst. Die Umsetzung der Anforderungen mittels analogen Bauteilen machte es notwendig, Schaltungen zu entwerfen und parametrieren, welche in ausführlichen Stromlaufplänen dokumentiert wurden. Die anschließende Planung der Leiterplatten stellte eine umfangreiche Aufgabe dar und gestaltete sich zum Teil als recht schwierig, bis sämtliche Leitungswege und Bauteile untergebracht waren. Die praktische Ausfertigung der Platinen, welches das Aufbringen und Anlöten der Bauteile umfasste, sowie die Vorbereitung des Gehäuses führten zu langen Aufenthalten in der Werkstatt und ausgedehntem Betrieb der Lötstation. Beim ersten Durchtesten trat schließlich teilweise Ernüchterung ein, wenn einige Funktionen nicht in geplanter Weise vorstatten gingen. Ausgiebige Fehlersuche konnte die Probleme beseitigen, jedoch unterscheiden sich Theorie und Praxis - auch in der Elektronik - oftmals stark. Bemerkbar war dies, wenn z.B. vorher berechnete Schaltschwellen nach der Ausfertigung auf der Platine nicht den gewünschten Wert aufwiesen. Dies bedeutete oftmals das Tauschen von Widerständen und Anpassung der Schaltung. Einstreuungen und andere Effekte stellten Hindernisse dar, welchen nur mit umfangreicherem Wissen begegnet werden konnte. Das Zusammenfügen der einzelnen Platinen und Gehäuseteile war andererseits mit geringeren Problemen verbunden und die abschließende Gesamtprüfung diente zur endgültigen Ermittlung der Schaltwerte für die Funktionen und Anzeigen. Der fertige Laderegler und Balancer ist ideal auf die eingangs erwähnten Systemteile (PV-Modul, Akkumulator) zugeschnitten. Eine Umsetzung mit Geräten aus der Industrie wäre nicht möglich gewesen.

Besonders Augenmerk bei der Planung und Ausfertigung wurde auf die Sicherheit und das Vermeiden einer Überladung der Batterie gelegt. Hierzu wurden mehrere, redundante Vorrichtungen geschaffen, welche im Folgenden aufgelistet sind.

- Kurzschluss des PV-Moduls bei Überspannung einer Zelle

- Automatisches Balancieren einer Zelle mit Überspannung
- Kontrollierter Kurzschluss bei Batterieüberspannung und somit Auslösung einer definierten Halbleitersicherung
- Überprüfung, ob die Batteriekurzschlussvorrichtung angeschlossen ist

Mithilfe dieser Sicherheitsfunktionen liegt die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer gefährlichen thermischen Situation der Batterie in einem äußerst niedrigen Bereich.

Abschließend ist in Abbildung 48 das Blockschaltbild für das Gesamtsystem mit den Detailfunktionen dargestellt.

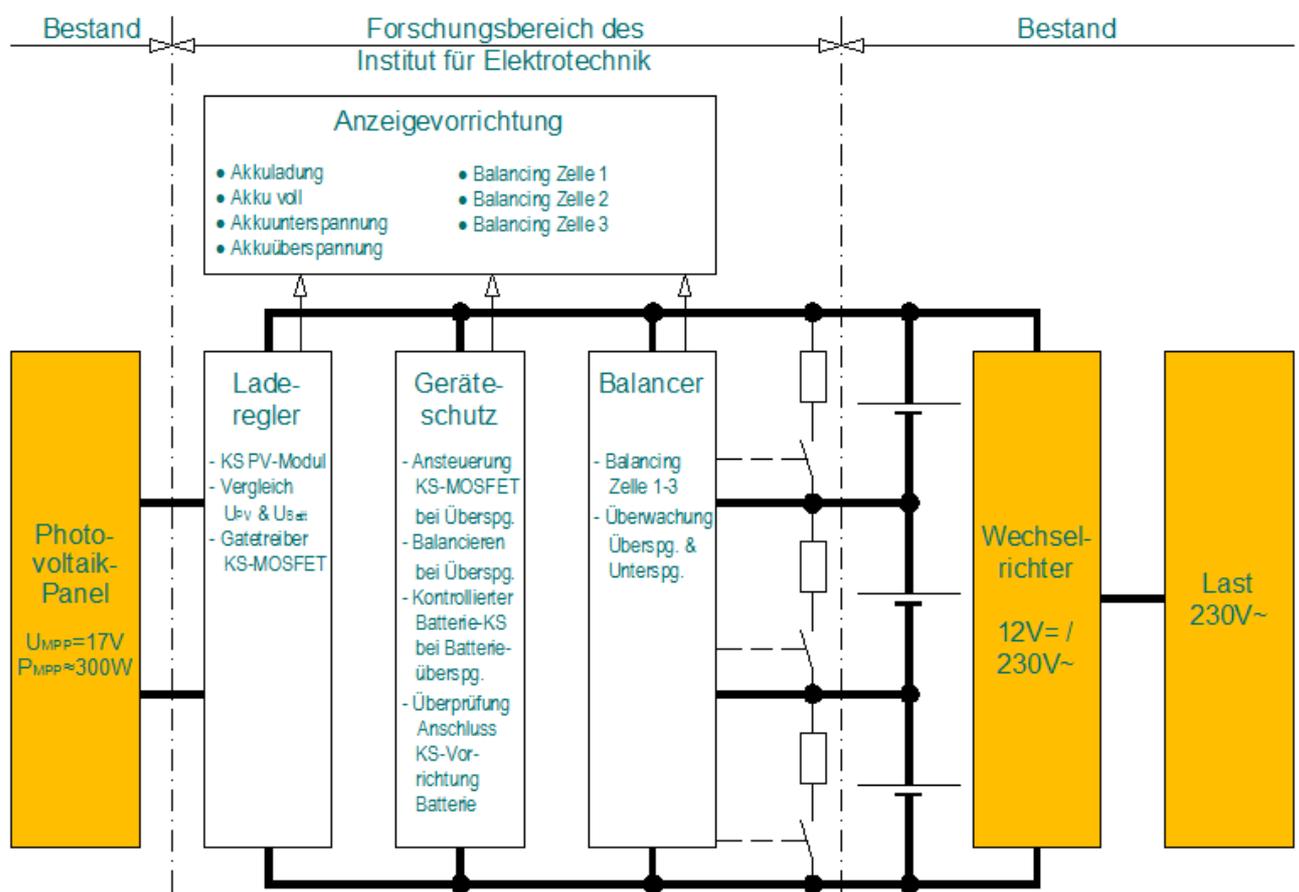


Abbildung 48: Blockschaltbild des Gesamtsystems

9 Literaturverzeichnis

- [1] Wilk H. *Solarstrom – Handbuch zur Planung und Ausführung von Photovoltaikanlagen*; 2. Auflage; Arbeitsgemeinschaft Erneuerbare Energie GmbH: Gleisdorf, 1995; pp35-79
- [2] Quaschnig V. *Erneuerbare Energien und Klimaschutz: Hintergründe - Techniken und Planung - Ökonomie und Ökologie – Energiewende*; 3. aktualisierte und erweiterte Auflage; Carl Hanser Verlag: München, 2013; p136
- [3] Zahoransky R. *Energietechnik – Systeme zur Energieumwandlung. Kompaktwissen für Studium und Beruf*; 3. Auflage; Friedr. Vieweg & Sohn Verlag: Wiesbaden, 2007; p267
- [4] Kaltschmitt M.; Streicher W. *Regenerative Energien in Österreich – Grundlagen, Systemtechnik, Umweltaspekte, Kostenanalysen, Potenziale, Nutzung*; 1. Auflage; Vieweg & Teubner | GWV Fachverlage GmbH: Wiesbaden, 2009; pp173-174
- [5] Tiwari G.N.; Dubey S. *Fundamentals of Photovoltaic Modules and Their Applications*; The Royal Society of Chemistry: Cambridge, 2010; p126
- [6] Dobrinski P. et al *Physik für Ingenieure*; 12. Auflage; Vieweg & Teubner | GWV Fachverlage GmbH: Wiesbaden, 2010; p607
- [7] Sasaki T. et al *Memory effect in a lithium-ion battery*; in Nature Materials 12, 2013; pp569-575
- [8] Tietze U.; Schenk Ch. *Halbleiter-Schaltungstechnik*; 11. Völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage – 1. Korrigierter Nachdruck; Springer-Verlag: Berlin Heidelberg, 1999; pp177-185 & pp979-986 & pp612-614 & p1307
- [9] Mertens K. *Photovoltaik – Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis*; Carl Hanser Verlag: München, 2011; pp231-250
- [10] Schröder D. *Leistungselektronische Bauteile*; 2. Auflage; Springer-Verlag: Berlin Heidelberg, 2006; pp262-279
- [11] Federau J. *Operationsverstärker – Lehr- und Arbeitsbuch zu angewandten Grundsaltungen*; 6. Auflage; Springer Fachmedien : Wiesbaden, 2012; pp1-67
- [12] Werdich M. *FMEA – Einführung und Moderation*; 2. überarbeitete und verbesserte Auflage; Vieweg + Teubner Verlag | Springer Fachmedien: Wiesbaden, 2011, 2012; pp1-77
- [13] HEF40106B Hex inverting Schmitt trigger – NXP. Zu finden unter < http://www.nxp.com/documents/data_sheet/HEF40106B.pdf > [zitiert am 09.04.2014]
- [14] Abeywardana D.B.W. et al *Improved Shared Transformer Cell balancing of Li-ionen Batteries*; Department of Electrical and Electronic Engineering, Faculty of Engineering, University of Peradeniya, Sri Lanka, 2012

- [15] Moore S.M.; Schneider P.J. *A Review of Cell Equalization Methods for Lithium Ion and Lithium Polymer Battery Systems*; SAE Technical Paper 2001-01-0959, 2001; SAE 2001 World Congress, Detroit, MI, USA, 2001
- [16] Einhorn M. et al *Improved Performance of Serially Connected Li-Ion Batteries With Active Cell Balancing in Electric Vehicles*; IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 60, No. 6, July 2011; pp2448-2457
- [17] Martinez C. et al *Using Cell Balancing to Maximize the Capacity of Multi-cell Li-Ion Battery Packs*; Application Note 167; Intersil Americas Inc., June 2007
- [18] Faria R. et al *Primary and Secondary Use of Electric Mobility Batteries from a Life Cycle Perspective*; Journal of Power Sources, doi:10.1016/j.jpowsour.2014.03.092, 2014
- [19] Schneider E.L. et al *Assessment and reuse of secondary batteries cells*; Journal of Power Sources, doi:10.1016/j.jpowsour.2008.12.154, 2009
- [20] BUZ344 SIPMOS® Power Transistor – Siemens. Zu finden unter < <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/siemens/BUZ344.pdf> > [zitiert am 17.05.2014]
- [21] LT1615/LT1615-1 Micropower Step-Up DC/DC Converters in ThinSOT – Linear Technology. Zu finden unter < <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/16151fas.pdf> > [zitiert am 08.04.2014]

10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Blockschaltbild Aufgabenstellung	2
Abbildung 2:	Gegenüberstellung PV-Überschuss- und -Volleinspeisung.....	4
Abbildung 3:	PV-Anlage im Inselbetrieb ohne Speicher und Spannungskonvertierung	6
Abbildung 4:	PV-Anlage im Inselbetrieb ohne AC-Last.....	7
Abbildung 5:	PV-Anlage im Inselbetrieb mit AC-Last.....	7
Abbildung 6:	Aufbau einer Lithium-Ionen-Zelle; Quelle: Lithium-Ionen-Akkus < https://www.elektronikkompodium.de/sites/bau/0810281.htm > [zitiert am 10.04.2014].....	9
Abbildung 7:	Überladung einer Zelle	11
Abbildung 8:	Batterieladung ohne Eingriff des Balancers	13
Abbildung 9:	Akkumulator zu Beginn des Balancing-Vorganges	14
Abbildung 10:	Akkumulator nach Abschluss des Balancing-Vorganges	14
Abbildung 11:	Bipolartransistor T26 in Emitterschaltung.....	16
Abbildung 12:	Ausgangskennlinienfeld des Transistors BC237; Quelle: vgl. BC237 Datasheet (PDF) < http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/50722/FAIRCHILD/BC237.html > [zitiert am 07.04.2014]	17
Abbildung 13:	Transistoren T32 und T33 in Darlington-Schaltung.....	18
Abbildung 14:	Grundsätzlicher Aufbau eines Hochsetzstellers	19
Abbildung 15:	Stromlaufplan des Hochsetzsteller-ICs LT1615; Quelle: vgl. LT1615/LT1615-1 Micropower Step-Up DC/DC Converters in ThinSOT < http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/16151fas.pdf > [zitiert am 08.04.2014]	20
Abbildung 16:	Dotierungsschema und Ersatzschaltbild eines Thyristors	21
Abbildung 17:	Schaltung des invertierenden Verstärkers.....	22

Abbildung 18:	Aufbau eines Summierverstärkers	23
Abbildung 19:	Schaltung des Differenzverstärkers	24
Abbildung 20:	Schaltung eines nicht invertierenden Schmitt-Triggers	25
Abbildung 21:	Schalthysterese eines nicht invertierenden Schmitt-Triggers.....	26
Abbildung 22:	Schaltzeichen und Stromlaufplan des Referenzspannungs-ICs TL431; Quelle: vgl. TL431 Precision Programmable Reference < http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl431.pdf > [zitiert am 08.04.2014].	27
Abbildung 23:	Schaltzeichen eines Optokopplers	29
Abbildung 24:	Funktionsdiagramm und Pinbelegung des Logik-IC HEF40106B, vgl. [13].....	30
Abbildung 25:	Blockschaltbild des Lastenheftes	31
Abbildung 26:	Frontansicht des Gehäuses mit Anzeigeeinrichtungen	35
Abbildung 27:	Platine Anzeige und Ansteuerung Thyristor - Bestückungsseite	37
Abbildung 28:	Platine Anzeige und Ansteuerung Thyristor - Bestückungsseite	38
Abbildung 29:	Platine Anzeige und Ansteuerung Thyristor - Layoutseite.....	38
Abbildung 30:	Prototyp der Ladereglerplatine - Bestückungsseite.....	39
Abbildung 31:	Prototyp der Ladereglerplatine – Layoutseite.....	40
Abbildung 32:	Prototyp der Laderegler – Platine eingebaut im Gehäuse	41
Abbildung 33:	Prototyp des Laderegler - Vorderseite	42
Abbildung 34:	Prototyp des Laderegler – Rückseite	42
Abbildung 35:	Laderegler Bestückungsseite	45
Abbildung 36:	Laderegler Layoutseite.....	45
Abbildung 37:	Balancer Bestückungsseite	48
Abbildung 38:	Balancer Layoutseite.....	49
Abbildung 39:	Balancer-Leistungsteil, MOSFETs und Balancierwiderständen .	52
Abbildung 40:	MOSFETs am Balancer-Leistungsteil	53

Abbildung 41:	Platine des Balancer-Leistungsteils	53
Abbildung 42:	Rückansicht der gefertigten Einheit.....	56
Abbildung 43:	Ins Gehäuse eingesetzte Laderegler-Balancer-Platine	58
Abbildung 44:	Ins Gehäuse eingesetzte Platine für Anzeige und Ansteuerung Thyristor	59
Abbildung 45:	Anschlussleiste mit Kunststoffabdeckung und Ersatzsicherung; beschriftete Anschlüsse für Balancer	60
Abbildung 46:	Prüfaufbau mit Netzgeräten	61
Abbildung 47:	Prüfaufbau mit Akkuzellen.....	61
Abbildung 48:	Blockschaltbild des Gesamtsystems	66

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Auflistung der eingesetzten MOSFETs.....	29
Tabelle 2:	Anzeigen Laderegler – Kontaktbezeichnungen und Funktion.....	36
Tabelle 3:	Messergebnisse.....	62

12 Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
AC	Alternating Current - Wechselstrom
Akku	Akkumulator
DC	Direct Current - Gleichstrom
ENS	Einrichtung zur Netzüberwachung mit zugeordneten Schaltorganen
EVU	Elektroversorgungsunternehmen
FMEA	Fehlermöglichkeits- und einflussanalyse
IC	Integrated circuit (integrierter Schaltkreis)
KS	Kurzschluss
LCD	Liquid crystal display (Flüssigkristallanzeige)
LED	Licht-emittierende Diode
Li-Ionen	Lithium-Ionen
MOSFET	Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor (Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor)
MPP	Maximum Power Point
MPPT	Maximum Power Point Tracker
OPV	Operationsverstärker
PV	Photovoltaik
SPG	Spannung

13 Symbole und Formelzeichen

C	Kapazität [F]
D	Diode
F	Sicherung
I	Stromstärke [A]
k	Kilo
L	Induktivität [H]
M	Mega
P	Leistung [W]
R	Widerstand [Ω]
T	Transistor
X	Kontakt/Klemme

Indizes

A	Ausgang
B	Basis
Batt	Batterie
C	Collector
CE	Collector Emitter
Diff	Differenz
DS,on	Strecke Drain-Source, im eingeschalteten Zustand
E	Eingang
IN	Eingang

MPPT	Maximum Power Point Tracker
OUT	Ausgang
P	Leistung [W]
PV	Photovoltaik
R	Widerstand [Ω]
Ref	Referenz
Vers	Versorgung

Anhang A – Stromlauf-, Bestückungs- und Layoutpläne

Anhang B – Datenblätter der eingesetzten Bauteile

Die Datenblätter sind, aufgrund ihrer hohen Zahl, auf der beiliegenden Compact Disc gespeichert und abrufbereit. Eine Beilage in Papierform ist nicht vorhanden.

Anhang C – FMEA
