

# DIPLOMARBEIT

Gesamtprojekt

## Mountain Power Station

Entwicklung einer autonomen Ladestation

Leon Hipf                    5CHEL                    Betreuer: Prof.Dipl.-Ing. Siegbert Schrempf

Thomas Fellner              5CHEL



HÖHERE TECHNISCHE BUNDESLEHR- UND VERSUCHSANSTALT Salzburg

Elektronik und Technische Informatik

Kooperationspartner:

ausgeführt im Schuljahr 2021/22

---

Abgabevermerk:

Datum: 04.04.2022

übernommen von:

## Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Salzburg, am 04.04.2021

Verfasserinnen / Verfasser:

---

Leon Hipf

---

Thomas Fellner

## DIPLOMARBEIT DOKUMENTATION

Namen der Verfasserinnen / Verfasser	Leon Hipf Thomas Fellner
Jahrgang Schuljahr	5CHEL 2021/22
Thema der Diplomarbeit	Entwicklung einer autonomen Ladestation
Kooperationspartner	

Aufgabenstellung	Ein Bergsteiger trägt viele elektronische Geräte mit sich, welche ihn bei seinen Bergtouren unterstützen. Sollte eines dieser Geräte aufgrund eines leeren Akkus ausfallen hat er wenig Möglichkeiten diese wieder aufzuladen. Um diesem Problem entgegenzuwirken, soll eine autonome Ladestation entwickelt werden.
------------------	--

Realisierung	Eine PV-Zelle versorgt die gesamte Ladestation. Überschüssige Energie wird in einem LiPo Akkupack gespeichert. Diese Ladevorgänge werden mit Schaltungskomponenten geregelt und überwacht. An USB-Buchsen können die Benutzer ein Ladekabel anstecken und ihre Geräte laden. Zusätzlich misst ein Sensor vor Ort Wetterdaten. Die Steuerung des gesamten Systems übernimmt ein Raspberry Pi. Dieser soll mittels GSM Modul eine Internetverbindung herstellen, welche für Wettervorhersagen und Ferndiagnose benutzt wird.
--------------	--

Ergebnisse	Die Ladestation stellt Energie zum Laden von akkubetriebenen Geräten zur Verfügung. Wetterdaten von vor Ort sowie eine Wettervorhersage aus dem Internet sind für den Benutzer auf einem Display zu sehen. Technische Details der Station sind über eine Website abrufbar.
------------	--

Typische Grafik, Foto etc. (mit Erläuterung)	
---	--

Teilnahme an Wettbewerben, Auszeichnungen	
--	--

Möglichkeiten der Einsichtnahme in die Arbeit	Bibliothek der HTBLuVA Salzburg
--	---------------------------------

Approbation (Datum / Unterschrift)	Prüferin / Prüfer	Direktorin / Direktor Abteilungsvorständin / Abteilungsvorstand
---------------------------------------	-------------------	--

# DIPLOMA THESIS

## Documentation

Author(s)	Leon Hipf Thomas Fellner
Form Academic year	5CHEL 2021/22
Topic	Development of an autonomous charging station
Co-operation Partners	

Assignment of Tasks	Modern mountaineers often carry a lot of electronic devices with them to help them on their travels. Should one of these become unavailable due to an empty battery they may not be able to recharge them. As countermeasure to this problem, we develop an autonomous charging station.
---------------------	--

Realisation	A PV cell supplies the charging station. Excess energy will be stored in a LiPo battery pack. The loading cycles are regulated and overseen by additional circuitry. Over USB jackets the user is able to charge it's devices. Additionally, a sensor on site measures weather data. The controller of the whole system is done by a Raspberry Pi. This one should maintain an internet connection via a GSM module to be used as weather forecast and remote diagnosis
-------------	---

Results	The charging stations provides energy to charge battery powered devices. Weather data from on site will be display for users alongside with a forecast. Technical details of the station are retrievable over a website.
---------	--

Illustrative Graph, Photo (incl. explanation)	 <p>The figure above shows the first prototype of the Mountain Power Station without the solar cell. The electronic is attached to the enclosure which is ready for assembly. The display shows the default Raspbian desktop.</p>
---	---

Participation in Competitions Awards	
--------------------------------------	--

Accessibility of Diploma Thesis	Library of the HTBLuVA Salzburg
---------------------------------	---------------------------------

Approval (Date / Sign)	Examiner	Head of College Head of Department
---------------------------	----------	---------------------------------------

## Vorwort

Elektronische Geräte haben ihren Weg in etliche Alltag- und Freizeitaktivitäten schon lange gefunden. So auch in den Bergsport. Egal ob Karten, Biomonitoring oder Höhenmesser. All dies gibt es in elektronischer Form. Damit diese Geräte praktisch mitgeführt werden sie mit einem Akku versorgt. Da sich diese über die Zeit entladen, kann es bei längeren Touren vorkommen, dass sich der Akku vollständig entlädt. Wenn man keinen Reserve-Akku mitführt, gibt es keine Möglichkeit das Geräte weiter verwenden zu können. Um den Bergsteigern eine Möglichkeit zur Wiederaufladung der Akkus zu geben, soll eine Ladestation entwickelt werden.

## Danksagung

Wir bedanken uns bei unserem Projektbetreuer Prof. Dipl.-Ing. Siegbert Schrempf. Dieser hat uns die Projektidee gegeben und uns mit seinen technischen Fachkenntnissen unterstützt.

Ebenfalls bedanken möchten wir uns bei Prof. Dipl.-Ing. Dr. Andreas Magauer, welcher uns in der finalen Phase der Systemintegration half einen kritischen Fehler ausfindig zu machen.

Zusätzlicher Dank gilt FL Helmut Strasser und FL Wolfgang Strassl, welche uns beim Design der Platine sowie des Gehäuses mit ihren Erfahrungen und Ratschlägen zur Seite gestanden sind.

Besonderer Dank gilt Herr FL Franz Rieser, welcher uns bei der Planung und Konstruktion unserer Halterung unterstützt hat und mechanische Arbeiten durchgeführt hat, für welche wir nicht qualifiziert sind.

Darüber hinaus möchten wir uns bei allen Lehrern der HTL Salzburg bedanken, welche uns durch diese 5 Jahre an der Schule begleitet und ihr Wissen mit uns geteilt haben.

# 1 Inhalt

---

2	Überblick .....	12
3	Systemspezifikation.....	13
3.1	Zielbestimmungen.....	13
3.1.1	Musskriterien.....	13
3.1.2	Wunschkriterien .....	13
3.1.3	Abgrenzungskriterien.....	13
3.2	Produkteinsatz .....	14
3.2.1	Anwendungsbereiche .....	14
3.2.2	Zielgruppe.....	14
3.2.3	Betriebsbedingungen.....	14
3.3	Produktumgebung.....	14
3.3.1	Software.....	14
3.3.2	Hardware.....	14
3.4	Produktfunktionen .....	15
3.5	Produktdaten .....	16
3.6	Produktleistungen .....	16
3.7	Benutzungsoberfläche .....	17
3.7.1	Display.....	17
3.7.2	Ladevorrichtung.....	17
3.8	Qualitätszielbestimmungen .....	17
3.9	Globale Testszenarien und Testfälle.....	18
3.10	Entwicklungsumgebung .....	19
3.10.1	Software .....	19
3.10.2	Hardware.....	19
3.10.3	Orgware.....	19
4	Organisation - Projektmanagement.....	20
4.1	Projektteam.....	20
4.2	Individuelle Aufgabenstellungen inkl. Arbeits- und Terminplan (GANTT-Diagramme).....	21
4.2.1	Leon Hipf .....	21
4.2.2	Thomas Fellner .....	22
5	Grundlagen und Methoden .....	23
5.1	Hardwareentwicklung.....	23
5.1.1	Vorgehen .....	23
5.1.2	Funktion eines Buck Converters .....	24
5.1.3	Cell Balancing.....	25

5.1.4	Batteriepack .....	26
5.1.5	Das Solarpanel .....	28
5.1.6	Der Laderegler .....	31
5.1.7	Protection Circuit .....	39
5.1.8	Spannungsversorgung 5V .....	47
5.1.9	Spannungsversorgung für die USB-Ladeeinheit .....	51
5.1.10	Ladeperipherie .....	60
5.1.11	Systemintegration .....	61
5.2	Raspberry Pi .....	67
5.2.1	Hardware-Schnittstellen .....	68
5.2.2	ADS 1115 Modul .....	73
5.3	Internetanbindung .....	75
5.3.1	Realisierungsmöglichkeiten .....	75
5.3.2	Wellenausbreitung .....	76
5.3.3	Antenne .....	78
5.3.4	Mobilfunknetz .....	79
5.3.5	GSM-Standard .....	80
5.3.6	GSM-Modul .....	81
5.3.7	Point-to-point-protocol (PPP) .....	84
5.4	Wetterdaten .....	86
5.4.1	BMP180 .....	86
5.5	Web-Interface .....	87
5.5.1	Grundlagen .....	87
5.5.2	Node Red .....	87
5.5.3	JavaScript .....	90
5.5.4	Liquid Crystal Display .....	91
5.5.5	Webzugriff von außen .....	92
5.6	Gehäuse .....	94
5.7	Halterung .....	97
6	Ergebnisse – Abnahme .....	99
6.1	Prototypen-Systemtest .....	99
6.2	Laderegler .....	99
6.3	Spannungsversorgung 5V .....	100
6.4	Spannungsversorgung für die USB-Ladeeinheit .....	101
6.5	Abnahmetests des Endprodukts .....	103
7	Fertigungsunterlagen .....	105
8	Quellen- und Literaturverzeichnis .....	120

9	Verzeichnis der Abbildungen, Tabellen und Abkürzungen.....	122
9.1	Abbildungsverzeichnis .....	122
9.2	Tabellenverzeichnis .....	124
9.3	Glossar .....	125
10	Begleitprotokoll gemäß § 9 Abs. 2 PrO.....	126
10.1	Begleitprotokoll Hipf.....	126
10.2	Begleitprotokoll Fellner .....	127
11	Anhang.....	128

## 2 Überblick

Damit Bergsteiger ihre akkubetriebenen Geräte wiederaufladen können entwickeln wir eine autonome, stationäre Ladestation. Damit genügend Zeit zum Aufladen bleibt wird die Station an Orten platziert, an welchen Bergsteiger länger verweilen. Hierzu zählen zum Beispiel Hütten

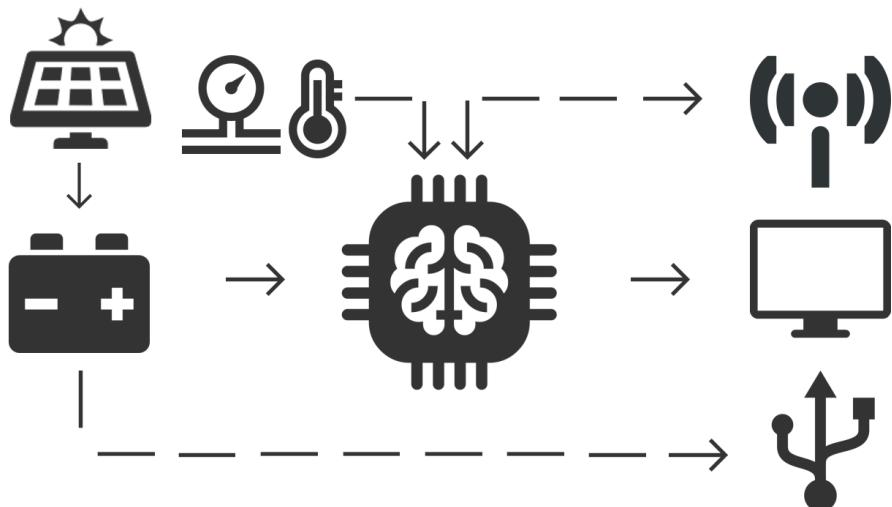


Abbildung 1 Blockschaltbild MPS inkl. Legende

oder Biwaks.

Die Ladestation wird über eine Solarzelle versorgt. Über Lade- und Schutzschaltungen wird die erzeugte Energie in Lithium-Polymer Akkumulatoren gespeichert. Über verschiedene Spannungswandler werden die nötigen Spannungen unter Beachtung des Stromverbrauchs erzeugt. Die zentrale Einheit der Ladestation bildet ein Embedded System. Dieser übernimmt die Steuerung und Überwachung der Station. Zusätzlich wird eine Wetterinformationssystem entwickelt. Dieses besteht aus einer Temperatur- und Luftdruckmessung vor Ort, sowie einem aktuellen Wetterbericht. Der Nutzer bekommt diese Informationen auf einem Display ausgegeben. Die für den Wetterbericht nötige Netzanbindung wird über ein GSM-Modul geschaffen. Wenn es die Netzarchitektur zulässt, soll es dem Administrator möglich sein eine Ferndiagnose der Station durchzuführen. Da für die Ladung von bis zu drei Geräten ein Strom von mehreren Ampere notwendig ist können die integrierten USB-Buchsen des Raspberry Pi nicht verwendet werden. Deshalb sind externe USB-Buchsen essenziell, welche auch über einen eigens für diesen hohen Stromfluss ausgewählten, mit interner Strombegrenzung ausgestatteten, Spannungswandler versorgt werden.

## 3 Systemspezifikation

---

### 3.1 Zielbestimmungen

#### 3.1.1 Musskriterien

- Die Akkus werden gefahrlos geladen und entladen
- Die Ladestation deaktiviert sich automatisch, sobald die Kapazität der Akkus einen kritisch niedrigen Wert erreicht hat
- Unter günstigen Umständen kann sich die Ladestation selbst reaktivieren
- Die Peripherie, die zum Laden der an die MPS angeschlossenen Geräte, stellt genügend Strom zur Verfügung, um diese aufzuladen
- Die gemessenen und empfangenen Wetterdaten werden auf einem Display angezeigt
- Der Raspberry Pi kann sich mit dem Mobilfunknetz verbinden

#### 3.1.2 Wunschkriterien

- Das Gehäuse ist witterfest
- Für den Administrator der MPS steht eine Website zur Verfügung mit gemessenen Werten der Station und eventuellen Fehlermeldungen

#### 3.1.3 Abgrenzungskriterien

- Der Benutzer muss sein Ladekabel selbst zur Verfügung stellen
- Der web-bezogene Wetterbericht sowie die Administratorwebsite ist bei zu abgeschiedener Platzierung der MPS eventuell nicht verfügbar
- Die Ladestation ist bei zu hoher Entladung der Akkumulatoren nicht benutzbar

## 3.2 Produkteinsatz

### 3.2.1 Anwendungsbereiche

Die Idee der Ladestation ist primär mit den Gedanken an Bergtouren entstanden. Hier sollte sie an Orten aufgestellt werden, an welchen länger verblieben wird, um genügend Zeit zum Aufladen zur Verfügung zu haben. Bei Bergtouren wären dies Gipfelkreuze, Hütten und Biwaks. Jedoch kann die Ladestation auch an anderen Orten verwendet werden, welche nicht über ein Anbindung zu einem Stromnetz verfügen.

### 3.2.2 Zielgruppe

Die primäre Zielgruppe besteht aus Sportlern und Hobbyisten, welche fernab des Stromnetzes ihren Tätigkeiten nachgehen.

### 3.2.3 Betriebsbedingungen

Für einen problemlosen Betrieb muss die Ladestation an Orten mit möglichst hoher Sonneneinstrahldauer platziert werden. Die Solarzelle sollte so ausgerichtet sein, dass sich die Absorberfläche möglichst lange im maximalen Sonneneinfallswinkel befindet.

Sollte sich die Ladestation längere Zeit ohne Sonneneinstrahlung finden, wird die Station bis zur Wiederaufladung heruntergefahren.

## 3.3 Produktumgebung

### 3.3.1 Software

Bereits am System vorinstalliert

### 3.3.2 Hardware

Raspberry Pi 4B als zentrale Steuereinheit

GSM Modul IOT-GA6 für die Mobilnetzanbindung

LCD-Display JRP5002 als Benutzerinterface

## 3.4 Produktfunktionen

### /F010/ System mit Spannung versorgen

Die Energie der Solarzelle versorgt die gesamte Ladestation.

### /F011/ Internen Pufferakku sicher aufladen

Über die Lade- und Balancingschaltung wird überschüssige Energie der Solarzelle im internen Akkupack gepuffert. Durch Schutzfunktionen wird eine Langlebigkeit sowie gefahrlose Nutzung des Produkts gewährleistet.

### /F012/ Externen Akku aufladen

Die entworfene Ladevorrichtung lädt, mit Zusatz eines Ladekabels, angeschlossene Akkus.

### /F020/ Messung interner elektrischer Größen

Über Messschaltungen werden Versorgungsspannungen und Ausgangstrom vom Raspberry Pi eingelesen.

### /F021/ Messung des Temperatursensors

Ein Sensor nimmt Luftdruck und Temperatur auf und kommuniziert diese an den Raspberry Pi.

### /F022/ Raspberry Pi agiert als Webserver

Auf dem Raspi wird eine Website gehostet, welche die Messdaten aus /F020/ und /F021/ für eine Ferndiagnose zugänglich macht.

### /F030/ Verbindung zum Mobilfunknetz

Der Mikrocontroller ist über das GSM-Modul mit dem Mobilfunknetz verbunden

### /F031/ Externe Wetterdaten

Über die Netzanbindung wird ein aktueller Wetterbericht abgerufen.

### /F040/ Display zeigt gemessene Daten

Die Daten aus /F021/ und /F031/ werden auf einem Display visualisiert, um Benutzer zugänglich zu werden

### 3.5 Produktdaten

#### **/D020/ Spannungsdaten**

Messwerte aus **/F020/**. Werden verwendet, um Kenngrößen wie Spannung und Ausgangsleistung der Akkumulatoren zu visualisieren.

#### **/D021/ Wetterdaten**

Messwerte aus **/F021/**. Werden auf dem Display visualisiert (**/F040/**) um dem Benutzer die Entwicklung von Luftdruck und Temperatur zugänglich zu machen.

#### **/D030/ Mobilfunknummer**

Die Mobilfunknummer über welche die Kommunikation mit dem GSM-Modul möglich ist.

### 3.6 Produktleistungen

#### **/L010/ Robustheit**

Der Benutzer soll sich darauf verlassen können, dass die Ladestation nicht durch natürliche Einflüsse beschädigt wird und dass keine Gefahren von dieser ausgehen.

#### **/L020/ Effizienz**

Aufgrund der Inkonsistenz der Sonneneinstrahlung wird angestrebt die Schaltung möglichst energiesparsam zu gestalten, um Ausfälle der Station größtenteils zu verhindern.

#### **/L030/ Benutzerfreundlichkeit**

Dem Benutzer soll es ohne spezielle Einführung ermöglicht werden korrekt mit der Ladestation umzugehen und die Funktionen zu verstehen.

## 3.7 Benutzungsoberfläche

### 3.7.1 Display

Das Display soll, wie in **F040** beschrieben, dem Benutzer die Möglichkeit geben sich einen Überblick über das Wetter zu verschaffen. Hierfür wird eine Historie der vor Ort gemessen Wetterdaten visualisiert, sowie ein lokaler Wetterbericht, welcher von einem öffentlichen Wetterdatensystem bezogen wird, angezeigt. Diese Anzeige wird bereits bei der Inbetriebnahme konfiguriert und ist nicht von dem Benutzer einzustellen. Nähere Beschreibung unter 5.5.4.

### 3.7.2 Ladevorrichtung

Für die Primärfunktion der Ladestation werden USB-Ladebuchsen zur Verfügung gestellt. Die Benutzer müssen ein, zu ihrem Gerät passendes, Ladekabel selbst mit sich führen. Dieses muss korrekt an der Ladevorrichtung angeschlossen werden.

## 3.8 Qualitätszielbestimmungen

	sehr wichtig	wichtig	weniger wichtig	unwichtig
Robustheit	x			
Zuverlässigkeit		x		
Korrekttheit		x		
Benutzerfreundlichkeit	x			
Effizienz	x			
Portierbarkeit				x
Kompatibilität			x	

Zuverlässigkeit: Aufgrund von Wind und Wetter ist es nicht möglich für eine hundertprozentige Funktion garantieren zu können

Korrekttheit: Aufgrund von begrenzter Zeit und Priorisierung andere Qualitätszielbestimmungen wurde die Korrektheit nur als wichtig eingestuft

Portierbarkeit: Als unwichtig eingestuft, da die Station nur für stationären Betrieb vorgesehen ist

Kompatibilität: Es ist kein Datenaustausch der Station mit Drittgeräten vorgesehen.

### 3.9 Globale Testszenarien und Testfälle

#### /T010/ System mit Spannung versorgen

Die Ein- und Ausgangsspannungen der Spannungswandler werden gemessen.

#### /T011/ Internen Pufferakku aufladen

Überprüfung des Ladereglers und der Akku Be- und Entladung. Hierfür wird die Akkuspannung sowie wichtige Potentiale des Reglers überwacht. Sicherstellung, dass keine Gefahr von dem Akkupack ausgeht.

#### /T012/ Externen Akku aufladen

Verbrauchergerät wird an der Ladevorrichtung angeschlossen und der Ladevorgang beobachtet.

#### /T020/ Messung interner elektrischer Größen

Die Größen werden mit einem Digitalmultimeter bestimmt und mit den Werten verglichen, welcher der Raspi selbst aufnimmt und auf der Website ausgibt.

#### /T021/ Messung des Temperatursensors

Die durch den Raspi gemessene Temperatur wird mit der manuell gemessenen Umgebungstemperatur verglichen.

#### /T022/ RaspberryPi agiert als Webserver Host

Zugriff auf die am Raspi gehostete Website aus einem nicht lokalem Netz.

#### /T030/ Verbindung zum Mobilfunknetz

SMS vom Raspi aus an Mobiltelefon gesendet.

#### /T031/ Externe Wetterdaten

Wetterbericht wird auf dem Raspi angezeigt.

#### /T040/ Display zeigt gemessene Daten

Anzeige des gewünschten Resultats.

## **3.10 Entwicklungsumgebung**

### **3.10.1 Software**

Eagle 9 für den Schaltplan- und Platinenentwurf

Visual Studio Code für Programmierung der Raspi Software

### **3.10.2 Hardware**

Raspberry Pi 4B als zentrale Steuereinheit

GSM Modul IOT-GA6 für die Mobilnetzanbindung

### **3.10.3 Orgware**

kanbanflow.com für die Organisierung des Workflows

OneDrive als Cloudspeicher

## 4 Organisation - Projektmanagement

---

### 4.1 Projektteam

Name	Individuelle Themenstellung	Klasse	Arbeitsaufwand
Leon Christopher Hipf (Hauptverantwortlich)	Hardwareentwurf der Ladestation	5CHEL	180 Stunden
Thomas Fellner	Entwicklung eines Webinterface zur Ferndiagnose	5CHEL	180 Stunden

Abbildung 2 Projektteam

## 4.2 Individuelle Aufgabenstellungen inkl. Arbeits- und Terminplan (GANTT-Diagramme)

### 4.2.1 Leon Hipf

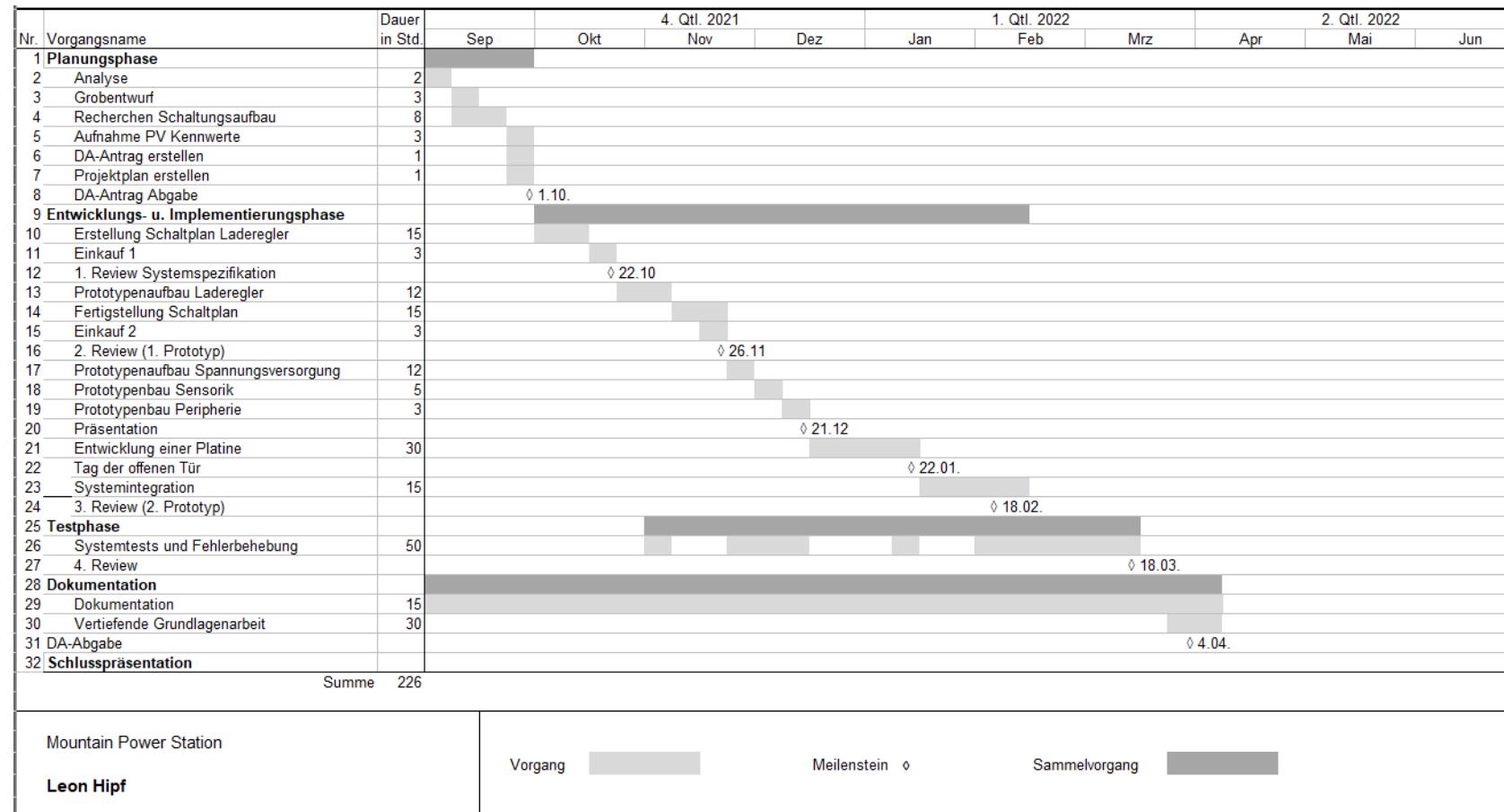


Abbildung 3 Individuelle Aufgabenstellung Leon Hipf

#### 4.2.2 Thomas Fellner

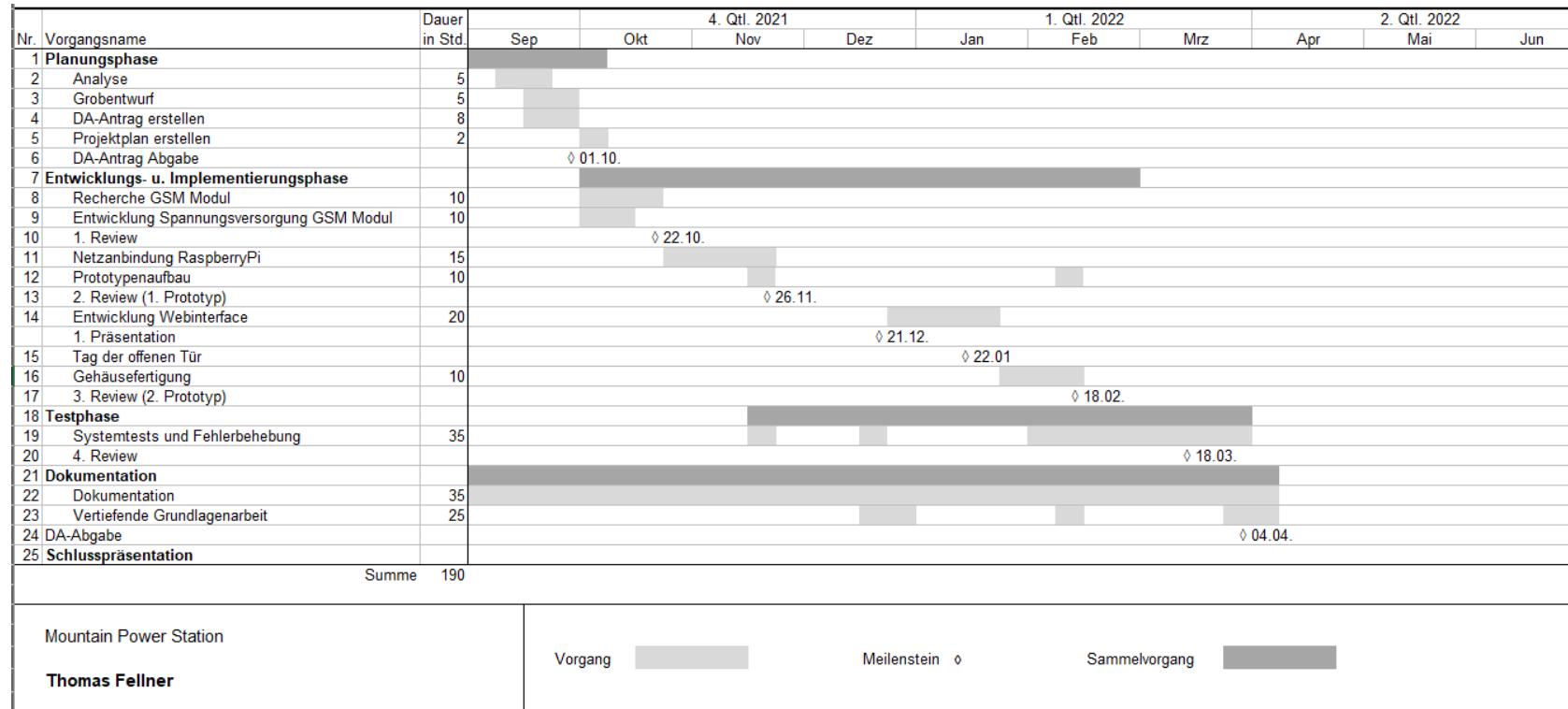


Abbildung 4 Individuelle Aufgabenstellung Thomas Fellner

## 5 Grundlagen und Methoden

### 5.1 Hardwareentwicklung

#### 5.1.1 Vorgehen

Die Entwicklung der Hardware kann in mehrere Phasen unterteilt werden:

1. **Blockschaltbild:** Initial wird ein grobes Blockschaltbild basierend auf den Ziel Kriterien erstellt. Im Laufe der Planung werden hier noch Änderungen vorgenommen. Sobald ein Überblick über die Komponenten und deren Funktionen besteht, wird jede im Einzelnen genauer betrachtet, um die passenden Bausteine für die jeweilige Aufgabe zu finden. Die Funktionsblöcke basieren meist auf einem, speziell für die Aufgabe ausgewähltem Chip.
2. **Schaltung:** Diese Chips benötigen aber noch eine externe Beschaltung, die dimensioniert werden muss. Die notwendigen Komponenten müssen an die Anforderungen der Schaltung abgepasst sein. Hinweise dazu liefert das Datenblatt des Herstellers. Weiters ist die Verfügbarkeit der Bauteile bei einem Lieferanten zu überprüfen. Das Ergebnis dieses Schritts ist ein vorläufiger Schaltplan.
3. **Breadboard-Testing:** Für die IC's werden SMD auf THT Adapter gefertigt. Somit können die Schaltungen am Breadboard aufgebaut werden. Der große Vorteil besteht darin, Fehler schnell zu finden und sie korrigieren zu können. Im Falle eines Fehlers in der Dimensionierung, wird dieser im Schaltplan korrigiert. Die neue Version des Schaltplans wird erneut aufgebaut. Die einzelnen Funktionen werden nach und nach getestet, bis ein Block vollständig verifiziert wird. Diese Vorgehensweise des Prototypings ist allerdings nur begrenzt möglich. Bei höheren Strömen und / oder Frequenzen ist das Testen am Breadboard leider nur noch begrenzt möglich.
4. **Modulplatinen:** Für Schaltungsböcke, auf die das zutrifft, werden einzelne Modulplatinen entwickelt. Falls weitere Fehler auftreten, können diese leichter behoben werden, da es weniger potentielle Fehlerquellen gibt. Bei den Layouts ist es

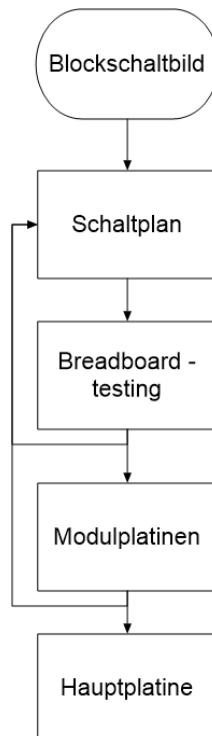


Abbildung 5 Vorgehen in der  
Hardwareentwicklung  
Flussdiagramm

wichtig sich an die im Datenblatt vorgegebenen Richtlinien, sowie allgemein gültige Regeln zu halten.

- 5. Hauptplatine:** Nach der endgültigen Verifizierung aller Schaltungsteile können sie auf einer finalen Platine zusammengeführt werden. Auf dieser Hauptplatine werden alle Komponenten integriert.

Jeder Block des Blockschaltbildes wird noch im Detail erklärt werden. Dazu werden noch einige Grundlagen benötigt, auf die in den nächsten Kapiteln eingegangen wird.

### 5.1.2 Funktion eines Buck Converters

Ein Buck Converter ist ein Schaltregler und hat die Aufgabe, eine Gleichspannung in eine kleinere Gleichspannung umzuwandeln. Im Grunde kann er durch folgende Schaltung dargestellt werden.

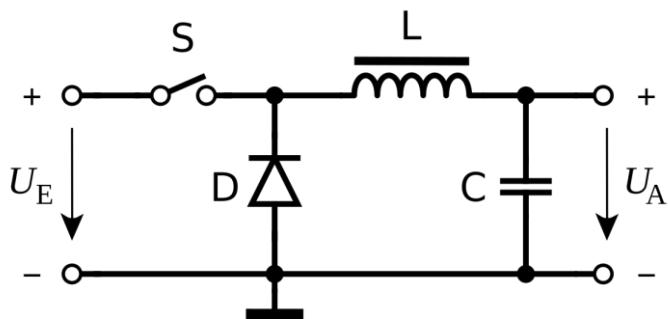


Abbildung 6 Buck Converter Ersatzschaltbild

Der Switch wird in der Praxis meist durch einen IC realisiert. Die gewünschte Ausgangsspannung wird erreicht, indem sich der Schalter mit einer hohen Frequenz öffnet und schließt. Daraus ergibt sich ein bestimmter Duty Cycle. Die Ausgangsspannung errechnet sich aus der Multiplikation des Duty Cycle mit der Eingangsspannung. Bei einer Eingangsspannung von 10V und einem Duty Cycle von 40% ergeben sich somit 4V am Ausgang. Ein tieferer Einblick zur Funktionsweise eines Buck Converters kann man in dem Artikel „Basic Calculation of a Buck Converter's Power Stage“ [1] von TI. Der Strom durch die Spule ist somit eine Dreiecksfunktion, wie in der untenstehenden Grafik veranschaulicht. Durch diese Stromschwankungen würden sich am Ausgang aber auch Spannungsschwankungen ergeben. Der Kondensator am Ausgang „glättet“ aber den Strom, somit ist der Ausgangsstrom genau der Durchschnitt des Spulenstroms. Die Stromdifferenz wird Spitze-Spitze Strom oder auf Englisch Peak-Peak-Current bezeichnet und wird häufig mit  $I_{PP}$  abgekürzt.

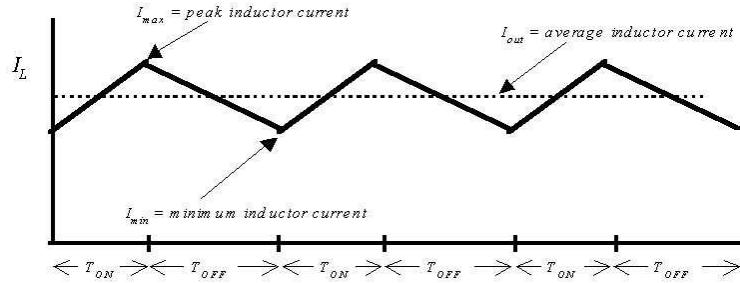


Abbildung 7 Spulenstrom eines Buck Converters [1]

Wenn jedoch der Lastwiderstand sehr groß wird und sich der Laststrom so weit vermindert, dass er während der Toff Periode den Wert 0 erreicht, so spricht man vom Lückenden Betrieb (engl. Discontinuous Mode). Die Folge sind Schwingungen in der Zeit, während der Strom auf 0 gesunken ist. Das Ergebnis am Ausgang ist somit unbrauchbar. Laut des von TI veröffentlichten Artikels „Basic Calculation of a Buck Converter's Power Stage“[2], kann der Spitzen-Spitzen-Strom mit folgender Gleichung berechnet werden.

$$I_{pp} = \frac{(V_{IN(max)} - V_{OUT}) * D}{f_s * L} \quad \text{Bei:} \quad D = \frac{V_{OUT}}{V_{IN(max)} * \eta}$$

Bei der Dimensionierung muss darauf geachtet werden, dass auch bei der geringsten Last im kontinuierlichen Modus gearbeitet wird. Anders ausgedrückt muss  $I_{pp}/2$  kleiner sein als der minimale Laststrom.

### 5.1.3 Cell Balancing

Ein essenzielles Feature bei dem Betrieb von mehreren in Serie geschalteten Akkus ist das Cell Balancing. Keine Zellen sind exakt identisch. Es gibt immer kleine Unterschiede in der Chemie von Akkumulatoren. Diese kleinen Unterschiede, wie Abweichungen im Innenwiderstand, führen nach mehreren Ladezyklen zu ungleichen Spannungen über den Zellen. Da beim Laden aber nur über das gesamte Batteriepack eine Ladespannung angelegt wird, kann es sein, dass einzelne Zellen ihre maximal zulässige Spannung überschreiten, während andere nicht annähernd vollgeladen sind. Das kann zur Zerstörung der Zelle führen. Um dessen vorzubeugen, muss die Spannung jeder Zelle überwacht werden um im Falle einer ungleichen Ladung, die Zellen zu auszugleichen. Man unterscheidet zwischen zwei Arten des Cell Balancings.

Die erste Variante ist das passive Balancing. Sobald eine Zelle eine bestimmte Spannung erreicht, wird ihr ein Widerstand parallel geschalten. Somit wird die Zelle in der Spannung begrenzt und zu einem kleinen Teil sogar wieder entladen. Die anderen Zellen haben somit Zeit, um beim Laden wieder aufzuholen. Der Vorteil liegt klar in der einfachen technischen Realisierbarkeit. Es muss nur ein Transistor

zwischen Zelle und Widerstand angeschlossen werden. Wenn Balancing benötigt wird, kann eine Spannung an den Transistor angelegt werden und er leitet.

Der Nachteil besteht in der Effizienz.

Sämtlicher Strom über den Widerstand wird in Wärme umgewandelt und zählt als Verlustleistung.

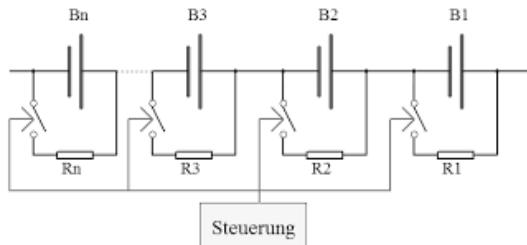


Abbildung 8 Passives Balancing [2]

Die Alternative dazu ist das aktive Balancing. Hierbei wird mit auf die Anwendung hin optimierten Schaltreglern die überschüssige Ladung von volleren Zellen auf, die mit einer geringeren Spannung verschoben, anstatt sie in Wärme umzuwandeln. Das spiegelt sich positiv im Wirkungsgrad wider. der Schaltungstechnische Aufwand ist bei dieser Variante allerdings um ein Vielfaches höher.

Zusätzliche Informationen über das Thema Cell Balancing ist im Artikel „Battery Balancing verbessert Leistung und Lebensdauer“ auf der Website all-electronics.de zugänglich[3].

#### 5.1.4 Batteriepack

Ein umgangssprachliches „Batteriepack“ besteht aus mehreren in Serie oder parallel geschalteten Akkumulatoren. Hier stehen verschiedene Alternativen zur Verfügung. Nicht jede ist allerdings für die Ladung durch ein Solarpanel geeignet. Für Solar - Applikationen werden meist entweder Bleiakkus oder Lithium-Ionen-Akkus verwendet. Im Gegensatz zu LiPo-Akkus, brauchen Bleiakkus keine komplexe Beschaltung zum sicheren Laden und Entladen. Lithium-Ionen-Akkus haben dafür den



Abbildung 9 LiPo Batterypack

Vorteil einer höheren Lebensdauer und Energiedichte. Somit wird für eine höhere Kapazität weniger Platz benötigt. Aus diesem Grund wurde eine Unterform der Lithium-Ionen-Akkus gewählt – Lithium Polymer Akkus. Der gewählte

Akkumulator wurde von dem Hersteller Melasta gefertigt und ist extra für hohe Entladungsströme ausgelegt. Eine Zelle hat eine nominale Spannung von 3,7V. Für das Laden von Handys wird eine Spannung von 5V benötigt. Bei den Varianten von ein oder zwei Zellen in Serie würde einmal ein Boost und einmal ein Buck Converter benötigt werden. Diese Converter haben allerdings Dropout Spannung. Diese entsteht durch interne Komponenten, die zum Ausgang in Serie geschalten sind, wie ein Transistor oder ein Shunt-Widerstand. Vor allem wenn die Zellen beinahe entladen oder vollständig geladen sind, kann dies dazu führen, dass die benötigte Spannung von 5V nicht mehr erreicht werden kann. Aus diesem Grund werden 3 Zellen in Serie geschalten. Um die Kapazität zu verdoppeln, wird zu jeder Zelle noch eine weitere parallel geschalten. Somit ergibt sich für das Batteriepack eine 3S2P Konfiguration. Die Zahl vor dem „S“ steht für die Anzahl der in Serie geschalteten Zellen. Die Zahl vor dem „P“ für die Anzahl der parallel geschalteten Zellen

Die Kapazität einer Zelle beläuft sich auf 10Ah. Vollständig geladen liegt am Akku eine Spannung von 12,6V an. Somit ergibt sich die folgende Leistungskapazität:

$$C = 3 * 4,2V * 2 * 10Ah = 252Wh$$

Der Raspberry Pi wird mit 5V versorgt und benötigt zwischen 500mA und 1000mA. Er ist die einzige Komponente die stets Energie des Akkus verbraucht. Das Display wird zur Erhöhung der Effizienz nur bei der Betätigung eines

Schalters für eine gewisse Zeit aktiviert.

Somit verbraucht die MPS bei

Nichtbenutzung im Durchschnitt 3,75Wh.

Auch wenn die Sonne nicht scheint, kann der Raspberry und somit der Webserver für theoretisch fast drei Tage betrieben werden. Durch die Verwendung des LCD's oder der Ladefunktion kann diese Dauer drastisch reduziert werden.

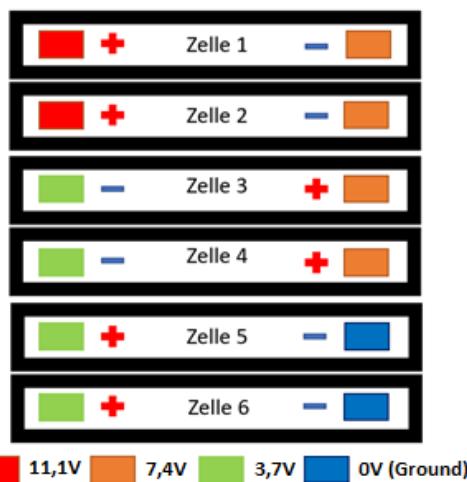


Abbildung 10 Aufbau Batteriepack

Durch die mechanische Konstruktion des

Akkus soll das Batteriepack so platzsparend wie

möglich ausgeführt werden. Dazu werden die Zellen wie in der Grafik gezeigt

übereinandergelegt. Eine schwarze Box entspricht einer Zelle. Die Kontakte mit derselben Farbe sind miteinander verbunden. Blau ist der Ground des Batteriepacks, Grün entspricht 3,7V,

Orange 7,4V und Rot ist der Plus Pol (11,1V). Wie in der Grafik visualisiert, werden die parallelen Zellen jeweils direkt miteinander verbunden. Danach werden diese Paare gegengleich übereinandergestapelt, um sie leicht in Serie schließen zu können. Die Kontakte der Zellen sind ca.  $15 \times 10$ mm große Plättchen. Um sie miteinander zu verbinden, wurde durch jedes, ein Loch mit dem Durchmesser 3,4mm gebohrt. Mit M3 Schrauben und Muttern, wurden die Plättchen laut der Abbildung 10, miteinander verbunden. Um die Kabel an alle 4 Pole zu befestigen, werden Kabelschuhe mit einer Hülse an sie gecrimpt. Somit können die Kabel bei jedem Pol befestigt werden. Für die Kabel des Plus- und Minuspols wurden aufgrund des hohen, möglichen Stromes Kabel mit einem Querschnitt von  $2\text{mm}^2$  verwendet. Um Kurzschlüsse vorzubeugen, wurden alle Pole mit Schrumpfschläuchen isoliert.

### 5.1.5 Das Solarpanel

Das Hauptkriterium für die Auswahl des Solarpanels ist die Leistung. Das Laden von Handys oder ähnlichen Geräten kann sehr viel Strom in Anspruch nehmen. Um zu verhindern, dass die Batterie vollständig entladen wird, muss das Solarpanel in der Lage sein, diese schnell wieder aufladen zu können. Jedoch sollte keine allzu große Fläche für das Solarpanel beansprucht werden und auch das Preis-Leistungs-Verhältnis muss akzeptabel sein. Somit wurde ein Panel gewählt mit 50W, laut dem Hersteller. Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom sind angegeben bei 22,8V und 2,92A und die Fläche beläuft sich auf knapp  $0,3\text{m}^2$ . Im Zuge einer Laborübung wurden die UI Kennlinie, aus welcher der MPP ermittelt werden kann, sowie der Einfluss von Beschattung an dem Panel ermittelt.

### Übungsdurchführung

#### Aufnahme der UI Kennlinie:

Die Schaltung wurde wie unten gezeigt aufgebaut. Als Lastwiderstand wurde ein Schiebewiderstand von 500 Ohm verwendet, welcher für die entsprechende Leistung geeignet ist. Die Sonnenstrahlung wurde mit einer 230V/500W Glühlampe simuliert. Die Lampe wurde in einer Entfernung von 27 cm aufgestellt. Ein Foto des Messaufbaus ist zusätzlich unter dem Punkt Schaltung zu betrachten. Anschließend wurden durch Messung von anliegender Spannung am Modul und abgegebenem Strom die UI – Kennlinie erstellt sowie der Verlauf der Leistung dargestellt.

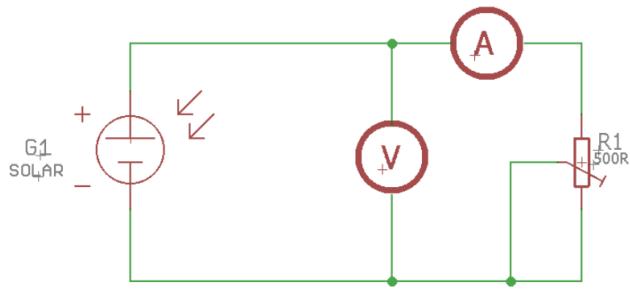


Abbildung 11 Versuchsaufbau zur Aufnahme der UI Kennlinie des Solarpanels

Abbildung 12 Schaltung zur Aufnahme der UI Kennlinie des Solarpanels

RI	U	I	P
$\Omega$	V	mA	W
Leerlauf	20,25	0	0
582	20,14	35	0,7049
485	20,1	41	0,8241
455	20,05	43	0,86215
399	19,99	49	0,97951
351	19,93	55	1,09615
300	19,85	65	1,29025

Tabelle 1 UI Kennlinie

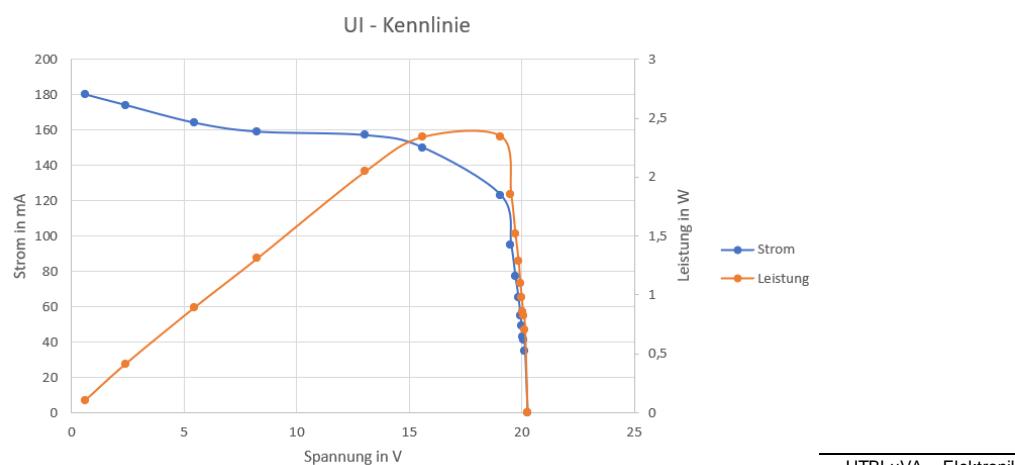


Abbildung 13 UI Kennlinie

Aus der Messung gehen wichtige Kennwerte wie die Leerlaufspannung von 20,25V und der Kurzschlussstrom von 180mA hervor. Außerdem ist bei der Leistungskennlinie, der Leistungsverlauf und der MPP ablesbar. Dieser liegt bei einer Spannung von ca. 17,5V. Bei dieser Messung beträgt er ca. 2,5W. Dieser Wert sowie die Ergebnisse für die Stromstärke werden im realen Betrieb unter Sonnenlicht jedoch noch weiter in die Höhe gehen, da die verwendete 500W Glühbirne weit nicht dieselbe Strahlungsleistung wie Tageslicht aufweist.

Anmerkung Kurzschluss: Bei dem Kurzschluss wurde trotzdem eine Spannung von 0,59V gemessen obwohl eigentlich 0V anliegen müssten. Der Grund ist das Potentiometer. Der Kurzschlussstrom wurde wie in obiger Schaltung gemessen und das Potentiometer wurde idealerweise auf 0 Ohm gestellt. Unter realen Bedingungen floss der Strom dennoch über einen kleinen Widerstand. So ist der kleine Spannungsabfall zu erklären.

### Einfluss von Beschattung

Die Schaltung bleibt bei dieser Übung gleich wie bei der Vorgängerübung. Der Lastwiderstand wurde auf 134 Ohm eingestellt und während der Messung nicht verändert. Somit ergab sich eine Spannung von 17,92V. Danach wurden Strom und Spannung, bei verschiedenen Abdeckungsstufen gemessen.

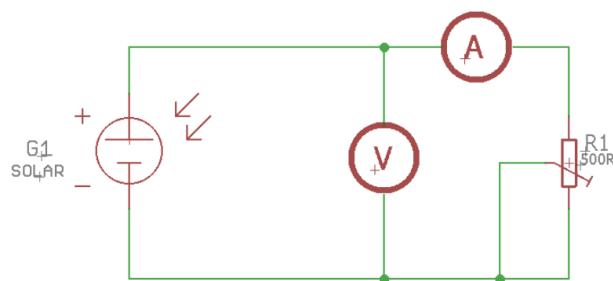


Abbildung 14 Schaltung zur Ermittlung des Einflusses von Beschattung beim Solarpanel

Verdeckung %	U		P
	V	mA	W
0	17,92	128	2,29376
10	17,7	126	2,2302
15	12,7	90	1,143
20	10,7	81	0,8667
25	5,4	9	0,0486
30	0,63	4	0,00252
40	0,3	2	0,0006
50	0,15	1	0,00015

Tabelle 2 Einfluss von Beschattung beim Solarpanel

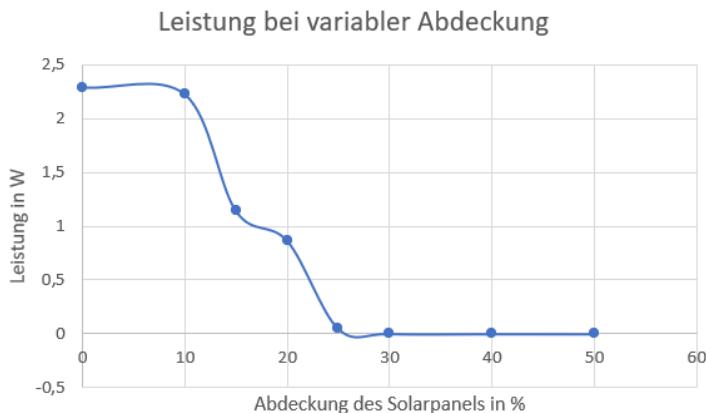


Abbildung 15 Einfluss von Beschattung beim Solarpanel

Die Kennlinie zeigt die Ausgangsleistung des Solarpanels, wenn ein Teil dessen abgedeckt wird.

Im realen Betrieb kann dies an einem sonnigen Tag durch z.B. eine vorbeiziehende Wolke passieren. Die Problematik besteht dabei am Inneren Aufbau des Panels, welches aus vielen kleinen Solarzellen besteht, die miteinander in Serie geschaltet sind, um eine höhere Spannung am Ausgang zu erzielen. Bei Verdunklung einzelner Zellen, fallen diese nicht nur als Quelle aus, sondern werden auch noch hochohmig und somit zum Verbraucher. Bis zu 10% nehmen keinen erheblichen Einfluss auf die Ausgangsleistung. Von 10% bis 30% ist allerdings ein schnell sinkender, annähernd linearer Zusammenhang zu betrachten. Jede Verdunklung, die über ein Drittel des Solarmoduls hinausgeht, macht es als Energiequelle unbrauchbar. Die Messwerte können nur noch aus der Tabelle abgelesen werden, da sie sich nur noch im mW-Bereich befinden.

**Kommentar [LH1]:** Sie wollten das ich den Aufbau eines Solarpanels beschreibe. Das habe ich doch hier getan?

### 5.1.6 Der Laderegler

#### 5.1.6.1 Allgemein

Der Laderegler ist das Bindeglied zwischen dem Akku und dem Solarpanel. Das darf unter keinen Umständen direkt an die Batterien angeschlossen werden, da Lithium-Polymer-Akkus zum Laden jeweils eine exakte Spannung von 4,2V benötigen. Auf das ganze Batteriepack gesehen, ergibt sich somit eine gewünschte Ladespannung von 12,6V.

Der Hersteller Analog Devices hat mehrere passende IC's in seinem Sortiment. Aufgrund von Lieferengpässen, welche auf die aktuelle weltweite Halbleiterknappheit zurückzuführen sind, waren keine dieser Chips verfügbar. Deshalb musste auf den asiatischen Hersteller CONSONANCE ausgewichen werden. Dieser stellt eine breite Auswahl von Lade- und Batteriemanagement-Chips zur Verfügung. Diese wurden miteinander verglichen, um so den am besten passenden, für unsere Anwendung zu finden. Der notwendige Chip muss für Lithium Polymere Akkus geeignet sein und mindestens drei Zellen in Serie unterstützen. Außerdem wird eine MPP-Tracking Funktion vorausgesetzt, um die Effizienz zu erhöhen. Dadurch wurde die Auswahl schon massiv eingeschränkt. Die schlussendliche Wahl wurde durch Zusatz-Features, wie eine Statusindikation oder eine Temperaturüberwachung bestimmt. Wir haben uns für den Chip „CN3722“ entschieden.

#### 5.1.6.2 Funktionen

Dieser IC wurde extra für Solaranwendungen gefertigt. Somit sind die Funktionen des Chips perfekt auf diese Aufgabe zugeschnitten.

- Maximum Power Point Tracking (MPPT): Jedes Solarpanel hat einen bestimmten Punkt, an dem es am effizientesten arbeitet. Dieser Punkt kann mithilfe eines Spannungsteilers eingestellt werden.
- Großer Spannungsbereich am Eingang: Speziell für Solaranwendungen ist es wichtig, dass der Chip mit allen möglichen Eingangsspannung arbeiten kann
- Hohe Ladeströme möglich: Mit der richtigen Beschaltung könnten Ladeströme bis 5 Ampere realisiert werden. Da der Kurzschlussstrom des Solarpanels bei den günstigsten Verhältnissen nicht mal über 2,5A steigt, ist dies ausreichend.
- Hohe Schaltfrequenz: Der CN3722 ist ein Schaltspannungsregler als Buck Converter ausgeführt. Der interne Oszillator erzeugt eine Frequenz von 300kHz.
- Unterspannungsschutz: Wenn die Spannung am Eingang unter 6V fällt, schaltet sich der Ausgang automatisch ab.
- Komplexes Ladeprogramm: Abhängig von der Spannung am Akku werden verschiedene Schritte in einem Ladezyklus durchlaufen. Diese sind in der unteren Grafik visualisiert. Falls die Batterie tiefenentladen ist, geht der Laderegler in einen sogenannten „tickle charge mode“. Dabei fließen nur 15% des eigentlichen Ladestroms. Dieser Ladestrom ist mithilfe eines Shunt-Widerstandes einstellbar. Der Akku gilt als tiefenentladen, sobald er 66,7% der Spannung, die er bei voller Aufladung hätte, unterschreitet. Sobald der

Pegel über diesem Prozentsatz liegt, geht der Laderegler in die Konstantstromphase (Constant Current Phase). Sobald sich die Spannung am Akku nah genug an der Ziel Spannung ist, kommt die Konstantspannungsphase (Constant Voltage Phase). Hierbei wird am Ausgang die gewünschte Spannung angelegt. Die Folge daraus ist die kontinuierliche Verringerung des Ladestroms. Sobald dieser 9,5% seines eigentlichen Wertes erreicht hat, gilt der Akku als vollständig geladen und der Zyklus wird beendet. Wenn die Spannung, durch externe Entladung, auf unter 95,8% absinkt, wird ein neuer Zyklus gestartet.

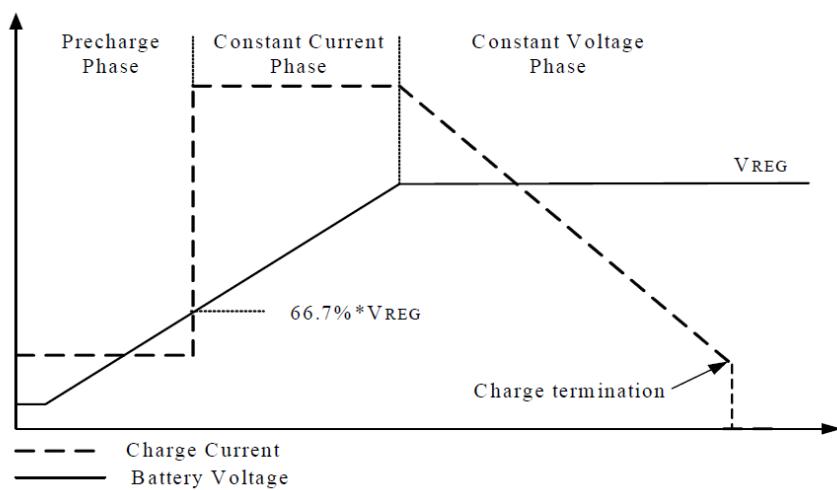
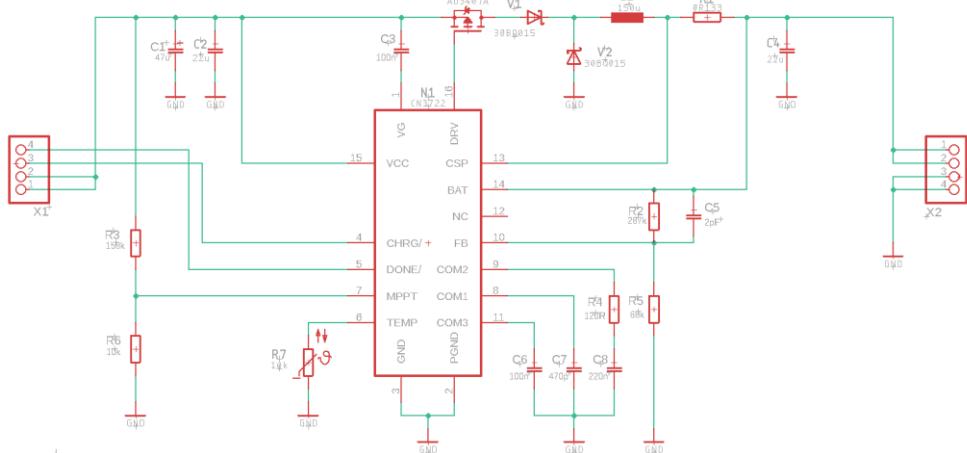


Abbildung 16 Ladevorgang CN3722

- **Sleep Mode:** Falls die Spannung am Eingang weiter sinken sollte als die gewollte Ausgangsspannung, so geht der Laderegler in einen „Schlafmodus“. Hier wird der Stromverbrauch des IC's so weit wie möglich reduziert.
- **Status Indikation:** Es sind zwei Pins im Chip integriert die anzeigen in welcher Phase sich der Laderegler befindet.
- **Temperaturüberwachung:** Um ein sicheres Laden zu gewährleisten, wird die Temperatur des Akkus während des gesamten Ladezyklus gemessen. Falls die Temperatur zu weit ansteigt oder absinkt, setzt der Ladevorgang aus. Sobald sich die Lage gebessert hat, steigt der Regler wieder beim letzten Punkt im Zyklus ein.

#### 5.1.6.3 Dimensionierung



Die Dimensionierung erfolgt laut Datenblatt[4]. Das Ergebnis ist der abgebildete Schaltplan.

Da es sich bei diesem Schaltplan, um den der Modulplatine handelt, sind die für die weitere Schaltung wichtigen Signale an Steckerleisten angeschlossen. Diese Signale sind die Eingangsspannung, die Ausgangsspannung, Ground sowie zwei Signale zur Statusindikation.

- Eingangskondensatoren (C1 und C2): Der Kondensator am Eingang muss fähig sein mit dem Ripple Strom, der durch die Spule entsteht, klarzukommen. Der im Datenblatt empfohlene Wert liegt bei  $47\mu F$ . Dieser Wert kann, da der Ausgangstrom und somit der Ripple Strom eher gering ist, übernommen werden. Um Überspannungsspitzen zu verkleinern, wird empfohlen einen kleineren Keramikkondensator parallel zum eigentlichen Eingangskondensator zu schalten. Diese besitzen im Vergleich zu anderen Kondensatortypen einen geringen ESR und ESL. Die Kondensatoren müssen den Spannungen in der Schaltung standhalten. Aufgrund der Überspannungen wurden die Kondensatoren mit einem zusätzlichen Polster im Bereich der Maximalspannung ausgewählt.
- Ausgangskondensator (C4): Da die Schwankungen ebenfalls gering sind, kann auch hier der empfohlene Wert von  $10\mu F$  gewählt werden. Auch hier wird zur Verbesserung der Performance ein Keramikkondensator verwendet.
- Spule: Im Datenblatt sind diverse Werte für Spulen vorgeschlagen abhängig von der Eingangsspannung und dem Ladestroms. Für 20V am Eingang und 2 – 3A Ladestrom ist ein Wert von  $20 – 30\mu H$  empfohlen. Daraus resultiert allerdings ein Spitzen-Spitzen

Strom von 700mA. Wenn es bewölkt ist, kann es passieren, dass das Solarpanel nur kleinere Ströme liefern kann. Um sicher im kontinuierlichen Betrieb zu bleiben wurde die Spule auf ein I<sub>pp</sub> von 100mA dimensioniert. Es ergibt sich eine Induktivität von 150µH. Wichtige Merkmale sind der maximale Strom I<sub>p</sub>, den die Spule treiben kann und der ESR, welcher geringgehalten werden muss, um Verluste zu vermeiden.

- Transistor: Für Applikationen, die einen Ladestrom von 2,5A nicht überschreiten, wurde im Datenblatt eine Empfehlung ausgesprochen. Es handelt sich um den AO3407A, einen P-Channel MOSFET.
- Schottky Dioden: Die Diode V2 treibt den Strom in der sperrenden Phase des MOSFET's. Die Diode V1 muss laut Datenblatt in der Schaltung vorhanden sein. Beide Dioden sollen vom selben Typ sein. Für Ladeströme unter 2,5A wird hier die Diode 3QBQ015 empfohlen.
- Programmierung Ladestrom: Der Strom mit dem der Akku, während der Konstant-Strom-phase geladen wird, kann mithilfe eines Shunt-Widerstands R1 eingestellt werden. Es wird ein Ladestrom von 1,5A angestrebt. Diese Stromstärke kann bei gutem Wetter vom Solarpanel geliefert werden, erhöht dabei aber nicht die Anforderungen an das Layout oder die stromführenden Komponenten. Die Spannung über diesem Widerstand wird von zwei Pins des CN3722 gemessen. Der Wert des Widerstandes kann mit folgender Formel berechnet werden:

$$R = \frac{200mV}{I} = \frac{200mV}{1,5A} = 133m\Omega$$

Auch sehr spezifische Widerstände, außerhalb der E12-Reihe, sind bei unseren gewählten Lieferanten verfügbar. RS führt einen Shunt-Widerstand mit genau 133mΩ in ihrem Sortiment.

- Programmierung Maximum Power Point: Der MPP kann mit einem Spannungsteiler eingestellt werden. Im Datenblatt wird folgende Formel zur Berechnung der MPP-Spannung gegeben:

$$V_{MPP} = 1,04 * \left(1 + \frac{R3}{R6}\right)$$

Für R6 wird ein Wert von 10kOhm gewählt. Die Spannung des Maximum Power Points liegt, wie im Kapitel „5.1.5 Das Solarpanel“ beschrieben bei ca. 17V. Nach Umstellen der Gleichung, ergeben sich 158kΩ für R3.

- Programmierung der Ausgangsspannung: Auch die gewünschte Ausgangsspannung kann mithilfe eines Spannungsteilers programmiert werden. Der Strom, welcher in den Feedback Pin fließt, liegt bei gerade mal 50nA und kann vernachlässigt werden. Auch hier wird eine Formel zur Berechnung der Ausgangsspannung angegeben:

$$V_{out} = 2,416 * \left(1 + \frac{R_2}{R_5}\right)$$

Für Lithium Polymer Zellen einer nominalen Spannung von 3,7V soll eine Ladespannung von 4,2V verwendet werden. Auf drei Zellen in Serie gerechnet ergibt es eine gewünschte Ausgangsspannung des Laderegels von 12,6V. Für R5 wird ein 68kOhm Widerstand gewählt. Daraus resultieren 287kΩ für R2.

- Schleifenkompensation: Die Spule sowie der Ausgangskondensator erzeugen eine Phasendrehung des Ausgangssignals. Zum Regeln muss diese Phasendrehung kompensiert werden. Dies gelingt mit einigen passiven Bauelementen. Oft ist diese Kompensationsschaltung im Chip integriert, um externe Beschaltung zu minimieren. Die Kompensation ist allerdings auf die im Datenblatt angegebenen Werte für die Spule und den Ausgangskondensator zugeschnitten. Bei starker Abänderung einer dieser zwei Komponenten, in unserem Fall bei der Spule, kann auch eine Änderung in der Kompensationsschaltung notwendig sein. Da die Berechnung dieser Kompensationsschaltung relativ komplex ist, wurde die Funktion des Laderegels mit den vom Hersteller empfohlenen Bauteilwerten getestet und verifiziert.

**Kommentar [LH2]:** Sie haben gefragt woher die Phasendrehung kommt. Ich habe diese Information von Herr Strasser. Er hat mir aber nur gesagt das eine Phasendrehung auftritt aber nicht woher diese kommt. Wegen seinem, und jetzt meinem Krankheitsfall konnte ich ihn nicht fragen.

- Feed Forward Kondensator[5]:  
Dieser Kondensator wird parallel zum oberen Widerstand des Spannungsteilers am Ausgang geschalten. Er verbessert die Schleifenstabilität und die Transient Performance (Übergangsleistung), des Buck Converters. Das bedeutet, dass der Ausgang nicht mehr so stark auf eine abrupte Änderung

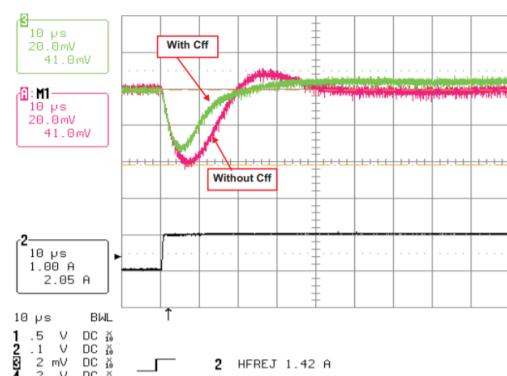


Abbildung 18 Veranschaulichung des Einflusses eines Feed Forward Capacitors

der Last reagiert, wie in nebenstehendem Beispiel gezeigt. Der Hersteller hat folgende Formel zur Berechnung des Feed Forward Kondensators bereit gestellt:

$$C_{FF} = 8 * \frac{R_5}{R_2} (pF)$$

Somit ergibt sich eine Kapazität von 1,89pF. Gewählt wurde ein Kondensator mit 2pF.

Die Grafik ist aus einem Artikel von Texas Instruments über Feed Forward

Kondensatoren.

#### 5.1.6.4 Layout

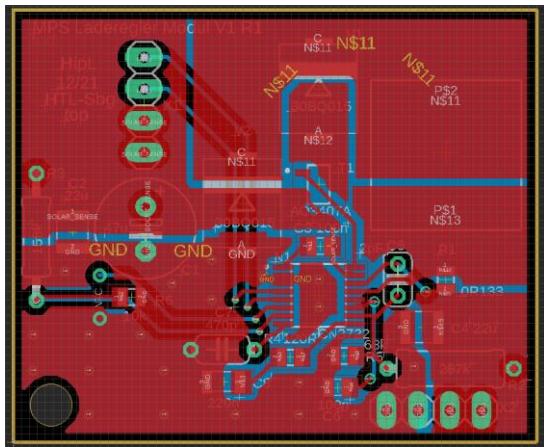


Abbildung 19 Layout Laderegler mit Polygon

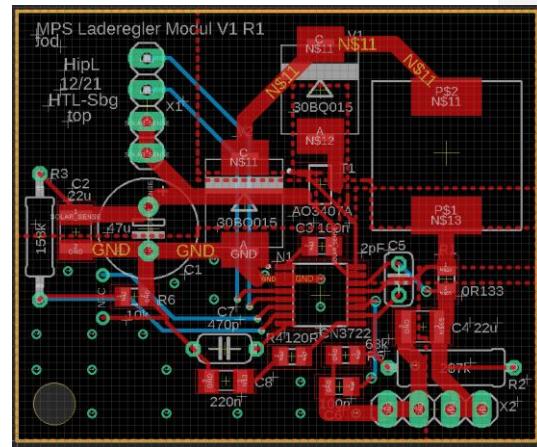


Abbildung 20 Layout Laderegler ohne Polygon

Für Testzwecke wurde die Schaltung als Modul auf einer einzelnen Platine gefertigt.

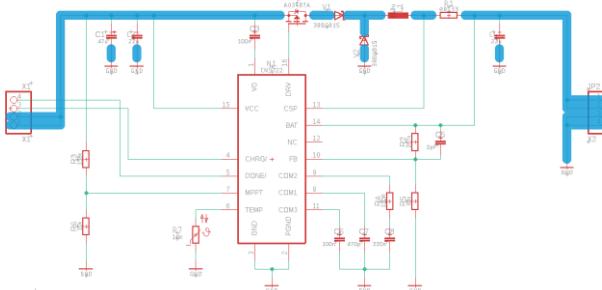


Abbildung 22 Schaltung CN3722 mit eingezeichnetem Stromweg

Beim Erstellen des Layouts für den Laderegler wurde sich so gut wie möglich an die im Datenblatt angegebenen Layout Considerations gehalten. Am wichtigsten ist, die stromführenden Leitungen so knapp wie möglich aneinander zu bringen. In Abbildung 21 und Abbildung 22 wurden alle stromführenden Leitungen blau markiert. Jeder zusätzliche Millimeter bringt ungewollten Leitungswiderstand und Leitungsinduktivität. Vor allem bei Wechselströmen mit hohen Frequenzen, wie hier (300kHz) ist es notwendig das Beste aus dem Layout

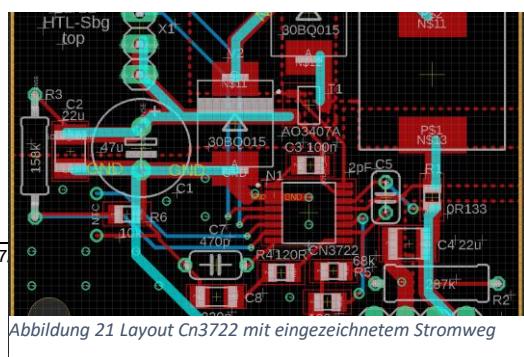


Abbildung 21 Layout Cn3722 mit eingezeichnetem Stromweg

herauszuholen um eine fehlerfreie Funktion zu gewährleisten. Um das Design so kompakt, wie möglich zu halten, wurden nach Möglichkeit SMD Bauteile verwendet.

Die Spannung am MPPT Pin ist laut Hersteller abhängig von der Umgebungstemperatur. Deshalb sollte der Chip, wenn möglich einen Abstand von Hitzequellen, wie Transistor oder Dioden haben. Große Abstände sind bei einem kompakten Layout nicht möglich, aber der Chip wurde zumindest unterhalb der kritischen Komponenten platziert. Da sich

bei hohen Strömen, die Bauteile gefährlich erhitzen können, ist es wichtig eine ausreichende Ableitung der Wärme zu gewährleisten. Dies wird hauptsächlich über die Ground-fläche übernommen. Um diese thermische Leitfähigkeit um ein Weiteres zu erhöhen, wurde auf sogenannte „Thermals“ verzichtet. Wenn diese

Thermals in der CAD-Software aktiviert sind, wird die Massefläche nicht zu 100% mit dem Pad verbunden, wie es in der Abbildung 23 Unterschied Thermals aktiviert und deaktiviert“ zu sehen ist. Die Pads sind nur über kleine Leitungen verbunden. Bei vielen Applikationen reicht die Wärmeleitung, während dem Betrieb trotzdem aus, und durch die Thermals wird die Lötfähigkeit der Platine erhöht. Außerdem wurde nicht nur für den Ground ein Polygon verwendet. Um die Leitungswiderstände zu vermindern, wurde für jede stromführende Leitung ein eigenes Polygon erstellt. Die Konfiguration des Polygons wurde wie in Abbildung 24 vorgenommen. Um die maximale Fläche zu erzeugen, wurden die Flächen übereinandergelegt. Danach wurde mit der Rank Funktion eine Priorität hinzugewiesen. Somit haben die Flächen untereinander einen fixen Abstand und der Platz wurde am effizientesten ausgenutzt. Eingestellt werden, kann der Abstand mit dem Isolate-Parameter. In unserem Fall wurde ein etwas größerer Standartwert von 24 mil gewählt. Sogenannte „Orphans“ also Flächen ohne Verbindung an irgendein Potential wurde ausgeschalten, da diese höchstens als Antennen fungieren würden. Am Bottom Layer wurde die gesamte Fläche mit Ground verbunden. Um die

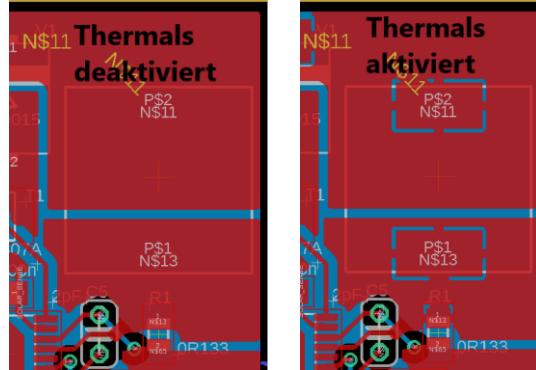


Abbildung 23 Unterschied Thermals aktiviert und deaktiviert



Abbildung 24 Einstellung Polygon

Potentiale oben und unten ident zu halten, wurden die beiden Ground Polygone alle paar Millimeter mit Vias (Durchkontakteierungen) verbunden.

Laut den HTL Richtlinien[6] wird die Platine mit folgenden Informationen beschriftet:

Platinenname, Versionsnummer, Revisionsnummer, Namenskürzel, Datum, die Aufschrift HTL-Sbg und jeweils top und bot für die Beiden Layer. Bei Fertigung in der Schule müsse dies mit Kupfer geschrieben werden. Da diese außerschulisch gefertigt wurde, konnten diese Informationen mit Siebdruck aufgedruckt werden. Befestigt wird die Platine auf der Hauptplatte mit den beiden Stiftleisten. Zur zusätzlichen Stabilität wurde an einer Ecke ein Loch gebohrt. Somit kann die Platine zusätzlich mit einer M3 Schraube angeschraubt werden.

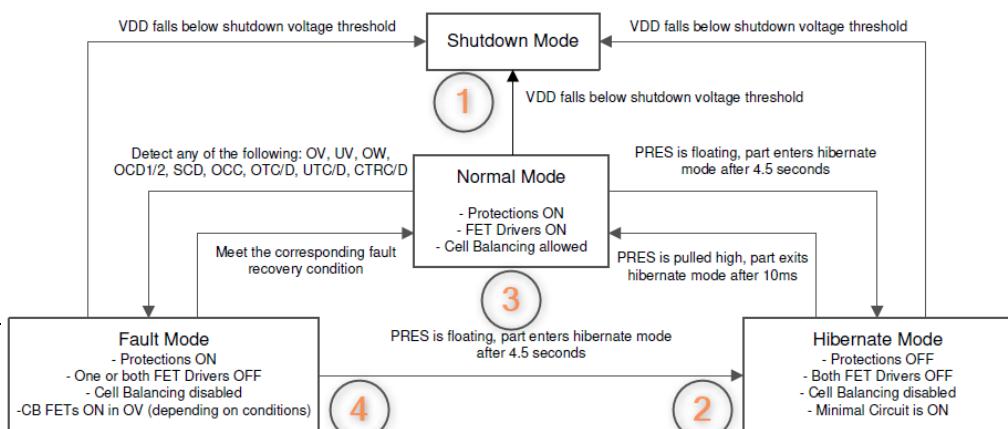
### 5.1.7 Protection Circuit

#### 5.1.7.1 Allgemein

Eine sichere Ladung des Akkus wird durch den Laderegler sichergestellt. Von außen ist der Akku allerdings nicht abgesichert. Da bei falscher Verwendung LiPo-Akkus in Flammen aufgehen können, die schwer wieder zu löschen sind, müssen weitere Sicherheitsmaßnahmen getroffen werden. Die Zellen können auf viele Wege beschädigt werden. Beispiele sind zu große Ströme beim Laden oder Entladen, Kurzschlüsse, Überhitzung oder Unterkühlung sowie auch eine Überspannung oder Unterspannung, alias Tiefentladung. Die Hauptaufgabe der Schutzschaltung ist es, das Batteriepack von außen zu schützen. Es soll den Akku aber ebenfalls von schaltungsinternen Gefahren, wie einer eventuellen Fehlfunktion des Ladereglers beschützen. Eine weitere unentbehrliche Funktion ist das Cell Balancing. Gesucht ist ein Chip, welcher alle genannten Features aufweist. Gewählt wurde ein IC der BQ77915 Familie von Texas Instruments.

#### 5.1.7.2 Funktionen

Die BQ77915 Familie stellt eine Reihe verschiedener Chips für den Schutz von diversen Lithium



Ionen- / Lithium Ionen- Akkupacks zur Verfügung. Mit einem Chip können Packs mit 3 – 5 seriellen Zellen geschützt werden. Der IC hat den Vorteil, einen sehr geringen Stromverbrauch zu besitzen, was bei der Akku-versorgten Applikation, wie in diesem Fall von Nöten ist. Im Betrieb können vier verschiedene Modis auftreten.

Falls die Versorgungsspannung unter den Mindestwert sinkt, geht der Chip in den **1. Shutdown Mode**. Währenddessen schaltet der Chip alle Funktionen ab und vermindert somit den Stromverbrauch auf unter  $1\mu\text{A}$ . Für z.B. den Transport des Akkupacks steht der **2. Hibernate Mode** zur Verfügung. Hierbei werden alle Schutzfunktionen sowie das Cell Balancing abgestellt, und die Transistoren, welche Ladung oder Entladung des Akkus ermöglichen, werden deaktiviert. Aktiviert wird der Modus, indem der PRES Pin floatend gelassen wird. Indem man den Pin auf High zieht, kann man wieder zurück in den **3. Normalmode** gelangen. In diesem sind alle Schutzfunktionen und das Balancing aktiv. Falls ein Fehler auftritt, geht der Chip in den **4. Fault Mode**. Abhängig vom Fehler werden Aktionen getätigt, welche die Situation deeskalieren. Um dies zu bewerkstelligen, befinden sich auf der Minusleitung des Batteriepacks ein Charge- und ein Discharge- MOSFET. Diese können vom IC, unabhängig voneinander angesteuert werden. Somit kann der Akku jederzeit von der Last getrennt werden.

Die Werte, bei denen der Chip reagiert, beispielsweise eine Spannungsüberhöhung, wird durch sogenannte „Tresholds“, (zu Deutsch: Schaltschwellen) festgelegt. Folgende Schutzfunktionen können mit einem BQ77915 Chip implementiert werden (in den Klammern befinden sich die im Datenblatt verwendeten Kürzel für den jeweiligen Fehlerfall):

- Überspannung (OV): Dieser Fehler tritt auf, wenn zumindest eine Zelle über dem Überspannungstreshold liegt. Der Charge – FET wird in diesem Fall deaktiviert. Falls in dieser Zeit der Akku von außen entladen werden sollte, wird dies detektiert und der CHG – FET wieder angesteuert. Um wieder in den Normalmode zurückzukehren, muss die Spannung der betroffenen Zelle wieder auf Überspannungstreshold minus der Überspannungshysterese absinken.
- Unterspannung (UV): Als äquivalent zum Überspannungsschutz, tritt dieser Fehler ein, wenn die Spannung einer Zelle unter die zugehörige Schwelle fällt. Hier wird nun der Discharge – FET deaktiviert. Durch die vorgegebene Beschaltung kann das Akkupack aber dennoch geladen werden. Wenn die Spannung der betroffenen Zelle auf den Treshold plus die Hysterese steigt, geht der Chip zurück in den Normalmode.

- Open Wire Detection (OW): Falls innerhalb der Schaltung Fehler auftreten oder die Station beschädigt wird, sodass Verbindungen zum Batteriepack verloren gehen, kann dies vom Chip detektiert werden. Infolgedessen werden beide Transistoren abgeschaltet.
- Überstromschutz (OCD1/OCD2): Der Strom, welcher ins Batteriepack fließt bzw. herausfließt wird's jederzeit mithilfe eines Strommesswiderstandes überwacht. Falls der Spannungsabfall an diesem Widerstand zu hoch wird und somit einen hohen Strom anzeigt, werden beide Transistoren nach einem kurzen einstellbaren Delay abgeschaltet. Nach einer gewissen Zeit werden beide wieder angesteuert und es wird erneut auf einen Überstrom geprüft.
- Kurzschlusschutz (SCD): Bei diesem Fehlerfall ist das Verhalten ident zum Überstromfehler. Allerdings muss hier ein sehr hoher Strom am Widerstand gemessen werden, welcher nur durch einen Kurzschluss erzeugt werden kann. Die Transistoren werden hierbei um ein Vielfaches schneller abgestellt, um Schäden an der Schaltung oder dem Akku zu vermeiden.
- Temperaturüberwachung (OTC/UTC/OTD/UTD): Hier sind vier verschiedene Fehlerfälle vorhanden. Einmal für Überhitzung und einmal für Unterkühlung. Die Schwellen bei der dieser Fehler auslöst sind jeweils noch abhängig davon ob geladen oder entladen wird. Gemessen wird die Temperatur mithilfe eines Spannungsabfalls eines temperaturabhängigen Widerstands. Der Chip kehrt wieder in den Normalmode zurück, wenn sich die Spannung über diesem Widerstand zurück in den normalen Bereich begibt.

Es gibt noch eine weitere Strombegrenzung für das Laden des Akkus (OCC). Diese Funktion wurde allerdings ignoriert, da der Strom von Seiten des Laderegler bereits auf maximal 1,5A begrenzt ist.

Für eine Dimensionierung des Chips auf die gewünschte Funktion, sind die im EEPROM festgelegten Tresholds ausschlaggebend. Von außen kann leider nicht auf das EEPROM zugegriffen werden, da gewünschten Tresholds, bei der Herstellung des Chips programmiert werden. Dafür gibt es mehrere Versionen des Protection IC's „BQ7791500“ - „BQ7791508“. Die einprogrammierten Tresholds variieren hier von Version zu Version. Gewählt werden muss die, die am ehesten den Forderungen für die eigene Applikation entspricht. In Abbildung 22 sind die verschied

enen Versionen mit den jeweiligen Tresholds dargestellt.

Abbildung 26 Verschiedene Versionen der BQ77915 Familie

Hier sind neben

Part Number	OV			UV			OW	OCD1		OCD2		SCD		OCC	
	Thre- shold (mV)	Delay (s)	Hyst (mV)	Thre- shold (mV)	Delay (s)	Hyst (mV)		Load Remo- val Reco- very (Y/N)	Current (nA)	Thre- shold (mV)	Delay (ms)	Threshold (mV)	Delay (ms)	Threshold (mV)	
BQ7791500	4200	1	200	2900	1	400	Y	100	60	180	60	180	120	0.96	60
BQ7791501	4250	1	200	2800	1	400	Y	100	35	180	60	180	120	0.96	20
BQ7791502	4200	1	200	2900	1	400	Y	100	70	180	70	180	120	0.96	70
BQ7791504	4275	1	100	2000	1	200	N								Disabled
BQ7791506	3800	1	200	2500	1	400	Y	100	50	700	100	350	300	0.4	60
BQ7791508	4200	4.5	100	3000	4.5	200	Y	100	70	1420	140	700	300	0.4	60

Part Number	Current Fault Recovery				Temperature (°C) <sup>[1]</sup>				Cell Balancing			
	Delay (ms)	Method			OTD	OTC	UTD	UTC	V <sub>START</sub> (V)	V <sub>HYST</sub> (V <sub>OV</sub> – V <sub>FC</sub> ) (mV)	V <sub>STEP</sub> (V <sub>CBTH</sub> – V <sub>CTRL</sub> ) (mV)	
BQ7791500	N/A	Load removal only (OCD1, OCD2, SCD)/load detection only (OCC)			65	45	-10	0	3.8	100	100	
BQ7791501	N/A	Load removal only (OCD1, OCD2, SCD)/load detection only (OCC)			70	50	-20	0	3.8	100	100	
BQ7791502	N/A	Load removal only (OCD1, OCD2, SCD)/load detection only (OCC)			65	45	-10	0	3.8	100	100	
BQ7791504	Disabled	N/A			Disabled				3.5	50	50	
BQ7791506	N/A	Load removal only (OCD1, OCD2, SCD)/load detection only (OCC)			65	50	-10	0	3.5	100	50	
BQ7791508	500	Load removal only (OCD1, OCD2, SCD)/load detection only (OCC)			65	50	-20	-5	3.8	100	50	

den Tresholds auch Hysteresen oder Delays abgebildet. Diese sind meist für die Rückkehr aus dem Fehlerfall in den Normalmode wichtig. Die Bedingung für diese Rückkehr wird „Recovery Condition“ bezeichnet. Die Recovery Condition „Load removal“ wird später genauer beschrieben.

Zur Realisierung des Cell Balancings wird die Spannung an jeder Zelle gemessen. Somit kann die Spannung der einzelnen Zellen bestimmt werden. Sobald eine Zelle einen Überspannungsfehler verursacht, wird das Cell Balancing für die Zelle aktiviert. Es bleibt so lange aktiv, bis die Zelle wieder auf einen im EEPROM festgelegten Wert abgesunken ist. Die Überlegungen für die Wahl des Chips sind im nächsten Kapitel „5.1.7.3 Dimensionierung“ genauer dargestellt.

### 5.1.7.3 Dimensionierung

Der Gesamtschaltplan ist bei der technischen Dokumentation, am Ende der Diplomarbeit abgebildet.

Das Ergebnis der Dimensionierung mithilfe des Datenblatts[7] ist der abgebildete Schaltplan. Im Datenblatt ist ein Beispiel-Schaltplan bereits gegeben. Hierbei kann man sich grob orientieren. Um die eigenen Voraussetzungen zu erfüllen, müssen noch einige Bauteile hinzugefügt oder entfernt werden bzw. Werte dieser Bauteile verändert werden. Im Fall der Mountain Power Station ist die Ausgangslage folgendermaßen:

- Es wird ein LiPo Akku mit drei Zellen verwendet. Keine Zelle sollte weiter wie minimal 2,9V entladen und maximal 4,2V geladen werden. Andernfalls kann das zu Schäden oder einer Reduktion der Lebensdauer führen.
- Zum Laden des Handys sollen insgesamt ca. 4A zur Verfügung stehen, für die restliche Schaltung maximal 1,5A. Somit müssen 5,5A getrieben werden können. Die Strombegrenzung sollte etwas höher liegen.
- Ein Kurzschlusschutz, welcher die Leitung schnell von der Last trennt ist erwünscht
- Am Berg gibt es ein großes Spektrum an möglichen Umgebungstemperaturen. Die planmäßige Funktion der MPS soll im Bereich von ca. -10°C bis 30°C gewährleistet werden. Die Fehlerfälle für die Temperatur sind in diesem Fall nicht ausschlaggebend für die Wahl des Chips. Solange der Akku innerhalb der gerade angegebenen Betriebstemperatur entladen werden kann, ist dies akzeptabel. Beim Laden selbst darf die Temperatur nicht so weit abfallen bzw. steigen. Um die Lebensdauer des Akkus zu verlängern, müssen die Grenzwerte hier etwas näher beieinander liegen.
- Die Funktion des Cell Balancings ist erwünscht mit einem Balancing-Strom von 50mA.
- Die „Load removal“ Funktion, bei der in bestimmten Fehlerfällen die Last entfernt werden muss, ist nicht erwünscht.

Nach diesen Vorgaben ist nun die Schaltung zu dimensionieren. Aufgrund der Komplexität wird dieser Prozess nur oberflächlich beschrieben. Für einen tieferen Einblick wird auf das Datenblatt verwiesen.

- Für drei Zellen ist nur ein einziger Protection IC notwendig. Der CBO Pin wird deshalb floatend gelassen.
- Mit den beiden Pins CTRC und CTRD könnten die Transistoren von außen beliebig gesteuert werden. In diesem Fall ist dieses Feature nicht notwendig deshalb werden beide Pins auf Ground gelegt.

- Da der Hibernate Mode nicht verwendet wird, muss der PRES Pin auf High gezogen werden. Er wird also über einen Widerstand von 10k mit der Versorgungsspannung verbunden.
- Aufgrund der Notwendigkeit des Cell Balancings wird der CBI Pin mit Ground verbunden. Die Widerstände R3, R4, R7 und R12 bestimmen den Balancing-Strom. Ein plausibler Spannungswert, bei dem Balancing eintritt ist 4,1V für die gewünschten 50mA ergibt sich somit ein Widerstandswert von  $82\Omega$ .
- Für die Wahl der IC Version waren die Schwellen für Überstromfehler und Unterspannungsfehler ausschlaggebend. Da LiPo Akkus bei Spannungen unter 3V schon permanente Schäden davontragen können standen nur noch Version Null, Zwei und Acht zur Auswahl (siehe Abbildung 22). Als Tresholds für den Überstromschutz stehen somit noch 70mV und 60mV zur Verfügung. Da 5,5A noch fließen sollen und die Messung, laut Datenblatt nur zu 20% genau ist, bietet sich als Wert für einen Shunt Widerstand  $10m\Omega$  an, in Kombination mit einer Treshold von 70mV. Die Last wird somit im idealen Fall beim Überschreiten von 7A getrennt. Wenn man die Ungenauigkeit von 20% einberechnet, ergibt sich ein Intervall von 5,6A bis 8,4A. Dies ist die beste Lösung, um den benötigten Strom sicher treiben zu können. Den Treshold von 70mV bieten nur noch Version Zwei und Acht. Da im Falle eines Kurzschlusses der BQ7791508 erst bei 30A auslöst, wurde Die Version 2 des Chips gewählt.
- Mit dem OCDP Pin kann die Zeit programmiert werden, nach der der Überstromschutz auslöst. Hier wurde mit einem 604kOhm Widerstand eine Zeit von 700ms gewählt.
- Als MOSFET's wurden zwei IRFR024N verwendet. Sie sind für hohe Ströme bis 17A, bei Raumtemperatur, zulässig und somit für die Applikation gut geeignet. Außerdem hält der MOSFET eine Gate to Source Spannung von 20V aus. Die MOSFET's werden nämlich, vom Chip mit einer ca. VDD angesteuert. Bei einer Akkuspannung von maximal 12,6V besteht hier somit keine Gefahr. Andernfalls hätte man zwischen Gate und Source des Charge MOSFETS eine extra Schottky Diode platzieren müssen.
- Die Widerstände R5 und R6 sind maßgeblich für die Rise- und Fall-Time der MOSFETS verantwortlich. Es wurden die im Datenblatt empfohlenen Werte  $4,7k\Omega$  und  $1k\Omega$  verwendet.

- Für die Widerstände R15 und R16 wurden die empfohlenen Werte von jeweils  $1\text{M}\Omega$  verwendet. Falls Load Detection verwendet wird, müsste für R16 ein  $3,3\text{M}\Omega$  Widerstand verwendet werden.
- Die bereits erwähnte „Load-Removal-detection“ ist eine Recovery Condition für den Unterspannungs-, Überstrom- und Kurzschlusschutz. Der LD Pin ist intern über einen großen Widerstand mit Ground verbunden. Fall keine Last vorhanden ist wird also das Ground Potential am LD Pin gemessen. Falls eine Last präsent ist, zieht diese die Spannung am LD Pin extern auf High. Bei der gewählten Version muss also die komplette Last entfernt werden damit Load Removal detektiert werden kann. In unserer Applikation ist das Entfernen der gesamten Last allerdings nicht möglich. Der LD Pin wurde deshalb auf Ground gelegt. So misst der Chip immer eine fehlende Last und die Recovery Conditions sind nur noch die wirklich relevanten (Spannungsanstieg bei einem Unterspannungsfehler oder Ablauf der Überstromverzögerung bei einem Überstromfehler). Um aus dem Überstromfehler beim Laden (OCC) wieder zu entkommen, muss eine Last detektiert werden. Da dieser Fehlerfall aufgrund unseres geringen Ladestromes nie erreicht werden kann, ist die Lösung LD auf Ground zu legen für diese Applikation geeignet.
- Die im Datenblatt für diesen Chip angegebenen Temperaturschwellen, liegen beim Entladen bei  $65^\circ\text{C}$  und  $-10^\circ\text{C}$  und beim Laden bei  $45^\circ\text{C}$  sowie  $0^\circ\text{C}$ . Gemessen wird die Temperatur mithilfe eines Spannungsteilers, bestehend aus einem  $10\text{k}\Omega\text{m}$  Widerstand und einem Thermistor. Die Angaben des Datenblatts gelten nur unter der Verwendung eines Thermistors der Reihe 103AT. Der gewählte Lieferant hatte dieses Bauteil leider nicht im Sortiment und auch kein ähnliches konnte zur richtigen Zeit geliefert werden. Deshalb musste auf einen Thermistor mit einer etwas anderen Kennlinie umgestiegen werden. Die ungefähr daraus resultierenden Grenzen beim Entladen sind  $-3^\circ\text{C}$  und  $56^\circ\text{C}$ . Beim Laden ergibt sich ein Intervall von ca.  $5^\circ\text{C}$  bis  $41^\circ\text{C}$ .
- Für exakte Messungen am Shunt Widerstand, sind RC Filter an den Messleitungen angebracht, wie im Datenblatt empfohlen.
- Nach demselben Prinzip wurden auch an den Messleitungen für die Spannungen der einzelnen Zellen Kondensatoren mit jeweils  $100\text{nF}$  zur Verbesserung der Messqualität hinzugefügt.

#### 5.1.7.4 Layout

Im Gegensatz zu den anderen Schaltungen wurde für dieses Modul, keine extra Platine erstellt.

Da hier nicht mit Frequenzen von mehreren hundert Kilohertz gearbeitet wird, konnten die meisten Funktionen schon beim Testen am Breadboard, verifiziert werden. Aus diesem Grund wurde die Schaltung direkt auf der Hauptplatine platziert. In den folgenden Abbildungen ist der Ausschnitt der Hauptplatine zu sehen, bei denen die Komponenten der Schutzschaltung

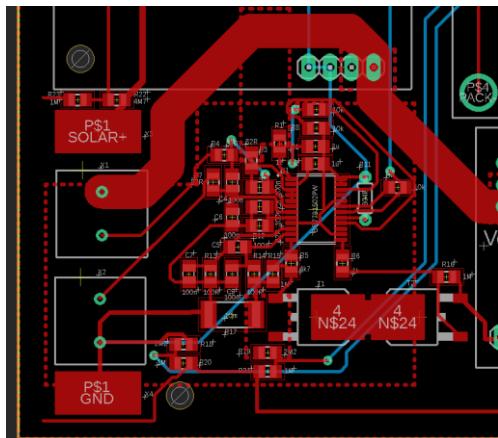


Abbildung 27 Layout Protection Circuit ohne Polygon

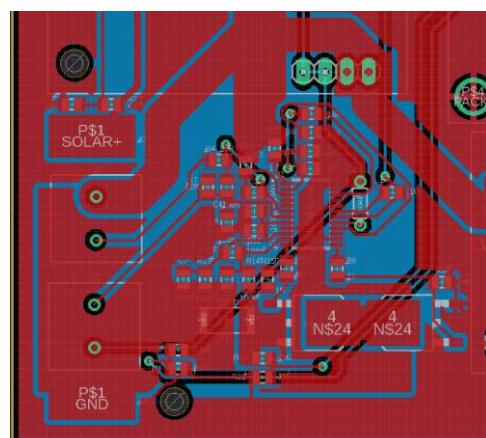
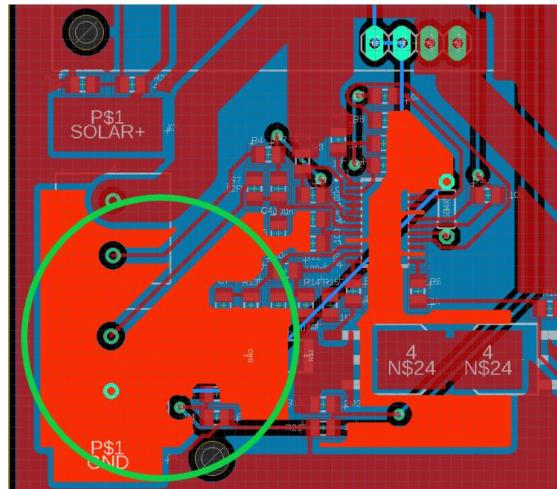


Abbildung 28 Layout Protection mit Polygon

platziert wurden.

Beim vorhandenen Schaltungsentwurf ist das Layout nicht so kritisch, wie bei den Buck Convertern. Dennoch gibt es ein paar Punkte auf die geachtet wurde, um die optimale Funktion zu gewährleisten. Auf die Hauptplatine werden alle Modulplatinen, zusätzliche Komponenten und der Raspberry platziert. Die Platine soll aber so klein wie möglich gehalten werden, um sie in der Schule zu fertigen und sie leicht in ein Gehäuse verpacken zu können. Im Datenblatt sind die wichtigsten Punkte für das Layout zusammengefasst. Die Leitungen SRN und SRP, welche die Spannung am Shunt Widerstand messen, müssen ähnlich lang sein. Die Filter,



für die Versorgungsspannung und die Zellen-Messleitungen sind so nahe, wie möglich am Chip zu platzieren. Es wird zwischen Power Ground und Analog Ground unterschieden. Der Power Ground beinhaltet die Leitung vom Ground des Solarpanels bis zum Kontakt des Shunt Widerstandes. Laut Datasheet sollten die Ground's getrennt werden und nur an einem Punkt verbunden werden. Der Verbindungspunkt wurde etwas größer gewählt und ist in Abbildung 29 grün eingezzeichnet. Der Einfachheit halber wurden, einige Kontakte, welche direkt neben dem Punkt liegen direkt damit verbunden. Der restliche Teil (der helle Teil außerhalb des grünen Kreises) ist nur an einem Punkt mit dem Power Ground verbunden. Weiters sind die Gate to Source Widerstände nah am MOSFET zu platzieren.

### 5.1.8 Spannungsversorgung 5V

#### 5.1.8.1 Allgemein

Abgesehen vom Laderegler und der Schutzschaltung, die direkt vom Solarpanel bzw. von der Batterie versorgt werden, gibt es in diesem Projekt noch andere Funktionsblöcke, die eine korrekte Versorgungsspannung benötigen. Das sind der Raspberry Pi, das dazugehörige ADC Modul sowie das angeschlossene LCD, der Luftdruck und Temperatursensor und das GSM Modul. Alle diese Komponenten benötigen eine stabile 5V Versorgung. Der Raspberry arbeitet zwar auch mit 3,3V, aber diese werden intern erzeugt. Um einen Spannungswandler entwerfen zu können, muss die Menge an Strom bekannt sein die er treiben muss. Um dies herauszufinden, wurden unter verschiedenen Bedingungen, die jeweiligen Stromwerte gemessen. Einmal nur der Raspberry Pi und einmal der Raspberry Pi mit eingeschalteten LCD. Beim dritten Versuch wurden mit den Raspberry noch parallel Videos gedownloadet, um den maximalen Stromverbrauch zu bekommen. Das Ergebnis kann in Abbildung 30 betrachtet werden.

Betriebsart	Stromverbrauch in mA
Raspberry Pi	500-700
Raspberry Pi + LCD	1000
Raspberry Pi + Download + LCD	max 1500

Abbildung 30 Stromverbrauch Raspberry + LCD

Da die anderen Komponenten, nur kleine Ströme benötigen können, sie hier vernachlässigt werden. Es wurde ein Schaltregler entworfen, der einen Strom von bis zu 2A treiben kann.

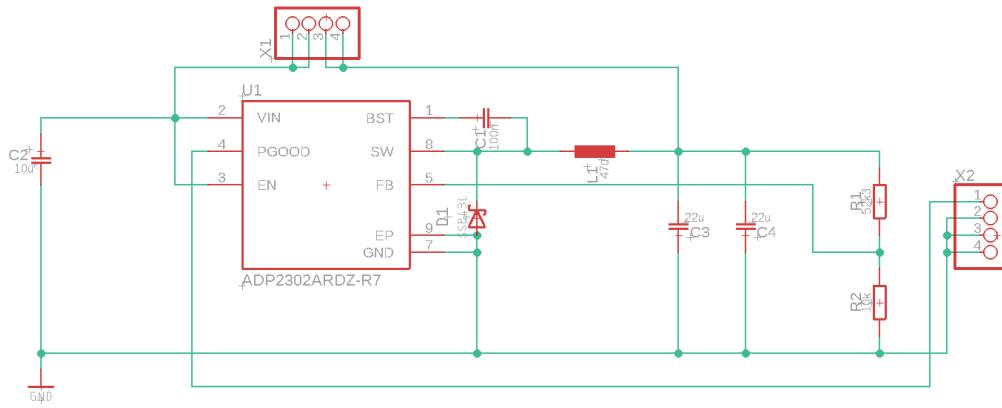
Im Sortiment des Herstellers Analog Devices fand sich ein passender Chip, der ADP2302. Er ist für Ströme bis 2A geeignet und es können diverse Ausgangsspannungen erzeugt werden unteranderem auch die gewünschten 5V.

#### 5.1.8.2 Funktionen

- Hohe Effizienz: Für die benötigten Ströme bei 5V, wird im Datenblatt ein Wirkungsgrad von über 90% angegeben. Auch wenn dieser Wert nicht ganz erreicht wird, ist es noch immer sehr effizient was bei einer Akku-betriebenen Applikation, von Vorteil ist. Außerdem kann bei einer geringen Verlustleistung auf zusätzliche Kühlkörper verzichtet werden.
- Problemloser Umgang mit gegebenen Kenngrößen: Der Chip kann in einem großen Eingangsspannungsbereich arbeiten, außerdem ist er für die benötigten Stromstärken geeignet.
- Hohe Genauigkeit bei Temperaturschwankungen: Auch wenn die Temperatur stark steigen oder fallen sollte, verspricht der Hersteller eine Genauigkeit von +-1,5% der Ausgangsspannung
- Hohe Schaltfrequenz: Der interne Oszillator erzeugt eine Frequenz von 700kHz
- Integrierter Transistor: Anders als beim Laderegler ist im ADP2302, bereits ein MOSFET integriert.
- Power Good Output: Am PGOOD Pin kann man mithilfe eines Pull up Widerstandes erkennen, ob der Chip die korrekte Ausgangsspannung liefert.
- Weitere Features: Der ADP2302 weist weitere, nicht ausschlaggebend für die Auswahl, aber durchaus praktische Funktionen auf. Beispiele sind ein Unterspannungsschutz, ein Überstromstrom am Ausgang, einen Überhitzungsschutz sowie einen Enable-Pin am Eingang.

#### 5.1.8.3 Dimensionierung

Durch die Integration einiger Komponenten im ADP2302, sind nur wenige Bauteile von außen



hinzuzufügen und zu dimensionieren. Die Dimensionierung geschieht nach dem Datenblatt [8].

Abbildung 31 Schaltplan 5V Versorgung

- Programmierung der Ausgangsspannung: Die gewünschte Ausgangsspannung kann mithilfe eines Spannungsteilers programmiert werden. Im Datenblatt wird eine Formel zur Berechnung der Ausgangsspannung angegeben:

$$V_{out} = 0,8 * \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)$$

Die gewünschte Ausgangsspannung ist 5V. Unter der Annahme das R2 gleich 10kΩm ist, ergibt sich für R1 ein Wert von 52,3kΩm.

- Catch Diode: Da die Diode den Ausgangsstrom, während der Nicht-Leitenden Phase übernimmt, muss darauf geachtet werden eine Diode zu wählen, welche auch für diesen Strom geeignet ist. Im Datenblatt wurde die Diode SSB43L empfohlen. Diese kann Strömen bis 4A standhalten.
- Spule: Die hohe Schaltfrequenz würde es erlauben kleine Werte für die Induktivität zu wählen. Der Wert der Induktivität ist maßgeblich für den Ripple Strom verantwortlich. Im Datenblatt wurde folgende Formel zur Berechnung gegeben.

$$\Delta I_{RIPPLE} = \frac{(V_{IN} - V_{OUT})}{L \times f_{sw}} \times \left( \frac{V_{OUT} + V_D}{V_{IN} + V_D} \right)$$

where:

$f_{sw}$  is the switching frequency.

L is the inductor value.

$V_D$  is the diode forward drop.

$V_{IN}$  is the input voltage.

$V_{OUT}$  is the output voltage.

Abbildung 32 Formel für die Berechnung von  $I_{pp}$  ( $\Delta I_{ripple}$ )

Der Wert der Spule sollte laut Datenblatt folgendermaßen berechnet werden:

$$L = \frac{(V_{IN} - V_{OUT})}{0.3 \times I_{LOAD(max)} \times f_{sw}} \times \left( \frac{V_{curr} + V_D}{\text{Abbildung 33 Formel für die Berechnung der Induktivität}} \right)$$

Somit würde sich, bei einer Eingangsspannung von 12V ein Spulenwert von 7uH ergeben. Daraus ergibt sich weiters aber ein  $\Delta I_L$  von 500mA. Bei minimaler Belastung würde der Buck Converter somit in den diskontinuierlichen Modus gehen. Deshalb wurde die Spule mit einem sehr kleinen Ripple-Strom von 100mA neu dimensioniert. Daraus folgt eine Induktivität von 47uH. Der Nachteil von größeren Spulen ist einerseits der höhere Preis, die größere Bauform, und der größere Innenwiderstand. Die ersten zwei Punkte sind für einen Prototypen irrelevant und bei höchstens zwei Ampere, ist auch der größere Widerstand noch kein großes Problem.

- **Eingangskondensatoren:** Die Eingangskapazität muss im Stande sein, dem ständigen Laden und Entladen, in der Höhe des Spulenstroms, standzuhalten. Aufgrund der größeren Spule ist dieser allerdings nicht besorgniserregend groß. Der Kondensator muss aber deutlich mehr als die maximale Akkusspannung aushalten, da es zu Spannungsüberhöhungen kommen kann. Im Datenblatt wird ein Wert von 10uF empfohlen. Es wurde darauf geachtet einen Keramikkondensator mit einem Dielektrikum der Klasse X7R zu nehmen. Somit wird die Effizienz durch einen niedrigeren ESR verbessert.
- **Ausgangskondensator:** Der Ausgangskondensator hat die Aufgabe die durch die Spule erzeugte Wechselspannung zu glätten. Dazu ist eine größere Kapazität notwendig. Aus den bereits genannten Gründen soll auch hier ein X7R Keramikkondensator verwendet werden. Zwei parallele 22uF Keramikkondensatoren sind ausreichend.
- **Bootstrap Kondensator:** Um den Transistor richtig ansteuern zu können ist intern, eine Bootstrapschaltung verbaut. Dazu muss von außen ein 100nF Keramikkondensator, ebenfalls X7R, zwischen dem BST Pin und dem SW Pin angeschlossen werden.

#### 5.1.8.4 Layout

Auch hier wurde, um das Testen zu vereinfachen, eine Modulplatine für diese Schaltung erstellt.

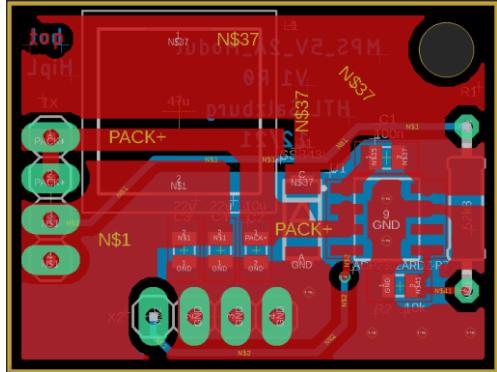


Abbildung 35 Layout 5V Versorgung mit Polygon

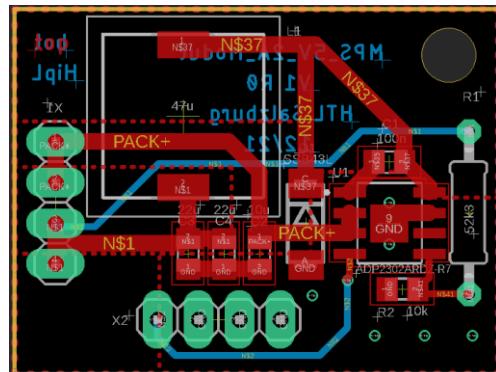


Abbildung 34 Layout 5V ohne Polygon

Aufgrund der Ströme bis zu 2A und der hohen Schaltfrequenz, ist es auch hier wichtig, die im Datenblatt vorgeschriebenen, sowie allgemein gültigen Richtlinien zu befolgen. Das Design muss insgesamt sehr kompakt gehalten werden. Alle Komponenten befinden sich so knapp wie möglich am Chip. Nur die Feedbackwiderstände wurden verhältnismäßig weiter außerhalb platziert, da durch hochohmige Widerstände, leicht Störungen eingekoppelt werden können. Wie beim Laderegler, wurden für alle stromführenden Leitungen Kupferflächen verwendet, die Thermals deaktiviert und für ein Signal mehrere Stiftleisten verwendet, um über die Hauptplatine mehr Hitze absondern zu können. Die Masseflächen auf top und bot wurden alle paar Millimeter mithilfe von Vias (Durchkontaktierungen) verbunden. So entstehen keine Potentialdifferenzen. Zwei dieser Vias, wurden direkt unter dem Chip angebracht. Dort befindet sich ein extra großes Pad, welches mit Ground verbunden ist, um die Wärmeleitung zu verbessern. Zur Befestigung wird ein Loch für eine M3 Schraube am oberen rechten Eck der Platine platziert.

### 5.1.9 Spannungsversorgung für die USB-Ladeeinheit

#### 5.1.9.1 Allgemein

Die Hauptfunktion der MPS besteht darin Geräte wie Handys oder Smartwatches über einen USB-Port aufzuladen. Da dies für mehrere Geräte gleichzeitig möglich sein soll und dies aufsummiert zu Strömen von mehreren Ampere führen kann, wurde hierfür ein eigener Buck Converter verwendet. Ein wichtiges Kriterium für diesen IC ist eine integrierte

Strombegrenzung. Der Akku ist zwar durch die Schutzschaltung ausreichend abgesichert aber die gesamte Ladeperipherie muss extra geschützt werden. Gewählt wurde der IC „MIC28513“ des Herstellers Microchip.

#### 5.1.9.2 Funktionen

- Hohe Effizienz: Auch dieser Buck Converter soll bei der von uns verwendeten Eingangsspannung und unserem benötigtem Ausgangstrom, einen Wirkungsgrad von über 90% aufweisen. Somit muss kein Kühlkörper verwendet werden.
- Problemloser Umgang mit gegebenen Kenngrößen: Es können viele verschiedene Eingangsspannungen gewandelt werden. Für unsere Zwecke reicht der Bereich leicht aus. Laut Hersteller ist der Chip in der Lage bis zu 4A problemlos zu treiben.
- Synchroner Buck Converter: Der Unterschied zu herkömmlichen Schaltreglern liegt im Strompfad bei geschlossenem Schalter. Während der Strom beispielsweise beim ADP2302 durch die Schottky Diode weiterfließen kann, geschieht dies beim MIC28513 durch einen internen MOSFET. Dieser hat im Gegensatz zur Diode ein viel geringeren Spannungsabfall und somit wird die Verlustleistung reduziert. Im Umkehrschluss steigt dies die Effizienz.
- Integrierte Strombegrenzung: Die gewünschte Funktion der Strombegrenzung wurde beim Baustein implementiert und kann mithilfe eines Widerstandes programmiert werden.
- Integrierter Transistor: Wie beim ADP2302 ist der MOSFET schon im Chip integriert und muss somit nicht extern hinzugefügt werden.
- Hohe Schaltfrequenz: Auch hier steht eine Schaltfrequenz im 100kHz Bereich zur Verfügung. Es kann sogar ein beliebiger Wert zwischen 200kHz und 680kHz programmiert werden.
- „Hyper Light Load Architecture“: Der innere Aufbau des Chips ermöglicht auch bei geringen Lasten einen hohen Wirkungsgrad
- Hohe Genauigkeit: Der Hersteller garantiert eine Genauigkeit der Ausgangsspannung von  $\pm 1\%$ .
- PGOOD: Auch hier kann die vorgesehene Funktion des Chips mithilfe eines Open Drain Ausgangs von außen kontrolliert werden.
- Weitere Features: Der Chip bietet weitere Funktionen, wie Unterspannungsschutz am Eingang, einen Überhitzungsschutz sowie einen Kurzschlusschutz. Außerdem bietet er

eine Softstart Funktion. So können extreme Überspannungsspitzen bei Einschaltvorgängen verhindert werden.

### 5.1.9.3 Dimensionierung

Der in Abbildung 36 gezeigte Schaltplan, ist aus dem Datenblatt[9] zu entnehmen. Die

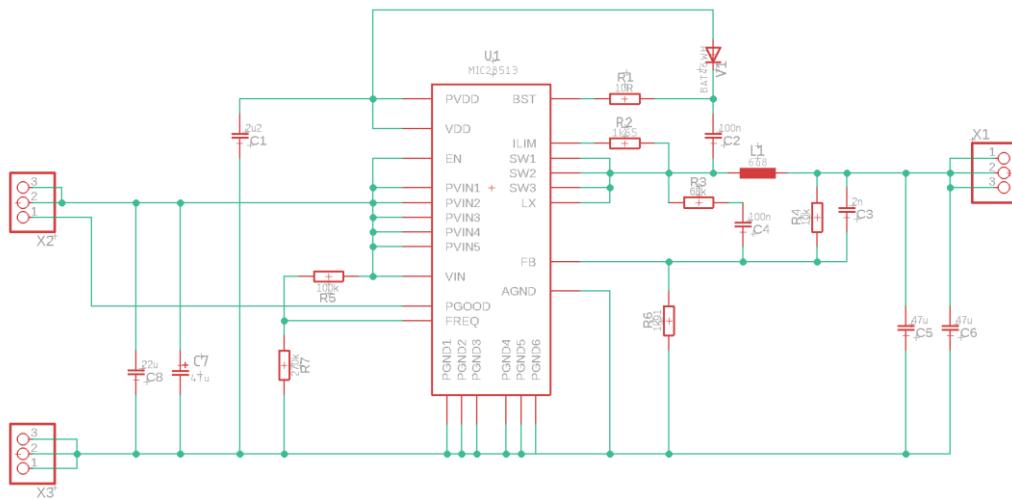


Abbildung 36 Schaltplan Versorgung für die Ladefunktion

Bauteilwerte müssen der eigenen Anforderungen entsprechend, dimensioniert werden.

- Programmierung der Schaltfrequenz: Die Schaltfrequenz kann mit einem Spannungswandler eingestellt werden, welcher mit dem FREQ Pin verbunden ist. Im Datenblatt ist folgende Formel zur Berechnung der Schaltfrequenz gegeben:

$$f_{sw} = 600\,000 * \left( \frac{R_7}{R_7 + R_5} \right)$$

Für R5 wurde wie empfohlen ein 100kΩ Widerstand gewählt. Als Schaltfrequenz wird ein Wert von 450kHz gewünscht. Nach Einsetzen in der Formel und Rundung auf einen passablen Widerstandswert, ergeben sich für R7 270kΩ und somit eine Frequenz von 437kHz.

- Spule: Dank „Hyper Light Load Architecture“ des MIC28513 und der hohen Minimallast am Ausgang muss die Spule hier nicht so groß dimensioniert werden wie beim

Laderegler der  
Im Datenblatt

$L = \frac{V_{OUT} \times (V_{IN(MAX)} - V_{OUT})}{V_{IN(MAX)} \times \Delta I_{L(PP)} \times f_{sw}}$	obigen 5V Versorgung. steht eine Formel zur
Where: $f_{sw}$ $\Delta I_{L(PP)}$	Switching Frequency The peak-to-peak inductor current ripple; typically 20% of the maximum output current

## Berechnung einer geeigneten Induktivität:

Abbildung 37 Formel zur Berechnung der Induktivität

Die maximale Eingangsspannung, also die maximale Akkusspannung, liegt bei 12,6V. Durch Einsetzen, ergibt sich eine Induktivität von 6,8uH. Zu Testzwecken wurde die Modulplatine mit einer Induktivität von 39uH in Betrieb genommen. Bei maximaler Last sank der Ausgang auf einen Wert von 4,5V ab. Der Grund war der Gleichstromwiderstand der Spule, welcher sich mit der steigenden Induktivität, erhöht. Bei einer hohen Last von 4A, können deshalb keine Spulen mit hohen Induktivitäten verwendet werden. Neben einem geringen Gleichstromwiderstand muss auch auf den höchstzulässigen Maximalstrom einer Spule geachtet werden. Dieser muss zumindest höher sein als die Summe des Maximalstroms und des halben Peak to Peak Stroms.

- Programmierung der Ausgangsspannung: Die gewünschte Ausgangsspannung kann mithilfe eines Spannungsteilers programmiert werden. Im Datenblatt wird eine Formel zur Berechnung der Ausgangsspannung angegeben:

$$V_{out} = 0,8 * \left( \frac{R_4}{R_6} \right)$$

Die gewünschte Ausgangsspannung ist 5V. Unter der Annahme, dass R4 gleich 10kΩ ist, ergibt sich für R1 ein Wert von 1,91kΩ. Durch die Verluste aufgrund des Gleichstromwiderstandes der Spule, konnte am Ausgang bei einer Belastung von 500mA allerdings nur eine Spannung von 4,9V gemessen werden. Diese sank mit steigender Belastung immer weiter bis sie 4,7V erreichte. Um dem entgegenzuwirken, wurde R6 mit dem nächstkleineren, vorhandenen Widerstand von 1,8kOhm ausgetauscht. Aus der Formel ergibt sich somit eine Spannung von 5,25V. In der Realität schwankt der Wert, abhängig von der Last zwischen 5V und 5,2V, was für unsere Anwendung, ausreichend genau ist.

- Programmierung der Strombegrenzung: Die interne Strombegrenzung wird durch einen internen MOSFET, als Shunt Widerstand verwendet, realisiert. Um die Strombegrenzung

einustellen, muss ein Widerstand von ILIM-Pin auf den Ausgang des Chips geschaltet werden. Eine Formel zur Berechnung des Widerstandes ist im Datenblatt angegeben:

$$R_{ILIM} = \frac{(I_{CLIM} + 0.5 \times \Delta I_{L(PP)}) \times R_{DS(ON)} + V_{CL}}{I_{CL}}$$

Where:

$I_{CLIM}$	Desired Output Current Limit
$\Delta I_{L(PP)}$	Inductor Current Peak-to-Peak Use <a href="#">Equation 4-4</a> to calculate the inductor ripple current
$R_{DS(ON)}$	On-Resistance of Low-Side MOSFET
$V_{CL}$	Current-limit threshold. 14 mV (typical).
$I_{CL}$	Current-limit source current. 70 $\mu$ A (typical).

Abbildung 38 Formel zur Berechnung des Strombegrenzungswiderstandes

Der Widerstand des MOSFETS beträgt 20m $\Omega$ . Da dieser Wert stark temperaturabhängig ist, wurde sicherheitshalber mit 25m $\Omega$  gerechnet. Der Peak to Peak Strom kann folgendermaßen berechnet werden:

$$\Delta I_{L(PP)} = \frac{V_{OUT} \times (V_{IN(MAX)} - V_{OUT})}{V_{IN(MAX)} \times f_{SW} \times L}$$

Abbildung 39 Formel zur Berechnung des Peak to Peak Stroms

Hier ergibt sich knapp 1A. Die Modulplatine wurde mit verschiedenen Widerständen für die Strombegrenzung getestet. Das Ergebnis war, dass der Chip auch Ströme die größer als 4A treiben kann. Wie im Kapitel „4.1.10. Ladeperipherie“ erklärt, könnten mit 4,5A nicht nur 2, sondern 3 Buchsen gleichzeitig versorgt werden. Deshalb wurde die Strombegrenzung, um dies zu ermöglichen, auf 5A gesetzt. Hierbei sind eventuelle Fehlertoleranzen berücksichtigt, um 4,5A gewiss treiben zu können. Daraus ergibt sich laut der obigen Formel ein Widerstandswert von 2164 $\Omega$ . Gewählt wurde ein Widerstand mit 2,2k $\Omega$ .

- Eingangskondensatoren: Die Eingangskapazität muss im Stande sein dem Spulenstrom und den Spannungen am Eingang standzuhalten. Die maximale Spannung muss aufgrund von möglichen Überspannungsspitzen am Kondensator weit mehr als die Eingangsspannung von ca. 12V aushalten. Im Datenblatt wird ausdrücklich vorgeschrieben einen Keramikkondensator mit X7R Dielektrikum zu verwenden. Da der  $\Delta I_L$  aber 1A beträgt, wird noch ein Aluminium-Elektrolytkondensator mit 47 $\mu$ F

parallelgeschaltet, um die Kapazität zu erhöhen. Für Den Keramikkondensator wurden 22uF gewählt.

- Ausgangskondensator: Der Ausgangskondensator hat die Aufgabe, die durch die Spule erzeugte Wechselspannung zu glätten. Um Spannungsschwankungen am Ausgang gering zu halten, muss ein Kondensator mit geringer ESR gewählt werden. Wie am Eingang muss zumindest ein Keramikkondensator verwendet werden. Um den großen Ripple Strom glätten zu können, wurden zwei 47uF Keramikkondensatoren in einer Parallelschaltung verwendet. Die Spannungsschwankungen am Ausgang dürfen allerdings nicht zu gering sein. Der Grund wird im nächsten Punkt erläutert.
- Spannungsschwankung am Feedback Pin: Der Chip regelt die Ausgangsspannung mithilfe des Feedback Pins. Die gemessene Spannung wird mit einem OPV gegen eine Referenzspannung von 0,8V verglichen. Um richtig Regeln zu

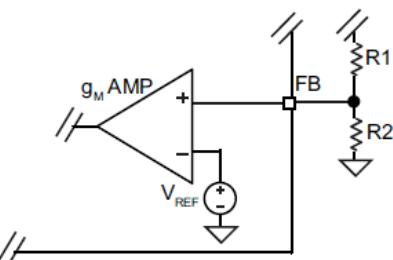


Abbildung 40 der Feedback Pin des MIC28513

können muss die Spannung am Feedback Pin einen gewissen Ripple aufweisen. Die Gründe dafür sind im Datenblatt genauer beschrieben. Im Datenblatt wird eine Spannungsschwankung von mindestens 20mV am Feedback Pin vorgeschrieben. Da diese am Ausgang allerdings geringgehalten werden sollte, gibt es Möglichkeiten, um den Ripple nur am Feedback Pin anzuheben. Mit der folgenden Formel kann die Spannungsschwankung am FB Pin berechnet werden:

$$\Delta V_{FB(PP)} = \frac{R2}{R1 + R2} \times ESR_{C_{OUT}} \times \Delta I_{L(PP)}$$

Abbildung 41 Formel zur Berechnung der Ripple-Spannung

Wegen dem kleinen ESR der Ausgangskondensatoren muss der Ripple am FB Pin erhöht werden. Dies kann durch einen Parallelkondensator am oberen Widerstand des Spannungsteilers realisiert werden. Die Kapazität kann mit folgender Formel bestimmt werden:

$$R1 \times C_{FF} \approx \frac{10}{f_{SW}}$$

Abbildung 42 Formel zur Berechnung des Feed-Forward-Kondensators

Der Ripple am Ausgang wird beim Verwenden

$$\Delta V_{FB(PP)} \approx ESR \times \Delta I_{L(PP)}$$

Abbildung 43 Berechnung der Ripple-Spannung mit einem Feed-Forward-Kondensator

dieses Kondensators unabhängig vom Spannungsteiler, wie in Abbildung 43 gezeigt.

Die Spannungsschwankungen am FB Pin sind nun ausreichend groß, damit der Chip regeln kann. Wie im fertig dimensionierten Schaltplan zu erkennen ist wurde aber noch eine Maßnahme zur Schwankungsverstärkung ergriffen. Durch die Serienschaltung von R3 und C4 wird der Ripple um ein Weiteres erhöht. Dies wäre nicht notwendig aber im Laufe des Prototypenbaus wurde die Schaltung mit diesen beiden Komponenten getestet. Die korrekte Funktion konnte verifiziert werden. Deshalb wurden keine weiteren Änderungen am Schaltplan vorgenommen. C4 wird im Datenblatt mit 100nF angenommen. R3 (Rinj) kann mit folgenden Gleichungen berechnet werden:

$$K_{div} = \frac{\Delta V_{FB(PP)}}{V_{IN}} \times \frac{f_{SW} \times \tau}{D \times (1 - D)}$$

Abbildung 44 Formel 1 zur Berechnung von R3

$$R_{INJ} = (R1//R2) \times \left( \frac{1}{K_{div}} - 1 \right)$$

Abbildung 45 Formel 2 zur Berechnung von R3

Für VFB(pp) wird der gewünschte Wert eingesetzt. Das Tau ist die Zeitkonstante, die durch den Spannungsteiler, R3 und C4 gebildet wird. Auch hierfür wurde zur Berechnung eine Formel im Datenblatt gegeben. Nach Auflösen des Gleichungssystems ergibt sich für R3 ein Wert von 68kOhm.

- Bootstrap Beschaltung: Der MIC28513 benötigt eine externe Beschaltung für den Bootstrap Pin. Diese sind R1, C1 und V1. Die Werte sind im Datenblatt angegeben.
- Temperatur Berücksichtigungen: Im Datenblatt sind mehrere Formeln gegeben, durch die, die geplante Funktion des Chips, auch ohne zusätzlichen Kühlkörper, überprüft werden kann. Mit der Formel in Abbildung 46 kann der maximale mögliche Strom aufgrund der Temperatur berechnet werden. Die Strombegrenzung selbst wurde auf 5A gesetzt. Nun gilt es zu überprüfen ob so eine hohe Strombegrenzung noch realisierbar ist.

$$I_{OMAX(TJMAX)} = \left( -\frac{1}{\theta_{JA}} \times T_A + \left( \frac{T_{J(MAX)}}{\theta_{JA}} + P_{D(L)} \right) \right) \times \frac{\eta}{V_{OUT} \times (1 - \eta)}$$

Where:

$\theta_{JA}$  = Device Package Thermal Resistance, which is 30°C/W for the 3 mm x 4 mm FCQFN-24LD.  
 $\eta$  = Buck Converter Efficiency, for  $V_{OUT} = 5V$  about 80% at  $V_{IN} = 45V$ , 85% at  $V_{IN} = 36V$ , 87% at  $V_{IN} = 24V$ .  
 $T_{J(MAX)}$  = Device Maximum Operating Junction Temperature, which is 125°C.  
 $T_A$  = Ambient Temperature.  
 $V_{OUT}$  = Output Voltage.  
 $P_{D(L)}$  = Inductor Power Dissipation due to DCR.

Abbildung 46 Formel zur Berechnung des Maximalstroms abhängig von der Temperatur

Zur Berechnung wird  
Verlustleistung in der

$$P_{D(L)} \approx I_{OUT}^2 \times DCR$$

zusätzlich noch die  
Spule benötigt:

Abbildung 47 Formel zur Berechnung der  
Verlustleistung der Spule

Aus der Gleichung geht eine aufgrund der Temperatur eine umsetzbare Strombegrenzung von 6,375A, also mehr als genug (DCR = 15mΩ, IOUT = 5A, Ta = 30°C, η = 90%).

#### 5.1.9.4 Layout

Wie bei dem anderen Buck Converter und dem Laderegler wurde zu Testzwecken eine eigene Modulplatine erstellt. Auch hier musste darauf geachtet werden die allgemein gültigen, und im Datenblatt vorgeschriebenen Richtlinien einzuhalten. Einige Punkte sind sehr ähnlich, zu den

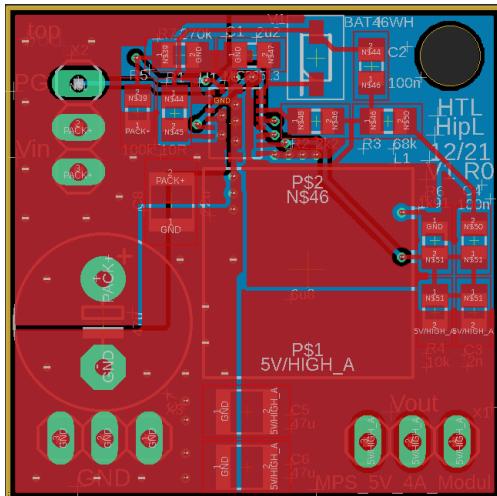


Abbildung 49 Layout Versorgung der Ladefunktion mit  
Polygon

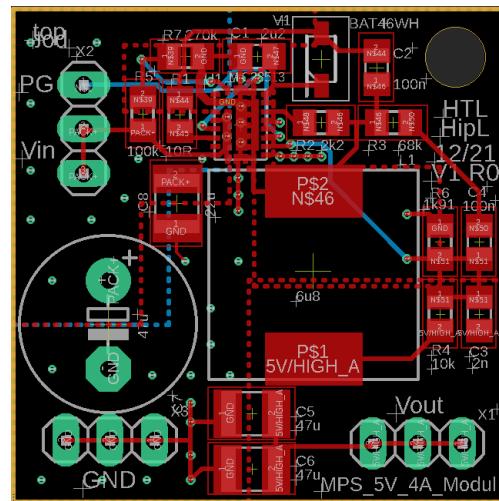


Abbildung 48 Versorgung der Ladefunktion ohne Polygon

vorherigen Layouts und werden deshalb nur  
noch kurz behandelt.

Natürlich müssen die stromführenden Leitungen wieder so kurz wie möglich gehalten werden. Es ist generell ratsam, das Design kompakt zu halten. Als Eingangskondensator muss wie in der Dimensionierung erwähnt ein Keramikkondensator mit X7R Dielektrikum verwendet werden. Keramikkondensatoren mit diesem Dielektrikum haben den Vorteil einer geringen

Temperaturabhängigkeit. Aus diesem Grund werden sie häufig für Schaltregler-Applikationen verwendet. Der Kondensator muss so knapp wie möglich am Chip platziert werden. Um Ground der Input- und Output Kondensatoren zu verbinden, wird eine Massefläche verwendet. Auch für die anderen stromführenden Netze werden Polygone genutzt. Diese müssen alle paar Millimeter mit Vias auf den unteren Layer verbunden werden. Zur Verbesserung des Wärmeabtransports zur Hauptplatine wurden für Input, Output und Ground wieder mehrere Stiftleisten verwendet und auf Thermals wird verzichtet. Genauere Einstellungen, wie etwa zu den Polygonen sind ident zu den bisherigen Platinen.

Im Gegensatz zum anderen Buck Converter musste aufgrund des höheren Stromes und der Gehäuseform des Chips auf weitere Details geachtet werden, die bisher noch irrelevant waren. Bei diesem Layout handelt es sich hier um eine 4 Layer Platine. Zu Top und Bottom kommen noch Layer 2 und Layer 15 hinzu. Bei Schaltreglern im Bereich der Leistungselektronik ist dies zwingend notwendig, um die EMV zu verbessern und Spannungsabfälle an Leitungen zu verhindern. Normalerweise kann in Eagle nur auf Top und Bot geroutet werden. Um das auch für die anderen Layer möglich zu machen, muss die richtige Design Rule Datei des Herstellers hochgeladen werden. Der Layer direkt unter Top, muss Ground sein. So kann nun an jeder Stelle der Schaltung mit einem Via die kurzmögliche Verbindung mit Ground hergestellt werden. Wie in Abbildung 50 zu sehen ist, handelt es sich beim Layer 2 nur um eine einzige große Massefläche. Auf dem Layer 15 kann nun ein weiteres oft benutztes Signal als Polygon verwendet werden. Wir haben uns aufgrund der Platzierung, für die Eingangsspannung entschieden. Die Alternative wären das Ausgangsignal oder der Ausgang des Chips.

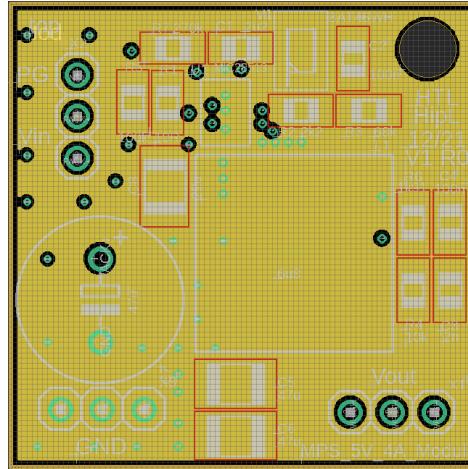


Abbildung 50 Massefläche am Layer 2

Ein weiterer wichtiger Punkt bei der Erstellung des Layouts ist das Package des MIC28513. Der Chip ist im ungewöhnlichen FQFN-24 Gehäuse verpackt. Im Internet konnte leider keine passende Library gefunden werden. Deshalb musste das Package selbst erstellt werden. Das Ergebnis ist in Abbildung 51 zu betrachten. Die nötigen Informationen

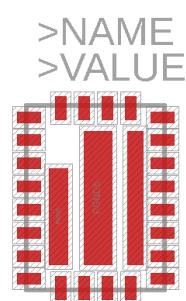


Abbildung 51 Package FQFN-24

waren im Datenblatt bei den mechanischen Zeichnungen abzulesen. Der Vorteil bei diesem Package liegt in der Kompaktheit. Für eine bessere Wärmeleitung sind größere Pads für die Eingangsspannung, den Ausgang des Chips und Ground, auf der Unterseite des Gehäuses angebracht. Der Nachteil und einer den ausschlaggebenden Gründe für die Herstellung außerhalb der HTL, ist ebenfalls die Größe. Die Pads sind zu nahe aneinander und könnten im Printlabor nicht mehr gefertigt werden. Zusätzlich zur Platine wurde ein „Stencil“ bestellt. Das ist eine Art Schablone für die Platine. Mit dieser Schablone kann später Lötpaste, auf die Pads gestrichen werden. Danach werden die Bauteile behutsam auf die vorgesehenen Plätze gelegt und leicht festgedrückt. Die Paste ist leicht klebrig und hält die Bauteile dort, wo sie sind. Anschließend wird die Platine auf einem Fließband durch einen geeigneten Ofen gefahren. Im Ofen erhitzt sich die Lötpaste und schiebt alle Bauteile perfekt auf ihren Platz. Außerhalb des Ofens erhärtet die Paste sofort. Dieser Prozess des Lötens wird Reflow – Löten genannt. Wegen dem Package des MIC28513 war es die einzige Variante die Platine zu Löten. Nachdem die Platine etwas abgekühlt ist müssen alle Verbindungen zwingend auf Kurzschlüsse überprüft werden.

Wie auch bei den anderen Platinen wurde, um die Befestigung auf der Hauptplatine zu vereinfachen, ein Loch am rechten oberen Eck gebohrt. Die Platinen Beschriftung kann auf dem Layer 21 (Silkscreen) geschrieben werden, da die Platine außerhalb der Schule gefertigt wurde.

### 5.1.10 Ladegeräte

Die Ladegeräte ist an der Spannungsversorgung für die USB-Ladeeinheit angeschlossen. Realisiert wird sie mit USB A Buchsen der Version 2.0. Dort kann vom Benutzer mithilfe eines passenden Ladekabels das gewünschte Gerät geladen werden. Für die Kommunikation der USB-Schnittstelle gibt es ein komplexes Protokoll. Dazu wäre ein extra Chip notwendig der mit dem Handy, beispielsweise die mögliche Stromstärke oder Ladespannung kommuniziert. Die Implementierung dieser Funktion würde den Rahmen der dieses Projektes sprengen. Deshalb wird auf jegliche Art der genannten Kommunikation verzichtet. Die Plus und Minus Leitung der USB-Schnittstelle ist mit dem Ausgang des Buck Converters und Ground verbunden. Die Art des USB-Ports muss dennoch festgelegt werden. Es gibt drei verschiedene Konfigurationen [10]:

- Standard downstream port (SDP): Hierbei handelt es sich um die übliche Verwendung des USB 2.0 Ports. Meist ist sie an Computern oder Laptops angebracht. Sie wird als

Anschlussstelle für Geräte benutzt, die keine hohen Stromstärken benötigen.

Verwendet wird diese Methode beispielsweise für Maus oder Tastatur. Der Strom ist hierbei auf maximal 500mA begrenzt. Konfiguriert werden kann diese Art, indem die beiden Datenleitungen mit einem 15kOhm Widerstand auf Ground geschlossen werden.

- Charging downstream port (CDP): Hierbei handelt es sich um eine Abwandlung des SDP. Ströme bis 1,5A sind hier zulässig.
- Dedicated charging port (DCP): Die Art beschreibt alle Energielieferanten wie etwa Ladegeräte. Somit ist dies die passende Konfiguration für unsere Anwendung. Der Maximalstrom liegt ebenfalls bei 1,5A. Damit das angeschlossene Gerät den Port richtig erkennt müssen die beiden Datenleitungen kurzgeschlossen werden.

Nun ist noch die Anzahl der möglichen USB-Buchsen zu bestimmen. Diese ist abhängig vom Gesamtstrom der über den Schaltregler fließen darf. Bei zwei Buchsen ergibt sich ein Strom von 3A. Gewünscht wären zumindest drei Buchsen, um mehrere Geräte parallel laden zu können. Dazu muss ein Strom von 4,5A getrieben werden können. Beim Testen des Schaltregler wurde festgestellt, dass auch über längere Zeit, Ströme, die etwas über den empfohlenen Maximalwert von 4A hinausgehen, problemlos getrieben werden können. Die Strombegrenzung der Schutzschaltung ist auch auf 7A festgesetzt. Leider ist diese Schwelle nicht sehr genau. In der Realität kann, die Strombegrenzung im schlimmsten Fall schon bei 5,6A einsetzen. In diesem Fall würde sich der Ausgang abschalten bis sich die Last wieder verringert. Die Alternative wäre die Strombegrenzung noch weiter anzuheben, wovon aus Sicherheitsgründen abgesehen wurde. Da dieses Abschalten der Schutzschaltung, ohnehin nur im unwahrscheinlichen „Worst Case“ eintritt, und es keine weiteren Folgen hat, wird die Abschaltung akzeptiert.

Auch wenn die Schaltung durch mehrere Schutzebenen abgesichert ist, wurden vor jeder Buchse Polyfuses angebracht, um die einzelnen Ports zu schützen. Hierbei handelt es sich um Sicherungen, welche sich bei zu hohem Strom erhitzten und so ihre Leitfähigkeit verlieren. Sobald sich der Strom reduziert sinkt auch die Temperatur und der Widerstand der Polyfuse geht wieder gegen Null.

### 5.1.11 Systemintegration

Der Schaltplan der Hauptplatine, sowie die restlichen Fertigungsunterlagen, sind bei der technischen Dokumentation, am Ende der Diplomarbeit einsehbar.

### 5.1.11.1 Allgemein

In den letzten Kapiteln wurden alle Einzelheiten zu den, für die Hardwareentwicklung relevanten, Funktionsblöcken beschrieben. Nun müssen diese noch mit den anderen Komponenten verbunden werden. Das Ergebnis ist die fertige Mountain Power Station. Von außen ist die MPS ein Gehäuse, welches sämtliche Schaltungselemente und den Akku beinhaltet. Zu sehen ist nur ein Eingang für die zwei Kabel des Solarpanels, sowie das LCD und die USB-Ports. Um alle Komponenten auf Platinen kompakt zusammenzuschalten wurde eine Hauptplatine erstellt, mit den nötigen Schnittstellen, um alle Komponenten zusammenzuschließen. Dies wurde folgend realisiert:

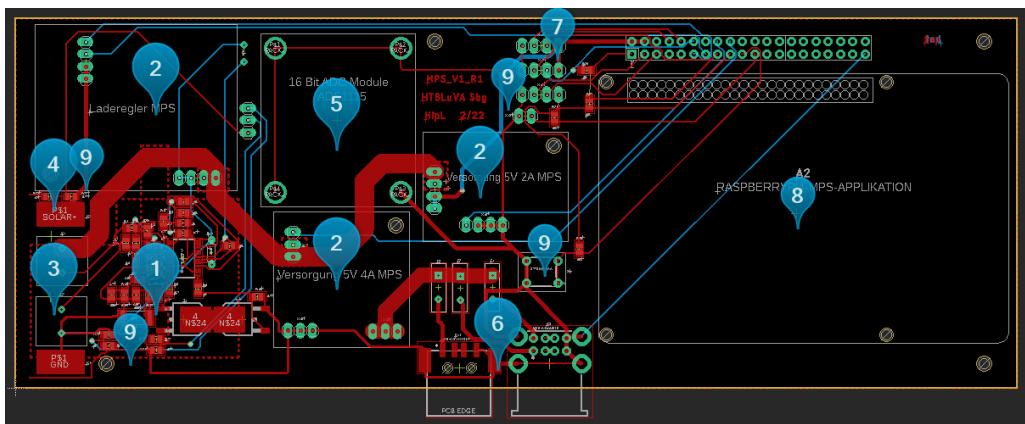


Abbildung 52 Übersicht Komponenten Hauptplatine

1. Die Schutzschaltung wird direkt auf der Hauptplatine integriert.
2. In Eagle gibt es die Funktion verschiedene Schaltungsgruppen in sogenannte „Design Blocks“ umzuwandeln. Dies wurde mit allen drei Modulplatinen gemacht. Die Design Blocks können nun in der Hauptplatinen-Datei importiert werden. Alle irrelevanten Komponenten wie die SMD Bauteile wurden gelöscht. Übrig bleiben nur der Grundriss, die Befestigungsbohrung sowie die Position der Stifteleisten. Wie bei allen Komponenten wurde darauf geachtet, die Platzierung so zu wählen, dass das Routen so einfach wie möglich zu gestaltet wird.
3. Um die Kontakte der Batterie zu befestigen, wurden Printklemmen an der Platine angebracht
4. Die Kabel des Solarpanels werden an zwei großen SMD Pads angelötet.
5. Ein großer Teil des Platzes wird durch das ADC Modul für den Raspberry verbraucht. Dafür wurde eine Eagle Library erstellt, welche einfach auf der Platine platziert werden

kann. Die Kontakte der Messleitungen sind in der Platine vorhanden. Das I2C Interface wird extra durch Buchsen-Leisten am Punkt 7 angebracht.

6. Bei dem Marker mit der Nummer 6 wurden die USB-Buchsen inklusive der dazugehörigen Sicherungen platziert. Die USB-Buchsen stehen etwas von der Platine hervor. So sind sie am Ende auf der Höhe der Außenwand des Gehäuses.
7. Hier sind Buchsen-Leisten für die externen Komponenten angebracht. Das sind das GSM Modul, der Luftdruck und Temperatursensor sowie das I2C Interface für das ADC Modul.
8. Um die Robustheit zu erhöhen, wird auch der Raspberry auf der Hautplatine montiert. Dies geschieht mit Befestigungsbohrungen. Um die Kontakte mit der Platine zu verbinden, wird neben den Raspberry eine 2x20 Stiftleiste platziert. Es werden zwar nicht alle Kontakte benötigt aber, so kann diese Stiftleiste, mit der am Raspberry leicht über ein 20x2 Jumperkabel verbunden werden.
9. Bei den durch die Zahl 9 markierten Punkten wurden noch weitere Komponenten hinzugefügt, die bisher noch nicht erwähnt wurden. Da der ADC nur Spannungen unterhalb seiner Versorgungsspannung von 5V messen kann, müssen die Spannungen an den Messpunkten noch irgendwie reduziert werden. Dies kann mit Spannungsteilern getan werden. Die gemessenen Spannungen werden durch ein bekanntes Verhältnis geteilt und später in der Software mit diesem Faktor multipliziert. An der Batterie können Spannungen von maximal 12,6V auftreten und am Solarpanel wird mit maximal 24V gerechnet. Aufgrund der E12 Reihe wurden Faktoren von 4,7 und 2,2 gewählt. Mittig auf der Platine wurde ein Taster platziert. Durch diesen kann der Raspberry resettet werden. Die Funktion wird nur für Test- oder Wartungsarbeiten gebraucht. Es wurde eine weitere zwei polige Buchsen-Leiste integriert, an welche Kontakte für einen Schalter angeschlossen werden können. Dieser wird außen am Gehäuse befestigt. Durch ihn können Nutzer der MPS das LCD anschalten

### 5.1.11.2 Layout

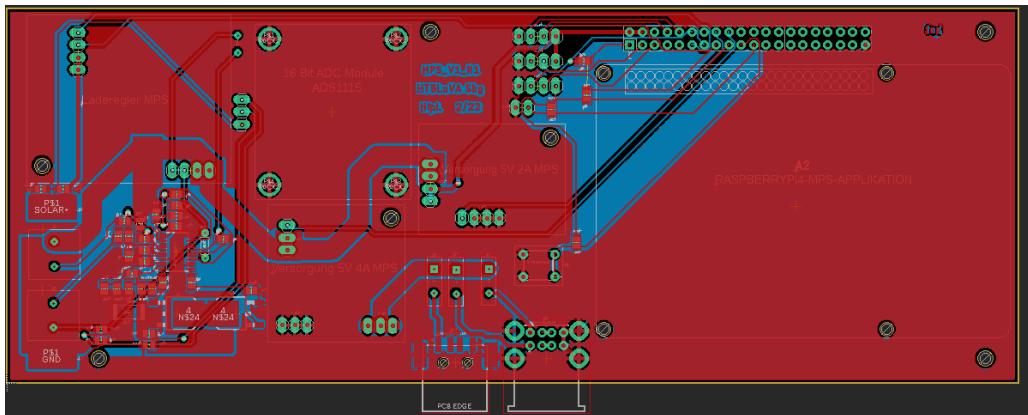


Abbildung 53 Layout Hauptplatine

Die Überlegungen beim Erstellen des Layouts der Schutzschaltung und der Modulplatten wurde bereits erläutert. Die bereits mehrfach erwähnten Punkte wie Einstellungen des Polygons, die Verwendung von Befestigungsbohrungen oder die Platinen Beschriftung sind gleich wie bei den bisherigen Platten. Der Knackpunkt, wie in Abbildung 53 zu sehen, ist die Dicke der Leiterbahnen. Je nach Leitungen wurden verschiedene Stärken verwendet. Als Standardwert für alle Leitungen, die fast keinen Strom führen, wurde ein Wert von 12mil festgelegt. Je höher die Ströme werden umso weiter werden sich die Leiterbahnen erhitzen. Bei der Wahl der Dicke wurde ein Wert für die maximale Temperaturerhöhung, gegenüber der Umgebungstemperatur von 20°C festgelegt. Am meisten Strom fließt über den Pluskontakt und

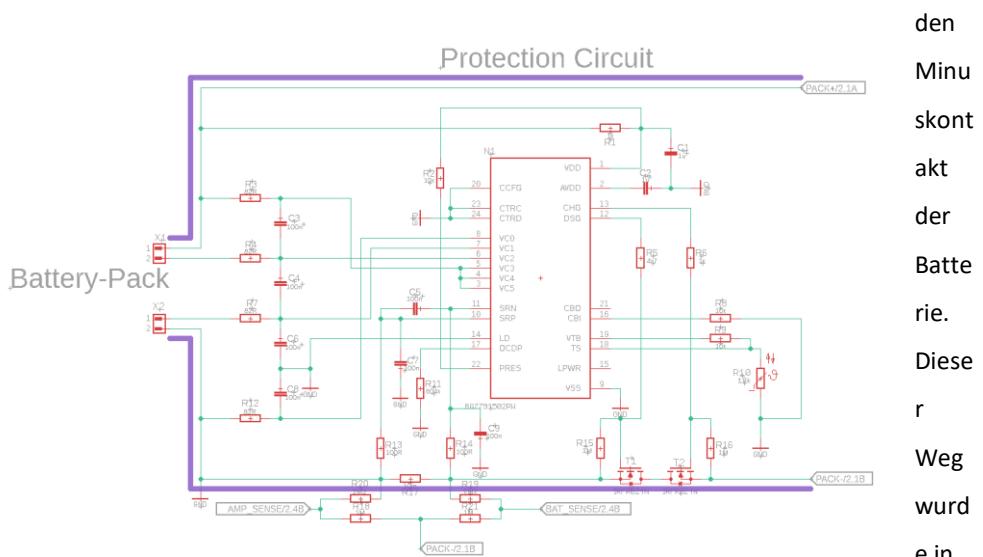


Abbildung 54 visualisiert.

Abbildung 54 Hochstromleitungen Schutzschaltung

Bei der Wahl der Leiterbahnbreite wurde sich an einer Tabelle im FTKL Leitfaden der HTL

Schichtstärke <i>Thickness copper layer</i>	Leiterbahnbreite <i>Track-width</i>	Max. Strom in Abhängigkeit zur Temperaturerhöhung. <i>Max. current depending on temperature increase.</i>				
		10 °C	20 °C	30 °C	45 °C	60 °C
35 µm	0,25 mm	0,5 A	0,8 A	1,0 A	1,3 A	1,6 A
	0,50 mm	1,0 A	1,6 A	2,0 A	2,5 A	3,0 A
	1,00 mm	2,2 A	3,0 A	3,6 A	4,2 A	4,8 A
	1,50 mm	3,0 A	3,8 A	4,6 A	5,3 A	6,5 A
	2,00 mm	3,8 A	5,0 A	6,5 A	7,5 A	8,5 A
	3,00 mm	4,5 A	6,5 A	8,0 A	9,5 A	11,0 A
	4,00 mm	6,0 A	8,5 A	10,0 A	12,0 A	13,5 A
	5,00 mm	7,0 A	10,0 A	12,0 A	14,5 A	16,0 A
	6,00 mm	7,5 A	11,0 A	14,0 A	16,0 A	18,0 A
	8,00 mm	9,0 A	14,0 A	17,0 A	20,0 A	22,5 A
	10,00 mm	10,0 A	16,0 A	20,0 A	23,0 A	26,0 A

Salzburg orientiert. [6]

Tabelle 3 Richtwerte für die Wahl der Leiterbahnbreite

Für die Netze Ground (Minuskontakt der Batterie) und Pack- (Minusausgang der Schutzschaltung) werden Polygone verwendet. Somit ist hier vor Überhitzung geschützt. Für die Kontakte zwischen den Transistoren und dem Plusausgang der Schutzschaltung, müssen geeignete Leiterbahnstärken gewählt werden. Im schlimmsten Fall können 8,6A fließen. Aus diesem Grund sind hier Leiterbahndicken von 4mm notwendig. Ein weiterer kritischer Punkt ist der Ausgang des Buck Converters für den Ladevorgang. Es wird mit einem Maximalstrom von

5A gerechnet und somit eine 3mm Leiterbahndicke gewählt. Nun gibt es noch ein paar Netze bei denen ca 1,5A fließen können. Dazu zählen der Plus Pol des Solarpanels, die USB-Leitungen und die 5V Versorgung für den Raspberry. Hier wurden 0,75mm gewählt.

## 5.2 Raspberry Pi

Aufgrund der hohen Verfügbarkeit und einer Vielzahl integrierter Funktionen, von welchen die projektkritischen später genauer erläutert werden, wurde der Raspberry Pi als Steuereinheit für das Projekt gewählt. Hierbei handelt es sich um einen Einplatinencomputer der Raspberry Pi Foundation.



Abbildung 55 Raspberry Pi 4B [11]

Für unser Projekt wurde die aktuellste Version (Raspberry Pi 4B, Abbildung 55) gewählt, da diese die gängigste am Markt ist und die aktuellsten Bibliotheks- und Softwareversionen unterstützt. Als Betriebssystem wird das Raspberry Pi OS Version 10 mit Release von Februar 2020 verwendet. Ursprünglich wurde geplant die aktuellste Version des Betriebssystems zu verwenden, jedoch gab es hier vielfach Komplikationen mit vorhandenen Softwarebibliotheken, da diese noch nicht auf diese OS-Version portiert wurden.

## 5.2.1 Hardware-Schnittstellen

Der Raspberry Pi verfügt über eine Vielzahl an Schnittstellen für Peripherie [vgl. [12]]. Im folgenden Teil werden die projektrelevanten genauer erklärt.

### 5.2.1.1 GPIO

GPIO ist die Abkürzung für General Purpose Input Output. Hierbei handelt es sich um programmierbare Pins, welche als Ein- oder Ausgang fungieren können. Unsere Version des Raspberry Pi's verfügt über 27 GPIO Pins. Diese befinden sich bei der 2x20 Stifteleiste. Der Logikpegel ist 3,3V. Die übrigen Pins werden für die Spannungsversorgung (Potentiale: GND; 3,3V; 5V) verwendet. Einige der GPIO Pins können für Interfaces (SPI, UART...) verwendet werden.

### 5.2.1.2 I2C

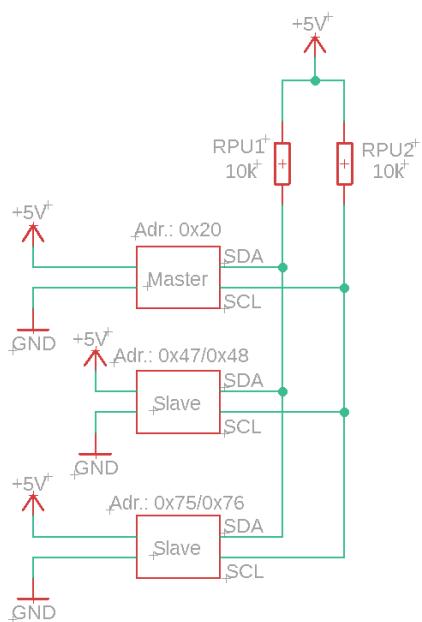


Abbildung 56 I2C Interface

Bei I2C (Inter-Integrated Circuit), auch als TWI (Two-Wire-Interface) bekannt, handelt es sich um eine serielle Schnittstelle für Datenbussysteme. Es ist eine Daten- und eine Takteleitung vorhanden (Abbildung 56). Als Spannungspegel werden 0V (log. 0) und 3,3V (log. 1) verwendet. Die Übertragungsgeschwindigkeit wird vom Master, über eine interne Clock, vorgegeben. Es ist möglich über eine Datenleitung mit mehreren Slaves zu kommunizieren. Hierfür wird jedem Device am Bus eine Adresse zugewiesen. Dies geschieht meist intern beim Hersteller oder softwareseitig.

Der Kommunikationsbeginn ist an eine Startbedingung geknüpft, welche vom Master

gesendet wird. Danach folgt die Adresse des anzusprechenden Devices. Je nach Art des Zugriffs (schreiben oder lesen) wird das letzte Bit der Adresse auf high oder low gesetzt.<sup>1</sup> Wenn die Adresse am Bus existiert, reagiert der angesprochene Slave, in dem er die Datenleitung auf low

<sup>1</sup> Wird durch die zwei Adressen in Abbildung 3 angedeutet.

zieht (Acknowledge). Nun beginnt die Übertragung der Datenbytes. Diese werden jeweils mit einem Acknowledge quittiert. Um die Übertragung zu beenden löst der Master eine Stopbedingung aus.

### 5.2.1.3 UART

Bei UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) handelt es sich um ein asynchrones, serielles Interface mit einer Schreib- und einer Leseleitung. Diese werden mit Rx (Receiver) und

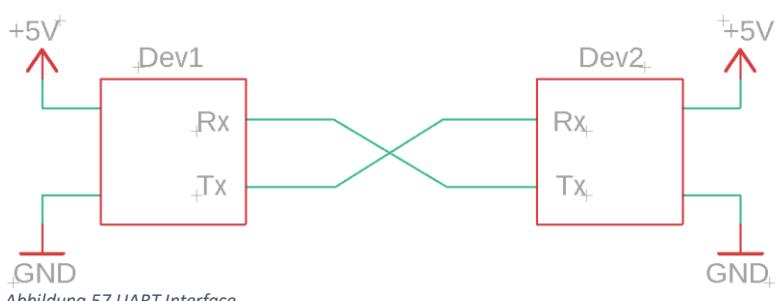


Abbildung 57 UART Interface

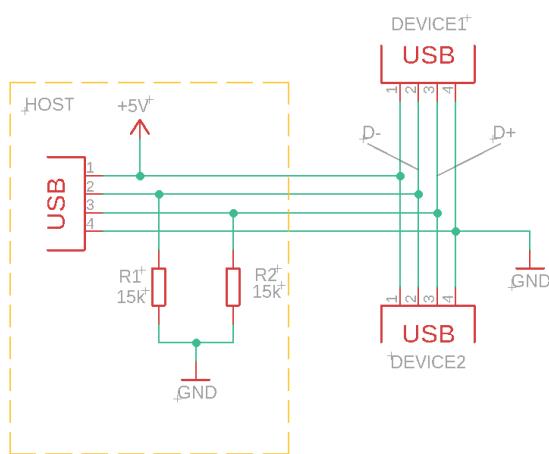
Tx (Transmitter) bezeichnet (Abbildung 57).

Das UART-Interface am Raspberry Pi benutzt dieselben Spannungspegel wie I2C. Die Spannungspegel von UART sind im Allgemeinen nicht genormt und somit von den verwendeten Kommunikationspartnern beziehungsweise deren Schnittstelle abhängig. Da es keine gemeinsame Takteleitung gibt muss dieser geräteintern konfiguriert werden und bei beiden Kommunikationspartnern übereinstimmen. Man spricht von der Baud-Rate. Hierbei handelt es sich um die Anzahl an Zeichen, die in einer Sekunde übertragen werden.

Die Datenübertragung erfolgt in sogenannten Frames. Diese sind von variabler Länge und enthalten neben den Datenbits noch ein Start-, ein Paritäts- und ein oder zwei Stop-bits. Die Frames müssen, gleich wie die Baud-Rate, bei den Kommunikationspartner übereinstimmend konfiguriert werden.

#### 5.2.1.4 USB

Bei USB (Universal Serial Bus) handelt es sich um ein serielles Bussystem [vgl. 3]. Er bringt eine sehr hohe Datenrate, sowie die Möglichkeit hohe Ströme zu liefern [5.1.10], mit sich. Eine Besonderheit des USB ist die hot-plug Fähigkeit. Diese ermöglicht es Peripheriegeräte (z.B. Maus, Speicherstick u.ä.) während des laufenden Betriebes anzuschließen.



Die am häufigsten verwendete USB-Konnektoren sind die des Typs A. Diese besitzen 4 Leitungen. Ein Paar für die differentielle Datenübertragung und ein Paar für die Spannungspotentiale 5V und GND. Das Gehäuse des Konnektors ist mit einem Metallgeflecht, welches die Leitungen schirmt, verbunden. Je nach Anwendung existieren auch Konnektoren mit mehr Pins.

Abbildung 58 USB

USB-Geräte bilden eine Sterntopologie. Mehrere Geräte werden direkt mit einem Host verbunden (Abbildung 58). Die beiden pull-down Widerstände ( $R_1$ ,  $R_2$ ) sind host-intern verbaut. Wenn kein Gerät an den Bus angeschlossen ist, bewirken diese den single-ended zero state (SE0). Dieser indiziert einen reset oder eine getrennte Verbindung. Sobald ein Gerät angeschlossen wird, zieht dieses eine der Datenleitung, mit einem  $1.5\text{k}\Omega$  Widerstand auf high und erzeugt hierdurch einen idle state. Die Datenübertragung besteht aus den Signalen SE0, J, K und SE1. Letzteres signalisiert einen verbotenen Zustand und kann nur bei fehlerhafter Kommunikation auftreten. Für die Übertragung wird eine non-return-to-zero, inverted (NRZI) Codierung verwendet. Bei dieser wechselt das Signal beim Übertragen einer Null auf einen anderen Signalzustand. Beim Übertragen einer Eins wird der momentane Zustand beibehalten. Im Fall von USB sind dies die Zustände J und K. Abhängig von der Übertragungsgeschwindigkeit (Abbildung 59) bestimmen diese den Zustand der Datenleitungen, wobei diese jeweils invertiert zueinander sind (Abbildung 60).

Bus State	Indication
Differential 1	D+ High, D- Low
Differential 0	D+ Low, D- High
Single Ended 0 (SE0)	D+ and D- Low
Single Ended 1 (SE1)	D+ and D- High
J-State: Low-Speed Full-Speed High-Speed	Differential 0 Differential 1 Differential 1
K-State: Low-Speed Full-Speed High-Speed	Differential 1 Differential 0 Differential 0

Abbildung 60 USB-Buszustände [14]

Bezeichnung		Datenrate (brutto)	Datenrate (Praxis)
<b>USB 1.0/1.1</b>	LowSpeed	1,5 MBit/s	130 kByte/s
	FullSpeed	12 MBit/s	1 MByte/s
<b>USB 2.0</b>	HighSpeed	480 MBit/s	ca. 40 MByte/s
<b>USB 3.0</b>	Gen 1	5 GBit/s	ca. 450 MByte/s
<b>USB 3.1</b>	Gen 2	10 GBit/s	ca. 800 MByte/s
<b>USB 3.2</b>	Gen 2x2	20 GBit/s	ca. 2 GByte/s
<b>USB4</b>	Gen 3x2	40 GBit/s	4 GByte/s

Abbildung 59 USB Geschwindigkeiten [3]

Für die Übertragung werden die Daten in Pakete gegliedert (Abbildung 61). Diese beginnen mit einer Synchronisationsinfo und einem 8 bit Package Identifier (PID). Die PID selbst benötigt nur 4 bit. Die übrigen 4 bit bilden ein Komplementär und werden zu Fehlererkennung verwendet. Danach folgen die Datenbits mit variabler Länge. Diese werden mit einem cyclic redundancy check (CRC) abgesichert. Hierbei handelt es sich um ein Prüfverfahren, welches auf Polynomdivision basiert. Das Ende eines Packets wird durch eine fixe Bitfolge indiziert.

Sync	PID	DATA	CRC16	EOP
8bit	8bit	Bis zu 8192 bit	16bit	3 bit

Abbildung 61 USB Datenpacket [15]

### 5.2.1.5 HDMI

Bei HDMI (High Definition Multimedia Interface) handelt es sich um eine Schnittstelle, welche für die Übertragung von Bild- und Videosignalen verwendet wird [16]. Es baut auf dem Digital Visual Interface (DVI) auf und ist somit abwärtskompatibel zu diesem. Es sollte den digitalen Nachfolger zu SCART Schnittstelle bilden. Laut der Spezifikation sind nur ein Bild- sowie zwei Audiokanäle für HDMI-Schnittstellen vorgeschrieben. Jegliche weitere Funktion ist optional.

Die geläufigsten HDMI Verbindung ist der Typ A. Dieser hat 19 Kontakte (Abbildung 62). Von diesen werden 6 für eine differentielle Datenübertragung von einem Bild- und zwei Audiokanälen verwendet. Das Taktsignal wird ebenfalls differentiell übertragen. Diese sind mit einem Metallgeflecht abgeschirmt, welche zusätzlich je einen Kontakt verwenden. 2 Leitungen werden für die Spannungsversorgung 0V/5V verwendet. Pin 14 ist für besondere Anwendungen reserviert. Die übrigen Leitungen werden für spezielle HDMI-Funktionen, wie zum Beispiel eine komponentenübergreifende Steuerleitung, verwendet.

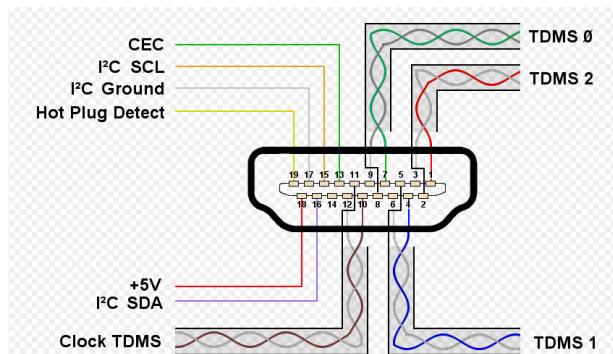


Abbildung 62 HDMI Type A [17]

### 5.2.2 ADS 1115 Modul

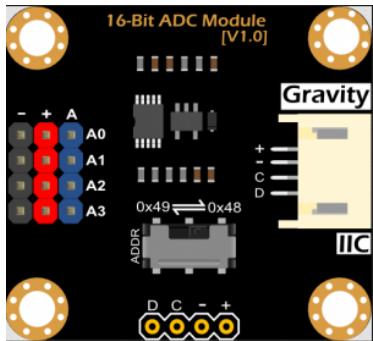


Abbildung 63 ADS1115 Modul

Da alle Schnittstellen des Raspberry Pi's digital sind braucht es für die Messung von analogen Größen, wie der Akkuspannung, eine Analog-Digital-Wandlung (AD-Wandlung). Hierfür wird das ADS1115 Modul des Herstellers DFRobot verwendet (Abbildung 63, [18]). Dieses basiert auf dem gleichnamigen Chip von Texas Instruments [s. 5.2.2.1]. Es ist für eine Versorgungsspannung von 3,3V bis 5V ausgelegt. Da Analogwerte nur bis knapp unter der Versorgungsspannung gemessen werden können ist . Die analogen Werte können entweder direkt als Referenz gegenüber GND oder als Differenzwerte eingelesen werden. Die Übertragung der gewandelten Werte erfolgt über I2C [s. 5.2.1.2]. Die Adresse, unter der mit dem Modul kommuniziert werden kann, ist über einen Kippschalter einstellbar. Eine genauere Beschreibung der Verwendung erfolgt unter 5.5.2

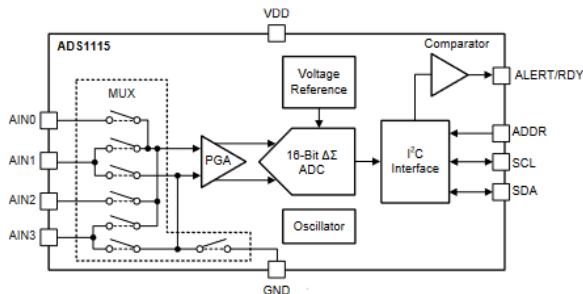


Abbildung 64 ADS1115 Blockdiagramm

### 5.2.2.1 TI ADS1115

Bei dem IC ADS1115 handelt es sich um einen low power, 16bit, I<sup>2</sup>C kompatiblen Analog-Digital-Wandler (ADW). Er verfügt über vier Analogeingänge, welche mit einem konfigurierbaren Multiplexer verbunden sind (Abbildung 64, vgl. [19] ). Dieser ermöglicht eine single-end conversion, welche die Versorgungsspannung und GND als Referenz verwendet, oder eine differential conversion, welche die Differenz zwischen Eingängen als Referenz verwendet.

Die Umsetzung der analogen Spannungswerte geschieht auf dem Prinzip der Delta-Sigma-Modulation. Bei dieser wird das rückgeführte, analoggewandelte Ausgangssignal vom analogen Eingangssignal subtrahiert. Diese Differenz wird mit einem Integrator aufsummiert. Daher der Name Delta-Sigma. Diese Summe wird an einen Komparator geschickt, welcher logisch eins am Ausgang ausgibt, wenn der Wert der Summe größer null ist. Ansonsten gibt er logisch null aus. Dieser Wert wird in einem D Flip-Flop gespeichert, nach jedem Taktzyklus ausgegeben und für die Rückführung verwendet. Am Ausgang erhält man ein Bitmuster, dessen mittleres Tastverhältnis proportional zur analogen Eingangsspannung ist. Da die serielle Umwandlung länger benötigt als eine parallele tastet Delta-Sigma-ADC das Signal mit einem Vielfachen der höchsten im Signal vorkommenden Frequenz ab. Üblich sind hierbei Faktoren von 16- bis 256-mal die Signalfrequenz.

## 5.3 Internetanbindung

### 5.3.1 Realisierungsmöglichkeiten

Um die Funktion der Wetterdienst- und Fernüberwachungsfunktionen sicherzustellen, benötigt die Ladestation eine Verbindung zum Internet. Da vorgesehen ist, die Station an abgeschiedenen Orten aufzustellen, ist eine Anbindung per Kabel nicht möglich. In der Planungsphase haben sich drei mögliche Alternativen für eine Verbindung aufgetan:

- Per Satellit
- Kommunikation mit einer Bodenstation
- Über ein GSM-Modul

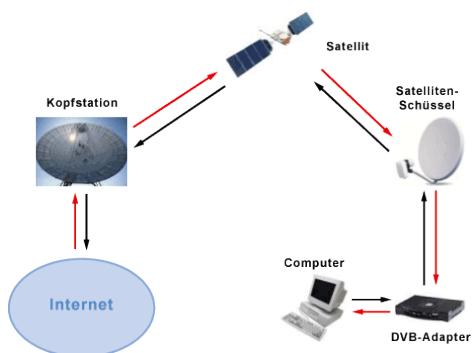


Abbildung 65 Internetempfang per Satellit

Internetempfang über einen Satelliten ist vielerorts kein Problem. Jedoch ist diese Variante mit hohen Tarifkosten und einer, im Vergleich zu den anderen Alternativen, komplexen Empfangsstufe verbunden (Abbildung 65, [19]). Für die Verbindung zum Satelliten wird eine Richtantenne benötigt, die auf einen Satelliten ausgerichtet werden muss, welcher eine Internetverbindung unterstützt. Zusätzlich bedarf

es einer Schaltung welches die Funktion eines Modems übernimmt, um die Daten, welche übertragen werden, an das System anzupassen. Somit erschließt sich dieses System als kosten- und zeitineffizient.

Als zweite Lösungsvariant stand eine Berg-Bodenstation Lösung zur Debatte. Die Bodenstation wird an einem Ort aufgestellt, an welchem eine Internetverbindung gewährleistet werden kann. Somit ist es dieser möglich Daten vom Internet zu beziehen und zu senden. Die Bergstation wird wie vorgesehen am Berg aufgestellt und kommuniziert über eine kabellose Schnittstelle mit der Bodenstation. Der Datenaustausch der beiden Station geschieht über ein LoRa-Modul. Bei LoRa handelt es sich um ein Übertragungsverfahren, welches für kabellose Verbindungen über weite Strecken benutzt wird (vgl. [20]) Module, welche diesen Standard

benutzen, sind kostengünstig und besitzen einen niedrigen Stromverbrauch. Aufgrund der hohen Reichweite ist es möglich mehrere Bergstationen mit einer Bodenstation anzusprechen. Aufgrund des hohen Entwicklungsaufwands, den eine zweite Station mit sich bringen würde, wurde diese Lösung abgewiesen.

Eine direkte Verbindung der Station mit dem Mobilfunknetz setzte sich als kosten- und zeiteffektivste Lösung durch. Die Netzinfrastruktur in Österreich lässt es zu, dieses Ziel anzustreben. Aufgrund der hieraus resultierenden Wahrscheinlichkeit, dass die Station an Orten ohne Netzempfang aufgestellt wird, ergibt sich das Kriterium, dass die Wettervorhersage- und Ferndiagnosefunktion nicht allerorts verfügbar ist.

### 5.3.2 Wellenausbreitung

Als Energieträger für kabellose Verbindungen werden elektromagnetische Wellen verwendet. Diese bestehen aus einer elektrischen und einer magnetischen Feldkomponente, welcher

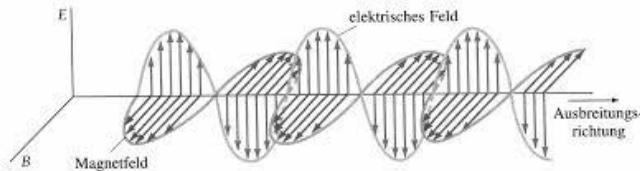


Abbildung 66 Elektromagnetische Welle

normal zueinander und transversal zur Ausbreitungsrichtung stehen (Abbildung 66, [21]).

Wellenlänge ist invers proportional zur Frequenz. Jede EM-Welle breitet sich, unabhängig von der Frequenz, mit Lichtgeschwindigkeit<sup>2</sup> aus.

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} * \frac{1}{f}$$

$\lambda$  ... Wellenlänge,  $c$  ... Lichtgeschwindigkeit im Medium,  $f$  ... Frequenz,

$\epsilon$  ... Permittivität,  $\mu$  ... Permeabilität

---

<sup>2</sup> Nur in den Medien Luft und Vakuum gültig

Mathematisch lässt sich die Ausbreitung von E- und H-Feldern über die Maxwell Gleichungen bestimmen. Da diese mathematische komplex sind ist dies keine praktische Lösung.

Je nach Art der Ausbreitung lassen sich EM-Wellen in zwei Kategorien unterteilen: Boden- und Raumwellen. Die Bodenwelle breitet sich nahe dem Erdboden parallel zur Erdkrümmung aus. Dieser Welle verliert, abhängig von der Leitfähigkeit des Untergrundes, über dem sie sich ausbreitet, an Energie. Am Festland ist die Reichweite geringer als zum Beispiel über einem Salzwassermeer. Mit steigender Frequenz steigt bei dieser Art der Ausbreitung auch der Erdverlust, da mehr Energie an den Untergrund abgegeben wird.

Raumwellen breiten sich frei im Raum aus. Für eine Funkverbindung mit einer Raumwelle wird das Reflexionsverhalten der Ionosphäre genutzt. Diese wird in übereinanderliegenden Schichten aufgeteilt. Je nach Frequenz werden EM-Wellen von diesen absorbiert, transmittiert oder reflektiert. Dies resultiert aus der Energie der Welle, welche Teilchen in der Ionosphäre anregt und somit ionisiert.

$$E = h\omega = \hbar f$$

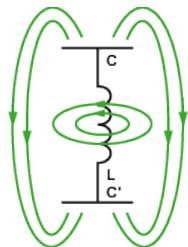
*E ... Energie der Welle*

*h ... Planksche Wirkungsquantum,  $\hbar$  ... reduzierte Planksche Wirkungsquantum [vgl. 18]*

Damit es bei Funkverbindungen nicht zu Komplikationen kommt sind die Frequenzen in Bänder eingeteilt und bestimmten Betriebsarten zugeschrieben worden. Diese Festlegungen gehen von der ITU sowie von lokalen Fernmeldebehörden aus. Aus den zugewiesenen Frequenzen lässt sich viel über das Ausbreitungsverhalten aussagen. Bei hohen Frequenzen ab dem UKW-Bereich spricht man von einer optischen Ausbreitung. Sender und Empfänger müssen in Sichtweite zueinander sein. Gebäude oder andere Hindernisse blockieren diese Wellen. Die Ausbreitung als Raumwelle ist möglich, jedoch kommt es in der Ionosphäre zu keiner Reflexion.

### 5.3.3 Antenne

Als Antennen bezeichnet man mechanische Einrichtungen, welche verwendet werden, um leitungsgebundene Energie in wellengebundene Energie um- und zurückzusetzen. Für die Funktion kann man sich eine Antenne als einen verlustlosen LC-Schwingkreis vorstellen, dessen



Kondensatorplatten aufgebogen wurden (Abbildung 67, [23]).

Wichtige Kenngrößen für Antennen sind: Gewinn, Eingangsimpedanz, Öffnungswinkel und Bandbreite. Der Gewinn ist ein Maß für die Richtfähigkeit einer Antenne. Er gibt an um welchen Faktor die Feldausbreitung in Richtung der Hauptkeule besser ist als der einer

*Abbildung 67 Antennen als RL-Schwingkreis* Referenzantenne. Meist wird als Referenz ein isotroper Kugelstrahler gewählt. Die Eingangsimpedanz ist von Relevanz für die Leistungsanpassung einer HF-Schaltung. Die Speiseleitung einer Antenne muss dieselbe Impedanz aufweisen wie die Antenne selbst, da ansonsten ein Teil der Leistung zurückreflektiert wird. Der Öffnungswinkel bezeichnet den Winkelbereich, in welchem eine Antenne die Hälfte ihrer Leistung abstrahlt. Die Bandbreite gibt an, in welchem Frequenzbereich sich die Charakteristiken einer Antenne nur geringfügig ändern.

Als Veranschaulichung der Strahlungseigenschaften einer Antenne wird das Antennendiagramm verwendet, aus welchen man wichtige Kenndaten der Antenne ermitteln kann. Diese werden entweder messtechnisch oder mittels Simulation bestimmt. Aufgetragen werden entweder die absolute Feldstärke, die absolute Leistung oder eine der beiden Größen in Bezug auf eine Referenzantenne dargestellt.

### 5.3.4 Mobilfunknetz

Mobilfunk bezeichnet eine kabellose Verbindung zwischen zwei Geräten. Die daraus resultierende Unabhängigkeit von direkten, kabelgebundenen Verbindungen ermöglicht den Betrieb von beweglichen Geräten wie zum Beispiel Handys. Für diesen Anwendungsbereich werden von diversen Betreibern Funkantennen errichtet, über welche Mobilfunkgeräte eine

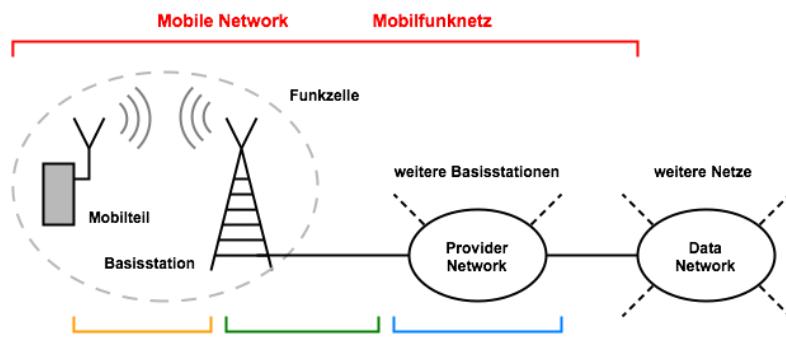


Abbildung 68 Netzstruktur Mobilfunknetz

Verbindung zum Netz des Providers herstellen können (Abbildung 68, [24]).

Das Mobilfunknetz verfügt über eine Zelltopologie. Alle innerhalb einer Zelle befindlichen Geräte sind mit dem selben Access Point verbunden. Dieser Access Point ist wiederum kabelgebunden an das Betreibernetz angebunden und stellt dessen Funktionen zur Verfügung. Um eine funktionelle Kommunikation zu gewährleisten, benötigen die einzelnen Geräte eine distinkte Signatur. Hierzu dient die Mobilfunknummer, beziehungsweise für Internetfunktionen die IP-Adresse. Üblicherweise verbinden sich Consumer Electronics mit dem Access Point, welcher die stärkste Verbindung aufweist.

Da das Mobilfunknetz ständig weiterentwickelt wird, sind verschiedene Technologiestandards entstanden. Diese werden in Generationen unterteilt. Die erste Generation besteht rein aus analogen Verfahren. Alle weiteren benutzen digitalen Datenübertragung. Der prägnanteste Unterschied zwischen den Standards ist die Datenrate sowie die Reichweite, welche sich größtenteils durch die genutzte Frequenz ergibt.

### 5.3.5 GSM-Standard

Die zweite Generation des Mobilfunkstandards bildet der Global Standard for Mobile Communications (kurz GSM). Dieser wurde in den 90er Jahren entwickelt, um Mobiltelefonie mit digitalen Verfahren zu ermöglichen. Dadurch sind die Signale weniger störanfällig. Als Weiterentwicklung dieses Systems gab es den General Packet Radio Service (kurz GPRS). Dieser wurde für die Übertragung von Daten geschaffen und benutzt dasselbe Netz.

Für die Kommunikation werden zwei Frequenzbänder verwendet [vgl. 14]. Diese sind GSM900 (880-915MHz und 925-960MHz) und GSM1800 (1710-1785MHz und 1805-1880MHz). Der untere Frequenzbereich wird für den Uplink verwendet. Hierbei gehen die Daten vom Endgerät in Richtung Betreibernetz. Der obere Frequenzbereich wird für den Datenstrom zum Endgerät verwendet und wird als Downlink bezeichnet.

Die einzelnen GSM-Kanäle verfügen über eine Bandbreite von 200kHz. Somit können 175 Kanäle im GSM900 Band, sowie 375 Kanäle im GSM1800 Band verwendet werden. Da diese Kanallimitierung die maximale Anzahl an Benutzern pro Zelle stark einschränken würde wird ein Zeitmultiplexverfahren verwendet. Diese ermöglicht es einem Kanal 8 Benutzer zuzuweisen, welche jeweils einen Slot von 0,57 Millisekunden für ihre Übertragung verwenden.

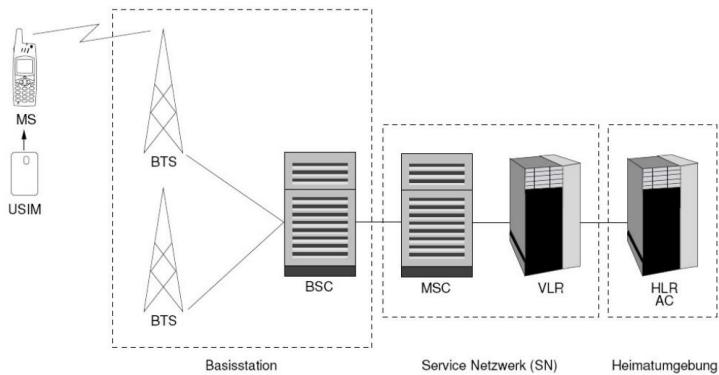


Abbildung 69 Netzstruktur GSM

Abbildung 69 zeigt die Netzstruktur des GSM-Netzes. Das Mobilfunkgerät verbindet sich mit der nächsten Basisstation und registriert sich dort. Für die Registrierung wird eine Teilnehmeridentifikation benötigt. Dies wird mit einer SIM bewerkstelligt (s. 5.3.6.2). Nach der Base Transceiver Station (BTS) ist das Netz kabelgebunden. Die einzelnen Masten werden über das Base Switching Center (BSC) verbunden. Hinter den Basisstationen steht ein Servicenetz, welches die einzelnen Basisstationen miteinander verknüpft. Hier befindet sich auch das Visitor

Location Register (VLR). Wenn Benutzer sich in einem fremden Netz registrieren, werden sie hier vermerkt, damit diese auch außerhalb des Heimatnetzes erreichbar sind. Im Home Location Register (HLR) bildet die zentrale Datenbank in einem Mobilfunknetz und ist für dessen Administration zuständig. In ihr sind alle Benutzerdaten gespeichert.

### 5.3.6 GSM-Modul

Damit sich der Raspberry Pi mit dem Mobilfunknetz verbinden kann wird ein GSM-Modul verwendet. Dieses bildet die Schnittstelle zwischen der Ladestation und dem Internet. Die erste Wahl fiel auf das SIM800L Modul. Dieses wurde aufgrund seiner Verfügbarkeit, Kosteneffizienz und verfügbaren Dokumentation gewählt. Nach einer Reihe von Testversuchen wurde festgestellt, dass dieses Modul fehlerhaft ist und eine eingelegte SIM-Karte nicht erkennt. Daher wurde als Alternative das IOT-GA6 Modul des Herstellers Guuooo Tech gewählt. Hier wird eine PCB-Antenne verwendet. Hierbei handelt es sich um eine, auf einer Platine aufgedruckten Antenne. Die Leiterbahnen wurden vom Hersteller entsprechend dimensioniert um für die Anwendung als GSM-Antenne zu fungieren.

#### 5.3.6.1 Controllerchip GSM A6

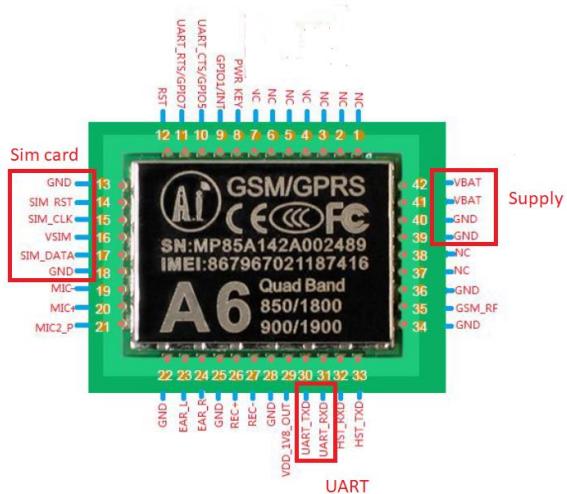


Abbildung 70 Pin-Beschreibung SIM A6

Als Haupt-IC des GSM Moduls dient der A6 GSM/GPRS Chip des Herstellers Ai-Thinker (Abbildung 70).

Für die Internetverbindung sind die drei rot markierten Komponenten des Chips von Relevanz. Der untere Bereich dient der Datenübertragung zum Raspberry Pi über eine UART Schnittstelle (s. 5.2.1.3).

Für die Versorgung wird eine Spannung von 3,3V – 4,2V benötigt. Da das Modul einen integrierten Abwärtswandler besitzt wird es direkt mit der 5V Versorgung der MPS verbunden. Im Normalbetrieb benötigt das Modul 100 Milliampere und kann daher mit der mit derselben Leitung versorgt werden, wie die restliche Schaltung.

### 5.3.6.2 SIM-Karte

Ein subscriber identity module (SIM) wird zur Identifikation eines Netzteilnehmers verwendet [vgl. [26]]. Hierfür wird jeder SIM-Karte eine weltweit einmalige IMSI zugewiesen. Diese besteht aus einem dreistelligen Landeskenner, einem Netzwerk-Code mit zwei oder drei Stellen und einer Teilnehmeridentifikationsnummer mit bis zu 10 Stellen. Üblicherweise sind dies kleine Chipkarten, für welche ein Slot an Mobilfunkgeräten vorgesehen ist. GSM-Module benutzen diese ebenfalls. Die Steuerung hierfür wird vollkommen vom IC übernommen.

### 5.3.6.3 Funktionstest des GSM Moduls

Für die Konfiguration und Steuerung des GSM-Moduls wird der AT-Befehlssatz verwendet.

Hierbei handelt es sich um einen Befehlssatz, welcher in den 1980er von Hayes Microcomputer Products, für die Parametrierung von Modems entwickelt wurde. Einige dieser Befehle wurden verwendet, um die Funktion des GSM-Moduls zu testen. Um diese Befehle an das Modul zu senden, wird der screen Befehl verwendet. Dieser öffnet ein Konsolenfenster, welches als Kommunikationsmittel für zusätzliche Geräte verwendet werden kann. Das Modul ist bereits vom Hersteller so konfiguriert, dass es beim Booten einige AT-Befehle ausführt und ausgibt (Abbildung 72). Somit kann sofort festgestellt werden, ob dieses funktioniert.

```
AT Ready
AST_POWERON
+CREG: 2
SMS Ready
Call Ready
+CREG: 1
```

Abbildung 72 GSM boot-up Befehle

Rückgabewerten

```
AT
OK
AT+CPIN?
+CPIN:READY
OK
AT+CREG?
+CREG: 1,1
OK
AT+CSQ
+CSQ: 21,99
OK
```

Abbildung 71 GSM Testbefehle

Abbildung 71 zeigt zusätzliche Befehle, mit welchen das GSM-Modul getestet wurde. Die Befehle, sowie die Bedeutung der Rückgabewerte sind im Internet auf etlichen Seiten einsehbar. Für unsere Interpretation (Tabelle 4) wurde die Liste der Seite m2msupport.net verwendet, da diese eine Vielzahl

von Befehlen beinhaltet, und Bedeutungen von exakt formuliert.

Befehl	Funktion	Rückgabe	Ergebnis
AT	Testet die Funktion des GSM Moduls	Ok	GSM Modul und die Kommunikation mit diesem funktioniert
AT+CPIN?	Zeigt, ob die SIM-Karte entsperrt ist	Ready	SIM-Karte ist entsperrt
AT+CREG?	Zeigt den Registrierungsstatus des Modems	1, 1	Im GSM Heimnetz registriert
AT+CSQ	Zeigt Signalstärke an	21,99	Signalstärke des Netzes ist sehr gut
ATD*Nummer*	Tätigt Anruf an *Nummer*	Ok	Anruf wurde durchgestellt

Tabelle 4 Interpretation GSM Test

Aus dem Test geht hervor, dass das GSM-Modul alle geforderten Funktionalitäten erfüllt und für das Herstellen einer Internetverbindung verwendet werden kann.

### 5.3.7 Point-to-point-protocol (PPP)

Da das GSM Modul mittels UART mit dem Raspberry Pi kommuniziert können die Daten nicht direkt über das GSM-Netz in das Internet gesendet werden. Es benötigt zuvor eine korrekte Paketierung und eine Überwachung der Datensendungen. Hierfür wird am Raspberry Pi ein Point-to-Point Protocol aufgesetzt. Dieses stellt eine direkte Verbindung zwischen zwei Geräten her und übernimmt die Kapselung der Daten und überwacht die Verbindung. In unserem Fall sind die zwei Endgeräte das GSM-Modul und das Netz des Mobilfunkanbieters.

```

GNU nano 3.2          peers/rnet
#1. imis/internet is the apn for idea connection
connect "/usr/sbin/chat -v -f /etc/chatscripts/gprs -T drei.at"
#2. For Raspberry Pi comm port
/dev/ttyAMA0
#3. Baudrate
115200
#4. Assumes that your IP address is allocated dynamically
noipdefault
#5. Try to get the name server addresses from ISP
usepeerdns
#6. Use this conn as default route to the internet
defaultroute
#7. Makes PPPD "dial again" when conn is lost
persist
#8. Do not ask the remote to auth
noauth
#9. No flow control with GSM Module
nocrtscts
#10. No modem control lines with GSM Module
local

```

Abbildung 73 Konfiguration PPP

Device die Verbindung hergestellt wird.

Abbildung 73 zeigt das Konfigurationsskript für das PPP. In der ersten Zeile befinden sich Parameter für die Verbindung zum Netzanbieter. Die ersten Parameter sind Pfade zu bereits existierenden Skripten. Als letzter Parameter wird der Access Point Name (APN) des Providers übergeben.

Die nächsten beiden Zeilen legen fest mit welcher Baudrate und über welches

Die übrigen Zeilen legen Optionen für das Management der Verbindung fest.

- noipdefault: Die IP-Adresse wird vom Provider bestimmt
- usepeerdns: Es wird der Domain Name Service (DNS) des Providers verwendet
- defaultroute: Die hier festgelegte Verbindung wird als standardmäßige Internetverbindung verwendet
- persist: Nach Netzverlust wird automatisch wieder versucht eine Verbindung herzustellen
- noauth: Es wird keine Authentifizierung für die Benutzung der Verbindung benötigt
- nocrtscts: Deaktiviert die Hardware Steuerung des Datenflusses
- local: Sperrt die Verbindung aus Punkt 2 für Benutzungen außerhalb des PPP

## 5.4 Wetterdaten

### 5.4.1 BMP180

Für die Messung der Wetterdaten vor Ort wird der Bosch BMP180 Sensor verwendet, welcher auf einer gleichnamigen Modulplatine verbaut ist. Es handelt sich hierbei um einen digitalen Luftdruck- und Temperatursensor. Da dessen Auflösung gut genug ist und er zu Projektbeginn bereits zur Verfügung stand, wurde dieser seinem Nachfolgermodell, dem BMP280, vorgezogen. Darüber hinaus ist der Stromverbrauch des BMP280 viel höher.

Die Messungen basieren auf dem piezoresistiven Effekt [vgl. [27]]. Je nach Druckeinwirkung auf das Sensorelement ändert es seinen Widerstand. Dieser Effekt ist bei allen leitenden Materialien zu beobachten, da der elektrische Widerstand abhängig von der Geometrie eines Leiters ist:

$$R = \frac{\rho * l}{A}$$

*$\rho$  ... Spezifischer Widerstand,  $l$  ... Länge des Leiters,  $A$  ... Leiterquerschnittsfläche*

Der genaue Aufbau oder die Funktionsweise des Sensorelements des BMP180 wird im Datenblatt nicht beschrieben. Vermutungen legen nahe, dass es sich um ein Halbleiter Piezoelement handelt, da diese empfindlicher auf Druckänderungen reagieren als gewöhnliche Metallelemente. Um diese Empfindlichkeit weiter zu erhöhen, wird es vermutlich als Teil einer Messbrücke verwendet. Über das Verhalten des Piezoelements können Rückschlüsse auf die Temperatur geführt werden, da die erzeugte Schwingung stark temperaturabhängig ist.

Die Datenübertragung erfolgt über das I2C-Interface (s. 5.2.1.2). Als Grundlage für die Software dienen die BMP085 Python Codes des Unternehmens Adafruit. Diese funktionieren auch beim BMP180, jedoch wurden sie so umkonfiguriert, dass die nötigen Daten direkt in Node Red weiterverarbeitet werden können (s. 5.5.2).

## 5.5 Web-Interface

### 5.5.1 Grundlagen

Für die Gestaltung des Webinterfaces wird das von IBM entwickelte Entwicklungstool „Node Red“ verwendet. Hierbei handelt es sich um ein, auf JavaScript basierendes, grafisches Entwicklungswerkzeug, welches die Implementation von IOT-Anwendungen vereinfacht. Dieses Tool wurde gewählt, da es hoch adaptierbar ist und viele Funktionen mit sich bringt, welche die Umsetzung des Projekts vereinfachen.

In Zusammenhang mit diesem wird der Onlinedienst „OpenWeatherMap“ verwendet, um die Daten für die Wettervorhersage zu beziehen.

#### 5.5.1.1 *OpenWeatherMap*

Bei OpenWeatherMap (OWM) handelt es sich um einen Onlinedienst, welcher Wetterdaten zur freien Nutzung zu Verfügung stellt. Als Nutzer dieses Dienstes bekommt man einen API-Schlüssel. Eine API (Application Programming Interface) wird als Schnittstelle zwischen zwei Softwarekomponenten verwendet. Somit kann dieser Schlüssel im Node Red System verwendet werden, um die Wetterdaten zu bekommen. Da diese nicht veränderbar sind ist diese Funktion von OWM abhängig. So muss eventuell die Wettervorhersage eines nahen Ortes verwendet werden, wenn für den exakten Standort keiner vorliegt. Darüber hinaus sind die Vorhersagen auch nur in 3 Stunden Intervallen vorliegend.

### 5.5.2 Node Red

Das Hauptgerüst von Node Red bilden die namensgebenden Nodes. Die einzelnen Nodes erfüllen jeweils eine bestimmte Aufgabe. Einige sind standardmäßig in die Entwicklungsumgebung integriert. Weitere, von anderen Nutzern zur Verfügung gestellte, können über eine Onlinebibliothek in ein Projekt integriert werden. Über JavaScript Anwendungen ist es möglich selbst Nodes zu erstellen und diese dem System hinzuzufügen. Neben der Standardbibliothek und zusätzlichen Raspberry Pi Nodes werden eine OWM-, eine ADS1115- sowie eine Dashboard-Bibliothek verwendet. Die OWM-Nodes ermöglichen es die unter 5.5.1.1 genannten Funktionen der Wettervorhersage zu implementieren. Die Dashboard-Nodes ermöglichen eine einfache Implementierung eines Benutzer-Interfaces.

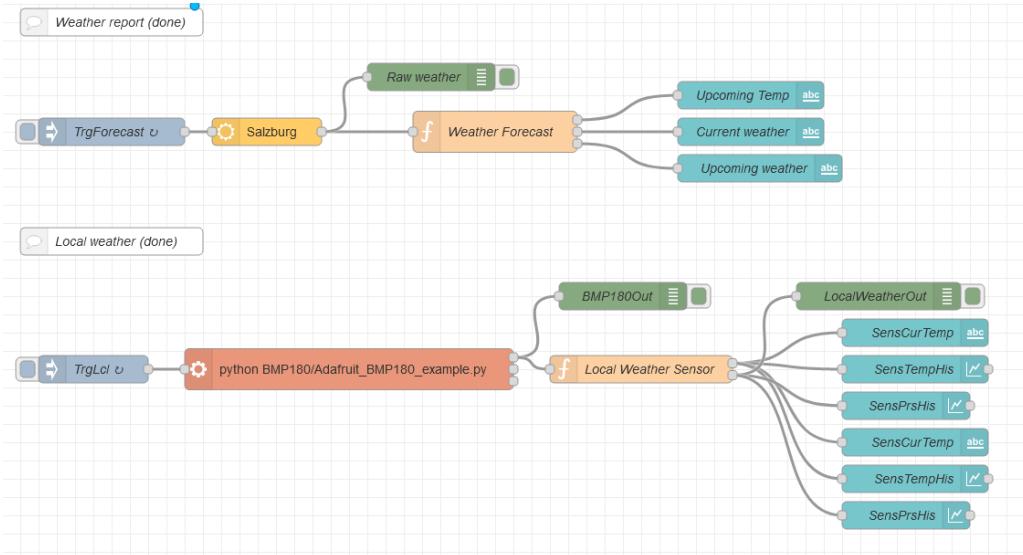


Abbildung 74 Node Red Wetterbericht

Abbildung 74 zeigt die Implementierung der Wettervorhersagefunktion in Node Red. Die obere Zeile an Nodes sorgt für die Vorhersage. Die untere wertet die Daten des BMP180 aus.

Beide Zeilen beginnen mit einem inject-Node. Diese wurden so konfiguriert, dass sie die nachfolgende Kette in bestimmten Intervallen auslösen. Der BMP180 wird alle 15 Sekunden ausgelesen, damit genügend Werte für den graphischen Verlauf vorliegen und der Benutzer immer aktuelle Werte auslesen kann. Da die Vorhersage einem Intervall von drei Stunden unterliegt wird dieser nur jede 15 Minuten ausgewertet.

Als zweiter Block in der oberen Zeile befindet sich ein OWM-Node. Dieser wurde so eingestellt, dass er auf ein 5-Tage Vorhersage eines Standortes zugreift. Als zweiter Block in der unteren Zeile befindet sich ein exec-Node. Diese führt einen beliebigen Konsolenbefehl aus. In diesem Fall führt er das Python Programm für das Auslesen der BMP180 Daten aus.

Vor der Ausgabe durchlaufen die Daten function-Nodes. In diese können JavaScript Programme implementiert werden und somit die Daten beliebig bearbeitet werden. Eine genauere Analyse einem dieser Blöcke erfolgt unter 5.5.3.

Am Ende der Zeilen befinden sich dashboard-Nodes. Diese werden für die Ausgabe und Visualisierung der Daten verwendet. Verwendet werden Textfelder und Liniendiagramm. Eine Ansicht der fertigen Anzeige ist unter 5.5.4 ersichtlich.

Bei den grünen Nodes handelt es sich um debug-Nodes. Diese geben die Werte, welche sie erhalten in einer Konsole aus. Sie sind nur während der Entwicklung von Bedeutung, um Funktionen zu überprüfen.

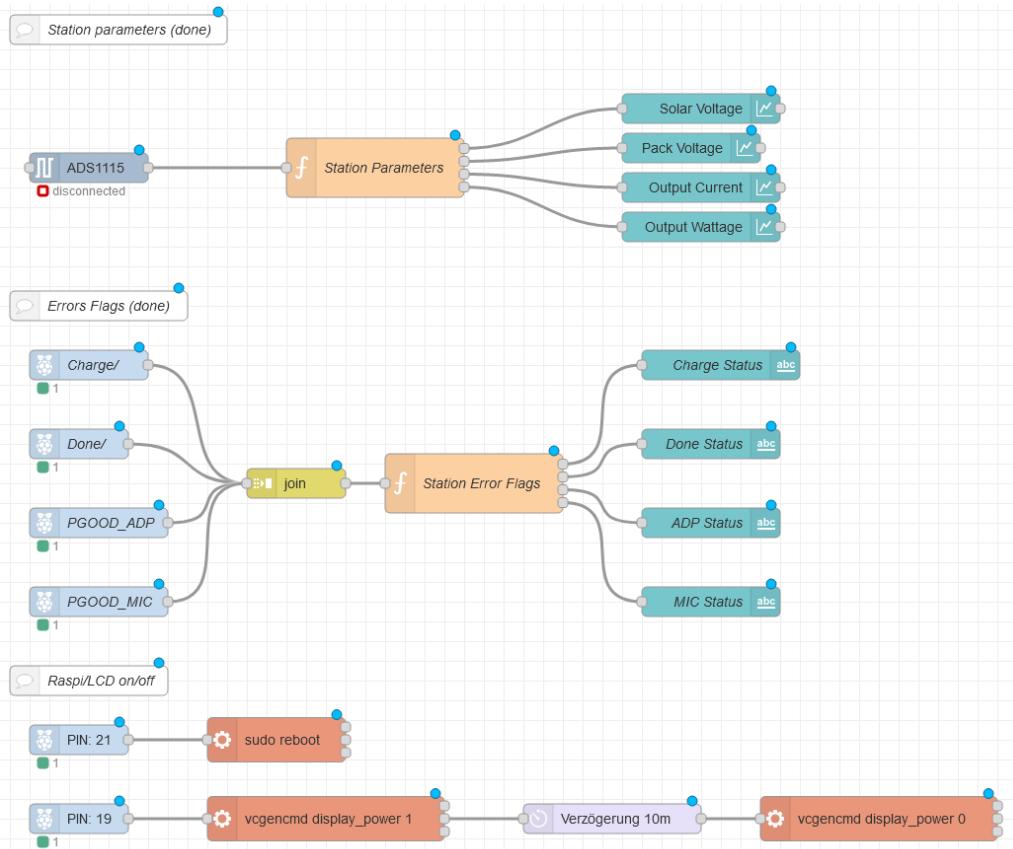


Abbildung 75 Node Red Ferndiagnose

Abbildung 75 zeigt die Implementierung für die Ferndiagnose. Der oberste Block wertet die Daten des ADS1115 (5.2.2) aus. Dieser misst mit seinen analogen Eingängen technische Kennwerte der Station. Der Node musste passend konfiguriert werden, da der programmable gain amplifier (PGA) nicht korrekt konfiguriert war. Hierfür wurde die Verstärkung softwareseitig empirisch so eingestellt, dass der Fehler für den gesamten Messbereich (0V-5V) sehr gering ausfällt. Die gemessenen Werte werden weiterverarbeitet, auf den ursprünglichen Werte zurückgerechnet und in einem Liniendiagramm dargestellt. Somit ist es möglich die Nutzung und Versorgung der MPS zu überwachen.

Die unteren beiden Blöcke lesen Daten der GPIO-Pins (s. 5.2.1.1) des Raspberry Pis ein. Der mittlere Block verarbeitet flags des Ladereglers(s. 5.1.6) sowie der Schutzschaltung(s. 5.1.7). Die Ansicht ist für die Ferndiagnose ist unter 5.5.5 ersichtlich.

Der untere Block ist für lokale Benutzung zuständig. Die obere Zeile regelt einen Neustart des Raspberry Pis über einen Schalter. Dies ist nötig, da der Pi selbst über keinen Rücksetzknopf verfügt und er nicht einfach von der Versorgung getrennt werden soll. Die untere Zeile regelt die Ein- und Ausschaltung des Displays. Bei einer Zustandsänderung mit einem Schalter wird das Display eingeschalten und nach einer Verzögerung von 10 Minuten wieder ausgeschalten.

### 5.5.3 JavaScript

Bei JavaScript handelt es sich um eine Skriptsprache, welche für dynamische Webanwendungen entwickelt wurde [vgl. [28]].

```
1  /*
2   // program name: weather forecast
3   // author: Thomas Fellner
4   // date: 04.02.2022
5   // function: Gets data from server of OpenWeatherMap and puts it
6   //             to corresponding dashboard part
7  */
8  var upcomTemp = {payload:""};
9  var curWeather = {payload: msg.payload[0].weather[0].main};
10 var upcomWeather = {payload:""};
11
12 var lastWeather=curWeather;
13 lastWeather.payload=curWeather.payload;
14 for(let i=0;i<8;i++){
15     //Temp.push({payload: msg.payload[i].main.temp});
16     upcomTemp.payload+=msg.payload[i].main.temp + "°C um " + msg.payload[i].dt_txt + "<br>";
17     if(lastWeather.payload != msg.payload[i].weather[0].main){
18         upcomWeather.payload +=msg.payload[i].weather[0].main +" "+ msg.payload[i].dt_txt + "<br>";
19         lastWeather.payload=msg.payload[i].weather[0].main;
20     }
21 }
22 curWeather.payload = msg.payload[0].weather[0].main
23 return [upcomTemp, curWeather, upcomWeather];
```

Abbildung 76 Node Red Funktion Wettervorhersage

Abbildung 76 zeigt eine JavaScript Anwendung, welche für die Wettervorhersage verwendet wird. Zuerst werden die Variablen initialisiert, welche am Ende an die Dashboard-Komponenten gesendet werden. Bei diesen Variablen handelt es sich um Objekte, welche alle das Attribut payload besitzen. Diese payload kann verschiedene Datentypen speichern und wird in Node Red für den wichtigen Teil der Daten verwendet. In der Variable upcomTemp werden kommende Temperaturwerte gespeichert. Die Variablen curWeather sowie upcomWeather sind für das momentane (current) sowie das kommende (upcoming) Wetter als Speicher gedacht.

Der zweite Block von Befehlen wertet die Daten aus. lastWeather speichert immer das Wetter, welches im aktuellen Durchlauf vorherrschend ist. Somit kann eine Wetteränderung detektiert werden. Da eine Vorhersage für 5 Tage zu weitreichend ist wurde die Schleife so begrenzt, dass nur die Daten der nächsten 24 Stunden vorliegend sind. Am Ende werden alle Daten an die Ausgänge des Nodes übergeben und an die zugehörigen dashboard-Nodes gesendet.

#### 5.5.4 Liquid Crystal Display

Damit der Endnutzer die Wetterdaten sehen kann, werden diese auf einem Liquid Crystal Display (LCD) angezeigt. Wir verwenden ein 5,5 Zoll touch-fähiges LCD mit einer Auflösung von 800x480 Pixel.

Die Funktionsweise dieser Displays beruht darauf, dass, durch elektrische Felder manipulierte, Flüssigkristalle die Streuung von Licht beeinflussen. Bei Flüssigkristallen handelt es sich um einen besonderen Zustand von kristallinen Strukturen, welcher beim Übergang vom festen in den flüssigen Aggregatzustand entsteht [vgl. [29]]. Die Ausrichtung der Kristalle in diesen Schichten kann über ein elektrisches Feld gesteuert werden. Je nach Stärke und Richtung des Feldes richten sich die Kristallstrukturen aus und beeinflussen somit die Eigenschaften des Lichts, welches es durchstrahlt. Für die Beleuchtung der Display wird eine Hintergrundbeleuchtung verwendet. Es ist dem Display auch möglich die Helligkeit der Umgebung auszunutzen.

Das Display verfügt über eine HDMI- und eine USB-Schnittstelle. Es müssen beide mit dem Raspberry Pi verbunden werden, damit es vollständig funktionstüchtig ist. Die USB-Schnittstelle wird für die Stromversorgung sowie für die Datenübertragung der Touch-Funktion verwendet. Letztere wurde nur in der Entwicklung verwendet und eine Manipulation des Benutzers über dieses Display wird mit einer Abdeckung vorgebeugt (siehe 0). Die Bilddaten selbst werden über die HDMI-Schnittstelle übertragen.

Da das Display einen sehr hohen Stromverbrauch hat, muss es vom Benutzer eingeschalten werden. 10 Minuten nach Einschaltung des Nutzers schaltet es sich automatisch wieder ab, damit kein unnötiger Stromverbrauch herrscht. Der Benutzer kann das Display jederzeit wieder aktivieren.

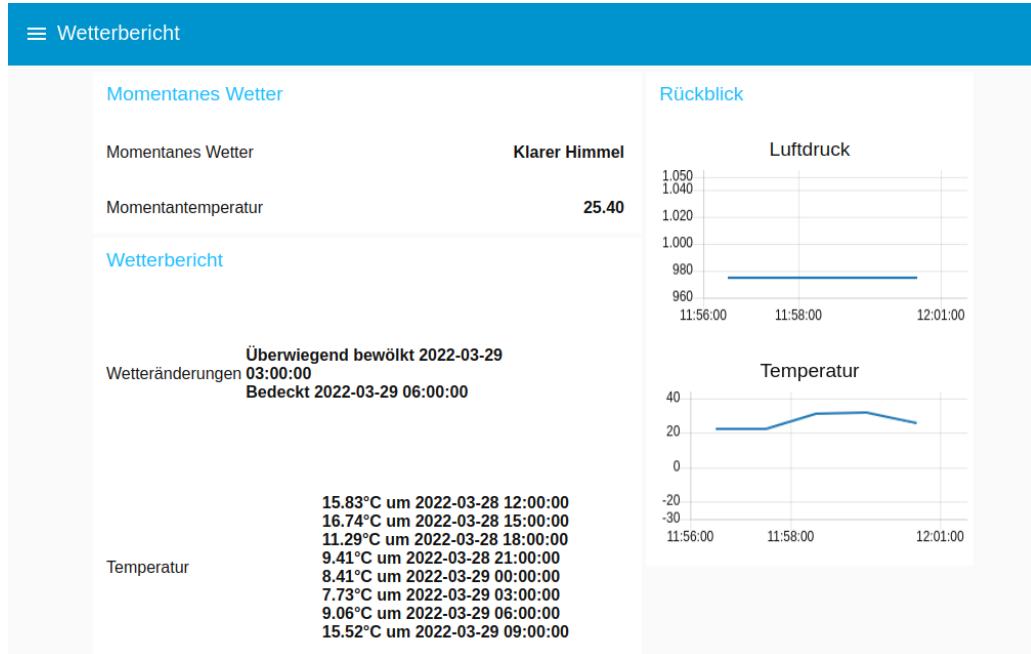


Abbildung 77 Node Red Benutzeransicht

Abbildung 77 zeigt die Ansicht für den Benutzer. Im Normalbetrieb kann er hier Information über das momentane sowie das kommende Wetter ablesen. Aus Gründen der Einfachheit werden für die Vorhersage nur Wetteränderungen angezeigt. In der linken Spalte des Fensters werden der vergangene Verlauf von Temperatur und Luftdruck ausgegeben. Da die Station noch nicht im Betrieb ist sind diese Werte hier abgängig. Aufgrund der Beschriftungen sollte es für den Endnutzer leicht verständlich sein, welche Daten wo ablesbar sind.

### 5.5.5 Webzugriff von außen

Da der Raspberry Pi mit dem Mobilfunknetz verbunden ist, ist seine IP-Adresse nicht statisch. Um die Anzahl an nötigen IP-Adressen zu reduzieren ist es üblich, dass sich diese in einem Provider Netzwerk spätestens alle 24 Stunden ändern. Wenn man nun den Node Red Server auf dem Raspberry Pi direkt erreichen möchte, müsste man das Netz erreichen können, mit dem der Raspberry Pi verbunden ist und dessen IP kennen. Da dies unpraktisch ist wird ein Dynamic Domain Name Service (DDNS) verwendet, damit der Raspberry Pi unter einer definierten URL erreichbar ist. Um dies zu erreichen wird der DDNS-Dienst des Anbieters No-IP verwendet. Dieser stellt vordefinierte URL Endungen zur Verfügung und bietet einen Dienst an, welcher Änderungen der IP-Adresse überprüft und diese an den Server sendet. Dieser wurde auf dem Raspberry Pi aufgesetzt und somit wird die aktuelle IP-Adresse dessen alle 10 Minuten an den

DDNS-Server gesendet. Somit ist der Raspberry Pi, solang eine Internetverbindung besteht, von außen erreichbar.

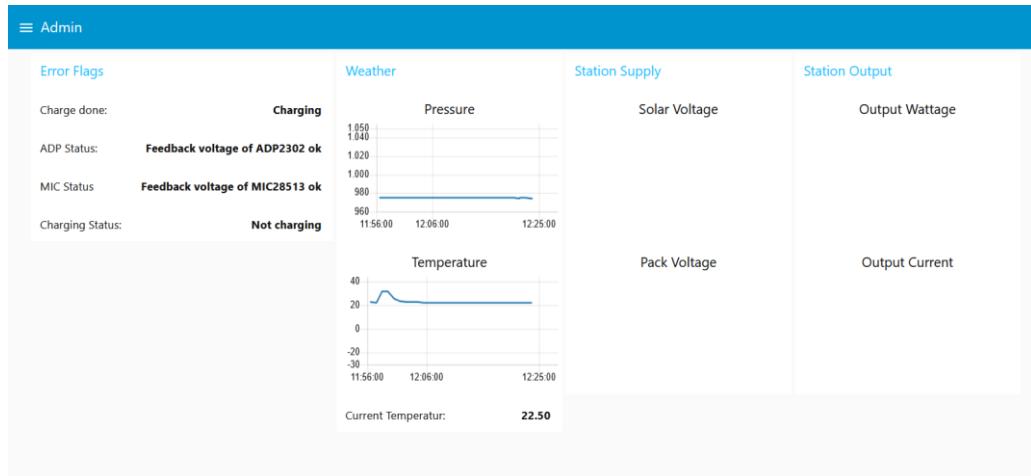


Abbildung 78 Node Red Diagnoseseite

Abbildung 78 zeigt die Ansicht für die Ferndiagnose. Im Unterschied zum Wetter-Interface ist es in englischer Sprache gehalten. Von links nach rechts ist zu sehen: Error Flags von Laderegler und Protection Circuit gemessene Wetterdaten des BMP180 und technische Daten der Station im Zeitverlauf.

Die Error Flags werden von den zugehörigen Chips selbst bestimmt und nur über die GPIO Pins des Raspberry Pi's eingelesen. Die Anzeige der Wetterdaten basiert auf denselben Funktionen wie die der Benutzeroberfläche. Daher sind in Abbildung 74 einige dashboard-Nodes doppelt vorhanden. Für die technischen Daten der Station werden die analogen Größen gemessen und mit dem ADS1115 umgewandelt (s. 5.2.2).

## 5.6 Gehäuse

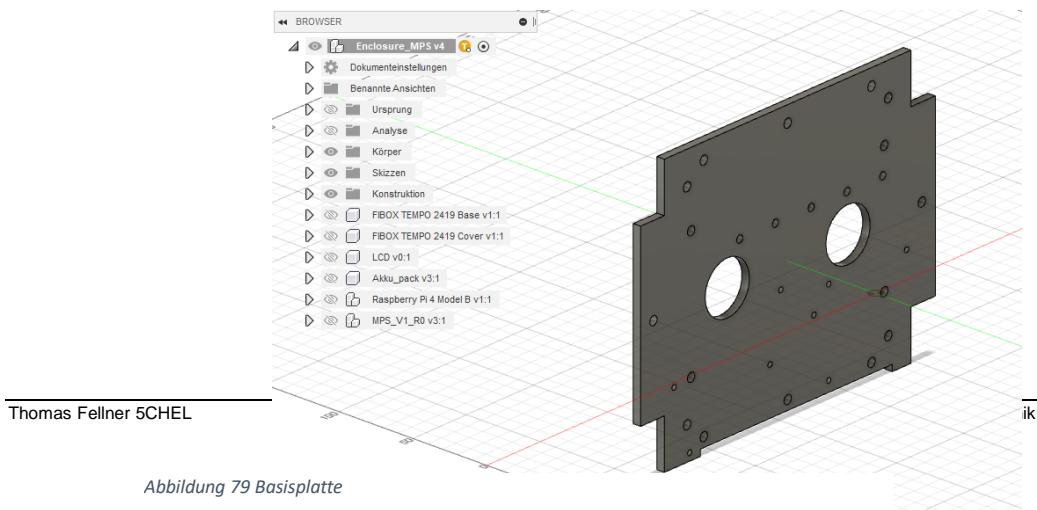
Für die Wahl eines geeigneten Gehäuses müssen viele Kriterien berücksichtigt werden. Im Fall der MPS sind dies folgende:

- Größe: Finden alle Komponenten Platz?
- Wetterfestigkeit: Da die MPS für Outdoor Nutzung vorgesehen ist muss das Gehäuse gegen Staubeindringen und Niederschlag geschützt sein.
- Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV): Besonders wegen des GSM-Moduls muss darauf geachtet werden, dass sich die EM-Wellen ohne Störung ausbreiten können
- Adaptiermöglichkeit: Da das Gehäuse nicht vollständig selbst hergestellt wird muss es möglich sein dieses, je nach Bedarf, verändern zu können

Der ausschlaggebendste Faktor für die Größe ist das Akkupack, da dessen Abmessungen die der anderen Komponenten überragen. Aufgrund der EMV und Adaptierbarkeit ist die Wahl auf Kunststoffgehäuse beschränkt worden. Darüber hinaus bieten diese auch noch Witterungsbeständigkeit. Damit die Elektronik gegen Niederschlag geschützt ist muss das Gehäuse mindestens die Schutzart IP65 aufweisen. Gehäuse ab dieser Schutzklasse sind für den Outdoorgebrauch verwendbar.

Die Berücksichtigung all dieser Kriterien hat zum Gehäuse TA241911 des Herstellers Fibox geführt. Hierbei handelt es sich um ein ABS Gehäuse mit den Außenabmessungen 240x191x107. Der Hersteller garantiert eine IP65 Konformität. Das Gehäuse ist vollständig gegen Berührung, Staubeindringen und Spritzwasser geschützt. Im Inneren befinden sich Abstandsbolzen für Befestigungen.

Für die Konstruktion der Teile innerhalb des Gehäuses werden die CAD Programme Fusion360



und XpertMill verwendet. Damit die einzelnen Komponenten im Gehäuse befestigt werden können ist eine Basisplatte aus PVC vorgesehen (Abbildung 79).

Diese ist mit Bohrungen versehen, welche zur Befestigung der Basisplatte im Gehäuse sowie für die Befestigung der Platinen auf der Basisplatte verwendet werden. Die Bohrungen mit dem größten Durchmesser sind für die Kabeldurchführungen vorgesehen. Diese werden verwendet um das Gehäuse an der Stelle, an welcher die Leitungen der Solarzelle eingeführt werden, abzudichten.

Für die Befestigung der Hauptplatine werden Abstandsbolzen auf der Basisplatte angebracht, an welchen diese befestigt wird. Für den LiPo-Akku ist im oberen Teil des Gehäuses eine Ablage vorgesehen. Diese ist mit M5 Schrauben an der Grundplatte festgeschraubt. Der Raspberry Pi wird an der Unterseite der Akku-Ablage befestigt.

Damit das LCD für den Benutzer ersichtlich ist, ist eine Ausfrässung am Gehäusedeckel vorgesehen. In diese wird eine Acrylglasplatte eingelegt. Diese wurde so bearbeitet, dass sie das Loch komplett ausfüllt und auf der Innenseite des Deckel bis über die Fixierungsbohrungen für das LCD reicht. Für eine gute Transparenz und die Reduzierung von Unebenheiten wurde das Acrylglas geschliffen und poliert. Als zusätzliche Abdichtmaßnahme ist das Acrylglas mit einem Kunststoffkleber (Acrifix 116) am Deckel angeklebt. Das Display ist mit Abstandsbolzen am Deckel festgeschraubt.

Für die USB-Buchsen sind auf der Unterseite des Gehäuses Löcher gebohrt und zurechtgefeilt worden, damit der Benutzer sein USB-Kabel anstecken kann. Da es sich hier nur um einen Prototypen handelt wurde nicht darauf geachtet, dass eine unsachgemäße Benutzung

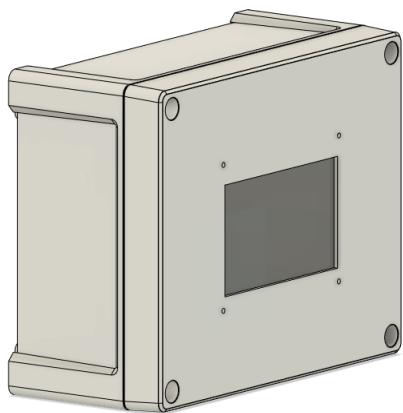


Abbildung 80 Gehäuse MPS mit Deckel

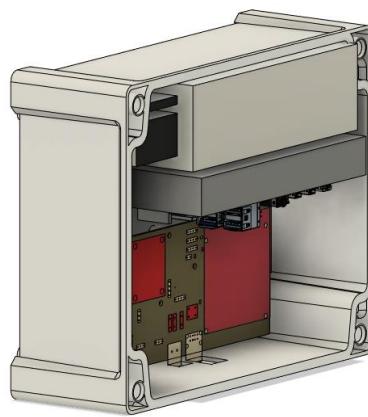


Abbildung 81 Gehäuse MPS ohne Deckel

übermäßigen Verschleiß mit sich bringt.

Abbildung 80 und Abbildung 81 zeigen den ersten Prototypen des Gehäuses für die Mountain Power Station.

## 5.7 Halterung



Da die PV-Zelle sicher montiert werden muss, ist eine Halterung für diese Teil des Projekts. Die Idee ist es, die PV-Zelle mittels einer Halterung am oberen Ende eines Masten zu montieren. Unterhalb befindet sich das Gehäuse samt der Elektronik. Abbildung 82 zeigt den Erstentwurf zur mechanischen Konstruktion der MPS. Aufgrund der Korrosionsbeständigkeit und Verfügbarkeit ist Aluminium als Material gewählt werden.

Für die Aufhängung der PV-Zelle ist ein Rahmen vorgesehen. Die Streben sind gewinkelt, um die Stabilität zu erhöhen. Diese sind mit einem Schutzgasscheißverfahren verbunden worden. Damit das Solarmodul eine optimale Leistungsaufnahme erzielt wird ein Neigungswinkel von 30° gegenüber dem Horizont angestrebt. Dies wird erreicht, indem das obere Ende der PV-Zelle

Abbildung 83 Grobentwurf MPS

Abbildung 82 Grobentwurf MPS Rückansicht

am oberen Mastende  
und das untere Ende

des Rahmens in einem bestimmten Abstand befestigt wird.

Damit das Gehäuse auf den Masten befestigt werden kann ist eine Schale aus Aluminium vorgesehen. Diese beinhaltet Bohrungen für die Durchführungen der PV-Zellen-Kabel sowie zur Befestigung des Gehäuses.

Für den Hauptmasten wird ein U-Profil aus Aluminium verwendet. Dieses ist so bearbeitet, dass es leichter im Boden versenkt werden kann.

## 6 Ergebnisse – Abnahme

---

### 6.1 Prototypen-Systemtest

Um die gewünschte Funktion der MPS zu gewährleisten, wurden umfangreiche Tests durchgeführt. Dies allerdings nicht nur beim Endprodukt, sondern auch bei einem Prototypen-Systemtest welcher vor der Entwicklung der Hauptplatine gemacht wurde. Zu diesem Zweck wurde ein

#### **Prototypen-Systemtest**

Testprotokoll

#### **Laderegler:**

Konstant Strom-Phase

- ✓ Konstant Spannungs-Phase mit anschließender „Charge Termination“
- ✓ MPPT beim Eingang
- ✓ Abschalten bei Temperaturüberschreitung

aus den

Produktfunkti

onen

entwickelt.

#### **Spannungsversorgung 5V:**

- ✓ 8,9V – 12,6V → 5V bis 2A

✓

#### **Spannungsversorgung für die USB-Ladeeinheit:**

- ✓ 8,9V – 12,6V → 5V bis 5A
- ✓ Strombegrenzung bei 5A
- ✓ Wirkungsgrad über 85% im Dauerbetrieb

Abbildung 84 Prototypen- Systemtest Protokoll

### 6.2 Laderegler

Bei dieser Messung wurde das Solarpanel bei Schönwetter, auf einen gut von der Sonne bestrahlten Ort platziert. Danach wurde das Panel auf den Eingang des Ladereglers geschalten. Am Ausgang wurde der Akku angeschlossen. Die Spannung des Akkus zu Beginn der Messung betrug 11,65V. In 20 Minuten Abständen wurden die Spannung am Akku und der Ladestrom gemessen. Das Ergebnis ist in Abbildung 84 zu sehen. Außerdem wurde überprüft, ob der Chip

im Falle eine Überhitzung den Ladevorgang unterbricht und ob sich am Eingang die Spannung des MPP einstellt.

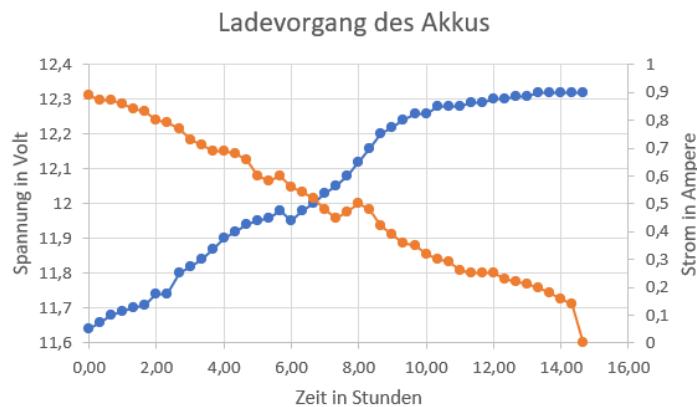


Abbildung 85 Prototypen- Systemtest Ergebnis: Laderegler

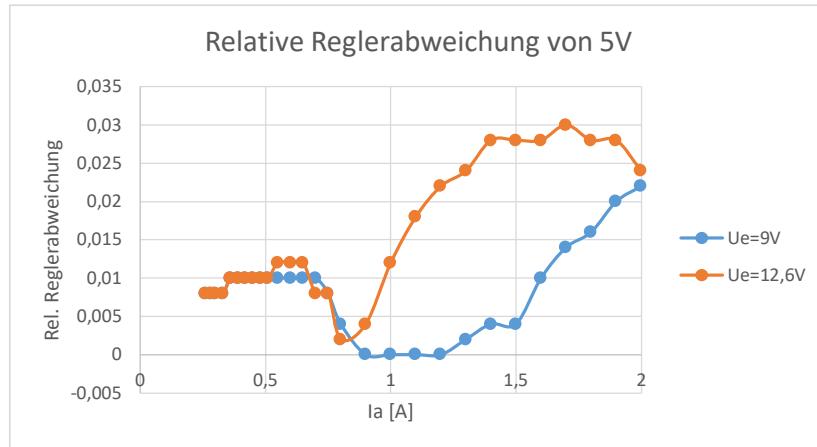
Der ideale Verlauf dieser Ladekurve, laut Datenblatt ist in Abbildung 16 auf der Seite 33, dargestellt. Die blaue Kurve stellt hierbei die Spannung des Akkus dar. Die orange Kurve stellt den Ladestrom dar. Das Akku-Pack kommt im vollgeladenen Zustand nicht auf die erwarteten 12,6V sondern bleibt bei 12,3V. Der Verlauf der Spannung ist erst linear, später flacht die Kurve ab. Der Ladestrom nimmt stetig ab. Da der Ladevorgang bei einer Akku-Spannung von 11,65V begann kann angenommen werden, dass der Laderegler sich bereits in der Konstantspannungsphase befindet. Dieser Teil des Ladezyklus wurde somit nicht getestet. Der Ladevorgang soll laut Datenblatt bei 9,5% des festgelegten Maximal-Ladestroms abgebrochen werden. Die Messergebnisse stimmen mit der Vorgabe überein.

### 6.3 Spannungsversorgung 5V

Im Zuge einer Laborübung wurde der entwickelte Buck Converter zur Erzeugung der Versorgungsspannung von 5V getestet. Durch ein Potentiometer am Ausgang konnte jeder beliebige Ausgangsstrom eingestellt werden. Bei gegebenen Eingangsgrößen wurden die Ausgangsgrößen gemessen.

*Abbildung 86*  
*Prototypen-*  
*Systemtest*  
*Ergebnis:*  
*Spannungsver-*  
*orgung 5V*

Die relative  
 Regelabweichung  
 ergibt sich durch:  $\frac{\Delta U_a}{U_a}$



Bei den durchgeführten Tests wurde die Ausgangsspannung bei der kleinsten, sowie der größten möglichen Eingangsspannung gemessen. Diese Grenzen liegen durch die Schutzschaltung bei 8,9V und 12,6V. Durch das Potentiometer wurden  $2,5\Omega$  am Ausgang angeschlossen was einen Strom von ca. 2A zur Folge hatte. Wie in der Grafik ersichtlich ist, kann der Buck Converter, trotz des hohen Ausgangstromes, seine Ausgangsspannung sehr genau bei 5V halten. Die Abweichungen befinden sich nur im niedrigen, einstelligen Prozentbereich. Es sind allerdings Unterschiede aufgrund der Eingangsspannung zu erkennen. Bei 9V bleibt die Reglerabweichung bis ca. 1,6A unter 1%. Bei 12,6V allerdings wird die einprozentige Abweichung schon bei 1A erreicht. Auch die Maximale Abweichung ist bei einer höheren Eingangsspannung größer.

#### 6.4 Spannungsversorgung für die USB-Ladeeinheit

Der entwickelte Buck Converter, basierend auf dem Chip „MIC28513“, wurde an ein  $12\Omega$  Potentiometer angeschlossen. Der Widerstand wurde so lange vermindert, bis sich ein Ausgangstrom von etwa 5A einstellte. Nun wurde die Ausgangsspannung betrachtet. Auch der Ausgangstrom, sowie Eingangsspannung und Eingangsstrom wurden gemessen, um den Wirkungsgrad zu ermitteln. Das Experiment wurde 15 Minuten geführt. Ermittelt wird der Wirkungsgrad mithilfe folgender Formeln:

$$P_e = U_e * I_e$$

$$P_a = U_a * I_a$$

$$\eta = \frac{P_a}{P_e}$$

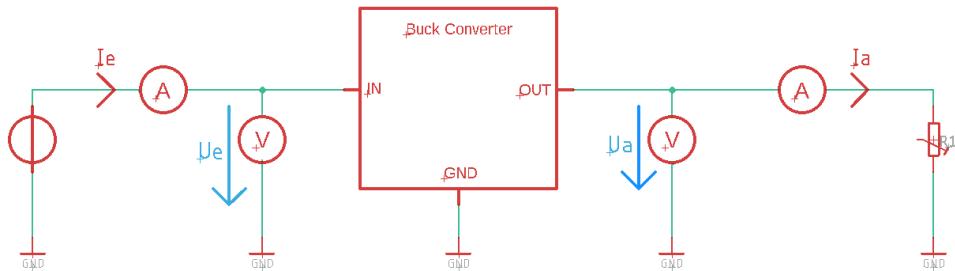


Abbildung 87 Prototypen-Systemtest Messaufbau: Spannungsversorgung für die USB Ladeeinheit

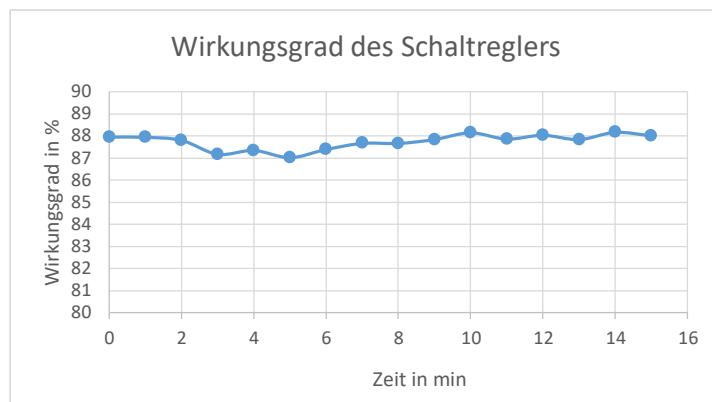


Abbildung 88 Prototypen- Systemtest Ergebnis: Spannungsversorgung für die USB-Ladeeinheit Wirkungsgrad

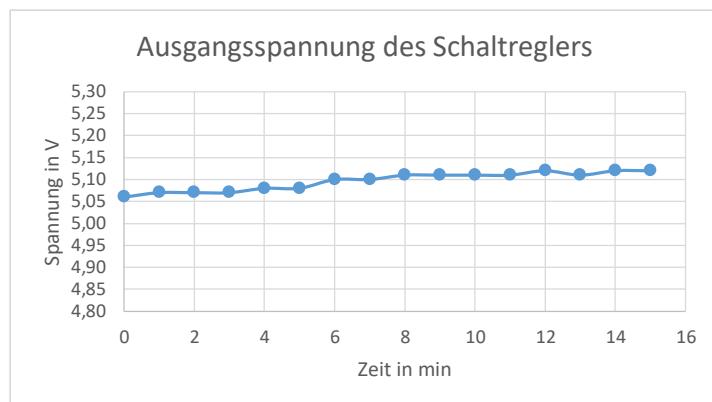


Abbildung 89 90 Prototypen- Systemtest Ergebnis: Spannungsversorgung für die USB-Ladeeinheit Ausgangsspannung

Mit diesen Ergebnissen ist die korrekte Funktion des Schaltreglers belegt. Ausgangsspannung befindet sich stets zwischen 5V und 5,12V. Der Wirkungsgrad ist mit 87% - 88%, auch über längere Zeit stabil.

## 6.5 Abnahmetests des Endprodukts

-→ Durchgeführte Tests und Ergebnisse (siehe auch Systemspezifikation-Globale Testfälle)

Anforderung	Durchgeführte Tests	Testergebnis	Freigabe (J/N)?
Die Spannungswandler liefern die geforderten Spannungen.	T010	Die Ausgänge der Spannungswandler liefern die korrekten Spannungen.	J
Der interne Pufferakku soll über die Solarzelle geladen werden.	T011	Der Akku wird durch das Solarpanel geladen.	J
Angeschlossene Akkugeräte sollen geladen werden.	T012	Es können bis zu drei Geräte parallel geladen werden.	J
Mit einem ADC sollen elektrische Größen der Schaltung bestimmt werden.	T020	Der Raspberry Pi kann keine I2C-Verbindung mit dem ADS1115 herstellen.	N
Mit einem BMP180 soll der Luftdruck und die Umgebungstemperatur gemessen werden.	T021	Die vom Sensor erfasste Temperatur stimmt mit der durch ein Thermometer gemessenen überein. Der Luftdruck passt mit einem errechneten Wert überein.	J
Der Raspberry Pi soll eine Website hosten, welche von außerhalb erreichbar ist.	T022	Die vom Raspberry Pi gehostete Website ist nicht erreichbar.	N

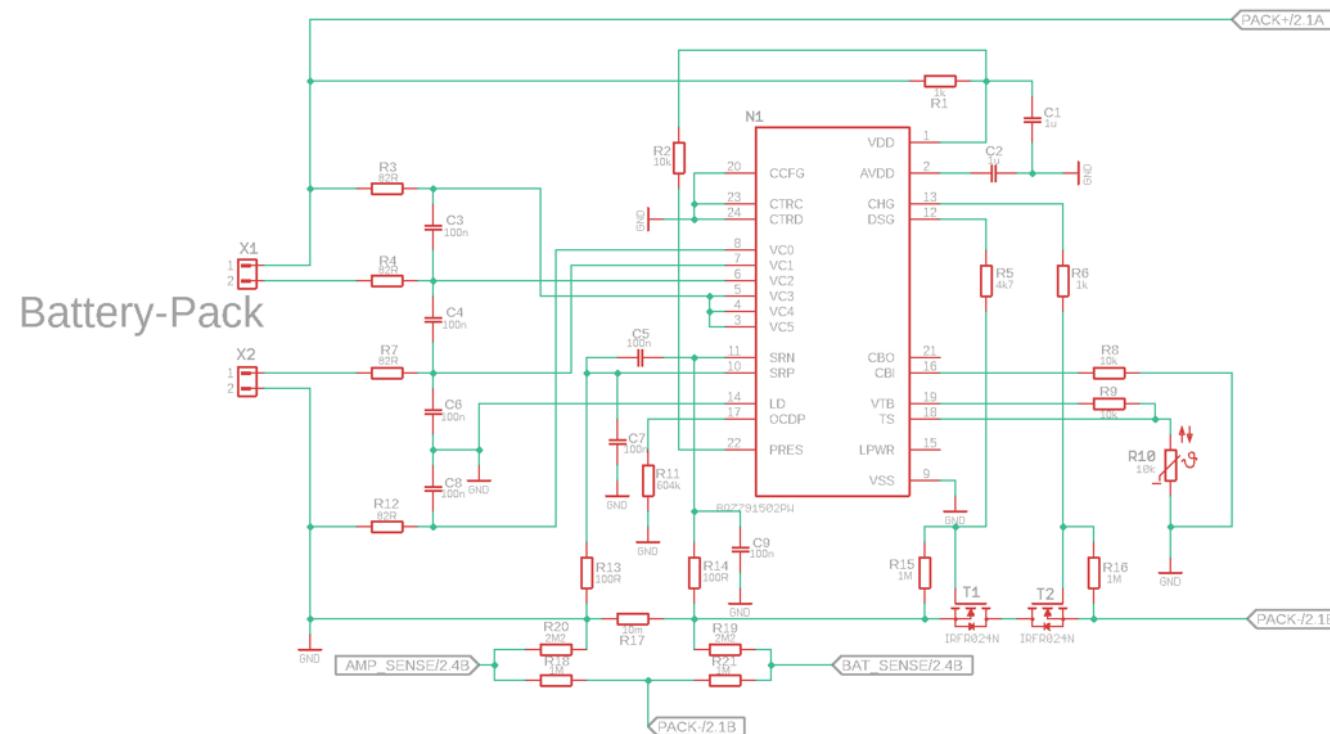
Der Raspberry Pi soll mit dem Mobilfunknetz verbunden sein und eine SMS an ein anderes Gerät senden.	T030	Es konnte eine SMS vom Raspberry Pi an ein Smartphone gesendet werden.	J
Der Raspberry Pi soll eine Wettervorhersage von einem Onlinedienst erhalten.	T031	Der Raspberry Pi erhält die Daten für die Wettervorhersage.	J
Ein Display soll die Daten für den User anzeigen.	T040	Das Display zeigt die Daten für den User an.	J

## 7 FERTIGUNGSUNTERLAGEN

Für die Fertigung der Platine sowie zur Dokumentation sind in der HTL Fertigungsunterlagen vorgeschrieben. Es handelt sich hierbei um die Dokumentation der Hauptplatine. Auf die Schaltpläne und Layouts der Modulplatinen wurde schon in den jeweiligen Kapiteln eingegangen. Im Hauptschaltplan sind diese deshalb nur noch durch Stiftleisten dargestellt. Die folgenden Seiten beinhalten: Schaltplan, Stückliste, Layout Top und Bot, Bestückungsplan Top, Bohr-Plan, Konstruktionsplan, sowie eine Vorschau der Platine auf Top und Bot.

**Kommentar [LH3]:** Die Fertigungsunterlagen werden zur ausgedruckten Version beigelegt

## Protection Circuit



Solarpanel

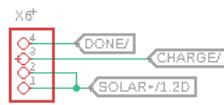


Sachnummer, Dateiname:  
Beilage 1

**HTBLuVA**  
**Salzburg**  
**Elektronik**

**HTBLuVA Salzburg**  
**Elektronik**

Name:		Toleranz:		Werkstoff:	
ID-Nr.:	Gez.:	Geprüft:	Betreuer:	Dokumentart:	Freigabe:
5CHEL 5	HipL		SRES	Schaltplan	
Benennung:		Version:			Revision:
Mountain Power Station			1.0	0	Dokumentstatus:
MPS			Prototyp		
Maßstab:	Spr.:	Datum:	Blatt:	Blätter:	
ohne	DE	11.02.2023	1	1	



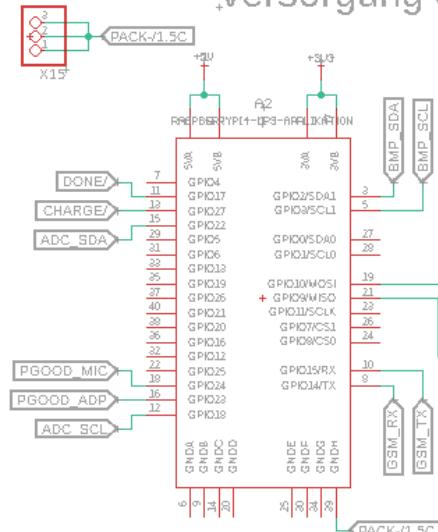
Laderegler



Versorgung 5V 2A



Versorgung 5V 4A



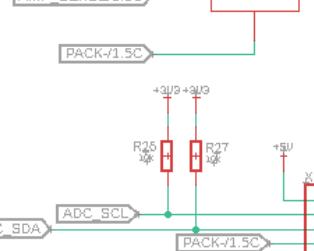
Raspberry Pi



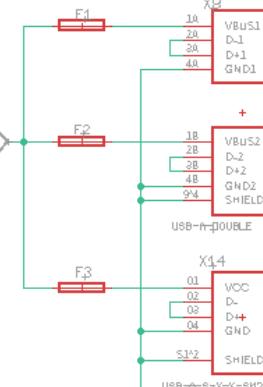
GSM Modul



ADC Modul



USB - Ports



BMP180

Sachnummer, Dateiname:  
Beilage 1  
  
  
**HTBLuVA Salzburg  
Elektronik**

Name:  
**Leon Hipf**  
  
 Benennung:  
**Mountain Power Station  
MPS**

ID-Nr.:	Gez.:	Geprüft:	Betreuer:	Dokumentart:	Freigabe:
5CHEL 5	HipL		SRES	<b>Schaltplan</b>	
				Version: 1.0	Revision: 0 Dokumentstatus: Prototyp
				Maßstab: ohne	Spr.: DE Datum: 11.02.2023 Blatt: 1 Blätter: 1

1	2	3	4	5	6	7
Lfd. Nr.	Stück zahl	Ein- heit	Benennung	Lieferant / Bestellnummer	MCd	Bemerkung
1	1	STK	RES 10m, 1%, 1W R17	mouser.at 66-OAR1R010FLF		2512
2	4	STK	RES 82R, 1%, 1/8W R3-4, 7, 12	HTL-Salzburg		0805
3	2	STK	RES 100R, 1%, 1/8W R13-14	HTL-Salzburg		0805
4	2	STK	RES 1k, 1%, 1/8W R1, 6	HTL-Salzburg		0805
5	1	STK	RES 4k7, 1%, 1/8W R5	HTL-Salzburg		0805
6	7	STK	RES 10k, 1%, 1/8W R2, 8-9, 24-27	mouser.at 603-MFR-12FRF5210K		0805
7	1	STK	RES 604k, 1%, 0.4W R11	mouser.at 594-5083JD604K0FT		0204/5
8	4	STK	RES 1M, 5%, 1/8W R15-16, 20-21, 23	HTL-Salzburg		0805
9	4	STK	RES 2M2, 5%, 1/8W R18-19	HTL-Salzburg		0805
10	4	STK	RES 4M7, 5%, 1/8W R22	HTL-Salzburg		0805
11	1	STK	THERM 10k R10	rs-online.com 954-103AT-2		NTC
12	9	STK	CAP 100n, 50V C3-9	lcsc.com C84772		0805
13	1	STK	CAP 1u C1-2	lcsc.com C169113		0805
14	2	STK	TRMFN IRFR024N T1-2	lcsc.com C2583		TO-252-2
15	1	STK	IC BQ7791502PWR N1	mouser.at 595-BQ7791502PWR		24TSSOP
16	1	STK	CON USB-Buchse X8	rs-online.com 199-9985		Single Typ A
17	2	STK	CON USB Buchse X14	mouser.com 575-4300890		Double Typ A
18	11	STK	CON Stiftleiste X6-7, 9-13, 15-18	lcsc.com C429959		RM2.54, 1-polig
19	2	STK	CON Printklemme X1-2	rs-online.com 146-8347		RM5.08, 2-polig
20	3	STK	FUSE Polyfuse 1,75A F1-3	rs-online.com 657-1772		RM4.3

Sachnummer, Dateiname: <b>Beilage 2</b>	Name: <b>Hipf</b>	Toleranz:	Werkstoff:				
 <b>HTBLuVA Salzburg</b> Technische Informatik	ID-Nr.:	Gez.:	Geprüft:	Bestreuer:	Dokumentart:	Freigabe:	
	5CHEL 5	HipL			Stückliste		
	Benennung: <b>MPS</b> Mountain Power Station				Version:	Revision:	Dokumentenstatus:
					1	0	Fertigung
				Maßstab:	Spr.:	Datum:	Blatt:
				ohne	DE	04.04.2022	1
						Bilanz:	1

1	2	3	4	5	6	7
Lfd. Nr.	Stück zahl	Ein- heit	Benennung	Lieferant / Bestellnummer	MCd	Bemerkung
1	1	STK	Solarpanel 50W	amazon.de		max 18,5V / 2,72A
2	1	STK	Raspberry Pi 4b	electronics.semaf.at		1,5GHz 2GB RAM
3	1	STK	GSM GA6	ebay.com		
4	1	STK	SD-Karte	amazon.de		64GB
5	1	STK	Photovoltaikkabel 4mm2	amazon.de		2m
6	1	STK	LCD Bildschirm	amazon.de		800 x 480
7	1	STK	ADS1115	mouser.at DFR0553		I2C
8	1	STK	SD-card Reader	amazon.de		USB
9	1	STK	Platine MPS	HTL-Salzburg		
10	1	STK	Platine Laderegler	HTL-Salzburg		
11	1	STK	Platine 5V5A	HTL-Salzburg		
12	1	STK	Platine 5V2A	HTL-Salzburg		
13	6	STK	LiPo Akkumulatoren	HTL-Salzburg		
14	1	STK	Fibox TA241911	conrad.at 533232		Gehäuse
15	1	STK	PVC 3mm,	HTL-Salzburg		Basisplatte
16	1	STK	PVC 8mm	HTL-Salzburg		Akkuablage
17	1	STK	Acrylglass 5mm	HTL-Salzburg		Sichtglas LCD
18	4	STK	M3x7 Abstandbolzen	HTL-Salzburg		
19	6	STK	M3x20 Abstandbolzen	HTL-Salzburg		
20	29	STK	M3 Schrauben	HTL-Salzburg		
21	9	STK	M4 Schrauben	HTL-Salzburg		
22	4	STK	M5 Schrauben	HTL-Salzburg		
23	29	STK	M3 Beilagscheiben	HTL-Salzburg		
24	8	STK	M4 Beilagscheiben	HTL-Salzburg		
25	4	STK	M5 Beilagscheiben	HTL-Salzburg		

Sechnummer, Dateiname:	Name:	Toleranz:	Werkstoff:
Beilage 2	Hipf		

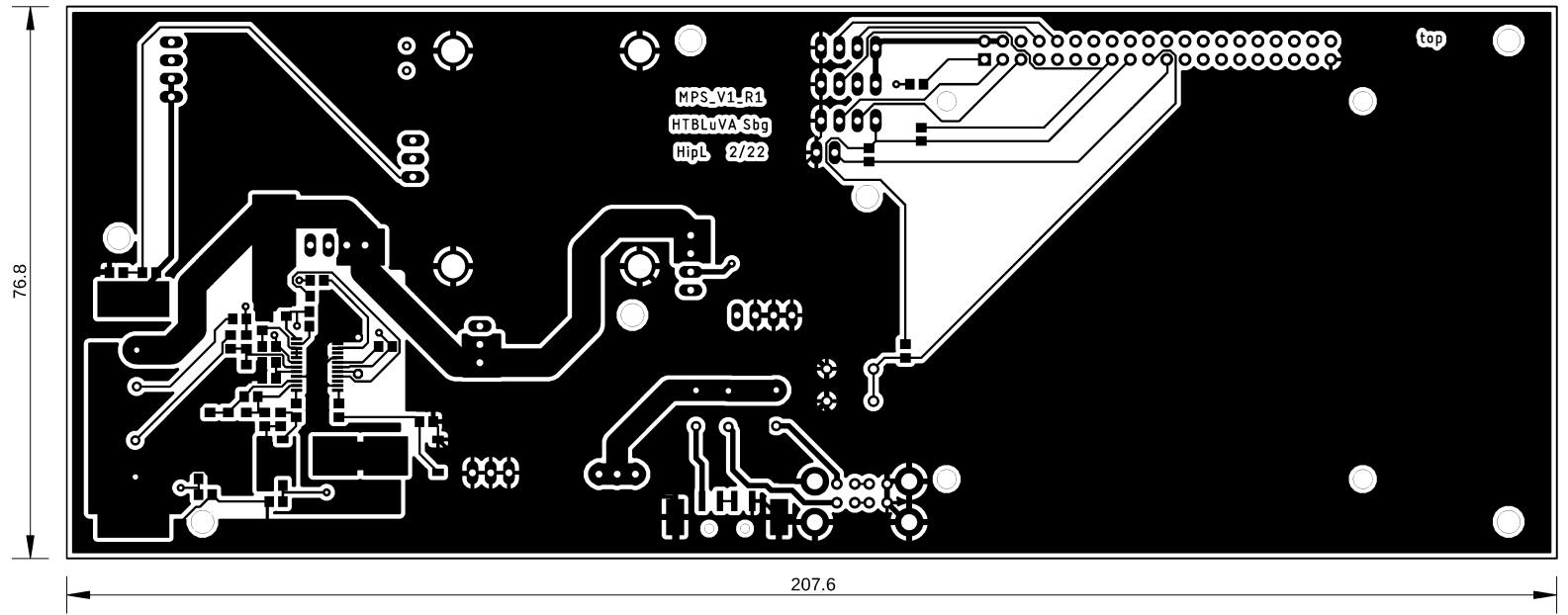
  

 <b>HTBLuVA</b> Salzburg <b>HTBLuVA Salzburg</b> Technische Informatik	ID-Nr.:	5CHEL 5	Gez.:	Geprüft:	Betreuer:	Dokumentiert:	Gesamtstückliste	Freigebe:	SreS
	Benennung:	MPS			Version:	1	Revision:	Fertigung	
		Mountain Power Station			Maßstab:	1: ohne	Datum:	Blatt:	Blätter:
					Spr.:	DE	04.04.2022	1	2

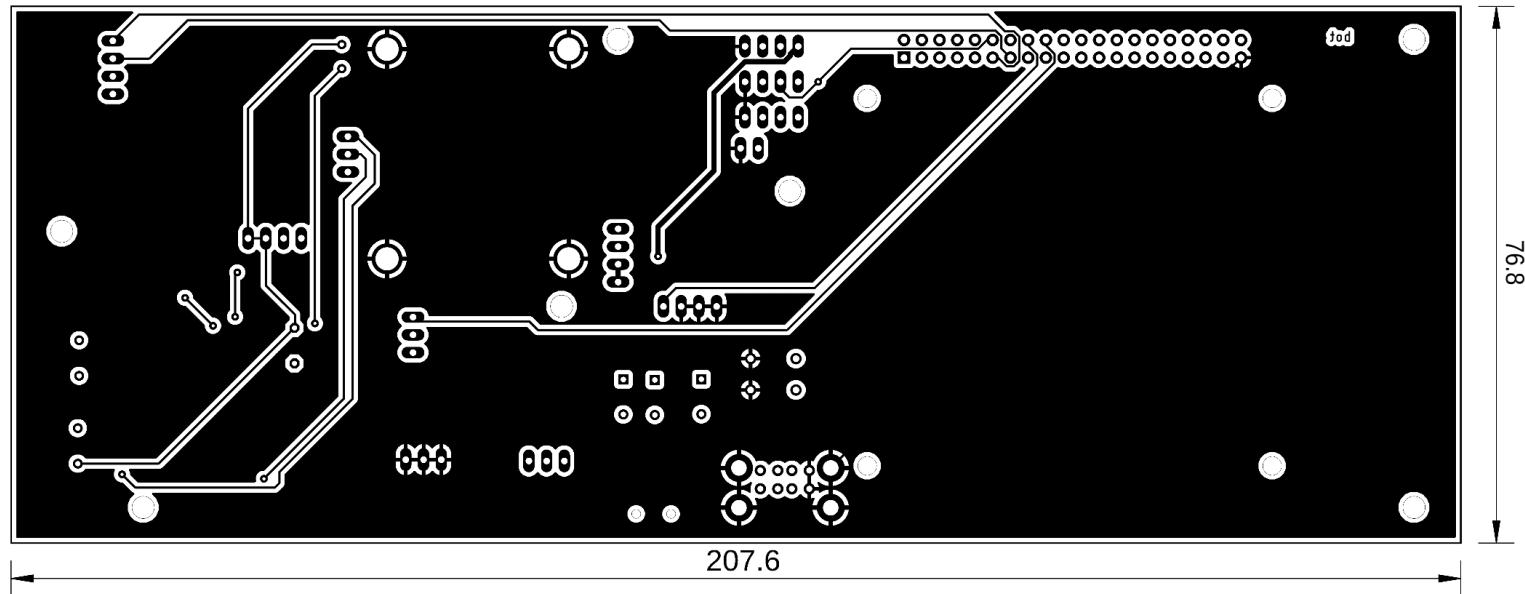
1	2	3	4	5	6	7
Lfd. Nr.	Stück zahl	Ein- heit	Benennung	Lieferant / Bestellnummer	MCd	Bemerkung
26	8	STK	M3 Muttern	HTL-Salzburg		
27	9	STK	M4 Muttern	HTL-Salzburg		

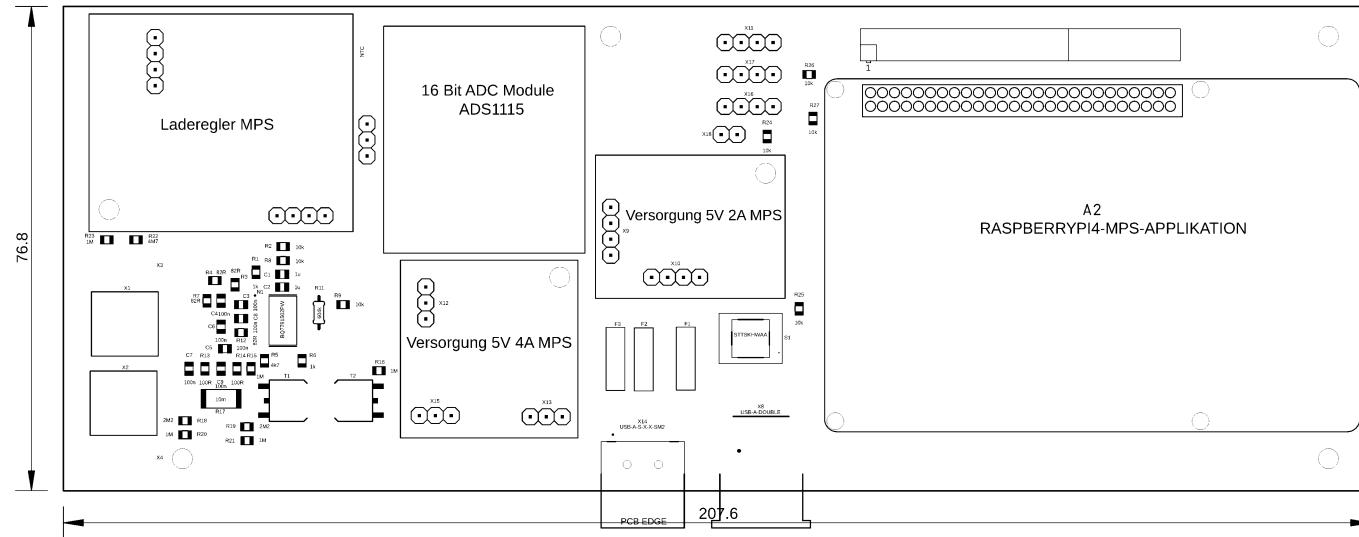
Sachnummer, Dateiname:  Beilage 2	Name:  Hipf	Toleranz:	Werkstoff:
 HTBLuVA Salzburg Technische Informatik	ID-Nr.: 5CHEL 5 Gez.: HipL Geprüft: Betreuer:	Dokumentart: Gesamtstückliste	Freigabe: SreS
	Benennung:  MPS Mountain Power Station	Version: 1	Revision: 0 Dokumentenstatus: Fertigung
	Maßstab: ohne	Spr.:	Datum: 04.04.2022 Blatt: 2 Blätter: 2



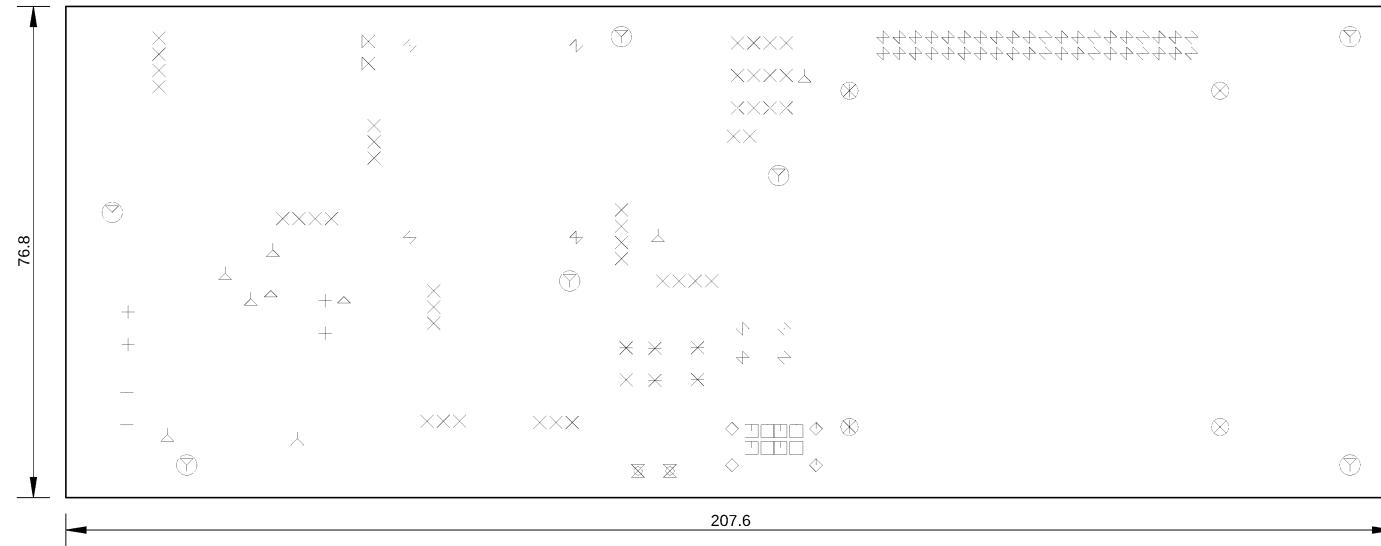
Sachnummer, Dateiname: Beilage 3	Name: <b>Leon Hipf</b>	Toleranz:	Werkstoff:
	ID-Nr.: <b>5CHEL 5</b>	Gez.: <b>HipL</b>	Geprüft: <b>SRES</b>
Benennung: <b>Mountain Power Station MPS</b>	Dokumentart: <b>Layout top</b>	Freigabe:	
	Version: <b>1.0</b>	Revision: <b>0</b>	Dokumentstatus: <b>Prototyp</b>
	Maßstab: <b>ohne</b>	Spr.: <b>DE</b>	Datum: <b>04.04.2022</b>
			Blatt: <b>1</b>
			Blätter: <b>1</b>



Sachnummer, Dateiname: Beilage 4	Name: <b>Leon Hipf</b>	Toleranz:	Werkstoff:
	ID-Nr.: <b>5CHEL 5</b>	Gez.: <b>HipL</b>	Geprüft: <b>SRES</b>
Benennung: <b>Mountain Power Station MPS</b>	Dokumentart: <b>Layout bot</b>	Freigabe:	
	Version: <b>1.0</b>	Revision: <b>0</b>	Dokumentstatus: <b>Prototyp</b>
	Maßstab: <b>ohne</b>	Spr.: <b>DE</b>	Datum: <b>04.04.2022</b>
			Blatt: <b>1</b>
			Blätter: <b>1</b>

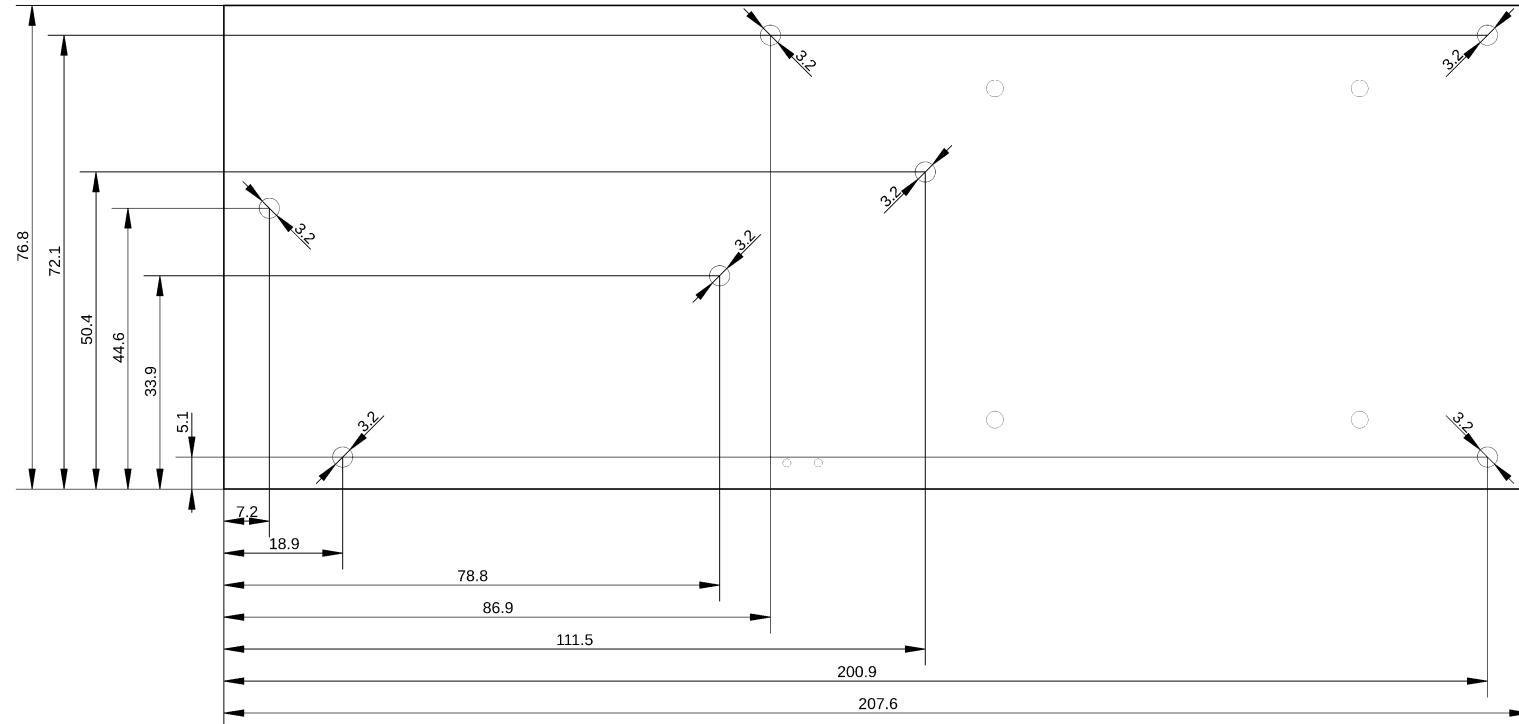


Sachnummer, Dateiname: Beilage 5	Name: Leon Hipf	Toleranz:	Werkstoff:			
HTBLuVA Salzburg Elektronik	ID-Nr.: 5CHEL 5	Gez.: HipL	Geprüft:	Betreuer: SRES	Dokumentart: Bestückungsplan top	Freigabe:
	Benennung: Mountain Power Station MPS		Version: 1.0	Revision: 0	Dokumentstatus: Prototyp	
	Maßstab: ohne	Spr.: DE	Datum: 04.04.2022	Blatt: 1	Blätter: 1	

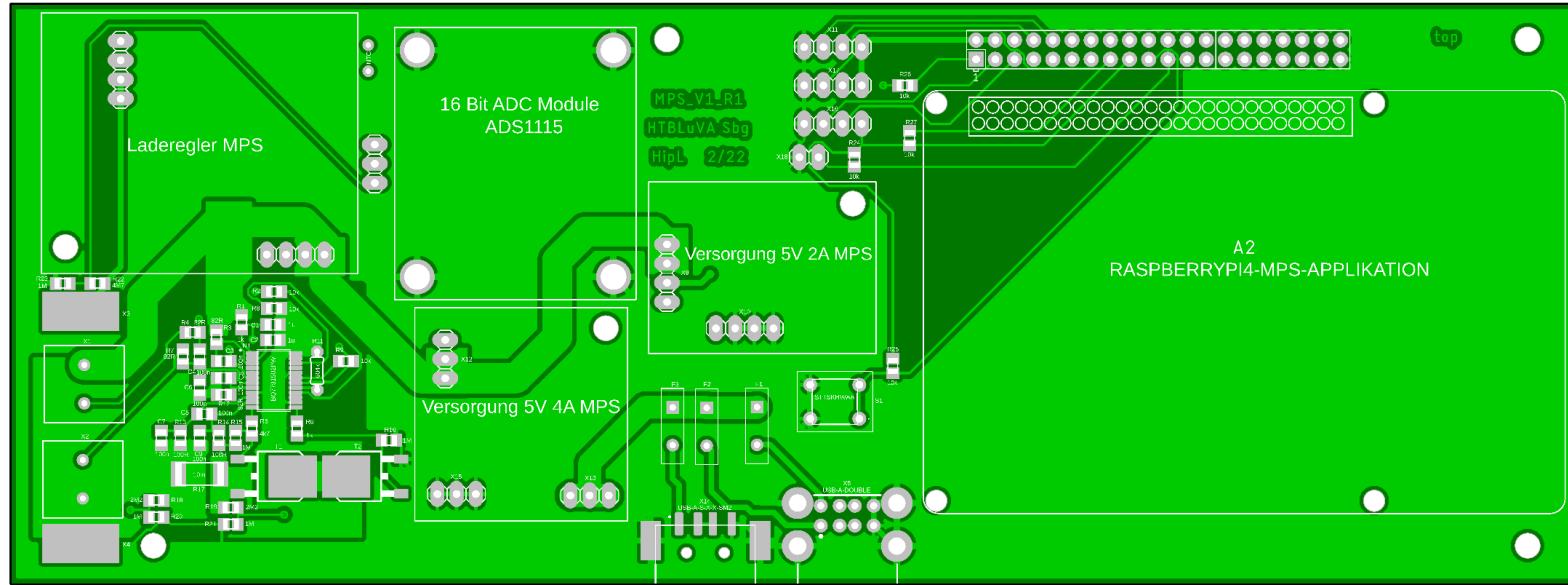


Drill chart				
Sym	ID	Diameter	Quantity	Plated
△	1	0.50	9	YES
▣	2	0.70	2	YES
+	3	0.80	6	YES
※	4	0.85	6	YES
□	5	0.92	8	YES
†	6	1.00	44	YES
×	7	1.02	42	YES
✗	8	1.30	2	NO
◇	9	2.30	4	YES
×	10	2.70	4	NO
▽	11	3.20	7	NO
‡	12	3.40	4	YES

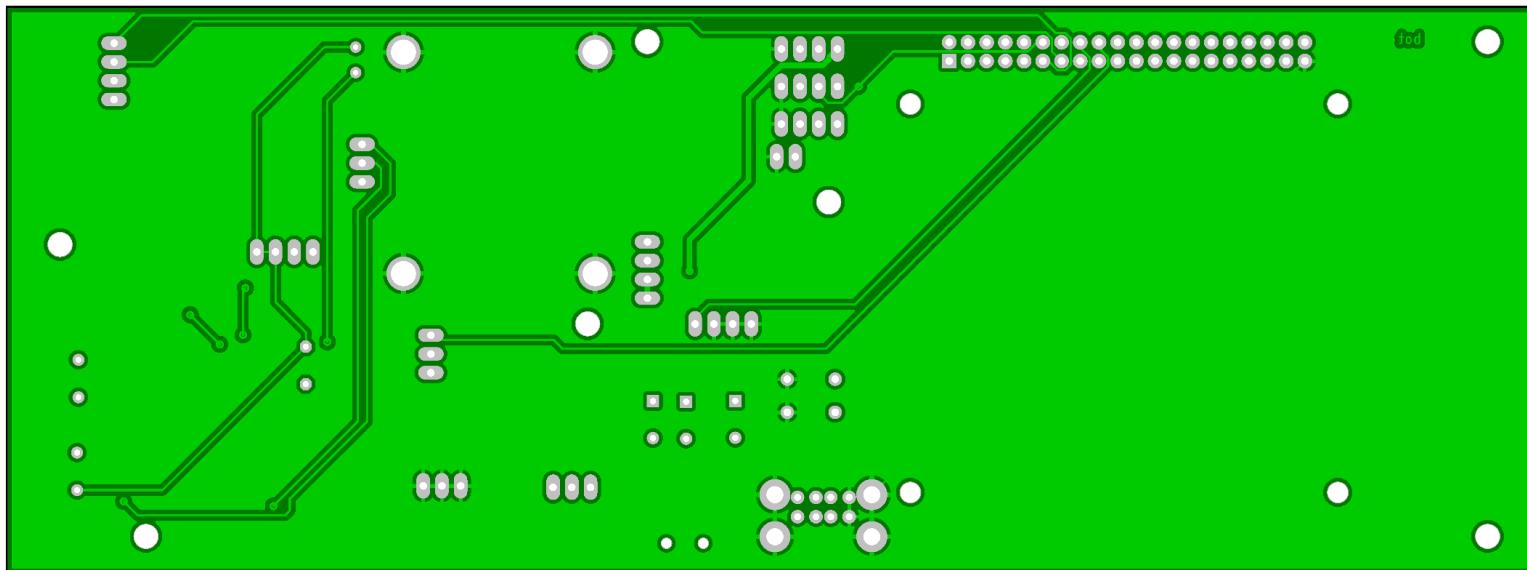
Sachnummer, Dateiname: Beilage 6	Name: <b>Leon Hipf</b>	Toleranz:	Werkstoff:			
 <b>HTBLuVA Salzburg</b> <b>Elektronik</b>	ID-Nr.: <b>5CHEL 5</b>	Gez.: <b>HipL</b>	Geprüft:	Betreuer: <b>SRES</b>	Dokumentart: <b>Bohrplan</b>	Freigabe:
	Benennung: <b>Mountain Power Station MPS</b>		Version: <b>1.0</b>	Revision: <b>0</b>	Dokumentstatus: <b>Prototyp</b>	
	Maßstab: <b>ohne</b>	Spr.: <b>DE</b>	Datum: <b>04.04.2022</b>	Blatt: <b>1</b>	Blätter: <b>1</b>	



Sachnummer, Dateiname: Beilage 7	Name: <b>Leon Hipf</b>	Toleranz:	Werkstoff:					
 <b>HTBLuVA</b> <b>Salzburg</b> <b>Elektronik</b>	ID-Nr.: <b>5CHEL 5</b>	Gez.: <b>HipL</b>	Geprüft:	Betreuer: <b>SRES</b>	Dokumentart: <b>Konstruktionsplan</b>	Freigabe:		
	Benennung: <b>Mountain Power Station MPS</b>	Version: <b>1.0</b>	Revision: <b>0</b>	Dokumentstatus: <b>Prototyp</b>	Maßstab: <b>ohne</b>	Spr.: <b>DE</b>	Datum: <b>04.04.2022</b>	Blatt: <b>1</b>



Sachnummer, Dateiname: Beilage 8	Name: Leon Hipf	Toleranz:	Werkstoff:				
HTBLuVA Salzburg Elektronik	ID-Nr.: 5CHEL 5	Gez.: HipL	Geprüft:	Betreuer: SRES	Dokumentart: PCB top	Freigabe:	
	Benennung: Mountain Power Station MPS				Version: 1.0	Revision: 0	Dokumentstatus: Prototyp
	Maßstab: ohne	Spr.: DE	Datum: 04.04.2022	Blatt: 1	Blätter: 1		



Sachnummer, Dateiname: Beilage 9	Name: <b>Leon Hipf</b>	Toleranz:	Werkstoff:
	ID-Nr.: <b>5CHEL 5</b>	Gez.: <b>HipL</b>	Geprüft: <b>SRES</b>
	Dokumentart: <b>PCB bot</b>	Freigabe:	
Benennung: <b>Mountain Power Station MPS</b>		Version: <b>1.0</b>	Revision: <b>0</b>
		Dokumentstatus: <b>Prototyp</b>	
Maßstab: <b>ohne</b>		Spr.: <b>DE</b>	Datum: <b>04.04.2022</b>
		Blatt: <b>1</b>	Blätter: <b>1</b>

1	2	3	4	5	6		
Lfd. Nr.	Stück zahl	Ein- heit	Benennung	Lieferant / Bestellnummer	Preis Einzel Gesamt		
1	1	STK	RES 10m, 1%, 1W	mouser.at / 68-OAR1R010FLF	0,790 0,790		
2	4	STK	RES 82R, 1%, 1/8W	HTL-Salzburg /			
3	2	STK	RES 100R, 1%, 1/8W	HTL-Salzburg /			
4	2	STK	RES 1k, 1%, 1/8W	HTL-Salzburg /			
5	1	STK	RES 4k7, 1%, 1/8W	HTL-Salzburg /			
6	7	STK	RES 10k, 1%, 1/8W	mouser.at / 603-MFR-12FRF5210K	0,090 0,090		
7	1	STK	RES 604k, 1%, 0,4W	mouser.at / 594-5063JD604K0FT	0,190 0,190		
8	4	STK	RES 1M, 5%, 1/8W	HTL-Salzburg /			
9	4	STK	RES 2M2, 5%, 1/8W	HTL-Salzburg /			
10	4	STK	RES 4M7, 5%, 1/8W	HTL-Salzburg /			
11	1	STK	THERM 10k	rs-online.com / 954-103AT-2	1,000 1,000		
12	9	STK	CAP 100n, 50V	lcsc.com / C84772	0,021 0,189		
13	1	STK	CAP 1u	lcsc.com / C169113	0,095 0,095		
14	2	STK	TRMFN IRFR024N	lcsc.com / C2583	0,360 0,720		
15	1	STK	IC BQ7791502PWR	mouser.at / 595-BQ7791502PWR	1,520 1,520		
16	1	STK	CON USB-Buchse	rs-online.com / 199-9985	2,020 2,020		
17	2	STK	CON USB Buchse	mouser.com / 575-4300890	2,170 4,340		
18	11	STK	CON Stiftleiste	lcsc.com / C429959	0,084 0,924		
19	2	STK	CON Printklemme	rs-online.com / 146-8347	1,051 2,102		
20	3	STK	FUSE Polyfuse 1,75A	rs-online.com / 657-1772	0,520 1,560		
				Übertrag:			
				Materialpreis	€ 16,080		
				Materialgemeinkosten (10%)	€ 1,608		
				Materialverkaufspreis	€ 17,688		
Sachnummer, Dateiname: Beilage 10		Name:	Hipf	Toleranz:	Werkstoff:		
 <b>HTBLuVA</b> <b>Salzburg</b> <b>Technische Informatik</b>		ID-Nr.:	Ges.:	Doprft.:	Betreuer:	Dokumentiert:	Freigebe:
		5CHEL 5	HipL			Materialkalkulation	SreS
		Benennung:			Version:	Revision:	Dokumentationsstatus:
		MPS			1	0	Fertigung
		Mountain Power Station	Maßstab:	Spr.:	Datum:	Blatt:	Blätter:
			ohne	DE	04.04.2022	1	1

1	2	3	4	5	6
Lfd. Nr.	Stück- zahl	Ein- heit	Benennung	Lieferant / Bestellnummer	Preis Einzel Gesamt
1	1	STK	Solarpanel 50W	amazon.de /	50,000 50,000
2	1	STK	Raspberry Pi 4b	electronics.semaf.at /	45,480 45,480
3	1	STK	GSM GA6	ebay.com /	9,490 9,490
4	1	STK	SD-Karte	amazon.de /	12,100 12,100
5	1	STK	Photovoltaikkabel 4mm²	amazon.de /	12,050 12,050
6	1	STK	LCD Bildschirm	amazon.de /	51,420 51,420
7	1	STK	ADS1115	mouser.at / DFR0553	8,860 8,860
8	1	STK	SD-card Reader	amazon.de /	8,050 8,050
9	1	STK	Platine MPS	HTL-Salzburg /	17,688 17,688
10	1	STK	Platine Laderegler	HTL-Salzburg /	8,272 8,272
11	1	STK	Platine 5V5A	HTL-Salzburg /	11,407 11,407
12	1	STK	Platine 5V2A	HTL-Salzburg /	10,217 10,217
13	6	STK	LiPo Akkumulatoren	HTL-Salzburg /	0,000 0,000
14	1	STK	Fibox TA241911	conrad.at / 533232	16,990 16,990
15	1	STK	PVC 3mm,	HTL-Salzburg /	0,000 0,000
16	1	STK	PVC 8mm	HTL-Salzburg /	0,000 0,000
17	1	STK	Acrylglass 5mm	HTL-Salzburg /	0,000 0,000
18	4	STK	M3x7 Abstandbolzen	HTL-Salzburg /	0,000 0,000
19	8	STK	M3x20 Abstandbolzen	HTL-Salzburg /	0,000 0,000
20	29	STK	M3 Schrauben	HTL-Salzburg /	0,000 0,000
21	9	STK	M4 Schrauben	HTL-Salzburg /	0,000 0,000
22	4	STK	M5 Schrauben	HTL-Salzburg /	0,000 0,000
23	29	STK	M3 Beilagscheiben	HTL-Salzburg /	0,000 0,000
24	8	STK	M4 Beilagscheiben	HTL-Salzburg /	0,000 0,000
25	4	STK	M5 Beilagscheiben	HTL-Salzburg /	0,000 0,000
26	8	STK	M3 Muttern	HTL-Salzburg /	0,000 0,000
27	9	STK	M4 Muttern	HTL-Salzburg /	0,000 0,000
				Übertrag:	
				Materialpreis	€ 261,824
				Materialgemeinkosten (10%)	€ 26,182
				Materialverkaufspreis	€ 288,006
Sachnummer, Dateiname: Beilage 10		Name: <b>Hipf</b>	Toleranz:	Werkstoff:	
 <b>HTBLuVA Salzburg</b> Technische Informatik		ID-Nr.: 5CHEL 5	Gez.: HipL	Geprüft: 	Betreuer: Dokumentart: <b>Materialkalkulation</b> Freigabe: SreS
		Benennung: <b>MPS</b>	Version: 1	Revision: 0	Dokumentendaten: <b>Fertigung</b>
			Maßstab: ohne	Spr.: DE	Datum: 04.04.2022 Blatt: 1 Bilder: 1

## 8 Quellen- und Literaturverzeichnis

---

- [1] EDN, „Duty-cycle is one key to buck converters’ output current capability“, *EDN*, 16. April 2003. <https://www.edn.com/duty-cycle-is-one-key-to-buck-converters-output-current-capability/> (zugegriffen 4. April 2022).
- [2] „slva477b.pdf“. Zugegriffen: 30. Dezember 2021. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.ti.com/lit/an/slva477b/slva477b.pdf?ts=1640839272305&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/an/slva477b/slva477b.pdf?ts=1640839272305&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F)
- [3] „Battery Balancing verbessert Leistung und Lebensdauer“, *all-electronics*. <https://www.all-electronics.de/automotive-transportation/battery-balancing-verbessert-leistung-und-lebensdauer.html> (zugegriffen 21. März 2022).
- [4] „CN3722\_Solar\_Lilon\_Charger.pdf“.
- [5] „slva466a.pdf“. Zugegriffen: 30. Dezember 2021. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.ti.com/lit/an/slva466a/slva466a.pdf?ts=1640852780732&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/an/slva466a/slva466a.pdf?ts=1640852780732&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F)
- [6] „FTKL\_Leitfaden\_2019-05\_noPWD.pdf“.
- [7] „bq77915\_LiPo\_Protection\_Balancer.pdf“.
- [8] „ADP2302\_5V\_2A\_Buck.pdf“.
- [9] „MIC28513\_5V\_4A\_Buck\_current\_limit\_function.pdf“.
- [10] „The Basics of USB Battery Charging | Maxim Integrated“. <https://www.maximintegrated.com/en/design/technical-documents/tutorials/4/4803.html> (zugegriffen 17. Februar 2022).
- [11] „Raspberry Pi“. [https://m.media-amazon.com/images/I/51FoT6dIhNL.\\_AC\\_.jpg](https://m.media-amazon.com/images/I/51FoT6dIhNL._AC_.jpg) (zugegriffen 20. Februar 2022).
- [12] „raspberry-pi-4-datasheet.pdf“. Zugegriffen: 20. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://datasheets.raspberrypi.com/rpi4/raspberry-pi-4-datasheet.pdf>
- [13] B. B. D. G. www.black-box.de, „3809 - USB Standards“, *Black Box*. <https://www.black-box.de/de-de/page/28829/Information/Technische-Ressourcen/black-box-erklaert/usb-universal-serial-bus/USB-Standards> (zugegriffen 3. März 2022).
- [14] R. Murphy, „USB 101: An Introduction to Universal Serial Bus 2.0“, Nr. 001, S. 57.
- [15] „USB (Communications)“, *Wikipedia*. 12. Februar 2022. Zugegriffen: 3. März 2022. [Online]. Verfügbar unter: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=USB\\_\(Communications\)&oldid=1071371871](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=USB_(Communications)&oldid=1071371871)
- [16] „HDMI - High Definition Multimedia Interface“. <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/com/1205041.htm> (zugegriffen 27. Februar 2022).
- [17] „High Definition Multimedia Interface“, *Wikipedia*. 16. März 2022. Zugegriffen: 27. März 2022. [Online]. Verfügbar unter: [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=High\\_Definition\\_Multimedia\\_Interface&oldid=221195227](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=High_Definition_Multimedia_Interface&oldid=221195227)
- [18] „ADS1115 Picture“. Zugegriffen: 6. März 2022. [Online]. Verfügbar unter: [https://raw.githubusercontent.com/DFRobot/Wiki/master/Resource/DFR0553\\_%E5%9B%BE\\_01.png](https://raw.githubusercontent.com/DFRobot/Wiki/master/Resource/DFR0553_%E5%9B%BE_01.png)
- [19] „ads1114.pdf“. Zugegriffen: 6. März 2022. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1114.pdf?ts=1646525002330&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1114.pdf?ts=1646525002330&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F)
- [20] „Was ist LoRaWAN?“, *LoRa-WAN Technology*. <https://www.lora-wan.de/> (zugegriffen 16. Februar 2022).

- [21] „em-wave“. <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTyjwyRE9WsQBnj6XoYmJdtv9-n6S5-rdUonQ&usqp=CAU> (zugegriffen 27. Februar 2022).
- [22] „Plancksches Wirkungsquantum“, *Wikipedia*. 17. März 2022. Zugegriffen: 26. März 2022. [Online]. Verfügbar unter:  
[https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Plancksches\\_Wirkungsquantum&oldid=221248516](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Plancksches_Wirkungsquantum&oldid=221248516)
- [23] „AntenneKondSpu“. <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/kom/schalt/08101713.gif> (zugegriffen 20. März 2022).
- [24] „Mobilfunknetz“. <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/kom/bilder/04062211.png> (zugegriffen 16. Februar 2022).
- [25] „Global System for Mobile Communications“, *Wikipedia*. 14. Februar 2022. Zugegriffen: 26. März 2022. [Online]. Verfügbar unter:  
[https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Global\\_System\\_for\\_Mobile\\_Communications&oldid=220184931](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Global_System_for_Mobile_Communications&oldid=220184931)
- [26] „SIM-Karte“, *Wikipedia*. 30. Dezember 2021. Zugegriffen: 6. März 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=SIM-Karte&oldid=218640714>
- [27] „BST-BMP180-DS000-1509579.pdf“. Zugegriffen: 12. März 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mouser.at/datasheet/2/783/BST-BMP180-DS000-1509579.pdf>
- [28] „JavaScript“, *Wikipedia*. 15. Februar 2022. Zugegriffen: 12. März 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=JavaScript&oldid=220210768>
- [29] „einf-fluessigkrist.pdf“. Zugegriffen: 13. März 2022. [Online]. Verfügbar unter:  
<https://www.uni-wuerzburg.de/fileadmin/08020000/praktika/tf/einf-fluessigkrist.pdf>

# 9 Verzeichnis der Abbildungen, Tabellen und Abkürzungen

---

## 9.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Blockschaltbild MPS inkl. Legende .....	12
Abbildung 2 Projektteam .....	20
Abbildung 3 Individuelle Aufgabenstellung Leon Hipf.....	22
Abbildung 4 Individuelle Aufgabenstellung Thomas Fellner.....	22
Abbildung 5 Vorgehen in der Hardwareentwicklung Flussdiagramm .....	23
Abbildung 6 Buck Converter Ersatzschaltbild.....	24
Abbildung 7 Spulenstrom eines Buck Converters.....	25
Abbildung 8 Passives Balancing.....	26
Abbildung 9 LiPo Batterypack.....	26
Abbildung 10 Aufbau Batterypack.....	27
Abbildung 11 Versuchsaufbau zur Aufnahme der UI Kennlinie des Solarpanels .....	29
Abbildung 12 Schaltung zur Aufnahme der UI Kennlinie des Solarpanels.....	29
Abbildung 13 UI Kennlinie.....	30
Abbildung 14 Schaltung zur Ermittlung des Einflusses von Beschattung beim Solarpanel .....	30
Abbildung 15 Einfluss von Beschattung beim Solarpanel .....	31
Abbildung 16 Ladevorgang CN3722.....	33
Abbildung 17 Schaltung des Ladereglers .....	34
Abbildung 18 Veranschaulichung des Einflusses eines Feed Forward Capacitors .....	36
Abbildung 19 Layout Laderegler mit Polygon .....	37
Abbildung 20 Layout Laderegler ohne Polygon.....	37
Abbildung 21 Layout Cn3722 mit eingezeichnetem Stromweg .....	37
Abbildung 22 Schaltung CN3722 mit eingezeichnetem Stromweg .....	37
Abbildung 23 Unterschied Thermals aktiviert und deaktiviert .....	38
Abbildung 24 Einstellung Polygon .....	38
Abbildung 25 Betriebsmodi BQ77915.....	39
Abbildung 26 Verschiedene Versionen der BQ77915 Familie.....	42
Abbildung 27 Layout Protection Circuit ohne Polygon .....	46
Abbildung 28 Layout Protection mit Polygon.....	46
Abbildung 29 Power Ground des Protection Circuits .....	46
Abbildung 30 Stromverbrauch Raspberry + LCD .....	47
Abbildung 31 Schaltplan 5V Versorgung.....	49
Abbildung 32 Formel für die Berechnung von Ipp ( $\Delta$ Iripple) .....	50
Abbildung 33 Formel für die Berechnung der Induktivität .....	50
Abbildung 34 Layout 5V ohne Polygon .....	51
Abbildung 35 Layout 5V Versorgung mit Polygon .....	51
Abbildung 36 Schaltplan Versorgung für die Ladefunktion .....	53
Abbildung 37 Formel zur Berechnung der Induktivität.....	54
Abbildung 38 Formel zur Berechnung des Strombegrenzungs-Widerstandes .....	55
Abbildung 39 Formel zur Berechnung des Peak to Peak Stroms.....	55
Abbildung 40 der Feedback Pin des MIC28513 .....	56
Abbildung 41 Formel zur Berechnung der Ripple-Spannung .....	56
Abbildung 42 Formel zur Berechnung des Feed-Forward-Kondensators .....	56
Abbildung 43 Berechnung der Ripple-Spannung mit einem Feed-Forward-Kondensator .....	56

Abbildung 44 Formel 1 zur Berechnung von R3 .....	57
Abbildung 45 Formel 2 zur Berechnung von R3 .....	57
Abbildung 46 Formel zur Berechnung des Maximalstroms abhängig von der Temperatur .....	57
Abbildung 47 Formel zur Berechnung der Verlustleistung der Spule.....	58
Abbildung 48 Versorgung der Ladefunktion ohne Polygon .....	58
Abbildung 49 Layout Versorgung der Ladefunktion mit Polygon.....	58
Abbildung 50 Massefläche am Layer 2 .....	59
Abbildung 51 Package FQFN-24 .....	59
Abbildung 52 Übersicht Komponenten Hauptplatine .....	62
Abbildung 53 Layout Hauptplatine.....	64
Abbildung 54 Hochstromleitungen Schutzschaltung.....	65
Abbildung 55 Raspberry Pi 4B [10] .....	67
Abbildung 56 I2C Interface.....	68
Abbildung 57 UART Interface .....	69
Abbildung 58 USB .....	70
Abbildung 60 USB-Buszustände [13] .....	71
Abbildung 59 USB Geschwindigkeiten [3]	71
Abbildung 61 USB Datenpacket [14].....	71
Abbildung 62 HDMI Type A [16] .....	72
Abbildung 63 ADS1115 Modul .....	73
Abbildung 64 ADS1115 Blockdiagramm.....	74
Abbildung 65 Internetempfang per Satellit.....	75
Abbildung 66 Elektromagnetische Welle.....	76
Abbildung 67 Antennen als RL-Schwingkreis .....	78
Abbildung 68 Netzstruktur Mobilfunknetz .....	79
Abbildung 69 Netzstruktur GSM.....	80
Abbildung 70 Pin-Beschreibung SIM A6.....	81
Abbildung 71 GSM Testbefehle.....	83
Abbildung 72 GSM boot-up Befehle .....	83
Abbildung 73 Konfiguration PPP.....	85
Abbildung 74 Node Red Wetterbericht .....	88
Abbildung 75 Node Red Ferndiagnose.....	89
Abbildung 76 Node Red Funktion Wettervorhersage.....	90
Abbildung 77 Node Red Benutzeransicht .....	92
Abbildung 78 Node Red Diagnoseseite.....	93
Abbildung 79 Basisplatte.....	94
Abbildung 80 Gehäuse MPS mit Deckel.....	96
Abbildung 81 Gehäuse MPS ohne Deckel .....	96
Abbildung 83 Grobentwurf MPS Rückansicht .....	97
Abbildung 82 Grobentwurf MPS.....	97
Abbildung 84 Prototypen- Systemtest Protokoll.....	99
Abbildung 85 Prototypen- Systemtest Ergebnis: Laderegler .....	100
Abbildung 86 Prototypen- Systemtest Ergebnis: Spannungsversorgung 5V.....	101
Abbildung 87 Prototypen-Systemtest Messaufbau: Spannungsversorgung für die USB Ladeeinheit .....	102
Abbildung 88 Prototypen- Systemtest Ergebnis: Spannungsversorgung für die USB-Ladeeinheit Wirkungsgrad .....	102
Abbildung 89 90 Prototypen- Systemtest Ergebnis: Spannungsversorgung für die USB-Ladeeinheit Ausgangsspannung .....	102

## 9.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 UI Kennlinie .....	29
Tabelle 2 Einfluss von Beschattung beim Solarpanel.....	31
Tabelle 3 Richtwerte für die Wahl der Leiterbahnbreite .....	65
Tabelle 4 Interpretation GSM Test .....	83

### 9.3 Glossar

Raspi	Raspberry Pi
LiPo	Lithium-Polymer
log.	logisch
ITU	International Telecommunication Union (dt. Internationale Fernmeldebehörde)
IMSI	International Mobile Subscriber Identity
EM	Elektro-Magnetisch
UKW	Ultrakurzwellen
SIM	Subscriber Identity Module
MPP	Maximum Power Point

## 10 Begleitprotokoll gemäß § 9 Abs. 2 PrO

### 10.1 Begleitprotokoll Hipf

**Name:** Hr. Leon Hipf

**Diplomarbeitstitel:** MPS – Entwicklung einer autonomen Ladestation

KW	Beschreibung	Zeitaufwand
38	Genauere Ausarbeitung der technischen Umsetzung (Blockschaltbild)	10h
39	Messungen am Solarpanel und Schaltungsdesign	10h
40	Schaltungsdesign und Laborübung One Wire	10h
41	Schaltungsdesign	15h
42	Schaltungsdesign, Laborübung Solarpanel und 1. Review	15h
43	Schaltungsdesign und 1. Einkauf	15h
44	Schaltungsdesign und Prototypenbau 4V Versorgung	15h
45	Erstellung des Batterypacks	10h
46	Prototypenbau Laderegler und 5V 2A Versorgung	10h
47	Prototypenbau Schutzschaltung und 2. Review	10h
48	Prototypenbau Schutzschaltung und 5V 2A Versorgung	10h
49	Prototypenbau Schutzschaltung	10h
50	Entwicklung Modulplatinen und 2. Einkauf	20h
51	Präsentationen	10h
52	Präsentationen und Dokumentationsarbeit	10h
1	Dokumentationsarbeit, Beginn Diplomarbeit	10h
2	Diplomarbeit	15h
3	Löten Modulplatinen, Sortieren der Bauteile und Diplomarbeit	10h
4	Löten Modulplatinen und Präsentationen	10h
5	Laborübung Buck Converter, Test des Ladereglers und Schreiben des Testprotokolls	10h
6	Prototypenbau Versorgung 5V 5A	10h
7	Prototypenbau Versorgung 5V 4A und Entwicklung Hauptplatine	20h
8	Diplomarbeit	25h
9	Diplomarbeit und Löten Hauptplatine	15h
10	Diplomarbeit, Löten Hauptplatine und Inbetriebnahme Hauptplatine	15h
11	Diplomarbeit und Inbetriebnahme Hauptplatine	15h
12	Diplomarbeit und Inbetriebnahme Hauptplatine	15h
13	Diplomarbeit und Systemverifikation	15h

**KW** ...Kalenderwoche

----- ...Semesterabschnitt

## 10.2 Begleitprotokoll Fellner

**Name:** Hr. Thomas Fellner

**Diplomarbeitstitel:** MPS – Entwicklung einer autonomen Ladestation

KW	Beschreibung	Zeitaufwand
38	Grundlagenarbeit Netzverbindungen	10h
39	DA-Antrag, Grundlagenarbeit GSM-Modul	10h
40	Projektplannerstellung, Dimensionierung Spannungsversorgung GSM-Modul	10h
41	Entwurf Spannungsversorgung GSM-Modul	10h
42	Recherche Mobilfunknetz, Messung Solarzelle	10h
43	Raspberry Pi Konfiguration	10h
44	GSM Modul Versorgung Test	10h
45	GSM Modul Test	10h
46	Webserver aufsetzen und konfigurieren	10h
47	Neudimensionierung Versorgung GSM Modul, GSM Modul Code	10h
48	Fehlerdiagnose GSM Modul, Webserver erweitert	10h
49	GSM Test	10h
50	Node Red aufsetzen, Neuanschaffung GSM Modul	10h
51	Node Red Programmierung, Präsentation Vorbereitung	10h
52	Präsentation Vorbereitung	10h
1	Präsentation, Neukonfiguration Raspberry Pi	10h
2	Test neues GSM Modul, PPP konfigurieren	10h
3	Buck converter Test	10h
4	Node Red BMP180 Code	10h
5	Buck converter Test. Node Red ADS1115 Applikation	10h
6	Node Red User Interface, Präsentation	14h
7	Diplomarbeit, Präsentation, GSM Test	10h
8	Gehäuse, Diplomarbeit	10h
9	Gehäuse, Diplomarbeit	12h
10	Gehäuse, User-Interface Änderung, Diplomarbeit	18h
11	Gehäuse, Diplomarbeit, Korrekturen User-Interface	18h
12	Diplomarbeit, Gehäuse, Testungen	14h
13	Testungen, Fertigstellung Gehäuse, Diplomarbeit	12h

KW ...Kalenderwoche

----- ...Semesterabschnitt

## **11 Anhang**

---