



**hochschule mannheim**

# **Hardwareoptimierung eines Laufroboters und Überführung der Elektronik auf Leiterplatten**

Daniel Groß

Studienarbeit

Studiengang Mechatronik

Fakultät für Informatik  
Hochschule Mannheim

2018-12-31

Betreuer

Prof. Dr. Thomas Ihme, Hochschule Mannheim

**Groß, Daniel:**

Hardwareoptimierung eines Laufroboters und Überführung der Elektronik auf Leiterplatten  
/ Daniel Groß. –

Studienarbeit, Mannheim: Hochschule Mannheim, 2018. 53 Seiten.

**Groß, Daniel:**

Hardware-improvement of a walking-robot and conversion from wired to printed circuits  
on boards / Daniel Groß. –

seminar paper, Mannheim: University of Applied Sciences Mannheim, 2018. 53 pages.

## **Erklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Ich bin damit einverstanden, dass meine Arbeit veröffentlicht wird, d. h. dass die Arbeit elektronisch gespeichert, in andere Formate konvertiert, auf den Servern der Hochschule Mannheim öffentlich zugänglich gemacht und über das Internet verbreitet werden darf.

Mannheim, 2018-12-31

Daniel Groß



# Abstract

## ***Hardwareoptimierung eines Laufroboters und Überführung der Elektronik auf Leiterplatten***

An dem sechsbeinigen Laufroboter Akrobat, der Hochschule Mannheim, werden auch in Zukunft noch weitere Versuche und Arbeiten durchgeführt. Damit dies möglichst wenig Komplikationen verläuft, wird die Elektronik im Innenraum, auf Leiterplatten übertragen. Der Roboter wird zudem autark gemacht, indem zwei Akkumulatoren integriert werden, die über ein Interface von Außen aufladbar sind. Der Platz für die Akkumulatoren wird durch ändern der inneren Anordnung geschaffen. Dem System wurde im Innenraum eine neue und übersichtlichere Struktur gegeben, um die Integration weiterer Sensoren, auf einfache Art und Weise zu ermöglichen. Um ein einfaches Arbeiten mit dem System zu ermöglichen, wird ein Bedienfeld integriert, dass die wichtigsten Anschlüsse für Eingabegeräte bereitstellt. Das anvisierte Langzeitziel, der autonom-betriebener Roboter, ist somit wieder ein Stück näher gerückt.

## ***Hardware-improvement of a walking-robot and conversion from wired to printed circuits on boards***

The university of applied sciences in Mannheim, is in possession of a six-legged walking-robot called "Akrobat". In the future-time the students should also be able to upgrade this machine. To create such works smooth as possible, the system-hardware will be optimized and improved. This procedure consists three different main steps. The internal wiring will be transferred as printed-circuits to boards, while the required current of the system constitutes a bigger problem. The advanced analysis of that is also part of this work. The system gets a user-interface panel with USB-connectors and for an easier system-handling. The third step is the integration of two lithium-polymer cells to convert the system to a self-sustaining one. With these improvements, the road to the autonomous robot, is a bit less far away.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Motivation . . . . .	2
1.2. Ziele dieser Arbeit . . . . .	3
1.3. Gliederung . . . . .	4
<b>2. Stand des Systems zu Beginn</b>	<b>5</b>
2.1. Stand der Komponenten . . . . .	5
2.1.1. Stand der Steuerung . . . . .	5
2.1.2. Liste der Komponenten . . . . .	6
<b>3. Systemerweiterungen</b>	<b>7</b>
3.1. Baugruppe „Autarke Versorgung“ . . . . .	7
3.2. Baugruppe PCB1 . . . . .	8
3.3. Baugruppe PCB2 . . . . .	8
<b>4. Leiterplatte PCB1 - Prototyp</b>	<b>11</b>
4.1. Benutzer-Bedienfeld . . . . .	12
4.1.1. Einbauprobe des Prototypen . . . . .	13
4.2. Stromaufnahme . . . . .	13
4.2.1. Leistungsbereich (Ströme bis zu 10 A) . . . . .	13
4.2.2. Normalbereich (mittelhohe Ströme bis etwa 4 A) . . . . .	14
4.2.3. Signalbereich (geringe Ströme) . . . . .	14
4.3. Leiterbahnen des Leistungsbereichs . . . . .	14
4.3.1. Spannung und Abstand zwischen Leiterbahnen . . . . .	14
4.3.2. Strombelastbarkeit und Breite der Leiterbahnen . . . . .	14
4.3.3. Vorgaben zum Herstellungsprozess . . . . .	15
4.3.4. Zusammenhang zwischen Leistung und Leiterbahn-Geometrie	15
4.4. Dimensionierung von Leiterbahnen . . . . .	17
4.4.1. Ungenauigkeit der Designrichtlinie . . . . .	17
4.4.2. Zu- und Abfuhr der Wärme . . . . .	17
4.4.3. Begrenzung der zulässigen Temperatur . . . . .	18
4.5. Ermittlung der Bahnbreite aus vorgegebenen Parametern . . . . .	19
4.5.1. Erste Näherungs-Formel, aus der IPC-2221 . . . . .	19
4.5.2. Zweite Näherungs-Formel, aus dem Design-News Magazin	20

4.5.3. Dritte Näherungs-Formel, des Leiterplattenherstellers . . . . .	20
4.6. Die Neue $I(\Delta T)$ - Korrelation . . . . .	22
4.7. Kontrollrechnung der zulässigen Stromstärke auf Basis der Korrelationsformel . . . . .	23
4.8. Umsetzung auf dem Leiterplatten-Layout von PCB1 . . . . .	24
<b>5. Leiterplatte PCB1</b>	<b>25</b>
5.1. Energiequellen-Management . . . . .	25
5.1.1. Spannungszustände . . . . .	25
5.2. EQM-Schaltung . . . . .	27
5.2.1. Problem des hohen Schaltstroms . . . . .	27
5.2.2. Ansteuerung der MOSFET-Schaltmodule . . . . .	28
5.2.3. Interne Versorgung : LiPo-Akkumulatoren . . . . .	28
5.2.4. Zugeführte Versorgung : externe Quelle . . . . .	29
5.3. Quellenwechsel während des Betriebs . . . . .	29
5.3.1. Problem des Spannungseinbruchs beim Umschalten . . . . .	29
5.3.2. Höhe von PCB1 . . . . .	32
5.4. Endlösung von PCB1 . . . . .	33
5.4.1. Fixierung des Raspberry-Pi . . . . .	33
<b>6. Leiterplatten PCB2A, PCB2B</b>	<b>35</b>
6.1. PCB2A . . . . .	35
6.1.1. Funktionen der Leiterplatte PCB2B . . . . .	35
6.1.2. Montage . . . . .	36
6.1.3. Pufferkondensatoren C_A1 und C_B1 . . . . .	36
6.1.4. 4-adrige BUS-Verbindung zu den Motoren . . . . .	36
6.1.5. Funktionen der Leiterplatte PCB2B . . . . .	37
6.2. Das IC INA219 am I <sup>2</sup> C-BUS . . . . .	37
6.2.1. Steuerung des INA219 über die I <sup>2</sup> C-BUS-Kommunikation .	38
6.3. I <sup>2</sup> C-BUS des Raspberry-Pi . . . . .	39
6.3.1. Dauerhafte I <sup>2</sup> C-Adressierung . . . . .	40
6.3.2. Python-Bibliothek zum INA219 . . . . .	40
6.3.3. Python-Programm zum IC . . . . .	41
6.3.4. Eintragung als System-Service . . . . .	42
6.3.5. Skripte ausführbar machen . . . . .	42
6.3.6. Steuerung von Services . . . . .	43
<b>7. Leiterplatten-Herstellung</b>	<b>45</b>
7.1. Parameter und CAD-Software . . . . .	45
7.1.1. Footprints der Bauteile und Module . . . . .	45
7.1.2. Hersteller-Design-Regeln . . . . .	46
7.1.3. Benötigte Lagen zur Anfertigung . . . . .	46
7.1.4. Kupfer-Balance und Wärmeverteilung . . . . .	47

<b>8. Platzierung der Komponenten</b>	<b>49</b>
8.1. Innere Anordnung . . . . .	49
8.1.1. Inhalt der Gehäuse-Segmente . . . . .	49
<b>9. Zusammenfassung</b>	<b>53</b>
9.1. Zusammenfassung . . . . .	53
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>vii</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>ix</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>xi</b>
<b>Quellcodeverzeichnis</b>	<b>xiii</b>
<b>Index</b>	<b>xv</b>
<b>A. Anhänge</b>	<b>xv</b>
A.1. PCB1 EQM . . . . .	xv
A.2. PCB2A, PCB2B . . . . .	xv



# Kapitel 1

## Einleitung

In der Hochschule Mannheim gibt es schon seit einiger Zeit das Roboter-Projekt Akrobat. Hierbei handelt es sich um einen sechsbeinigen Laufroboter. Der Roboter besitzt bereits die nötigsten Eigenschaften zur Fortbewegung. Dies erfolgte mit der Arbeit von W. Askerow [3], in welcher drei statische Laufmuster implementiert wurden. Mit diesen kann sich die Laufmaschine auf flachem Gelände fortbewegen. Der Roboter soll in Zukunft aber auch auf unebenem Gelände zurecht kommen. Dafür müssen intelligenter Laufarten implementiert werden. Für Solche, muss der Roboter jedoch mehr Sensoren haben, da für reaktive oder gar planende Verfahren mehr Umgebungsinformationen benötigt werden. Aus diesem Grund wird das System im Inneren so umgestaltet, dass ein Nachrüsten von Sensoren nur noch minimalen Aufwand mit sich bringt. Hierfür werden, unter anderem, die inneren Kabelfverbindungen auf Leiterplatten übertragen. Die Versorgungsleitungen verlaufen zum Teil auch über diese. Dabei stellt die Strombelastbarkeit von Leiterbahnen, ein größeres Problem dar, welches entsprechend genau untersucht wird. Denn das System soll für Stromstärken, von bis zu 10 A ausgelegt sein. Die Leiterbahnbreite wird entsprechend der Berechnungsresultate festgelegt. Als Berechnungsgrundlage dienen die Forschungsergebnisse aus [2] und [1]. Aus der notwendigen Bahnbreite resultiert ein weiteres Problem, nämlich die stark eingeschränkte Größe, der Fläche, die für das Leiterplattenlayout von PCB1<sup>1</sup> zur Verfügung steht. Für den zukünftigen Einbau, von weiteren Sensoren, werden diverse Schnittstellen von Bussen, wie dem I<sup>2</sup>C-Bus und SPI-Bus bereitgestellt. Auf Grund der geplanten Integration eines 3D-Bildverarbeitung-Systems, werden im vordersten Gehäuseteil, alle dazu notwendigen Vorkehrungen getroffen. Des Weiteren wird die autarke Betriebsweise, in der

---

<sup>1</sup>PCB1 ist die Bezeichnung der Leiterplatte, auf der sich überwiegend die Bauteile, des Bedienfelds befinden.

## 1. Einleitung

---

Aufgabenstellung gefordert. Zur Umsetzung, werden zwei Akkumulatoren im Innenraum untergebracht. Als problematisch stellt sich dabei heraus, dass für diese nicht genug Platz ist. Ebenso ist es Teil der Aufgabenstellung, eine Schaltung zu entwickeln, die es erlaubt zwischen autarker und externer Versorgung zu wechseln. Dies soll gleichermaßen auch während des laufenden Betriebes möglich sein, ohne dabei den steuernden Einplatinen-PC zu beeinträchtigen. Durch das Umschalten wird ein Spannungseinbruch erzeugt, der durch eine geeignete Maßnahme kompensiert wird. Der Roboter soll zukünftig einfacher in der Handhabung sein und auch mehrere USB-Anschlüsse am Gehäuse bereitstellen, um Eingabegeräte, wie beispielsweise Tastaturen, dort anzuschließen. Diese und Weitere Funktionen werden mit der Entwicklung eines Bedienfeldes eingebracht. Dieses dient gleichzeitig auch als Gehäuseabdeckung und enthält auch Anschlüsse zum Laden der Akkumulatoren. Da auch das Bedienfeld, auf Basis einer Leiterplatte aufgebaut ist, muss auch bei deren Layout, die Strombelastbarkeit der Leiterbahnen berücksichtigt werden.

### 1.1. Motivation

Im der Logistik und im Haushaltsbereich finden Roboter bereits verstärkt Anwendung, um die Menschen bei der Arbeit zu unterstützen. Es gibt bereits viele Bereiche in denen Roboter eingesetzt werden. Diese reichen von Staubsaugerrobotern mit raffinierter Steuerung, bis zu Robotern, die kaum noch vom Mensch zu unterscheiden sind. Einige Menschen stehen dieser Tatsache mit Bedenken gegenüber. Doch es gibt viele Anwendungszwecke bei denen Dank Robotern keine Menschenleben mehr riskiert werden müssten. Die Entschärfung gefundener Bomben, die noch aus Kriegszeiten stammen, ist nur eins der Beispiele. Bei Anwendungszwecken wie diesem, liegt in der Regel kein flaches Gelände vor. Roboter deren Fortbewegung auf Rädern basiert, sind hierfür nicht geeignet. Anders ist es bei den sogenannten Laufmaschinen, deren Lokomotion mit Hilfe von Beinen stattfindet. Laufroboter mit sechs Beinen eignen sich für derartige Terrains wesentlich besser. Die Hochschule Mannheim verfügt über mehrere Arten von Robotern, darunter auch der Laufroboter „Akrobat“, der sich mit Hilfe seiner sechs Beine fortbewegt. In der Arbeit von Müller, Kumar und Moos [7] wurde dessen Steuerung, auf einen Einplatinen-PC übertragen, dem Raspberry-Pi. Mit dieser Studienarbeit sollen die bisherigen Erfolge des Akrobat-Projekts weiter optimiert werden, indem die innere Verdrahtung von Steuerung und Versorgung, neu strukturiert wird. Diese Umsetzung hilft

den zukünftigen Studenten, effektiv dabei, den Überblick zu behalten. Ebenso hilft sie bei der Fehlersuche, wenn neue Versuche am System durchgeführt werden. Es wurde auch auf eine modulare und sinnvolle Anordnung der Systemkomponenten geachtet. In diesem Zuge wurde weitere Besonderheiten eingebracht, wie bspw. die Möglichkeit einzelne Komponenten über Steckbrücken zu deaktivieren. Mit dieser Arbeit wird ein autarkes System geschaffen und die erste große Hürde, auf dem Weg zum Langzeitziel "Der autonome Roboter", bewältigt.

## 1.2. Ziele dieser Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es unter anderem, das Akrobat-System endlich zu autark zu machen. Um in den inneren Gehäuse-Segmenten genügend Platz für die Akkumulatoren zu schaffen, wird die bisherige Position des steuernden Raspberry-Pi verändert. Die Akkumulatoren sollen von außerhalb aufgeladen werden können. Da keine Ladeelektronik für die LiPo-Akkumulatoren<sup>2</sup> vorhanden ist, war eine der Anforderungen ein passendes Interface für das Ladegerät nach Außen zu führen. Auch die USB-Ports des Raspberry-Pi sollen auf diese Weise zugängig gemacht werden. Entsprechend dieser Anforderungen wurde eine Management-Schaltung entworfen, die es auch erlaubt das System fremd zu versorgen. Dies alles wurde mit der Entwicklung der Leiterplatte PCB1 umgesetzt. Hierfür war es notwendig eine passende Blende anzufertigen. Ferner war gefordert gewesen unterbrechungsfrei zwischen den beiden Versorgungseinheiten während des Betriebs umschalten zu können. Ein weiteres Ziel war die Strukturierung und Optimierung der elektronischen Verbindungen im Inneren. Hierfür bot es sich an, diese Verbindungen als gedruckte Schaltung, auf zwei Leiterplatten zu übertragen. Diese sollen samt den Akkumulatoren in den größeren beiden Gehäusesegmenten untergebracht werden. Ein größeres Problem ergab sich aus einer weiteren Anforderung, dem höchstzulässigen Strom von 10 A. Für das Führen von Strömen in diesem Bereich, sind spezielle Vorkehrungen notwendig. Besonders dann, wenn diese Ströme auch noch über gedruckte Schaltungen auf Leiterplatten verlaufen. Dieser Sachverhalt wurde genauer untersucht, auch um die nötigen Parameter zur Herstellung der Leiterplatten zu ermitteln.

---

<sup>2</sup>LiPo ist die abgekürzte Schreibweise der Stoff-Zusammensetzung, auf welcher das Akkumulator-Funktionsprinzip basiert.

### **1.3. Gliederung**

Die Arbeit verläuft in der hier geschilderten Reihenfolge und Inhalten. Das zweite Kapitel beinhaltet den Stand zu Arbeitsbeginn. Ab dem dritten Kapitel focussiert sich der Inhalt auf Baugruppen, die in Kapitel vier bis sechs genauer behandelt werden. Beginnend in Kapitel vier, mit dem Prototypen von Leiterplatte PCB1, wird sich durch alle Systemerweiterungen durchgearbeitet. Kapitel fünf hat die Endversion von PCB1 zum Inhalt. Für die Baugruppen werden zuerst die geforderten Funktionen beschrieben und im Anschluss, die Art und Weise der Integration. Die Probleme, die innerhalb jeder Baugruppe auftreten, werden im jeweiligen Kapitel mitbehandelt. Nach den Baugruppen, in Kapitel sieben, wird die Leiterplattenherstellung und die verwendete Software zum Thema. Die größte auftretende Problematik, die zur „Strombelastbarkeit von Leiterbahnen“ ist innerhalb Kapitel vier zu finden. Von den Leiterplatten PCB2 A und B wurden keine Prototypen angefertigt, da deren elektronische Schaltung vergleichsweise einfach ist. Daher gibt es nur ein Kapitel, dass sich mit dieser Baugruppe befasst. In diesem wird auch das IC zur Leistungsmessung behandelt. Im vorletzten Kapitel befindet sich eine Zuordnung der Komponenten, unterteilt in Baugruppen. Eine Zuordnung in Gehäusesegmente ist ebenfalls Bestandteil. Abschließend steht noch eine knappe Zusammenfassung der erreichten Ziele geschrieben.

Im Anhang befinden sich vergrößerte Darstellungen der relevanten Stromlaufpläne.

## Kapitel 2

# Stand des Systems zu Beginn

Hier wird in kurzer Form das System und dessen Stand beschrieben, wie er bei Beginn dieser Arbeit war.

### 2.1. Stand der Komponenten

Das System verfügte bereits über 18 Servomotoren des Typs Dynamixel RX-64. Des Weiteren war ein Raspberry-Pi 3B und eine Leiterplatte mit Spannungsregler zur Versorgung des Raspberry-Pi. Die Motoren waren über eine gemeinsame BUS-Verbindung, die aus vier Adern besteht verbunden. Zu deren Ansteuerung wurde eine USB-RS485 Adapter verwendet, der sich ebenfalls im Inneren befand.

#### 2.1.1. Stand der Steuerung

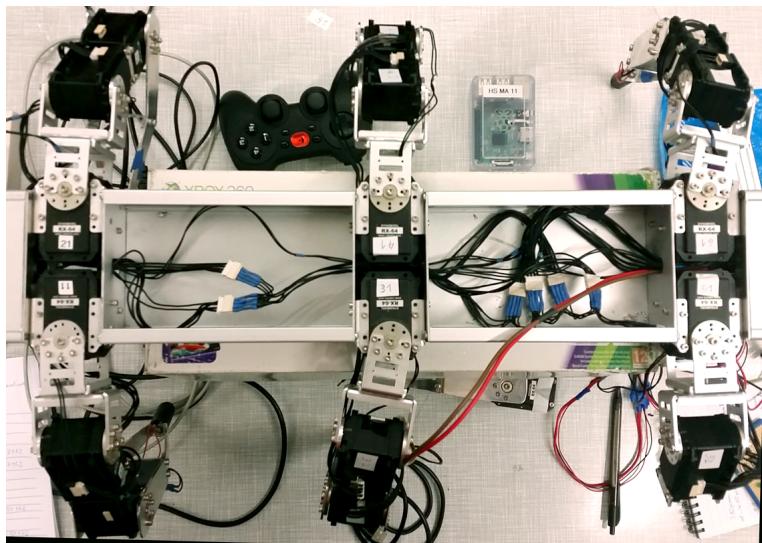
Eine Roboter-Steuerung wurde bereits in der Arbeit [3] entwickelt und integriert. Diese wurde über das Framework ROS<sup>1</sup> realisiert. Ursprünglich wurde von einem externen Laptop aus gesteuert. Die Steuerung wurde in [7] auf einem Raspberry-Pi eingerichtet und im Robotergehäuse integriert. Das ROS-Akrobat-Paket wurde in Ubuntu Version 14.04 (Indigo-Igloo) entwickelt. Bei der ROS-Version handelte es sich um die Indigo-Version. Bestandteil des ROS-Pakets sind auch die drei unterschiedlichen Laufmuster. Mit einem Gamepad kann gewechsel und gesteuert werden. Die Energie-Versorgung des Systems, wurde von außerhalb zugeführt.

---

<sup>1</sup>ROS steht für Robot Operating System. Dieses ist speziell für Roboter entwickelt worden und basiert auf dem sog. „Publisher and Subscriber“-Prinzip

## 2. Stand des Systems zu Beginn

---



**Abbildung 2.1.:** Bild des ursprünglichen Systems, hier ohne RPi und ohne DC-DC-Wandler

### 2.1.2. Liste der Komponenten

- Raspberry Pi 3B
- Dynamixel Servo-Motoren Rx-64 (18 Stk.)
- FTDI-USB-to-RS485 Converter
- (Drucksensoren in den Füßen)
- Leiterplatte mit DC-DC-Wandler

## Kapitel 3

# Systemerweiterungen

In diesem Kapitel werden die neuen bzw. geänderten Komponenten des Roboters beschrieben und Baugruppen zugewiesen.

### 3.1. Baugruppe „Autarke Versorgung“

Des Weiteren soll das System für eine Dauer  $T_{BAT}$  von mindestens 60 Minuten in der Lage sein, um sich autark, also über den internen Akkumulator, zu versorgen. Die Energie wurde bisher von Extern bezogen. Zwei geeignete Lithium-Polymer-Akkumulatoren wurden bereits in der Studienarbeit [7] angeschafft. Die Spannung der Akkus wird über das Energiequellen-Management eingespeist, indem am Benutzerbedienfeld, der Stifts S2 eingesteckt wird. Das Bedienfeld befindet sich am hinteren Teil des Roboters.

Die Baugruppe „autarke Versorgung“ besteht aus:

- Zwei Akkupaketen mit der Typ-Bezeichnung SLP 4500 S4 des Herstellers Red Power

Beide Akkus parallel geschaltet, ergeben eine Gesamtkapazität von 9000 mAh. Mit ihr könnte der Roboter sogar bei zulässigem Höchstrom eine ganze Stunde lang betrieben werden. Weitere Einzelheiten sind der Arbeit [7] zu entnehmen. Um den Massenschwerpunkt des Systems möglichst im Zentrum zu belassen, wurden die zwei Batterie-Pakete so platziert, dass der Massenschwerpunkt möglichst auf der Position des Roboter-Mittelpunkts verblieb.

### 3. Systemerweiterungen

---

#### 3.2. Baugruppe PCB1

Baugruppe PCB1 besteht aus einer Leiterplatte PCB1 und dem zugehörigen Benutzer-Bedienfeld.

Funktionen der Leiterplatte:

- Schaltung des Energiequellen-Management (EQM)
- Interface zum Laden der Akkumulatoren
- Signalführung der Raspberry-Pi USB-Ports

Funktionen des Bedienfeldes:

- Schalter S1: Hauptschalter des Systems EIN-AUS
- Schalter S2: Batterie als Quelle einbinden (S2 ist ein Steckstift)
- Anschlussbuchsen für externe Versorgung 12 V ... 18,5 V
- LED-Anzeige für Versorgung von Extern
- LED-Anzeige für Netzwerk-Aktivität

#### 3.3. Baugruppe PCB2

Die innere Verkabelung verlief bisher über handgefertigte Verbindungsleitungen, die über Molex-Steckkontakte miteinander kontaktiert waren. Diese Verbindungen wurden in Leiterbahnen überführt und die Motorenzuleitungen, für Dreier-Gruppen, mittels Schmelzsicherungen abgesichert. Der alte DC Spannungswandler wurde gegen zwei neue DC-DC-Wandler der Firma Traco, des Typs TEN 15-2411W [14] verbaut, diese erzeugen eine Spannung von 5 V am Ausgang. Die gesamte Verdrahtung ist auf die Leiterplatten PCB2A und PCB2B aufgeteilt worden, die sich in den inneren Gehäusesegmenten befinden.

Funktionen:

- Übertragung der Kabelverbindungen auf Leiterplatte
- Strombegrenzung der Servomotor-Gruppen (je Bein) durch Schmelzsicherungen
- Strombegrenzung einzelner Komponenten durch Schmelzsicherungen

- DC-DC Wandlung von  $V_{\text{BUS}}$ -Spannungslevel in eine 5 V-Spannung
- Führung der 4-adrigen BUS-Verbindung (GND,  $V_{\text{BUS}}$ , D+, D-)
- Steckverbindung für die Servomotoren
- Leistungs-Monitor-IC für Akkumulatorstrom (INA219)
- Steckbrücken zum EIN-AUS-Schalten einzelner Komponenten



## Kapitel 4

### Leiterplatte PCB1 - Prototyp

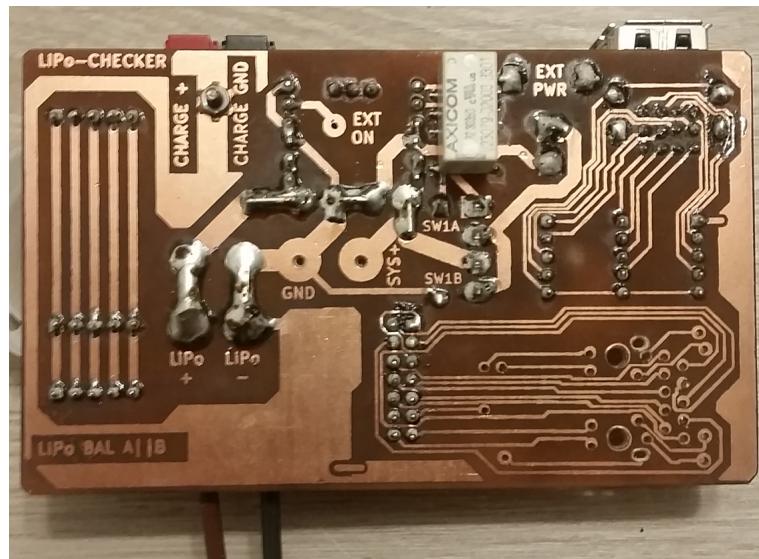


Abbildung 4.1.: Platine hergestellt über Direkt-Toner-Methode

Die Leiterplatte PCB1 ist der Grundbaustein des Benutzer-Bedienfeldes. Von dieser wird ein Prototyp mit Hilfe der sogenannten „Direkt-Toner-Methode“ [8] angefertigt. Nur so kann ein probeweises Einbauen an vorgesehener Stelle erfolgen, denn innerhalb des Aluminium-Gehäuses steht nur wenig Volumen zur Verfügung. Auch das Risiko von Fehlern innerhalb des Leiterplatten-Layouts konnte minimiert werden. Die Methode eignet sich gut um in kurzer Zeit eine Leiterplatte zu erzeugen, die für Probeaufbauten bestens ausreicht. Bei der Probeplatine stand nur eine Seite zum Anlöten von Bauteilen zur Verfügung. Bei der Endlösung wird mit dem Einsatz von SMD-Bauteilen eine weniger dichte Anordnung erreicht.



**Abbildung 4.2.:** Anschlüsse des Bedienfeldes, bei Prototypen PCB1

### 4.1. Benutzer-Bedienfeld

Der Raspberry-Pi wird ohne Schutzgehäuse, über die Montagebohrungen, auf Pfeilern befestigt. Diese sind auf an ihrem anderen Ende auf der Leiterplatte PCB1 befestigt. Somit bleibt der RPi auf der Position, um eine Steckverbindung zwischen beiden Platinen zu ermöglichen. Beim Prototyp wurde ein Versuch mit Trägerplatte gestartet, die zu Befestigung diente. Diese Trägerplatte entfällt bei der Endlösung, durch Verwendung der Montagepfeiler. Die Anschlüsse des RPi sind über das Bedienfeld erreichbar. Abbildung 4.2 zeigt die, nach Außen geführten Anschlussmöglichkeiten, die PCB1 besitzt.

Am Bedienfeld sind diese Anschluss-Möglichkeiten verfügbar:

- RPi: Drei von vier USB-Ports
- RPi: LED-Anzeige für LAN-Aktivität
- RPi: Micro-USB Power Eingang (5 V)
- RPi: Audio-Ausgang
- RPi: HDMI-Ausgang
- PCB1: Akkumulator-Ladeanschluss
- PCB1: Akkumulator-Balanceranschluss
- PCB1: Anschluss für externe Versorgung (12 V bis 20 V)

Bedienelemente:

- S1 Ein-Aus-Hauptschalter
- S2 Steckstift zur Einbindung des Akkus



**Abbildung 4.3.:** Prototyp PCB1 mit Raspberry-Pi im eingebautem Zustand, ohne Blende

#### 4.1.1. Einbauprobe des Prototypen

Das Bild 4.3 zeigt den Einbau im Gehäuse. Bereits ohne Kabelverbindungen, die noch hinzukommen, ist der Platz bereits sehr knapp.

### 4.2. Stromaufnahme

Grob lassen sich die Stromkreise auf PCB1 in drei Gruppen einteilen. In Stromaufnahme im Signalbereich, Normalbereich und Leistungsbereich. Erstere Beiden sind unkritisch was die Geometrie der Leiterbahnen angeht. Die Leiterbahnen des Leistungsbereichs, der Stöme bis zu 10 A [5] führt, benötigen allerdings einer genaueren Untersuchung. Viele Leiterplattenproduzenten orientieren sich an der Design-Richtlinie IPC-2221 [12], die jedoch nur eine bedingte Genauigkeit aufweist. In diesem Abschnitt wird die Gegenüberstellung der IPC-Tabelle mit den unterschiedlichen gängigen Näherungsformeln 4.6, 4.7 und 4.8 behandelt.

#### 4.2.1. Leistungsbereich (Ströme bis zu 10 A)

- Energiequellen-Management
- $V_{\text{BUS}}$ -Leitung auf PCB2A und PCB2B

## 4. Leiterplatte PCB1 - Prototyp

---

- Eingänge zum Laden des Akku und der externen Versorgung

### 4.2.2. Normalbereich (mittelhohe Ströme bis etwa 4 A)

- Akkumulator-Balancer Interface
- Versorgung des Raspberry-Pi

### 4.2.3. Signalbereich (geringe Ströme)

- USB-Ports
- Datenleitungen RS485
- Datenleitungen SPI, I<sup>2</sup>C
- LAN-verbindung

Der Schalter S1 und der Stift S2 sind dem Signalbereich zuzuordnen, da sie lediglich einen geringen Steuerstrom zu führen haben.

## 4.3. Leiterbahnen des Leistungsbereichs

### 4.3.1. Spannung und Abstand zwischen Leiterbahnen

Die Leiterabstände einer gedruckten Schaltungen nach gängigen Design-Richtlinien, betragen für Spannungen von 0 V ... 50 V, ohne Schutzschicht und bei Verwendung unterhalb der Höhe von 3048 m (über Meeresspiegel) mindestens 0,318 mm. Dieses Maß wurde beim Entwurf berücksichtigt.

### 4.3.2. Strombelastbarkeit und Breite der Leiterbahnen

Der folgende Abschnitt befasst sich mit dem Problem der zulässigen Stromstärken bei Leiterbahnen. Wie weit diese belastet werden können und welche Einflüsse diesbezüglich eine Rolle spielen. Beiläufig werden hier auch Materialstärken und Produktionsparameter ermittelt, um die Herstellungskosten möglichst nicht in die Höhe zu treiben. Als Produzent wurde die Firma „Multi-Circuit-Boards“ [4] ge-

wählt. Der Grund dafür war die kostengünstige Herstellung speziell im Bereich der Kupferdicke von 70 µm.

#### 4.3.3. Vorgaben zum Herstellungsprozess

Folgende Parameter wurden bereits im Voraus festgelegt:

1. Maximal 2 Lagen
2. Schichtdicke des Kupfers mit 70 µm
3. Max. zulässige Temperaturerhöhung von 50 °C
4. Strombelastung bis zu 10 A
5. Trägermaterial FR4
6. Höhe der Trägerplatte  $d = 1,55$  mm
7. Außenmaße 99,5 mm x 59,5 mm

#### 4.3.4. Zusammenhang zwischen Leistung und Leiterbahn-Geometrie

Bereits im Jahre 1841 stellte der Wissenschaftler James Joule zwischen der elektrischen Heizleistung  $P$ [W] und der Stromstärke  $I$ [A] den Zusammenhang  $P = U \cdot I$  her.

Der Bezug zwischen Spannung und Strom ist gegeben durch:

$$P = U \cdot I \quad (4.1)$$

Der elektrische Widerstand kann wie folgt über die Spannung mit der Leistung in Bezug gesetzt werden:

$$U = R \cdot I \quad (4.2)$$

Wird 4.2 in 4.1 eingesetzt, entfällt die Spannung. Die elektrische Leistung lässt sich somit als die Funktion 4.3 schreiben, deren abhängige Größen der Widerstand und

#### 4. Leiterplatte PCB1 - Prototyp

---

der Strom sind. Der elektrische Widerstand  $R$  des Leiters (hier Leiterbahn) lässt sich über folgende Gesetzmäßigkeit ermitteln:

$$\left( \frac{L}{A} \rho_{20} (1 + \alpha_{20}(T - 20^\circ\text{C})) \right) \quad (4.3)$$

Die allgemeine Form der elektrischen Leistung lautet:

$$P = R \cdot I^2 \quad (4.4)$$

Wird der Leiterbahnwiderstand eingesetzt, so ergibt sich folgender Zusammenhang.

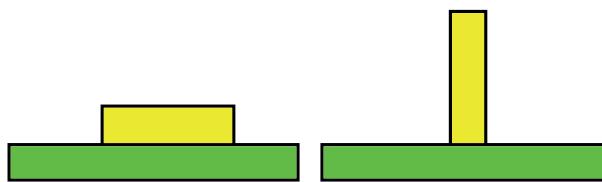
$$P = \left( \frac{L}{A} \rho_{20} (1 + \alpha_{20}(T - 20^\circ\text{C})) \right) \cdot I^2 \quad (4.5)$$

Die Leiterbahn stellt hierbei den elektrischen Widerstand in Form eines (Heiz-)Leiters dar, der im Unterschied zum Kabel-Leiter, einen viereckigen Querschnitt besitzt. Zur Festlegung der Bahnbreite ist also die Ermittlung des Widerstandswertes notwendig, welcher von Leiterquerschnitt, spezifischen Widerstand <sup>1</sup>  $\rho[\frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}}]$  und dem Temperaturkoeffizienten  $\alpha[\frac{1}{K}]$  abhängig ist.

Die Größen  $\alpha$  und  $\rho$  sind material- und temperaturabhängig und verhalten sich nicht-linear. Der elektrische Widerstand nimmt mit zunehmender Querschnittsfläche  $A$  des Leiters ab, denn umso mehr leitendes Material zur Verfügung steht, desto mehr Elektronen können sich durch die Fläche hindurch bewegen. Bei gleichbleibendem Stromverbrauch der Last, verringert sich proportional auch die Verlustleistung. Folglich verringert sich dann die Wärmeentwicklung Leiterbahn an dieser Stelle. In der Leiterbahn entsteht ein Wärmefluss, dieser entspricht der Verlustleistung, welche mittels Wärmeübertragung in das Leiterplatten-Trägermaterial gelangt und der sich dort weiter aufteilt. Allerdings wird nicht nur in das Trägermaterial, der Leiterplatte übertragen. Bei dem Prozess wird 1/3 des Wärmeflusses an die umgebende Luft abgegeben, dieser Vorgang wird allgemein als Konvektion bezeichnet. Die übrigen 2/3 werden durch Infrarotstrahlung und Wärmeleitung an die Umgebung der Leiterplatte abgegeben. Die Umgebung würde in diesem Falle dann dem Aluminiumprofil entsprechen, in welchem die Leiterplatte montiert wird.

---

<sup>1</sup>Der spezifische Widerstand ist abhängig vom genutzten Material



**Abbildung 4.4.:** Wärmeabgabe einer Leiterbahn

## 4.4. Dimensionierung von Leiterbahnen

### 4.4.1. Ungenauigkeit der Designrichtlinie

„Die Festlegung der Geometrie einer Leiterbahn kann nicht alleine durch Kenntnisse des zulässigen Stroms  $I$  und einer bekannten Temperatur  $T$  festgelegt werden. So wird es aber in der Richtlinie gehandhabt. Anhand der nachfolgenden Grafik aus [2] soll diese Ungenauigkeit verständlicher gemacht werden.“

„Die reine Abhängigkeit der Strombelastbarkeit von der Fläche des Bahnquerschnitts wie in Bild 4.4 kann so nicht richtig sein. Die Leiterbahnen in dem Bild haben zwar eine gleichgroße Querschnittsfläche, aber es kommt auch auf die Fläche an, mit der die Bahn den direkten Kontakt zur Trägerplatte hat. Sie bestimmt den Wärmeeintrag in die Trägerplatte mit. Die linke Konfiguration kann darum, bei gleicher Temperatur mit einem höheren Strom belastet werden. Laut IPC-2221 Richtlinie haben die beiden Leiterbahnen aber die gleiche Temperatur und es fließt der gleiche Strom durch Beide. Dieser Sachverhalt kann also nicht ganz stimmen, [denn bei der rechten Konfiguration, kann die Leiterbahn ihre Wärme fast ausschließlich an die Umgebungsluft abgeben] [...].“ [2]

Die einzige Fläche, an der die Wärme direkt in das Trägermaterial (FR4) übergeht, ist die schmale Auflagefläche der rechten Bahn im Bild 4.4. Luft ist jedoch kein guter Wärmeleiter, daher muss es ein deutlich abweichendes Ergebnis zur linken Konfiguration geben.

### 4.4.2. Zu- und Abfuhr der Wärme

Scheinbar spielt die Art und Güte der Wärmeabführung eine wichtige Rolle. Durch Physikalische Gesetze ist festgelegt, dass ein fließender Strom immer Wärmeent-

stehung zur Folge hat. Diese Erkenntnis deckt sich mit der Tabelle der Bahnbreiten der IPC-2221. Die Tabelle beginnt nämlich erst bei einer Temperaturdifferenz von 10 °C, eine Differenz von 0 °C gibt es nicht, sobald ein Stromfluss existiert. Wichtig ist auch die Dauer  $t$  in [ s ], mit der belastet wird. Unter der Annahme einer konstanten Strombelastung und zunehmender Zeit  $t$ , versucht sich die Leiterplatte und ihre Umgebung auf ein Temperaturlgleichgewicht einzupendeln [15]. Es ist daher auch sehr entscheidend wie die Art und Höhe der Kühlleistung ist.

### 4.4.3. Begrenzung der zulässigen Temperatur

Temperaturgrenzen ergeben sich meistens durch weitere verbaute Materialien oder auch durch die elektronische Schaltung, welche nur innerhalb eines bestimmten Temperaturbereiches funktioniert. Durch Material bedingt, zählt hierzu z.B. der sog. „Glaspunkt“<sup>2</sup> des Trägermaterials (FR4), der bei ungefähr 120 °C liegt. Hiermit ist also schon eine obere Temperaturgrenze durch das FR4 einzuhalten. Da Lötzinn bei 110 °C bereits schmelzen kann, wird die obere Grenztemperatur auf 100 °C abgerundet, um etwas Reserve zu schaffen.

Unter der Annahme, dass die Bezugstemperatur 20 °C beträgt, ergibt sich ein maximal zulässiger Temperaturunterschied von  $\Delta T = 80$  °C, ab diesem können Materialschäden auftreten.

### Länge der Leiterbahnen

Seltsamer Weise ist die Länge der Leiterbahn ist nicht von Belang, obwohl mit zunehmender Bahnlänge, sich auch der elektrische Widerstand erhöht. Der Grund dafür ist, dass die zugeführte Wärmemenge wieder durch das Trägermaterial und Umgebungsluft abgeführt wird. Die zwei Größen stehen also in einem bestimmten Verhältnis zueinander. Dieses Verhältnis ändert sich nicht durch Länge der Bahn. Anders ausgedrückt, steigt die Abfuhr und Zufuhr im selben Verhältnis mit der Bahnlänge an. Daher ist die Länge der Leiterbahn, für das Ablesen der Tabelle auch nicht erforderlich. Formal lässt sich dieses Gleichgewichtsverhältnis von Wärme- und Kühlleistung mit dem Ausdruck  $0 = P - K(T)$  beschreiben [15].

---

<sup>2</sup>Der „Glaspunkt“ ist die obere Temperaturgrenze, ab welcher das Glasgewebe des Materials irreparabel geschädigt wird und die Leiterplatte beginnt, sich zu verbiegen.

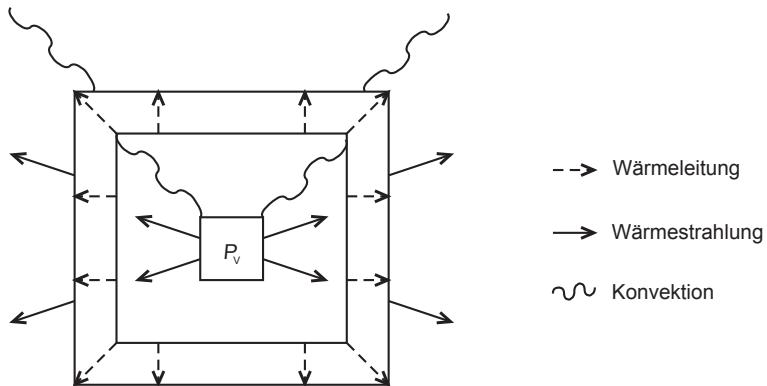


Abbildung 4.5.: Bestandteile des Wärmestroms [15]

Mit dem Anbringen von zusätzlichen Wärmeabführenden Bauteilen oder z. B. einer aktiven Kühlung, kann durchaus eine höhere Strombelastbarkeit bei unveränderter Geometrie der Leiterbahn erreicht werden.

## 4.5. Ermittlung der Bahnbreite aus vorgegebenen Parametern

In diesem Abschnitt werden gängige Näherungen, unter Verwendung der Vorgaben gegenübergestellt und verglichen. Die folgenden Berechnungen wurden mit einem  $\Delta T$ -Wert von 20 °C berechnet. Zulässig wäre allerhöchstens ein  $\Delta T$  von 50 °C.

### 4.5.1. Erste Näherungs-Formel, aus der IPC-2221

„Folgender Ausdruck ist eine Näherung, die sich aus den Zusammenhängen der IPC-2221 Richtlinie ableiten lässt, denn eine eindeutige Formel ist in der Richtlinie nicht angegeben.“ [2]

$$I = 9,6 \cdot A^{0,68} \cdot \Delta T^{0,43} \quad (4.6)$$

wobei die Fläche  $A = h \cdot b$  in [ mm<sup>2</sup> ] anzugeben ist.

Nun kann mit einem Wert für die Bahnbreite und der gewählten Kupferlagen-Dicke, die Leiterbahn-Querschnittsfläche berechnet werden. Mit der Festlegung der zulässigen Temperaturdifferenz kann somit ein zulässiger Strom errechnet werden. Dieser Wert stützt sich auf den Erkenntnissen der Versuche aus der IPC-2221, welche allerdings alle mit 35 µm dicker Kupferlage durchgeführt wurden.

## 4. Leiterplatte PCB1 - Prototyp

---

Für den Strom  $I$  wurde ein Wert von 10 A und für die zulässige Temperaturdifferenz 20 °C vorgegeben. Um die Leiterbahnbreite möglichst gering zu halten, wurde die Dicke der Lage des Kupfers auf 70 µm festgelegt.

Für die geforderten Werte ergibt sich mit IPC-2221-Formel und der Bahnbreite  $b = 4,5$  mm ein zulässiger Strom von 15,8 A. Mit einer Bahnbreite von  $b = 4,0$  mm ergibt sich ein Strom von 14,6 A. Die exakte Breite entsprechend des zulässigen Stroms, müsste nach dieser Formel mit  $b = 2,3$  mm gegeben sein. Der aus dieser Breite resultierende Stromwert ergibt sich mit 10,07 A.

### 4.5.2. Zweite Näherungs-Formel, aus dem Design-News Magazin

Zum Vergleich wurde mit gleichen Gegebenheiten und der zuvor errechneten Bahnbreite von  $b = 2,3$  mm, nochmal der zulässige Strom über die Formel-Variante, des Design-News Magazins, das auf [4] erwähnt wird, gerechnet. Allgemein lautet diese:

$$I = 6,4 \cdot A^{0,69} \cdot \Delta T^{0,45} \quad (4.7)$$

,wobei die Fläche  $A = h \cdot b$  auch hier wieder in [ mm<sup>2</sup> ] anzugeben ist.

Es ergibt sich hier jedoch ein zulässiger Höchststrom von 7 A. Um 10 A als zulässigen Strom zu erreichen, muss die Bahnbreite weiter auf 4 mm erhöht werden. Hieraus ergibt sich dann ein Strom  $I$  von 10,2 A.

### 4.5.3. Dritte Näherungs-Formel, des Leiterplattenherstellers

Des Weiteren werden beide Ergebnisse mit dem, der Näherung verglichen, die auch der Hersteller (Multi-Circuit-Boards) verwendet. Bei dieser Variante handelt es sich um eine Kombination aus den Formeln der IPC-2221, Design-News sowie den Erkenntnissen von Dr. Johannes Adam und lautet wie folgt:

$$I = K \cdot h^{0,5} \cdot b^{0,64} \cdot \Delta T^{0,5} \quad (4.8)$$

,wobei h und b jeweils in [ mm ] anzugeben sind.

Bei dieser Formel kommt noch der Faktor  $K$  hinzu, welcher die Anordnung und Anzahl der Kupferlagen mitberücksichtigt. K ist ein fester Faktor (2 Lagen:  $K = 3,3$ ; 4 Lagen:  $K = 3,6$ )

Die Vergleichsrechnung wurde auch mit dieser Formel durchgeführt. Entsprechend, wurde für  $K$  hier 3,3 gewählt, für  $h = 70 \mu\text{m}$  und wieder die aus Formel 4.6 errechnete Breite  $b$  von 2,3 mm. Der errechnete Strom von 6,6 A bei einer Breite  $b$  von 2,3 mm entspricht fast dem Wert, der über die zweite Näherung, die der Design-News Formel errechnet wurde. Um nach dieser Formel der Forderung der 10A gerecht zu werden, musste die Leiterbahnbreite auf  $b = 4,5 \text{ mm}$ , also auf etwa das Doppelte erhöht werden. Der resultierende Strom beträgt dann 10,24 A.

### ***Auswertung der drei Näherungs-Formeln***

Die benötigte Mindestbreite der Leiterbahn wurde zuvor über die drei unterschiedlichen Näherungs-Formeln 4.6, 4.7 und 4.8 berechnet. Mit der Breite von etwa 4,5 mm darf ein Strombelastung von 10,24 A auftreten.

Die Ergebnisse sind:

- 2,3 mm nach IPC-2221 Richtlinie 4.6
- 4,0 mm nach Design-News Magazin 4.7
- 4,5 mm nach der zusammengesetzten Formel des Herstellers 4.8

An dieser Stelle muss erwähnt werden, dass die IPC-Formel auf eine Leiterplatte, mit einzelner  $35 \mu\text{m}$  dicker Leiterbahn auf oberer Seite und voller Kupferfläche der gleichen Dicke auf der Unterseite basiert. Die Formel ist für andere Konfigurationen und Kupferdicken nicht zu gebrauchen. Nach späteren Forschungs-Erkenntnissen aus [2] ist die Näherungsformel der IPC-2221 [12] ausschließlich für die Kupferstärke von  $35 \mu\text{m}$  gültig, was durch die Ergebnisse aus dieser Arbeit nochmal bestätigt wird.

Nur durch Kenntnis, der zulässigen Temperatur und dem Strom, ist es im Allgemeinen also wirklich nicht möglich die Geometrie der Leiterbahn eindeutig zu bestimmen. Denn mathematisch betrachtet steckt hinter diesem Zusammenhang eine Differentialgleichung bzw. eine Kurvenschar, welche unendlich viele Lösungen innerhalb eines zulässigen Definitionsbereiches haben kann. Die Verfahren, die Firmen für Stromanalysen von Leiterplatten verwenden, sind numerische Lösungsverfahren. Diese kommen durch das sogenannte Approximation-Verfahren zum Ergebnis.

## 4.6. Die Neue $I(\Delta T)$ - Korrelation

Durch erfolgreiche Reproduktion der IPC-2221 [12] Kurven, konnte über Extrapolation auf andere Leiterplatten-Szenarien und somit ein allgemeinerer Zusammenhang aufgestellt werden. In der Arbeit [2] wurde eine Reihe von Leiterplatten-Szenarien auf den Materialien FR4, Keramik und Polyimidfolie untersucht. Gerade wegen dem Sachverhalt der doppelten Kupferdicke ist es für das Akrobat-Projekt interessant zu prüfen, inwiefern sich die Ergebnisse dieser „Neuen Korrelation“ mit denen, der drei Näherungsformeln 4.6, 4.7 und 4.8 decken.

Ähnlich wie der Faktor  $K$  der dritten Näherung, gibt es hier die Konstante  $B_{LP}$ , welche das Verhältnis von Kupfergehalt und Bahnabständen von oberer und unterer Kupferlage berücksichtigt. Durch den ähnlichen Verlauf der Ergebnis-Diagramme konnte J.Adam eine Regel zur Skalierung herleiten, die es erlaubt den Strom auch für andere Konfigurationen und Kupferstärken zumindest Näherungsweise zu ermitteln. Alle der getesteten Szenarien basieren auf 1,6 mm dicken Platinen, welche der Vorgabe von 1,55 mm fast gleich kommt. Im Rahmen dieser Arbeit, wird hier nur auf die relevanten Konfigurationen eingegangen. Also nur auf die, mit Leiterbahn auf der Oberseite und leerer Unterseite sowie auf die mit Leiterbahn auf Oberseite und vollflächiger Kupferunterseite. Ein etwas aktuelleres Dokument, dessen Thema ebenfalls die Neue-Korrelation ist und auch von J.Adam verfasst wurde, ist [1]. In diesem ist der Sachverhalt anhand qualitativ besserer Bilder erläutert. Die Leiterplatten des Akrobat-Projekts entsprechen natürlich keiner der beiden Konfiguration ganz genau, aber sie liegen mit Sicherheit irgendwo dazwischen.

1. Szenario-1 entspricht der Konfiguration mit leerer Unterseite.  $B$  beträgt hier 3,6.
2. Szenario-2 entspricht der Konfiguration mit Kupfer-Vollfläche auf der Unterseite (Bild 6 in der IPC-2221). Hier gilt  $B = 1,6$

Theoretisch kann der Wert für  $B$  im Bereich von 1,6 und 3,6 variieren, da bei den entworfenen Leiterplatten des Akrobat-Projekts natürlich nicht genau eines dieser zwei Modell-Szenarien vorliegt. Jedoch kann die Aussage gemacht werden, dass der Faktor bezüglich der Projekteileiterplatten dazwischen liegen muss und vermutlich mehr in Richtung dem Wert von 1,6 geht. Denn beim Entwurf wurden gerade zur besseren Wärmeableitung möglichst viele Kupferflächen eingebracht. Auf die Herleitung der Regel zur Skalierung wird hier nicht im Detail eingegangen, aber sie kann in dem von J.Adam verfassten Artikel [2] oder [1] nachgelesen werden.

Formal lautet die Skalier-Regel:

$$\Delta T = B_{LP} \cdot b^{-1,43} \cdot \frac{35 \mu\text{m}}{h} \cdot I^2 \quad (4.9)$$

, wobei  $h$  hier in [ $\mu\text{m}$ ] anzugeben ist.

Nach  $I$  umgeformt ergibt sich:

$$I = \sqrt{\Delta T \cdot \frac{h}{35 \mu\text{m} B_{LP}} \cdot b^{-1,43}} \quad (4.10)$$

## 4.7. Kontrollrechnung der zulässigen Stromstärke auf Basis der Korrelationsformel

Mit der, aus Näherung 4.7 und 4.8 ermittelten Bahnbreiten, wird hier für die beiden Szenarien nochmal auf Basis der Formel 4.10 gegengerechnet.

Der zulässige Strom nach Formel XX und einer Leiterbahnbreite, aus dritter Näherung 4.8 von 4,5mm beträgt:

- Szenario 1:  $B_{LP} = 3,6$  und  $b = 4,5$  ergibt einen zul. Strom  $I_{S1} = 9,8 \text{ A}$
- Szenario 2:  $B_{LP} = 1,6$  und  $b = 4,5$  ergibt einen zul. Strom  $I_{S2} = 14,7 \text{ A}$

Für eine Leiterbahnbreite von 4,0mm (zweite Näherung 4.7) entsprechend

- Szenario 1:  $B_{LP} = 3,6$  und  $b = 4,0$  ergibt einen zul. Strom  $I_{S1} = 9,0 \text{ A}$
- Szenario 2:  $B_{LP} = 1,6$  und  $b = 4,0$  ergibt einen zul. Strom  $I_{S2} = 13,5 \text{ A}$

Und für eine Leiterbahnbreite von 2,3mm (erste Näherung 4.6, nur bei  $35 \mu\text{m}$  Kupferdicke anwendbar)

- Szenario 1:  $B_{LP} = 3,6$  und  $b = 2,3$  ergibt einen zul. Strom  $I_{S1} = 6,6 \text{ A}$
- Szenario 2:  $B_{LP} = 1,6$  und  $b = 2,3$  ergibt einen zul. Strom  $I_{S2} = 4,4 \text{ A}$

Die Breite aus Näherung Eins wäre tatsächlich nicht für die vorgegebene Stromstärke nicht ausreichend. Allerdings stimmt die Bahnbreite von 2,3mm grundsätzlich nicht. Sie hätte nur bei der Kupferstärke von  $35 \mu\text{m}$  einem sinnvollen Wert entsprochen. Die beiden anderen Näherungen liefern brauchbare Werte. Auf Basis der ermittelten Werte wurde eine Breite von mindestens 4,0mm eingehalten.

#### 4. Leiterplatte PCB1 - Prototyp

---

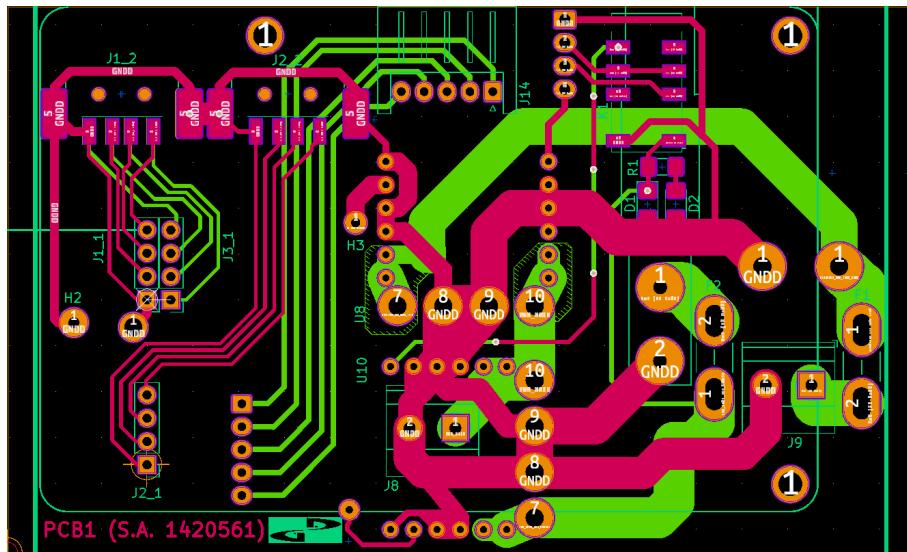


Abbildung 4.6.: Draufsicht des endgültigen Layouts, von PCB1

#### 4.8. Umsetzung auf dem Leiterplatten-Layout von PCB1

Zur Veranschaulichung wird in diesem Abschnitt, die Umsetzung anhand des endgültigen Leiterplatten-Designs von PCB1 gezeigt. Abbildung 4.6 zeigt dieses, wobei sich der Leistungsteil auf der rechten Seite befindet.

# Kapitel 5

## Leiterplatte PCB1

In diesem Kapitel liegt der Focus auf der Energiequellen-Managementfunktion. Die Stromproblematik wurde bereits im vorhergehenden Kapitel ausführlich untersucht. Hier wird das Problem des Spannungseinbruchs behandelt, der beim wechseln von der Quelle mit höherer Spannung auf die mit niedriger entsteht. Ebenso wird die Vorgehensweise zur Lösung des Problems beschrieben und die zugehörige Messung erklärt.

### 5.1. Energiequellen-Management

#### 5.1.1. Spannungszustände

Das EQM ist so konzipiert, dass es die zwei DC-Spannungen, die auftreten können regelt. Die des LiPo-Akkumulators und die, die von außerhalb eingespeist werden kann. Erwähnenswert ist an dieser Stelle, dass die externe Spannung keinen genauen Wert besitzen muss, aber innerhalb des Bereich 12 V ... 18,5 V liegen muss. Intern wird das niedrigere Spannungslevel von 5 V dauerhaft über DC-DC-Wandler geregelt. Die  $V_{BUS}$  Spannung kann innerhalb des genannten Bereiches variieren.

Die vom EQM selektierte Spannung wird in jedem Fall auf die  $V_{BUS}$ -Leitung (PWR\_SYS\_MAIN) geschaltet. Mit der folgenden Zustandstabelle soll die Funktion des EQM nochmal verdeutlicht werden.

Vorweg eine kurz Erläuterung zu den Abkürzungen der Zustände:

„nc“ ist die Abkürzung für „not connected“.

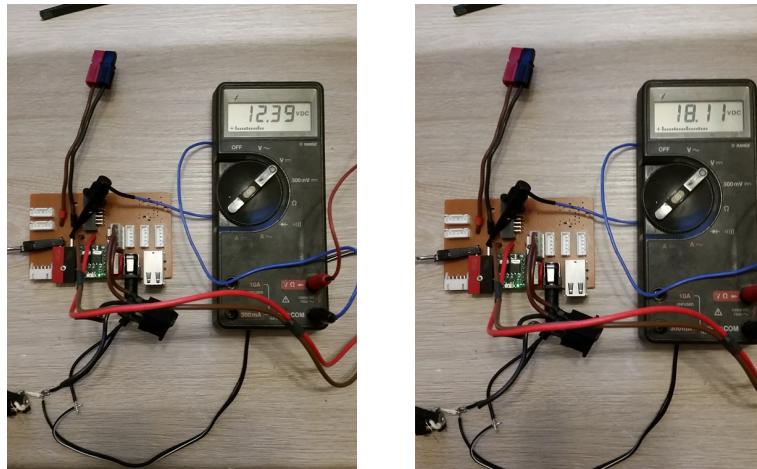
„X“ stellt einen willkürlichen Zustand dar.

## 5. Leiterplatte PCB1

---

**Tabelle 5.1.:** Regelung der Spannungszustände durch das EQM

DC-Spannung		Schalterstellung			Zustand	PWR_SYS_MAIN
BAT_PWR	EXT_PWR	S1	S2			
14,7 V	nc	AUS	X	AUS	0 V	
14,7 V	nc	X	AUS	AUS	0 V	
14,7 V	nc	X	AUS	AUS	0 V	
14,7 V	nc	EIN	EIN	EIN	14,7 V	
14,7 V	18,5 V	AUS	X	AUS	0 V	
14,7 V	18,5 V	EIN	X	AUS	18,5 V	
nc	18,5 V	AUS	X	AUS	0 V	
nc	18,5 V	EIN	X	EIN	18,5 V	



**Abbildung 5.1.:** Funktionskontrolle des EQM mit dem Multimeter

„PWR\_SYS\_MAIN“ ist nur eine andere Bezeichnung für die  $V_{BUS}$ -Leitung.

„PWR\_BAT“ ist die Spannung, welche vom Akkumulator kommt.

„PWR\_EXT“ kennzeichnet die extern eingespeiste Spannung.

Die Schalterstellungen<sup>1</sup> sind auf die Zustände „EIN“ und „AUS“ beschränkt und werden hier nicht weiter erläutert.

Folgende Abbildung zeigt einen Ausschnitt der Funktionskontrolle des EQM die mit einem einfachen Multimeter erfolgte. Der Spannungseinbruch ist mit diesem Messgerät nicht ersichtlich.

<sup>1</sup>S1: Hauptschalter zum Ein- oder Ausschalten des Systems, S2: Ist der Freigabestift für den Akkumulator, der jedoch wie Schalter S1 betrachtet werden kann.

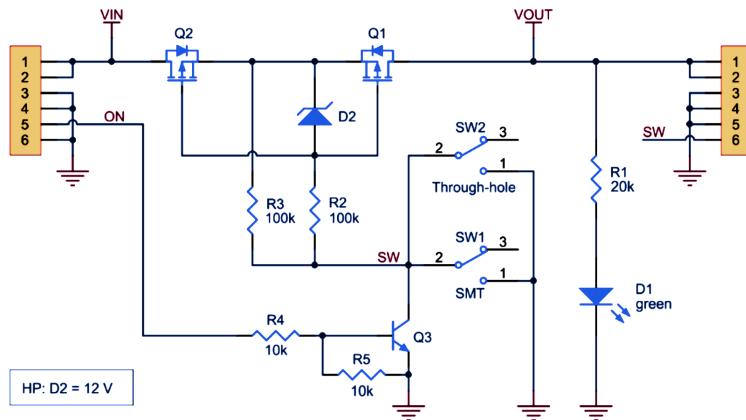


Abbildung 5.2.: Stromlaufplan des MOS-Feldeffekttransistor-Schaltmodul

## 5.2. EQM-Schaltung

Hier wird kurz darauf eingegangen, weshalb die Ströme nicht direkt über die Schaltern S1 und S2 verlaufen und nur die Steuerung der Schaltmodule übernehmen.

### 5.2.1. Problem des hohen Schaltstroms

Das Schaltung des Moduls ist die folgende:

Da beim Akrobat-Roboter unter Umständen sehr hohe Ströme auftreten können, sind mechanische Schaltelemente wie bspw. Wippenschalter an dieser Stelle ungeeignet. Ihre Schaltkontakte können, bei hohen Schalt-Strömen Lichtbögen erzeugen oder sogar aufeinander „kleben“ bleiben. Aus diesem Grund wurden für den Leistungs-Schaltkreis (EQM) Halbleiter-Schaltelemente, anstatt mechanischer Schalter verbaut. Genauer handelt es sich um MOS-Feldeffekttransistor-Schaltmodule. Solche eignen sich besser, da sie starke Ströme ohne mech. Verschleiß und Lichtbögen schalten können. Deren Ansteuerung kann wiederum durch mechanische Schalter oder Steuerrelais erfolgen, da dann nur noch ein geringer Steuerstrom fließt. Durch recherchieren wurden ein geeignetes Modul<sup>2</sup> [9] mit entsprechend hoher Schaltleistung<sup>3</sup> gefunden.

Ein maximaler Strom von 10 A war vorgegeben, entsprechend wurde das Modell mit 16 A Schaltstrom gewählt. Der durchschnittliche Gesamtstrom, im Normalbetrieb liegt, nach Schätzung deutlich unterhalb des Stroms von 10 A [5].

<sup>2</sup>Diese werden oft auch als Break-out-Boards bezeichnet.

<sup>3</sup>Modul: MOSFET-switch, Schaltstrom: 16 A, Hersteller: Pololu

### 5.2.2. Ansteuerung der MOSFET-Schaltmodule

Die Steuerung der MOSFET-Schalter übernimmt das Signal-Reed-Relais K1, so wie die automatische Wechselsektion auf externe Versorgung. Die Leitung mit der Bezeichnung  $V_{BUS}$  wird durch das EQM geregelt und lässt nur eine der beiden Quellen-Spannungen zu. In der Schaltung übernimmt dies das Relais K1. Dieses hängt direkt am Eingang der externen Versorgung und schaltet in genau dem Moment wo diese angeschlossen wird. Das für den LiPo-Akku. zuständige Schaltmodul wird dann deaktiviert und das der externen Versorgung aktiviert.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass dieses Umschalten nicht ganz unproblematisch ist. Es kann in dem Moment zu einem Spannungseinbruch auf der  $V_{BUS}$ -Leitung kommen. Diese Problematik wird im Abschnitt „Quellenwechsel bei Systembetrieb“ genauer behandelt.

### 5.2.3. Interne Versorgung : LiPo-Akkumulatoren

Akkupakete besitzen neben ihren Hauptpolen noch einen sog. Balancer-Anschluss, dieser hat die Funktion beim Laden und Entladen die einzelnen Zellen auszugleichen bzw. die Spannung gleichermaßen auf diesen zu verteilen. Die Hauptpole selbst sind mit Kabeln und Schraubklemmen parallel geschaltet. Ebenso die fünf Balancer-Leitungen der beiden Akkumulatoren, denn beim parallelen Betrieb, sollten sich auch die parallel liegenden Zellen ausgleichen. Über XH-Steckverbindungen<sup>4</sup> werden die Balancer-Leitungen parallel geschaltet. Im Ausnahmefall kann auch mit einem einzelnen Akku betrieben werden. Auf Grund des hohen Gewichts der Akkus verschiebt sich dann allerdings der Massenschwerpunkt aus der Mitte des Roboters, was nicht unbedingt erwünscht ist. Nur die zusammengeführten Hauptpole beider Akkumulatoren werden über den Shunt-Widerstand, der Strommessseinheit (INA219 auf PCB2A) geführt. Der Shunt besitzt einen Widerstandswert von  $4\text{ m}\Omega$ . Der Strom der LiPo-Akkumulatoren erzeugt eine Spannungsabfall am Shunt-Widerstand. Diese Spannung wird vom INA219-IC in einen Stromwert umgerechnet. Konfiguriert und Ausgelesen wird das IC über den I<sup>2</sup>C-BUS. Da der Raspberry-Pi die ermittelten Werte weiterverarbeitet, ist der INA219-Baustein mit den I<sup>2</sup>C-BUS-Pins des GPIO-Ports am RPi verbunden. Zur besseren Übersicht wur-

---

<sup>4</sup>Ist die Bezeichnung des Herstellers JST für diese Art Steckkontakte

den für Eingang und Ausgang des Teils der Leiterplatte, der für die Strommessung zuständig ist blaue Schraubklemmkörper verwendet.

Empfehlenswert ist es nur dann den Stift S2 einzustecken, wenn der Akrobat autark betrieben werden soll. Soll der Akku geladen werden, so wird der Stift davor einfach gezogen.

### 5.2.4. Zugeführte Versorgung : externe Quelle

Sobald eine externe Spannungsquelle am vorgesehenen Eingang angelegt wird, wird dies durch eine rote LED signalisiert. Bereits das alleinige kontaktieren einer externen Quelle veranlasst das Relais K1, auf die externe Versorgung umzuschalten. Dafür muss der Schalter S1 nicht zwingend auf ON stehen. Die optische Signalisierung durch eine rote LED findet auch dann statt, wenn sich der Hauptschalter in OFF-Stellung befindet. Der Grund dafür ist, dass auch vor einem Einschalten klar erkenntlich sein soll, dass nach Einschalten mittels S1 direkt von extern versorgt wird.

## 5.3. Quellenwechsel während des Betriebs

An dieser Stelle wird das Problem des Spannungseinbruchs beschrieben. Dieser tritt immer dann auf, wenn von der Versorgung mit höherem Spannungslevel, auf die mit geringerem gewechselt wird.

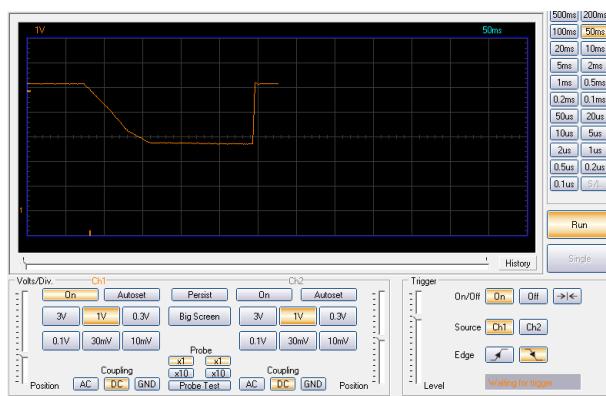
### 5.3.1. Problem des Spannungseinbruchs beim Umschalten

Es war in der Aufgabenstellung verlangt gewesen eine Quellenumschaltung zu entwickeln, die auch im aktiven Systembetrieb, unterbrechungsfrei zwischen beiden Quellen wechselt. Das System alternativ auch extern versorgen zu können, war ebenso in der Aufgabenstellung gefordert. Anhand des Probeaufbaus, des EQM, stellte sich heraus, dass ein Umschalten vom niedrigeren Spannung (Akkuspannung) auf die höhere (externe) möglich war, jedoch nicht in umgekehrter Weise. Diese Bilder zeigen den Spannungseinbruch im Verlauf der Versorgungsspannung. Gemessen wurde am Ausgang des DC-DC Wandlers, der für den RPi zuständig ist.

## 5. Leiterplatte PCB1



**Abbildung 5.3.:** Spannungseinbruch mit  $2200 \mu\text{F}$  Pufferkondensator



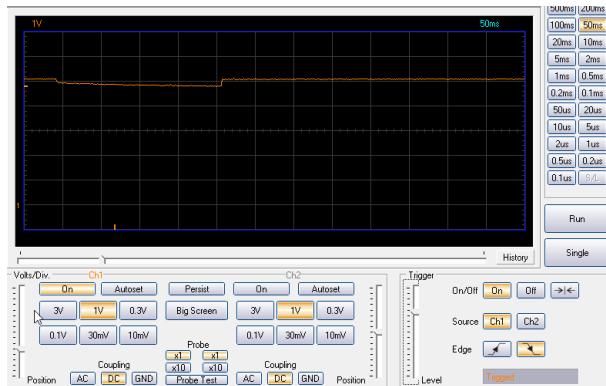
**Abbildung 5.4.:** Spannungseinbruch mit  $4400 \mu\text{F}$  Pufferkondensator

Der Einbruch mit den Kapazitäten  $2200 \mu\text{F}$  (Abbildung 5.3) und mit  $4400 \mu\text{F}$  (Abbildung 5.4) sind nicht ausreichend genug, um den Einbruch in der Art zu minimieren, dass die Funktion des RPi aufrecht erhalten wird. Gelöst ist das Problem erst, mit Verwendung erheblich größerer Kapazitäten<sup>5</sup> Der Spannungsverlauf inklusive Einbruch, unter Verwendung des  $0,47 \text{ F}$ -Kondensators ist in Abbildung 5.5 ersichtlich.

Der Ladestrom nach dem Einschalten, ist nur durch den Traco-DC-DC Wandler begrenzt. Der geladene Kondensator entlädt sich, nach ausschalten des Systems, über den RPi bzw. über dessen Betriebsanzeige-LED (rot).

Um die Ethernet-Verbindung und somit auch die ROS-Kommunikation während des Umschaltens aufrecht zu erhalten, ist natürlich auch der Ethernet-Switch durch den Kondensator Cx mitzuvorsorgen. Um die Funktion des RPi zu überprüfen, wurde vor dem Umschalten eine Ping-Signal, ausgehend vom RPi, zum lokalen Netzwer-

<sup>5</sup>0,47 F Puffer-Kondensator am 5V-Ausgang beider DC-DC Wandler.



**Abbildung 5.5.:** Spannungseinbruch mit 470 mF Pufferkondensator



**Abbildung 5.6.:** Ladekurve der Spannung am 470 mF Pufferkondensator

krouter gestartet. Das Ping-Signal wurde während des Umschaltvorgangs weiterbetrieben, um den RPi und den Ethernet-Switch auf Erhalt ihrer Funktion zu prüfen.

Das fortlaufende Ping-Signal, das während des Quellenwechsels aktiv ist, wird in Abbildung 5.7 gezeigt.

## 5. Leiterplatte PCB1

```

64 bytes from 192.168.178.1: icmp_seq=264 ttl=64 time=2.80 ms
64 bytes from 192.168.178.1: icmp_seq=265 ttl=64 time=2.91 ms
64 bytes from 192.168.178.1: icmp_seq=266 ttl=64 time=3.01 ms
64 bytes from 192.168.178.1: icmp_seq=267 ttl=64 time=3.04 ms
64 bytes from 192.168.178.1: icmp_seq=268 ttl=64 time=2.98 ms
64 bytes from 192.168.178.1: icmp_seq=269 ttl=64 time=2.97 ms
64 bytes from 192.168.178.1: icmp_seq=270 ttl=64 time=3.06 ms
64 bytes from 192.168.178.1: icmp_seq=271 ttl=64 time=3.34 ms
64 bytes from 192.168.178.1: icmp_seq=272 ttl=64 time=3.47 ms
64 bytes from 192.168.178.1: icmp_seq=273 ttl=64 time=3.00 ms
64 bytes from 192.168.178.1: icmp_seq=274 ttl=64 time=2.92 ms
64 bytes from 192.168.178.1: icmp_seq=275 ttl=64 time=2.89 ms
64 bytes from 192.168.178.1: icmp_seq=276 ttl=64 time=2.81 ms
64 bytes from 192.168.178.1: icmp_seq=277 ttl=64 time=3.26 ms
64 bytes from 192.168.178.1: icmp_seq=278 ttl=64 time=2.91 ms
64 bytes from 192.168.178.1: icmp_seq=279 ttl=64 time=3.92 ms
64 bytes from 192.168.178.1: icmp_seq=280 ttl=64 time=2.93 ms
64 bytes from 192.168.178.1: icmp_seq=281 ttl=64 time=2.88 ms
64 bytes from 192.168.178.1: icmp_seq=282 ttl=64 time=2.83 ms
^C
--- 192.168.178.1 ping statistics ---
282 packets transmitted, 282 received, 0% packet loss, time 281364ms
rtt min/avg/max/mdev = 2.806/3.255/13.529/0.956 ms
ubuntu@masterboard:~$ █

```

Abbildung 5.7.: Ping-Testsignal während der Quellenumschaltung

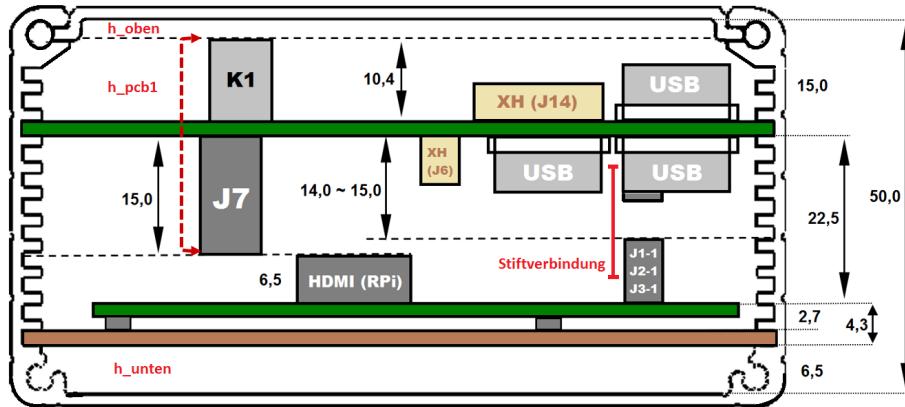


Abbildung 5.8.: Schematische Darstellung von RPi und PCB1 im eingebautem Zustand

### 5.3.2. Höhe von PCB1

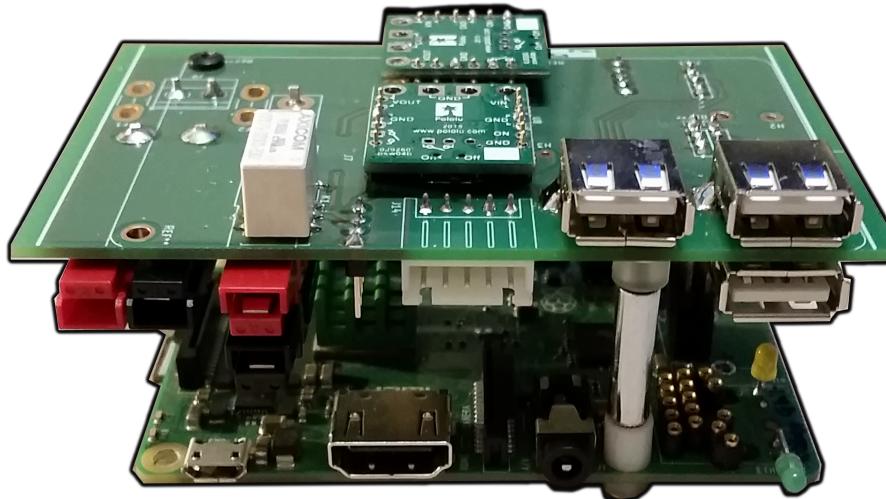
Anhand der bestückten Bauteile, auf Ober- und Unterseite, welche das größte Höhenmaß besitzen, wurde im Vorfeld die Gesamthöhe von Leiterplatte PCB1 ermittelt.

Das höchste Bauteil der Oberseite ist ein Reed-Relais mit einer Höhe  $h_{K1}$  von 10,4 mm. Die Höhe der Leiterplatte beträgt 1,6 mm. Das größte Höhenmaß der Unterseite nimmt Stecker J7, mit einer Höhe von 15 mm ein.

Die Ermittlung der Gesamthöhe von PCB1 ist mit dem Zusammenhang

$$h_{PCB1} = h_{TOPmax} + h_{LP} + h_{BOTmax} \quad (5.1)$$

gegeben. Die Höhe von PCB1 wurde mit 27 mm errechnet. Der Einbau erfolgte mit der Anordnung aus Abbildung 5.8.



**Abbildung 5.9.:** Raspberry Pi mit aufgesteckter Leiterplatte PCB1

Die Summe aller Höhenmaße im Innenraum ist durch folgenden Ausdruck beschrieben:

$$h_{\max} = h_{\text{PCB1}} + h_{\text{RPi}} + h_{\text{Distanzbuchse}} + h_{\text{Trägerplatte}} + h_{\text{unten}} + h_{\text{oben}} \quad (5.2)$$

Einsetzen aller Höhenwerte führt zur Gesamthöhe die im inneren des Aluminiumprofils verfügbar ist.

$$27 \text{ mm} + 6,5 \text{ mm} + 1,6 \text{ mm} + 1,1 \text{ mm} + 1,6 \text{ mm} + 6,5 \text{ mm} + 5,7 \text{ mm} = 50 \text{ mm} \quad (5.3)$$

## 5.4. Endlösung von PCB1

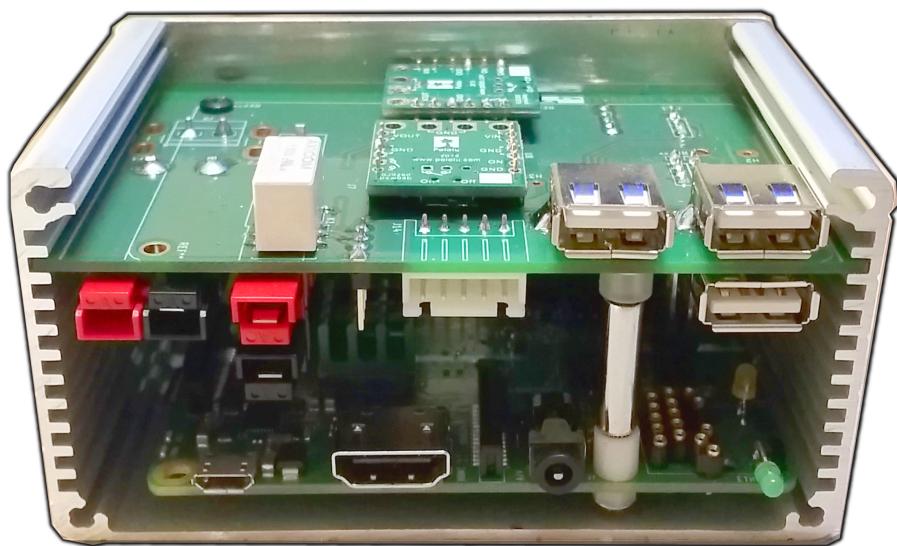
In diesem Abschnitt ist fertige Leiterplatte aufgezeigt, wie sie vom Hersteller geliefert wurde. Abbildung 5.9 zeigt die extern hergestellte Leiterplatte, wie sie bereits auf dem Raspberry-Pi montiert ist.

### 5.4.1. Fixierung des Raspberry-Pi

Durch die Änderung der Kabelverbindung in eine Stifteleistenverbindung, war eine Fixierung durch zwei Abstandsbolzen, die angemessenere Variante, um den Raspberry-Pi an der richtigen Position, wie in Abbildung 5.10 zu fixieren.

## 5. Leiterplatte PCB1

---



**Abbildung 5.10.:** Raspberry-Pi und PCB1, eingebaut im hintersten Gehäusesegment

# Kapitel 6

## Leiterplatten PCB2A, PCB2B

### 6.1. PCB2A

#### 6.1.1. Funktionen der Leiterplatte PCB2B

Auf dieser Leiterplatte verläuft ein Teil der 4-adrigen BUS-Verbindung als gedruckte Schaltung übertragen. Die BUS-Verbindung ist für vier Bein mit je drei Motoren ausgelegt. Diese werden über die üblichen Dynamixel Steckverbindungen<sup>1</sup> Bein-Weise kontaktiert. Zu jeder Motorgruppe eines Beins ist auf der Leiterplatte eine zugehörige SMD-Schmelzsicherung (3,5 A) zu finden. Ebenso wurden die 5 V-Komponenten, entsprechend ihres Stromverbrauchs abgesichert. Die Abbildung 6.1 zeigt die Endlösung der A-Leiterplatte. Des Weiteren ist einer von beiden DC-DC-Wandlern auf der A und auf der B Einheit aufgebracht. Diese befinden sich auf der Unterseite der Leiterplatten. Der Grund dafür ist die bessere Wärmeabführung

---

<sup>1</sup>Es handelt sich bei den Steckverbindern um die Molex-Serie des Herstellers JST



Abbildung 6.1.: Endlösung von PCB2A

## 6. Leiterplatten PCB2A, PCB2B

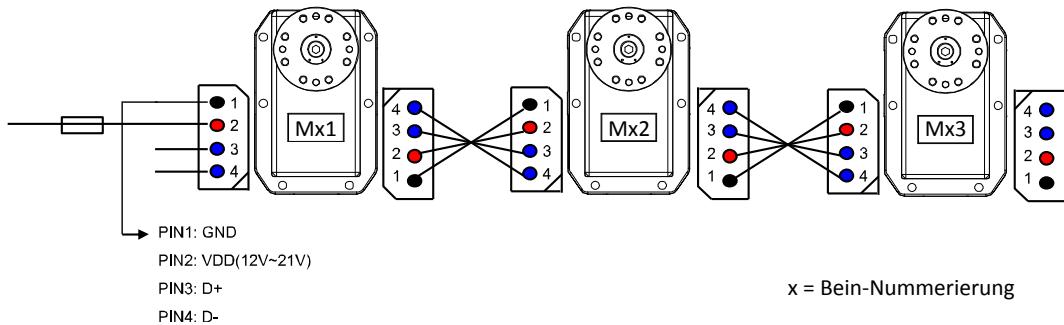


Abbildung 6.2.: 4-adrige BUS-Verbindung eines Beins

durch den direkten Kontakt mit dem Aluminiumprofilgehäuse. Die Leiterplatten wurden hierfür natürlich erhöht montiert.

### 6.1.2. Montage

Die umliegenden Montagepunkte liegen auf Abstandspfeilern mit gleicher Höhe. Der Wandler wir minimaler Kraft gegen den Boden gedrückt um Kontakt mit diesem sicherzustellen. Dies wurde bei beiden Leiterplatten gleichermaßen gehandhabt.

### 6.1.3. Pufferkondensatoren C\_A1 und C\_B1

Der Kondensatoren kompensieren den Spannungseinbruch, welcher beim Wechsel der Versorgungsquelle auftritt. Er wurde hinter dem DC-DC-Wandler, an dessen Ausgang platziert. Die Messungen und die Ermittlung des Kapazitätswertes, sind Inhalt des vorherigen Kapitels??.

### 6.1.4. 4-adrige BUS-Verbindung zu den Motoren

Da auch die 4-adrige Bus-Verbindung der Servomotoren über die Platinen PCB2A und PCB2B verläuft, wird an dieser Stelle kurz auf deren elektrische Verbindung eingegangen. Eine schematische Darstellung ist in Bild 6.2 zu sehen. Jeder Motor ist über eine ID ansprechbar und kann sich an beliebiger Stelle in der BUS-Leitung befinden. Die RX-64 Motoren kommunizieren über eine RS485-EIA485-Schnittstelle, welche auch oft in der Industrie angewandt wird. Mit dieser seriell-asynchronen



**Abbildung 6.3.:** Endlösung von PCB2B

Schnittstelle lassen sich insgesamt bis zu 254 Teilnehmer über eine zugeteilte ID adressieren. Die Steuerung der Beine, sowie der implementierten Gangmuster ist Bestandteil des Akrobat-ROS-Pakets das in der Arbeit [3] erstellt worden ist.

#### 6.1.5. Funktionen der Leiterplatte PCB2B

Die Leiterplatte PCB2B ist in Bild 6.3 ersichtlich und erfüllt folgende Funktionen:

- RS485-Kommunikationsverbindung zwischen RPi und Motoren
- Versorgung der Motoren mit der BUS-Spannung (14,7 V ... 18,5 V)
- Messen des Lipo-Stromverbrauch mittels INA-Baustein
- Wandlung der BUS-Spannung von  $V_{BUS} = 14,7 \text{ V} \dots 18,5 \text{ V}$  in 5 V
- Anschlüsse für Motoren, PCB2B, PCB1, I<sup>2</sup>C-BUS-Sensoren
- Sicherungen für Motoren, RPi und Ethernet-Switch
- Pufferkondensator gegen 5 V-Spannungseinbruch (beim Quellenwechsel)

## 6.2. Das IC INA219 am I<sup>2</sup>C-BUS

Inhalt des folgenden Kapitels, ist der INA219-Baustein und der Bus, über den er angesteuert wird. Dieser wird als I<sup>2</sup>C-Bus bezeichnet und wird bei Sensoren oft verwendet. Mit dieser Arbeit wird der Roboter mit diesem Power-Monitoring-IC ausgestattet. Die Schaltung die zum Messen des Akkumulatorstroms verwendet wer-

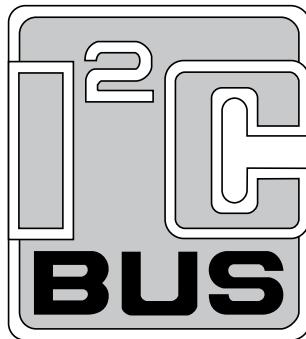


Abbildung 6.4.: Logo des I<sup>2</sup>C-BUS

den kann, wurde nur auf der A-Einheit angelegt. Das Kernstück dieser Schaltung ist INA219-Baustein. Weitere Bauteile in dessen Umfeld, zählen überwiegend zu einer Filterschaltung, die im Datenblatt [13] zu finden ist.

Integriert worden ist:

- INA219 Baustein zur Strom- und Leistungsüberwachung

Das Power und Leistungs-Monitor-IC, führt die Messung mit Hilfe eines Shunt-Widerstandes und der dort abfallenden Spannung durch. Es wird kann bei richtiger Konfiguration der fließende Strom und die  $V_{BUS}$ -Spannung errechnet werden und aus diesen Werten wiederum der aktuelle Leistungsverbrauch. Der Baustein kann für unterschiedliche Genauigkeiten und BUS-Spannungsbereiche konfiguriert werden [10].

### 6.2.1. Steuerung des INA219 über die I<sup>2</sup>C-BUS-Kommunikation

Der I<sup>2</sup>C-Bus ist ein weit verbreiteter Standard im Bereich von Sensorik. Er benötigt vier Adern von den zwei Datenleitungen sind (SCL = Serial Clock und SDA = Serial Data). Beide Datenleitungen sind über Pull-up-Widerstände<sup>2</sup> mit der Versorgungsleitung verbunden. Die angeschlossenen Slaves haben einen Open-Collector-Ausgang, der zusammen mit den Pull-up-Widerständen eine UND-Schaltung bildet. Beim I<sup>2</sup>C-BUS beträgt die Betriebsspannung  $V_{DD}$  normalerweise immer 3,3 V. Es gibt aber auch Bauteile die bis zu 5,5 V akzeptieren, wie beispielsweise der INA-219. Wobei der HIGH-Pegel mindesten 0,7  $V_{DD}$  betragen sollte und der LOW-Pegel höchstens 0,3  $V_{DD}$ .

<sup>2</sup>Jeder Widerstand hat einen Wert von 3,3 kΩ

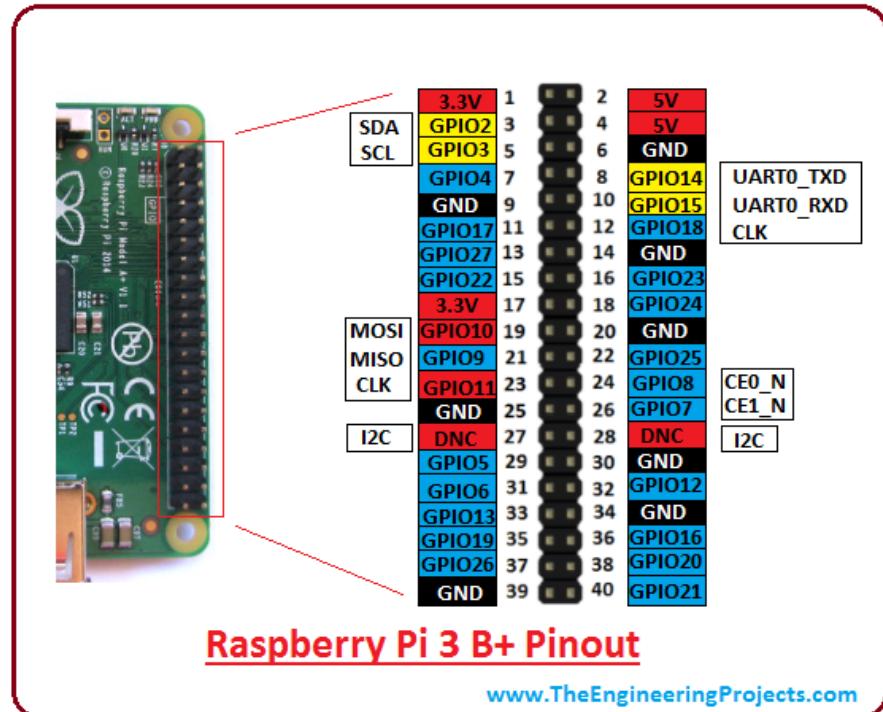


Abbildung 6.5.: GPIO Port [6]

Es handelt sich bei dieser Art der Übertragung, um eine seriell-asynchrone Übertragung. Die BUS-Teilnehmer sind über ihre Adresse ansprechbar. Es können bis zu 128 Teilnehmer<sup>3</sup> an einem I<sup>2</sup>C-Bus Master angeschlossen werden.

### I<sup>2</sup>C am GPIO-Port des RPi

Zwei PINs<sup>4</sup> des Raspberry Pi sind für das Datenleiterpaar des I<sup>2</sup>C-Bus vorgesehen und mit SCL und SDA gekennzeichnet. Die DC-Versorgungsspannung von 3,3 V kann ebenfalls am GPIO-Port entnommen werden.

### 6.3. I<sup>2</sup>C-BUS des Raspberry-Pi

Falls nicht schon geschehen, muss zuerst die I<sup>2</sup>C-Kommunikation auf dem Raspberry Pi aktiviert werden, dies ist z.B. mit dem Tool raspi-config möglich. Dieses startet mit dem Befehl

<sup>3</sup>16 von 128 Adressen sind für Sonderfälle reserviert

<sup>4</sup>GPIO-Pin 3 und 5 für die Daten und Pin 1 für 3,3 V-Spannung

## 6. Leiterplatten PCB2A, PCB2B

---

pin		Adresse	
A1	A0	Bin	Hex
GND	GND	1000000	40
GND	VS+	1000001	41
GND	SDA	1000010	42
GND	SCL	1000011	43

**Tabelle 6.1.:** Auszug der Adressierungs-Tabelle, des INA219

```
sudo raspi-config
```

Ein wichtiger Befehl zur Überprüfung, ob überhaupt ein Gerät erkannt wird ist folgender:

```
i2cdetect -y 1
```

Beim Raspberry-Pi B Rev1 lautet der Befehl gleich, jedoch mit einer 0 statt 1 am Ende.

### 6.3.1. Dauerhafte I<sup>2</sup>C-Adressierung

Die Adressierung der einzelnen Slaves erfolgt mit ihrer zugeteilten ID, ähnlich wie bei den Servo-Motoren. Beim INA219 geschieht dies über die PINs A0 und A1. Dem INA219 ist dauerhaft<sup>5</sup> die Adresse 0x40 (hexadezimal) zugewiesen. Tabelle 6.1 zeigt beispielhaft einige Adressen mehr.

### 6.3.2. Python-Bibliothek zum INA219

Die offizielle pip-Bibliothek zum IC ist unter folgendem Git-link finden:

```
sudo pip3 install pi-ina219
```

Eine alternative Bibliothek gibt es unter:

```
sudo pip3 install git+git://github.com/chrisb2/pi_ina219.git
```

Die Bibliothek des IC selbst wurde in dem Verzeichnis

```
file: /home/ubuntu/ina219.py
```

<sup>5</sup>Hierfür mussten die PINs A0 und A1 mit GND verbunden werden.

abgelegt. Diese Datei ist die Python-Bibliothek zum INA-Baustein, in der viele Funktionen bereits definiert sind.

### ***Durchführung eines pip-Upgrades***

Anschließend kann es notwendig sein, ein pip3-Upgrade<sup>6</sup> durchzuführen. Dieses wird über das Kommando:

```
sudo pip3 install --upgrade
```

gestartet.

### **6.3.3. Python-Programm zum IC**

Der verwendete Programmcode liegt in der Programmier-Sprache Python vor und stammt von dem Projekt Rototron [11]. Er ist nur für die Konfiguration und zum Auslesen zuständig. Auf dem Raspberry-Pi ist das Programm im folgende Verzeichnis zu finden:

```
file: /home/ubuntu/ina219_currentMeas.py
```

ist für den Messvorgang zuständig.

### ***Probe der Messung***

Die Überprüfung auf die grundsätzliche Funktion des IC's erfolgt durch weiterleiten des Rückgabewertes, der ina219\_currentMeas.py-Datei. Die gemessenen Werte werden der .txt-Datei, in den vorgegebenen Intervallen angehängt. Der Code besteht nur aus folgender Zeile:

```
file: /etc/i2cDevice/ina219.sh
```

umgesetzt.

Der Inhalt dieser Datei ist simpel und wie folgt:

Der Programmaufruf zur Messung in Intervallen erfolgt somit nach jedem Ablauf der Dauer  $T_{INA}$ . Die .txt Log-Datei mit Messwerten befindet sich auf dem Desktop.

---

<sup>6</sup>Hier wurde mit der neuen pip3 Version gearbeitet, daher auch im Befehl pip3

## 6. Leiterplatten PCB2A, PCB2B

---

```
\#!/bin/sh
sudo python /home/ubuntu/ina219_currentMeas.py
    >> /home/ubuntu/Desktop/currentLOG.txt
```

**Listing 1:** ina219 current measurement python code

file: /home/ubuntu/Desktop/currentLOG.txt

Die Häufigkeit des Auslesung wird mit dem Wert des Sleep-Befehls in der ina219\_currentMeas.py Datei verändert.

### 6.3.4. Eintragung als System-Service

Um ein Skript automatisch nach dem Start des Betriebssystems auszuführen, wird es seit Ubuntu 16.04 (Xenial), als Service<sup>7</sup> deklariert. Diese befinden sich als .service-Dateien in dem Verzeichnis:

/etc/systemd/system/

#### **Der I<sup>2</sup>C-INA Service**

Für den INA des Akrobat-Roboters wurde eine Service-Datei unter folgendem Namen und Pfad erstellt:

file: /etc/systemd/system/i2c-ina219.service

Der Inhalt<sup>8</sup> ist auf das nötigste beschränkt und lautet wie folgt:

### 6.3.5. Skripte ausführbar machen

Das Shell-Skript muss genau, wie das Python-Skript anschließend noch ausführbar gemacht werden.

Für das Python-Skript erfolgt dies mit dem ausführen des Befehls:

```
sudo chmod u+x /home/ubuntu/ina219_currentMeas.py
```

Beim Shell-Skript mit diesem:

---

<sup>7</sup><https://askubuntu.com/questions/919054/how-do-i-run-a-single-command-at-startup-using-systemd>

<sup>8</sup>Befehle und Ereignisse sind weitere Ereignisse, von denen Programm-Starts abhängig sein können.

```
[Unit]
# Hier kann eine Beschreibung hinterlegt werden
Description=i2c autostart service for ina219 log

[Service]
#User=ubuntu #=Option zur Ausführung nur für bestimmte user
#measurement-values will be appended to file: ~/Desktop/*.txt
ExecStart=/bin/sh -c ". /etc/i2cDevice/ina219.sh;" 

[Install]
WantedBy=multi-user.target
```

**Listing 2:** Dateiinhalt von ina-219.service

```
sudo chmod u+x /etc/i2cDevice/ina219.sh
```

### 6.3.6. Steuerung von Services

Durch die Festlegung innerhalb der .service-Datei, lässt sich dieser über die systemctl-Kommandos steuern.

```
sudo systemctl start ina-219
```

```
sudo systemctl stop ina-219
```

```
sudo systemctl enable ina-219
```

Änderungen an Services werden, ohne Neustart, erst wirksam durch die Ausführung von:

```
sudo systemctl daemon-reload
```



# Kapitel 7

## Leiterplatten-Herstellung

Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit der Leiterplatten-Software und dem Parameter die zur Herstellung benötigt werden. Dabei wurde sich möglichst an den Standard-Vorgaben, des gewählten Herstellers „Multi-Circuit-Boards“ orientiert.

### 7.1. Parameter und CAD-Software

Das Layout-Design wurde mit der kostenlosen Software „KiCad“ erstellt. Im Rahmen dessen, wurden auch die benötigten Symbole, Footprints und Schaltpläne mit der gleichen Software angefertigt. Das Programm ist Open-Source-Software und kostet nichts, sofern damit keine kommerziellen Interessen beabsichtigt sind. Neben dem Schaltplan- und Layout-Editor gibt es auch einen Gerber-Viewer, mit dem sich die zur Herstellung benötigten Gerber-Files prüfen lassen.

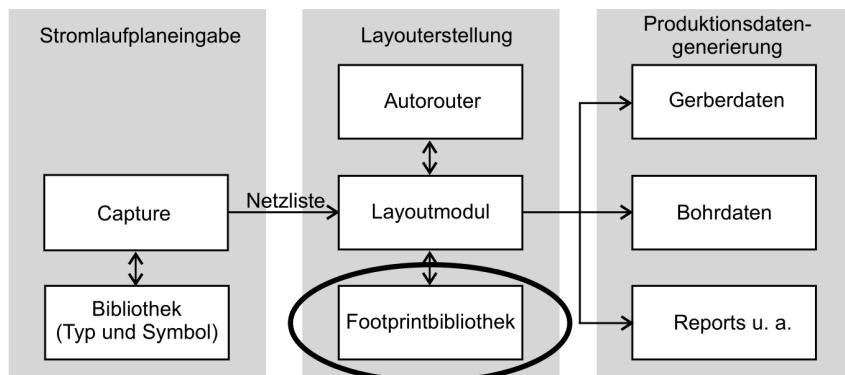
Die offizielle Onlinepräsenz der CAD-Software ist unter <http://kicad-pcb.org/> zu finden.

#### 7.1.1. Footprints der Bauteile und Module

Für das Layout wurden, zwecks der Bestückung von Bauteilen sowie Modulen passende Footprints<sup>1</sup> erstellt, worüber auch die Module über Stiftleisten, mit der Leiterplatte (PCB1) verbunden sind. Die Grafik 7.1 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen Footprint-Library und Produktionsdaten.

---

<sup>1</sup>Als Footprints werden die bauteilspezifischen Lötpadformen von SMD-Bauteilen genannt, auf welchen sie angelötet werden. Gelochte Footprints sind für THT-Bauteile (through-hole technology) gedacht.



**Abbildung 7.1.:** Funktionsweise zur Erzeugung der Gerber-Daten

Lage	KiCad Lagen-Name	Standard Protel-Endung
Top Lage	F.Cu	.GTL
Bottom Lage	B.Cu	.GBL
Top Positionsdruck (Overlay)	F.SilkS	.GTO
Top Lötstopp (Solder-stop)	F.Mask	.GTS
Bottom Lötstopp	B.Mask	.GBS
Kontur	Edge.Cuts	.GM1

**Tabelle 7.1.:** Lagen für den Leiterplatten-Herstellungsprozess

### 7.1.2. Hersteller-Design-Regeln

Der Hersteller „Multi-Circuit-Boards“ stellt Standard-Designregeln zur Verfügung, mit deren Einhaltung der Endpreis möglichst gering bleibt. So kosten zum Beispiel beliebig viele Fräsurarbeiten keinen Aufpreis, wenn ihr Durchmesser im Bereich von 0,8 mm bis 2,0 mm liegt. Kleinere Größen sind dennoch möglich, aber diese kosten entsprechenden Preisaufschlag.

### 7.1.3. Benötigte Lagen zur Anfertigung

Standardmäßig verwendet KiCad, die sogenannten Protel-Endungen<sup>2</sup> (Gerber<sup>3</sup>-Export).

Lagen, die dem Hersteller übergeben wurden:

<sup>2</sup> „Protel DXP“ ist die vorhergehende Bezeichnung einer Leiterplatten-CAD-Software die heute als „Altium-Designer“ bekannt ist.

<sup>3</sup>Das Gerberdaten-Format ist das meistgenutzte Format, mit dem Daten von der Design-Software(CAD) zum Leiterplatten-Herstellungsprozess übergeben werden.

### 7.1.4. Kupfer-Balance und Wärmeverteilung

Bei den hergestellten Platinen wurde darauf geachtet, dass die Kupferflächen auf beiden Seiten möglichst gleichmäßig verteilt sind. Diese wurden in möglichst hohem Maße eingebracht. Der Grund dafür ist die bessere Wärmeleitung, die bei hohen Strömen vorteilhaft sein kann. Wenn Teilflächen der Leiterplatte, auf ihren übereinanderliegenden Seiten, einen zu unterschiedlich hohen Kupferanteil besitzen, können beim Herstellungsprozess Verbiegungen entstehen. Solche Probleme zeigen sich oft auch erst beim Lötprozess, sofern dieser industriell (Reflow, etc.) erfolgt, da hierbei durch die unterschiedliche temperaturabhängige Materialdehnung Zugspannungen entstehen. Eine Ausnahme besteht, wenn komplett mit der Hand bestückt wird, wie bei diesem Projekt. Werden zum Beispiel Masse-Flächen benötigt, so sollten diese auf der gegenüberliegenden Lage durch Auffüllen mit Kupfer ausgeglichen werden. Ein weitere gute Lösung für dieses Problem, wird durch „gerasterte Flächen“ erreicht. Doch nicht jede Software verfügt über diese Funktion. Die Wärmeleitung ist bei „gerasterten Flächen“ allerdings weniger gut, als bei „vollem Kupfer“.



# Kapitel 8

## Platzierung der Komponenten

Dieses Kapitel zeigt die Gehäuse-Zuordnung der einzelnen Komponenten, des Systems. Dabei wurden diese, den Segmenten zugeteilt, in denen sie sich befinden. Der Hintergrund hierfür ist, die bessere Übersicht für zukünftige Erweiterungen, zu ermöglichen.

### 8.1. Innere Anordnung

Es wurde beim integrieren der neuen Komponenten dauerhaft darauf geachtet, dass beim späteren Gesamtsystem der Massenschwerpunkt möglichst im Zentrum liegt. Dies hat den Vorteil, dass zukünftige implementierte Algorithmen weniger komplex werden, sofern diese z.B. auf Inclino-Sensoren<sup>1</sup> basieren. Vereinfacht kann der Gravitationsvektor innerhalb von Steuerungsprogrammen an gleicher Position wie der Massenschwerpunkt angenommen werden. Es muss also kein Versatz zwischen Gravitations-Sensor und Massenschwerpunkt, in der Software, berücksichtigt werden.

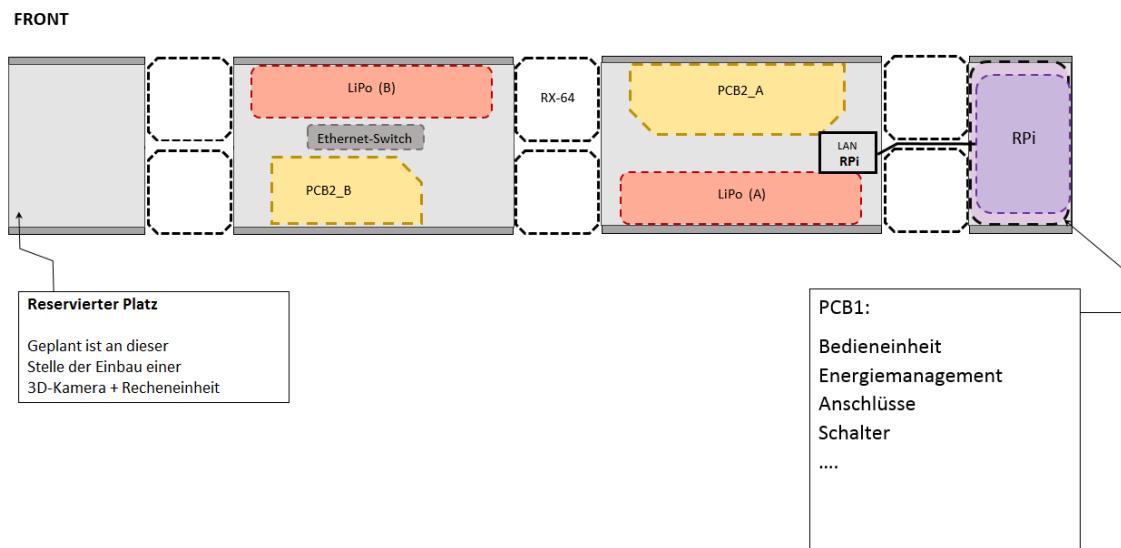
#### 8.1.1. Inhalt der Gehäuse-Segmente

In diesem Kapitel wird näher auf die Inhalte der vier Gehäusesegmente eingegangen. Zwischen den Segmente befinden sich außer den Motoren keine weiteren Komponenten. Die Reihenfolge der Auflistung beginnt bei der Hinterseite und verläuft in Richtung Frontseite.

---

<sup>1</sup>Inclinosensoren ist eine alternative Bezeichnung für Neigungssensoren

## 8. Platzierung der Komponenten



**Abbildung 8.1.:** Positionen der Komponenten

Gehäusesegmente:

- Gehäuseteil/Rahmenteil: Hinten (rear frame)
- Gehäuseteil/Rahmenteil: Hinten-Mitte (middle-rear frame)
- Gehäuseteil/Rahmenteil: Front-Mitte (middle-front frame)
- Gehäuseteil/Rahmenteil: Front (front frame)

### **Gehäuseteil: Hinten(rear frame)**

- Raspberry Pi 3B-plus
- PCB1 5: Bedienpanel, elektr. Energiemanagement, Anschlussmöglichkeiten
- GPIO-Steckleiste mit UART-zu-RS485 Wandler

### **Bedienfeld für Benutzer am hinteren Gehäuseteil (back-panel)**

- Abdeckung mit Anschlüssen
- Schalter S2, Steckstiftbuchse S2, LED-Anzeigen

**Gehäuseteil: Mitte-Hinten (middle-rear frame)**

- LIPO Akkumulator - A
- PCB2A 6
- Adapter zu GPIO-Port des RPi

**Gehäuseteil: Mitte-Front (middle-front frame)**

- LIPO Akkumulator - B
- PCB2B 6
- Ethernet-Switch

**Gehäuseteil: Front (front frame)**

- RESERVIERT für System zur Bildverarbeitung



# **Kapitel 9**

## **Zusammenfassung**

### **9.1. Zusammenfassung**

Der Roboter konnte durch die erfolgreiche Integration der zwei Akkumulatoren endlich autark gemacht werden. Die Anschlüsse für Eingabegeräte sind über das Bedienfeld am hintersten Gehäusesegment gut zugänglich. Über dieses können die auch die Akkumulatoren geladen und aktiviert werden. Ebenso ist ein Hauptschalter zum Ein- und Ausschalten vorhanden. Im vordersten Gehäusesegment wurde bereits Platz reserviert, um den Einbau eines 3D-Bildverarbeitung-System dort zu ermöglichen. Der Raspberry-Pi wurde in das hinterste und kleinere Gehäusesegment verschoben. Er sitzt mit PCB1 gemeinsam in diesem Gehäuseteil. Die geforderte Management-Schaltung, zum Wechseln der Versorgung, konnte ebenso umgesetzt werden und funktioniert auch Störungsfrei während dem Betrieb. Des Weiteren wurde ein Ethernet-Switch mit drei Anschlüssen integriert. Er soll zukünftig den Zugriff von Außen ermöglichen. Die anderen zwei Anschlüsse sind für den Raspberry-Pi und für das zukünftige System zur Bildverarbeitung. Die Innere Verkabelung konnte durch den Transfer auf Leiterplatten so weit beseitigt werden, dass ein Einbau der neuen Komponenten möglich war. Ein Adapter mit den Schnittstellen für SPI, I<sup>2</sup>C und RS485 wurde in die großen Segmente gelegt. An diesem könne weitere Sensoren, Module oder Ähnliches , angeschlossen werden. Die Andere Seite des Adapter führt auf die GPIO-Schnittstelle der Steuereinheit, dem Raspberry-Pi. Somit wurden die Zielvorgaben im weiten Sinne erreicht.



## **Abkürzungsverzeichnis**

x

# **Tabellenverzeichnis**

5.1. Regelung der Spannungszustände durch das EQM . . . . .	26
6.1. Auszug der Adressierungs-Tabelle, des INA219 . . . . .	40
7.1. Lagen für den Leiterplatten-Herstellungsprozess . . . . .	46



# Abbildungsverzeichnis

2.1. Bild des ursprünglichen Systems, hier ohne RPi und ohne DC-DC-Wandler . . . . .	6
4.1. Platine hergestellt über Direkt-Toner-Methode . . . . .	11
4.2. Anschlüsse des Bedienfeldes, bei Prototypen PCB1 . . . . .	12
4.3. Prototyp PCB1 mit Raspberry-Pi im eingebautem Zustand, ohne Blende . . . . .	13
4.4. Wärmeabgabe einer Leitebahn . . . . .	17
4.5. Bestandteile des Wärmestroms [15] . . . . .	19
4.6. Draufsicht des endgültigen Layouts, von PCB1 . . . . .	24
5.1. Funktionskontrolle des EQM mit dem Multimeter . . . . .	26
5.2. Stromlaufplan des MOS-Feldeffekttransistor-Schaltmodul . . . . .	27
5.3. Spannungseinbruch mit 2200 µF Pufferkondensator . . . . .	30
5.4. Spannungseinbruch mit 4400 µF Pufferkondensator . . . . .	30
5.5. Spannungseinbruch mit 470 mF Pufferkondensator . . . . .	31
5.6. Ladekurve der Spannung am 470 mF Pufferkondensator . . . . .	31
5.7. Testsignal: Ping von RPi zu Router . . . . .	32
5.8. Schematische Darstellung von RPi und PCB1 im eingebautem Zustand . . . . .	32
5.9. Raspberry Pi mit aufgesteckter Leiterplatte PCB1 . . . . .	33
5.10. Raspberry-Pi und PCB1, eingebaut im hintersten Gehäusesegment . . . . .	34
6.1. Endlösung von PCB2A . . . . .	35
6.2. 4-adrige BUS-Verbindung eines Beins . . . . .	36
6.3. Endlösung von PCB2B . . . . .	37
6.4. Logo des I <sup>2</sup> C-BUS . . . . .	38
6.5. GPIO Port [6] . . . . .	39
7.1. Funktionsweise zur Erzeugung der Gerber-Daten . . . . .	46
8.1. Positionen der Komponenten . . . . .	50
A.1. Schaltplan PCB1 . . . . .	xvi
A.2. Schaltplan GPIO-Port Raspberry-Pi 3B+ . . . . .	xvii
A.3. Schaltplan PCB2A und PCB2B . . . . .	xviii

## Abbildungsverzeichnis

---

A.4. Layout PCB2B . . . . .	xix
A.5. Layout PCB2A . . . . .	xx

# Literatur

- [1] Dr. Johannes Adam. *Strombelastbarkeit von Leiterbahnen*. Techn. Ber. Haus der Technik, Tagung Elektronikkühlung, 28. Feb. 2007.
- [2] Johannes Adam. *Neues von der Strombelastbarkeit von Leiterbahnen*. Forschungsber. DVS/GMM-Fachtagung Elektronische Baugruppen, 2004.
- [3] Wilen Askerow. „Konstruktion, Aufbau und Inbetriebnahme einer sechsbeinigen Laufmaschine unter Verwendung inverser Kinematik.“ Bachelor Thesis. Hochschule Mannheim, 2014.
- [4] Multi Circuit-Boards. *Strombelastung der Leiterbahnen*. 2019. URL: <https://www.multi-circuit-boards.eu/leiterplatten-design-hilfe/oberflaeche/leiterbahn-strombelastbarkeit.html>.
- [5] Thomas Ihme. „Strombelastung Leiterbahnen“. In: *Strombelastung Leiterbahnen*. 2018.
- [6] LdB. *Raspberry Pi 3b+ GPIO description*. 2016. URL: <http://www.TheEngineeringProjects.com>.
- [7] Moos Müller Kumar. *Autarkisierung des sechsbeinigen Roboters*. Techn. Ber. Hochschule Mannheim, 2018.
- [8] Thomas Pfeifer. *Leiterplattenherstellung mit der Direkt Toner Methode*. 2018. URL: [http://thomaspfeifer.net/platinen\\_aetzen.htm](http://thomaspfeifer.net/platinen_aetzen.htm).
- [9] Pololu. *Mosfet-slide-switch (HP, 16 Ampere Version)*. Hrsg. von Pololu. 2018. URL: <https://www.pololu.com/distributors#Germany>.
- [10] raspberrypi-spy. *Enabling the i2c-interface*. 2018. URL: <https://www.raspberrypi-spy.co.uk/2014/11/enabling-the-i2c-interface-on-the-raspberry-pi/>.
- [11] Rototron. *Raspberry Pi INA219 Tutorial*. 10. Feb. 2017. URL: <https://www.rototron.info/raspberry-pi-ina219-tutorial/>.

- [12] National Institute of Standards und Technology, Hrsg. *IPC-2221/B*. 2012.
- [13] Texas-Instruments. *INA219*. 2008.
- [14] Traco. *Datenblatt zu TEN 15-2411W*. Hrsg. von Traco. 2018. URL: <https://www.tracopower.com>.
- [15] Gerald Zickert. *Leiterplatten*. 2018.

## **Anhang A**

# **Anhänge**

### **A.1. PCB1 EQM**

Schaltplan zu Energie-Quellen-Management auf PCB1, aus Kapitel 5

### **A.2. PCB2A, PCB2B**

Schaltplan und Layout zu PCB2A und PCB2B, aus Kapitel 6

## Energie-Quellen-Management

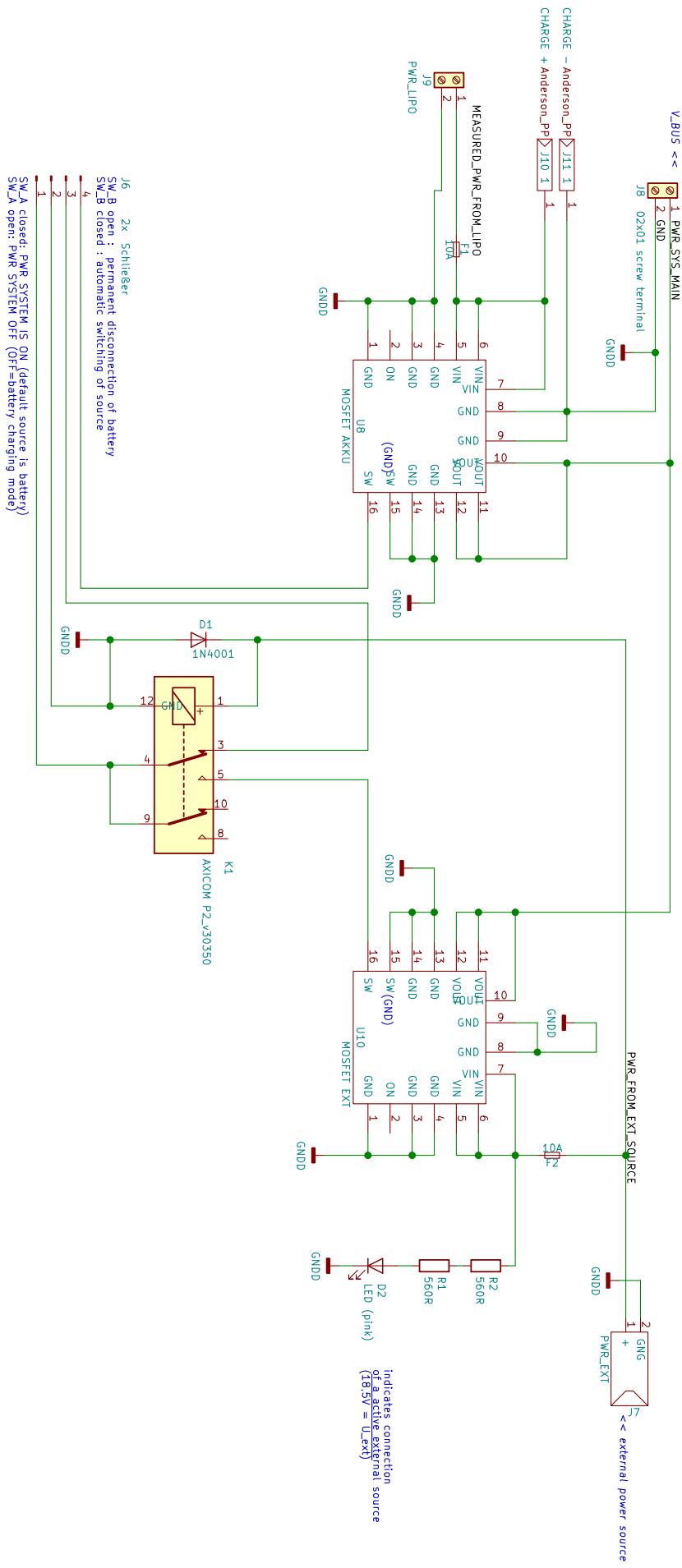


Abbildung A.1.: Schaltplan PCB1

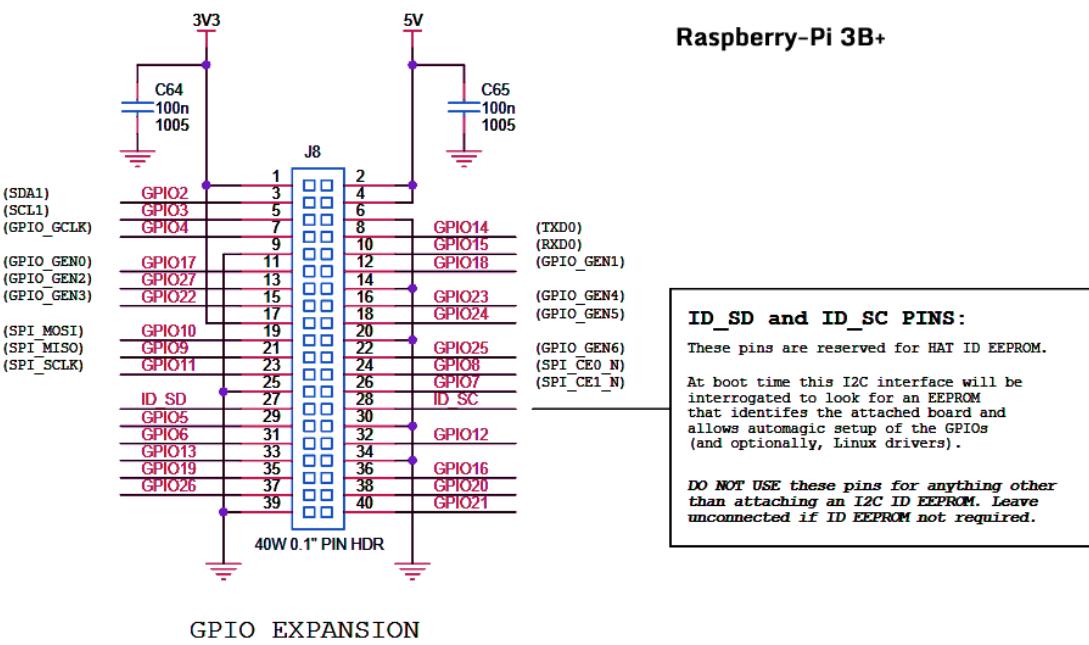


Abbildung A.2.: Schaltplan GPIO-Port Raspberry-Pi 3B+

## A. Anhänge

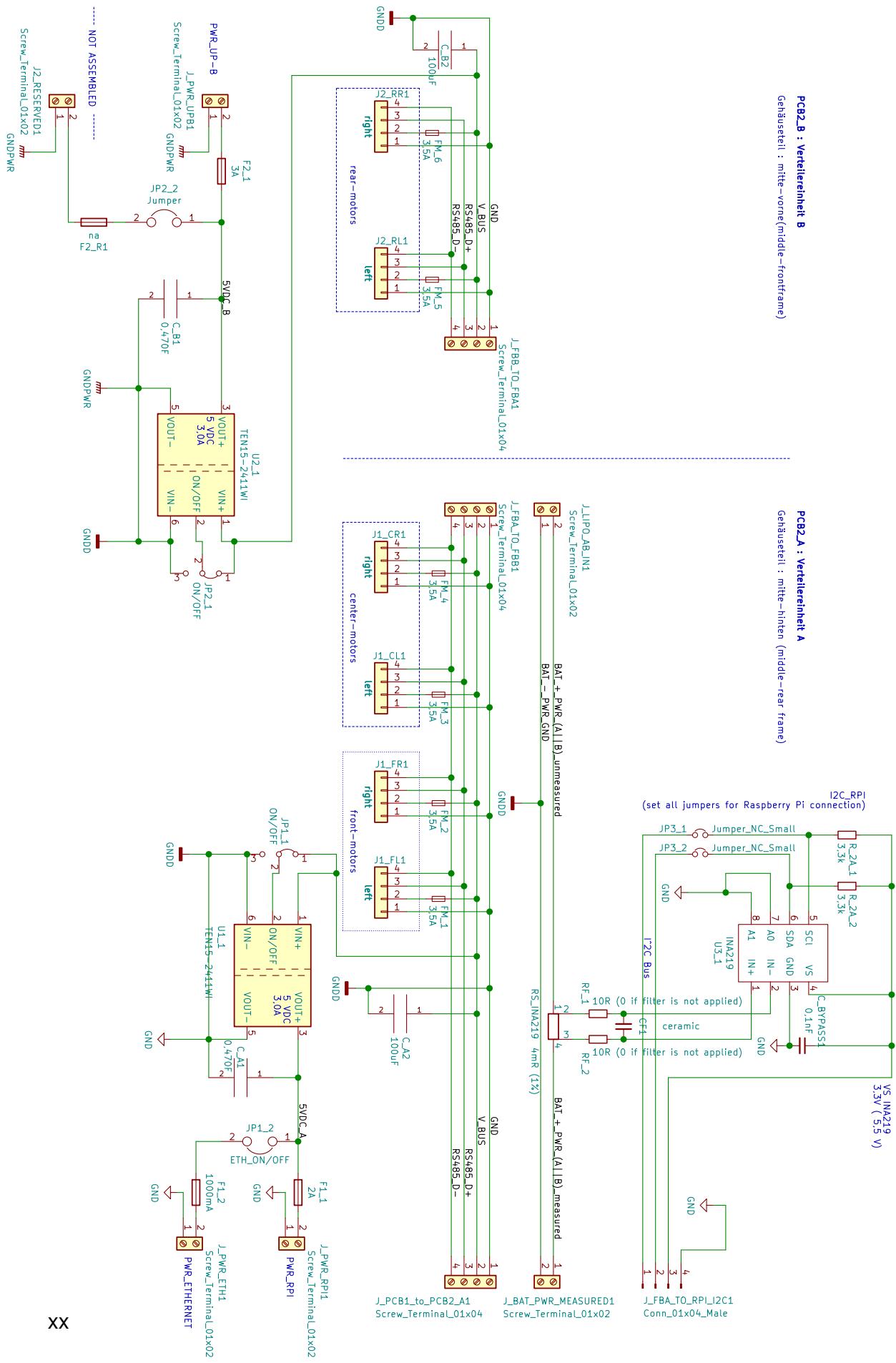


Abbildung A.3.: Schaltplan PCB2A und PCB2B

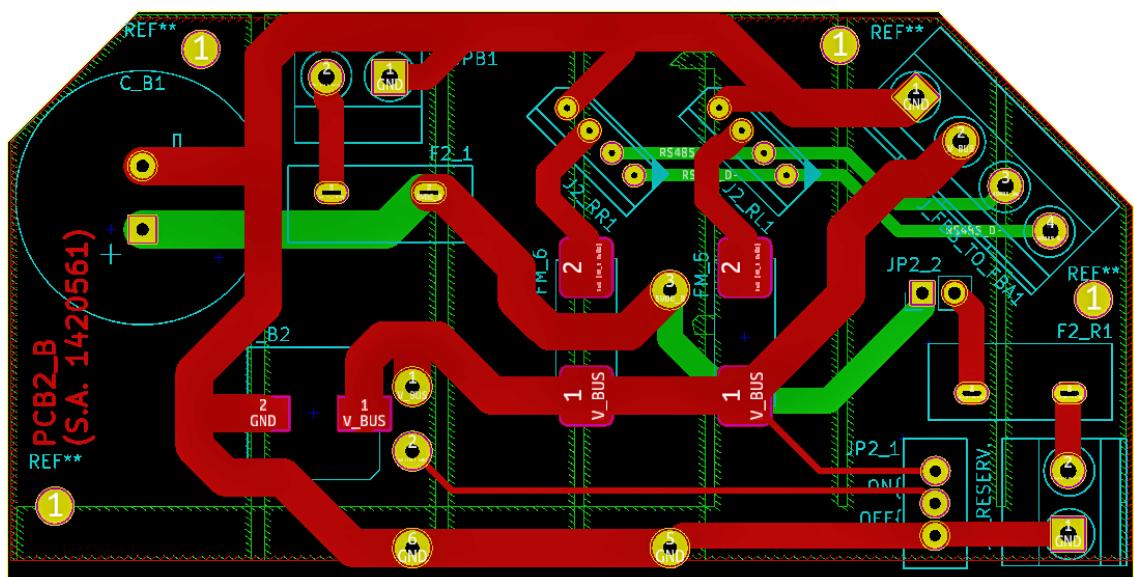


Abbildung A.4.: Layout PCB2B

## A. Anhänge

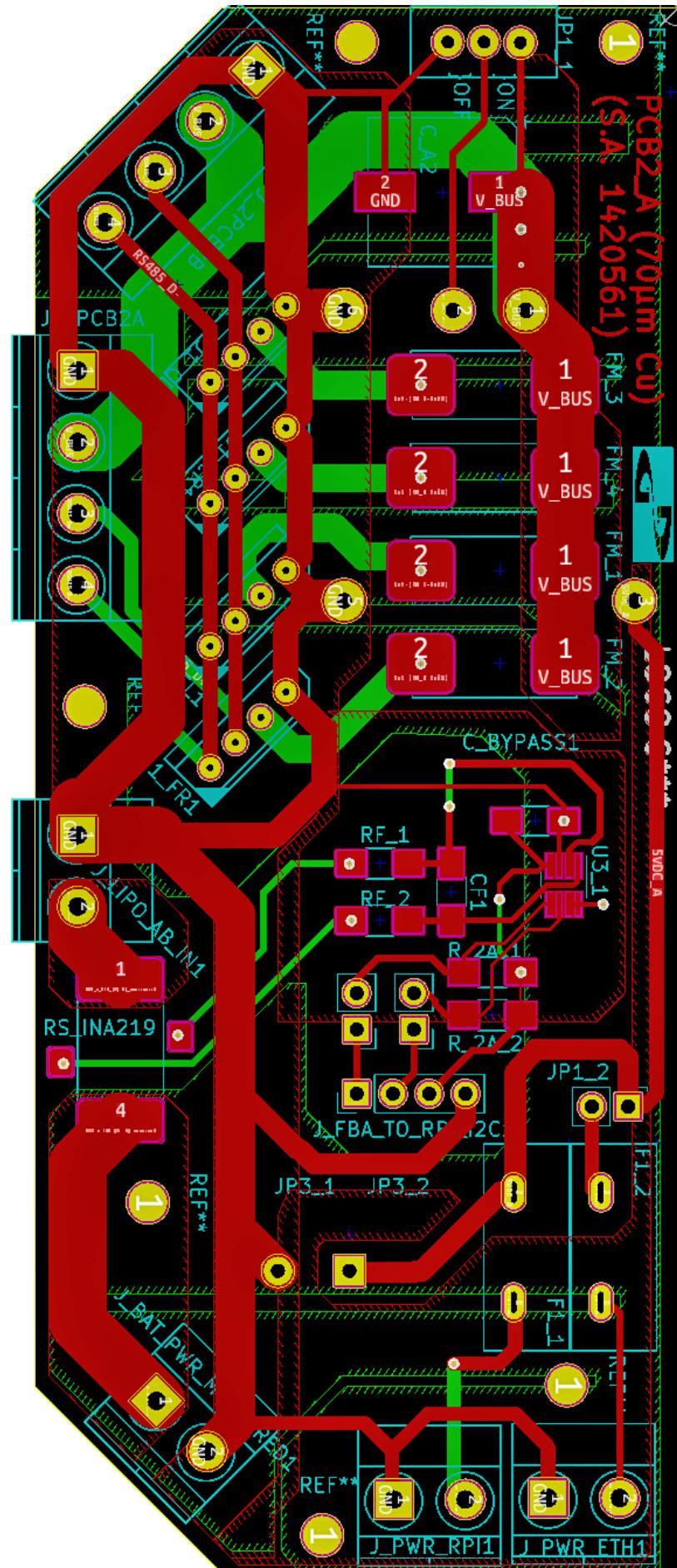


Abbildung A.5.: Layout PCB2A