

DIPLOMARBEIT

Gesamtprojekt

RoboGlove - Bionische Hand

3D-Druck, Mechanik, User-Interface Programmierung

Amir Al-Maytah 5BHEL Betreuer: Prof. Dipl.-Ing. Christoph Diemberger

Mikrokontroller-Programmierung, Testmanagement, Gesamtintegration

Fabian Schweitzer 5BHEL Betreuer: Prof. Dipl.-Ing. Christoph Diemberger

Hardwareentwicklung, PCB-Design, Projektleitung

Ladislaus Szabo 5BHEL Betreuer: Prof. Dipl.-Ing. Christoph Diemberger

Ausgeführt im Schuljahr 2023/2024

Abgabevermerk:

Datum: 13.2.2024

übernommen von:

Eidesstaatliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen Hilfsmittel als die angegebenen benutzt habe. Die Stellen, die anderen Werken (gilt ebenso für Werke aus elektronischen Datenbanken oder aus dem Internet) wörtlich oder sinngemäß entnommen sind, habe ich unter Angabe der Quelle und Einhaltung der Regeln wissenschaftlichen Zitierens kenntlich gemacht. Diese Versicherung umfasst auch in der Arbeit verwendete bildliche Darstellungen, Tabellen, Skizzen und Zeichnungen. Für die Erstellung der Arbeit habe ich auch folgende Hilfsmittel generativer KI-Tools (z. B. ChatGPT, Grammarly Go, Midjourney) zu folgendem Zweck verwendet: [Bitte hier Einsatzgebiet anführen.]. Die verwendeten Hilfsmittel wurden vollständig und wahrheitsgetreu inkl. Produktversion und Prompt ausgewiesen.

Amir Al-Maytah

Fabian Schweitzer

Ladislaus Szabo

Danksagung

Wir möchten uns herzlich bei unserem Betreuer Dipl.-Ing. Christoph Diemberger bedanken, der uns bei diesem Projekt grundlegend unterstützt und motiviert hat.

Des Weiteren gilt unser Dank auch Fachlehrer Robert Offner und allen anderen Lehrpersonen, die uns in der Werkstatt betreut und geholfen haben.

Wir danken allen, die uns im Rahmen dieses Projekts zur Seite standen.

DIPLOMA THESIS

DOCUMENTATION

Authors	Amir Al-Maytah, Fabian Schweitzer, Ladislaus Szabo
From	5BHEL 2023/2024
Academic year	
Topic	RoboGlove - Bionische Hand
CO-operation partners	

Assignment of tasks	As part of a feasibility study, a robotic hand is to be controlled by means of a glove. For this purpose, various sensors must be tested for accuracy and the evaluated data then transmitted wirelessly to the robotic hand. The positions of the fingers are to be displayed in a user interface.
----------------------------	---

Realization	The movements of the human hand are recorded with Flex sensors on the glove. The required data is then transmitted to the robotic hand via Bluetooth. A website will serve as the user interface.
--------------------	---

Results	The hand movements can be correctly evaluated and transmitted. The user wears the glove and grasps an object. The servo motors interpret the received data by means of the PCB and enable the robot hand to also grasp the same object. When the hand is opened, the robot hand must also move back to its starting position.
----------------	---



Die Schule der Technik

HTBLVA Wien 20
College of
Electronic and Technical Information
Technology

Diploma
Exam

Illustrative graph, photo
(with explanation)



Die Schule der Technik

Final construction of the System

Participation in competitions,
Awards

Accesibility of
Diploma Thesis

Department administration

Approval
(Date/Signature)

Examiner

Head of College/Department

DIPLOMARBEIT DOKUMENTATION

Namen der Verfasser/innen	Amir Al-Maytah, Fabian Schweitzer, Ladislaus Szabo
Jahrgang Schuljahr	5BHEL 2023/2024
Thema der Diplomarbeit	RoboGlove - Bionische Hand
Kooperationspartner	

Aufgabenstellung	Im Rahmen eines Diplomprojekts soll eine Roboterhand mittels eines Handschuhs gesteuert werden. Dazu müssen verschiedene Sensoren auf Genauigkeit getestet und anschließend die ausgewerteten Daten kabellos an die Roboterhand übertragen werden. Die Bewegungen der Finger sollen mit Motoren nachgebildet werden und die Stellungen dieser soll im User-Interface dargestellt werden.
Realisierung	Die Bewegungen der menschlichen Hand werden mit Flexsensoren am Handschuh erfasst. Die benötigten Daten werden anschließend über ein drahtloses Protokoll an die Roboterhand übertragen. Die Bewegungen der Roboterfinger werden mit Servomotoren realisiert. Als User-Interface soll eine Application dienen.
Ergebnisse	Die Handbewegungen können korrekt ausgewertet und übertragen werden. Der Benutzer trägt den Handschuh und greift ein Objekt. Die Servomotoren interpretieren mittels des PCBs die empfangenen Daten und ermöglichen es der Roboterhand ebenfalls das gleiche Objekt zu greifen. Beim Öffnen der Hand muss sich die Roboterhand in ihre Ausgangsstellung zurückbewegen.

Typische Grafik, Foto etc.
(mit Erläuterung)



Die Schule der Technik
Vollständiger Aufbau des Systems

Teilnahme an Wettbewerben,
Auszeichnungen

Möglichkeiten der
Einsichtnahme in die Arbeit

Abteilungsadministration

Approbation
(Datum/Unterschrift)

Prüfer/Prüferin

Direktor/Direktorin
Abteilungsvorstand/Abteilungsvorständin

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Ausgangslage und grundlegende Motivation	1
1.2 Themenerläuterung	1
1.3 Grundgliederung der Arbeit	1
1.4 Untersuchungsanliegen der individuellen Themenstellungen	1
2 Lastenheft	2
3 Vorwissenschaftlicher Theorieteil	2
3.1 Platzhalter Thema Amir	2
3.2 Platzhalter Thema Fabian	2
3.3 Sicherheitsaspekte der Mensch-Roboter-Kollaboration	2
4 Theoretische Grundlagen des Diplomprojekts	2
4.1 ESP-NOW Fabian	2
4.1.1 OSI-Modell	4
4.1.1.1 Physical Layer	4
4.1.1.2 Data Link Layer	5
4.1.1.3 Network Layer	5
4.1.1.4 Transport Layer	5
4.1.1.5 Session Layer	5
4.1.1.6 Presentation Layer	5
4.1.1.7 Application Layer	6
4.1.1.8 ESP-NOW Schichten	6
4.1.1.9 IEEE 802.15.4 Standard	6
4.2 OPV Technologien Laci	7
4.2.1 Single-Supply	8
4.2.2 Dual-Supply	8
4.2.3 Rail-to-Rail Technologie	8
4.3 PWM-Signale	10
5 Grundlegende Systemkonzepte	10
5.1 Gesamtsystemkonzept	10
5.1.1 Systembeschreibung	10
5.2 Eingabesubsystem	11
5.3 Ausgabesubsystem	12

6 Mechanische Realisierung	12
6.1 Handschuh <i>Amir</i>	12
6.1.1 Platzhalter für diverse Unterpunkte von <i>Amir</i>	12
6.2 Roboterhand <i>Amir</i>	12
6.2.1 Der Grundgedanke	12
6.2.1.1 Fertigung und CAD	13
6.2.2 Versuchsaufbauten	14
6.2.2.1 Aufbau	14
6.2.2.2 Versuchsresultat	14
6.2.3 Erste Testhand	14
6.2.3.1 Konzept Einführung	14
6.2.3.2 Realisierung und Zusammenbau	15
6.2.3.3 Fazit und Ergebnisse	18
6.2.4 Zweite Testhand (Inmoov)	18
6.2.4.1 Einführung	18
6.2.4.2 Realisierung und Zusammenbau	19
6.2.4.3 Fazit und Ergebnisse	19
6.2.5 Dritte Testhand (Projekt-Silikonhand)	19
6.2.5.1 Konzepteklärung	19
6.2.5.2 Erste Versuche einer Gussform und Aswertung	19
6.2.5.3 Verbesserungen und Realisierung (Gelenke im Guss)	19
6.2.5.4 Verbesserung der Gelenke	19
6.2.5.5 Entwurf einer neuen Gussform	19
6.2.5.6 Vorbereitung und Probleme beim Guss	19
6.2.5.7 Konzeptverbesserung	19
6.2.5.8 Fazit und Stellungnahme (Konzept verworfen)	19
6.2.6 Vierte Hand	20
6.2.6.1 Erfahrung und Konzepteklärung	20
6.2.6.2 Erster Entwurf	20
6.2.6.3 Verbesserungen – zweiter Entwurf	20
6.2.6.4 Realisierung und Aufbau	20
6.2.6.5 Versuche...	20
7 Hardware Realisierung	20
7.1 Eingabesubsystem	20
7.1.1 Grundlegende Voraussetzungen <i>Laci</i>	20
7.1.2 Überlegungen, Simulationen und Berechnungen <i>Laci</i>	21
7.1.2.1 Bewegungserfassung der Fingerbeugung	21
7.1.2.2 Auslesen der Sensoren	21
7.1.2.3 Berechnung des Tiefpassfilters	22
7.1.2.4 Berechnung der OPV Verstärkung und Dimensionierung des Shuntwiderstands	23
7.1.2.5 Umwandlung der Differenzwerte in ein geeignetes Format . .	23
7.1.2.6 Vervielfachung der Schaltung für alle Flexsensoren	24
7.1.2.7 Bewegungserfassung der Handgelenksdrehung	24

7.1.2.8	Mikrocontroller	25
7.1.2.9	Akkuversorgung	26
7.1.3	Versuchsaufbauten und Messungen <i>Laci</i>	26
7.1.3.1	Messschaltung der Flexsensoren	26
7.1.3.2	Messergebnisse	28
7.1.4	Schaltungsdesign <i>Laci</i>	31
7.1.4.1	Externe Anschlüsse	31
7.1.4.2	Mikrocontroller	33
7.1.4.3	Mikrocontroller Buttons	34
7.1.4.4	Status LEDs	34
7.1.4.5	Multiplexer	35
7.1.4.6	Operationsverstärker	35
7.1.4.7	Analog-Digital-Wandler	36
7.1.4.8	Gyroskop-Sensor	36
7.1.4.9	Akku Versorgung	37
7.1.5	Platinendesign <i>Laci</i>	38
7.1.5.1	Erste Testplatine	38
7.1.5.2	Zweite Version der Platine	40
7.2	Roboterhand	43
7.2.1	Grundlegende Voraussetzungen	43
7.2.2	Überlegungen, Simulationen und Berechnungen <i>Laci</i>	43
7.2.2.1	Aktorik zur Fingerbewegung	43
7.2.2.2	Datenempfang	44
7.2.2.3	Ansteuerung der Motoren	44
7.2.2.4	Positions -und Kraftmessung der Roboterfinger	45
7.2.3	Versuchsaufbauten und Messungen <i>Laci</i>	48
7.2.3.1	Messschaltung der Griffkraftkontrolle	48
7.2.4	Schaltungsdesign <i>Laci</i>	53
7.2.4.1	Externe Anschlüsse	53
7.2.4.2	Serial-UART-Bridge	55
7.2.4.3	Mikrocontroller	56
7.2.4.4	Mikrocontroller Buttons	57
7.2.4.5	Versorgung	58
7.2.4.6	PWM-Controller	59
7.2.4.7	Servoanschlüsse	60
7.2.4.8	Strommessung zur Griffkraftkontrolle	61
7.2.4.9	Status LEDs	64
7.2.5	Platinendesign <i>Laci</i>	65
7.2.5.1	Erste Testplatine	65
7.2.5.2	Zweite Version der Platine	68

INHALTSVERZEICHNIS

8 Software Realisierung	70
8.1 Handschuh	70
8.1.1 Konzepte und Überlegungen Fabian	70
8.1.1.1 Datenübertragung	70
8.1.1.2 Programmiersprache/Entwicklungsumgebung	71
8.1.1.3 Benutzerfreundlichkeit	71
8.1.1.4 Testen	72
8.1.1.5 Allgemeines Konzept	72
8.1.1.6 Minimaler & maximaler Widerstandswert	73
8.1.1.7 Verworfene Ideen	73
8.1.2 Realisierung und Gliederung Fabian	75
8.1.2.1 Realisierung	75
8.1.2.2 Gliederung	76
8.1.2.3 Wichtige Codezeilen	76
8.2 Roboterhand	80
8.2.1 Grundlegende Voraussetzungen	80
8.2.2 Konzepte und Überlegungen Fabian	80
8.2.2.1 Testen	80
8.2.2.2 Allgemeines Konzept	80
8.2.3 Realisierung und Gliederung Fabian	81
8.2.3.1 Realisierung	81
8.3 User Interface	88
8.3.1 Grundlegende Voraussetzungen	88
8.3.2 Entwicklungsumgebung Laci	88
8.3.3 Konzepte und Überlegungen Laci	88
8.3.3.1 Allgemeines Konzept	88
8.3.4 Realisierung und Gliederung Laci	90
9 Tests und Messungen	90
9.1 Platzhalter für diverse Unterpunkte	90
10 Projektmanagement	90
10.1 Projektstrukturplan	90
10.2 Milestoneplan	90
10.3 Gantt-Diagram	91
10.4 Meeting Struktur	91

11 Fertigungsunterlagen	91
11.1 Mechanik	91
11.1.1 händische Skizzen	91
11.1.2 CAD-Zeichnungen	91
11.1.3 3D-Modelle	91
11.2 Hardware	91
11.2.1 Stromlaufpläne	91
11.2.2 Platinen	91
11.2.3 Bestückungslisten	91
11.3 Software	91
11.3.1 Diagramme	91
11.3.2 Code	91
12 Ergebnisse und Erkenntnisse	91
13 Ausblick	91
14 Verzeichnisse	91
14.1 Quellenverzeichnisse	91
14.2 Abbildungsverzeichnis	91
14.3 Abkürzungsverzeichnis	91
15 Anhang	91

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und grundlegende Motivation

Es gibt Produktionsbereiche, die klinisch sauber gehalten werden müssen, da durch Menschen Kontaminationen entstehen können. Für dieses Vorhaben soll ein Prototyp einer Roboterhand, die über einen Sensorhandschuh kabellos gesteuert wird, entwickelt und aufgebaut werden. Diverse Parameter der Roboterhand sollen in einem Interface für den Benutzer dargestellt werden.

1.2 Themenerläuterung

Ziel des Projekts ist es, eine Roboterhand zu bauen, die über einen kabellos verbundenen Handschuh gesteuert werden kann. Das Ziel ist es, Daten der Fingergelenksensoren auszulesen, zu übertragen und die Bewegungen mit der Roboterhand nachzustellen. Endziel ist es, Daten richtig zu verarbeiten und die Roboterhand entsprechend zu bewegen. Daten sollen in einem Interface dargestellt werden.

Es soll eine Erfassung der Sensordaten möglich sein. Diese sollen übertragen und empfangen werden können. Die Roboterhand soll die Finger nach der Vorgabe des Handschuhs bewegen können. Als Endergebnis soll eine halbvolle 500mL Plastikflasche umschlossen und in der Luft gehalten werden. In dem Interface, dem User-Interface, sollen wichtige Daten dargestellt und Parameter verändert werden können.

1.3 Grundgliederung der Arbeit

Folgende Schüler des TGMs haben, das in Punkt 1.1 zusammengefasste, Projekt entwickelt und gefertigt:

Projektleiter: Ladislau Szabo (Hardwareentwicklung, PCB-Design, Projektleitung)

Mitarbeiter: Fabian Schweitzer (Mikrokontroller-Programmierung, Testmanagement, Gesamtintegration)

Amir Al-Maytah (3D-Druck, Mechanik, Userinterface-Programmierung)

Die folgenden beiden Betreuer haben uns jeder Zeit geholfen:

Dipl.Ing. Christoph Diemberger

Fachlehrer Robert Offner

1.4 Untersuchungsanliegen der individuellen Themenstellungen

Mit dieser Diplomarbeit soll eine Roboterhand nach einem fertigen Design aufgebaut werden, die mit einem kabellos angebundenen Handschuh gesteuert wird. Zu diesem Zweck müssen verschiedene Sensoren getestet werden, die die Fingergelenksstellung messen. Deren Daten müssen ausgelesen und mittels kabelloser Schnittstelle an die Roboterhand übertragen werden

(Schweitzer). Um die Fingerbewegungen an der Roboterhand nachzustellen, muss folglich eine Motoransteuerung entwickelt werden (Szabo). Um die elektronischen Bauelemente unterzubringen, muss ein entsprechendes Gehäuse, in Form einer menschlichen Hand beziehungsweise eines Arms, gefertigt werden. Zusätzlich soll ein Interface erstellt werden, in dem der Benutzer Daten des Roboterarms und des Handschuhs einsehen kann. (Al-Maytah)

2 Lastenheft

3 Vorwissenschaftlicher Theorieteil

3.1 Platzhalter Thema Amir

3.2 Platzhalter Thema Fabian

3.3 Sicherheitsaspekte der Mensch-Roboter-Kollaboration

4 Theoretische Grundlagen des Diplomprojekts

4.1 ESP-NOW Fabian

Das ESP-NOW Protokoll macht es möglich, dass man Daten problemlos per Funkstrecke versenden kann. Dabei kann dieses auf dem ESP32 und ESP8266 verwendet werden, da nur diese dafür ausgewählt wurden. Der Hersteller "Espressif" hat dieses Protokoll entwickelt. Es können bis zu 250 Bytes pro Senden ausgetauscht werden. Dies ist auch bis zu einer maximalen Anzahl von zwanzig ESP32/ESP8266 Slaves möglich. Das Mischen der beiden genannten Boards ist möglich. Dabei kann auch jeder der ESPs jeweils als Transmitter, Receiver oder Transceiver verwendet werden. Ein Vorteil dieser Übertragungsmöglichkeit ist, dass die dafür benötigten Bibliotheken in der Arduino IDE zu finden sind. Diese sind nämlich schon standardmäßig im Paket für den ESP32 und ESP8266 vorhanden.

Als Erstes muss die MAC-Adresse des jeweiligen ESPs identifiziert werden. Bei Bedarf kann diese auch geändert werden. Es wird hierfür also kein Router benötigt. Diese besteht aus sechs Bytes. Angegeben wird sie im Hexadezimalsystem, wobei zwischen Zweierblöcken von Buchstaben und Zahlen jeweils ein Doppelpunkt steht. Um auf alle WIFI-Funktionen nutzen

zu können, muss auch die Bibliothek für WIFI eingebunden werden. Wichtig ist, dass WIFI zuvor aktiviert wurde, da sonst keine Daten übertragen werden können. Durch den Aufruf der Funktion `esp_now_init()` kann ESP-NOW initialisiert werden, mit `esp_now_deinit()` kann es wieder rückgängig gemacht werden. Durch die Funktion `esp_now_add_peer()` können neue Geräte gespeichert werden, an die man dann etwas sendet. Zu beachten ist, dass Kanäle von 0 bis 14 vorhanden sind, wobei 0 für den aktuellen Kanal steht. Darüber wird dann auch gesendet, außer man stellt einen spezifischen Kanal ein, auf dem sich das lokale Gerät befindet.

Um Daten zu senden, muss die Funktion `esp_now_send()` aufgerufen werden. Dadurch können dann Daten gesendet werden. Die Funktion `esp_now_register_send_cb()` ist dafür da, um die Sende-Callback-Funktion zu registrieren. Es wird ein Feedback zurückgeliefert, ob die Daten erfolgreich gesendet wurden oder nicht. Bei erfolgreichem Senden wird `ESP_NOW_SEND_SUCCESS` zurückgeliefert. Dies passiert, wenn sie erfolgreich am MAC-Layer empfangen wurden, ansonsten `ESP_NOW_SEND_FAIL`. Warum eine Fehlermeldung ausgegeben wird, kann nicht nur einen Grund haben. Beispielsweise existiert die angestrebte MAC-Adresse nicht, die Kanäle sind nicht identisch oder der Action frame geht bei der drahtlosen Übertragung verloren. Um doppelte Daten auszuschließen, ist es möglich, dass man eine Sequenznummer verwendet, um zu überprüfen, ob es eine fehlerbehaftete Übertragung sein könnte. Ein zu kurzes Intervall zwischen dem Senden der verschiedenen Daten kann dazu führen, dass eine Störung auftreten kann. Die Sende-Callback-Funktion kann dadurch gestört werden. Es sollte deshalb auf jeden Fall der Moment abgewartet werden, bis die Sende-Callback-Funktion eine Antwort liefert hat. Dabei wird diese Funktion jedes Mal mit hoher Priorität beim Wifi-Task ausgeführt. In der Callback-Funktion sollen auf jeden Fall nur die wichtigsten Operationen abgearbeitet werden.

Um Daten zu empfangen, muss die Funktion `esp_now_register_recv_cb()` aufgerufen werden. Dies ist dafür verantwortlich, um die Empfangs-Callback-Funktion zu realisieren. Genauso, wie beim Sender, wird hierzu der WIFI-Task verwendet, weshalb nur die nötigsten Operationen abgearbeitet werden sollen.

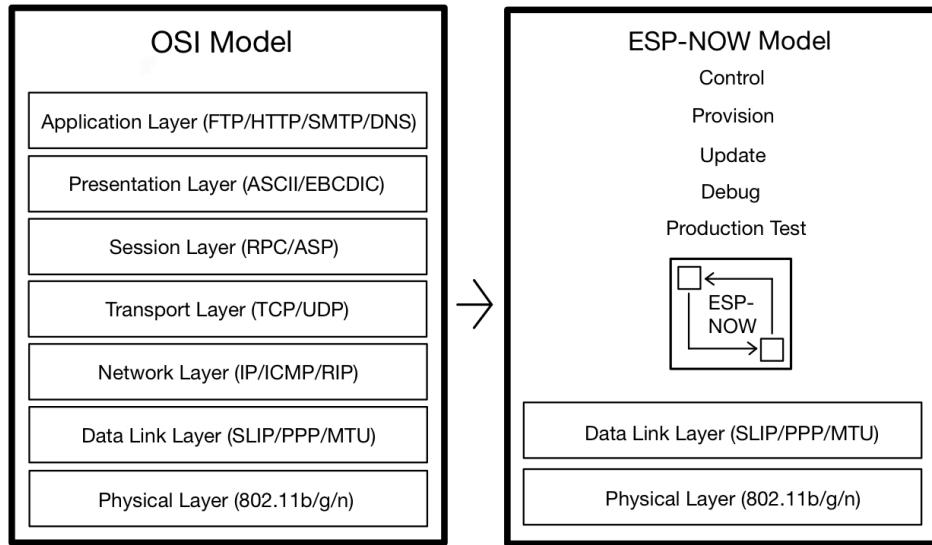
Mit der Funktion `esp_wifi_config_esnow_rate()` kann die ESP-NOW Rate angegeben werden. Dabei muss beachtet werden, dass die gewünschte Schnittstelle bereits konfiguriert wurde. Eine Energiesparen Funktion kann über `esp_wifi_connectionless_module_set_wake_interval()` festgelegt werden. Hier kann man dann einstellen, wann sich der ESP einschalten soll.

Im Freien, ohne störende Wände oder Möbel, kann ESP-NOW Daten auf jeden Fall von 150 bis 200 Metern weit übertragen. In geschlossenen Räumen funktioniert die Übertragung meist durch eine Wand, in seltenen Fällen sogar durch zwei, abhängig von der Dicke und anderen störenden Einflüssen.

Das OSI-Modell wird bei dem ESP-NOW Modell von fünf Schichten auf eine einzige reduziert. Daten müssen somit nicht den Network layer, nicht den Transport layer, nicht den Session layer, nicht den Presentation layer und nicht den Application layer durchlaufen. Der große Vorteil liegt außerdem darin, dass man einige Dinge nicht berücksichtigen muss. Es gibt keine Paketköpfe oder Entpacker auf jeder Schicht. Dies führt zu einer schnelleren Reaktion und die

4.1 ESP-NOW Fabian

Paketverluste werden dadurch in überlasteten Netzen reduziert. Dies führt zu einer deutlichen Verbesserung der möglichen Verzögerung, indem diese sehr niedrig gehalten werden kann.



4.1.1 OSI-Modell

Das OSI-Modell ist standardisiert und ermöglicht die Kommunikation zwischen den verschiedensten Computersystemen. OSI (Open Systems Interconnection) wurde von der ISO (International Organization for Standardization) erfunden. Es besteht aus 7 Schichten (application layer, presentation layer, session layer, transport layer, network layer, data link layer und physical layer). Wichtig ist, dass jede einzelne Schicht eine andere Aufgabe erfüllt. Durch das System der einzelnen Schichten kann die Fehlersuche vereinfacht werden, da man die jeweiligen durchforsten kann. Zu beachten ist allerdings, dass diese untereinander ebenfalls Daten austauschen und untereinander kommunizieren können. Dabei ist jede Schicht nach international standardisierten Protokollen definiert. Das bedeutet, dass gewisse Regeln zur Kommunikation eingehalten werden müssen. Dabei ist es möglich, dass sich ein Protokoll über mehrere Schichten verteilt.

Beim Sender und Empfänger werden diese sieben Schichten jeweils einmal angewandt.

4.1.1.1 Physical Layer

Beschreibt die mechanische und funktionale Schnittstelle zum Übertragungsmedium. Die Datenübertragung der physischen Geräte, wie Schalter, Kabel, usw. ist hiermit gemeint. Daten werden in einen Bitstrom umgewandelt. Zu beachten ist, dass das Übertragungsmedium an sich nicht zur 1. Schicht gehört, nur die Datenübertragung bei Einschalten des physischen Geräts gehört in diese.

4.1.1.2 Data Link Layer

Beschreibt die Sicherungsschicht, die eine stabile und funktionierende Verbindung zwischen Endgerät und Übertragungsmedium herstellt. Der Data Link Layer verarbeitet Pakete vom Network Layer, spaltet diese in kleinere Teile namens Frames und ist für den Datentransfer zwischen zwei Geräten im selben Netzwerk verantwortlich. Die physikalische Adressierung von Datenpaketen wird hier durchgeführt. Außerdem werden auch eine Fehlererkennung, Fehlerbehebung und Datenflusskontrolle angewandt.

4.1.1.3 Network Layer

Beschreibt den regulierten Datentransfer zwischen zwei verschiedenen Netzwerken. Hier werden einzelne Segmente auf dem Sendergerät von dem Transport Layer in Fragmente aufgeteilt und auf dem Empfängergerät dann wieder zusammengefügt. Die logische Adressierung findet ebenfalls statt.

4.1.1.4 Transport Layer

Beschreibt das Bindeglied zwischen den transportorientierten und den anwendungsorientierten Schichten. Wie immer, werden die Daten in kleinere Bestandteile zerlegt. Header-Informationen und eine Fehlerkontrolle werden von den Segmenten beinhaltet, falls nicht alle Daten erfolgreich angekommen sind oder fallengelassen wurden, kann dies hilfreich sein.

4.1.1.5 Session Layer

Beschreibt die Verbindung zwischen den Endsystemen. Session nennt man den zeitlichen Bereich zwischen dem Starten und Beenden der Kommunikation. Wichtig ist auch, dass dieser Layer dafür verantwortlich ist, dass genug lange Daten übertragen werden können und die Verbindung nicht schon zuvor beendet wird. Für die Effizienz soll allerdings nach einem abgeschlossenen Vorgang die Verbindung unterbrochen werden.

4.1.1.6 Presentation Layer

4.1 ESP-NOW Fabian

Beschreibt die Aufbereitung der Daten, sodass der Nutzer diese verstehen kann. Damit ist gemeint, dass beispielsweise verschlüsselte Daten zuerst entschlüsselt werden müssen, bevor sie der Nutzer verstehen kann. Die Komprimierung und Dekomprimierung von Daten werden hier auch durchgeführt.

4.1.1.7 Application Layer

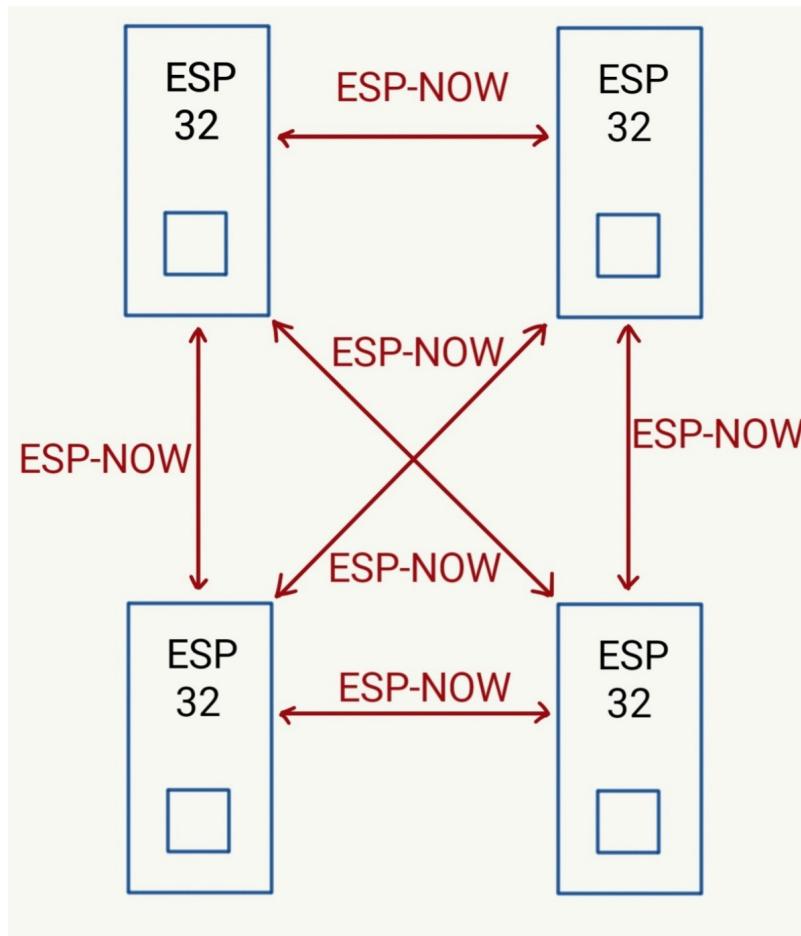
Beschreibt die Bereitstellung von Funktionen für Anwendungen und die Verbindung zu den unteren Schichten. Die Dateneingabe und Datenausgabe werden hier ebenfalls durchgeführt. Softwareanwendungen sind auf den Application Layer angewiesen (http, SMTP, ...). Diese Protokolle sind für die Kommunikation notwendig und standardisiert.

4.1.1.8 ESP-NOW Schichten

Es gibt bei ESP-NOW zwei Schichten, den Data Link Layer und den Physical Layer (siehe OSI-Modell). Dabei beruht der Physical Layer auf dem IEEE 802.15.4 Standard. Da jedoch nicht so viele Schichten, wie bei dem OSI-Modell vorhanden sind, gibt es mehrere Möglichkeiten, wo Fehler liegen können und es ist nicht so leicht den Fehler an der richtigen Stelle zu suchen.

4.1.1.9 IEEE 802.15.4 Standard

Es ist ein internationaler Standard für die drahtlose Kommunikation, der von Electrical and Electronics Engineers (IEEE) entwickelt wurde. Besonders wird Wert auf die geringe Datenrate und dem daraus folgend geringen Stromverbrauch Wert gelegt. Es werden lizenzenfreie Frequenzbänder im 2,4GHz-, 915MHz- und 868MHz-Bereich verwendet.



4.2 OPV Technologien Laci

Ein Operationsverstärker, kurz OPV, ist ein analoger Gleichspannungsverstärker, der sich durch seine üblicherweise sehr hohe Verstärkung auszeichnet. Der elektrische Grundbaustein ist ein Differenzverstärker, der durch äußere Beschaltungen angepasst werden kann. In der grundlegendsten Funktion, verstärkt ein OPV die Differenz der beiden Eingangsspannungen am "+" und "-" Anschluss. Das Ergebnis dieses Verstärkungsprozesses wird anschließend über "Vout" ausgegeben.

Operationsverstärker können mit einem sogenannten "Single-Supply" oder "Dual-Supply" versorgt werden. Dies bezieht sich auf die Art der Versorgungsspannung.

4.2.1 Single-Supply

Bei dieser Art der Versorgung, wird ausschließlich eine positive Spannung und das Groundpotential genutzt. Das bedeutet, dass der OPV theoretisch einen maximalen Ausgangsbereich von GND bis VCC haben kann. Negative Spannungen können nicht ausgegeben werden.

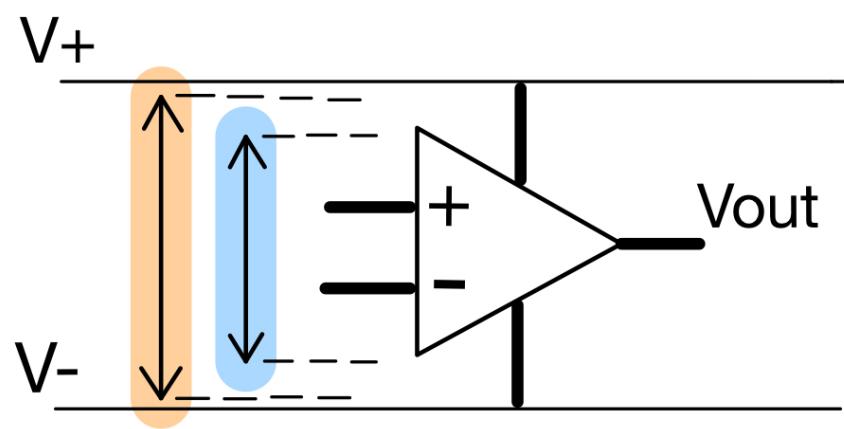
4.2.2 Dual-Supply

Beim Dual-Supply Betrieb, wird der OPV von einer positiven und negativen Spannung versorgt. Das bedeutet, dass der OPV nun die Fähigkeit besitzt auch negative Spannungen auszugeben und der Ausgangsspannungsbereich somit größer als beim Single-Supply ist.

4.2.3 Rail-to-Rail Technologie

Hat ein OPV die sogenannte "Rail-to-Rail Technologie", so ist die Rede von Spannweite des Ausgangsspannungsbereichs. Bei diesem Feature ist der Operationsverstärker dazu fähig fast bis auf das positive und negative Versorgungspotential Spannung auszugeben. Dies ist oft von Vorteil, da dadurch die Versorgungsspannungen nicht übermäßig hoch sind und somit die Schaltungen mit niedrigeren Spannungen arbeiten kann. Dies ist auch für die Benutzer der entsprechenden Endgeräte sicherer.

In der folgenden Grafik sind die Ausgangsspannungsbereiche eines normalen OPVs, in blau, und eines OPVs mit Rail-to-Rail Technologie, in Orange, dargestellt.

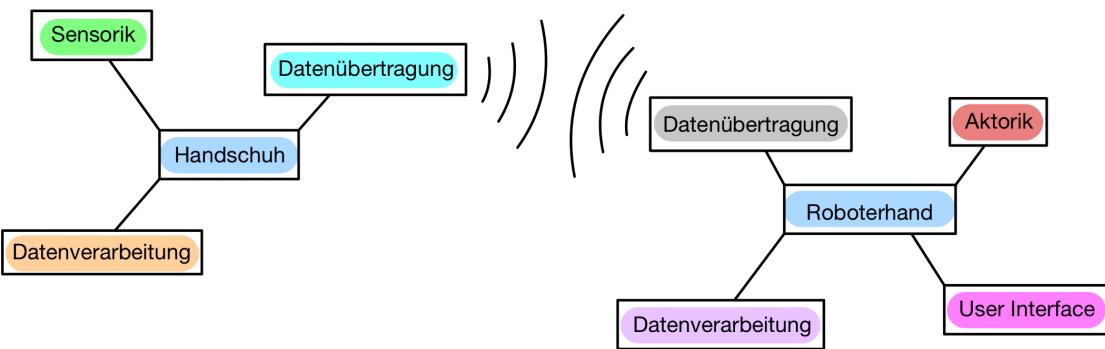


4.3 PWM-Signale

5 Grundlegende Systemkonzepte

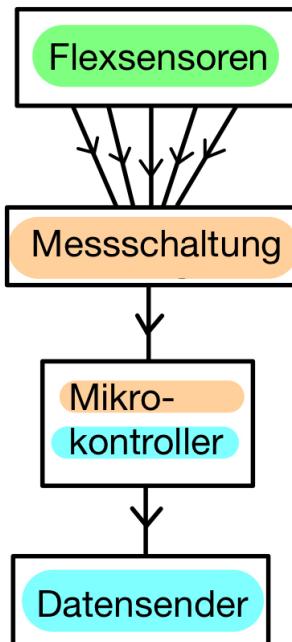
5.1 Gesamtsystemkonzept

5.1.1 Systembeschreibung



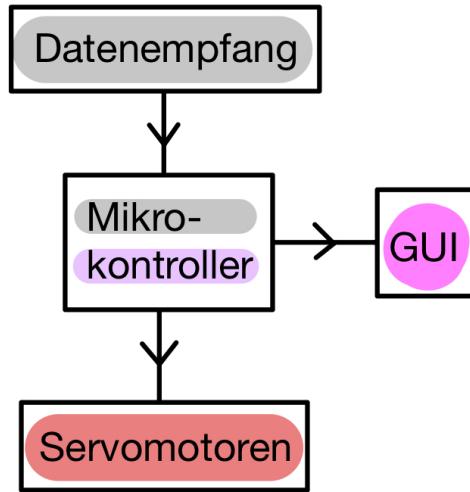
Das Gesamtsystem ist im oberhalb abgebildeten Blockschaltbild grafisch veranschaulicht. Die linke Hälfte zeigt das Konzept des Handschuhs (Eingabe) und die rechte Hälfte die Roboterhand (Ausgabe). Die grundlegende Konzeptionierung der Bewegungserfassung besteht darin, dass mithilfe von Sensoren die Fingerbeugung aller fünf Finger gemessen wird. Anschließend werden die Sensordaten ausgewertet und verarbeitet. Die resultierenden Informationen werden folglich über eine drahtlose Verbindung an das zweite Subsystem, nämlich der Roboterhand, übertragen. Dort wird das Gesendete empfangen, weiterverarbeitet und interpretiert. Die Aktorik setzt die digitalen Anweisungen in mechanische Bewegungen um, wodurch die Roboterhand gesteuert wird. Im Ausgabesystem ist auch ein User-Interface enthalten. Die diversen Funktionen werden in späteren Punkten näher erläutert.

5.2 Eingabesubsystem



Der Sensorhandschuh ermöglicht dem Benutzer die Roboterhand zu steuern. Dies geschieht durch Flexsensoren, die an den Fingern des Handschuhs angebracht sind. Wird ein Finger gebeugt, so ändert sich der Widerstandswert der korrespondierenden Sensoren. Diese Änderungen werden von einer Messschaltung erfasst, die die Sensorwerte interpretiert, digitalisiert und anschließlich an den Mikrokontroller über ein Kommunikationsprotokoll weitergibt.

5.3 Ausgabesubsystem



Sind die Daten des Eingabesubsystems empfangen, müssen diese in ein geeignetes Format für die Steuerung der Aktorik, also den Servomotoren, umgewandelt werden. Dies geschieht mit dem Mikrokontroller. Angebunden an das Ausgabesubsystem ist ein Graphical-User-Interface, welches in Punkt 8.3 näher erklärt wird.

6 Mechanische Realisierung

6.1 Handschuh **Amir**

6.1.1 Platzhalter für diverse Unterpunkte von Amir

6.2 Roboterhand **Amir**

6.2.1 Der Grundgedanke

Der Grundgedanke der Mechanik in der Roboterhand ist es alle drei Glieder eines Fingers, darunter das Fingergrundglied, das Fingermittelglied und das Fingerendglied mit ausschließlich der Bewegung eines einzelnen Servomotors auf oder zu zuklappen. Umsetzbar ist dies durch ein Zugsystem, welches für ein Aufklappen und ein Zuklappen des Fingers ermöglicht. Gezogen wird durch den Finger der Roboterhand ein oder mehrere Schnüre, ähnlich wie bei einer

Marionette. Diese Schnüre bringen den Finger je nach Verlängern oder Verkürzen zum Bewegen. Ebenso ist je nach Zug wählbar in welcher Stellung der Finger sich dann befindet. Befestigt wird dies an einem mit dem Servomotor gesteuertem Zugmechanismus.

6.2.1.1 Fertigung und CAD

Der Entwurf eines Modells ist mit ständiger Weiterentwicklung verbunden, sind in solch einem Modell mechanische Komponenten vorhanden nimmt die Fertigungsschleife ersichtlich mehr Komplexität an und erfordert die Möglichkeit in kürzester Zeit flexibel Anpassungen und Optimierungen am Entwurf ausgiebig zu testen. Speziell während der Entwicklung der mechanischen Komponente einer Roboterhand ist auf viele Faktoren zu achten, es ergeben sich ständig neue Erkenntnisse sowie auch Problematiken, welche eine Lösung erfordern. Sei es mangelnde Stabilität unter hoher Belastung, zu viel Reibung oder gängige Konstruktionsfehler.

Dank dem neuen Fertigungsverfahren des 3D-Drucks ist es möglich Versuchsaufbauten in einem CAD-Programm zu entwerfen, diese folglich zu drucken und dementsprechend auf ihr Verhalten zu testen.

Ein CAD-Programm ist eine Software, welche zur Erstellung von zweidimensionalen oder auch dreidimensionalen Komponenten Modellen dient, CAD steht für Computer-Aided Design(engl.) und bedeutet übersetzt „Computerunterstütztes Entwerfen“. Neben dem reinen Entwerfen von Modellen haben solche Programme auch die Eigenschaft, das Modell je nach Material auf Stabilität, maximal Belastung oder sonstige Verhaltensmuster zu testen.

Das 3D-Verfahren arbeitet mit den exportierten Modell-Dateien eines CAD-Programms und setzt diese in ein greifbares Modell um.

Dabei gibt es darunter mehrere Fertigungsmethoden, die von uns gewählte ist die gängigste, FDM (Fused Deposition Modeling), dieses Verfahren arbeitet hauptsächlich mit Kunststoffen. Dabei zeichnet ein Extruder mit eingeführtem Filament Sichtweise ein Modell auf eine Druckplatte und formt damit ein reales Objekt. Kunststoffe, die für dieses Fertigungsverfahren verwendet werden ist PLA, ABS, PETG und weitere.

Die Vorteile des FDM-Drucks sind, dass die Druckgeräte sowie das Filament billig zu erhalten sind. Aber auch die das Verfahren einfach und nicht besonders komplex ist, sowie auch schnell.

In der initialen Entwicklungsphase des Projekts „Bionic-Hand“ kommen zwei private 3D, Drucker zum Einsatz, welche das FDM-Verfahren nutzen. Der sich daraus erschließende Vorteil ist eine effektive und besonders effektive Prototypenherstellung. Von großer Bedeutung ist die Möglichkeit, jederzeit ein Modell in den Drucker zu laden und damit innerhalb weniger Stunden neues Versuchsobjekt zu erhalten.

Im Laufe der ersten Versuchsaufbauten war die Druckqualität nicht sehr relevant, denn der Fokus lag auf der Zeitersparnis und hauptsächlich auf dem Gewinn von Erkenntnissen, sowie auf dem Verständnis der in der CAD-Software entworfenen Mechanismen.

(Quelle: Zum zitieren und Quellenverzeichnis: <https://filamentworld.de/3d-druckverfahren/>)

6.2.2 Versuchsaufbauten

In diesem Versuchsaufbau war es das Ziel mit einem simplen Testmodell Erkenntnisse über den Mechanismus zu erhalten und dadurch mehr aus ihm zu lernen. Dafür wurde in der CAD Software Fusion360 ein erstes Testmodell entworfen.

6.2.2.1 Aufbau

Das Modell besteht aus den drei Gliedern eines Fingers, einer Halterung für einen Servomotor, sowie aus den im Inneren vorhandenen Führungen.

Zwischen jedem Fingerglied befindet sich 1cm Abstand, verbunden sind diese durch eine 3mm dicke Fläche. Die Fläche hat den Zweck sich bei Zug an der Schnur zu biegen, durch die Führungen wird nur eine Biegung an der „Fläche“ ermöglicht. Befestigt wird die Schnur an einer Halterung am Servomotor und wir dadurch bei Rotation des Servos entsprechend angezogen. Die Fingerglieder haben eine nach außen gewölbter Form und sind in Richtung der Fläche verjüngt, dies ermöglicht dem Finger sich auf noch engeren Raum zusammenzuziehen.

6.2.2.2 Versuchsresultat

Das Versuchsresultat war nahrhaft und bot einen breiten Einblick in den Mechanismus. Dabei gab es zahlreiche Erkenntnisse über Reibung, Stabilität und mechanische Abnutzung sowie aber auch Belastung.

Einer der Erkenntnisse war es, dass die Schnur eine gewisse Zugfestigkeit benötigt. Getestet wurden dabei mehrere Schnüre unter anderem auch Nylonschnüre. Als besonders stabil haben sich dann Angelschnüre bewiesen. Festgestellt wurde ebenso, dass ein mechanischer Widerstand benötigt wird, welcher den Finger wieder in seine Ursprungsposition: ausgestreckt – versetzt. Anfangs war dafür die freie Fläche vorgesehen, diese hat sich jedoch über die Zeit abgenutzt und hat den Finger nicht in die Ursprungsposition befördert. Eine mögliche Lösung während Gummikordeln, elastische Schnüre, welche am „Fingerrücken“ platziert werden und sich bei Biegen des Fingers spannen. Desto kürzer die Zugschnur im Finger, desto länger die Gummikordel.

6.2.3 Erste Testhand

6.2.3.1 Konzept Einführung

Die erste Testhand zielt darauf ab ein Modell welches durchgängig erweitert werden kann zu schaffen. Mit Rücksicht auf etwaige Testergebnisse des Versuchsresultats (Verweis auf 6.2.1.2) soll ein Modell geschaffen werden, welches den im Versuch aufgetretenen Problematiken entgegenwirkt. Unter anderem der nicht vorhandene Rückzug, eine Schnur für den Zug mit ausreichender Reißfestigkeit sowie eine anwendungsgemäße Konstruktion des Fingers.

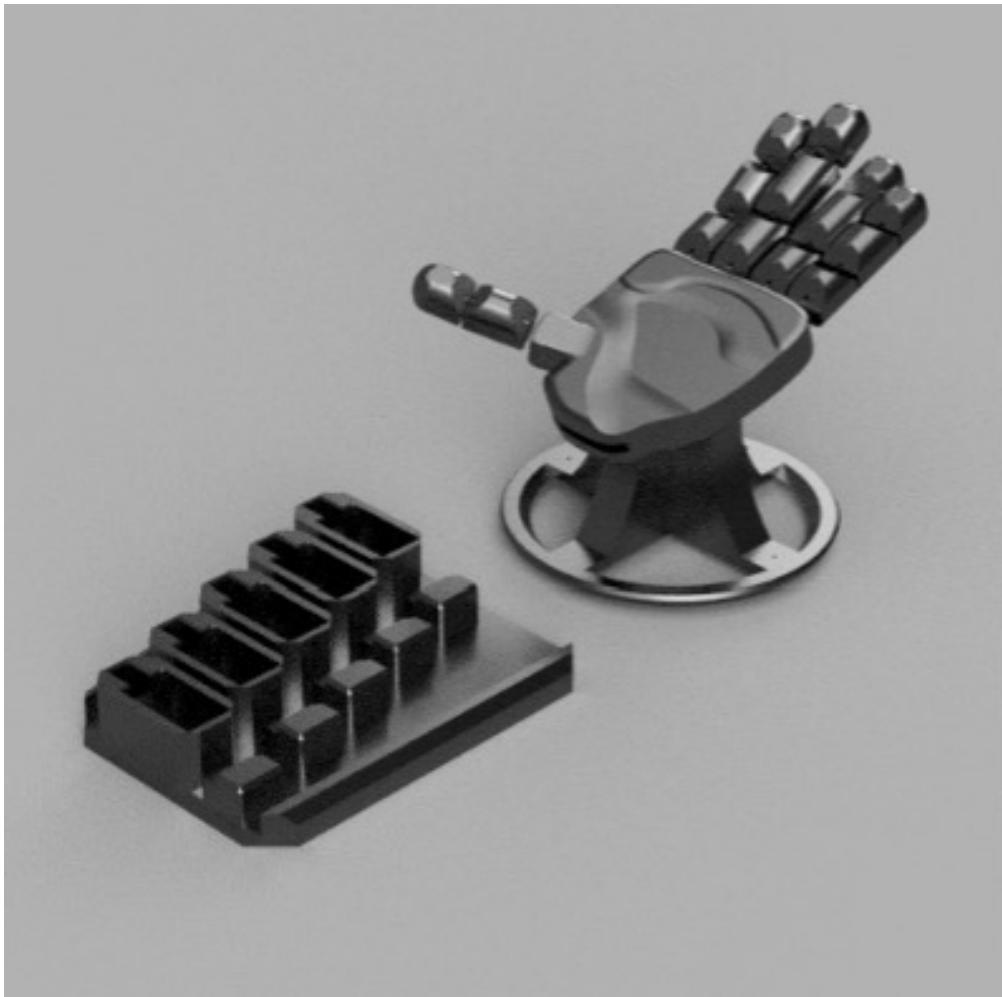
Eine konkrete Lösung, um für mehr Sicherheit im Zusammenhang mit dem Zugsystem zu sorgen wurde für diesen Aufbau eine Angelschnur mit einem Durchmesser von XXmm gewählt, diese hat eine Kraft von XX/m. Aufgrund der XXX ist die Schnur ebenso schnittfest.

Im Versuch (Verweis) hat sich erwiesen, dass eine Fläche aus PLA welche die Fingerglieder verbindet nicht genügend Kraft aufbringt, um den Finger wieder in seine Ursprungsposition zu bewegen. Demnach wird eine Kraft benötigt, welche ständig dem Zug der Angelschnur entgegenwirkt und den Finger entsprechend austreckt.

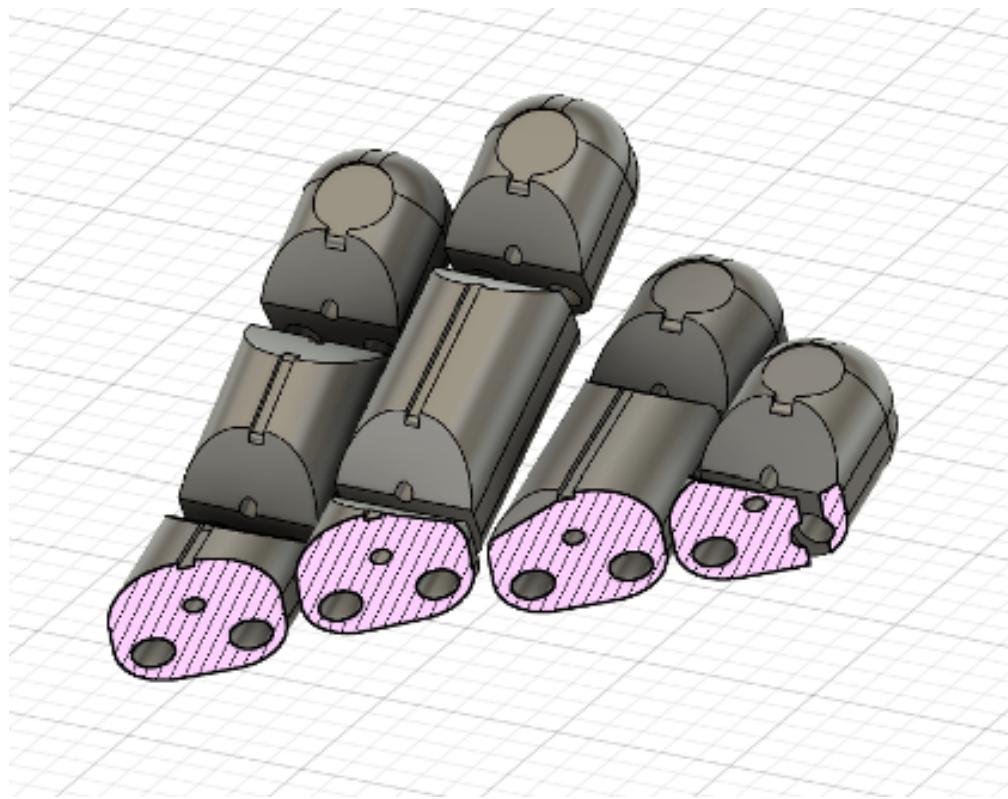
In diesem Modell wird daher ein Elastomer, ein elastisches Material in Form eines Bandes mit ausreichender Kraft gewählt.

6.2.3.2 Realisierung und Zusammenbau

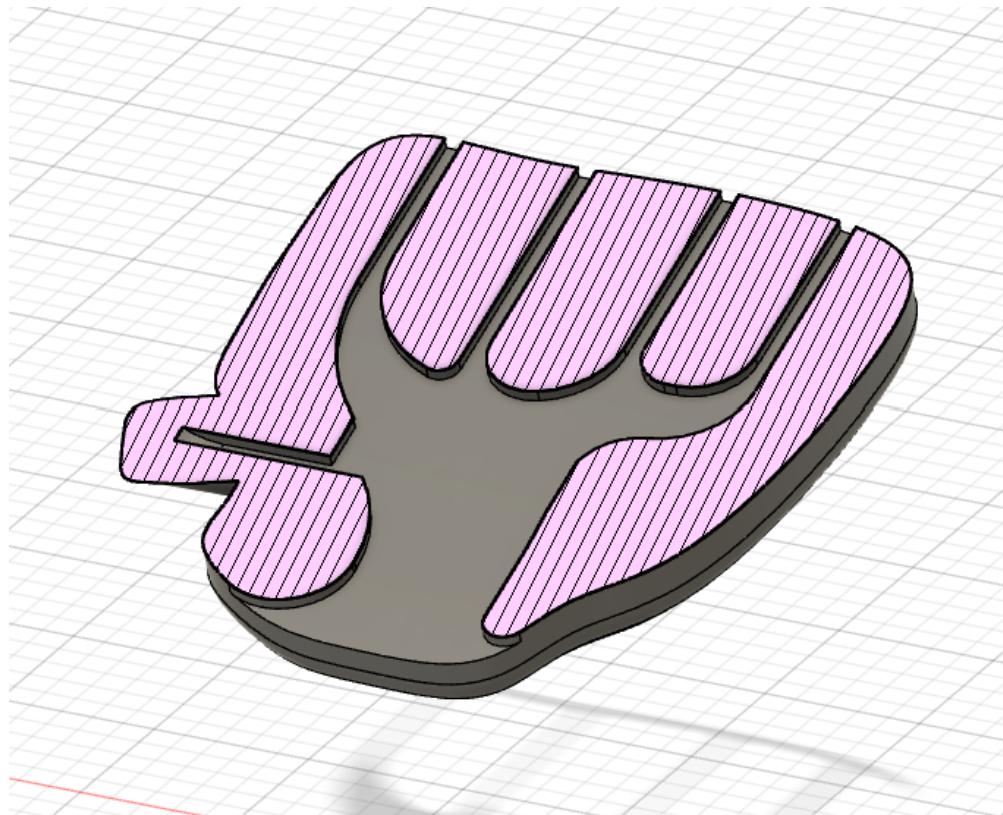
Das Konzept wird anhand einer Testhand realisiert, diese setzt sich im Wesentlichen aus zwei Komponenten zusammen: dem Motorblock, welcher für die Antriebsmechanik zuständig ist, und der Roboterhand, welche die eigentliche die Bewegungen der Motoren in der Bionic Hand umsetzen.



Das komplexeste Modell ist die Roboterhand, die aus mehreren Elementen besteht, darunter die Handfläche sowie die einzelnen Finger, die sich jeweils in drei Glieder unterteilen lassen. Der Mechanismus in jedem Finger erfüllt dieselbe Funktion: Durch ziehen an der Schnur verkürzt sich ihre Länge, was dazu führt, dass sich der jeweilige Finger zusammenzieht. Im Detail betrachtet beschränkt sich der Mechanismus des Fingers nicht nur auf das bloße Ziehen an ihm. Der Finger unterteilt in weitere Elemente. Er besteht aus drei Gliedern, von denen jedes eine Abschrägung an beiden Kanten, die zum nächsten Glied ausgerichtet sind, aufweist. Durch die Verjüngung der Kanten, kann beim sogenannten Falten des Fingers dafür gesorgt werden, dass sich der Finger auf kleineren Raum zusammenziehen oder auch falten kann.



Wie in dieser Grafik ersichtlich wird hier der Querschnitt aller Finger dargestellt, dabei ist es nicht von Relevanz welches der drei Fingerglieder hier genommen wird. Alle Glieder, das unterste, das mittlere sowie das oberste Glied haben eine gemeinsame Eigenschaft: Durch jeden Finger verlaufen drei Tunnel. Der oberste Tunnel hat den Zweck einen Durchgang für die Angelschnur zu schaffen, an dieser wird gezogen und bewirkt das Falten des Fingers. In den beiden unteren Tunneln oder auch Kanälen, welche einen ersichtlich größeren Durchmesser von XX mm besitzen verläuft das Elastomer, ein elastisches Band. Durch Falten des Fingers, welcher durch Zug an der Angelschnur ausgelöst wird, verlängert sich die Strecke auf, die sich das elastische Band spannen muss. Dies löst gegengleich zum Zug eine gegenwirkende Spannung aus. Anhand der durch das Band entstandenen Zugkraft, behält der Finger seine Position, er wird somit gesichert, um weiter in Richtung Zug der Angelschnur zu kippen und wiederum von der Angelschnur, um in Richtung des Bandes zu kippen. Neben der Funktion des Rückzuges verbinden die beiden Bänder alle aneinander liegenden Fingerglieder sowie auch das unterste Glied mit dem Handflächenelement. Dabei spielt auch die Position der Tunnel für das Band eine wesentliche Rolle, denn diese verhindern durch ihre Parallele Anordnung, an den unteren äußeren Seiten des Gliedes, dass sich die Glieder nach rechts oder links neigen. Ebenso befindet sich an dem inneren Teil des Gliedes, welches die Fingerkuppe nachstellt, beim Fingerabdruck eine runde Einkerbung sowie ein rechteckiger Kanal. Diese Eigenschaft des Modells hält die Option eines optionalen Kraftsensors frei. Mit so einem Sensor könnte, bei Integration der Funktion auch die Druckkraft gemessen werden.



Verbunden sind alle Finger mit dem Element der Handfläche, dieses Element fungiert lediglich als Verbindungskomponente zwischen allen Fingern und dem Daumen. Im Querschnitt der Handfläche lässt sich erkennen, dass diese von innen einen Hohlraum beinhaltet. Dieser Hohlraum hat jeweils einen Kanal zu jedem der Finger, sowie Daumen. Dort soll später die Angelschnur durchgeführt werden. Nahe dem Handgelenk befindet sich eine große Öffnung, diese ist für alle fünf Schnüre gedacht und hat ausreichend Größe für die Schnüre und evtl. auch Kabel für die optionalen Kraftsensoren.

6.2.3.3 Fazit und Ergebnisse

6.2.4 Zweite Testhand (Inmoov)

6.2.4.1 Einführung

6.2.4.2 Realisierung und Zusammenbau

6.2.4.3 Fazit und Ergebnisse

6.2.5 Dritte Testhand (Projekt-Silikonhand)

6.2.5.1 Konzepterläuterung

6.2.5.2 Erste Versuche einer Gussform und Asuwertung

6.2.5.3 Verbesserungen und Realisierung (Gelenke im Guss)

6.2.5.4 Verbesserung der Gelenke

6.2.5.5 Entwurf einer neuen Gussform

6.2.5.6 Vorbereitung und Probleme beim Guss

6.2.5.7 Konzeptverbesserung

6.2.5.8 Fazit und Stellungnahme (Konzept verworfen)

6.2.6 Vierte Hand

6.2.6.1 Erfahrung und Konzepterläuterung

6.2.6.2 Erster Entwurf

6.2.6.3 Verbesserungen – zweiter Entwurf

6.2.6.4 Realisierung und Aufbau

6.2.6.5 Versuche...

7 Hardware Realisierung

7.1 Eingabesubsystem

7.1.1 Grundlegende Voraussetzungen Laci

Die Hardware des Eingabesubsystems muss einige Kriterien erfüllen, um schlussendlich voll funktionfähig in das Gesamtsystem eingebaut werden zu können. Zunächst ist die Größe der Schaltung, als mit der wichtigste Punkt zu nennen. Da es bei diesem Projekt nicht nur um die Funktionalität, sondern auch um ein ergonomisches Benutzererlebnis geht, sollte die entgültige Platine auf dem Handschuhrücken nicht größer als 4cm x 4cm sein. Beim Design der Elektronik muss durch die Größenrestriktion natürlich darauf geachtet, dass durch diese keine Einbußen in Bezug auf die korrekte und sichere Funktion des Projektteils entstehen. Übermäßige Wärmeentwicklung ist ebenfalls zu vermeiden, da diese auf lange Zeit unangenehm für den Endnutzer ist. Die Versorgung der Schaltung sollte möglichst über einen kleinen und portablen Akku geschehen, um dem Benutzer das bestmögliche Erlebnis zu bereiten. Dieses Feature ist allerdings optional und ist daher nicht garantiert zur Verwendung bereit. Über einen USB Anschluss soll der Mikrokontroller programmierbar sein und die Schaltung auch für Test -und Wartungszwecke versorgt werden können. Das Maximalgewicht darf 500g nicht übersteigen.

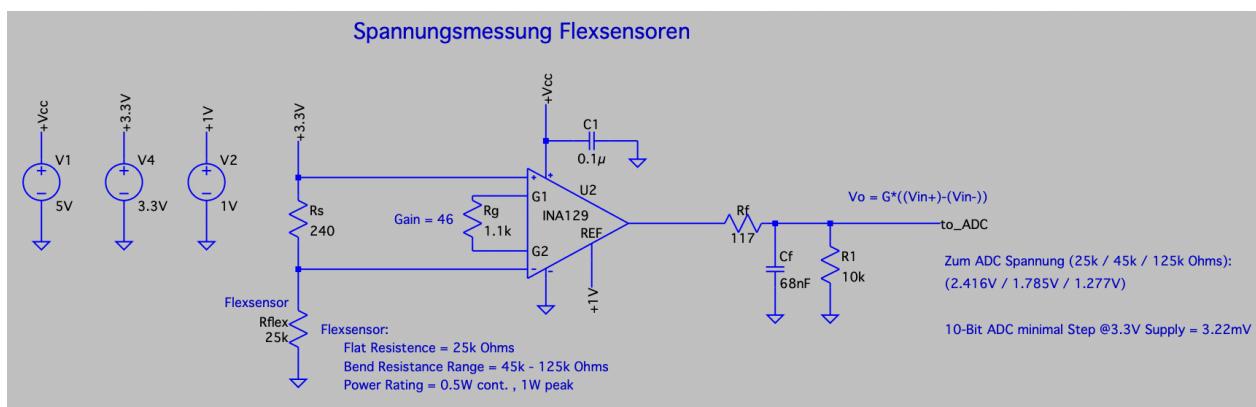
7.1.2 Überlegungen, Simulationen und Berechnungen Laci

7.1.2.1 Bewegungserfassung der Fingerbeugung

Die Bewegungen des Benutzers müssen gemessen werden können. Das bedeutet, dass eine Form von Messschaltung notwendig ist um die Beugung der Finger interpretieren zu können. Dies könnte man durch das Messen des Beugungswinkels realisieren. Allerdings hat jeder Finger drei Gelenke, wodurch man diese auch bei der Roboterhand individuell steuern müsste. Die zweite Möglichkeit wäre, durch eine visuelle Aufnahme die Bewegung des Handschuhs und dadurch des Benutzers aufzuzeichnen. Da dies allerdings nur in dafür vorgesehenen, mit Kameras ausgestatteten, Räumen funktionieren würde, ist dies für uns auch keine sinnvolle Möglichkeit. Schließlich haben wir uns für die Erfassung der Fingerbewegungen mittels Flexsensoren entschieden. Diese ändern den Widerstand je nach der aktuell vorherrschenden Beugung. Bei dieser Art der Bewegungserfassung muss man nicht jedes Fingergelenk einzeln steuern und braucht auch keine externen Kameras. Somit ist bei dieser Methode der Datenerfassung ein sehr flexibler Verwendungsbereich des Handschuhs gewährleistet. Um die Änderungen der Widerstandsstreifen messen und verarbeiten zu können ist nun eine Schaltung notwendig. Diese muss Wertdifferenzen erkennen und in ein geeignetes Format zur Weiterverarbeitung mit einem Mikrokontroller umwandeln können.

7.1.2.2 Auslesen der Sensoren

Das Auslesen der Flexsensoren kann durch einen einfachen Spannungsteiler erfolgen. Dabei ist die Genauigkeit allerdings nicht optimal und ist daher nicht für unsere Anwendung geeignet. Als Lösung für dieses Problem haben wir an eine OPV-Messschaltung gedacht. Diese soll mit einem Shuntwiderstand die Spannungsdifferenz messen, die sich bei einer Veränderung des flexiblen Widerstands ergibt. Durch eine geeignete Verstärkung des OPVs kann diese mit einer Referenzspannung verglichen werden.



7.1 Eingabesubsystem

Die Flexsensoren (Rflex) beziehen ihre Versorgung über einen Shunt-Widerstand (Rs). Je nach Belastung, ändert sich der Spannungsabfall an diesem (Je größer die Beugung des Sensors, desto kleiner ist der Spannungsabfall). Die Spannungsdifferenz am Shunt-Widerstand wird von einem Operationsverstärker verstärkt. Bei der Auswahl des OPVs sind einige Punkte zu beachten, um eine korrekte und genaue Erfassung der Fingerbeugung zu gewährleisten.

Folgende Kriterien müssen folglich bei der Wahl des Operationsverstärkers beachtet werden:

- Ausgangspegel bei gewählter Versorgungsspannung:

Zunächst wurde das Kriterium der Versorgungsspannung betrachtet. Da wir maximal 5V Gleichspannung in der gesamten Schaltung verwenden wollen, muss der OPV mit dieser geringen Spannung immer noch verstärken. Da am positiven Verstärkereingang eine maximale Spannung von 3.3V anliegt, muss dies bei Verstärkern mit einer geeigneten Supply Range auch mit nur 5V Versorgungsspannung gewährleistet sein.

- Referenzspannung:

Ein weiteres Kriterium ist das vorhanden sein eines Referenzspannungsanschlusses. Da der OPV keine Rail-to-Rail Technologie besitzt, muss der Ausgangsspannungspiegel auf ein gewisses minimum angehoben werden. In unserem ist dies +1V. Würde diese Referenzspannung nicht vorhanden sein, so würde der OPV falsche Werte erzeugen, da dieser erst ab einer verstärkten Spannung am Ausgang von ca. 750mV korrekt funktioniert.

Aufgrund dieser Kriterien und der Notwendigkeit von Genauigkeit und geringer Störungseigenschaften, viel die Wahl des Operationsverstärkers auf den INA129 instrumentation amplifier.

Der Shunt-Widerstand wurde nicht berechnet. Dieser wurde einfach durch probieren inder Simulation bestimmt.

Ein Tiefpassfilter (Rf und Cf) ist hinter den Ausgang des OPVs geschaltet, um mögliche Spannungsstörungen (Ripple), zusätzlich zu dem ohnehin schon sehr störungsfreien Ausgangssignal des INA129, herauszufiltern. Der zu GND geschaltete Widerstand (R1), entlastet den Eingang des folgenden ADCs. Der Tiefpassfilter wurde folgendermaßen dimensioniert.

7.1.2.3 Berechnung des Tiefpassfilters

$$f_g = 20\text{kHz} \quad \tau = \frac{1}{\omega_g} = \frac{1}{2\pi * 20\text{kHz}}$$

$$f_g = \frac{\omega_g}{2\pi} \quad \tau = R * C$$

$$C = 68\text{nF} \quad R = \frac{\tau}{68\text{nF}} = 117\Omega$$

7.1.2.4 Berechnung der OPV Verstärkung und Dimensionierung des Shuntwiderstands

Verstärkungsgleichung laut Datenblatt: $G = 1 + \frac{49.4k\Omega}{R_g}$
diemensionierung shuntwiderstand noch einfügen

Gain gewählt mit 46. $R_g = 1.1k\Omega$

Die Verstärkung wurde so gewählt, dass diese mit dem Shunt-Widerstand für den ADC optimal geeignet ist. (Simulation)

Der Shuntwiderstand wurde nicht wirklich berechnet. Dieser wurde durch probieren in der Simulation ermittelt. Eine Berechnung des Shunts wäre nicht wirklich Zielführend gewesen, da diese normalerweise bei Schaltungen mit hohen Strömen verwendet werden. Da sich die Flexsensoren allerdings in einem Widerstandsbereich von $25k\Omega - 125k\Omega$ befinden, benötigen diese nicht viel Strom, wodurch schon zu erwarten war, dass ein relativ hoher Wert benötigt wird. Schlussendlich wurden 240Ω gewählt, da dieser Widerstand bei sowohl voller, als auch geringer Biegung der Flexsensoren, eine gute Spannungsdifferenz für die Verstärkung mit dem OPV liefert.

7.1.2.5 Umwandlung der Differenzwerte in ein geeignetes Format

Um nun die analogen Ausgangswerte des Operationsverstärkers nach der Verstärkung der Spannungsdifferenzen am Flexsensor für den Mikrokontroller möglichst effizient und brauchbar zu machen, ist eine Umwandlung in ein digitales Signal notwendig. Dies Funktion wird mit mit einem ADC umgesetzt. Bei der Wahl dieses Logikbauteils, sind, wie beim OPV, einige Kriterien zu beachten um die korrekte Funktion der Schaltung weiterhin zu gewährleisten.

Folgende drei Kriterien sind maßgeblich bei der Wahl der Analog-Digital-Wandlers zu beachten:

- Genauigkeit, Auflösung und Aussteuerbereich:

$$\text{Aussteuerbereich} = 0 - 3.3V$$

bei 10Bit ADC: $LSB = 3.22mV$

Wegen der 1V Referenzspannung des OPVs ist der Ausgangspegel 1V - 3.3V

$$ADCAusgangsstufen = \frac{2.3V}{3.22mV} = 713$$

7.1 Eingabesubsystem

Der reale Ausgangsspegl des OPVs liegt wie bei der Simulation in Punkt Auslesen der Sensoren ermittelt zwischen 1.277V bis 2.416V. Das bedeutet, dass eine Auflösung von 10Bit und ein Austeuerbereich von 0V - 3.3V ausreichend ist, um den kompletten Wertebereich sehr genau abzudecken. Zusätzlich haben wir uns noch dazu entschieden alle Logikbauteile die eine Kommunikation mit dem Mikrokontroller erfordern mit dem I2C Bussystem anzuschließen. Daher muss der Analog-Digital-Wandler diese Art der Kommunikation ebenfalls unterstützen. Aufgrund dieser Auswahlkriterien ist die Wahl des Bauteils auf den MAX11611 gefallen.

7.1.2.6 Vervielfachung der Schaltung für alle Flexsensoren

Um die zuvor beschriebene Schaltung nun nicht für jeden Flexsensor einzeln bauen zu müssen, wäre eine Art Schalter vorteilhaft. Dieser soll in Sekundenbruchteilen zwischen allen Sensoren durchschalten. Das bedeutet also, dass zwischen dem Shunt-Widerstand und R_{flex} in der Simulation dieses Bauteil platziert werden muss.

Für diesen Zweck ist ein Multiplexer bestens geeignet. Folgende Kriterien muss dieser erfüllen.

- Versorgung und Kanäle:

Die Versorgung muss an den Rest der Schaltung angepasst sein, das bedeutet, dass entweder 3.3V oder 5V in Frage kommen. Bei einer Anzahl von einem Flexsensor pro Finger, also fünf, muss der Multiplexer mindestens 5 Kanäle aufweisen, wobei mehr Kanäle für mögliche zukünftige Erweiterungen kein Problem sind. All diese Eingänge müssen auf einen Ausgang geschalten werden.

- Ansteuerung:

Die Ansteuerung muss mit einem Mikrokontroller möglich sein. Hier bleibt also die Wahl zwischen analogen und digitalen Anschlüssen, oder ein I2C Anschluss um mit dem Rest der Schaltung kompatibel zu bleiben.

Folglich viel die Wahl auf den MUX508IDR. Dieser ist ein 8:1 Channel Multiplexer, der über 5V versorgt werden kann und über drei Analoganschlüsse für die Auswahl des Kanals verfügt.

7.1.2.7 Bewegungserfassung der Handgelenksdrehung

Um die Drehung des Handgelenks zu erfassen ist ein anderer Sensor als ein Flexsensor notwendig. Dieser neue Sensor muss die Funktion eines Gyroskops haben und folglich die Positionen von X, Y -und Z-Achse übermitteln. Dieser Übermittlung muss per I2C-Bus erfolgen, um die Kompatibilität mit der restlichen Schaltung zu ermöglichen.

Ausgewählt wurde der Sensor MPU-6000, da dieser schon eingebaute ADCs hat, um die

Achswerte vor der Übertragung zu digitalisieren.

7.1.2.8 Mikrokontroller

Bei der Auswahl des Mikrocontrollers wurden sehr viele Aspekte beachtet. Dieser ist das Herzstück der Schaltung und ermöglicht allen Komponenten zusammen zu funktionieren und diese auch zu steuern.

Folgende Kriterien müssen von dem verwendeten Mikrocontroller folglich erfüllt werden:

- Performancerelevante Ressourcen:

Zu beachten ist hierbei vor allem der vorhandene Flash-Speicher, die CPU und der On-Chip Memory. Hierbei gilt grundsätzlich natürlich je mehr, desto besser. Das gleiche gilt ebenfalls für den Flash-Speicher.

- Versorgung und Anschlüsse:

Um mit der Schaltung kompatibel zu sein, muss der Mikrocontroller mit 3.3V oder 5V versorgt werden können. Zusätzlich sollte der Chip möglichst wenig Leistung brauchen. Es sollten mindestens zehn I/O-Anschlüsse vorhanden sein.

- Unterstützte Bussysteme:

Da wir bei der Schaltung einheitlich auf das I2C Bussystem setzen, muss zumindest dieses von dem gewählten Mikrocontroller unterstützt werden. Als zweite Pflichtunterstützung gilt die UART-Kommunikation. Die Funktion und Notwendigkeit dieser wird in Punkt **(externe Anschlüsse)** erläutert.

- Möglichkeiten der drahtlosen Übertragung:

Da die Flexsensorwerte drahtlos übertragen werden müssen, muss der Mikrocontroller eine Form dieser Übertragung unterstützen. Vorzüglicherweise ist die Antenne für die Übertragung schon vorhanden, damit weitere Schaltungsteile nicht notwendig sind. Hier kämen zum Beispiel Bluetooth oder Wifi in Frage.

- Programmierbarkeit:

Der Chip muss mit einer schon verfügbaren Entwicklungsumgebung programmierbar sein. Wichtig ist in diesem Bezug vor allem die Debugmöglichkeit, da bei einigen Mikrocontrollern ein extra Debugtool um viel Geld erworben werden muss. Eine Programmierung im Terminal kommt ebenfalls nicht in Frage.

- Größe und Formfaktor:

7.1 Eingabesubsystem

Schlussendlich dürfen sich alle Kriterien jedoch nicht zu sehr auf die Größe des Mikrocontrollers auswirken. Diese sollte natürlich so klein wie möglich sein und trotzdem Bauteile wie eine Antenne aufweisen.

Nach beachtung aller Kriterien haben wir uns für einen ESP32 Mikrokontroller entschieden. Hierbei blieb allerdings die Wahl zwischen dem reinen Chip und dem Modul, bei dem die Antenne und andere Funktionalitäten, die andernfalls selbst gebaut werden müssten, schon integriert sind. Nach Abwägungen von Größe und Performance, haben wir uns für das ESP32-WROOM-32E-N16 Modul entschieden. Dieses hat eine integrierte Antenne, reichlich Performance und viel Flash-Speicher. Der Formfaktor ist bei allen diesen Funktionalitäten immer noch im Rahmen.

7.1.2.9 Akkuversorgung

Da es nicht praktikabel ist die Schaltung des Handschuhs dauerhaft mit einem Kabel zu versorgen, soll dies schlussendlich durch einen Akku oder eine Batterie erfolgen. Entschieden haben wir uns für eine Lithium-Polymer-Akku (LiPo), da diese trotz geringer Größe verglichen mit anderen Akkuarten eine hohe Kapazität besitzen.

Die notwendige Kapazität für eine bestimmte Betriebsdauer wurde folgendermaßen berechnet:
Berechnung Akkukapazität hier einfügen

Um den LiPo-Akku nicht jedes mal extern aufladen zu müssen, haben wir uns eine Schaltung überlegt, die dies auch mithilfe des schon vorhandenen USB-C Anschlusses für das Programmieren des Mikrocontrollers verwendet wird. Dazu ist allerdings eine relativ komplizierte Schaltung notwendig, weswegen bei vielen Produkten, die LiPo-Akkus verwenden, extra Ladegeräte gekauft werden müssen. Dies wollten wir vermeiden und haben dementsprechend viel Zeit in die Reserche für eine funktionierende LiPo-Kontroller-Schaltung investiert.

Zunächst ist jedoch wichtig zu wissen, welchen Akku wir überhaupt erwenden. Entschieden haben wir uns für den **LiPo-Akku**.

7.1.3 Versuchsaufbauten und Messungen **Laci**

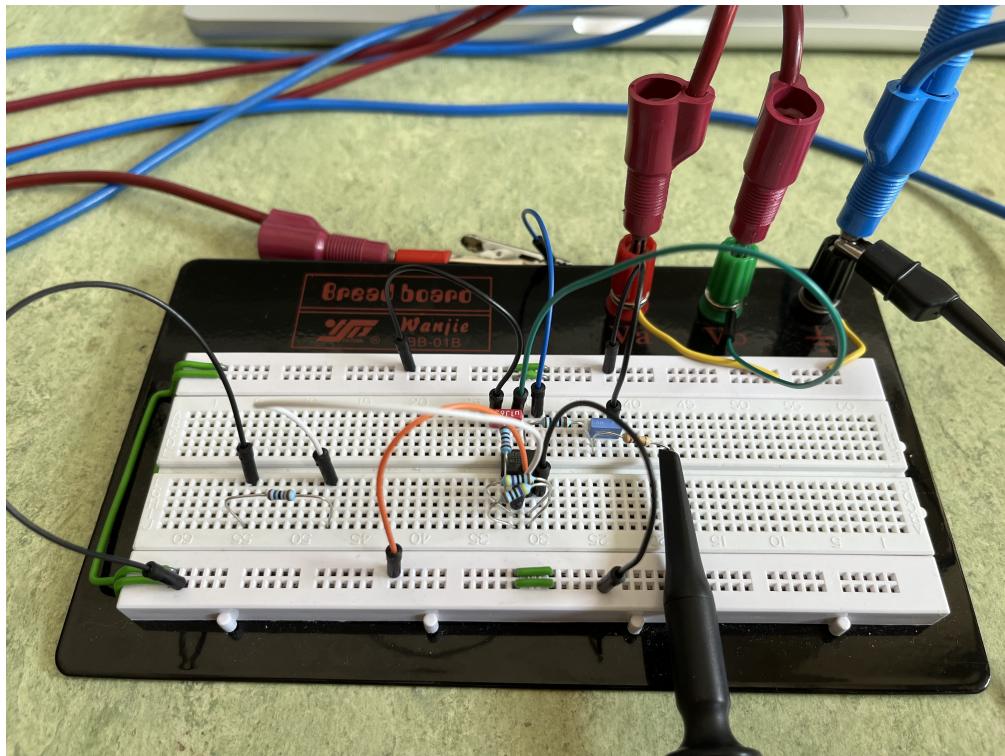
In den folgenden Punkten werden die praktischen Tests, der in Punkt 7.1.2 beschriebenen Konzepte und Überlegungen, erläutert.

7.1.3.1 Messschaltung der Flexsensoren

Zunächst wurde die Schaltung aus Punkt 7.1.2.2 auf einem Steckbrett aufgebaut. Das Ziel der Messung ist es, den Widerstand bei jeder Stellung eines Flexsensoren zu wissen. Dies ist wichtig, um die Daten der Sensoren korrekt auszulesen und an die Roboterhand zu senden.

Werden die Widerstandswerte nicht korrekt gemessen, so bewegt sich die Roboterhand nicht entsprechend nach den Bewegungen des Benutzers.

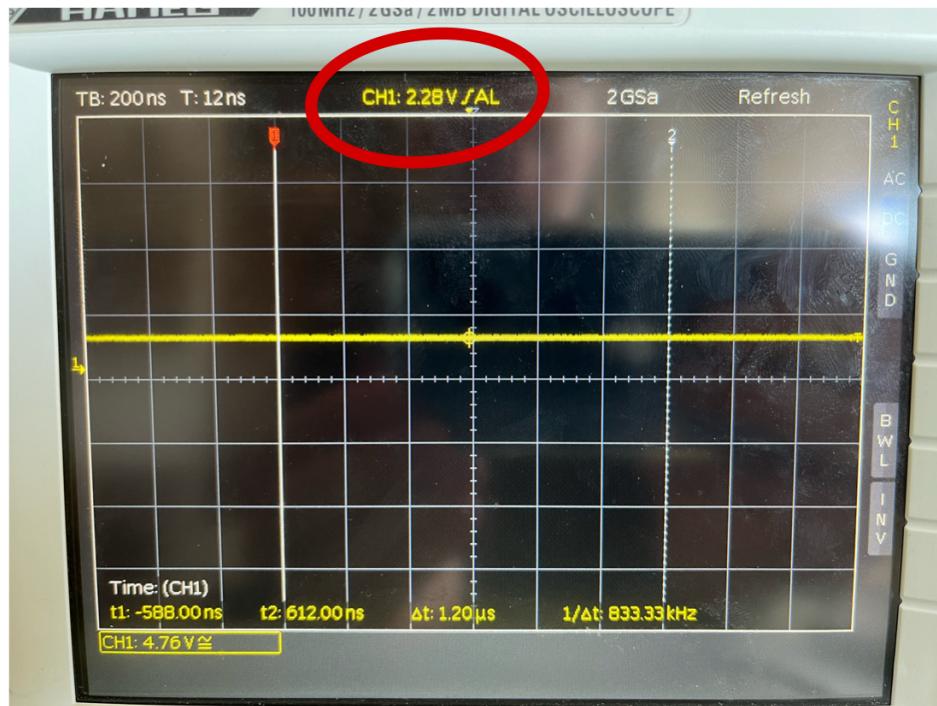
Die zu messende Größe ist die Ausgangsspannung des OPVs, die sich je nach Widerstand der Last verändert. Die Last wird in unserem Versuchsaufbau von drei Widerständen simuliert, da wir die Flexsensoren zu dem Zeitpunkt der Messung noch nicht zu Verfügung hatten. Wir haben die Lastwiderstände mit 27k, 68k und 118k gewählt, da der Widerstandsbereich der Sensoren bei 25k – 125k liegt. Im nächsten Punkt werden die Messergebnisse dargestellt.



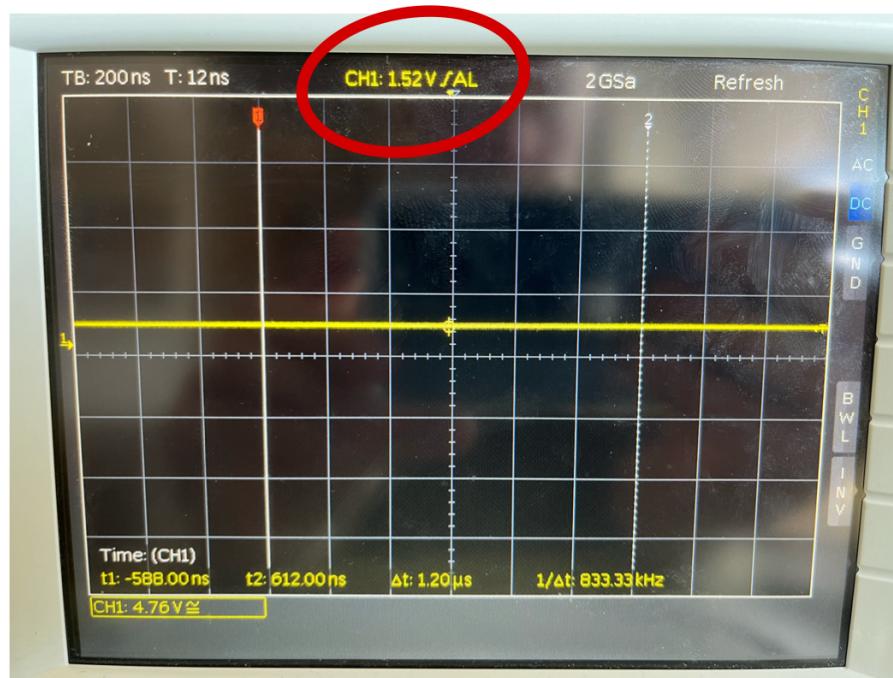


+3.3V für die Versorgung des Flexsensors (Last), simuliert mit drei normalen Widerständen.
+1V als Referenzspannung für den INA-129.
+5V zur Versorgung des INA129.

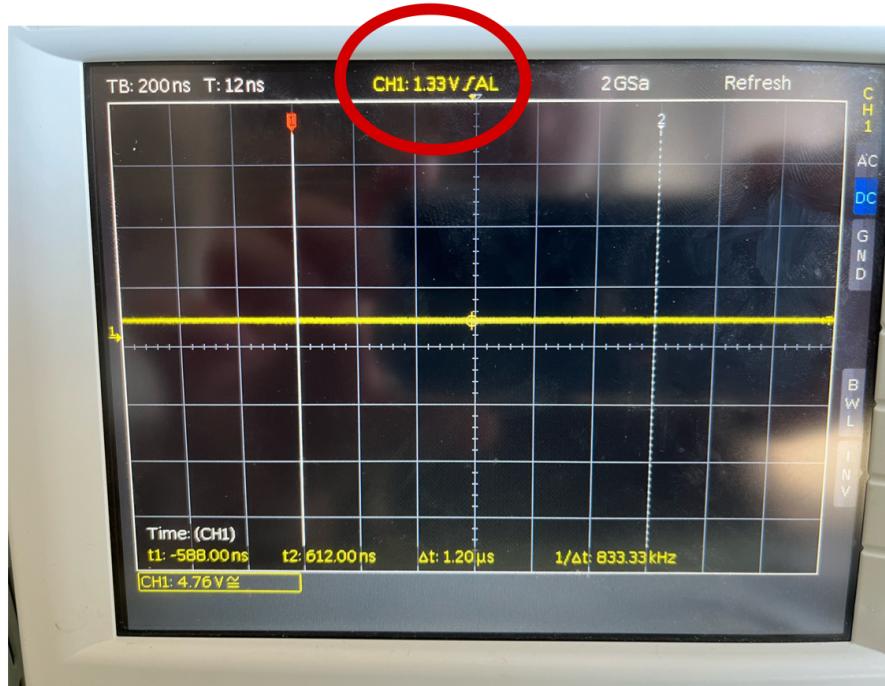
7.1.3.2 Messergebnisse



Das obige Oszilloskopbild zeigt die, mit einem Tastkopf, gemessene Ausgangsspannung des Operationsverstärkers, bei einem Flexsensorwiderstand von $27\text{k}\Omega$. Die gemessene Spannung ist rot eingekreist und beträgt 2.28V. Da bei der Simulation in LTspice mit einem Widerstand von $25\text{k}\Omega$ eine Ausgangsspannung von 2.416V resultierte, ist anzunehmen, dass 2.28V für den gewählten Widerstand angemessen sind. Daraus kann man schließen, dass die Schaltung für diesen Widerstandswert des Flexsensors korrekt funktioniert.



Nun wurde die gleiche Messung erneut durchgeführt, allerdings mit einem Flexsensorwiderstand von $67\text{k}\Omega$. Wir zu erwarten, ist die Ausgangsspannung des OPVs gesunken, da der Spannungsabfall am Shuntwiderstand nun geringer ausfällt. Zu erwarten war ein Spannungswert von rund 1.5V. Dieser Pegel wurde mit 1.52V fast genau getroffen, wodurch die funktionsfähigkeit der Schaltung weiter sichergestellt wurde.



Schlussendlich wurde noch ein Flexsensorwiderstand von $118\text{k}\Omega$ simuliert, um den nahezu Maximalwert des Sensors zu simulieren. Zu erwarten waren rund 1.3V. Die Messung bestätigt die Überlegungen, wodurch die Funktionalität dieser Schaltungskomponente bewiesen wurde.

Zusätzlich ist nun die Notwendigkeit einer Referenzspannung von +1V bewiesen worden, da ohne dieser ein theoretischer Spannungspegel von nur 500mV am Ausgang des INA-129 aufgetreten wäre. Dies ist praktisch allerdings nicht möglich, da der OPV über keine Rail-to-Rail Technologie verfügt, wodurch er nur eine minimale Ausgangsspannung von rund 800mV ausgeben kann.

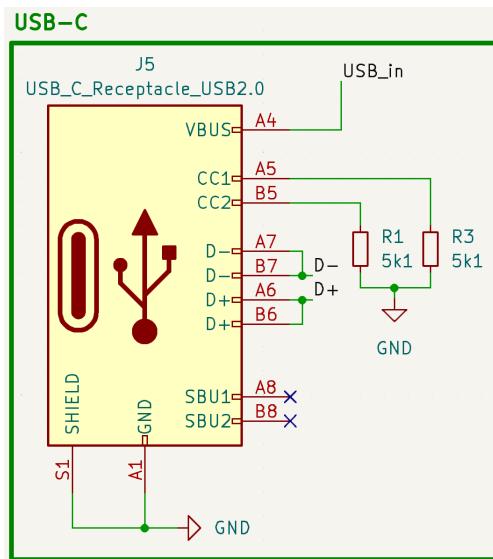
7.1.4 Schaltungsdesign Laci

Nach den generellen Überlegungen und Versuchsaufbauten, die zu der Entwicklung der Schaltung des Eingabesubsystems beigetragen haben, wird in diesem Punkt das genaue Schaltungsdesign erläutert.

7.1.4.1 Externe Anschlüsse

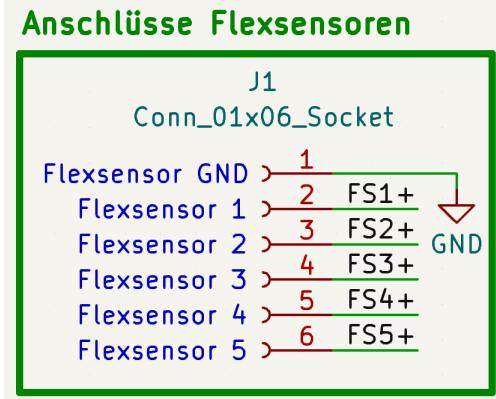
- Anschluss zur Programmierung des Mikrocontrollers:

Für die Programmierung des Mikrocontrollers wird ein USB Anschluss benötigt. Dieser sollte möglichst kompatibel mit den neuesten Computern sein, weswegen wir uns für USB-C-Typ2.0 entschieden haben. Um das Serial Signal der USB Schnittstelle für den Mikrocontroller lesbar zu machen, muss dieses für die UART-Kommunikation umgewandelt werden. Hierzu muss der Mikrocontroller diese auch unterstützen. Mit einer Serial-UART-Bridge, wird das Signal umgewandelt. Der Chip wird von +3.3V versorgt. Von der USB-Buchse werden die beiden Datenleitungen D+ und D- mit verbunden. Anschließend wird das umgewandelte Signal über die UART-Leitungen an den ESP32 Mikrocontroller übertragen. Wichtig zu beachten ist hierbei, dass die UART-Leitungen ausgekreuzt sein müssen. Die Funktion der Anschlüsse RTS und DTR wird in Punkt [Mikrocontroller](#) erläutert.



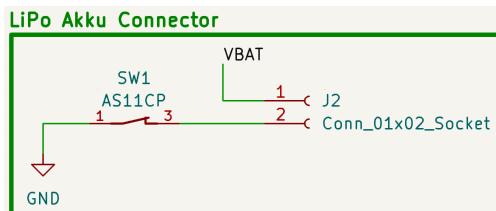
- Anschluss der Flexsensoren:

Die Flexsensoren könnten natürlich einfach angelötet werden, jedoch ist die einfache Wartung bei einem fehlerhaften Sensor ebenfalls zu berücksichtigen. Aufgrund dessen wird eine 6-Pin-JST-Buchse als Anschluss verwendet. Alle GND-Pins werden auf einen zusammengefasst, um möglichst viel Platz zu Sparen.



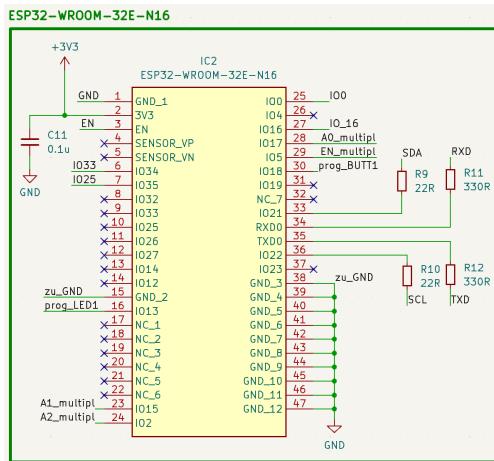
- Anschluss des Akkus:

Der Akku wird ebenfalls mit einer JST-Buchse mit der Schaltung verbunden anstatt diesen anzulöten. Da der Akku einen Versorgungs -und GND-Anschluss hat, wird eine 2-Pin-JST-Buchse verwendet.



7.1.4.2 Mikrokontroller

Der ESP32-Chip wird mit +3.3V versorgt. Wichtig zu beachten ist dadurch, das ein Logic-HIGH somit auch 3.3V und nicht 5V ist! Die Versorgung wird mit einem Kondensator stabilisiert. Für alle Busleitungen, also I2C und UART, wurden Widerstände in Serie hinzugefügt, um die Kommunikationsleitungen vor Spannungsspitzen oder Überspannung zu schützen. Die Funktion wäre auch ohne diese gegeben. Für die Datenleitungen SDA und SCL des I2c Busses sind zwei $10k\Omega$ PullUp-Widerstände vorgesehen. Zusätzlich wird ebenfalls der Anschluss IO16 mit einem PullUp-Widerstand auf 3.3V gezogen, da dies so vom Datenblatt vorgegeben wird. Die Funktionen der einzelnen Anschlüsse werden in den folgenden Punkten gemeinsam mit den damit verbundenen Bauteilen näher erläutert.



7.1.4.3 Mikrokontroller Buttons

In der Schaltung sind drei Taster verbaut. Diese sind alle mit dem Mikrokontroller verbunden und erfüllen verschiedene Funktionen.

- Upload Button:

Dieser Button ist mit dem IO0 Anschluss des ESP32 verbunden und muss bei dem Hochladen von Code kurzzeitig gedrückt werden, um den Mikrokontroller in den Upload-Modus zu versetzen. Der Pin IO0 ist standardmäßig für diese Funktion vorgesehen und sollte für nichts anderes verwendet werden.

- Reset Button:

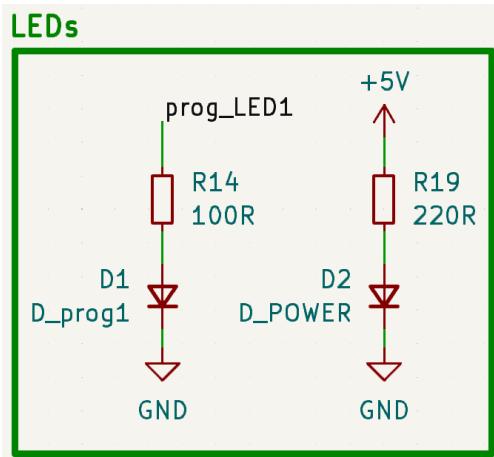
Dieser Button ist mit dem EN (Enable) Anschluss des ESP32 verbunden. Die Funktion dieses Tasters ist es, den ESP32 jederzeit zurücksetzen zu können falls dieser abstürzt oder ein anderweitiges Problem auftritt, durch das dieser nicht mehr korrekt funktioniert.

- Programmable Button:

Die Funktion dieses Buttons kann frei durch den programmierten Code gewählt werden.

7.1.4.4 Status LEDs

Die beiden Leuchtdioden sind als Statusanzeige gedacht. Eine POWER LED, die immer leuchtet wenn die Schaltung mit +5V versorgt wird. Die Funktion der anderen LED ist, sowie bei einem Button, frei wählbar und ist deswegen mit Pin IO13 des ESP32 verbunden.



7.1.4.5 Multiplexer

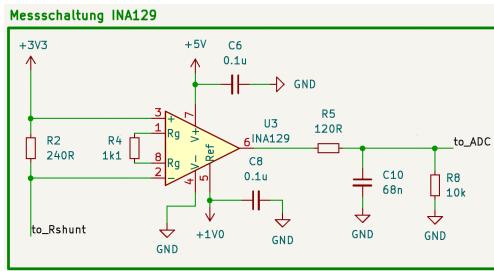
Der Multiplexer schaltet zwischen allen Flexsensoren durch und vermeidet somit die Messschaltung fünf mal bauen zu müssen. Die Verbindung zum ESP32 erfolgt über drei digitale Addresspins und einen Enable Pin. Je nachdem welche Bitkombination übermittelt wird, ändert sich die interne Schalterposition und somit der gerade aktive Kanal zur Messung eines Flexsensors.

7.1.4.6 Operationsverstärker

Für das Auslesen der Flexsensoren, wird eine Schaltung, wie in Punkt „Äuslesen der Sensoren“ beschrieben, benötigt. Da am Shuntwiderstand nur sehr wenig Spannungsabfall auftritt und daher die Spannungsdifferenz zwischen positivem und negativem Verstärkereingang sehr klein ist, muss das Signal verstärkt werden. Hierfür wird der INA129 Instrumentenverstärker verwendet. Dieser wird mit 5V versorgt, was für einen OPV eine relativ geringe Versorgungsspannung ist. Da die maximale Eingangsspannung der Verstärkereingänge allerdings nie mehr als 3.3V beträgt, ist dies kein Problem.

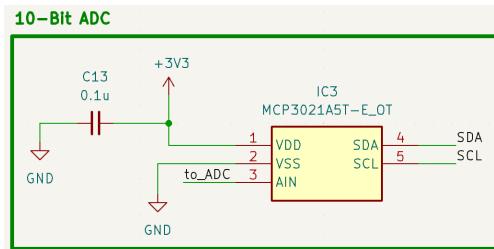
Die +1V Spannungsreferenz ist notwendig, da der ausgewählte Operationsverstärker nicht über Rail-to-Rail Technologie besitzt. Die kleinstmögliche Spannungsdifferenz am Eingang des OPV, wenn der Flexsensor seinen maximalen Widerstand von $125\text{k}\Omega$ erreicht, beträgt nur 6.3mV. Aufgrund der fehlenden Rail-to-Rail Fähigkeit, muss die Ausgangsspannung des OPV deshalb auf mindestens 800mV angehoben werden, um eine korrekte Funktion des OPVs zu gewährleisten. Deshalb wird eine Referenzspannung von 1V verwendet.

7.1 Eingabesubsystem



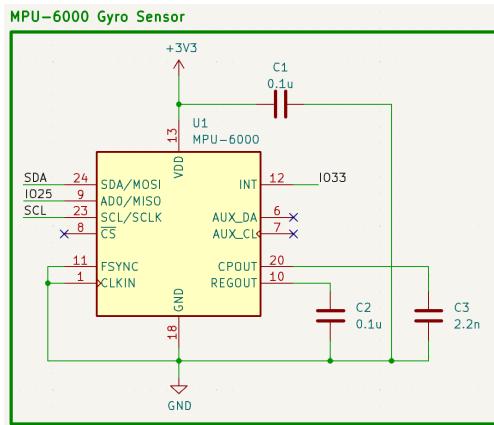
7.1.4.7 Analog-Digital-Wandler

Der Analog-Digital-Wandler ist dafür zuständig, die analogen Werte, vom Ausgang des Operationsverstärkers kommend, in digitale Signale umzuwandeln. Der OPV und der ADC sind über das Label toADC verbunden. Da der Chip über 3.3V versorgt wird, befindet sich der mögliche Aussteuerbereich zwischen 0V und 3.3V. Wie im Punkt Umwandlung der Differenzwerte in ein geeignetes Format berechnet, hat der ADC in unserer Schaltung ein LSB von 3.22mV. Da wir wissen, dass die kleinste Spannungsdifferenz am Shuntwiderstand 6.3mV ist und diese auch noch mit dem Faktor 46 verstärkt wird, kann festgestellt werden, dass der ADC mehr als genau genug für unsere Anwendung ist. Dies ist ein Vorteil, da bei der Programmierung anschließend nicht zwischen einzelnen ADC-Stufen unterschieden werden muss, sondern immer mehrere LSBs Unterschied auftritt. Die aktualisierten Werte, werden über die beiden I2C Leitungen an den Mikrokontroller übertragen.



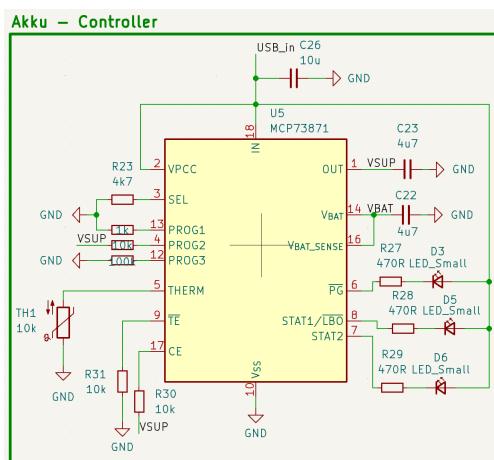
7.1.4.8 Gyroskop-Sensor

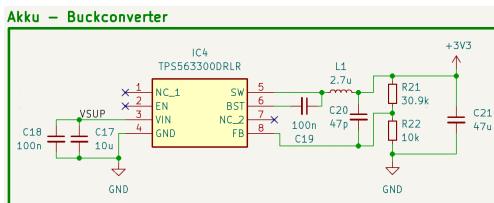
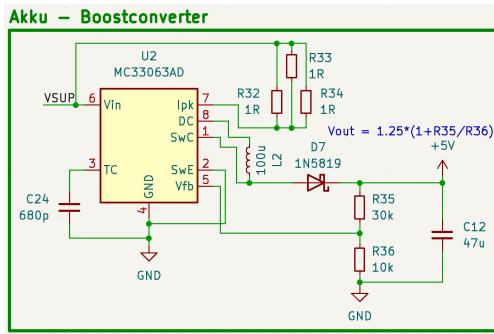
Der Gyroskopsensor ist dafür zuständig die Drehung des Handschuhs in X, Y -und Z Richtung zu erkennen. Die Versorgung basiert auf 3.3V und die Datenübertragung erneut mittels I2C-Bussystem. Der Unterschied bei diesem Chip ist allerdings, dass mehrere ADCs integriert sind, um die Positionsdaten der Achsen schon digitalisiert an den Mikrokontroller zu übergeben. AD0 wird dabei verwendet um die Adresse des Mikrochips festzulegen. Diese wird später benötigt um mit dem Sensor Daten austauschen zu können.



Am Pin CLKIN hätte man die Möglichkeit einen externen Referenztaktgeber anzuschließen. Bei unserer Anwendung ist der integrierte Taktgeber allerdings völlig ausreichend, weswegen der Anschluss mit GND verbunden und damit deaktiviert wurde. Der CS Pin wird nur für die SPI Kommunikation benötigt, weshalb dieser ebenfalls deaktiviert wurde. Das gleiche gilt für den Anschluss FSYNC. Die beiden AUX-Anschlüsse könnte man verwenden, um mit anderen I2C fähigen Sensoren direkt zu kommunizieren. Da dies allerdings unser einziger Sensorchip mit dieser Fähigkeit ist, bleiben die beiden Pins auch nicht verbunden. Die Kondensatoren sind vom Hersteller im Datenblatt vorgesehen und gewährleisten einen stabilen Betrieb.

7.1.4.9 Akku Versorgung

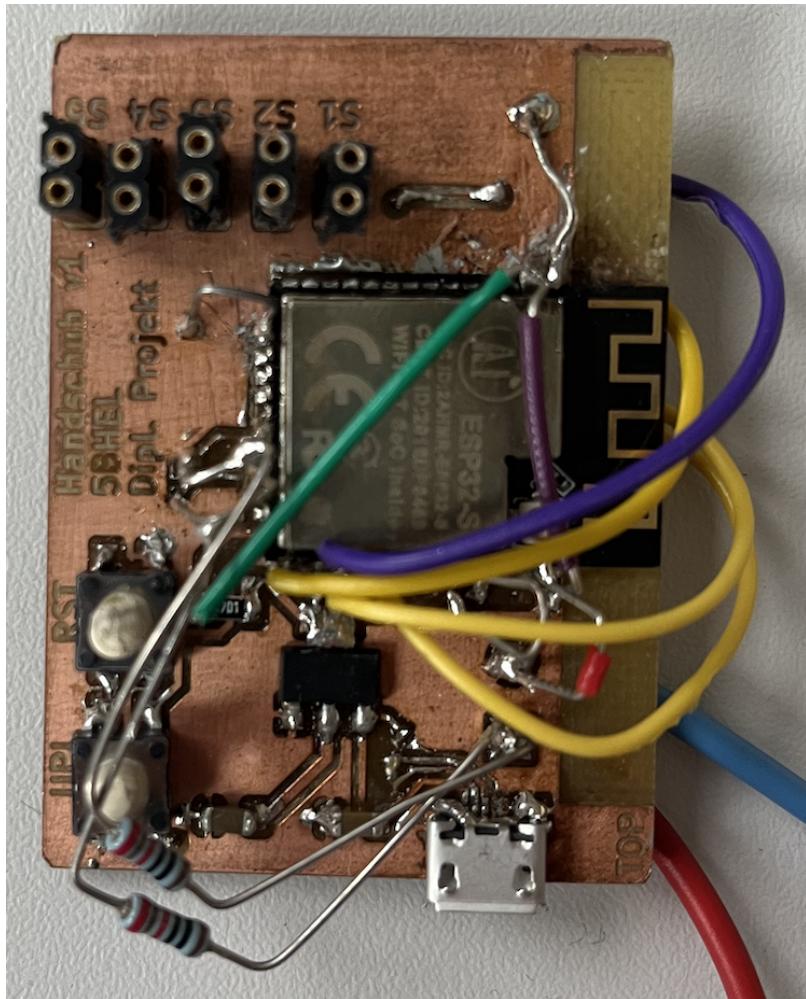




7.1.5 Platinendesign Laci

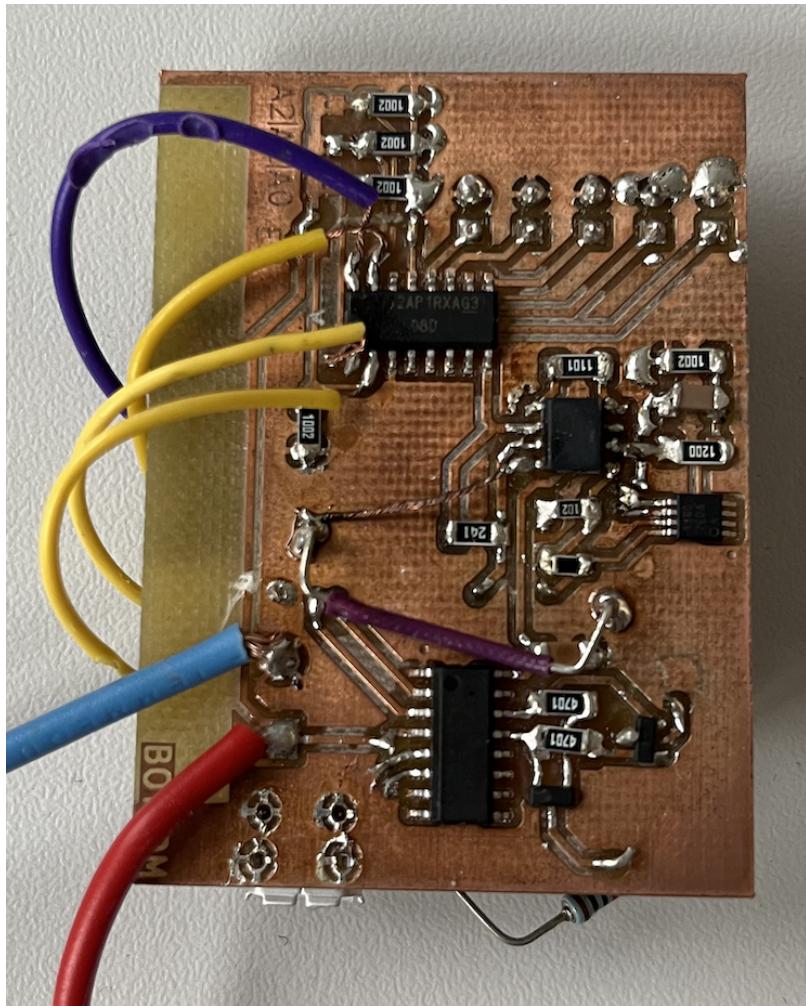
7.1.5.1 Erste Testplatine

Die erste Testplatine wurde in der schuleigenen Werkstatt, mithilfe einer Plattenfräse, gefertigt. Da das Design auch zu dem frühen Zeitpunkt des Projekts schon relativ kompliziert war, gab es bei der Fertigung einige Probleme. Aufgrund schon vorhandener Erfahrung, wurden die Bauteile mit möglichst großem Fottprint (1206) gewählt, um ein einfaches Löten per Hand zu ermöglichen. Da es ICs aber leider nur in einer, für das Bauteil festgelegten, Größe zu kaufen gibt, mussten Leiterbahnen mit einer Breite von nur 0.3mm verwendet werden. Dies führte beim Löten leider zum Ablösen dieser, weshalb einige Jumper-Kabel notwendig waren, um die kaputten Leiterbahnen zu ersetzen. Die Installation dieser Ersatzkabel, hat einige Zeit in Anspruch genommen, wodurch der Entwicklungsprozess der Hardware kurzzeitig verzögert wurde.



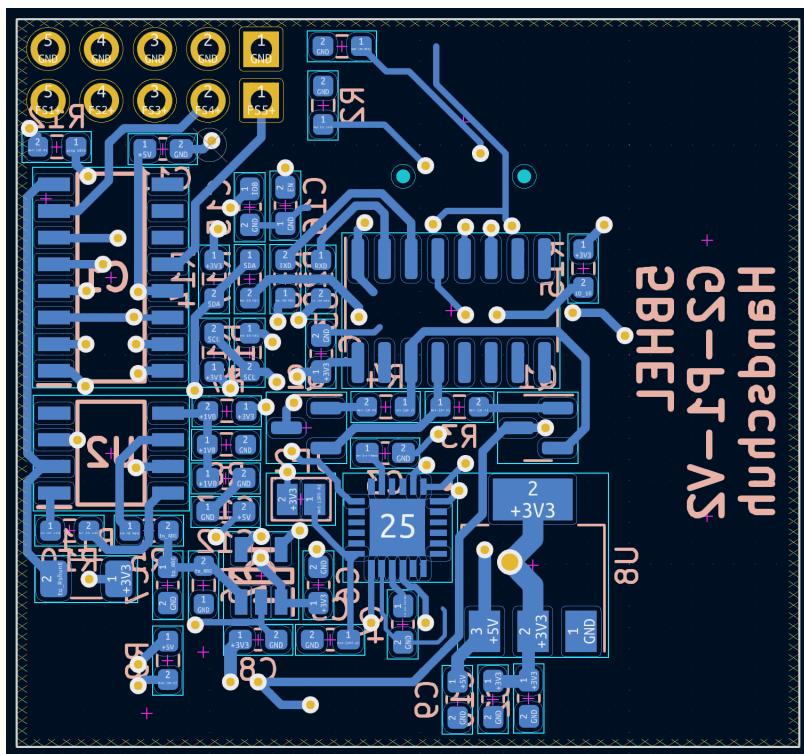
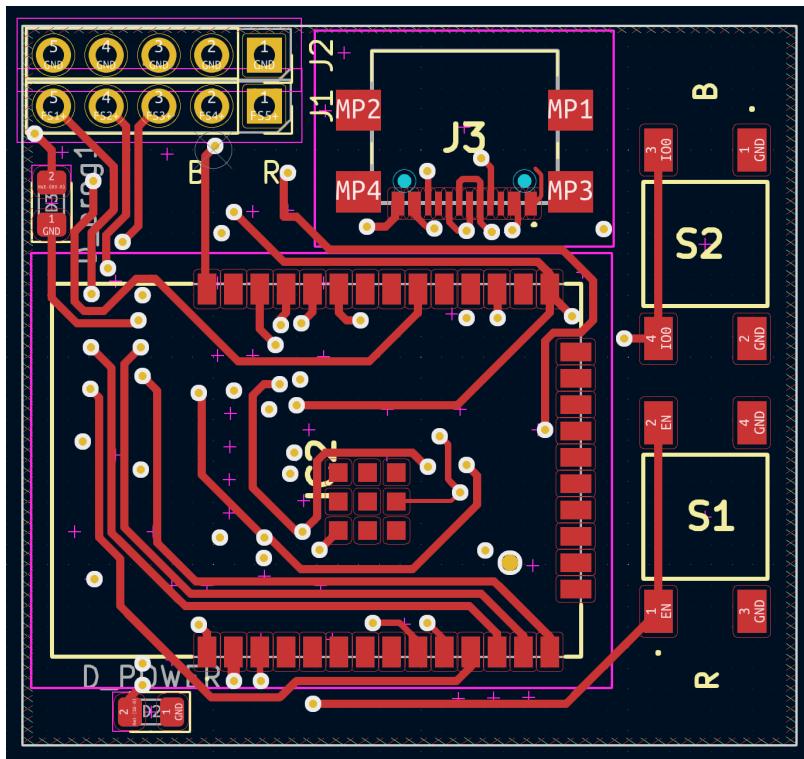
Zu sehen ist die Oberseite der ersten Testplatine des Eingabesubsystems. In der oberen linken Ecke des Bilds, sind die Anschlüsse für die 5 Flexsensoren zu sehen. Diese werden für Testzwecke mit Jumper-Kabeln verbunden, um ein schnelles Auswechseln der Sensoren und einsetzen von fixen Referenzwidersänden zu ermöglichen. Bei der Fertigung der Platne sind einige Leiterbahnen sehr dünn ausgefallen, weshalb einige Kabel zur erneuten Verbindung von Lötpads gebraucht wurden. Zu dem frühen Entwicklungszeitpunkt, wurde noch eine Micro-USB-Buchse verwendet, da diese größere Pins hat und das Löten somit erleichtert.

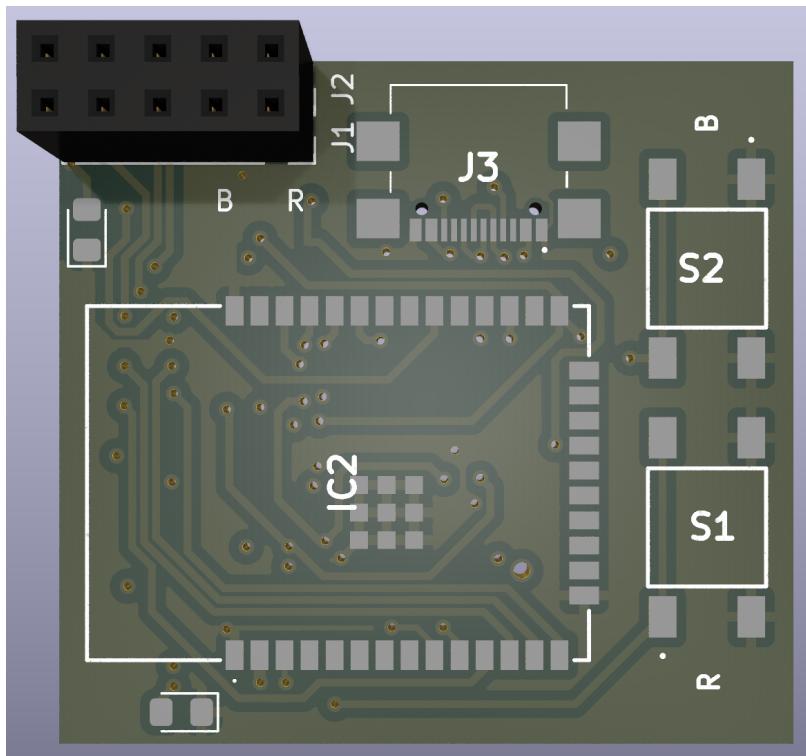
7.1 Eingabesubsystem

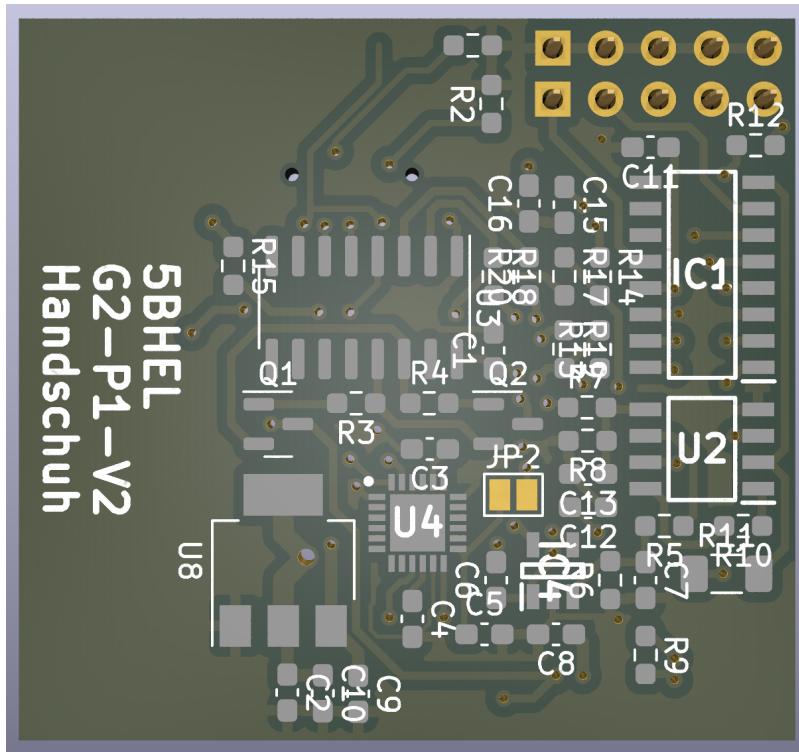


An der Unterseite, kann der Grund für die Fehler in der Fertigung erkannt werden. Da die verwendeten ICs mit einer maximalen Leiterbahnbreite von 0.3mm verbunden werden müssen, kam es, vor allem bei der Serial-UART-Bridge in der oberen linken Ecke des Bilds, zu Leiterbahnablösungen. Das blaue und rote Kabel stellt die Versorgung der Platine dar.

7.1.5.2 Zweite Version der Platine







7.2 Roboterhand

7.2.1 Grundlegende Voraussetzungen

Die Roboterhand ist die Ausgabe des Gesamtsystems und wird vom Eingabesubsystem gesteuert. Jeder Finger wird von einem Motor bewegt. Die ankommenden Daten müssen interpretiert und anschließend in ein geeignetes Format zur Ansteuerung der Motoren umgewandelt werden. Zusätzlich zu dieser grundlegenden Funktionalität der Ansteuerung, müssen auch noch einige weitere Aspekte beachtet werden. Hier sind zum Beispiel die möglichst geringe Größe der Schaltung und die trotzdem ausgiebigen Funktionen zu nennen. Dazu zählen visuelle Indikatoren für diverse Parameter, Schalter und Taster, Anschlüsse und Erweiterungsmöglichkeiten. Die detaillierten Entwicklungs -und Designschritte, werden in den folgenden Punkten näher erläutert.

7.2.2 Überlegungen, Simulationen und Berechnungen **Laci**

7.2.2.1 Aktorik zur Fingerbewegung

Bei der Aktorik zur Bewegung der Roboterfinger, gibt es, wie bei Sensorik zur Erfassung der Bewegungen, ebenfalls unzählige Methoden und Konzepte zur Auswahl. Bei schon etablierten

Herstellern von bionischen Händen werden fast ausschließlich lineare DC Motoren verwendet. Diese sind sehr hochpräzise, sehr gut gefertigt und haben für ihre Größe sehr viel Kraft. Nachteile sind allerdings die hohen Preise und die vergleichweise kompliziertere Ansteuerung. Außerdem sollten diese Motoren in präzise gefertigten Produkten Anwendung finden, die möglichst wenig Reibung aufweisen und gelagerte Gelenke haben. Da wir in der Schule die Möglichkeit zur Fertigung eines solchen Produkts nicht haben und dies ebenfalls zu teuer wäre, haben wir uns entschieden diese Art der Aktorik, obwohl es die beste Wahl wäre, nicht zu verwenden. Stattdessen haben wir uns für die Verwendung von Servo Motoren entschieden, die wesentlich billiger und einfacher anzusteueren sind und trotzdem mehr als genügend Kraft haben. Der Nachteil bei diesen Motoren ist allerdings die Größe, wodurch unser Endprodukt ziemlich sicher etwas größer als gehofft ausfallen wird.

7.2.2.2 Datenempfang

Um den Datentransfer möglichst einfach zu gestalten und keine Kompatibilitätsprobleme zu haben, entschieden wir uns den gleichen Mikrokontroller wie beim Eingabesubsystem zu verwenden. Dies ermöglicht eine relativ einfache Datenübertragung ohne zusätzliche Antennen. Werden Daten empfangen, so wird die Software am Chip aktiv, die in Punkt ([Verweis auf Roboterhand Softwarebeschreibung](#)) näher beschrieben wird. Der Entschluss zur Verwendung dieser identischen Systeme, wurde relativ rasch getroffen, da wir genug andere Schwierigkeiten haben werden und die Funkübertragung nicht dazu zählen soll. Genauere Designanforderungen, zum Layout der integrierten Antenne, werden in Punkt 7.2.5 erklärt.

7.2.2.3 Ansteuerung der Motoren

Nachdem die Daten in Software verarbeitet wurden, müssen nun die Servomotoren angesteuert werden. Da diese über ein PWM-Signal ([siehe Punkt 4.3](#)) angesteuert werden, stellt sich die Frage ob man dies direkt über den Mikrokontroller realisiert, oder mithilfe einer PWM-Controller-Schaltung. Da wir eine Mindestanzahl von fünf Servomotoren haben und auch für zukünftige Erweiterungen bereit sein möchten, haben wir uns für die Ansteuerung via Servo-Controller entschieden.

Bei der Ansteuerung der Motoren ohne Controller, ist das Problem, dass für jeden Servomotor ein eigener Pin des Mikrocontrollers benötigt wird. Dies ist nicht gerade Vorteilhaft, weil dadurch zwangsläufig andere Funktionen des Mikrocontrollers, die nur mit bestimmten Pins funktionsfähig sind, außer Kraft gesetzt werden. Um dieses Problem zu vermeiden verwenden wir einen PWM-Controller-Chip, dessen Auswahl im folgenden Punkt näher erläutert wird.

PWM-Controller-Chip

Bei der Auswahl des Mikrochips war die Ansteuerungsmöglichkeit das größte Auswahlkriterium. Da wir bei der Schaltung des Eingabesubsystems auf die I2C-Kommunikation setzen, wollten wir dem treu bleiben und haben das gleiche bei dem gesamten Schaltungsdesign des Ausgabesubsystems ebenfalls beachtet. Das bedeutet, dass nur Mikrochips in Frage kommen, die diese Art des Übertragungsprotokolls unterstützen. Als nächstes ist die Anzahl der PWM Ausgangskanäle

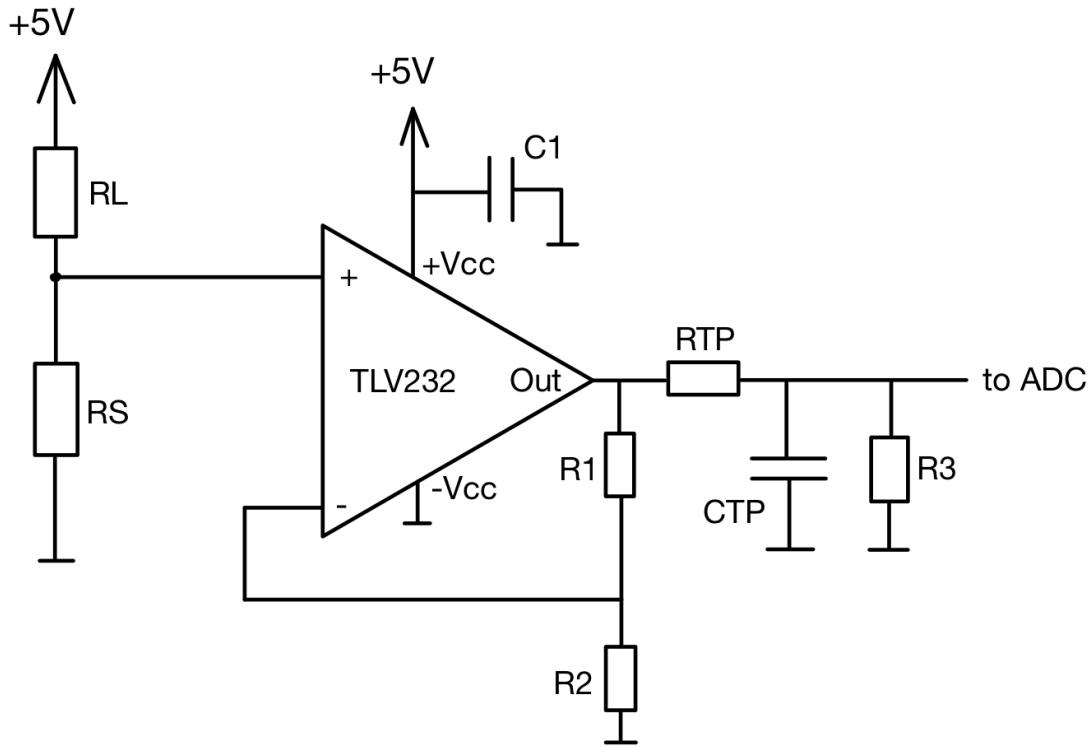
zu beachten und wie diese und der Baustein selbst adressiert werden können. Ebenfalls zu beachten war, dass der Chip mit 5V Versorgungsspannung zurecht kommen muss.

Die Wahl viel schlussendlich auf den PCA9685, welcher 16 PWM-Kanäle hat und über alle anderen, soeben beschriebenen, Anforderungen verfügt. Durch die hohe Anzahl von Signal-Ausgängen bleiben wir ebenfalls für zukünftige Erweiterungen kompatibel.

7.2.2.4 Positions -und Kraftmessung der Roboterfinger

Da mit der Roboterhand Objekte gegreift werden sollen, ohne diese zu beschädigen oder zu zerquetschen, mussten wir uns eine Schaltung überlegen, mit der man einen, mit der Griffkraft steigenden, Parameter messen kann. Hierfür könnte man den Winkel jedes Fingers messen, wodurch allerdings extra Sensoren notwendig wären. Außerdem ändert sich der Gelenkwinkel der Finger nicht mehr, sobald die Roboterhand etwas festhält und nur mehr stärker zudrückt. Diese Methode der Griffkraftmessung haben wir deswegen verworfen.

Stattdessen haben wir uns dazu entschieden den Strom zu messen, den jeder einzelne Servomotor beim Schließen des jeweiligen Fingers benötigt. Dies ermöglicht uns jeden Motor einzeln zu regulieren und gegebenenfalls bei einer Fehlfunktion abzuschalten.



Diese Messung basiert auf dem gleichen Prinzip wie die der Flexsensorstellung in [Punkt 7.1.2.2](#). Mithilfe eines Shunt-Widerstands wird ein Spannungsabfall gemessen, der anschließend über eine Messschaltung verstärkt und in ein Digitalsignal umgewandelt wird.

Je mehr Strom der Servomotor benötigt, um die gewünschte Position zu erreichen und somit dem Widerstand des Objekts in der Hand entgegen zu wirken, desto größer ist der Spannungsabfall am Shunt-Widerstand R_S . Der Motor wird in der obigen Abbildung mit R_L dargestellt, da eine höher Strombedarf dem senken dieses Widerstands in der Simulation gleicht.

Wird nun ein Spannungsabfall gemessen, so wird dieser durch den Operationsverstärker verstärkt. Die Verstärkung wird bei dieser Schaltung von den Widerständen R_1 und R_2 bestimmt. In Serie kommt anschließend ein Tiefpassfilter, um, sowie bei der Schaltung des Eingabesubsystems, ungewünschte Störungen herauszufiltern. Der Widerstand R_3 entlässt den Eingang des folgenden Bauelements, nämlich einem ADC.

Folgendes Kriterium wurde bei der Wahl des Operationsverstärkers beachtet:

- Ausgangspegel bei gewählter Versorgungsspannung:

Zunächst wurde das Kriterium der Versorgungsspannung betrachtet. Da wir maximal

5V Gleichspannung in der gesamten Schaltung verwenden wollen, muss der OPV mit dieser geringen Spannung immer noch verstärken. Da am positiven Verstärkereingang eine maximale Spannung von 5V anliegt, muss dies bei Verstärkern mit einer geeigneten Supply Range auch mit nur 5V Versorgungsspannung gewährleistet sein. Folglich wird die Rail-to-Rail Technologie ([Punkt 4.2.3](#)) tragend, um keine Referenzspannung zu benötigen.

Da wir nicht bis ganz an die Grenzen des Aussteuerbereichs kommen werden (wird anhand der Berechnungen verständlich), ist der TLV232 wie für diese Anwendung gemacht.

Dimensionierung der Schaltung

Den theoretischen Widerstand der Servomotoren, haben wir uns, anhand der im Datenblatt angegebenen Stromwerte bei 5V Versorgungsspannung, mit dem ohmschen Gesetz ausgerechnet. Dies hilft uns unter anderem auch in LTspice, da wir so verschiedene Lasten simulieren können.

$$R_{Idle} = 500\Omega$$

$$R_{noLoad} = 29.41\Omega$$

$$R_{max.Load} = 4.16\Omega$$

Der OPV, wurde zusammen mit dem Shunt-Widerstand so dimensioniert, dass am Ausgang, bei voller Belastung des Motors, annähernd 5V auftreten. Dabei sollten ca. 100mV - 200mV Sicherheitsabstand gelassen werden, da die Rail-to-Rail Technologie auch ihre Grenzen hat und nicht unendlich genau an den Versorgungsspeigel ausgeben kann. Dies lässt die Physik einfach nicht zu.

Es wurde ein relativ hochohmiger Shunt-Widerstand mit $R_s = 165m\Omega$ gewählt, um die Leistung, die über den Widerstand verloren geht, möglichst gering zu halten.

Mit den folgenden Formeln wurde anschließend die notwendige Verstärkung des OPVs berechnet, um auf den gewünschten Ausgangsspannungsbereich zu kommen.

$$G = 1 + \frac{R_1}{R_2}$$

$$V_{out} = G * (V_{in+} - V_{in-}) + V_{ref}$$

Die entgültigen Werte lauten wie folgt: $R_1 = 100k\Omega$
 $R_2 = 6.2k\Omega$

Mit diesen Widerstandswerten ergibt sich eine Verstärkung von $G = 17.13$.

Da nun sichergestellt ist, dass der Ausgangsspannungspegel des OPVs bei der gewählten Verstärkung, dem gewählten Shunt-Widerstand und der maximalen Belastung des Servos 5V nicht übersteigt, kann ein Analog-Digital-Wandler ausgewählt werden, um das analoge Signal zu digitalisieren. Da wir bei der Wahl von ADCs durch das Schaltungsdesign des

Eingabesubsystems schon Erfahrung gesammelt haben, viel das Aussuchen des jetzigen Wandlers nicht schwer. Entschieden haben wir uns für den identen Baustein wie bei der Sensorschaltung, jedoch mit dem Unterschied, dass dieser nun einen Aussteuerbereich von 0V - 5V hat, anstatt von 0V - 3.3V. Mit den folgenden Berechnungen wurde die Auswahl nochmals überprüft und die Stufenweite bestimmt.

Auflösung = 10 Bit, bei 0V - 5V Aussteuerbereich

$$LSB = \frac{5}{1024} = 4.88mV$$

Durch diese hohe Auflösung, kann die Griffkraft der einzelnen Finger sehr genau geregelt werden, wodurch ein feines Greifen von Objekten ermöglicht wird.

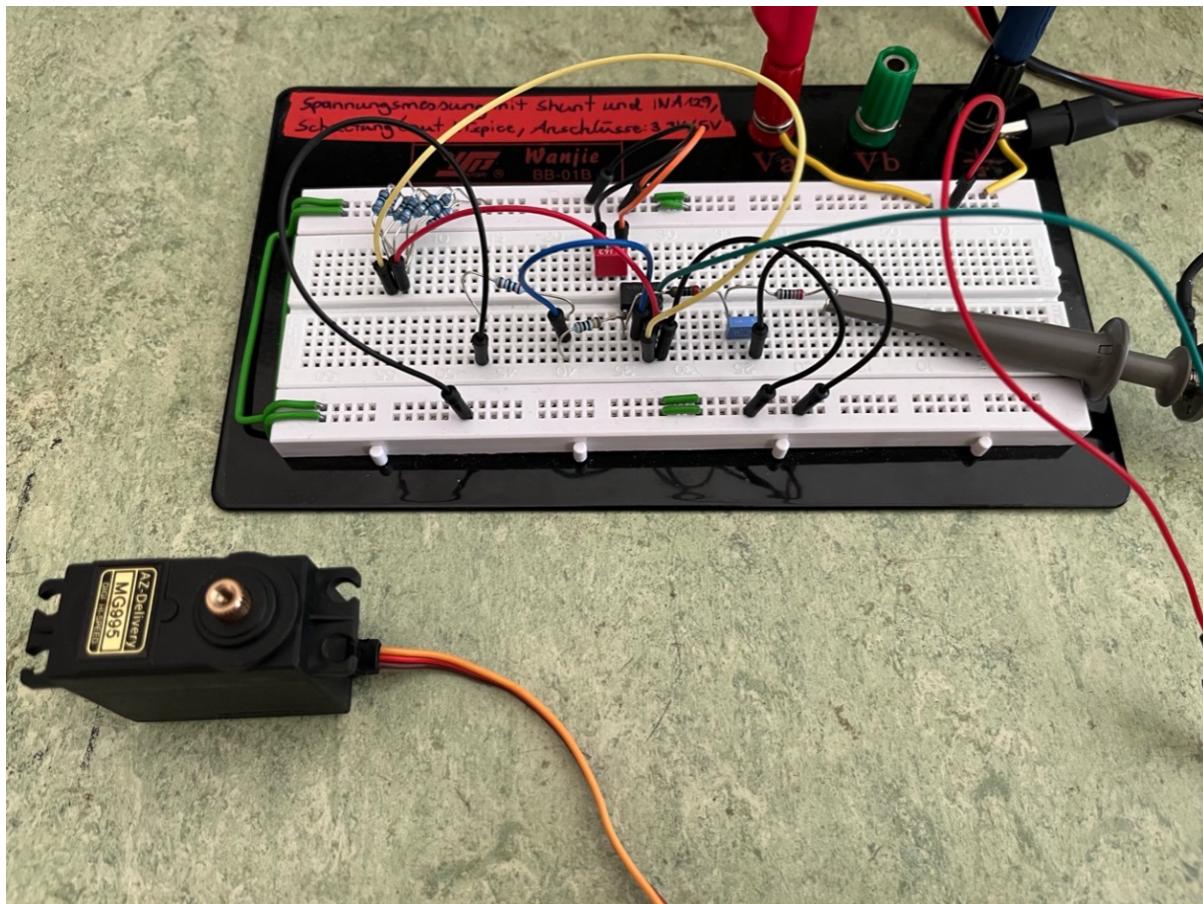
7.2.3 Versuchsaufbauten und Messungen **Laci**

7.2.3.1 Messschaltung der Griffkraftkontrolle

Das Ziel der Messung ist es, herauszufinden wieviel Strom ein Servomotor, abhängig von dem gerade erzeugten Drehmoment, braucht. Die gemessenen Daten sollen uns bei Feinjustierung der Griffkraftregelung der Roboterhand behilflich sein.

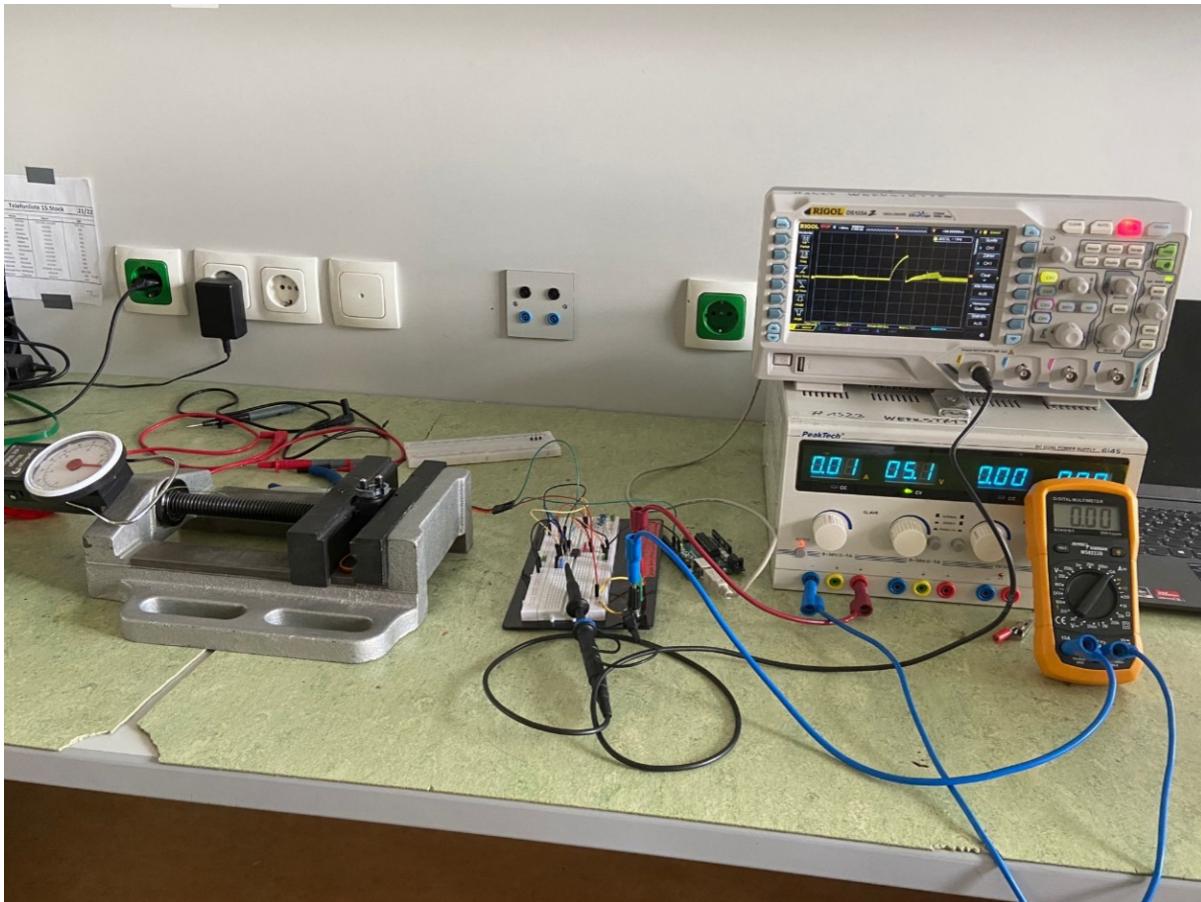
Der folgende Steckbrettaufbau repräsentiert die oben gezeichnete Schaltung.

Die Grundidee ist, dass sich der Spannungsabfall am Shunt Widerstand je nach Auslastung des Servos ändert und somit der Stromverbrauch gemessen werden kann. Anhand der vom OPV ausgegebenen Werte, kann folglich in Software die Ansteuerung programmiert werden.



Erklärung des Testablaufs

Die Schaltung wird mit +5V versorgt. Der OPV „TLV232“ kann, dank RailToRail Technologie, den Ausgang bis fast auf die Versorgungsspannung anheben. Durch die Simulation von verschiedenen Lasten am Servo mit einer Zugkraftwaage, fällt am Shunt Widerstand eine andere Spannung ab. Dadurch variiert die Ausgangsspannung des OPVs und im Programm kann ausgewertet werden, wie stark ein Finger der Roboterhand belastet wird. Je nachdem, kann dann geregelt werden. Wichtig zu beachten ist allerdings, dass diese Messung nicht die wahre Verwendung der Servos widerspiegelt. Für eine wahrheitsgetreue Ausmessung der Servobelastung, muss diese an der Hand (den einzelnen Fingern) durchgeführt werden und nicht in einem Testaufbau. Im folgenden Bild wird der gesamte Testaufbau gezeigt.



Messergebnisse

Die gemessenen Werte wurden in einer Tabelle dargestellt und anschließend grafisch in Diagrammen visualisiert.

Servomotoren (Ausmessung)						
Servomotor						
Winkel (*)	Strom (A)	max. Spannung v. Einsch. (V)	Spannung n. Einsch. (V)	Zugkraft (kg)	Zugkraft (N)	Delay (ms)
5	0,01	1,88		0,00	0,00	30
10	0,12	1,88		0,00	0,00	30
15	0,14	1,72		0,00	0,00	30
20	0,17	2,04		0,78	7,65	30
25	0,25	1,86		1,10	10,79	30
30	0,29	1,98		1,90	18,63	30
35	0,42	2,06		2,40	23,54	30
40	0,58	2,02		3,00	29,42	30
45	0,70	2,06		3,75	36,77	30
50	0,93	1,98		4,15	40,70	30
55	1,25	2,06		4,50	44,13	30
60	1,36	2,20		4,75	46,58	30
65	1,39	2,30		4,90	48,05	30
70	1,38	2,18		4,90	48,05	30
75	1,37	2,10		4,80	47,07	30
80	1,38	2,10		4,85	47,56	30
85	1,39	1,74		4,85	47,56	30
90	1,36	2,10		4,60	45,11	30
95	1,37	1,70		4,60	45,11	30
100	1,38	2,06		4,75	46,58	30
105	1,39	2,08		4,76	46,68	30
110	1,42	2,09		4,82	47,27	30
115	1,43	2,11		4,90	48,05	30
120	1,45	2,10		4,91	48,15	30

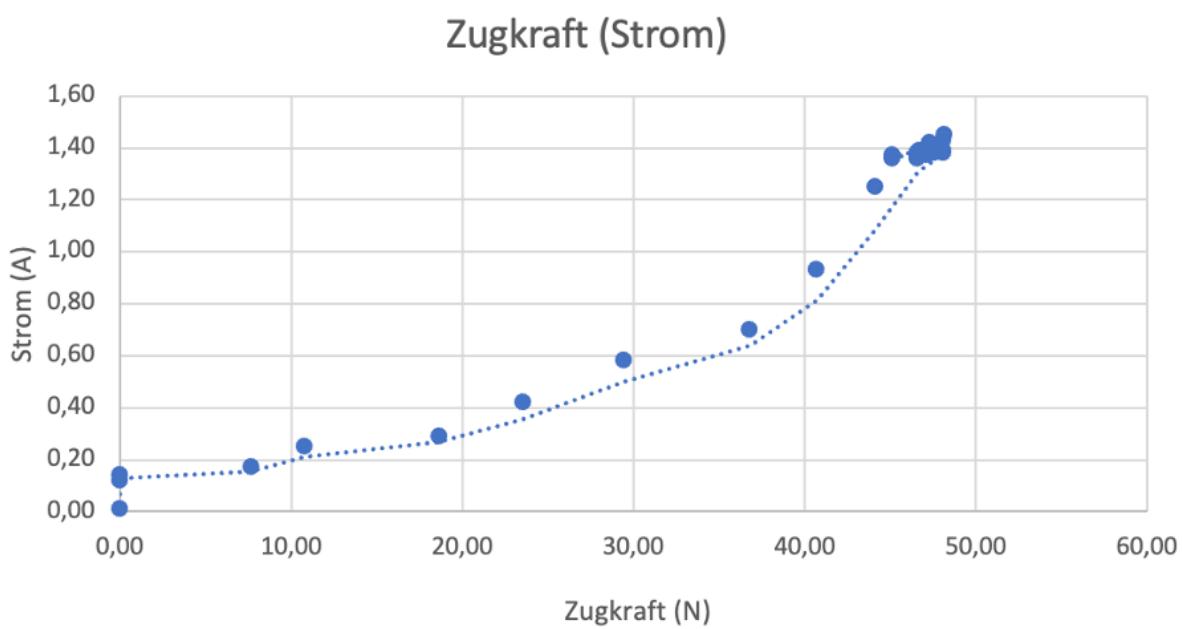
In der linken Spalte, ist die Servostellung, in Grad, vom Nullpunkt des Servos gemessen, abgebildet. Gleich daneben, wurde der Strom aufgetragen, der mit einem Multimeter gemessen wurde.

Da bei der Messschaltung ein Fehler aufgetreten ist, sind die Spalten *max.Spannung v. Einsch.(V)* und *Spannung n. Einsch(V)* nicht zu beachten!

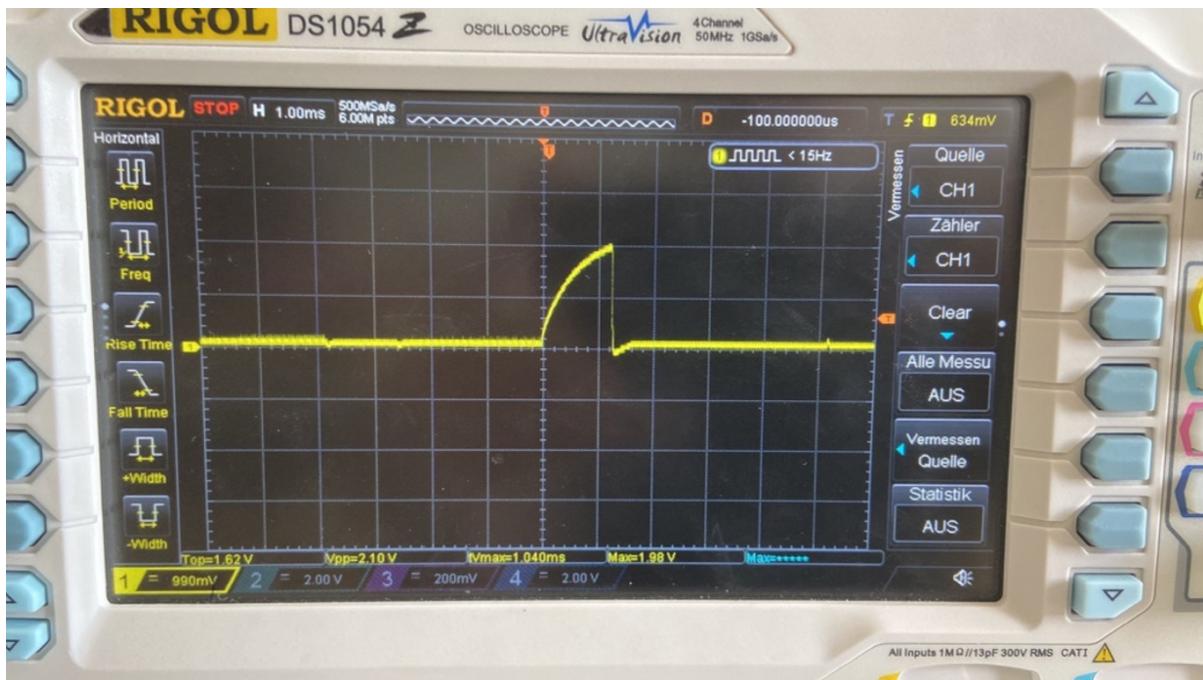
Die Zugkraft des Servomotors ist in Kilogramm und in Newton abgebildet. Rechts daneben ist noch eine Delay-Spalte zu sehen, die angibt wie lange der Servo gebraucht hat, um sich dem gewählten Winkel anzunähern. Am Anfang wurde es dem Motor selbst überlassen wie schnell er sich bewegt, jedoch führte dies zu unerwünschten Ungenauigkeiten, weshalb wir diesen Fehlerfaktor der Messung durch das Delay ausgeschlossen haben.

Ebenfalls zu erkennen ist, dass sich die Zugkraft des Motors ab der halben Vollaussteuerung des Servodrehwinkels nicht mehr ändert. Dies liegt daran, dass der 3D gedruckte Aufsatz, auf dem die Schnur zur Verbindung des Motors und der Zugkraftwaage angebracht ist, ab ca. 45N Zugkraft nachgegeben hat und in Folge auch kaputt gegangen ist. Dieser Materialfehler hat uns geholfen später im Projekt neue Aufsätze zu designen, die dem Zug des Servos standhalten.

Die Messergebnisse wurden im folgenden Diagramm visualisiert.



Der nicht-lineare Anstieg der Stromwerte in Abhängigkeit der Zugkraft, ist weitestgehend auf die Ungnauigkeit des Servomotors und die leichten Varianzen im Testaufbau zurückzuführen. Erwartet, beziehungsweise erhofft, haben wir uns einen möglichst linearen Ansitz, jedoch hat dies keinen wirklichen Einfluss auf die Funktion des Gesamtsystems, wenn der Kurvenverlauf in der Software berücksichtigt wird.



An dem Oszilloskopbild ist zu erkennen, wie sich der Strom bei der Ansteuerung eines Servomotors verhält. Es ist deutlich sichtbar, dass der Strom nicht linear steigt, sondern sich dem Spitzenwert immer weiter annähert, bis die gewünschte Position erreicht ist. Wird kein Objekt gegriffen, so existiert kein mechanischer Widerstand gegen den der Servo ankämpfen muss, wodurch sich der Strom wieder auf ein Minimum senkt. Würde der Roboterfinger und somit der Motor einem Widerstand entgegenwirken, so bliebe der Strom auf einem relativ konstanten Wert stehen bleiben. Dies ist der Fall, da ein Servo einen Gleichstrommotor eingebaut hat und dieser nicht nur für die Bewegung, sondern auch für das Entgegnen einer mechanischen Last Strom benötigt.

7.2.4 Schaltungsdesign Laci

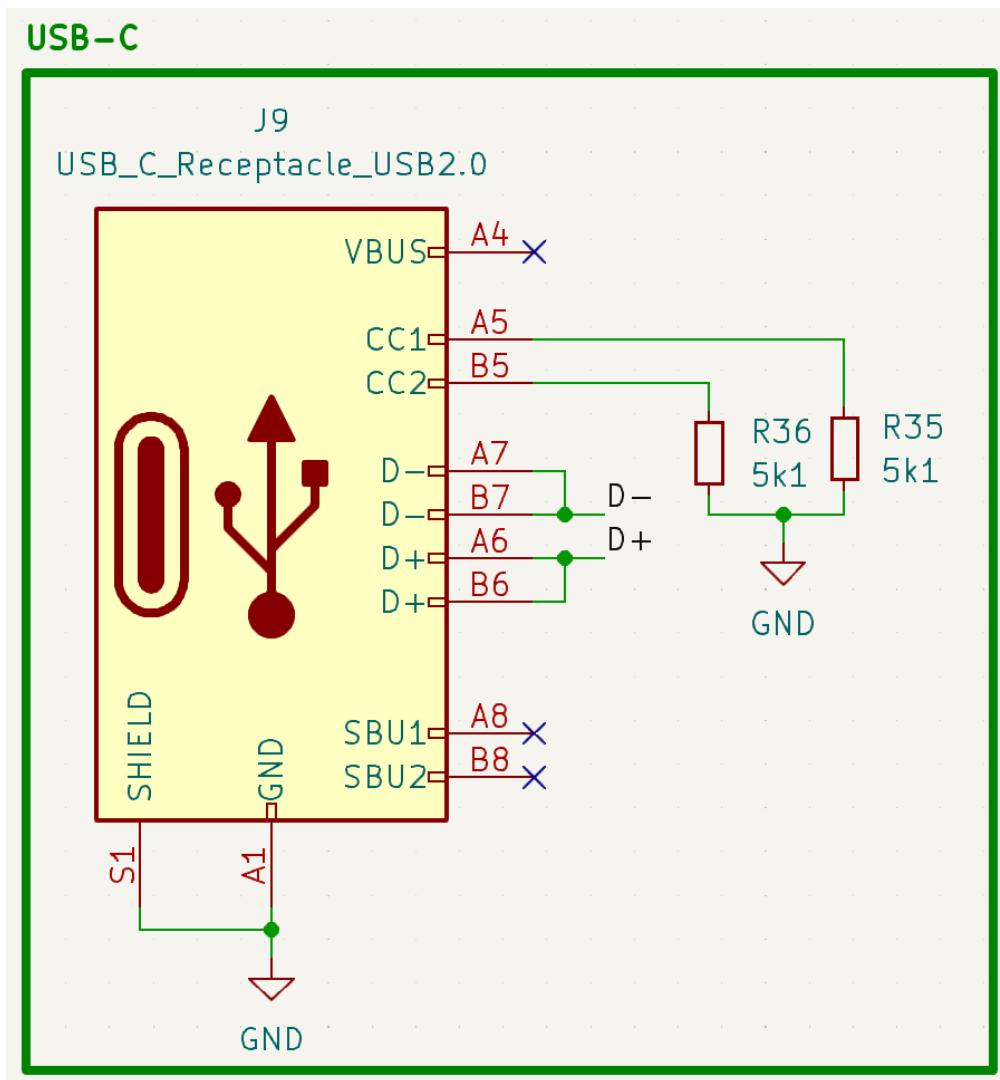
Nach den diversen Überlegungen, Konzepten und Berechnungen, wird in diesem Punkt das genauere Schaltungsdesign erläutert. Es wird erklärt worauf bei dem Schaltungsentwurf geachtet werden musste und mit welchen Besonderheiten, beziehungsweise Problemen, wir zu tun hatten.

7.2.4.1 Externe Anschlüsse

Wie auch schon bei der Schaltung des Eingabesubsystems, setzen wir auch beim Ausgabesubsystems auf einen USB-C Anschluss. Dieser dient zur Programmierung des Mikrocontrollers. Versorgt werden kann die Schaltung aufgrund des hohen Strombedarfs der Servomotoren allerdings nicht. Vorteilhaft ist dies allerdings auch, da die Platine gleichzeitig mit einem Netzteil verbunden sein kann und keine Gefahr besteht zwei Versorgungen gleichzeitig anzuschließen.

Anschluss zur Programmierung des Mikrokontrollers

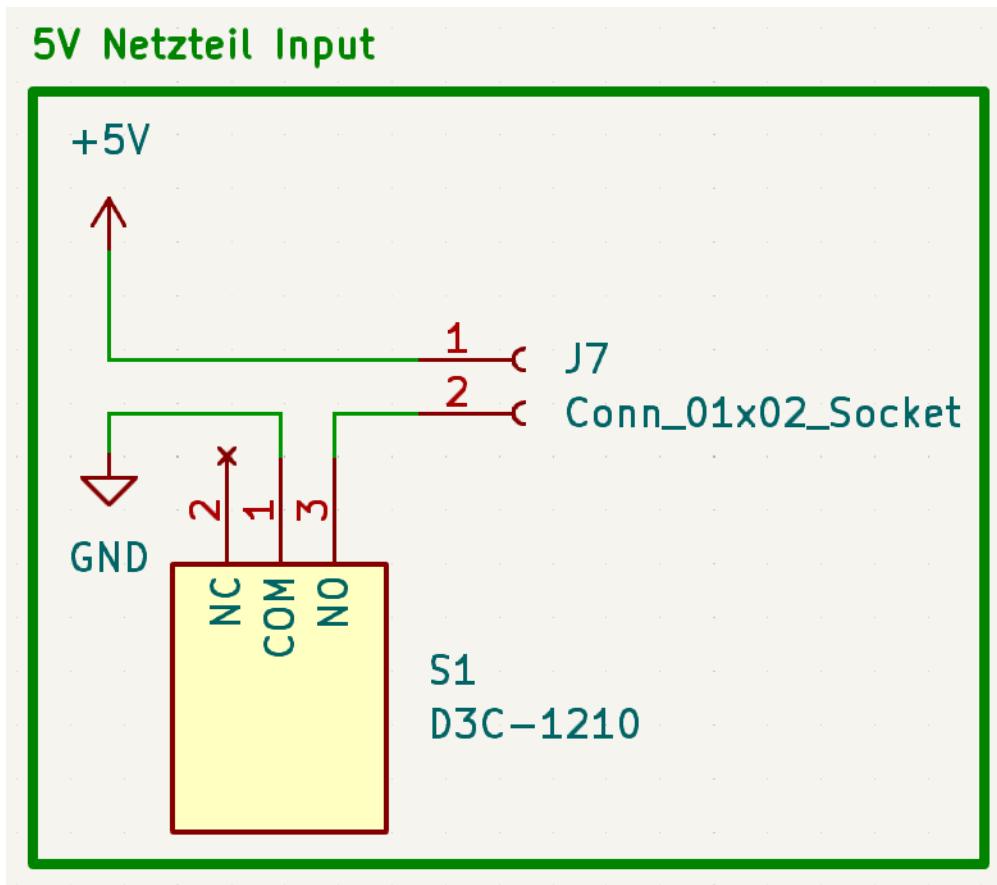
Für die Programmierung des Mikrokontroller ist ein USB-Anschluss notwendig. Da das Projekt mit den neuesten Computern kompatibel sein soll, haben wir uns, genauso wie beim Eingabesubsystem, für einen USB-C-Typ2.0 entschieden. Das Serial-Signal des angeschlossenen Computers, wird über die beiden Leitungen $D+$ und $D-$ übertragen. Die Anschlüsse $CC1$ und $CC2$ werden nicht benötigt, weshalb diese mit über einen Widerstand mit GND verbunden sind. $SBU1$ und $SBU2$ werden ebenfalls nicht benötigt.



Anschluss zur Versorgung der Schaltung

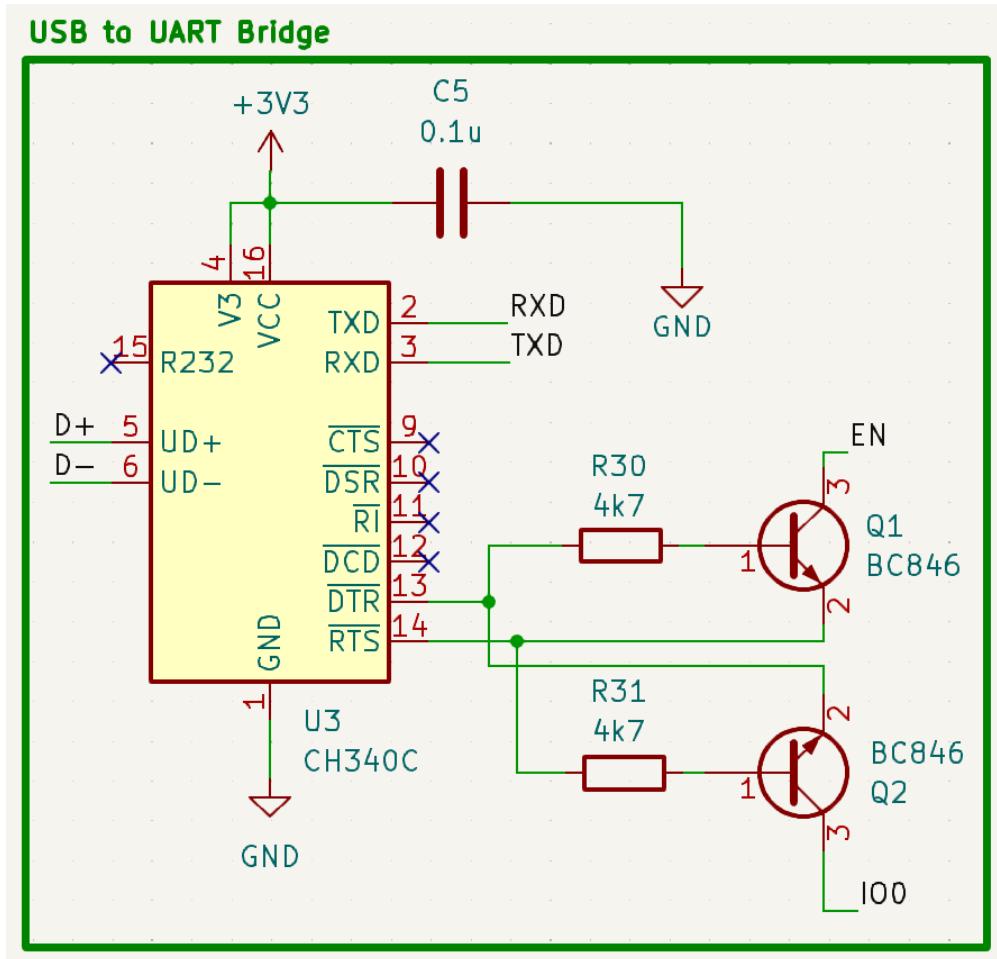
Da die Schaltung nicht über die USB-C-Buchse versorgt werden kann, muss dies über ein

Netzteil geschehen. Für diesen Zweck haben wir einen Connector mit zwei Pins vorgesehen. Ein Pin für die positive Versorgung und der andere für den *GND – Anschluss* des Netzteils. Zusätzlich dazu, wurde noch ein Jumper verbaut, der es uns erlaubt die Schaltung von der Versorgung zu trennen ohne jedes mal das Netzteil abdrehen zu müssen. Bei der nächsten Schaltungsversion wird die Versorgung über einen Barrel Jack erfolgen.



7.2.4.2 Serial-UART-Bridge

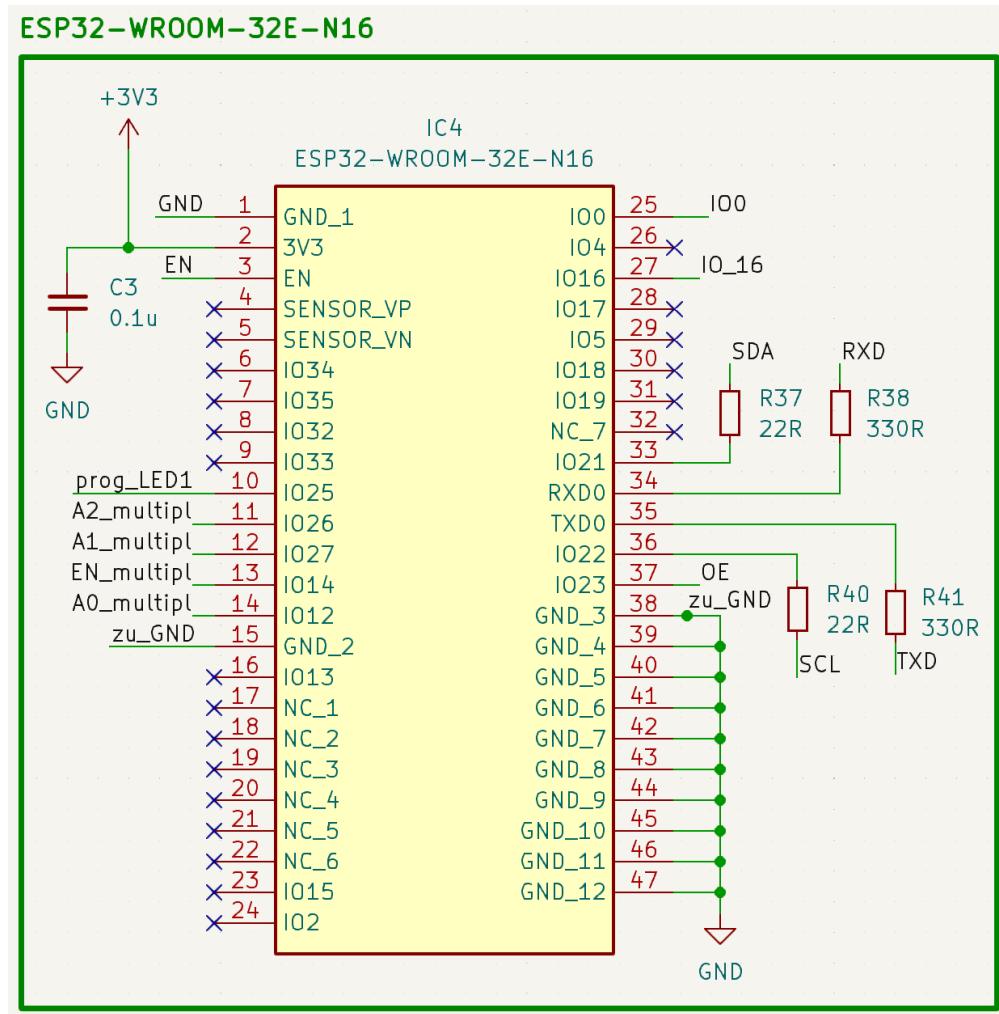
Der Serial-UART-Chip, hat die Aufgabe das über die USB-Buchse kommende Serial-Signal in ein UART-Signal umzuwandeln. Dies ist notwendig, da der verwendete Mikrokontroller keine Serial-Signale verarbeiten kann. Über die **ausgekreuzten** Leitungen *RXD* und *TXD*, werden die Daten zur Weiterverarbeitung übertragen. Die Versorgung basiert auf 3.3V. Die Pins *DTR* und *RTS* sind über eine Transistorschaltung ebenfalls mit dem Mikrokontroller verbunden. Die *EN* Leitung ist für die *RESET – Funktion* gedacht und die *IO0* Leitung für den Uploadvorgang von programmiertem Code.



7.2.4.3 Mikrokontroller

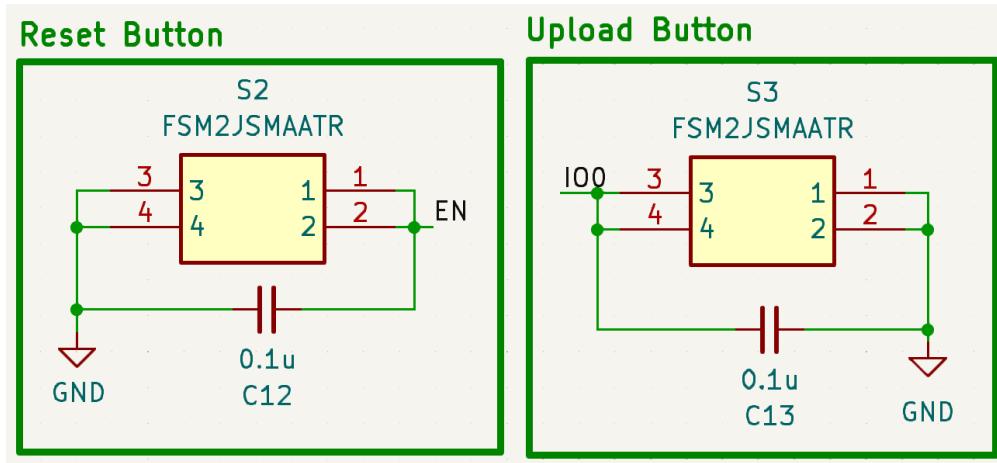
Der Mikrokontroller ist das Herz der Schaltung. Aufgrund der nötigen Kompatibilität in Bezug auf den Funk, haben wir uns, genauso wie beim Eingabesubsystem, für einen ESP32-Chip entschieden. Die geneue Bezeichnung lautet *ESP32 – WROOM – 32E – N16*. Zu diesem Chip führen unter anderem die zuvor beschriebenen Leitungen der Serial-UART-Bridge wodurch die Anbindung an die Außenwelt ermöglicht wird. Von diesem Chip gehen außerdem die I2C-Datenleitungen weg, welche mit dem ADC und dem PWM-Controller verbunden sind. Um eine möglichst störungsfreie Übertragung zu gewährleisten, wurden, außer den offensichtlichen $10k\Omega$ Pull-Up-Widerständen, noch Serienwiderstände in den Datenleitungen beigelegt. Diese dienen dem Schutz gegen Spannungsspitzen und mindern teilweise auch die Störungen die während dem normalen Betrieb auftreten können.

Die Funktionen der weiteren Pins werden in den folgenden Punkten, gemeinsam mit den dazugehörigen Bauteilen, näher erläutert.



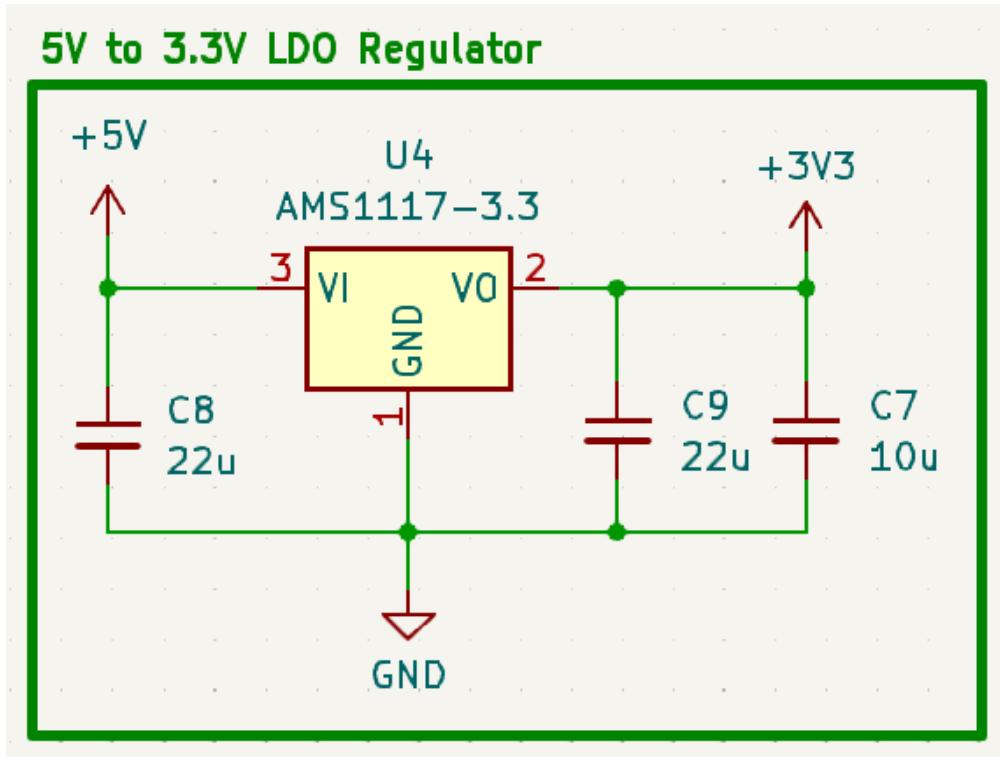
7.2.4.4 Mikrokontroller Buttons

Wie auch schon bei der Schaltung des Eingabesubsystems, werden für den ESP32 jeweils ein Drucktaster für das Hochladen von Code und das Zurücksetzen des Chips benötigt. Diese Buttons sind mit dem Mikrokontroller und des Serial-UART-Bridge verbunden.



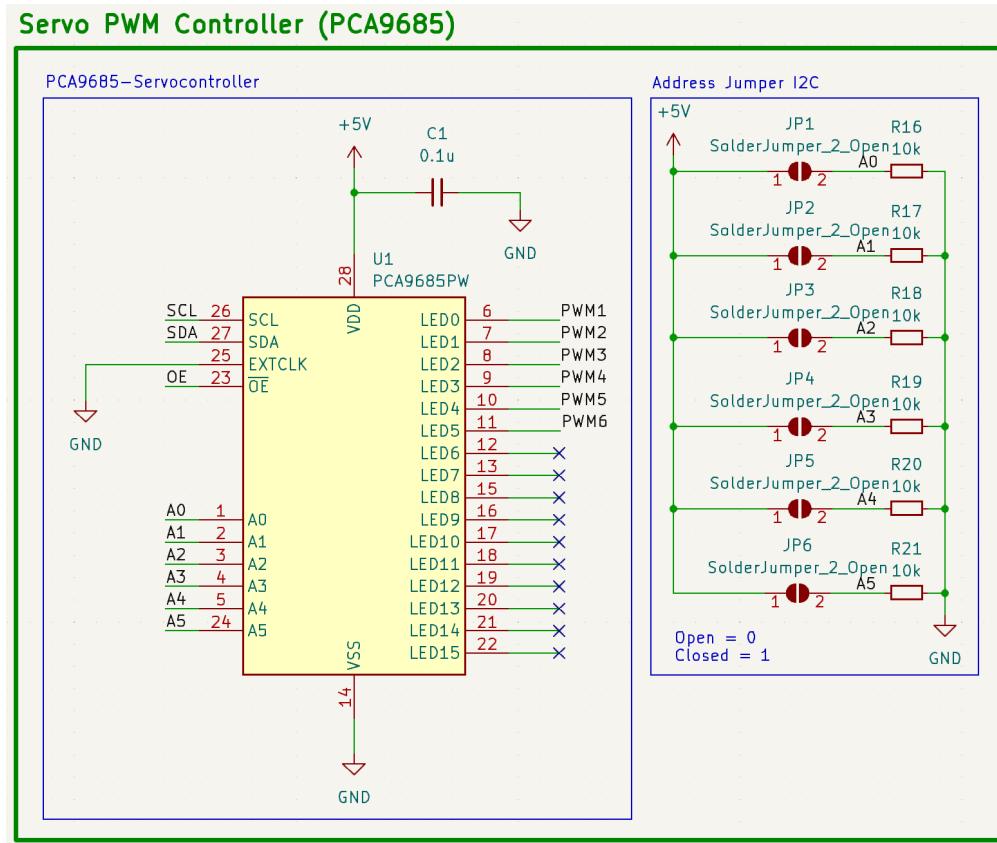
7.2.4.5 Versorgung

Da nicht alle Schaltungsteile mit 5V versorgt werden können, muss die Spannung auf einen geeigneten Pegel umgewandelt werden. Hierzu verwenden wir einen Spannungswandler. Am Eingang und Ausgang des Bausteins sind Stützkondensatoren zu *GND* geschalten, um die Spannungspegel von 5V und 3.3V zu stabilisieren. Zusätzlich dazu, ist bei jedem Versorgungspin eines Schaltungsbausteins noch ein Stützkondensator vorgesehen.



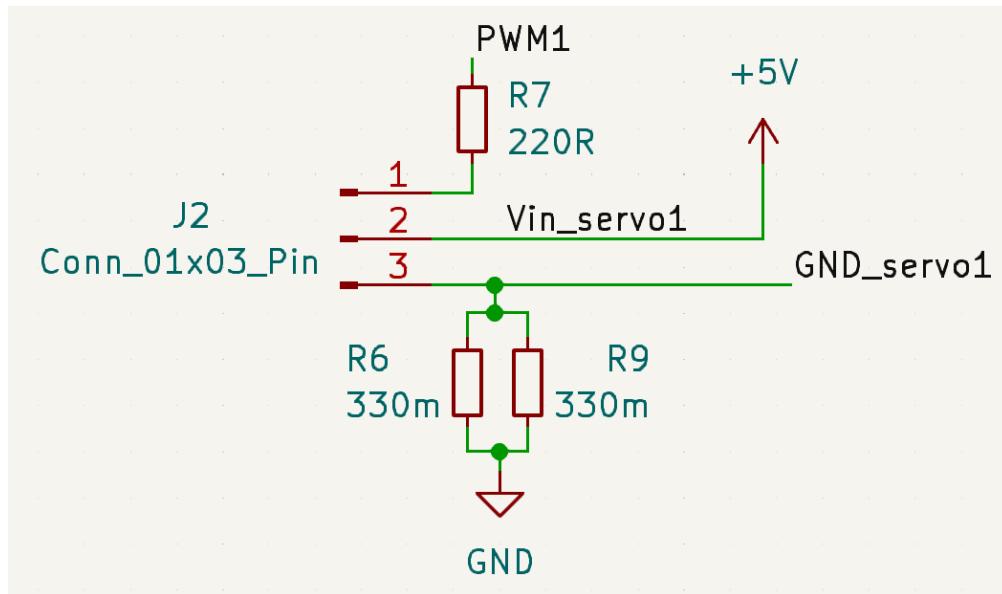
7.2.4.6 PWM-Controller

Der PWM-Controller ist das Bauteil, das für die korrekte Datenübertragung der Steuerungsdaten an die Servomotoren zuständig ist. Da wir keine Funktionen und Anschlüsse des Mikrocontrollers blockieren wollen (siehe Punkt 7.2.2.3), haben wir den *PCA9685* gewählt. Dieser ist per I2C-Protokoll ansteuerbar und hilft uns daher die Anzahl der elektrischen Leitungen auf ein Minimum zu reduzieren. Um die korrekte Ansteuerung des Mikrochips zu gewährleisten, existieren natürlich auch Adresspins (A0 - A5). Diese können auf *HIGH* oder *LOW* gesetzt werden, um die I2C-Adresse benutzerdefiniert einzustellen. Wir haben uns dazu entschieden diese Adressierung mit Lötknöpfen einstellbar zu machen. Standardmäßig ist die Adresse auf 000000, kann jedoch gezielt durch das Zulöten einzelner Jumper modifiziert werden. Der Pin *OE*, ist mit dem ESP32 verbunden. Dieser Anschluss erlaubt uns den PWM-Output des Mikrochips, durch ein *HIGH* oder *LOW* Signal, ein- und auszuschalten. Es ist zu erkennen, dass der Chip die Möglichkeit bietet bis zu 16 Servomotoren anzusteuern. Bei unserer Anwendung werden bei der aktuellen Entwicklungsstufe allerdings nur 6 Anschlüsse benötigt. Versorgt wird der Controller mit 5V.



7.2.4.7 Servoanschlüsse

Jeder Servomotor ist mit einem PWM-Pin des PWM-Controllers verbunden. Durch diese elektrischen Leitungen erhalten die Motoren ihre Drehbefehle. Um kompatibel mit dem Rest der Schaltung zu sein, haben wir die Versorgungsspannung für die Motoren mit 5V gewählt. Ein höherer Spannungspegel mit 6V wäre auch möglich gewesen, allerdings ist der Aufwand die Spannung zu erhöhen mit dem daraus resultierenden Gewinn an Zugkraft nicht zu vergleichen. Aufgrund dieses Umstands, wurde der Versorgungspegel wie beschrieben gewählt. Über den *GND – Anschluss* jedes Servomotors, wird die Strommessung (siehe Punkt 7.2.2.4) realisiert. Der Shuntwiderstandswert von $165m\Omega$ wird, aufgrund thermischer Verluste, durch zwei parallel geschaltete $330m\Omega$ Widerstände erzeugt, wodurch sich die Verlustleistung auf zwei Bauteile aufteilt. Die weitere Logik hinter dem GND_{servo} – Anschluss wird im folgenden Punkt erklärt.



7.2.4.8 Strommessung zur Griffkraftkontrolle

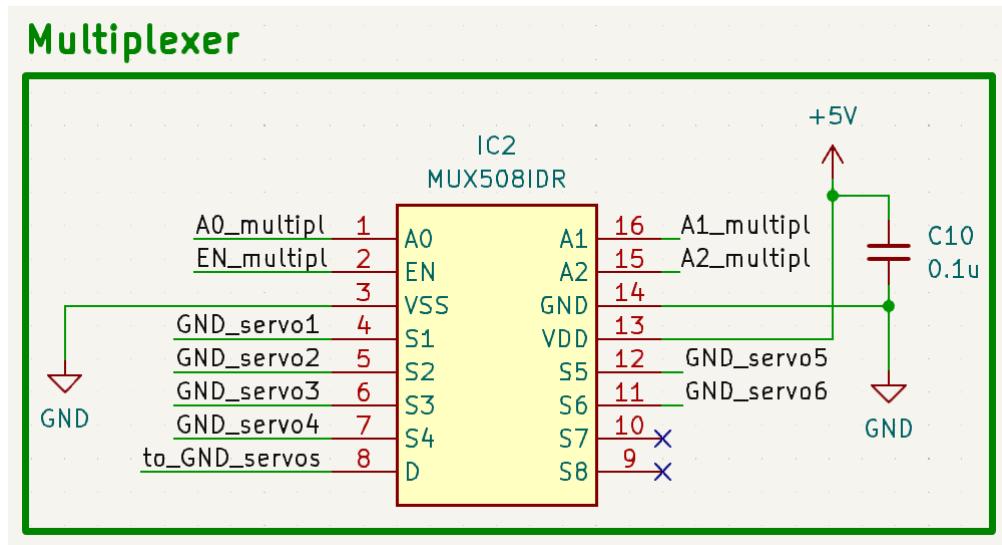
- **Multiplexer**

Der Multiplexer ermöglicht es, die Messschaltung der Griffkraftkontrolle nur einmal bauen zu müssen. Dies ermöglicht die Fähigkeit des Bauteils, in Bruchteilen einer Sekunde zwischen 8 verschiedenen Eingangskanälen zu wechseln. Die oben dargestellten Anschlüsse für die Servomotoren, müssen für jeden Motor einzeln vorhanden sein. Dank des Multiplexers, kann jeder *GND – Pin* allerdings auch zur Messung des Spannungsabfalls am Shunt-Widerstand gemessen werden. Jede Leitung die mit dem Label *GND_servo* beschriftet ist, wird an den Multiplexer angeschlossen, der mit dem Operationsverstärker der Messschaltung verbunden ist. Durch diese Schaltungslogik, kann jeder Motor mit nur einer einzigen Schaltung überwacht werden. Da der OPV einen sehr, sehr hohen Eingangswiderstand hat, fließt der, von den Motoren benötigte Strom, fast ausschließlich über die Shunt-Widerstände. Dies verhindert, dass der Multiplexer hohe Ströme schalten muss und somit Verluste auftreten.

Mithilfe der Pins A0 - A2, kann der Multiplexer gesteuert werden. Durch eine Bitkombination, die in der Software variiert wird, kann somit der Eingangskanal gewählt und durchgeschaltet werden. Mit den Pin *EN* kann das Bauteil deaktiviert, beziehungsweise aktiviert werden.

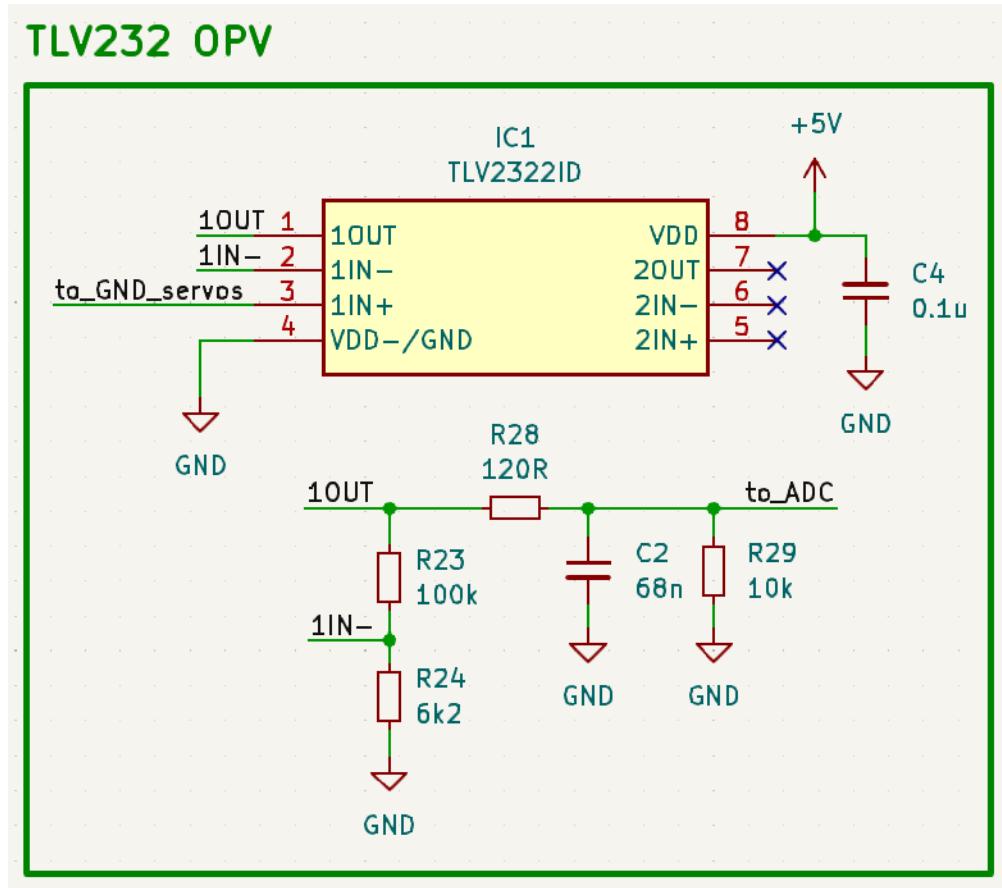
Der Anschluss *to_GND_servos*, verbindet den Multiplexer mit dem Operationsverstärker

TLV232.



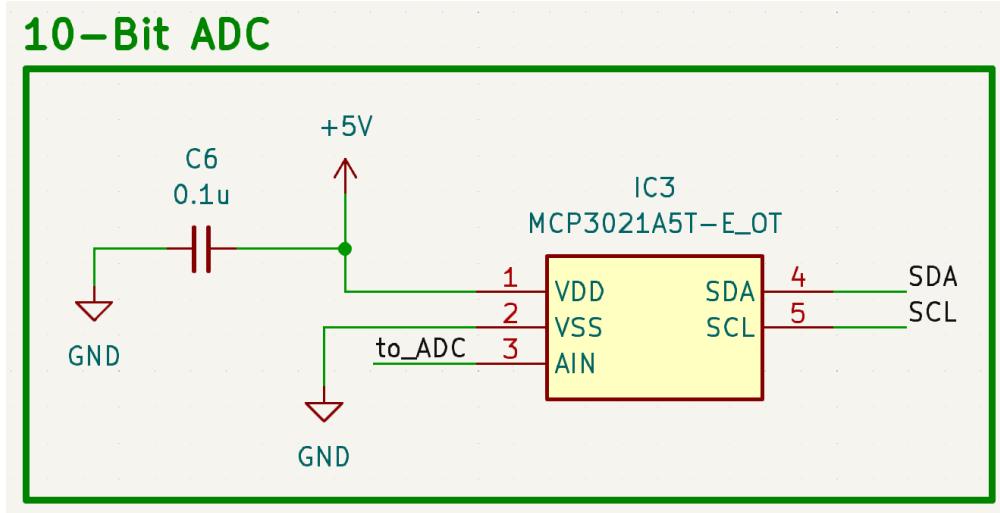
- Operationsversätzer

Mit dem Operationsverstärker wird der Spannungsabfall am Shunt-Widerstand jedes Servos verstärkt. Der Ausgang des Multiplexers ist nun der positive Eingang des OPVs. Nach der Verstärkung des Spannungspiegels, wird das Signal noch gefiltert, bevor es über das Label *to_ADC* zum Analog-Digital-Wandler übertragen wird. Für weitere Informationen zum Schaltungsdesign, siehe Punkt 7.2.2.4



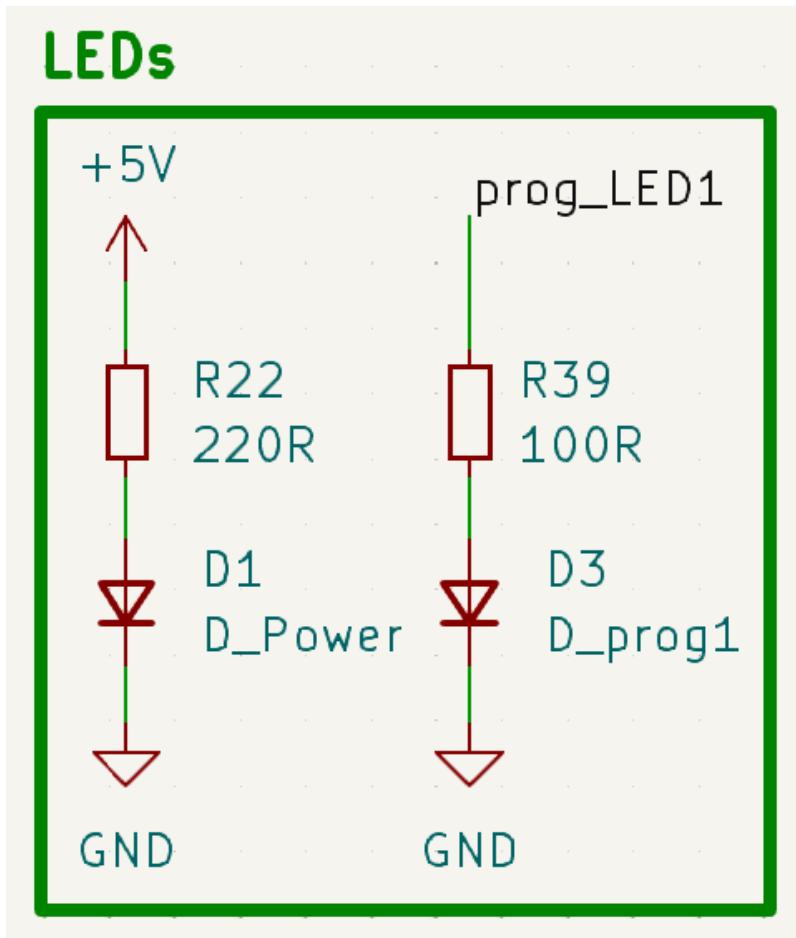
- Analog-Digital-Wandler

Das Ausgangssignal des Operationsverstärkers wird nun digitalisiert, um vom Mikrokontroller verarbeitet werden zu können. Über die beiden Datenleitungen *SDA* und *SCL* werden die digitalen Daten an den ESP32 übertragen. Adresspins sind bei diesem Bauteil keine vorhanden, weshalb die Standardadresse aus dem Datenblatt zur Ansteuerung zu verwenden ist.



7.2.4.9 Status LEDs

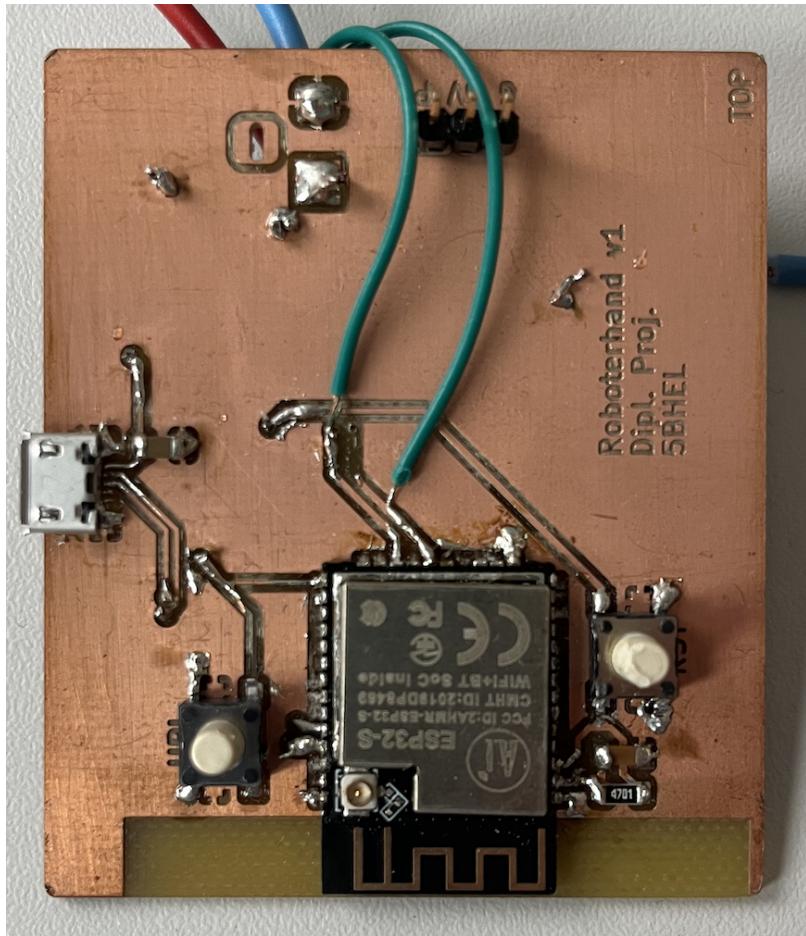
Genau wie bei der Schaltung des Eingabesubsystems, soll den Benutzer des Produkts ein optisches Feedback über wichtige Parameter bekommen. Dies wird durch zwei Leuchtdioden umgesetzt. Eine leuchtet bei aufrechter Versorgung und die Funktion der anderen LED kann frei gewählt werden.



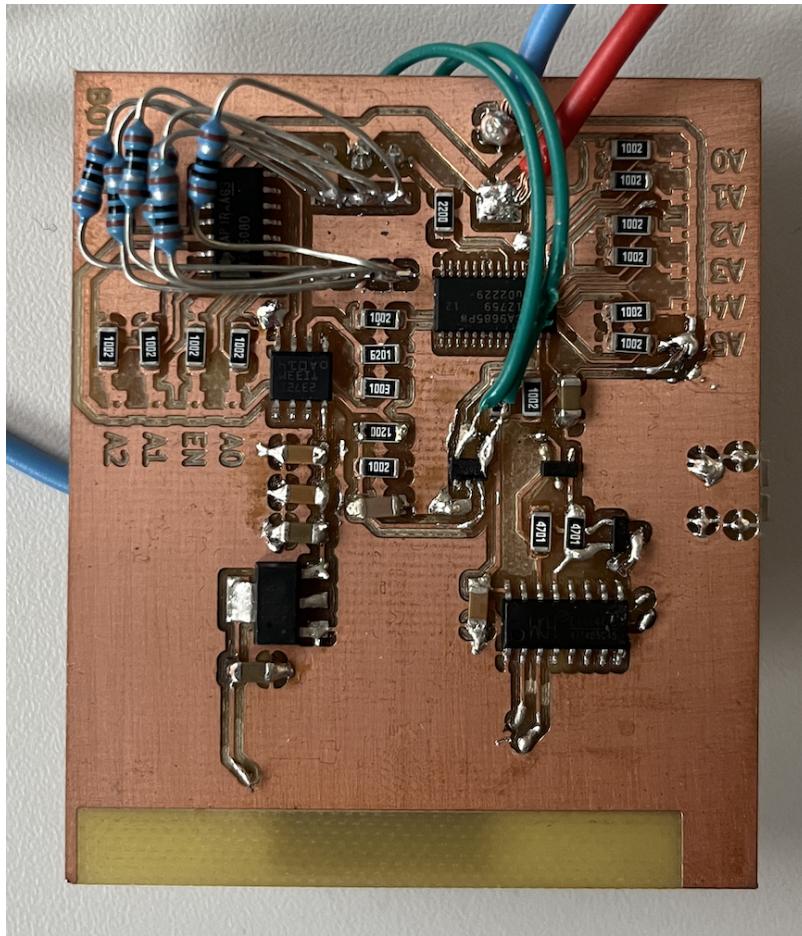
7.2.5 Platinendesign Laci

7.2.5.1 Erste Testplatine

Die erste Testplatine wurde in der schuleigenen Werkstatt, mithilfe einer Plattenfräse, gefertigt. Da das Design auch zu dem frühen Zeitpunkt des Projekts schon relativ kompliziert war, gab es bei der Fertigung einige Probleme. Aufgrund schon vorhandener Erfahrung, wurden die Bauteile mit möglichst großem Fottprint (1206) gewählt, um ein einfaches Löten per Hand zu ermöglichen. Da es ICs aber leider nur in einer, für das Bauteil festgelegten, Größe zu kaufen gibt, mussten Leiterbahnen mit einer Breite von nur 0.3mm verwendet werden. Dies führte beim Löten leider zum Ablösen dieser, weshalb einige Jumper-Kabel notwendig waren, um die kaputten Leiterbahnen zu ersetzen. Die Installation dieser Ersatzkabel, hat einige Zeit in Anspruch genommen, wodurch der Entwicklungsprozess der Hardware kurzzeitig verzögert wurde.



Dies ist die Oberseite der ersten Testplatine. Es ist der ESP32 zu sehen. Rechts und links daneben die Taster zum Hochladen von Code und zum Zurücksetzen des Mikrokontrollers. Zu diesem Zeitpunkt der Entwicklung wurde noch eine Micro-USB-Buchse verwendet, da diese weitaus leichter zu löten ist als USB-C-Buchsen.

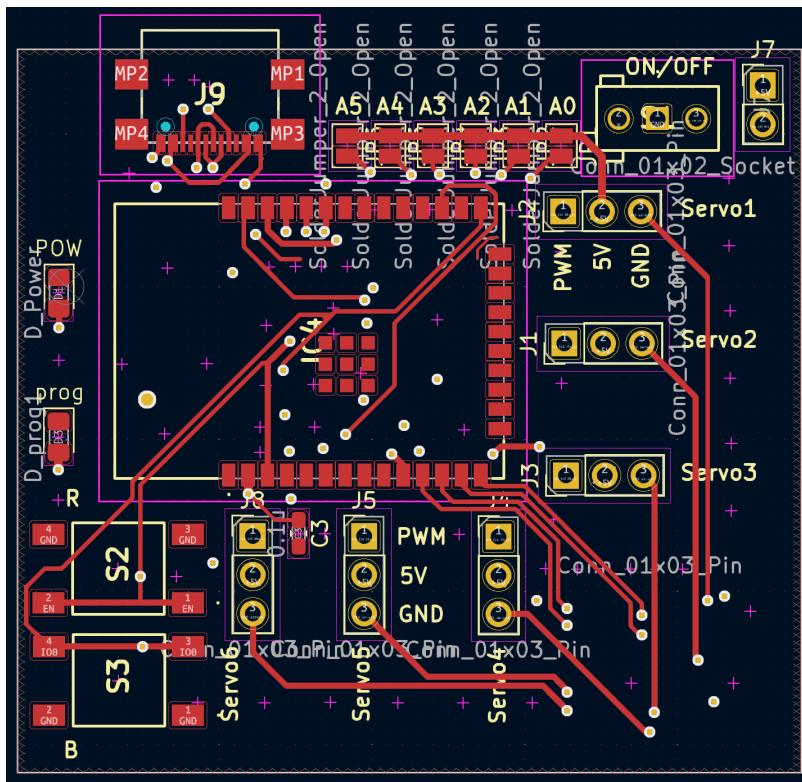


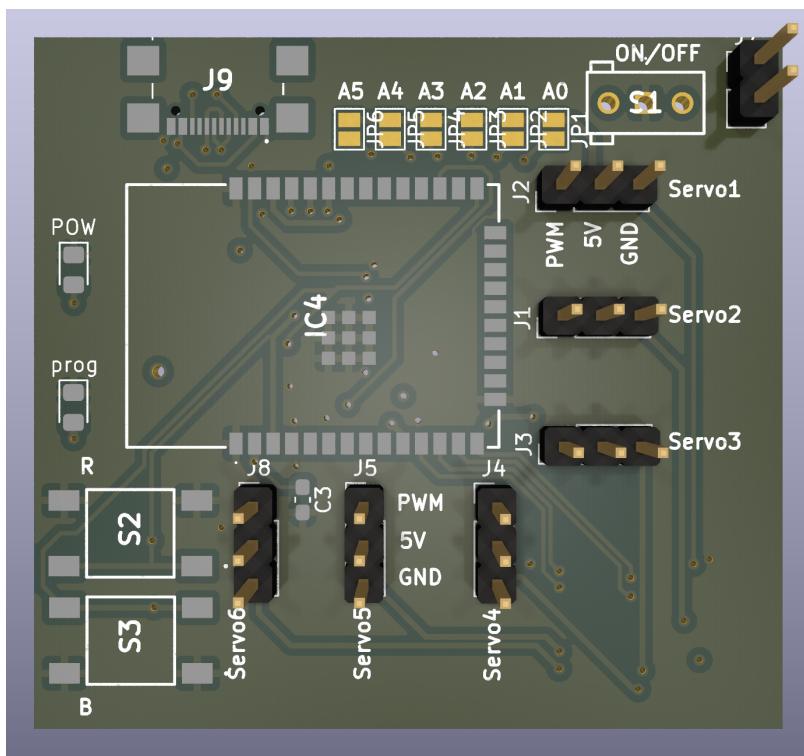
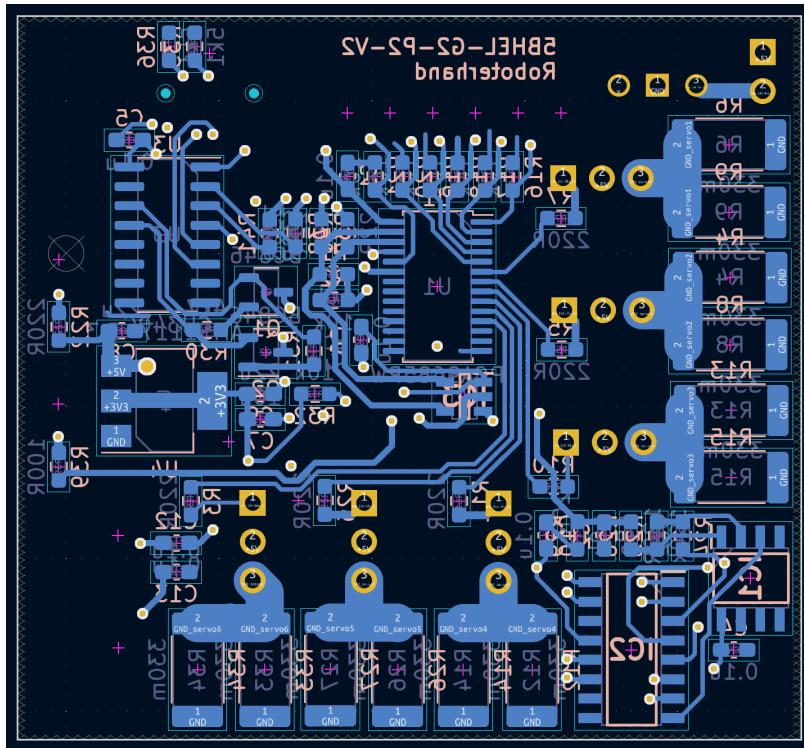
Nun ist die Unterseite der ersten Testplatine zu sehen. Es kann erkannt werden, dass einige ungeplante Modifikationen vorgenommen wurden, um die Platine ein erstes mal in Betrieb setzen zu können. Unter anderem wurden zwei Pins zum ESP32 (grüne Kabel) neu verbunden und die Shunt-Widerstände mit 6, parallel geschalteten, 1Ω Widersständen realisiert, da es Lieferschwierigkeiten mit den korrekten SMD-Widerständen gab. Über das rote und blaue, etwas dickere Kabel, wurde die Platine erstmals versorgt.

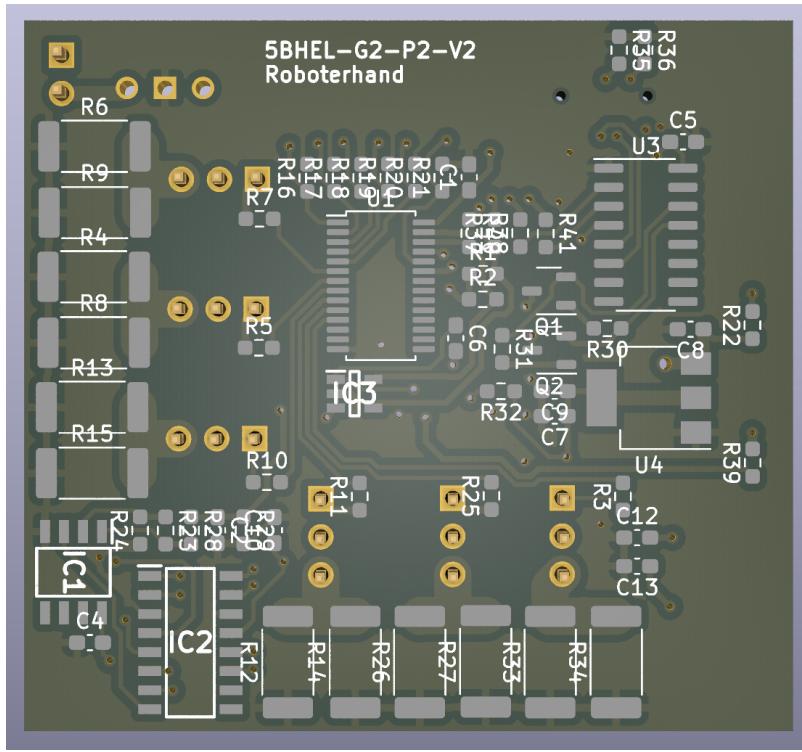
Unter den grünen Kabeln ist zu erkennen, wie dünn die Leiterbahnen sein mussten, um diese mit den Pins der ICs verbinden zu können. In der rechten, oberen Ecke des Bildes, sind die Adress-Jumper des PWM-Controllers zu erkennen. Dieser wurde für Testzwecke auf dieser Platine schon integriert, obwohl nur ein Servomotor angeschlossen werden kann.

Nach dem genauen Messen der Schaltung, wurde die korrekte Funktion bestätigt und mit dem Entwurf der zweiten Platinenversion begonnen.

7.2.5.2 Zweite Version der Platine







8 Software Realisierung

8.1 Handschuh

8.1.1 Konzepte und Überlegungen **Fabian**

8.1.1.1 Datenübertragung

Es gibt viele Möglichkeiten die Werte, die man von jedem einzelnen Flexsensor ausliest, zu übertragen. Wichtig ist es, dass dies einfach und auf eine sehr stabile Weise funktioniert. Werden nämlich Daten fehlerhaft oder nur teilweise übertragen, dann wirkt sich das auf der Empfängerseite drastisch aus. Es könnten dadurch unerwartete Fehler passieren beziehungsweise könnte die Roboterhand von einem instabilen System sehr hohe Schwankungen der Werte andauern wahrnehmen, was zu einer durchgängigen Belastung der Servos führen würde. Das ist zwar nicht allzu schlimm, aber verbraucht unnötig Ressourcen. Anfangs war Bluetooth die favorisierte Option, da man im Alltag immer wieder mit Geräten zu tun hat, die Bluetooth als Standard der Funkübertragung verwenden. Allerdings haben wir uns später dann aber für Wifi entschieden, da angenommen wurde, dass wir große Mengen an Daten versenden. Dies ist

nun aber nicht nötig, da nur die Widerstandswerte, die über einen ADC umgerechnet werden, nun versendet werden. Deshalb haben wir nach einer neuen Möglichkeit gesucht, die einfacher zu realisieren ist. Schlussendlich wurde es dann ESP-NOW, das auf 2,4GHz funk und am ehesten mit Wifi verglichen werden kann. Es können pro Sendung 250 Byte gesendet werden. Ebenso ist eine Kommunikation zwischen mehreren ESP32 in beide Richtungen möglich. Der Standard gilt allerdings wirklich nur für den ESP32, was allerdings aufgrund der Wahl von nur diesem letztgenannten, keine Probleme darstellt. ESP-NOW sendet auf dem 802.11 Protokoll, wie auch Wifi es macht. Der Vorteil liegt aber klar in der Energieeffizienz. ESP-NOW benötigt nämlich weniger Energie (vor allem, weil weniger Daten maximal gesendet werden können) als Wifi und ist deshalb gerade für unseren Zweck, die energiebetriebene Versorgung der Senderplatine, optimal. Nicht zu vergessen ist der schnellere Verbindungsauflaufbau. Beim Testen hatten sich beide Platinen sofort miteinander verbunden. Ein großer Vorteil ist die Peer-to-Peer Kommunikation, die zwischen den einzelnen ESP32 möglich ist. Es wird dafür kein Router oder Access Point benötigt. Dadurch, dass es auch einfach möglich ist, einzustellen, welche Platine über ESP-NOW senden, empfangen oder der Transceiver sein soll, kann man sehr leicht den spezifischen Anwendungsfall realisieren.

8.1.1.2 Programmiersprache/Entwicklungsumgebung

Die Arduino IDE (1. & 2. Version) wird als Entwicklungsumgebung verwendet, da diese für Mikrocontroller der Firma Arduino konzipiert wurde. Der ESP32 gehört auch zu den Mikrocontrollern, weshalb er ebenfalls über eigene Bibliotheken bestenfalls über die Arduino IDE angesteuert werden kann. Der Code wird in der Programmiersprache C oder C++ geschrieben, da diese für die Programmierung von Mikrocontrollern bestens geeignet ist. Mit Hilfe von verschiedenen Bibliotheken aus dem Internet wird die Implementierung von bestimmten gewünschten Funktionen vereinfacht. Wichtig ist allerdings dabei, dass alle benötigten Funktionen auch getestet und angewandt werden können. Durch kleine Testprogramme wird also jede Funktion einzeln getestet und dann am Schluss zu einem Programm zusammengefügt, aber erst, wenn alles fehlerfrei funktioniert hat. Der Vorteil der Arduino IDE besteht darin, dass die unterschiedlichsten Möglichkeiten der Konfiguration des ESP32 darüber möglich sind. Es kann beispielsweise die Baud-Rate geändert werden. Wichtig ist, dass es auch sowohl mit der Arduino IDE der ersten und zweiten Generation ohne Probleme funktioniert, die Datei mit dem Programm auf den ESP32 zu laden.

8.1.1.3 Benutzerfreundlichkeit

Es ist wichtig, dass jeder, der sich ein wenig mit der Software beschäftigt, diese auch verstehen und vor allem benutzen kann. Es soll darauf geachtet werden, dass so viele Codezeilen wie möglich und nötig mit Kommentaren erklärt wird, sodass eine einfachere Bearbeitung der Software realisiert werden kann. Die Fehlerbehebung soll damit um ein Vielfaches vereinfacht

werden, da man leicht abschätzen kann, wo ein Fehler liegen könnte. Zur effizienteren Erweiterung des Programmes soll es in verschiedene Blöcke aufgeteilt werden. Damit ist gemeint, dass jeder Block einzeln einmal getestet wurde, bevor dieser im endgültigen Programm in Betrieb gehen wird. Am Ende soll es möglich sein, dass nur der ESP32 per UART-Verbindung, über eine USB-C Kabel, angeschlossen wird und man das Programm nur auf diesen hochladen muss. Die optimalen Anpassungen sollen in der Standardversion des Programmes dann bereits vorhanden sein.

8.1.1.4 Testen

Jedes Programm muss ausführlich getestet werden. Die Tests bei der Senderplatine (Handschuh) beschäftigen sich vor allem mit dem Auslesen der Widerstandswerte der Flexsensoren. Es soll überprüft werden, ob sich die Werte in dem von dem Benutzer freiwillig ausgesuchten Bereich der map Funktion liegen. Bei dem Test soll bei dem gestreckten Flexsensor der maximale Wert angezeigt werden und bei ganz gebeugtem Zustand (maximale Biegung am Handschuh durch Fingerbiegung) der niedrigste. Es ist wichtig auch zu testen, ob der Multiplexer überall durchschaltet und das in richtiger Weise. Nachdem dies erfolgreich implementiert wurde, sollen die Werte des ADCs überprüft werden, der hinter den Multiplexer geschaltet wurde. Wenn diese Werte ebenfalls realistisch sind, dann können diese Werte wie vorher bereits erwähnt gemappt werden und dann in einem bestimmten Format über ESP-NOW an die Empfängerplatine (Roboterhand) gesendet werden. Dabei soll überprüft werden, ob auch wirklich Daten gesendet werden. Bei erfolgreichem Empfangen der Empfängerplatine soll die Senderplatine im Serial Monitor der Arduino IDE ausgeben, dass die Daten erfolgreich gesendet und empfangen wurden.

8.1.1.5 Allgemeines Konzept

Die Senderplatine ist so konzipiert worden, dass Flexsensoren über Drähte an die Platine angeschlossen sind. An jedem Anschluss befindet sich eine Leiterbahn zu einem Multiplexer. Dieser soll über die Software angesteuert werden und immer wieder im richtigen Abstand durchschalten. Wenn dies richtig funktioniert, dann soll die Software die Werte des ADCs auslesen, da mit diesen dann später gearbeitet wird. Diese Werte werden dann jeweils in folgendes Format gebracht: `”$s : n : angepassterWert”` (n... Multiplexer 0 – 4; angepasster Wert... gemappter Wert des Flexsensors). Eine drahtlose Verbindung zur Empfängerplatine (Roboterhand) ist über ESP-NOW herzustellen. Wenn die Verbindung von der Sender- zur Empfängerplatine erfolgreich hergestellt wurde, dann können die Werte, die in das vorher beschriebene Format gebracht wurden, per ESP-NOW versendet werden. Als Antwort soll man im Serial Monitor sehen können, ob die Werte erfolgreich empfangen wurden.

8.1.1.6 Minimaler & maximaler Widerstandswert

Anfangs gingen wir davon aus, dass die Werte der Flexsensoren sehr genau ausgelesen werden können. Wir sind davon ausgegangen, dass jedes Mal die Werte je bestimmter Biegung sehr ähnlich sein werden. Grundsätzlich ist dies nicht falsch, jedoch gibt es ein Problem, das wir erst im Laufe der Zeit wahrgenommen haben. Die Flexsensoren halten nämlich nicht so gut wie gedacht auf dem Handschuh. Oftmals rutschen diese hin und her und der Wert, der sich je nach Biegung des Fingers bei der Messung variiert. Das stellt ein großes Problem dar, denn jedes Mal müsste dann ein neuer minimaler und maximaler Wert angenommen werden, was einen Mehraufwand verursacht. Wenn die Flexsensoren dann aber fest am Handschuh befestigt sind, es eine geeignete Lösung dafür gibt, dann wäre keine Einschränkung der Werte notwendig.

Es ist nun allerdings nötig, dass minimale und maximale Werte auf jeden Fall festgelegt werden. Der minimale und maximale Wert jedes einzelnen Flexsensors muss unbedingt festgelegt werden. Ohne diese Vorgehensweise würde es oft der Fall sein, dass nie der minimale oder maximale Wert erreicht wird, egal wie viel man jeden Finger zu biegen oder strecken versucht. Durch die Festlegung dieser Grenzwerte ist es möglich, dass der minimale und der maximale Wert auf jeden Fall erreicht werden. Die Werte, die dann unter dem minimal festgelegten Widerstandswert liegen, werden auf den minimal eingestellten Wert gesetzt. Jene die über dem festgelegten Widerstandswert liegen, werden auf den maximal eingestellten Wert gesetzt. Somit ist es ohne Probleme möglich, dass Werte, die ebenso als Fehlmessungen gezählt werden können, schon im Vorhinein aus dem Wertebereich, aus dem Werte später drahtlos übertragen werden, herausgefiltert werden. Viel zu hohe Werte, die daraus resultierend sind, dass die Verbindung zum Flexsensor fehlerhaft ist, werden somit automatisch gelöscht und nicht per ESP-NOW später übertragen. Man verliert einen sehr kleinen Wertebereich durch diese festgelegten Grenzwerte, allerdings ist dies nicht merkbar und reduziert deutlich Unregelmäßigkeiten und Fehlmessungen. Wenn nun die Flexsensoren zusätzlich auch noch am Handschuh verrutschen, dann wird trotzdem noch eine sehr gute Messung und valide Werte zur Übertragung möglich sein.

8.1.1.7 Verworfene Ideen

Datenkorrektur auf Senderseite Ursprünglich wurde mit dem Gedanken gespielt, dass die eingelesenen Werte bereits auf der Senderseite korrigiert werden. Allerdings haben wir uns dann überlegt, dass es aus energietechnischer Sicht sinnvoller ist, wenn man es auf der Empfängerseite macht. Die Datenkorrektur hätte nach folgendem System aufgebaut werden sollen:

Die Werte jedes einzelnen Widerstands werden eingelesen. Dabei vergleicht man die ersten zehn eingelesenen Werte mit jeweils einem neuen Wert. Der arithmetische Mittelwert soll hierbei herangezogen werden. So würde man auch ein sehr schnelles Öffnen und Schließen der Hand unterbinden, da dies auch durch Fehlmessungen verursacht werden könnte. Der

arithmetische Mittelwert liefert dann sozusagen eine Rampe in die eine oder in die andere Richtung, wenn man eine Faust im Handschuh machen würde. Dass der Median allerdings als viel sinnvoller betrachtet wird, das fiel uns mit der Zeit erst auf. Beim Median nehmen wir die letzten 5 eingelesenen Werte her und nehmen davon immer den Median. Dadurch wird der Wert genommen, der sich in der größentechnischen Mitte der Werte befindet. Sollte also ein extrem hoher oder extrem niedriger Wert zufällig eingelesen werden, obwohl dies nicht so sein sollte, dann wird dieser nicht bei der Ausgabe an den Servo berücksichtigt.

Die Handschuhplatine wird über einen Akku versorgt. Deshalb sollte diese Platine nur für die wichtigsten beziehungsweise nötigsten Messungen und Berechnungen verwendet werden. Der Rest kann und soll dann lieber auf der per Netzteil betriebenen Roboterhandplatine durchgeführt werden, da in diesem Fall keine begrenzte Spannungsversorgung besteht, da kein Akku verwendet wird.

Verzögerung beim Senden

Eine Verzögerung vor dem Senden des ESP32 auf der Senderseite einzubauen war eine Idee, an der sehr lange festgehalten wurde. Es schien äußerst sinnvoll, eine gewisse selbst gewählte Zeit abzuwarten, bis man dann die Daten von der Sender- zu der Empfängerplatine sendet. Dies ist grundsätzlich keine schlechte Idee, allerdings konnte erfreulicherweise folgendes festgestellt werden: Nämlich, dass es auch ohne Abwarten eines bestimmten Intervalls möglich ist, die Daten zu senden. Der ESP32 auf der Empfängerseite kann die Daten genug schnell empfangen, ohne, dass ein bestimmter zeitlicher Abstand eingehalten werden muss. Das Beste daran ist, dass auch die Verarbeitung der Daten ohne Probleme abgearbeitet werden kann. Dies ist möglich, da so wenige Rohdaten, wie möglich, von der Senderseite aus übermittelt werden, sodass alles auf der Empfängerseite dann verarbeitet wird. Durch sehr schnelles Senden und Empfangen der Daten, kann die schnellstmögliche Bewegung der Roboterhand realisiert werden.

Modus zum Einstellen des minimalen und maximalen Wertes jedes Flexsensors

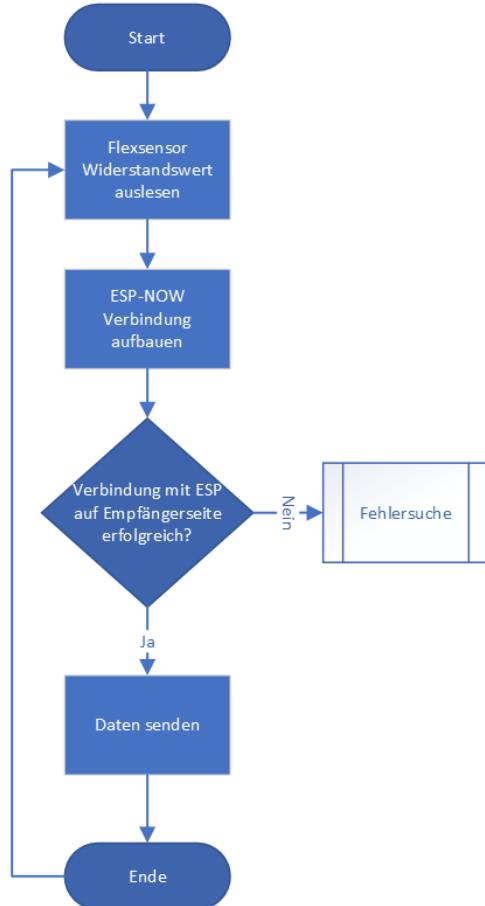
Es war ursprünglich geplant, dass beim Starten des Programmes am ESP32, der mit der Arduino IDE verbunden ist, jeder einzelne Wert der Flexsensoren jeweils eingelesen wird. Der große Vorteil davon wäre, dass es bei jedem Start des Programmes, samt Serial Monitor in der Arduino IDE, es möglich wäre, dass neue minimale und maximale Werte jedes Flexsensors ausgelesen werden. Durch einen festgelegten Befehl, den man in den Serial Monitor eingibt, könnte somit beispielsweise ein Wert des Flexsensors vom kleinen Finger gemessen werden. Für das Einstellen, welcher Finger und ob der minimale oder maximale Wert ausgelesen werden soll, hätte es dann verschiedene Befehle gegeben, die man in den Serial Monitor eingegeben hätte. Jeder einzelne minimale und maximale Wert hätte somit ausgelesen werden sollen und bis zum Neustart des ESP32 erhalten bleiben sollen.

Dies stellte sich aber als keine sinnvolle Lösung heraus. Als Erstes ist zu erwähnen, dass dieselben Flexsensoren jedes Mal zum Messen des jeweiligen Fingers genutzt werden. Es gibt keinen Wechsel dieser, es sei denn, einer geht kaputt. In diesem Fall muss für diesen dann manuell der minimale und maximale Wert ausgelesen werden. Des Weiteren verändert sich deshalb der minimale und maximale Wert jedes Flexsensors nicht. Diese beiden Grenzen werden einmalig manuell ausgelesen und nun im Programm als eigene Variable festgelegt.

Dies funktioniert dann viel besser. Bei der manuellen Messung wurden die minimalen und maximalen Werte öfter ausgelesen. Es wurde dann nach unten hin ein kleiner Spielraum gelassen, sowie auch nach oben hin. Das bedeutet, dass man beim Abbiegen oder Strecken des Fingers bereits den minimalen oder maximalen Wert kurz vor dem kompletten Abbiegen und Strecken erreicht. Dieser Schutzbereich garantiert, dass der minimale und maximale Wert immer erreicht werden können und die map-Funktion somit immer gute Werte übermitteln kann.

8.1.2 Realisierung und Gliederung **Fabian**

8.1.2.1 Realisierung



Der Code der Programmierung des ESP32 wurde in C/C++ geschrieben. Am Anfang werden die einzelnen Werte der Flexsensoren ausgelesen, die per Ansteuerung des Multiplexers und

8.1 Handschuh

des danach sitzenden ADCs bestimmt werden. Die ESP-NOW Verbindung wird danach aufgebaut. Diese dient zur drahtlosen Datenübertragung. Wenn die Verbindung mit dem ESP32 der Empfängerseite erfolgreich war, dann werden die Daten an die Empfängerplatine (Roboterhand) gesendet. Falls dies allerdings nicht erfolgreich war, dann muss eine Fehlersuche durchgeführt werden. Ein oftmals auftretender Grund ist, dass die beiden ESPs zu weit auseinander liegen. Falls diese Schritte alle abgearbeitet wurden, dann geht das ganze Prozedere wieder von vorne los.

8.1.2.2 Gliederung

Am Anfang des Senderprogramms werden die zu inkludierenden Bibliotheken eingebunden. Diese beinhalten die I2C Kommunikation für den ADC, die Möglichkeit ESP-NOW zu verwenden, indem auch zusätzlich die Wifi Bibliothek inkludiert wird.

Danach werden die ADC-Parameter festgelegt, sowie die Ports zur Ansteuerung des Multiplexers. Minimale und maximale Widerstandswerte werden festgelegt, damit es bei einer kleinen Toleranz im ganz unteren und oberen Bereich trotzdem immer den minimalen oder maximalen Wert erreicht.

Die ESP-NOW Parameter sind noch zu definieren. Also die Empfänger-Adresse, die Nummer des Flexsensors, sowie der Wert. Außerdem wird eine Funktion erstellt, die später dazu verwendet wird, um zu überprüfen, ob die Empfängerplatine (Roboterarm) die Daten erfolgreich empfangen hat.

Im Setup Teil werden anfangs die Ausgänge festgelegt, die für den ADC notwendig sind, sowie die SDA und SCL. Danach wird das ESP-NOW-Setup erstellt. In diesem Bereich werden alle notwendigen Schritte abgearbeitet, sodass man über ESP-NOW erfolgreich Daten senden kann.

In der Loop wird dann der Multiplexer angesteuert und immer wieder aufsteigend durchgeschalten. Der Wert, der vom ADC, der hinter den Multiplexer geschalten wurde, ausgegeben wird, wird dann durch eine Funktion in einen Wert umgerechnet.

Dieser Wert wird dann in Form einer Zeichenkette, die im Format `"$s : n : angepassterWert"` geschrieben wird, an den ESP32 der Empfängerplatine gesendet (n... Eingang des Multiplexers 0 – 4; angepassterWert... ausgelesener Wert (liegt zwischen Minimum und Maximum, das oben festgelegt wurde)). Es wird dann noch im Serial Monitor ausgegeben, ob die Senderplatine (Handschuh) die Daten erfolgreich senden konnte oder nicht.

8.1.2.3 Wichtige Codezeilen

```

int minWiderstand [5] = {1350, 1520, 1845, 1330, 1750};
//Daumen, Zeigefinger, Mittelfinger, Ringfinger, kleiner Finger
int maxWiderstand [5] = {1900, 2000, 2135, 1900, 2050};

```

In dem obenstehenden Code kann man zwei erstellte integer Arrays sehen. Eines ist für das Speichern des minimalen Widerstandwertes zuständig. Dort werden dann die manuell gemessenen Werte eingetragen. Das Array besitzt fünf Variablen. Die Variable auf Stelle 0 des minWiderstand Arrays gibt den minimalen Wert des Daumens an. 1 gibt den jeweiligen für den Zeigefinger an, 2 gibt den jeweiligen für den Mittelfinger an, 3 gibt den jeweiligen für den Ringfinger an und 4 gibt den jeweiligen für den kleinen Finger an. Somit kann jeder Finger im Array leicht einen neuen Wert zugewiesen bekommen und das Programm arbeitet automatisch mit den neu zugewiesenen Werten bei erneutem Hochladen auf den ESP32.

```

uint16_t result_mcp = mcp3021.read ();
value [ i - 1] = mcp3021.toVoltage (result_mcp , ref_voltage );

if (value [ i - 1] < minWiderstand [ i - 1]) {
    value [ i - 1] = minWiderstand [ i - 1];
}
if (value [ i - 1] > maxWiderstand [ i - 1]) {
    value [ i - 1] = maxWiderstand [ i - 1];
}
// Anpassen des Wertes
int angepassterWert = map (value [ i - 1], minWiderstand [ i - 1],
                           maxWiderstand [ i - 1], 0, 100);

```

Obenstehend ist nun der Codeabschnitt zu sehen, in welchem der vom ADC verarbeitete Wert des Flexsensors von dem ESP32 ausgelesen wird. Dieser wird dann mit dem Wert des minimalen und maximalen Widerstands verglichen. Wenn der ausgelesene Widerstandswert unter jenem des minimal erlaubten ist, dann wird dieser auf den minimal erlaubten gesetzt, um grobe Fehlmessungen zu vermeiden. Das gleiche gilt für den anderen Fall, nämlich, wenn der ausgelesene Wert über dem maximal festgelegten liegt. Dann wird der ausgelesene auf den maximal zulässigen Wert gesetzt. Dies ist sehr wichtig, da ein zu hoher Wert meist indiziert, dass es keine Verbindung zwischen dem Flexsensor und den anderen Komponenten, wie dem ADC, mehr besteht. Der Wert ist dann um ein Vielfaches höher als gewünscht. Um eine Beschädigung auf Empfängerseite, beziehungsweise dem dadurch folglich falschen Ansteuern der Servos zu verhindern, ist diese Maßnahme notwendig. Die Servos könnten sich ansonsten zu weit drehen und eine Beschädigung an der Mechanik hinterlassen.

```

if (value [ i - 1] <= vergleich [ i - 1]-10 || value [ i - 1]

```

```

        >= vergleich [ i - 1]+10){
    value [ i - 1];
} else {
    value [ i - 1] = vergleich [ i - 1];
}

```

In obenstehendem Code wird der Wert des Flexsensors ausgelesen und dann mit dem vorherigen Wert verglichen. Man nimmt also eine Toleranz zur Hilfe, um ein starkes Zittern der Finger zu verhindern. Es ist wichtig dies zu begrenzen, da man bei jeder minimalsten Änderung des Wertes ein extremes Zittern der Finger beziehungsweise der Servos auslösen würde, was einen Schaden an der Mechanik auslösen kann (ganzer Roboterarm zittert extrem). Es wird also der Wert des Flexsensors ausgelesen und falls dieser nicht mindestens um 10 größer oder kleiner als der zuvor gemessene Wert ist, dann wird weiterhin der vorherige Wert herangezogen. Erst sobald der momentan gemessene Wert den zuletzt gespeicherten um 10 über- oder unterschreitet, wird der aktuell gemessene Wert dann an die Empfängerseite übermittelt, ansonsten der alte Wert, der in der Variable „vergleich“ gespeichert steht.

```

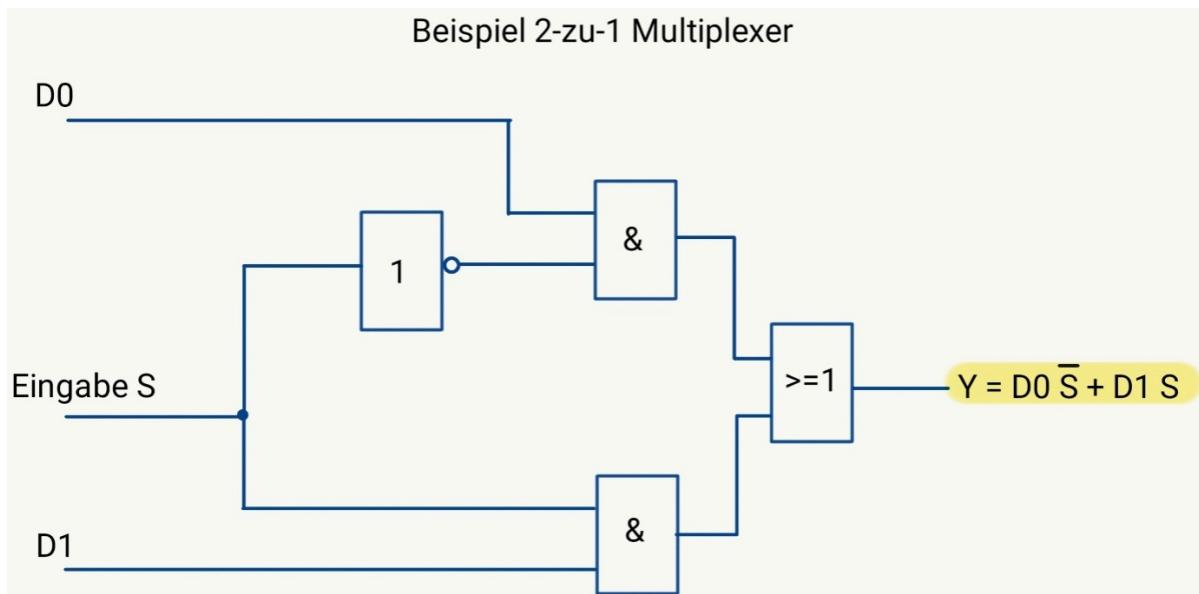
void selectMuxChannel(int channel){

    if (channel == 1) {
        digitalWrite(EN, HIGH);
        digitalWrite(A_0, LOW);
        digitalWrite(A1, LOW);
        digitalWrite(A2, LOW);
    } else if (channel == 2)
        ...
        ...
}

```

In obenstehendem Codeabschnitt wird der Multiplexer richtig eingestellt. Je nach Channelnummer wird dann festgelegt, welcher Eingang zum ADC weitergeschalten werden soll. Durch einige if-Bedingungen kann somit immer sichergestellt werden, dass man zu jeder Zeit den richtigen, gewünschten Wert auslesen kann.

Untenstehend kann man noch anhand einer einfachen Logikschaltung eines 2-zu-1 Multiplexers die Funktionsweise eines Multiplexers. Grundsätzlich wird über elektrische Signale einer von mehreren Eingangssignalen an den Ausgang durchgeschaltet. Meist funktioniert dies durch Halbleiterelemente. Das Steuersignals schaltet noch zusätzlich.



```

String package = "$s:" + String(i-1) + ":" + String(angepassterWert);

Serial.println(package);

esp_err_t result = esp_now_send(broadcastAddress,
                               (uint8_t *)package.c_str(), package.length() + 1);

```

Obenstehend sieht man nun das Format, in welchem die Daten an die Empfängerseite gesendet werden. Es wird ein String geformt. Dieser beginnt mit einem \$. Dies zeigt an, dass nun ein Befehl gesendet wird und man diesen verwerten soll. Danach noch ein s als Abkürzung für Servo. Der String von der Laufvariable i gibt dann an, welcher Wert nun gesendet wird, also beispielsweise \$s:1 würde bedeuten, dass nun der Wert des Daumens gesendet wird. Dies gibt dann eine Trennung an. Auf der Empfängerseite muss erkannt werden, wo die Trennung zwischen der Nummer des Fingers und des Wertes, zu dem sich der Servo dann hinbewegen soll, liegt. Der String von angepassterWert gibt dann den Wert an, den die Servoposition dann endgültig erreichen soll. Dabei ist es wichtig, dass dies allerdings auf der Empfängerseite dann umgesetzt wird. Auf der Senderseite wird der angepasste Wert zuvor möglicherweise durch die Grenzen von minimalem oder maximalem Widerstandswert begrenzt und dann noch mit der map-Funktion auf Werte von 0-100 gebracht, da damit dann auf der Empfängerseite gearbeitet wird. Gesamt schaut der String für den Zeigefinger mit dem angepassten Wert und einem halben Abknicken dieses also wie folgt aus: \$s:2:50:. Schlussendlich wird dann der gesamte String namens package über drahtloser Übertragung über ESP-NOW von der Sender- zu der Empfängerplatine gesendet.

8.2 Roboterhand

8.2.1 Grundlegende Voraussetzungen

Die Software des Roboterarms ist dafür verantwortlich, dass die von der Handschuhplatine, via ESP32, gesendeten Daten erfolgreich empfangen und gespeichert werden. Die Software wird hierzu per UART-Schnittstelle auf den ESP32 hochgeladen. Die Daten der Flexsensoren, die man bereits erhalten hat, sollen dann verarbeitet werden. Anhand des Widerstandswertes und der jeweiligen Veränderung, wird dann der Winkel des Servos eingestellt. Eine Fehlerkorrektur soll sicherstellen, dass die Griffkraft passend eingestellt wird. Jeder Flexsensor hat unterschiedliche Widerstandswerte, es muss also über jeden Finger eine gezielte Software geschrieben werden, damit man schlussendlich durch das Zusammenspiel aller Finger die Griffkraft richtig einstellen kann. Falsche Messungen sollen bestmöglich korrigiert werden, sodass die Servos jeweils die richtigen Winkeleinstellungen erhalten. Der ESP32 stellt hierbei die Zentrale der Steuerung dar.

8.2.2 Konzepte und Überlegungen **Fabian**

Datenübertragung, Programmiersprache/Entwicklungsumgebung und Benutzerfreundlichkeit siehe 6.1.1!

8.2.2.1 Testen

Die von der Senderplatine (Handschuh) gesendeten Daten sollen ausgelesen werden. Sie wurden nach einem bestimmten Format (Schema) gesendet. Diese Daten sollen nun ausgewertet werden. Diese Daten werden nun dazu verwendet, um die einzelnen Servos anzusteuern. Dabei wird zuerst die Servo Nummer der empfangenen Daten ausgelesen und dann der Wert. Je nachdem wie groß der Wert ist, dreht sich der Servo. Es kann dann getestet werden, ob sich der Servo tatsächlich dreht und somit, ob die Kommunikation mit dem Servo funktioniert. Wenn man die 3D-gedruckten Finger dann per Angelschnur mit den Servos verbindet, dann kann man am besten feststellen, ob die Software richtig läuft oder nicht.

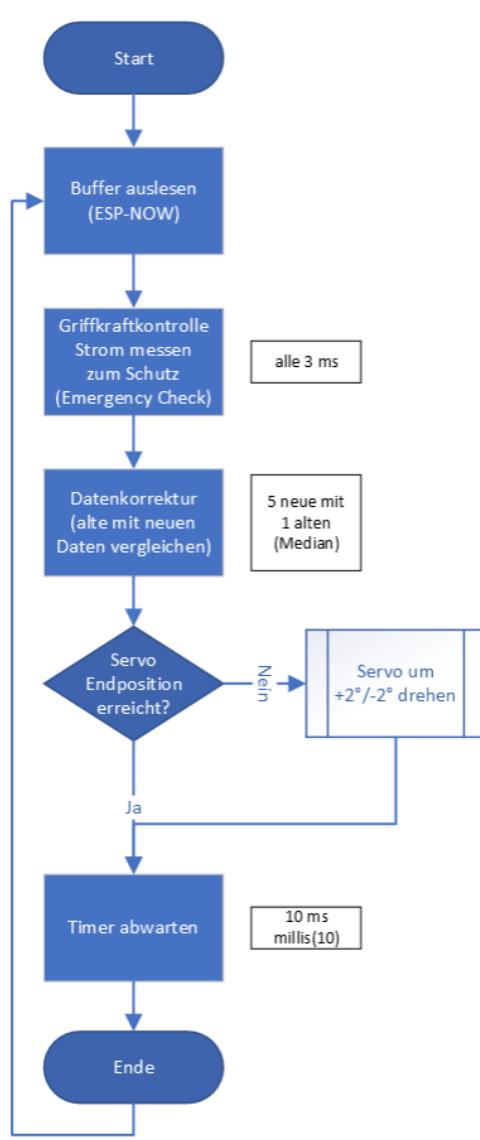
8.2.2.2 Allgemeines Konzept

Die über ESP-NOW empfangenen Daten (Widerstandswerte samt Nummer des Flexsensors) sollen ausgelesen werden. Dadurch kann dann bestimmt werden, welcher Servo sich um wie viel drehen soll. Es muss festgestellt werden, dass die Daten über eine Datenkorrektur (Median der letzten 5 Werte) korrigiert wird. Das soll dazu beitragen, dass Fehlmessungen nicht in die Werte, die an die Servos übergeben werden, einfließen. Dadurch wird sichergestellt, dass die korrigierten Werte weniger anfällig für große Schwankungen gegenüber der möglicherweise fehlgemessenen Werten (Wackelkontakt zwischen Flexsensor und Sendeplatine) sind. Durch die Strommessung kann dann noch festgestellt werden, ob ein Finger blockiert. Dies ist dann

der Fall, wenn der Strom zu lange einen gewissen festgelegten Schwellwert übersteigt. Die Servos sollen am Ende dann mit den korrigierten Werten angesteuert werden und sich ja nach Wert dann um eine einen bestimmten Winkel drehen, sodass der 3D-gedruckte Finger herangezogen oder entlastet wird.

8.2.3 Realisierung und Gliederung **Fabian**

8.2.3.1 Realisierung



Der Code der Programmierung des ESP32 wurde in C/C++ geschrieben.

Am Anfang wird der Buffer des ESP32 ausgelesen. Die von der Senderplatine (Handschuh) empfangenen Daten werden verarbeitet. Der Strom, der eine mögliche Blockierung eines Fingers erkennen kann, muss alle 3ms gemessen werden. Wenn dieser je Finger zu hoch ist, dann muss dieser Finger vorerst auf dem momentanen Wert belassen werden oder auf den maximalen Wert gesetzt werden. Dieser beschreibt die Stellung, wenn ein Finger nicht gebeugt wurde. Da die empfangenen Daten möglicherweise eine Fehlmessung beinhalten, muss eine Datenkorrektur diese entfernen. Der Median der letzten 5 Werte wird zu diesem Zweck verwendet. Dies soll dazu führen, dass ein Wert, der sehr anders als die weiteren 4 Werte ist, nicht an die Servos gesendet wird, sondern aussortiert wird. Nachdem dann alle Werte gesendet werden, wird überprüft, ob die Endposition des jeweiligen Servos erreicht wurde. Falls nein, dann darf sich der Servo weiter zu dem gesendeten Wert hinbewegen. Falls dann die gewünschte Endposition erreicht ist oder der Servo sich in eine beliebige Richtung dreht, dann wird noch der Timer von 10ms abgewartet und das Prozedere beginnt wieder von vorne.

Datenlesen & Speichern

ESP-NOW

- Bitstream auslesen (Fingerindex + Fingerposition)
- gelesene Werte in jeweils 5 Arrays nachshiften

Array (F1): Rohdaten
Array (F2): Rohdaten
Array (F3): Rohdaten
Array (F4): Rohdaten
Array (F5): Rohdaten

```
$finger1:75  
(45,45,45,45,60,50)
```

Arraydaten prüfen

Annahme Verzögerung um 3 Positionen

(20,5,5,6,5,5)

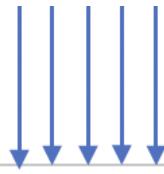
Aktuell steht das im Array!

An der Servo wird aber der vierte Wert gesendet.
Bis der Wert 20 kommt müssen 3 neue Werte folgen.

(5,5,5,20,5,5,5,6)

nun sieht man eine Annormalie im Array
Die Annormalie weicht den 3 neuen Werten enormst ab. (Abweichung
anhand einer Toleranz kalibrierbar)

nun springt das korrektursystem an und korrigiert den falschen Wert (20)
gegen den Median der nächsten Werte.



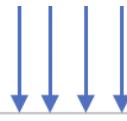
Griffkraftkontrolle

Es werden wieder 5 Werte empfangen diesmal einzelne keine Arrays.
Es wird der korrigierte/geprüfte/dritte Wert des Arrays übergeben. Somit erhält man 5 einzelnen Datenwerte

Demnach soll es eine kaum messbare Verzögerung geben.

Nun wird der Wert anapproximiert in 5 grad Schritten um Schrittweise den Strom zu prüfen.

Beispiel1: Ziel 70grad.

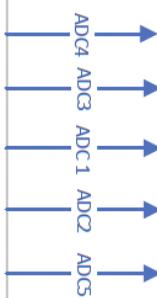


Der Motor bewegt sich in 5 grad Schritten auf 70 grad zu.

Bei 45 grad werden wird erkannt dass der Servo bereits 400mA zieht. Dies entspricht einer bekannten Charakteristik und somit ist die Schutzzvariable auf

1. Bis die Griffkraft kontrolle einschreitet, muss die Variable den Wert 3 erreichen.

Somit werden weitere 5 grad geschritten, wieder ist entspricht der Strom einer bekannten Charakteristik. Nun bewegt sich der Servo um 3 Grad weiter. Ist der Strom dann weiterhin auf auf 400mA so wird die Griffkraft kontrolle eingeschaltet und der Servo bleibt auf diesem Wert von 58grad.



ADC-Einlesen

Die jeweils fünf ADC-Werte werden eingelesen.



Als Erstes werden die von der Senderplatine gesendeten Daten ausgelesen. Diese werden mit ESP-NOW übertragen. Gesendet wird in folgendem Format: \$fingerNummer:Wert. Somit kann herausgefunden werden, welcher Wert eines bestimmten Fingers gerade gesendet wird. Der Fingerindex (Nummer) gibt dabei den Finger des Handschuhs an. Die Fingerposition kann einen Wert von 0-100 (Minimum-Maximum) annehmen. Die ausgelesenen Werte werden dann jeweils bei jedem neuen Auslesen um eine Stelle nach rechts geshiftet. Somit ergibt sich ein Array, das eine maximale Anzahl von 5 Werten pro Zeile erlaubt. Um zu vermeiden, dass sehr von den anderen Werten abweichende Zahlen in die Steuerung der Servos miteinfliessen, wird der Median aus den 5 Werten des Arrays gebildet. Dabei würde dann beispielsweise ein Wert von 20, wenn sich die anderen 4 im Bereich zwischen 2 und 5 liegen, herausgefiltert werden, da dieser nicht in der (festlegbaren) Toleranz liegt. Der Median wird also im schlimmsten Fall zur Vermeidung von Fehlern verwendet. Die Griffkraftkontrolle achtet ständig auf den aktuellen Stromwert. Falls dieser zu hoch sein sollte, wird die Position des Servos gehalten. Die aktuellen Werte, beziehungsweise der Median im Falle einer Abweichung, werden übergeben.

Der Servo wird dann jedes Mal um 5° weitergedreht. Die Schutzvariable hat dann anfangs den Wert 1, wenn allerdings der Strom laut Charakteristik einen bestimmten Schwellenwert überschreitet, dann wird die Schutzvariable auf den Wert 2 gesetzt und der Servo dreht sich nur noch um 3° weiter. Wenn schlussendlich dann der Strom zu hoch sein sollte, dann bleibt der Servo auf der momentanen Position stehen und die Schutzvariable wird auf den Wert 3 gesetzt. Damit soll eine mögliche Blockierung der Finger erkannt und die weitere Drehung des Servos erfolgreich gestoppt werden, um Schäden an der Mechanik zu vermeiden.

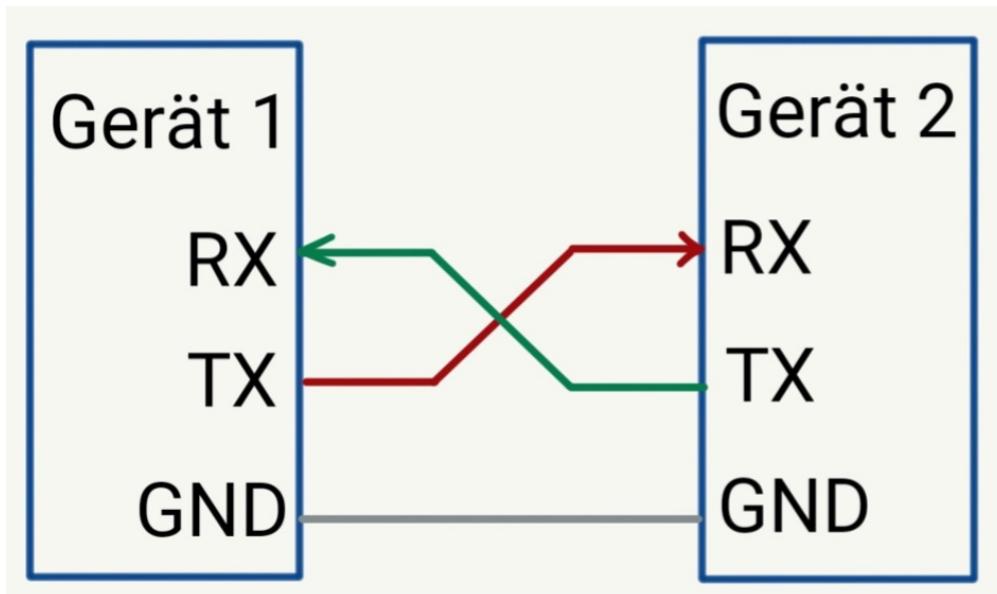
UART Funktionsweise

Der Arduino, beziehungsweise der ESP, werden über die serielle Verbindung UART (Universal Asynchronous Receiver and Transmitter) vom Computer angesprochen. Dabei stellt diese Verbindung eine asynchrone Datenübertragung mit fester Baudrate, Datenbits, Paritätsbits und Stoppbits dar. Es werden ausschließlich zwei Leitungen benötigt, nämlich eine zum Senden von Daten (TX – Transmit) und eine zum Empfangen von Daten (RX – Receive), um eine Möglichkeit der Kommunikation zu ermöglichen. Die Start- und Stopbits geben an, wann gesendet werden soll und wann dies nicht mehr geschehen soll. Sobald der Sender ein Startbit erhält, beginnt die Übertragung der Daten, aber beim Empfangen des Stopbit wird diese unterbrochen. Es wird dadurch keine Clock benötigt, da die Baud Rate dies regelt, allerdings ist zu beachten, dass diese maximal 10% von jeder des anderen Geräts abweichen darf. Die Baud Rate gibt an, wie viele Symbole pro Sekunde übertragen werden. Dabei kann ein Symbol ein einzelnes Bit oder eine Gruppe von Bits sein. Die Baudrate gibt also an in welchem Abstand jeweils ein Symbol gesendet wird (1s/Baudrate) oder eben im Umkehrschluss auch, wie viele Symbole pro Sekunde gesendet werden (Baudrate/1s).

Beispiel Protokoll für 8-bit Packet

Es ist ein Startbit vorhanden (LOW), dann noch 8 Datenbits (inklusive einem Paritybit, das Fehler identifizieren kann) und ein oder zwei Stoppbits (HIGH). Zur Kontrolle, ob es eine gerade oder ungerade Anzahl von Highbits gibt, wird ein Paritybit mitgesendet, das angibt, ob die Anzahl dieser gerade oder ungerade ist. Es gibt klarerweise keine hundertprozentige Sicherheit, aber man kann sich mehr auf die Nutzbarkeit der Daten verlassen. Wenn das Paritybit auf 0 gesetzt ist (odd), dann ist die Anzahl der Highbits ungerade. Wenn das Paritybit auf 1 gesetzt ist (even), dann ist die Anzahl der Highbits gerade. Es werden am Schluss meistens zwei Stoppbits gesendet, um eine längere Ruhephase zu realisieren. Dies führt zu einer stabileren Synchronität und Erhöhung der Robustheit gegen Signalstörungen. Bei UART wird das LSB (least significant bit) immer ganz rechts in den Daten gefunden. Sollte das Paritybit nicht stimmen, dann wird vom Empfänger an den Sender eine Anfrage mit der Bitte um erneutes Senden gesendet, da der Datensatz nicht stimmt.

<https://edistechlab.com/wie-funktioniert-uart/?v=fa868488740a>

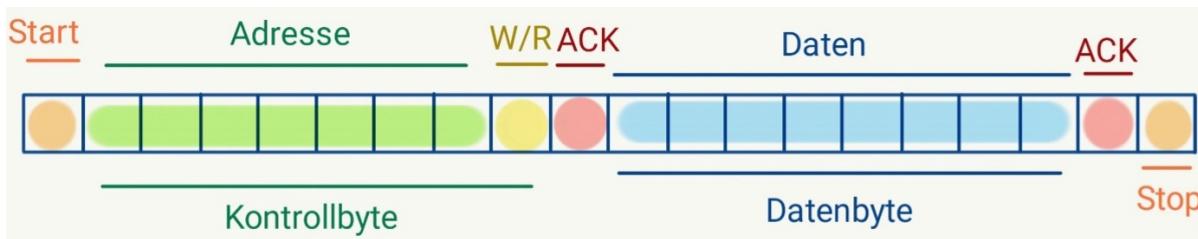


I2C Funktionsweise

I2C beschreibt eine Möglichkeit, über die zwei verschiedene Geräte miteinander kommunizieren können. Die Daten werden hintereinander gesendet und dies über zwei Leitungen. Es kann dabei mit bis zu 128 Teilnehmern kommuniziert werden. Am Ende interpretiert der I2C-Bus die Daten und steuert den Ablauf. Bei unserem Projekt ist der ESP32 der Master und die Flexsensoren beispielsweise die Slaves. Der Master ist dann der wichtige Bestandteil, da dieser für alle anderen Slaves derjenige ist, der sagt, was welches Bauteil machen soll. Dabei hängen alle Geräte beziehungsweise Bauteile an zwei Leitungen. Eine heißt SDA (serial data) und ist für die serielle Übertragung der Daten verantwortlich. Jedoch ist zu erwähnen, dass diese bidirektional benutzt wird. Das heißt es kann in beide Richtungen gesendet werden (Master zum Slave und umgekehrt). Es muss aber der Master regeln, also entweder Daten senden oder welche von einem Slave anfordern. Die zweite Leitung heißt SCL (serial clock) und ist für den Takt zuständig, der für alle per I2C verbundenen Geräte gilt. Es wird also ein synchroner Bus verwendet.

Beispiel Protokoll I2C Die Daten sind grundsätzlich in Datenpaketen verpackt, jedes besteht aus 1 Byte. Wenn nichts kommuniziert wird, dann hat SDA und SCL den Wert 1. Nachdem eine Start-Condition gesendet wurde, durch die alle Slaves wissen, dass sie nun auf den Master jederzeit reagieren sollen, wird die Adresse des Slaves gesendet, mit dem nun Daten ausgetauscht werden sollen. 7 Bit werden hierfür standardmäßig verwendet. Danach wird ein weiteres Bit gesetzt. Dieses kann den Wert 0, was Schreiben bedeutet, oder 1, was lesen bedeutet, haben. Nun ist der Slave an der Reihe. Dieser muss ebenso 0, wenn die Kommunikation bereitsteht, an den Master zurücksenden. Der Master sendet dann oder empfängt Daten vom Slave. Sobald alle Daten versendet wurden, kommt die Bestätigung. Der ganze Vorgang des Senden und Empfangens wird am Ende dann durch die Stop-Condition beendet. SDA wird hier auf 1 gesetzt, währenddessen SCL auch den Wert 1 besitzt.

<http://fmh-studios.de/theorie/informationstechnik/i2c-bus/>



8.3 User Interface

8.3.1 Grundlegende Voraussetzungen

Grundvoraussetzungen die das User-Interface erfüllen muss sind eine Anzeige der aktuellen Griffkraft in kg und eine Anzeige für den aktuellen Winkel den jeder Servomotor zur Zeit hat. Es ist zwingend notwendig, dass für die Anbindung des GUIs keine technischen Vorauskenntnisse benötigt werden. Der Verbindungsauflauf muss daher ebenfalls fast von selbst erfolgen. Multiplatform Kompatibilität und eine stabile Laufleistung sollten ebenfalls gegeben sein, um dem Endbenutzer keine Technologie aufzuzwingen, die nicht gewünscht ist.

8.3.2 Entwicklungsumgebung Laci

Entschieden haben wir uns für QT. Dies ist eine C++ Entwicklungsumgebungen, die besonders Plattform unabhängig ist. Es sind keine Änderungen des Quellcodes notwendig, um die Anwendung für MAC, LINUX oder WINDOWS kompatibel zu machen. Dies bezeichnet man auch als source code portability. Ebenfalls ist es relativ einfach möglich QML-Interfaces zu erstellen und diese mit umfangreichen Funktionalitäten auszustatten.

Weitere Eigenschaften von Qt sind:

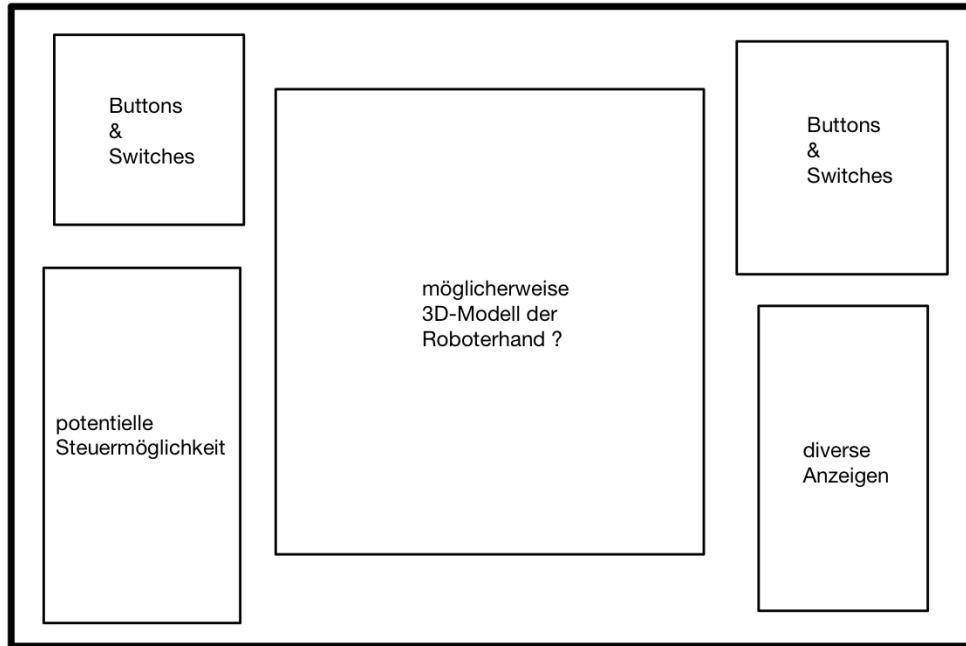
- ein GUI-Designer
- ein Debugger
- eine 3D-Umgebung um Modelle zu animieren

8.3.3 Konzepte und Überlegungen Laci

8.3.3.1 Allgemeines Konzept

Zunächst musste überlegt werden, wie die grafische Oberfläche aussehen soll. Diese wird

nämlich immer vor allen Funktionalitäten erstellt, um die anschließende Programmierung übersichtlicher und gegliedert durchführen zu können. Das grafische Interface wurde in der Beschreibungssprache QML erstellt, welche vielseitige Möglichkeiten zur individuellen Gestaltung bietet. Das Erstkonzept sieht folgendermaßen aus:



Zu sehen sind die ersten Überlegungen bezüglich des visuellen Layouts. Auf der rechten Seite des Bildschirms sollen die erforderlichen Anzeigen für die Parameter der Griffkraft und des Servodrehwinkels abgebildet werden. Links und rechts oben sollen diverse Knöpfe und Schieberegler zur weiteren Navigation und Kontrolle des UIs platziert werden. Optional kann noch ein 3D-Modell und Regler für die externe Steuerung der Roboterhand hinzugefügt werden. Diese Features sind allerdings nicht gefordert.

8.3.4 Realisierung und Gliederung **Laci**

9 Tests und Messungen

9.1 Platzhalter für diverse Unterpunkte

10 Projektmanagement

10.1 Projektstrukturplan

10.2 Milestoneplan

Lastenheft fertig – 10.10.2023

Kostenkalkulationen fertig – 24.10.2023

Prototypen proof of concept – 21.11.2023

Hardwaredesign fertig – 05.12.2023

PCB-Design fertig – 09.01.2024

Softwareimplementierung für Integrationstest fertig - 30.01.2024

Integration aller Komponenten – 06.02.2024

User Interface fertiggestellt – 13.02.2024

Abnahme durch die Projektbetreuer – 12.03.2024

10.3 Gantt-Diagramm

10.4 Meeting Struktur

11 Fertigungsunterlagen

11.1 Mechanik

11.1.1 händische Skizzen

11.1.2 CAD-Zeichnungen

11.1.3 3D-Modelle

11.2 Hardware

11.2.1 Stromlaufpläne

11.2.2 Platinen

11.2.3 Bestückungslisten

11.3 Software

11.3.1 Diagramme

11.3.2 Code

12 Ergebnisse und Erkenntnisse

13 Ausblick

14 Verzeichnisse

14.1 Quellenverzeichnisse

14.2 Abbildungsverzeichnis

14.3 Abkürzungsverzeichnis

15 Anhang