

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: 04.04.2024

übernommen von:

Eidesstattliche 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 (ChatGPT, Microsoft Copilot) zu folgendem Zweck verwendet: [Syntaxhilfen bei der Programmierung, allgemeine Informationsquelle]. Die verwendeten Hilfsmittel wurden vollständig und wahrheitsgetreu inkl. Produktversion und Prompt ausgewiesen.

Amir Al-Maytah

Fabian Schweitzer

Ladislaus Szabo

Erklärung

Die unterfertigten Kandidaten/Kandidatinnen haben gemäß § 34 Abs. 3 Z 1 und § 37 Abs. 2 Z 2 des Schulunterrichtsgesetzes in Verbindung mit den Bestimmungen der „Prüfungsordnung BMHS, Bildungsanstalten“, BGBl. II Nr. 177/2012 i.d.g.F. die Ausarbeitung einer Diplomarbeit/Abschlussarbeit mit folgender Aufgabenstellung gewählt:

RoboGlove - Bionic Hand (Gesamtprojekt)

Individuelle Aufgabenstellungen im Rahmen des Gesamtprojektes:

- Amir Mohammad Al Maytah (5BHEL): **3D-Druck, Mechanik, Userinterface-Programmierung**
- Fabian Schweitzer (5BHEL): **Mikrokontroller-Programmierung, Testmanagement, Gesamtintegration**
- Ladislaus Szabo (5BHEL): **Hardwareentwicklung, PCB-Design, Projektleitung**

Die Kandidaten/Kandidatinnen nehmen zur Kenntnis, dass die Diplomarbeit/Abschlussarbeit in eigenständiger Weise und außerhalb des Unterrichtes zu bearbeiten und anzufertigen ist, wobei Ergebnisse des Unterrichtes mit einbezogen werden können, die jedenfalls als solche entsprechend kenntlich zu machen sind.

Die Abgabe der vollständigen Diplomarbeit/Abschlussarbeit hat in digitaler und in zweifach ausgedruckter Form bis spätestens **04.04.2024** beim zuständigen Betreuer/der zuständigen Betreuerin zu erfolgen.

Die Kandidaten/Kandidatinnen nehmen weiters zur Kenntnis, dass ein Abbruch der Diplomarbeit/Abschlussarbeit nicht möglich ist.

Kandidaten/Kandidatinnen:

Amir Mohammad Al Maytah (5BHEL)

Fabian Schweitzer (5BHEL)

Ladislaus Szabo (5BHEL)

Datum und Unterschrift bzw. Handysignatur:







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

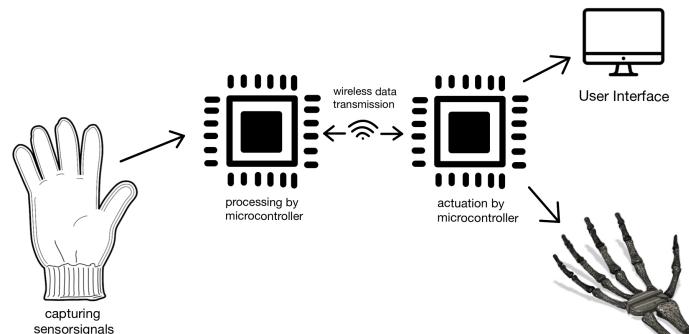
Authors	Amir Al-Maytah, Fabian Schweitzer, Ladislaus Szabo
From	5BHEL 2023/2024
Academic year	
Topic	RoboGlove - Bionische Hand
CO-operation partners	

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 wireless communication. An application of some kind 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.
----------------	---

**Illustrative graph, photo
(with explanation)**



Overview of the final integrated system

**Participation in competitions,
Awards**

**Accessibility of
Diploma Thesis**

Department administration

**Approval
(Date/Signature)**

Examiner

Head of College/Department

DIPLOMARBEIT

DOKUMENTATION

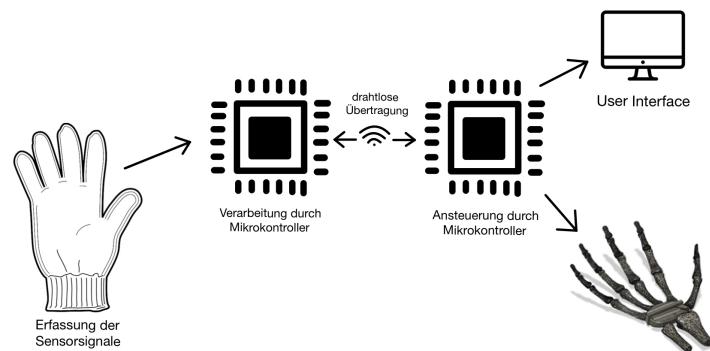
Namen der Verfasser/innen	Amir Al-Maytah, Fabian Schweitzer, Ladislaus Szabo
Jahrgang Schuljahr	5BHEL 2023/2024
Thema der Diplomarbeit	RoboGlove - Bionische Hand
Kooperationspartner	

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 Applikation 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)**



Vollständiger funktionaler Überblick des finalen Systems

**Teilnahme an Wettbewerben,
Auszeichnungen**

**Möglichkeiten der
Einsichtnahme in die Arbeit**

Abteilungsadministration

**Approbation
(Datum/Unterschrift)**

Prüfer/Prüférin

Direktor/Direktorin
Abteilungsvorstand/Abteilungsvorständin

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Ausgangslage und grundlegende Motivation	1
1.2 Themenerläuterung	1
1.3 Grundgliederung der Arbeit	2
1.4 Untersuchungsanliegen der individuellen Themenstellungen	2
2 Lastenheft	3
3 VWTT - Aktuatoren mit Positionsregelung [Al-Maytah]	7
3.1 Überblick über Aktuatoren	7
3.1.1 Diverse Arten von Aktuatoren und deren Anwendungsbereiche	7
3.1.1.1 Pneumatische Antriebe	7
3.1.1.2 Hydraulische Antriebe	8
3.1.1.3 Elektrische Antriebe	8
3.1.1.4 Thermische und magnetische Antriebe	8
3.1.1.5 Mechanische Antriebe	8
3.1.2 Einführung in den Servomotor	8
3.1.2.1 Grundlagen eines Servos	9
3.1.2.2 Aufbau und Funktionsprinzip eines Servomotors	9
3.1.3 Positionsregelung	11
3.1.3.1 Einführung in die Positionsregelung	11
3.1.3.2 Theoretische Grundlagen	11
3.1.3.3 Funktionsprinzip des Regelkreises	14
4 VWTT - Freie Lizenzen [Schweitzer]	17
4.1 Urheberrecht	17
4.1.1 Definition und Bedeutung	17
4.1.2 Auswirkung auf Software und Kreativwerke	19
4.2 Open Source	20
4.2.1 Definition und Bedeutung	20
4.2.2 Geschichte	21
4.2.2.1 Motivation, Entstehung und Meilensteine	21
4.2.2.2 Momentaner Zustand und Erwartungen für zukünftige Trends .	21
4.2.3 Lizenzen	22
4.2.3.1 Definition und Bedeutung	22
4.2.3.2 Freie Softwarelizenzen	22
4.2.3.3 Kommerzielle Softwarelizenzen - Gegenkonzept der freien Softwarelizenzen	22
4.2.3.4 Copyleft Erklärung	23
4.2.3.5 GNU GPL (General Public License)	24
4.2.3.6 Apache	25
4.2.3.7 MIT	26
4.3 Creative Commons	26

4.3.1	Definition und Bedeutung	26
4.3.2	Überblick der Lizenzen	27
5	VWTT - Sicherheitsaspekte der MRK [Szabo]	30
5.1	Einleitung	30
5.1.1	Hintergrund und Motivation	30
5.1.2	Ziel der Arbeit	30
5.2	Grundlagen der Mensch-Roboter-Kollaboration	30
5.2.1	Definition	30
5.2.2	Arten der Zusammenarbeit	31
5.2.2.1	Koexistenz	31
5.2.2.2	Synchronisation	32
5.2.2.3	Kooperation	33
5.2.2.4	Kollaboration	34
5.3	Sicherheitsaspekte	35
5.3.1	Gefahren und Risiken	35
5.3.1.1	Kollisionen	36
5.3.1.2	Unvorhersehbare Bewegungen	38
5.3.2	Sicherheitsstandards und Normen	39
5.3.2.1	ISA / IEC 62443	39
5.3.3	EU Vorschriften	40
5.3.3.1	EN61508	40
5.3.3.2	Maschinenrichtlinie 2006/47/EG	41
5.3.4	Nationale Vorschriften (Österreich)	41
5.4	Lösungen zur Verbesserung der Sicherheit bei der MRK	42
5.4.1	Sensor technologien	42
5.4.1.1	Ultraschallsensoren	43
5.4.2	Softwarebasierte Sicherheitsmaßnahmen	43
5.4.3	Physische Sicherheitsmaßnahmen	44
5.4.3.1	Roboterbezogen	44
5.4.3.2	Umgebungsbezogen	44
5.5	Fazit	45
6	Übersicht der eingesetzten Technologien	46
6.1	Flexsensor [Schweitzer]	46
6.2	Servomotor [Schweitzer]	47
6.3	ESP-NOW [Schweitzer]	47
6.3.1	OSI-Modell	50
6.3.1.1	Physical Layer	50
6.3.1.2	Data Link Layer	50
6.3.1.3	Network Layer	50
6.3.1.4	Transport Layer	51
6.3.1.5	Session Layer	51
6.3.1.6	Presentation Layer	51
6.3.1.7	Application Layer	51
6.3.1.8	ESP-NOW Schichten	51

6.3.1.9	IEEE 802.11b/g/n Standard	52
6.4	OPV Technologien [Szabo]	53
6.4.1	Single-Supply	53
6.4.2	Dual-Supply	53
6.4.3	Rail-to-Rail Technologie	53
6.5	Analog-Digital-Wandler [Schweitzer]	54
6.6	Multiplexer [Schweitzer]	55
6.7	PWM-Signale [Schweitzer]	55
6.8	I2C Funktionsweise [Schweitzer]	56
6.8.1	Funktionsweise	56
6.8.2	Beispiel Protokoll	56
6.9	UART Funktionsweise [Schweitzer]	57
6.9.1	Beispiel Protokoll für 8-Bit Packet	57
6.10	WiFi [Schweitzer]	58
7	Grundlegendes Systemkonzept [Szabo]	59
7.1	Gesamtsystemkonzept	59
7.1.1	Systembeschreibung	59
7.2	Eingabesubsystem	60
7.3	Ausgabesubsystem	61
8	Mechanische Realisierung [Al-Maytah]	62
8.1	Handschuh	62
8.1.1	Anforderungen	62
8.1.2	Überlegungen	62
8.1.3	Versuche	63
8.1.4	Testergebnisse	63
8.2	Roboterhand	65
8.2.1	Der Grundgedanke	65
8.2.1.1	Fertigung und CAD	65
8.2.2	Versuchsaufbau	66
8.2.2.1	Aufbau	66
8.2.2.2	Versuchsresultat	67
8.2.3	Entwicklungsstufe: initial	67
8.2.3.1	Konzept Einführung	67
8.2.3.2	Realisierung und Zusammenbau	68
8.2.3.3	Fazit und Ergebnisse	74
8.2.4	Entwicklungsstufe: InMoov	75
8.2.4.1	Einführung	75
8.2.4.2	Mechanismus	76
8.2.4.3	Fazit und Ergebnisse	79
8.2.5	Entwicklungsstufe: Silikon	81
8.2.5.1	Das Konzept	81
8.2.5.2	Gussform	82
8.2.5.3	Gelenke	85
8.2.5.4	Entwurf einer neuen Gussform	87

8.2.5.5	Gussform und Gussversuch der gesamten Hand	90
8.2.6	Entwicklungsstufe: Hybrid	96
8.2.6.1	Erfahrung und Konzepterläuterung	96
8.2.6.2	Erster Entwurf	97
8.2.6.3	Verbesserungen – zweiter Entwurf	99
8.2.6.4	Realisierung und Aufbau	100
8.2.6.5	Versuche	103
8.2.7	Fazit und Reflexion	103
9	Hardware Realisierung [Szabo]	104
9.1	Eingabesubsystem	104
9.1.1	Grundlegende Voraussetzungen	104
9.1.2	Überlegungen, Simulationen und Berechnungen	104
9.1.2.1	Bewegungserfassung der Fingerbeugung	104
9.1.2.2	Auslesen der Sensoren	105
9.1.2.3	Berechnung des Tiefpassfilters	106
9.1.2.4	Berechnung der OPV Verstärkung und Dimensionierung des Shuntwiderstands	106
9.1.2.5	Umwandlung der Differenzwerte in ein geeignetes Format	107
9.1.2.6	Vervielfachung der Schaltung für alle Flexsensoren	107
9.1.2.7	Bewegungserfassung der Handgelenksdrehung	108
9.1.2.8	Mikrokontroller	108
9.1.3	Versuchsaufbauten und Messungen	109
9.1.3.1	Messschaltung der Flexsensoren	110
9.1.3.2	Messergebnisse	112
9.1.4	Schaltungsdesign	115
9.1.4.1	Externer Anschluss	115
9.1.4.2	Mikrokontroller	116
9.1.4.3	Mikrokontroller Buttons	116
9.1.4.4	Status LEDs	117
9.1.4.5	Multiplexer	117
9.1.4.6	Operationsverstärker	118
9.1.4.7	Analog-Digital-Wandler	118
9.1.4.8	Gyroskop-Sensor	119
9.1.5	Platinendesign	120
9.1.5.1	Erste Testplatine	120
9.1.5.2	Zweite Version der Platine	122
9.2	Roboterhand	125
9.2.1	Grundlegende Voraussetzungen	125
9.2.2	Überlegungen, Simulationen und Berechnungen	125
9.2.2.1	Aktorik zur Fingerbewegung	125
9.2.2.2	Datenempfang	125
9.2.2.3	Ansteuerung der Motoren	126
9.2.2.4	Positions -und Kraftmessung der Roboterfinger	126
9.2.3	Versuchsaufbauten und Messungen	129
9.2.3.1	Messschaltung der Griffkraftkontrolle	129

9.2.4	Schaltungsdesign	134
9.2.4.1	Externe Anschlüsse	134
9.2.4.2	Serial-UART-Bridge	136
9.2.4.3	Mikrokontroller	137
9.2.4.4	Mikrokontroller Buttons	138
9.2.4.5	Versorgung	138
9.2.4.6	PWM-Controller	139
9.2.4.7	Servoanschlüsse	140
9.2.4.8	Strommessung zur Griffkraftkontrolle	141
9.2.4.9	Status LEDs	143
9.2.5	Platinendesign	144
9.2.5.1	Erste Testplatine	144
9.2.5.2	Zweite Version der Platine	146
10	Software Realisierung	150
10.1	Handschuh [Schweitzer]	150
10.1.1	Konzepte und Überlegungen	150
10.1.1.1	Datenübertragung	150
10.1.1.2	Programmiersprache/Entwicklungsumgebung	151
10.1.1.3	Einfache Bedienbarkeit	152
10.1.1.4	Testen	152
10.1.1.5	Allgemeines Konzept	154
10.1.1.6	Minimaler & maximaler Widerstandswert	154
10.1.1.7	Toleranz bei Werten	155
10.1.1.8	Verworfene Ideen	156
10.1.2	Realisierung und Gliederung	159
10.1.2.1	Realisierung	159
10.1.2.2	Gliederung	160
10.1.2.3	Wichtige Codezeilen	162
10.2	Roboterhand [Al-Maytah]	166
10.2.1	Grundlegende Voraussetzungen	166
10.2.2	Realisierung: Überblick	166
10.2.2.1	Programmfluss	167
10.2.2.2	Effiziente Gliederung essentieller Systemkomponenten	171
10.2.3	Kommunikation - Protokolle	172
10.2.3.1	Drahtlose Kommunikation	173
10.2.3.2	Serielle Kommunikation	173
10.2.4	Individuelle Komponenten	174
10.2.4.1	Parser und Interpretation: drahtloser Datenströme	175
10.2.4.2	Parser und Interpretation serieller Datenströme	175
10.2.4.3	proaktiver Datenkorrekturalgorithmus	176
10.2.4.4	Datenaufbereitung und Anweisung für Servoaktoren	178
10.3	User Interface [Szabo]	179
10.3.1	Grundlegende Voraussetzungen	179
10.3.2	Entwicklungsumgebung	179
10.3.3	Konzepte und Überlegungen	180

INHALTSVERZEICHNIS

10.3.4 Realisierung des Frontends	181
10.3.5 Erläuterung der Grafikoberfläche	181
10.3.6 Realisierung des Backends	183
11 Testen der Flexsensoren [Schweitzer]	184
12 Ergebnisse und Erkenntnisse	187
12.1 Mechanik [Al-Maytah]	187
12.2 Hardware [Szabo]	188
12.3 Software	189
12.3.1 Eingabesubsystem [Schweitzer]	189
12.3.2 Ausgabesubsystem [Al-Maytah]	190
12.4 Gesamtintegration [Schweitzer]	191
13 Ausblick	194
14 Abkürzungsverzeichnis	196
15 Projektmanagement	197
15.1 Milestoneplan	197
15.2 Arbeitstunden	198
16 Programme, Installationen und Plugins	210
16.1 Fusion 360	210
16.2 UltiMaker Cura	210
16.3 KiCad	210
16.4 Arduino IDE	210
16.5 QT Framework	210
17 Fertigungsunterlagen	211
17.1 Mechanik	211
17.2 Hardware	222
17.2.1 Stromlaufpläne	222
17.2.2 Platinenlayouts	229
17.2.3 Bestückungslisten	235
Abbildungsverzeichnis	250
Tabellenverzeichnis	251
Literaturverzeichnis	255

1 Einleitung

In einer sterilen Umgebung ist es unerlässlich, eine keimfreie Methode zu haben, um Aufgaben zu erledigen, die normalerweise von menschlichen Händen ausgeführt werden. Beispielsweise muss ein Objekt gegriffen und an eine andere Position innerhalb dieser geschlossenen Umgebung bewegt werden. Zusätzlich ist es hilfreich, eine Möglichkeit zur Analyse gefährlicher Güter zu haben. Diese Anforderungen können durch eine bionische Hand erfüllt werden. Diese Hand wird drahtlos vom Menschen über eine, in einen Handschuh integrierte elektronische Schaltung, gesteuert. Weitere Hardware-, Software- und Mechanikkomponenten sind erforderlich, um den gewünschten Anwendungsfall zu realisieren. Ein Prototyp eines Roboterarms wird entwickelt, der je nach Einsatzgebiet drahtlos gesteuert und vielfältig eingesetzt werden kann.

Diese Diplomarbeit wurde von mehreren Autoren verfasst und ist in verschiedene Kapitel unterteilt, um eine klare Struktur zu gewährleisten. Dadurch können die benötigten Informationen schnell gefunden werden. Zunächst werden grundlegende theoretische Kenntnisse festgehalten, um den Einstieg in das Thema zu erleichtern. Anschließend beschreiben wir die Umsetzung der Mechanik, gefolgt von der Hardware und der Software. Alle relevanten Aspekte der bionischen Hand werden in diesen Hauptkapiteln abgedeckt. Darüber hinaus werden Tests, Messungen und die während der Entwicklungsphase erzielten Ergebnisse aufgeführt und ausgewertet. Die abschließenden Erkenntnisse geben einen Überblick darüber, inwiefern die gewünschte Realisierung möglich ist. Jedes dieser Hauptkapitel enthält auch Unterkapitel, um die jeweilige Thematik detaillierter zu beschreiben.

In dieser Diplomarbeit sind alle durchgeführten Überlegungen und Entwicklungsschritte genau dokumentiert. Dadurch wird der gesamte Arbeitsfortschritt nachvollziehbar. Die verwendeten Informationen stammen aus eigener Erfahrung, Internetrecherchen oder Fachliteratur. Falls externe Quellen genutzt wurden, sind diese in Fußnoten mit entsprechenden Verweisen gekennzeichnet.

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 Fingergelenkssensoren 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 [[Unterabschnitt 1.2](#)] erläuterte Projekt, entwickelt und gefertigt:

Projektleiter: Ladislaus 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, das nach Bedarf auch erweitert werden kann, 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

Tabelle 1: Lastenheft

Requirement Nr.	Requirement Text	Mandatory (Y/N)	Erfüllungsgrad (%)
1	Es soll ein Handschuh (Eingabe) entwickelt werden, mit dem man eine Roboterhand (Ausgabe) steuern kann.	Y	100
2	Der Handschuh soll kabellos mit der Roboterhand verbunden werden können.	Y	100
3	Die Bewegungen der Roboterhand sollen möglichst gut die einer echten Hand immitieren.	Y	100
4	Die Roboterhand ist ein fertiges Design (3D Druck), dass im Projekt integriert wird.	Y	150 , weil das fertige Design verbessert und modifiziert wurde
5	Die Bewegungserfassung soll mit entsprechender Sensorik erfolgen.	Y	100
6	- Flex Sensoren für die Finger	Y	100
7	- Gyro Sensor für die Drehung des Handgelenks	N	50, Hardware ja, Software nein
8	Die Datenauswertung soll mit einem Mikrokontroller erfolgen.	Y	100
9	Eine Platine für das Verbinden aller Komponenten am Handschuh muss gebaut werden.	Y	100
10	- soll auf den Handrücken des Handschuhs passen	Y	100

Tabelle 2: Lastenheft

Requirement Nr.	Requirement Text	Mandatory (Y/N)	Erfüllungsgrad
11	- Anschlussmöglichkeiten für einen Akku (Akkupack oder LiPo), plus alternativ für eine externe Stromversorgung müssen vorhanden sein	Y	100
12	- USB Anschluss zum Programmieren des ESP32	Y	100
13	- Upload und Reset Button für ESP32	Y	100
14	- Annähen?	N	0, da die Sensoren anfangs angenähert wurden nun aber schlussendlich nicht
15	Mit einem ADC, sollen mindestens 30 verschiedene Positionen der Flexsensoren detektiert werden können.	Y	100
16	- diese Positionen sollen wiederherstellbar sein	Y	50
17	Das Maximalgewicht des Handschuhs soll 500g nicht übersteigen.	Y	100
18	Fertigung mittels 3D-Druck (fertiges Design)	Y	100
19	- metallische Gelenke für die Finger	Y	100
20	- Abmessungen der Hand und Finger wie eine echte !!	Y	100
21	Drucksensoren an den Fingerspitzen	N	0
22	Nachstellung der Bewegungen mit Motoren	Y	100
23	- Servomotoren	Y	100

Tabelle 3: Lastenheft

Requirement Nr.	Requirement Text	Mandatory (Y/N)	Erfüllungsgrad
24	Die Finger sollen sich kontrolliert zum und vom Handballen weg bewegen können.	Y	100
25	Die Finger sollen sich seitlich bewegen können.	N	0
26	Die Finger sollen sich zitterfrei bewegen können.	Y	90
27	Die Finger sollen sich störungsfrei bewegen können.	Y	90
28	- stabile kabellose Verbindung !! (störungstolerantes Kommunikationsprotokoll)	Y	90
29	- stabile Spannungsversorgung für jeden einzelnen Motor	Y	100
30	- Mikrokontroller für die Kommunikation mit dem Handschuh und die Steuerung der Servomotoren (ESP32)	Y	100
31	- Anschluss für externes Netzteil	Y	100
32	- USB Anschlus zum Programmieren des ESP32	Y	100
33	- Upload -und Reset Button für ESP32	Y	100
34	Jeder einzelne Servomotor soll eine Stromüberwachung haben.	Y	100
35	- mit dieser soll die Griffkraft der Finger kontrolliert werden können. (leicht - mittel - stark)	Y	0

Tabelle 4: Lastenheft

Requirement Nr.	Requirement Text	Mandatory (Y/N)	Erfüllungsgrad
36	- die Parameter der Griffkraft sollen eingestellt werden können.	Y	0
37	Die Hand soll eine 500mL Plastikflasche, die zur Hälfte gefüllt ist, als Endziel greifen können und in der Luft halten.	Y	100
38	Das User Interface soll folgende Elemente aufweisen:	Y	75
39	- 3D Modell der Hand	N	100
40	- Griffkraftanzeige (in kg)	Y	0
41	- Anzeige der Servostellung (Winkel)	Y	100
42	- in Form einer Applikation	Y	100

3 VWTT - Aktuatoren mit Positionsregelung [Al-Maytah]

3.1 Überblick über Aktuatoren

Ein Aktuator bezeichnet ein Gerät, welches erhaltene Energie und Signale in eine Bewegung oder auch Kraft umwandelt. Diese Apparaturen sind weitverbreitete Komponenten in Bereichen wie der Robotik bis zu großflächigen Anwendungen bei der Automatisierung und Steuerung verschiedener Applikationen in der Industrie.¹

Die anhand der Umwandlung resultierende Bewegung kann rotierend oder geradlinig sein. Rotierende Bewegungen werden anhand eines Drehantriebs erzeugt, bei geradlinigen Bewegungen hingegen bewegt sich der Antrieb auf einer Achse in beide Richtungen, vor und zurück.²

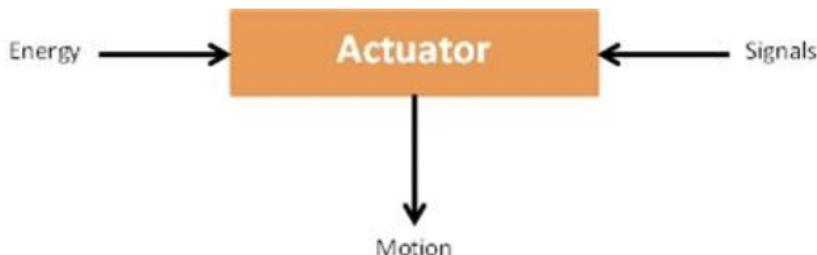


Abbildung 1: Actuator (Quelle: REAC 10.03.2024)

3.1.1 Diverse Arten von Aktuatoren und deren Anwendungsbereiche

Aufgrund der weitverbreiteten Anwendung von Aktuatoren erschließen sich verschiedene Arten von diesen. Demnach gibt es thermische, mechanische, elektrische, pneumatische und hydraulische Aktuatoren, mit verschiedenen Eigenschaften für das jeweilige Anwendungsgebiet. Diese Eigenschaften, können zu einem die Kraft, Reaktionszeit und auch Haltbarkeit sein, sowie auch die Drehbeziehungsweise allgemeine Geschwindigkeit.³

3.1.1.1 Pneumatische Antriebe

Unter einem Pneumatischen Antrieb versteht sich ein Gerät welches anhand von Druckluft eine Bewegung erzeugt. Die Anwendungen sind äußerst vielseitig, beispielsweise für die Bewegung von Komponenten in Maschinen und unter anderem auch zum Steuern der Stellung eines Ventils. Die Eigenschaften solch eines Antriebs sind sehr geringe Reaktionszeiten sowie starke Kräfte.⁴

¹Joy 10.03.2024

²REAC 10.03.2024

³Joy 10.03.2024

⁴Joy 10.03.2024

3.1 Überblick über Aktuatoren

3.1.1.2 Hydraulische Antriebe

Anhand des Drucks von Flüssigkeit wird beim hydraulischen Antrieb eine Bewegung erzeugt, diese findet ihren Platz bei Schwerlast-Anwendungen, besonders im Konstruktions- und Fertigungsbereich. Hydraulische Aktuatoren stehen für eine hohe Kraft und Haltbarkeit.⁵

3.1.1.3 Elektrische Antriebe

Diese Formen der Antriebe nutzen elektrische Energie um aus dieser eine Bewegung zu erzeugen. Diese unterteilen sich in Gleich- und Wechselstrommotoren, welche in elektronischen Anwendungen weitverbreitet sind. Aufgrund ihrer äußerst genauen Steuerungsmöglichkeiten, sowie des geringen Geräusches finden solche Antriebe ihre Anwendung in der Automatisierung gewisser Systeme, medizinischer Geräte und weiterer Laboranwendungen.⁶

3.1.1.4 Thermische und magnetische Antriebe

Diese Form eines Aktuators nutzt die Änderung von Temperatur oder magnetischen Feldern um daraus eine Bewegung zu erzeugen. Ein thermischer Antrieb macht sich somit die Ausdehnung oder Kontraktion gewisser Materialien, welche durch Temperaturänderungen verursacht wurde, zu nutze. Diese Verfahren finden ihre Applikation in sehr kleinen Systemen, wie in mikromechanischen oder miniaturisierten Anwendungen.⁷

3.1.1.5 Mechanische Antriebe

Eine Bewegung kann bei diesem Antrieb anhand von mechanischen Komponenten wie Zahnrädern, Nocken oder Hebel erzeugt werden. Deren Einsatz erfolgt häufig in Anwendungen, die geringe Kosten und eine hohe Haltbarkeit auf längere Zeit erfordern.⁸

3.1.2 Einführung in den Servomotor

Mit einem DC-Motor als Kernkomponente ordnet sich der Servomotor den elektrischen Antrieben zu. Der Begriff „Servo“ bedeutet so viel wie „Diener“ im Lateinischen und ist auf seine Funktion als Aktuator zurückzuführen, denn er ist eine Kombination eines Elektromotors und einer zugehörigen Steuerungs- und Regelungselektronik.⁹

⁵Joy 10.03.2024

⁶Joy 10.03.2024

⁷Joy 10.03.2024

⁸Joy 10.03.2024

⁹Wikipedia 10.03.2024b

3.1.2.1 Grundlagen eines Servos

Aus dem Zusammenspiel eines Servomotors und eines Servoreglers erschließt sich ein geschlossener Regelkreis, aus dem sich ein jeweiliger Antrieb bildet. Der Servo wird geregelt nach dem Prinzip der Positionsregelung, welche in [Unterunterabschnitt 3.1.3] ausführlicher erläutert wird.¹⁰ Besonders zeichnen sich diese Motoren anhand ihrer hohen Präzision aus, da sie in der Lage sind eine angeforderte Position akkurat anzusteuern und diese konstant zu halten. Auch führt dies dazu, dass der Antrieb ohne große Verzögerung eine Position beziehungsweise auch Drehzahl erreicht. Eine Anwendung findet dieser daher, aufgrund seiner Eigenschaften, in Systemen, welche darauf abzielen dynamische Bewegungen zu erzielen, wie Roboter oder Maschinen.¹¹

3.1.2.2 Aufbau und Funktionsprinzip eines Servomotors

Äußere Komponenten

Von außen sind von einem Servomotor sein Hauptgehäuse und seine Anschlüsse zu sehen. Die Anschlüsse dabei sind bei Modellbau-Motoren die Versorgung, sowie das Signalkabel. Auf diesem Kabel erfolgt die Datenübermittlung per PWM (Pulse-Width-Modulation). Auf der oberen Seite des Hauptgehäuses ist ein Zahnrad zu sehen, auf diesem können je nach Anwendung verschiedene Aufsätze montiert werden.¹² @3 min 38 Sekunden

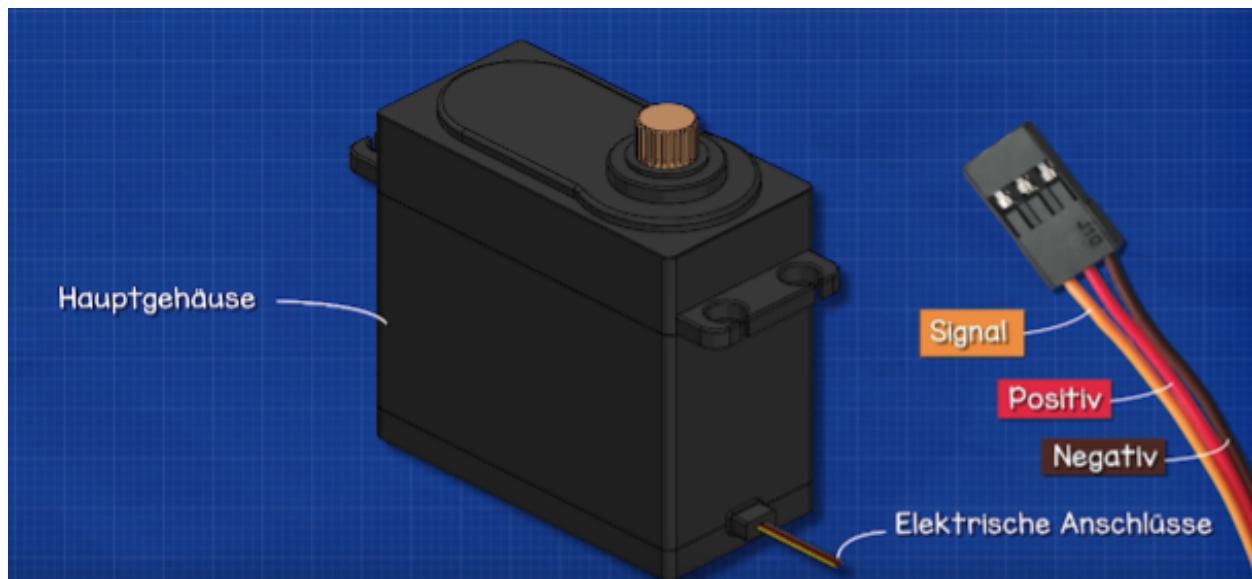


Abbildung 2: Äußere Betrachtung eines Servomotors (Quelle: Ingenieursmentalität 10.03.2024@3 min 51 Sekunden)

¹⁰Wikipedia 10.03.2024b

¹¹Beetz 10.03.2024

¹²Joy 10.03.2024

Innere Komponenten

Im Innenleben des Servos befindet sich ein Mechanismus, welcher sich aus mehreren Zahnräden und Kugellagern zusammensetzt, aufgrund der Anordnung, die diese Zahnräder haben, kann der Mechanismus auch als Verbundgetriebe bezeichnet werden. Dieses Getriebe hat zwei Seiten, auf der linken ist der sogenannte Eingang, welcher von einem Gleichstrommotor angetrieben wird, und rechts ist der Ausgang, welcher letztlich die gewünschte Drehung am Äußeren des Motors ausgibt und zugleich mit einem Potentiometer, zur Erfassung der Position, verbunden ist. ^{13@4 min 15 Sekunden}

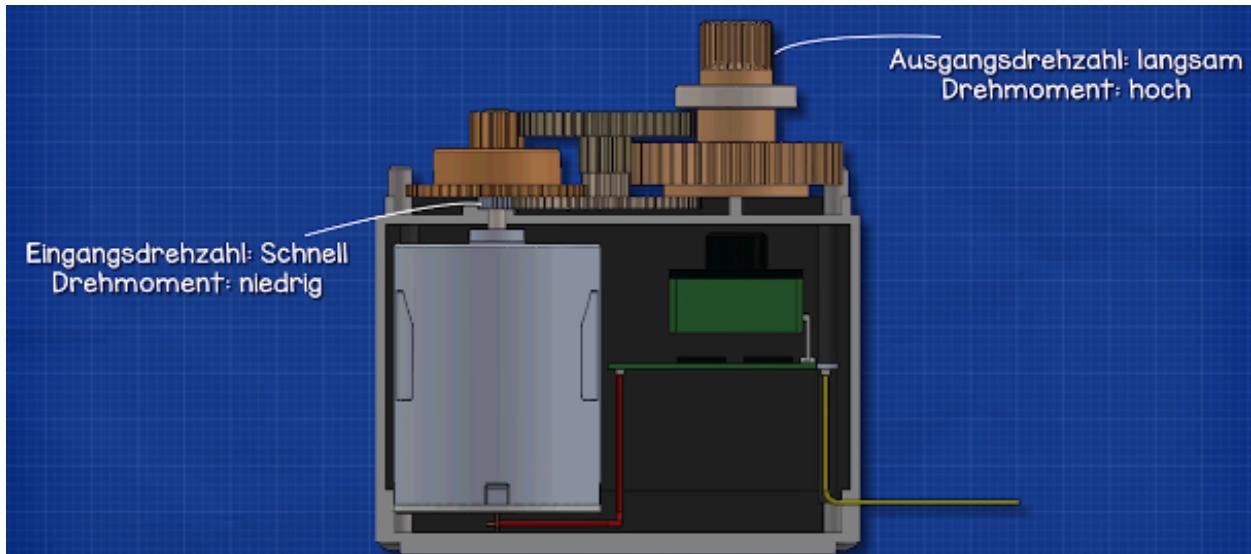


Abbildung 3: Servomotor von Innen ([Quelle: Ingenieursmentalität 10.03.2024@4 min 16 Sekunden](#))

Das Verbundgetriebe bewirkt, dass aus der hohen Drehzahl vom Gleichstrommotor eine niedrigere geschaffen wird, und es erhöht sich aufgrund der Übersetzung der Zahnräder das Drehmoment. ^{14@4 min 15 Sekunden}

¹³[Ingenieursmentalität 10.03.2024](#)

¹⁴[Ingenieursmentalität 10.03.2024](#)

3.1.3 Positionsregelung

3.1.3.1 Einführung in die Positionsregelung

Bezugnehmend auf ein System, wie der Antrieb eines Motors, regelt der Positionsregler diesen auf eine bestimmte Position und versucht diese durchgängig zu halten, solange bis auf eine neue Position geregelt werden soll. Die Anwendung der Positionsregelung ist oft in der Robotik zu sehen, sei es eine einzelne Achse eines Roboters oder Großanwendungen für diverse Systeme.

Wie bereits erwähnt regelt der Servomotor auf eine per PWM angewiesene Position, die Positionsregelung erfolgt unter gängigen Eigenschaften einer Regelung. Eine Regelabweichung zwischen Soll- und Ist Wert wird berechnet, darauf folgt vom Regler eine entsprechende Stellgröße.

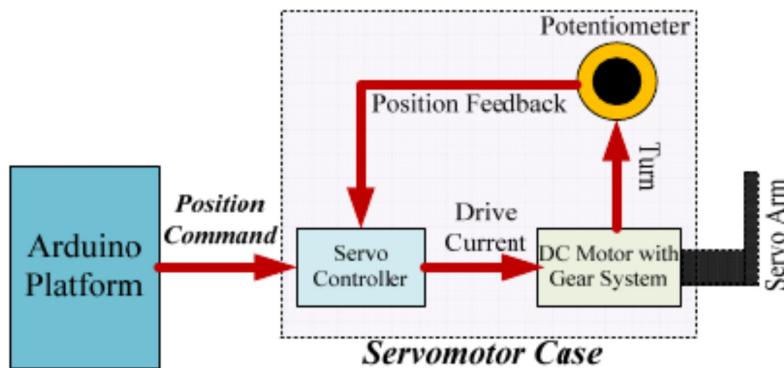


Abbildung 4: Servomotor von Innen (Quelle: *A comparative study on the position control method of dc servo motor with position feedback by using arduino* 19.03.2024)

Der Regelkreis eines Servomotors sieht wie folgt aus: Ein Mikrocontroller sendet per PWM eine Position an den Servo-Controller. Die gesendete Position entspricht nun der Sollgröße, das über das Getriebe verbundene Potentiometer liefert eine Rückmeldung der aktuellen Position, die Ist-Größe, an den Controller. Aus der Regelabweichung berechnet der Controller eine Stellgröße, einen Antriebsstrom, welcher zum Gleichstrommotor fließt und diesen antreibt, bis über das Feedback des Potentiometers festgestellt wird, dass die Zielposition erreicht wurde.

3.1.3.2 Theoretische Grundlagen

Essenzielle Begriffe

Ist-Größe: Beschreibt in diesem Zusammenhang den aktuellen Drehwinkel Φ des Motors, wird über das Potentiometer ermittelt.

Soll-Größe: Diese ist der Zielwinkel, bis zu dieser Position soll der Gleichstrommotor sich drehen und wird per PWM übergeben.

3.1 Überblick über Aktuatoren

Regelabweichung: Die Differenz zwischen der Soll- und Ist-Größe

Stellgröße: Die Größe welche bewirken soll, dass sich die Abweichung stetig verringert.

Erläuterung integrierter Regler

Der Regelkreis eines Positionsreglers setzt sich aus mehreren einzelnen Reglern zusammen, um daraus die notwendige Regelstrecke zu bilden.

PID-Regler

Eine wesentliche Komponente der Positionsregelung ist der PID-Regler, welcher eine Kombination beziehungsweise gar Parallelschaltung dreier Regelungsglieder ist. Sein Ziel ist es grundsätzlich die Abweichung zwischen Ist- und Sollgröße zu minimieren und dies möglichst präzise, effizient und genau. Aufgrund seiner vielfältigen Eigenschaften ist der PID-Regler in sämtlichen Anwendungen weitverbreitet und darf sich dementsprechend als der „Standardregler“ bezeichnen. Die drei integrierten Glieder, das P-Glied, das I-Glied sowie das D-Glied, ermöglichen das Einstellen anhand von drei Parametern, jedoch ausschließlich auf Basis einer fundierten Berechnung.¹⁵ p.99

Die Übertragungsfunktion des PID-Reglers setzt sich aus den einzelnen Übertragungsfunktionen der jeweiligen Glieder zusammen:

$$F_R(s) = k_R * (1 + \frac{1}{sT_n} + sT_v) = k_R + \frac{1}{sT_O} + sT_D$$

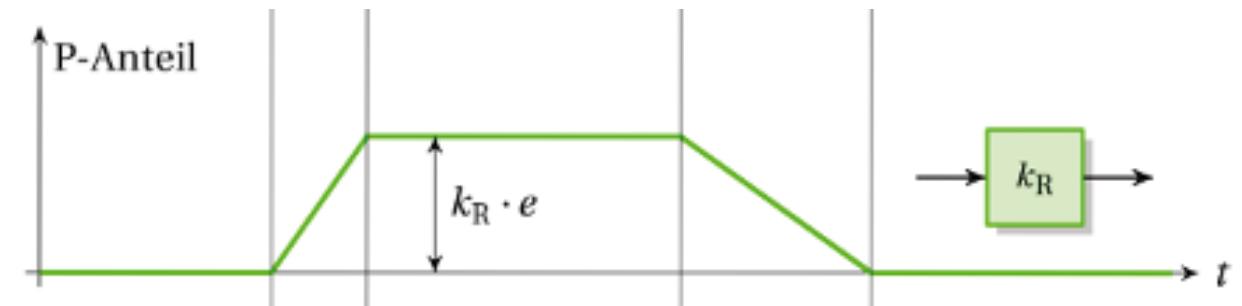


Abbildung 5: P-Glied (Quelle: Wilhelm 2022p.101)

Der erste Summand „ k_R “ der Übertragungsfunktion ist der P-Regler, das „P“ im Namen ergibt sich aus der Tatsache, dass seine Ausgangsgröße proportional zur Eingangsgröße ist, der P-Regler gibt somit die Konstante „ k_R “. ¹⁶P-Regler

¹⁵Wilhelm 2022

¹⁶Studiflix 10.03.2024

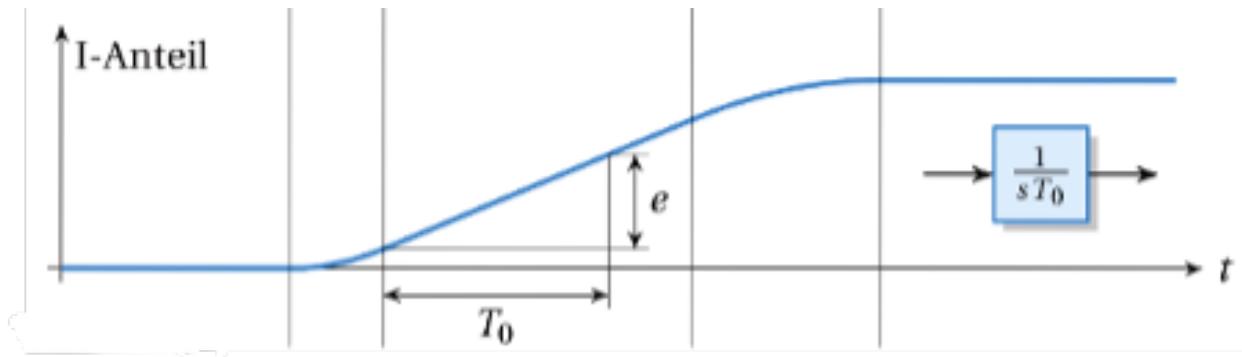


Abbildung 6: I-Glied (Quelle: Wilhelm 2022p.101)

In der Übertragungsfunktion beschreibt der zweite Summand den I-Anteil, dieser erzeugt eine Ausgangsstellgröße, welche dem zeitlichen Integral, daher der Name, der Eingangsgröße, sprich der Regelabweichung proportional ist. Bei einer konstanten Regelabweichung würde sich die Stellgröße in Form einer Rampe ändern.¹⁷p.99

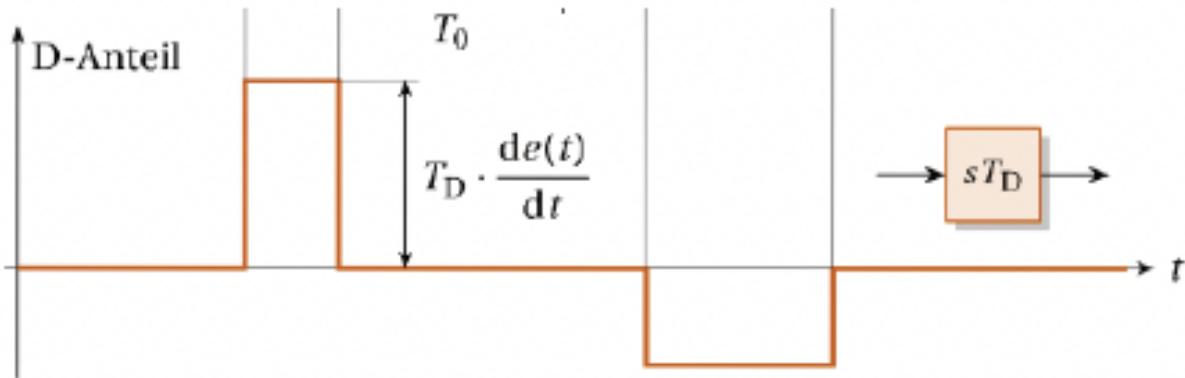


Abbildung 7: D-Glied (Quelle: Wilhelm 2022p.101)

Der letzte Summand beinhaltet die Übertragungsfunktion des D-Anteils, das „D“ steht dabei für Differenzierer, denn dieser erzeugt eine Stellgröße, welche proportional der zeitlichen Änderungsrate der Regelabweichung ist. Ist die Regelabweichung konstant, gibt es demnach keine Stellgröße, was jedoch bedeutet, dass mit einer raschen Reaktion auf eine Änderung der Regelabweichung zu rechnen ist.

¹⁷Wilhelm 2022

3.1.3.3 Funktionsprinzip des Regelkreises

Der Regelkreis einer Positionsregelung setzt sich aus mehreren verschiedenen Komponenten zusammen, mitunter dem PID-Regler als Kernglied, dem Motorblock und auch weiteren P und I Reglern.

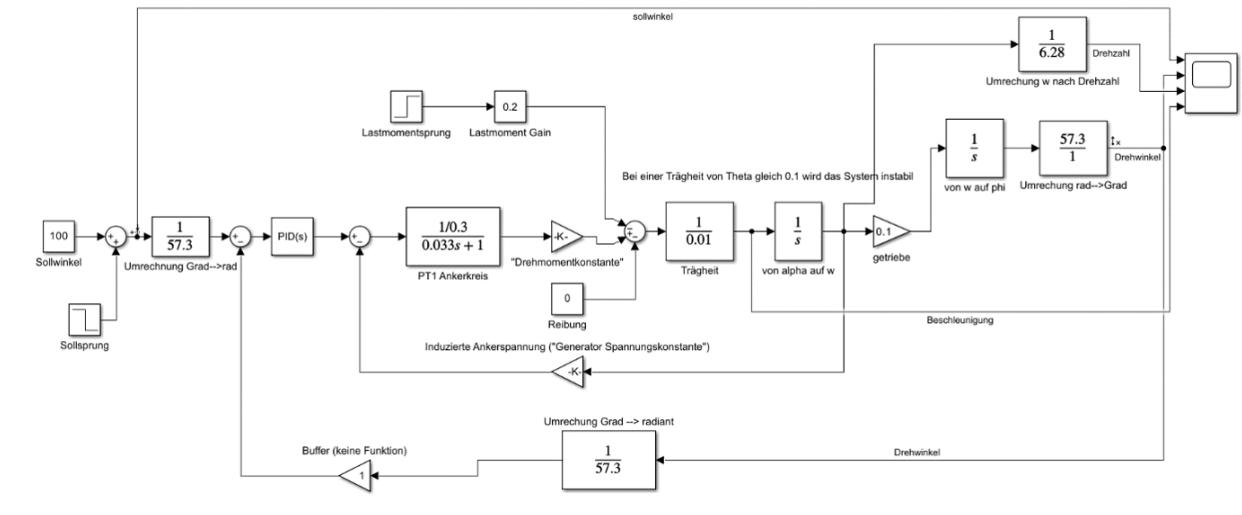


Abbildung 8: Makrodarstellung des Regelkreises

Das Funktionsprinzip der Positionsregelung wird anhand einer Simulation, wie in Abbildung 8 ersichtlich, dargestellt. Die Modellierung des Gleichstrommotors dient ausschließlich zur Veranschaulichung des Prinzips und soll nicht einen spezifischen Servomotor immittieren. Grundsätzlich beginnt der Kreislauf der Regelung mit einer Sollgröße, in diesem Fall einem Soll-Winkel von 100°. Vorhanden in der Simulation der Positionsregelung ist auch ein optionaler Sollsprung. Zu Beginn wird der Sollwinkel von Grad in Radian umgerechnet, danach wird eine Differenz zwischen dem Soll- und dem aktuellen Drehwinkel (Ist-Größe) gebildet.

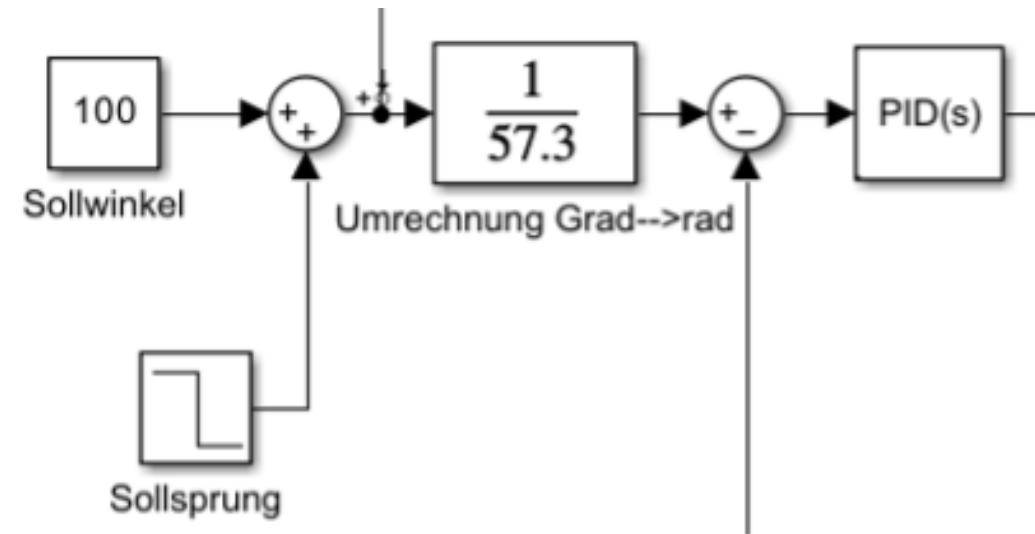


Abbildung 9: Abschnitt des Regelkreises für die Sollgröße

Die berechnete Differenz, welche die Regelabweichung darstellt, wird darauf an den PID-Regler übergeben, welche eine entsprechende Stellgröße in Form einer Spannung an den Motor gibt.

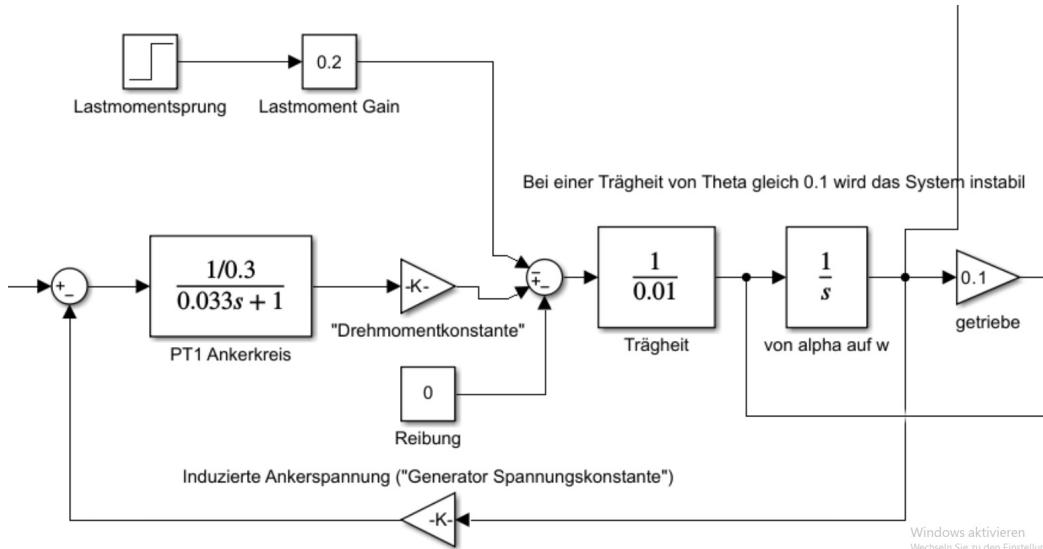


Abbildung 10: Abschnitt des Regelkreises Motor

Beschreiben lässt sich der Motor anhand folgendem Block, welcher sich aus einem PT1-Glied und sämtlichen Störmomenten zusammensetzt. Als Verzögerungsglied erster Ordnung beschreibt dieses das Anlaufverhalten des Motors.¹⁸ Zusätzlich werden das Lastmoment, die Reibung und die Trägheit in das System miteinkalkuliert.

¹⁸Wikipedia 10.03.2024a

3.1 Überblick über Aktuatoren

Aus der mathematischen Modellierung des Gleichstrommotors, wie im Blockschaltbild dargestellt, ergibt sich eine Winkelgeschwindigkeit, die Drehzahl des Motors „ Ω “. Wie in [Absatz 3.1.2.2] bereits beschrieben, wird die Drehzahl mit einem Getriebe übersetzt, im Falle dieses Beispiels beträgt das Übersetzungsverhältnis des Getriebes 0,1.

Mit einem I-Glied muss diese in den Drehwinkel Φ , welcher der Motorposition entspricht, umgerechnet werden.

$$\int_0^t \omega(t)dt = \phi$$

Finalerweise wird der Drehwinkel nochmals von Radiant in Grad rückgerechnet und der Drehwinkel ergibt sich, dieser wird anschließend als Feedback im Regelkreis rückgeführt und bietet eine Grundlage zur Berechnung der neuen Regelabweichung.

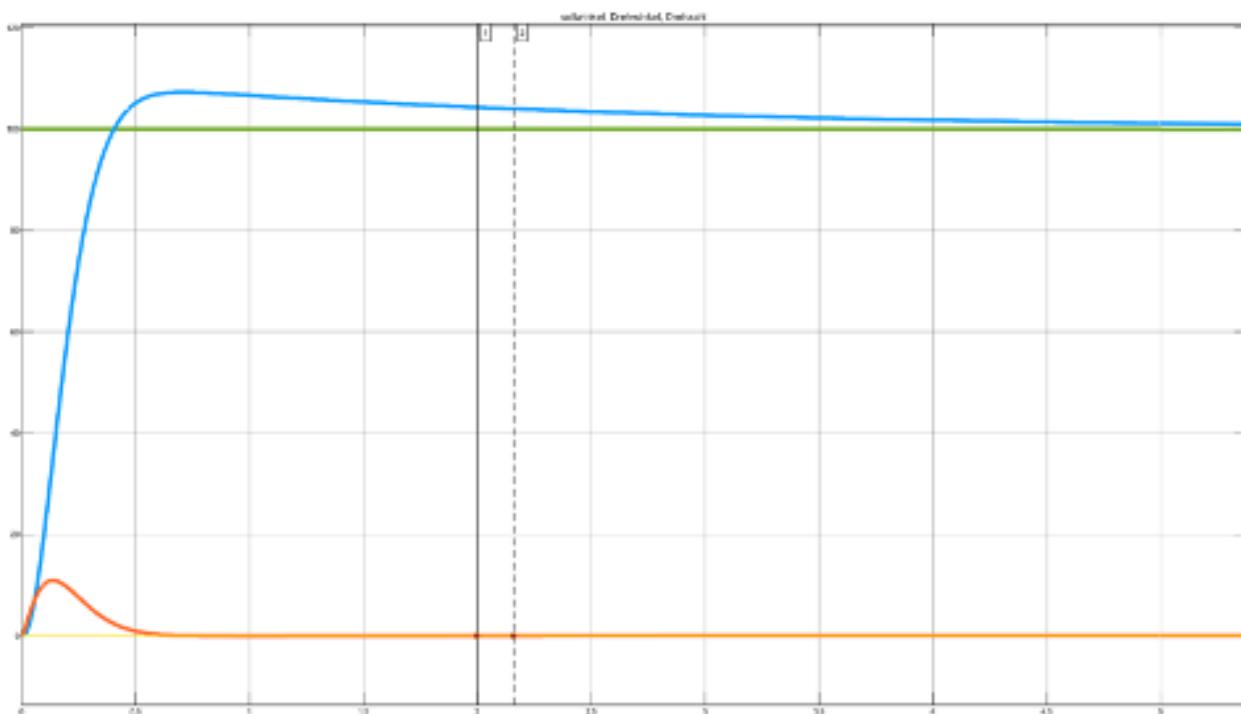


Abbildung 11: Diagram Positionsregler

Zu sehen sind in dieser Abbildung drei Größen: In Grün der Soll-Winkel, in Blau der tatsächliche Drehwinkel Φ (die Ist-Größe) und die Drehzahl (Winkelgeschwindigkeit Ω) ist orange gekennzeichnet. Erkennen lässt sich, dass zum Zeitpunkt $t=0$ das System die Anweisung bekommt auf einen Winkel von 100° zu regeln. Nach 0,4 Sekunden wurde diese Position erreicht, jedoch zugleich überschritten, der Motor hat sich auf 105° gedreht. Während dieses Vorgangs ist die Drehzahl auf ein Maximum von 10 Umdrehungen die Sekunde angestiegen, nach dem Erreichen des Zielwerts sinkt die Drehzahl und somit auch der Drehwinkel Φ bis dieser 100° erreicht.

4 VWTT - Freie Lizenzen [Schweitzer]

4.1 Urheberrecht

4.1.1 Definition und Bedeutung

Autoren, Programmierer oder aber auch beispielsweise Maler sind Urheber ihres selbst geschaffenen Werkes. Dabei beschreibt das Urheberrecht die Rechte, die eine Person an diesen hat. Wichtig ist auch, dass es nicht immer nur einen Urheber geben muss, sondern auch Teil- oder Miturheber existieren können, falls ein Werk nicht allein geschaffen wurde.¹⁹

Das Urheberrecht besitzt viele Merkmale, die vier wichtigsten sind allerdings folgende:

- Keine Möglichkeit der Übertragung: Es ist nicht möglich, sein Urheberrecht an andere Personen abzugeben. Es können lediglich Verwertungsrechte an bestimmte Personen vergeben werden. Damit ist es diesen möglich, das, von einer anderen Person geschaffene, Werk zu vervielfältigen, zu verbreiten und öffentlich auszustellen. Die einzige Ausnahme, einer Übertragung des Urheberrechts, stellt jene nach dem eigenen Tod an die Erben dar.
- Erlischt nach bestimmter Zeit: Das eigens geschaffene Werk ist für die gesamte Lebenszeit urheberrechtlich geschützt. Nach dem Tod erlischt das Urheberrecht nicht sofort, sondern erst 70 Jahre danach. Die Erben sind dadurch dazu berechtigt davon zu profitieren und die Nutzung weiterhin zu kontrollieren. Wenn allerdings das Urheberrecht erloschen ist, dann gilt das Werk als gemeinfrei und hat somit keinen urheberrechtlichen Schutz mehr.
- Tritt von selbst in Kraft: Sobald ein Werk eigenständig geschaffen wurde, fällt es unter den Bereich des Urheberrechts. Das bedeutet, dass man sich auch an die damit verbundenen Pflichten, sowie Rechte, halten muss.
- Kein Mindestalter: Es ist nicht notwendig ein bestimmtes Alter erreicht zu haben, um als Urheber gelten zu dürfen.²⁰

Die folgenden drei Anforderungen sind allerdings essenziell, um ein Werk als urheberrechtlich geschützt bezeichnen zu können:

- Wahrnehmbarkeit: Die bloße Idee lässt sich nicht schützen. Das Werk muss in einer Form existieren, in der es auch auf sinnlicher Ebene wahrgenommen werden kann.
- Schöpfungshöhe: Es muss sich um ein einzigartiges Werk handeln, das die eigentümliche geistige Schöpfung beinhaltet. Es muss sich von anderen Werken zumindest im kleinen Maß unterscheiden.

¹⁹ Saferinternet p.7 06.03.2024

²⁰ Saferinternet p.7 06.03.2024

4.1 Urheberrecht

- Orginalität: Fakten oder Wissen sind nicht geschützt. Deshalb muss eine individuelle Prägung des Schöpfers erkennbar sein.²¹

Als Urheber muss man auch Pflichten nachgehen. Dabei ist zu beachten, dass man keine illegalen Inhalte in das Internet stellen darf. Genauer gesagt dürfen diese nicht gegen das österreichische Recht verstößen.

- Persönlichkeitsrechte: Es müssen die personenbezogenen Daten, sowie das Recht auf das eigene Bild stets gewahrt werden. Außerdem sollte man das Namensrecht, sowie die Privatsphäre immer berücksichtigen.
- Rechtliche Grenzen der Inhaltsveröffentlichung: Andere Menschen im Internet zu beleidigen oder zu diskriminieren verstößt gegen die guten Sitten. Genauso ist es beispielsweise verboten nationalsozialistisches Gedankengut zu verbreiten.²²

Als Urheber hat man aber auch genauso Rechte, die einem zustehen. Diese sind in Persönlichkeits- und Verwertungsrechte gegliedert:

Persönlichkeitsrechte: Die wichtigsten sind, dass man entscheiden kann ob, wann und wie ein Werk veröffentlicht werden soll, in welcher Form der Name genannt werden muss und jede Änderung, die zur Entstellung des Werks führen würde, unterbunden werden wird.

Verwertungsrechte:

- Vervielfältigungsrecht: Das eigene Werk darf egal zu welchem Zeitpunkt in unbedingter Menge vervielfältigt werden.
- Verbreitungsrecht: Das eigene Werk darf überall angeboten und vervielfältigt werden. Nur der Urheber ist dazu berechtigt.
- Öffentliche Vorführung: Das eigene Werk darf in der Öffentlichkeit gezeigt beziehungsweise aufgeführt werden.
- Zurverfügungstellungsrecht: Das Recht, das Werk der Öffentlichkeit in drahtgebundener oder drahtloser Weise zur Verfügung zu stellen, zum Beispiel im Internet.²³

Welche Nutzungsrechte können erworben werden?

Ein urheberrechtlich geschütztes Werk darf rechtmäßig nur durch eine Ausnahmeregelung oder im Rahmen der freien Werknutzung verwendet werden. Genau zwischen diesen beiden Arten muss unterschieden werden:

²¹ Saferinternet p.8 06.03.2024

²² Saferinternet p.10 06.03.2024

²³ Saferinternet p.11 06.03.2024

- Nutzungsbewilligung und -recht, Lizenz: Es reicht eine mündliche Bestätigung aus, um eine Nutzungsbewilligung, ein Nutzungsrecht oder eine Lizenz an eine ausgewählte Person auszusprechen, allerdings ist eine schriftliche Bestätigung, gerade im Fall von Streitfällen, die geeigneter Methode.
- Freie Werknutzung: Im privaten Bereich darf eine Privatkopie auch ohne Zustimmung des Urhebers erstellt werden. Musik, die unter den urheberrechtlichen Schutz fällt, darf beispielsweise auf privaten Feiern abgespielt werden, ohne eine Verletzung des Urheberrechts zu begehen. Im Unterricht, sowie im Zitatrecht, darf auf urheberrechtlich geschützte Werke zugegriffen werden. Beim Zitatrecht ist allerdings darauf zu achten, dass der Autor, sowie die Quelle, angegeben werden müssen.²⁴

4.1.2 Auswirkung auf Software und Kreativwerke

Auch Softwares, beziehungsweise allgemein Kreativwerke, sind vom Urheberrecht geschützt. Dies ist der Fall, da diese auch in die Kategorie der Sprachwerke fallen (§2 Abs.1 Nr.1 UrhG). Bereits ab dem Schaffen der Software fällt diese unter das Urheberrechtsgesetz. Diese muss hierbei nicht fertiggestellt worden sein und dennoch ist diese gegen die unerlaubte Verbreitung, öffentliche Wiedergabe, sowie Ausstellung und Vervielfältigung geschützt. Es fallen hierbei auch keine Kosten an, sondern erst bei der Patentanmeldung, falls dies gewünscht sein sollte.²⁵

Individualität von Computerprogrammen

Es gelten besondere Regeln für das Urheberrecht bei Computerprogrammen (§69a UrhG). Das Werk muss eine eigene geistige Schöpfung des Entwicklers beinhalten, also eine gewisse Individualität widerspiegeln und darf keiner juristischen Person zugeschrieben werden. Diese kann lediglich Nutzungsrechte am Werk erhalten. Allerdings fallen objektive Neuheiten nicht unter den Schutz des Urheberrechtsgesetzes.²⁶

Urheberrechtlich sind folgende Teile geschützt:

- „Maschinencodes, Objektcodes, Quellcodes, sämtliche Programmteile, Unterprogramme und Programmodulen, zugehöriges Entwurfsmaterial (Pläne, Struktogramme).“²⁷
- „Grafische Benutzeroberflächen, Ideen und Grundsätze des Programms, abstrakte Problemstellungen, technische Schnittstellen, Webseiten, Datenbanken, Datenstrukturen und Daten.“²⁸

²⁴ Saferinternet p.29 06.03.2024

²⁵ Ionos 06.03.2024d

²⁶ Ionos 06.03.2024a

²⁷ Ionos 06.03.2024c

²⁸ Ionos 06.03.2024b

4.2 Open Source

4.2.1 Definition und Bedeutung

Open Source bezieht sich auf Software, von welcher der Quellcode eingesehen werden darf. Ebenso ist die Änderung und Nutzung erlaubt, zumeist sogar kostenfrei, allerdings muss stets auf die Lizenzbedingungen geachtet werden. Durch die Open Source Initiative (OSI) wird definiert, dass Lizenzverträge drei charakteristischen Merkmalen entsprechen müssen:²⁹

- Der Quelltext muss in einer Form vorliegen, in der ein Mensch diesen lesen kann. Des Weiteren muss dieser auch verstanden werden können, was bedeutet, dass ein Code in der Computersprache diese Anforderungen meist nicht erfüllen kann.
- Der Quelltext darf von allen Menschen verwendet werden. Dieser darf auch kopiert und verbreitet werden, allerdings wird zumeist die Weitergabe des Quelltextes befohlen.
- Der Quelltext darf verändert werden. Ebenso die Weitergabe dieser adaptierten Version ist möglich, dass dies zur Entwicklung der Anwendung beiträgt.

Trotzdem muss stets darauf geachtet werden, alle Lizenzbedingungen zu erfüllen. Jede Open Source Lizenz besitzt auch eine verschieden große Komplexität diesbezüglich. Oftmals ist damit eine gewisse Einarbeitungszeit nötig.³⁰

Zusätzlich müssen die zehn Punkte der Open Source Definition erfüllt sein: „Freie Weitergabe, Quellcode, Abgeleitete Werke, Integrität des Quellcodes des Autors, Keine Diskriminierung von Personen oder Gruppen, Keine Diskriminierung von Tätigkeitsfeldern, Verteilung der Lizenz, Lizenz darf nicht produktspezifisch sein, Lizenz darf keine andere Software einschränken, Lizenz muss technologienutral sein.“³¹

Grundsätzlich ist Open Source Software kostenfrei. Allerdings darf der Entwickler auch festlegen, ob die Software kommerziell verwendet werden darf oder nicht. Es kann außerdem für den Support oder den Verkauf der Software auf Datenträgern, Geld verlangt werden. Der Quellcode muss zwar immer im Internet zu finden sein, allerdings darf dieser, falls der Entwickler es so möchte, erst nach dem Kauf einer Genehmigung auf diesen zurückgreifen.³²

²⁹Wikipedia 07.03.2024a

³⁰Wikipedia 07.03.2024b

³¹Opensource 07.03.2024

³²Schanze 07.03.2024

4.2.2 Geschichte

4.2.2.1 Motivation, Entstehung und Meilensteine

Die Motivation hinter Open Source ist ganz klar das Ziel, bessere Software durch ein großes Netz an Nutzern weltweit zu gewährleisten. Unter diesen befinden sich etliche Entwickler, die sich mit der Optimierung und Verbesserung der Software beschäftigen. Somit kann die Innovation gesteigert werden, auch, wenn kein finanzieller Nutzen daraus resultiert.³³

- In den 1950er bis 1960er Jahren bildete sich die Do-it-yourself-Bewegung, die den Fokus darauf hatte, alles selbst zu machen. Damals war es beinahe überall so, dass zusätzlich zu der Software auch der Quellcode mitgeliefert wurde. Es war also jederzeit möglich, Änderungen vorzunehmen.
- In den 1970er Jahren begannen Unternehmen für ihre Software Geld zu verlangen. Der zuvor immer preisgegebene Quellcode wurde plötzlich zum firmeninternen Geheimnis.³⁴
- 1983 wurde das GNU-Projekt gestartet. Das Ziel war es ein freies Betriebssystem zu entwickeln und anderen zur Verfügung zu stellen. Er ist der Gründer der Free Software Foundation.³⁵
- 1991 wurde der Linux-Kernel für die Öffentlichkeit als freie Software freigegeben. Linus Torvalds entwickelte diesen und leitete hiermit die erste große Grundlage für Open Source ein.³⁶
- 1998 wurde der Begriff „Open Source“ immer bekannter, da in diesem Jahr die Open Source Initiative gegründet wurde. Seit damals wird Open Source immer mehr wahrgenommen und als Grundlage für etliche Projekte angesehen.³⁷

4.2.2.2 Momentaner Zustand und Erwartungen für zukünftige Trends

Laut Befragung nutzen bereits jetzt mehr als 75% der Unternehmen Open Source Software, bei Behörden sind es immerhin stolze 59%. Rund 50% der Unternehmen sind bestrebt die Entwicklung von Open Source zu unterstützen und 32% der Befragten haben im Unternehmen schon eine Open Source Policy verankert.³⁸

Die Tendenz ist klar steigend. Dies liegt daran, dass Open Source ein Treiber der Innovation ist. Viele neue Technologien werden vorerst auf dieser Basis geschrieben und später erst, nachdem diese erprobt wurden, in unternehmensinterne Programme aufgenommen. Ein weiterer Vorteil,

³³Wikipedia 07.03.2024a

³⁴Wikipedia 07.03.2024d

³⁵GPL 07.03.2024a

³⁶ Wikipedia Linux 10.03.2024

³⁷Wikipedia 07.03.2024d

³⁸Scholze 07.03.2024a

der auch in der Zukunft nicht unrelevant sein wird, ist der Fakt, dass immer mehr Wert auf Open Source Software gelegt wird, da die anfallenden Kosten dort deutlich geringer sind. Es kann auf diese frei zugegriffen werden und zusätzlich profitiert man von dem weltweiten Netz der Entwickler, die tagtäglich die Software versuchen ein Stück besser zu machen.³⁹ Schlussfolgernd ist es auch für Unternehmen vorteilhaft, wenn sie Open Source Projekte jederzeit verändern dürfen. Gerade im Bereich der Künstlichen Intelligenz wird ein Fokus auf die Entwicklung als Open Source Software gesetzt werden. Nebenbei ist das Thema Sicherheit nie zu vergessen, deshalb wird wohl in Zukunft auch auf diesen Bereich, da es immer häufiger zu Cyberattacken kommt, mehr Wert gelegt werden.⁴⁰

4.2.3 Lizenzen

4.2.3.1 Definition und Bedeutung

Für das Nutzen jeder Software ist eine Lizenz notwendig. Damit geht der Entwickler mit dem Nutzer eine Vereinbarung ein, welche angibt, in welchem Ausmaß die Software mit welchen Voraussetzungen verwendet werden darf. Bei dem Installieren von Programmen muss man meistens bereits den Nutzungsbedingungen zustimmen.⁴¹

4.2.3.2 Freie Softwarelizenzen

Als freie Softwarelizenzen können jene verstanden werden, die bei der Nutzung große Freiheiten bezüglich des Veränderns, Nutzens und Verbreitens von Software bieten. Dabei ist es allerdings möglich bestimmte Regeln im Lizenztext festzuhalten. Dort ist geregelt, ob die Software beispielsweise kommerziell weiterverkauft werden darf oder nicht. Zu den bekanntesten Arten der freien Lizenzen zählen unter anderem Open Source und Public Domain. Beide bieten größtenteils deren Software an, ohne dafür etwas bezahlen zu müssen. Der Unterschied ist allerdings, dass bei einer Public Domain Software der ursprüngliche Urheber entweder auf sein Urheberrecht verzichtet hat oder dieses bereits abgelaufen ist.⁴²

4.2.3.3 Kommerzielle Softwarelizenzen - Gegenkonzept der freien Softwarelizenzen

Als kommerzielle Softwarelizenzen werden jene bezeichnet, für die man Geld ausgeben muss, um die Software verwenden zu dürfen. Im Vergleich zu freien Softwarelizenzen ist die Veränderung oder Weiterverbreitung allerdings nicht erlaubt, man nennt sie auch proprietäre Lizenzen. Es gibt wieder einige unterschiedliche Arten von kommerziellen Softwarelizenzen:

³⁹Scholze 07.03.2024b

⁴⁰Wintergerst 10.03.2024

⁴¹Simpleclub 07.03.2024c

⁴²Simpleclub 07.03.2024a

- Original Equipment Manufacturer (OEM): Beschreibt Lizenzen, die direkt an die Hardware gebunden sind. Diese sind meist schon auf einem neuen PC, beispielsweise eine Windows Lizenz, vorinstalliert.
 - Concurrent User Lizenz (Floating License): Beschreibt eine Lizenz, die von einer festgelegten Anzahl von Nutzern verwendet werden darf.
 - Named-User-Lizenz (Arbeitsplatzlizenz): Beschreibt eine Lizenz, die an eine bestimmte Person gebunden ist. Oftmals ist diese Lizenz dann nur über einen Nutzeraccount aktivierbar.
- ⁴³

4.2.3.4 Copyleft Erklärung

Durch den Einsatz von Copyleft stellt der Schöpfer einer Software oder anderer Werke sicher, dass frei zugängliche Werke auch in der Form bestehen bleiben, auch, wenn andere diese nutzen, bearbeiten oder weiterverbreiten. Jeder, der etwas an der Software ändert, muss diese dann mit denselben Bedingungen, mit denen er diese ursprünglich vorgefunden hat, freigeben und darf keine eigenen Regeln festlegen. Es ist also nicht möglich diese dann als proprietäre Software zu verkaufen. Unternehmen müssen also, falls sie auf eine Copyleft Software zurückgreifen, getätigte Änderungen im Falle einer Veröffentlichung kostenfrei zur Verfügung stellen. Da das Copyleft-Prinzip das Urheberrecht verwendet, kann die Freiheit der Nutzer und des Werkes geschützt werden, denn genau für diesen Zweck ist dieses ausgelegt worden.⁴⁴

Da das GNU-Projekt, das von der Free Software Foundation (FSF) ins Leben gerufen wurde, für die Rahmenbedingungen der Copyleft Lizenzen verantwortlich ist, haben sie unterschiedliche Konzepte erstellt:

- GNU General Public License (GPL): Stellt sicher, dass die Software frei bleibt und von jedem genutzt, sowie bearbeitet und verbreitet werden darf.
- GNU Lesser General Public License (LGPL): Erlaubt Software, die spezielle Softwarebibliotheken nutzt, auch weiterzuverbreiten, solange die Softwarebibliotheken unter der LGPL bleiben.
- GNU Affero General Public License (AGPL): Stellt sicher, dass Änderungen von der Software, auf Servern, auch der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt werden müssen.
- GNU Free Documentation License (FDL): Stellt sicher, dass Dokumentationen kopiert, bearbeitet und weiterverbreitet werden dürfen, jedoch muss der Autor immer genannt werden.⁴⁵

⁴³Simpleclub 07.03.2024b

⁴⁴GNU 09.03.2024

⁴⁵GNU 09.03.2024

4.2.3.5 GNU GPL (General Public License)

Die GNU General Public License fällt unter die Copyleft Lizenzen und wurde von GNU beziehungsweise der Free Software Foundation entwickelt. Sie ist die restriktivste, der drei genauer betrachteten Lizenzen (siehe [Absatz 4.2.3.6] und [Absatz 4.2.3.7]) und wurde deshalb zur genaueren Betrachtung gewählt, da sie eine der am weitesten verbreiteten Softwarelizenzen weltweit darstellt. Bei der GPL gelten vier Bedingungen, nämlich, dass das Programm für jeden Zweck ausgeführt werden darf, der Quellcode durchgelesen und angepasst werden darf, sowie die Erlaubnis Kopien, beziehungsweise auch verbesserte Versionen, in den Umlauf zu bringen. Beim privaten Gebrauch dürfen auch Änderungen vorgenommen werden, ohne den Quellcode dann veröffentlichen zu müssen.⁴⁶

GPL V1

Die erste Version der GPL wurde 1989 veröffentlicht. Richard Stallman, einer der bekanntesten Persönlichkeiten der Free-Software-Bewegung, schrieb diese. Sie erhält die vier Grundbedingungen.⁴⁷

GPL V2

Die zweite Version der GPL wurde 1991, also nur zwei Jahre nach der ersten, veröffentlicht. Es wurden einige Unklarheiten beseitigt und Lücken in der Auslegung verschiedenster rechtlicher Aspekte geschlossen. Heutzutage stellt die GPL V2 die am meisten verbreite GPL-Lizenz dar. Nicht zuletzt aufgrund der Einfachheit, da es ab der GPL V3 deutlich komplexer wurde.

- Eine wichtige Neuerung stellte die „Liberty or Death-Klausel“ dar. Diese wurde mit dem Sinn eingeführt, dass diejenigen Menschen, die versuchen die Rechte zu beschränken, die einem durch die Lizenz zustehen, diese automatisch verlieren.
- Die Systembibliotheken Ausnahme kam in der V2 ebenfalls hinzu. Ab diesem Zeitpunkt war es auch möglich Systembibliotheken in GPL-lizenzierte Software zu verwenden, ohne dabei einen Verstoß zu begehen. Das erleichterte den Entwicklern das Schaffen von neuer Software drastisch.
- Wichtige Softwareprojekte, wie beispielsweise der Linux Kernel, wurden unter der GPL V2 veröffentlicht.⁴⁸

GPL V3

Die dritte Version der GPL wurde 2007 veröffentlicht. In dieser wurde der Fokus vor allem auf die technischen Neuerungen, die seit der letzten Veröffentlichung stattfanden, gelegt und wie man auf diese am besten reagieren kann. Die wichtigsten Neuerungen:

⁴⁶ Wikipedia GPL 07.03.2024

⁴⁷ GPL 07.03.2024b

⁴⁸ GPL 07.03.2024b

- Eine wichtige Neuerung stellte das Behandeln von „Tivoisierung“ dar. Das bedeutet, dass Hersteller oftmals GPL-lizenzierte Software auf deren Hardware hatten, die nur sie darauf verändern konnten. In der GPL V3 kam die Neuerung hinzu, dass den Nutzern Schlüssel oder Codes zur Verfügung gestellt werden müssen, damit auch modifizierte Software auf der Hardware zugelassen werden kann.
- Neu ist auch, dass Patentklagen nun aufgrund bestimmter Bedingungen erschwert werden.
- Die Kompatibilität mit anderen Lizenzen wurde erleichtert, zum Beispiel mit der Apache V2.0 Lizenz.⁴⁹

4.2.3.6 Apache

Die Apache Lizenz wurde 1999 von der Apache Software Foundation (ASF) veröffentlicht.⁵⁰ 2004 kam dann die zweite Version heraus. Sie stellt eine freie Softwarelizenz dar. Es ist also möglich diese zu nutzen, zu verändern und schlussendlich auch zu verbreiten. Einige Softwareanwendungen basieren auf der Apache Lizenz, wie unter anderem Android. Die Apache Lizenz wird nun genauer betrachtet, da der Apache Webserver auf dieser beruht und einen wichtigen Anteil in diesem Segment darstellt. Die Apache Lizenz ist offener als die GNU GPL, aber restriktiver als die MIT. Der Fokus liegt bei der Apache Lizenz wieder einmal darauf, dass die Software frei bleibt. Die Free Software Foundation hat außerdem offiziell bekanntgegeben, dass Apache zu der freien Software zählt. Die Apache V2.0 ist außerdem zur GNU GPL V3 kompatibel, zur GPL V2, die sehr oft Anwendung findet, allerdings nicht.⁵¹

Werke mit Apache V2.0 Lizenz müssen:

- eine Kopie der Apache Lizenz beinhalten
- angeben, wenn diese modifiziert wurden und dies an einer gut sichtbaren Stelle vermerken
- alle originalen Urheberrechtsvermerke innerhalb der Quellform angeben
- im Falle des Vorhandenseins einer Textdatei mit dem Namen „NOTICE“, die darinstehenden Urhebervermerke enthalten⁵²

⁴⁹GPL 07.03.2024c

⁵⁰Apache 10.03.2024

⁵¹Wikipedia 07.03.2024c

⁵²Wikipedia 07.03.2024c

4.2.3.7 MIT

Die MIT Lizenz (auch bekannt als X Consortium, X- oder X11-Lizenz) wurde 1987 vom Massachusetts Institute of Technology veröffentlicht. Sie ist für ihre Einfachheit und Flexibilität bekannt und stellt die offenste Lizenz dar. Sie wurde damals als Erstes für das X-Window System-Projekt eingesetzt. Dieses ermöglicht es, dass Fenster auf Bitmap-Displays angezeigt werden können, also vereinfacht gesagt stellt es eine grafische Benutzeroberfläche dar.⁵³ Die MIT Lizenz erlaubt die Verwendung, Modifikation und Verbreitung des Quellcodes und muss nicht unter der gleichen Lizenz veröffentlicht werden. Es ist außerdem erlaubt, dass diese auch in proprietäre Software eingebunden werden darf. Essenziell ist, dass bei jeglichen Kopien oder Modifikationen der Software der ursprüngliche Urheberrechtsvermerk, sowie die Lizenz selbst, angegeben werden müssen. Erlaubt ist allerdings, dass der Code weiterlizenziert werden darf, also, dass man bei einer Modifikation eine restiktivere Lizenz miteinbeziehen kann. Da die MIT Lizenz sehr offen ist, wird sie von Entwicklern sehr gerne verwendet.⁵⁴ jQuery (JavaScript Bibliothek für Webseiten), oder Node.js (JavaScript-Laufzeitumgebung) basieren beispielsweise auf der MIT Lizenz.⁵⁵

4.3 Creative Commons

4.3.1 Definition und Bedeutung

Creative Commons (CC) will Urhebern durch vorgefertigte Lizenzverträge helfen, dass diese ihre Werke mit bestimmten Bedingungen veröffentlichen können. Dabei ist es wichtig zu wissen, dass Creative Commons eine Not-Profit-Organisation ist. Die vorgefertigten CC-Lizenzen können bei dem eigens geschaffenen Werk angewandt werden. Es gibt sechs verschiedene Lizenzverträge, wobei jede davon den Nutzern andere beziehungsweise mehr Rechte gewährt.⁵⁶ Dadurch ist kein juristisches Fachwissen mehr erforderlich, um ein Werk für die Öffentlichkeit preiszugeben, Creative Commons hat diesen Teil bereits bei dem Erstellen der Standard-Lizenzverträge übernommen. Die Kreativität kann somit leichter gefördert werden, da durch die CC-Lizenzverträge genau geregelt wird, ob man ein Werk beispielsweise bearbeiten und danach veröffentlichen darf oder nicht. Auch, wenn eine CC-Lizenz an einem Werk angewandt wurde, ist es möglich, dass bestimmten Personen zusätzliche Rechte gewährt werden, die eigentlich laut CC-Lizenz nicht erlaubt wären. Eine Beschränkung der Rechte für bestimmte Personen ist allerdings in keinem Fall zulässig.⁵⁷

Creative Commons Lizenzen werden häufig aufgrund bestimmter Interessen verwendet:

- Ergänzung von neuen Inhalten, die auf einem ursprünglichen Werk beruhen
- Bearbeitung wird vereinfacht und die Nennung des Urhebers wird dadurch wahrscheinlicher (gleiche Art der Nennung bei CC-lizenzierten Werken)
- Open Source unterstützen und fördern, da man dadurch auch selbst profitieren kann

⁵³Holton 24.03.2024c

⁵⁴Holton 24.03.2024b

⁵⁵Holton 24.03.2024a

⁵⁶Commons 10.03.2024b

⁵⁷Commons 10.03.2024c

- Höhere Wahrscheinlichkeit der Verbreitung des Werkes, aufgrund von standardisierten bekannten CC-Lizenzbedingungen⁵⁸

4.3.2 Überblick der Lizenzen

Mittlerweile gibt es die Creative Commons Lizenzen in der Version 4.

In der ersten Version wurden die grundlegenden Bedingungen festgehalten. In der zweiten Version wurde es dann möglich gemacht, dass auf die Namensnennung verzichtet werden darf, aber nur, wenn ein drifriger Grund dies fordert. In der dritten Version wurde darauf Wert gelegt, dass die Lizenzen international besser angewandt werden können, wobei der Fokus vor allem auf der Kompatibilität mit der GNU GPL V3 lag. Ab der vierten Version sind keine Angaben des Materialtitels mehr nötig. Außerdem wurden Formulierungen vereinfacht, die Anpassung an lokale Gesetze vereinfacht, sowie die Internationalisierung angestrebt.

Es gibt sechs verschiedene CC -Lizenzen (V4.0). Diese reichen von weitgehender Offenheit zu größerer Kontrolle des Urhebers:

- CC BY (Attribution): Bei dieser „Namensnennung“ Lizenz darf das Werk uneingeschränkt genutzt werden. Der Autor, sowie Urheberrechtshinweise und Links zur Originalquelle müssen angegeben werden.⁵⁹



Abbildung 12: CC BY ([Quelle: Creative Commons Bilder 10.03.2024](#))

⁵⁸Commons 10.03.2024a

⁵⁹Kreutzer 10.03.2024

4.3 Creative Commons

- CC BY-SA (Attribution-ShareAlike): Bei dieser „Namensnennung-Weitergabe unter gleichen Bedingungen“ Lizenz wird Copyleft ausschlaggebend. Das bedeutet, dass die Bearbeitung und Weiterverteilung nur dann erlaubt ist, wenn die ursprüngliche Lizenz vorhanden bleibt. (Ansonsten ident mit CC BY).⁶⁰



Abbildung 13: CC BY-SA (Quelle: *Creative Commons Bilder* 10.03.2024)

- CC BY-NC (Attribution-NonCommercial): Bei dieser „Namensnennung-Nicht-kommerziell“ Lizenz ist keine kommerzielle Nutzung des Werkes erlaubt. (Ansonsten ident mit CC BY).⁶¹

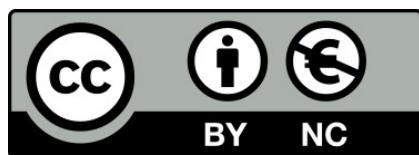


Abbildung 14: CC BY-NC (Quelle: *Creative Commons Bilder* 10.03.2024)

- CC BY-NC-SA (Attribution-NonCommercial-ShareAlike Lizenz): Bei dieser „Namensnennung-Nicht-kommerziell-Weitergabe unter gleichen Bedingungen“ Lizenz dürfen Bearbeitungen vorgenommen werden. Die Weiterverteilung davon ist unter den ursprünglichen Bedingungen erlaubt, allerdings nicht für kommerzielle Zwecke. (Ansonsten ident mit CC BY-NC).⁶²

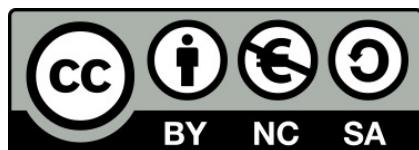


Abbildung 15: CC BY-NC-SA (Quelle: *Creative Commons Bilder* 10.03.2024)

⁶⁰Kreutzer 10.03.2024

⁶¹Kreutzer 10.03.2024

⁶²Kreutzer 10.03.2024

- CC BY-ND (Attribution-NoDerivatives): Bei dieser „Namensnennung-Keine Bearbeitung“ Lizenz ist keine Bearbeitung des Werkes erlaubt, weshalb dieses nur in unveränderter Form veröffentlicht und geteilt werden darf. (Ansonsten ident mit CC BY).⁶³



Abbildung 16: CC BY-ND (Quelle: [Creative Commons Bilder 10.03.2024](#))

- CC BY-NC-ND (Attribution-NonCommercial-NoDerivatives): Bei dieser „Namensnennung-Nicht-kommerziell-Keine Bearbeitung“ Lizenz sind keine Bearbeitungen erlaubt und ebenso wenig die kommerzielle Nutzung. (Ansonsten ident mit CC BY).⁶⁴

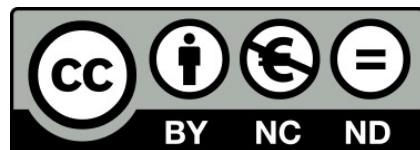


Abbildung 17: BY-NC-ND (Quelle: [Creative Commons Bilder 10.03.2024](#))

Die CC0 (Public Domain Dedication) stellt die vollständig offene Lizenz dar. Der Urheber gibt hierbei vollständig sein Urheberrecht auf und verzichtet ebenso auf sämtliche Schutzrechte. Mit dem Werk, das mit CC0 lizenziert wurde, darf also alles gemacht werden.⁶⁵



Abbildung 18: CCO (Quelle: [Creative Commons Bilder 10.03.2024](#))

⁶³Kreutzer 10.03.2024

⁶⁴Kreutzer 10.03.2024

⁶⁵*Creative Commons Lizenz* 10.03.2024

5 VWTT - Sicherheitsaspekte der MRK [Szabo]

5.1 Einleitung

5.1.1 Hintergrund und Motivation

Der Hintergrund dieser vorwissenschaftlichen Arbeit besteht darin, mögliche Sicherheitsanforderungen, die für unser Diplomprojekt relevant sind, kennenzulernen und gegebenenfalls umzusetzen. Aufgrund von unvorhersehbaren Ereignissen in elektronischen Bauteilen, Programmabläufen und Berechnungen, sind die Vorschriften zur Absicherung von Menschen bei der Verwendung von Robotern unerlässlich, wenn ein solches Produkt vermarktet werden soll.

Da die bionische Hand, gebaut von dem in der Dokumentation beschriebenen Entwicklerteam, erhebliche Kraft hat und dadurch Verletzungen an Körperteilen entstehen könnten, ist der Sicherheitsaspekt ein grundlegender Projektteil, um den Entwicklungsprozess zu vollenden.

5.1.2 Ziel der Arbeit

Das Ziel dieser Ausarbeitung ist es, Wissen über diverse Sicherheitsstandards und Normen zu sammeln und diese in Zukunft in Bezug auf das Diplomprojekt umzusetzen.

Diesbezüglich werden im folgenden Verlauf der Arbeit diverse Punkte beschrieben, die es bei der Konzeptionierung und Umsetzung von Sicherheitsstandards -und Normen zu beachten gilt. Es wird erklärt, was als Zusammenarbeit von Menschen und Roboter gesehen wird und welche Arten dieser gemeinsamen Arbeit, beziehungsweise Kollaboration, existieren. Anschließend werden die dazugehörigen Sicherheitsaspekte näher erläutert und die damit verbundenen Standards und Normen beschrieben. Gegen Ende werden noch Technologien und Praktiken genannt, die derzeit in der Industrie angewendet werden, um Vorfälle jeglicher Art zu vermeiden.

5.2 Grundlagen der Mensch-Roboter-Kollaboration

5.2.1 Definition

Die Grundidee der Mensch-Roboter-Kollaboration ist die Zusammenarbeit zwischen Menschen und industriell verwendeten Robotern. Dadurch sollen die Stärken beider Parteien vereint und die Schwächen minimiert werden. Heute wird jede Art der Zusammenarbeit, die keine robuste Abgrenzung, wie zum Beispiel einen Zaun oder eine Glasscheibe, hat, als Kollaboration zwischen Mensch und Roboter bezeichnet. Da Zusammenarbeit allerdings bedeutet an einer Aufgabe gemeinsam und zur gleichen Zeit zu arbeiten, müssen die verschiedenen Arbeitsschritte koordiniert und aufgeteilt werden.⁶⁶

⁶⁶Wannöffel 05.03.2024a

Um die Arten der Arbeitsteilung zu unterteilen, existieren vier verschiedene Bereiche, die das Fraunhofer-Institut für Arbeitsorganisation definiert hat. Im folgenden Punkt werden diese Bereiche genannt und näher beschrieben.⁶⁷

5.2.2 Arten der Zusammenarbeit

5.2.2.1 Koexistenz

Bei der Koexistenz ist ein Kontakt zwischen Mensch und Maschine nicht vorgesehen. Beide Parteien arbeiten allerdings im selben Raum und sind physisch nicht voneinander isoliert. Dies könnte bei Fehlfunktionen des Roboters zu unerwünschten Kontakten führen, weshalb auch bei der Koexistenz ein Sicherheitskonzept und Schutzmaßnahmen vorhanden sein müssen.⁶⁸

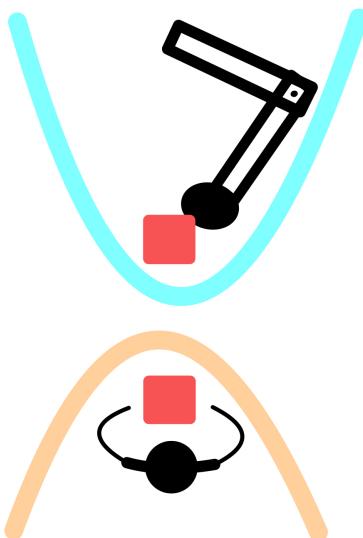


Abbildung 19: Koexistenz Quelle: Wannöffel 05.03.2024b

⁶⁷Wannöffel 05.03.2024b

⁶⁸Wannöffel 05.03.2024b

5.2.2.2 Synchronisation

Wie das Wort synchron impliziert, ist bei dieser Art der Zusammenarbeit eine zeitliche Abhängigkeit der Arbeitsschritte vorhanden. Mensch und Roboter arbeiten immer noch getrennt voneinander, jedoch wird nun ein Arbeitstakt vorgegeben. Dies dient zur zeitlichen Festlegung der verschiedenen Produktionsschritte, wodurch Kontakte zwischen Mensch und Roboter vermieden werden sollen.⁶⁹

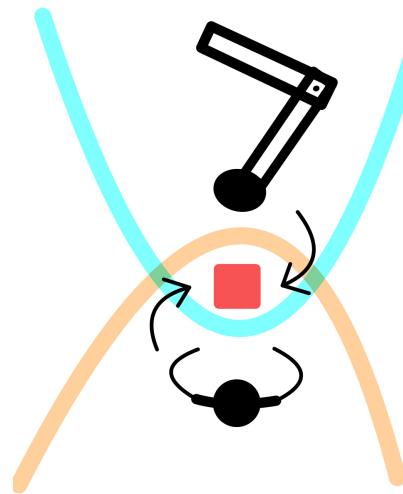


Abbildung 20: Synchronisation [Quelle: Wannöffel 05.03.2024b](#)

⁶⁹Wannöffel 05.03.2024b

5.2.2.3 Kooperation

Bei der Kooperation arbeiten beide Parteien gemeinsam in einem definierten Arbeitsraum. Ein Kontakt von Mensch und Maschine ist hier ebenfalls nicht vorgesehen, jedoch kann an mehreren Werkstücken gleichzeitig gearbeitet werden. Dies erfordert schon wesentlich komplexere Sicherungsmaßnahmen als bei der Synchronisation und Koexistenz.⁷⁰

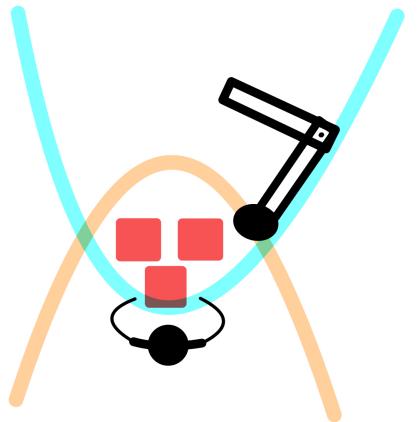


Abbildung 21: Kooperation Quelle: Wannöffel 05.03.2024b

⁷⁰Wannöffel 05.03.2024b

5.2.2.4 Kollaboration

Die Kollaboration ist die fortgeschrittenste Arbeitsweise, bei der Mensch und Roboter gleichzeitig im selben Arbeitsraum und möglicherweise am selben Werkstück arbeiten. Ein kontrollierter Kontakt kann bei der Kollaboration durchaus Teil des Arbeitsablaufs sein.⁷¹

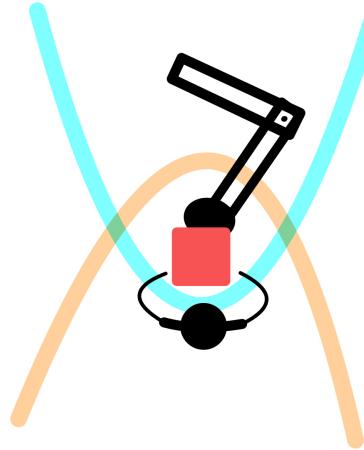


Abbildung 22: Kollaboration [Quelle: Wannöffel 05.03.2024b](#)

⁷¹[Wannöffel 05.03.2024b](#)

5.3 Sicherheitsaspekte

5.3.1 Gefahren und Risiken

Wie bei Computern und anderen Geräten mit elektronischen Bauteilen und Mikrochips, bieten Roboter eine vielfältige Angriffsfläche für Hacker. Die folgende Liste des TÜV Austria (2016), zeigt die zehn häufigsten Bedrohungen, die von IT-Angreifern genutzt werden.⁷²

- Social Engineering and Pishing
- Einschleusen von Schadsoftware über Hardware (z.B. USB-Sticks)
- Infektion mit Schadsoftware über Inter- und Intranet
- Einbruch über Wartungsfernzugänge
- Menschliches Fehlverhalten/Sabotage
- Internet verbundene Steuerungskomponenten
- Technisches Fehlverhalten, höhere Gewalt
- Kompromittierung von Extranet und Cloud-Komponenten
- (D) DoS Angriffe
- Kompromittierung von Smartphones im Produktionsbetrieb⁷³

Bei diesen Arten der Bedrohung, handelt es sich um sogenannte Primärangriffe. Diese werden verwenden, um Sabotage auszuüben und Geräte zu manipulieren. Durch diese gezielten Angriffe, können sowohl Maschinen beschädigt als auch Menschen verletzt werden, da durch die Übernahme fremder Personen alle Sicherheitsmaßnahmen außer Kraft gesetzt werden.⁷⁴

Die Schutzziele werden in der CIA-Triade zusammengefasst. [siehe [Josh 21.03.2024](#)]

In den folgenden Punkten werden Gefahren und Risiken erläutert, die nicht nur durch etwaige Hacker-Angriffe oder anderweitige illegale Tätigkeiten entstehen könnten.

⁷²Austria 06.03.2024

⁷³Austria 06.03.2024

⁷⁴Austria 06.03.2024

5.3.1.1 Kollisionen

Unerwartete Störungen und Fehlfunktionen können jederzeit auftreten. Dies gilt für den Betrieb, als auch für den Zeitraum, indem die Maschine von der elektrischen Versorgung getrennt ist. Die möglichen Gefahren beim Stillstand des Roboters werden allerdings nicht erläutert, es handelt sich hierbei ausschließlich um Ereignisse, die beim Betrieb eines Roboters auftreten können.

Kollisionen kommen bei geprüften Robotersystem eher selten vor, allerdings heißt dies nicht, dass diese nicht auch bei technisch abgenommenen Maschinen vorkommen können. Durch mechanische Abnutzung und Verschleiß können jederzeit unvorhergesehene Schwächen in der physischen Integrität auftreten, wodurch Bewegungen plötzlich anders als gewünscht geschehen können. Nicht nur das, Teile könnten genauso nachgeben und abbrechen, wodurch der Kollaborateur erheblichen Schaden nehmen könnte. Dies gilt es mit allen Mitteln zu verhindern, weshalb Richtlinien und Normen [siehe [Unterunterabschnitt 5.3.2](#)] unbedingt eingehalten und dauerhaft verbessert werden müssen. Die schon vorhandenen Sicherheitsmaßnahmen, die zusätzlich zu diversen Richtlinien umgesetzt werden, sind in [[Unterabschnitt 5.4](#)] beschrieben.

Es wird nach der Dauer des Kontakts und nach der Möglichkeit für die Person sich zu befreien entschieden, welche Art der Kollision vorliegt. Die genaue Beschreibung dieser Kontakt situationen ist in der ISO/TS 15066 nachzulesen.⁷⁵

Allgemein gesehen gibt es zwei Arten von Kollisionen, die zwischen dem Menschen und einem Roboter auftreten können:

Quasi-statische Kollisionen

Bei einer quasi-statischen Kollision ist der Kontakt mit mindestens 0,5 Sekunden definiert, wobei die betroffene Person nun in dem Zwischenfall gefangen ist. Das bedeutet, dass eingeklemmte Körperteile nicht aus eigener Kraft wieder befreit werden können.

Die Grenzwerte für die quasi-statische Kollision werden mithilfe der Schmerzgrenzen in Bezug auf eine gewisse ausgeübte Kraft des Roboters ermittelt. Dies gilt für 29 spezifische Körperzonen und wurde 2014 vom Institut des Arbeitsschutzes (IFA) und der Universität Mainz an 100 Personen getestet. Die Testresultate wurden in der ISO/TS 15066:2016 veröffentlicht.⁷⁶

⁷⁵Frauenhofer 18.03.2024a

⁷⁶Frauenhofer 18.03.2024a

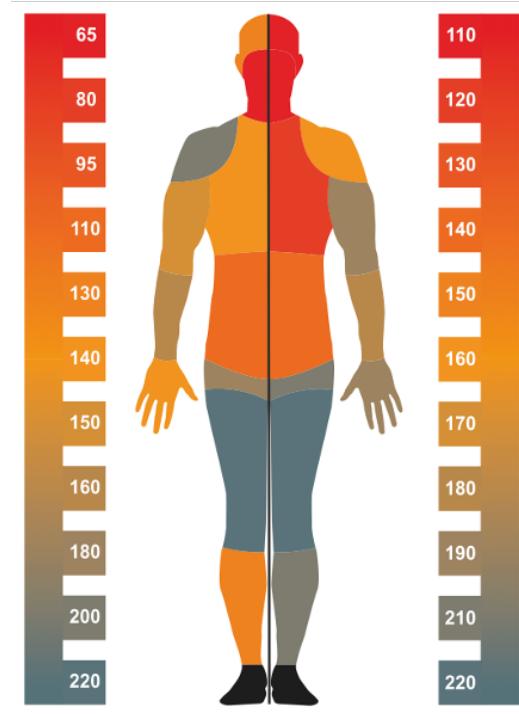


Abbildung 23: Schmerzbereiche eines Menschen ([Quelle: Frauenhofer 18.03.2024b](#))

In Abbildung 23 sind die verschiedenen Druckzonen zu sehen. Die Maßeinheit der rechten Zahlenspalte ist N/cm² (Newton pro Quadratzentimeter) und die der linken Spalte nur N (Newton).

Für die verunglückte Person müssen also zwei Grenzwerte eingehalten werden. Die maximale Kraft bei der Kollision, als auch der ausgeübte Druck des Roboters auf den Menschen.

Es ist gut zu erkennen, dass die Empfindlichkeit bezüglich der Krafteinwirkung und dem ausgeübten Druck vom Kopf zu den Füßen abnimmt. Da das Herz bei den meisten Menschen im linken Brustbereich sitzt, ist diese Hälfte des Oberkörpers auch deutlich empfindlicher. Die Folge ist, dass strengere Grenzwerte gelten.⁷⁷

Um sich etwas mehr unter den Grenzwerten vorstellen zu können, kann gesagt werden, dass eine Kraft von 65N einem 6,5kg schweren Objekt gleicht, dass in Ruhe auf einem Tisch liegt. Das bedeutet, dass der Grenzwert der Kraft im Kopfbereich schon erreicht ist, wenn ein 6,5kg schweres Objekt auf dem Kopf liegt. Im Bauchbereich wäre der Grenzwert gleichzusetzen mit einem 13kg – 14kg schweren Gegenstand, der nicht bewegt wird. Dabei entsteht die Kraft rein durch die Erdanziehungskraft.

⁷⁷[Frauenhofer 18.03.2024b](#)

Transiente Kollisionen

Bei einer transienten Kollision dauert der Kontakt zwischen Mensch und Roboter maximal 0,5 Sekunden und die betroffene Person hat die Möglichkeit noch auszuweichen oder Körperteile zurückzuziehen.

Die Grenzwerte bei der transienten Kollision werden in der Norm ISO/TS 15066 auf ungefähr das doppelte Maß als bei der quasi-statischen Kollision geschätzt.⁷⁸

5.3.1.2 Unvorhersehbare Bewegungen

Es existieren viele verschiedene Antriebsarten für Roboter:

- Servomotoren
- Schrittmotoren
- Hydraulische Systeme
- Pneumatische Systeme

Alle diese Konzepte sind dafür konzipiert eine Sache so genau wie möglich zu bewegen. Dies reicht von einfachen Zahnrädern bis hin zu komplexen Bestandteilen von Robotern wie Armen oder Greifer. Jedes Ansteuerungsprinzip benötigt eine Art von elektronischer Schaltung, um die Bewegungen eines Roboters zu kontrollieren.

Auch die sicherste Schaltung mit den besten Bauteilen und der besten Programmierung wird an einem Punkt ihrer Betriebszeit einen Fehler erzeugen. Dies könnte in unvorhersehbaren Bewegungen des Roboters resultieren, welche den gerade Arbeitenden verletzen könnte. Doch nicht nur durch elektronische Fehler, sondern auch durch Unstimmigkeiten in der Mechanik können zufällige Bewegungen entstehen. Servomotoren könnten über ihre vorgegebene Drehgrenze drehen, was bei dem Projekt RoboGlove – bionische Hand zu erheblichen Schwierigkeiten führen würde. Es könnten Roboterfinger abbrechen und Schnüre reißen. Wenn durch solch eine unvorhersehbaren Fehlfunktion Roboterteile beschädigt werden ist eine sichere Zusammenarbeit für den Mensch nicht mehr möglich. Präventive Maßnahmen und Lösungsansätze für destruktive Fehlfunktionen werden in [Unterabschnitt 5.4] beschrieben.

Falls bei unvorhersehbaren Bewegungen Kollisionen entstehen, sind die gleichen Vorschriften wie in Punkt (Kollisionen) zu erfüllen.

⁷⁸Frauenhofer 18.03.2024a

5.3.2 Sicherheitsstandards und Normen

Normen und Sicherheitsstandards sind Anforderungen, die von jeglichen Institutionen in Bezug auf Produkte, Dienstleistungen und Verfahren umgesetzt werden müssen. Diese Richtlinien tragen maßgeblich zur bedenk losen Verwendung von Alltagsgegenständen bei und schaffen Klarheit im öffentlichen Warenverkehr.

Prüfungen von technischen, und auch anderen, Dingen, können durch Normen wesentlich erleichtert werden, da diese eine Grundlage für das Vergleichen von spezifischen Eigenschaften generiert.

Es existieren drei Kategorien in die Normen aufgeteilt werden:

- Typ-A
- Typ-B
- Typ-C

Je weiter hinten der Buchstabe der Typenbezeichnung im Alphabet steht, desto genauer sind die zu erfüllenden Anforderungen, um sich für die gewählte Norm zu qualifizieren.⁷⁹

Folgende Normen und Sicherheitsstandards sind bei der MRK (Mensch-Roboter-Kollaboration) zu beachten:

5.3.2.1 ISA / IEC 62443

Diese internationale Norm beschreibt die Sicherheitsanforderung in Bezug auf Cybersecurity. Es werden die besten Praktiken beschrieben, um Sicherheitsrelevante Systeme gegen externe Angriffe zu schützen und dies mit der Prozesssicherheit bei der Mensch Roboter Kollaboration zu kombinieren.

Dieser Standard ist der Überbegriff für viele weitere Normen. Diese beschreiben Unterpunkte der Sicherheit bei der Programmierung, Internetverbindung und generelle Vorschläge wie externe Eingriffe in das lokale Steuerungsnetzwerk verhindert werden können.⁸⁰

⁷⁹Düngler Sebastian 11.03.2024

⁸⁰Automation 13.03.2024

5.3.3 EU Vorschriften

Zu den Aufgaben der europäischen Union gehört es, Richtlinien und Gesetze zu erlassen, die Arbeitende schützen. Dies gilt für jegliche Art eines Betriebs, wozu auch die Mensch-Roboter-Kolaboration gehört.

Jeder Mitgliedstaat der EU muss diese Vorschriften umsetzen. Dies ist der Fall, da entschieden wurde das CE-Kennzeichen an jedem verkauften Produkt anbringen zu müssen. Diese Kennzeichnung dient der Sicherheit der Benutzer und muss von jedem Hersteller, der im europäischen Raum verkauft, eingehalten werden.

5.3.3.1 EN61508

Die europäische Norm EN61508 befasst sich mit der funktionalen Sicherheit elektrischer und programmierbarer Systeme. Diese Sicherheitsgrundnorm ist unabhängig von der Anwendung, also nicht spezifisch für Robotersysteme, und ist für die allgemeine Sicherheit von Steuerungssystemen zuständig.

Der Fokus der Norm liegt auf dem Lebenszyklus eines Sicherheitsrelevanten Steuerungssystems. Zusätzlich wird auch beschrieben, wie der Entwurf elektrischer Systeme und der zugehörigen Software abzulaufen hat. Dies dient hauptsächlich den Herstellern der gerade beschriebenen Systeme.

Für den Endanwender ist die Norm EN 62061 oder EN ISO 13849-1/-2 interessanter. Dies sind die Standards für funktionale Sicherheit, in denen die Sicherheitsstufen der einzelnen Steuerungssysteme beschrieben werden. Es sind Geräte, Sensoren und komplett Steuerungen in Safety Integrity Levels von 1 bis 4 eingestuft.⁸¹

⁸¹Safety 13.03.2024

5.3.3.2 Maschinenrichtlinie 2006/47/EG

In dieser Maschinenrichtlinie wird die einheitliche Inverkehrbringung Sicherheitsrelevanter Maschinen und Systeme geregelt. Das Ziel ist es in Europa den gleichen grundlegenden Sicherheitsstandard zu erreichen. Anforderungen dieser Norm sind zum Beispiel:

- Die mechanisch und elektrisch sichere Gestaltung von Maschinen (sichere Steuerkreise, etc...)
- Die Gewährleistung einer sicheren Bedienung und Inbetriebnahme
- Die möglichst schwere Umgehbarkeit von Sicherheitseinrichtungen an Maschinen zu sichern

Diese Maschinenrichtlinie ist ein Teil des Verfahrens, um das CE-Kennzeichen zu bekommen.⁸²

5.3.4 Nationale Vorschriften (Österreich)

Als Mitgliedsstaat der europäischen Union, muss Österreich alle in Brüssel erlassenen Normen und Standards umsetzen. Nationale Abweichungen dieser Richtlinien können, nach Absprache mit der EU vorgenommen werden. In Bezug auf die maschinelle und interne Sicherheit von elektrischen und Sicherheitsrelevanten Systemen existieren solche Abänderungen nicht. Europäische Richtlinien müssen als nationales Gesetz angesehen werden und dürfen nicht umgangen werden!⁸³

⁸²Süd 13.03.2024

⁸³Fachlehrer Baumgartner

5.4 Lösungen zur Verbesserung der Sicherheit bei der MRK

5.4.1 Sensortechnologien

Abstandssensoren sind für die sichere Verwendung von Robotern essenziell. Ohne diese Sicherheitsmaßnahmen zur Vermeidung von Kollisionen, wäre die Mensch-Roboter-Kollaboration nicht zu realisieren.

Eine einfache und sehr vielfältige Methode Abstände zu messen sind Ultraschallsensoren, die an verschiedenen Positionen eines Roboters angebracht sind. Weitere Technologien umfassen Infrarotsensoren, Lasersensoren und KontaktSENSOREN. Letzteres kommt bei der MRK aufgrund des Kontaktes nicht in Frage.

Folgende Tabelle zeigt einen Überblick der genannten Technologien:

	Ultraschall	Infrarot	Laser
Reichweite	1 bis 250 cm	5 bis 80 cm	Mehrere Meter bis in den zweistelligen Meterbereich, je nach Modell.
Messbereich	Kegel mit einem Kegelwinkel von rund 30°	Kegel mit einem Kegelwinkel von rund 5°	Stark gerichtet (Präzision ein Grad oder sogar ein halbes Grad)
Genauigkeit	Relativ genau, die Genauigkeit hängt jedoch von Entfernung, Messwinkel sowie Temperatur und Druck ab.	Relativ genau, die Genauigkeit verringert sich jedoch mit der Entfernung.	Genau mit einer Verschiebung von wenigen Zentimetern über mehrere Meter.
Kosten	Günstig	Günstig	Relativ teuer
Empfindlichkeit gegen Interferenzen	Reagiert empfindlich auf Temperatur und Druck. Empfindlich auf andere Roboter, die die gleiche Frequenz verwenden, was insbesondere bei Wettkämpfen zum Problem werden kann.	Reagieren empfindlich auf starke Lichtquellen mit hohem Infrarotanteil. Ebenfalls empfindlich auf Farbe und Art der Hindernisse.	Kann keine Gegenstände mit glänzender Oberfläche orten, die das Laserlicht zurückwerfen (Scheiben, verchromte Objekte)

Abbildung 24: Flexsensor ([Quelle: Mazzari 18.03.2024](#))

5.4.1.1 Ultraschallsensoren

Diese Art der Sensoren funktionieren mithilfe der Schallausbreitung im Raum. Ein Ultraschallsignal (etwa 40kHz) wird ausgesendet und die Reflexionen wieder empfangen. Da die Schallgeschwindigkeit mit 1236km/h konstant ist, kann durch die vergangene Zeit die Entfernung eines Objekts oder eines Hindernisses berechnet werden.

Der effektive Abstrahlbereich der Ultraschallwellen beträgt zirka 30° . Aufgrund dessen müssen entweder mehrere Sensoren verwendet werden, oder eine bewegliche Vorrichtung entworfen, auf der der Ultraschallsensor montiert wird. Die Positionsbestimmung ist durch den breiten Abstrahlwinkel der Wellen relativ ungenau. Das bedeutet, dass Objekte nicht genau im Raum geortet werden können. Bei der MRK ist eine genaue Objekterkennung allerdings notwendig, da nur von Bedeutung ist, ob ein Objekt im Weg ist oder nicht. Der Sensor muss also nur dazu fähig sein den Roboter bei auftretenden Hindernissen zu stoppen, ganz egal wo genau sich das störende Objekt genau befindet.⁸⁴

Sollte der Winkel, mit dem die Ultraschallwellen auf ein Objekt treffen, zu spitz sein, so funktioniert die Objekterkennung nicht mehr, da die reflektierten Strahlen nicht wieder zurück zum Empfänger des Sensors geleitet werden.

Die Struktur des zu erkennenden Objekts spielt ebenfalls eine Rolle bei der Qualität des Empfang Signals. Generell kann angenommen werden, dass Materialien die Geräuschdämmend sind, wie zum Beispiel Teppiche, schlecht reflektieren und daher die Objekterkennung erheblich erschwert ist. Dies könnte bei dem Gewand einer Person ebenso der Fall sein.

Weiß der Roboter nach dem Stoppen vor einem Hindernis (einem Mensch) allerdings nicht genau wo er sich im Raum befindet, muss dieser von einem Mitarbeiter wieder in die Ursprungssituation zurückgebracht werden. So kann ein erneuter sicherer Start erfolgen. Dies nennt man auch „Perceptual Aliasing“ und beschreibt die zweideutige Situation eines Roboters aufgrund von Informationsmangel. Die nächste sichere Bewegung ist nicht eindeutig, daher wird ein Mensch benötigt, um den Betrieb wieder zu starten.⁸⁵

5.4.2 Softwarebasierte Sicherheitsmaßnahmen

Bei der Programmierung von Sicherheitsrelevanten MRK-Systemen muss auf einige Aspekte Acht gegeben werden. Dies beinhaltet vor allem die biomechanischen Limits, die im Punkt Kollisionen erläutert werden. Die Schwierigkeit besteht darin, die Performance des Roboters nicht zu beeinträchtigen, allerdings nicht zu schnelle und riskante Bewegungen zu verwenden und somit Menschen zu gefährden.⁸⁶

⁸⁴Mazzari 18.03.2024

⁸⁵Mazzari 18.03.2024

⁸⁶Frauenhofer 18.03.2024c

Um dies zu verhindern, müssen folgende Punkte beachtet werden:

- Auf mögliche Interaktionspunkte mit dem Menschen langsam zufahren (Greifen, Quetschen, ...)
- Überwachung des Kraftaufbaus beim Greifen von Objekten
- Die Bewegungsabläufe sollten gut geplant sein und den Personen im Umfeld bekannt sein

Dies sind nur wenige Punkte, die bei der Programmierung beachtet werden müssen. Die Devise lautet jedoch: Je mehr die Menschen über die nächsten Bewegungen des Roboters bescheid wissen, desto geringer ist die Gefahr einer potenziellen Kollision. Somit sollte die Sicherheitseinrichtungen in der Software nur im äußersten Notfall aktiviert werden.⁸⁷

5.4.3 Physische Sicherheitsmaßnahmen

5.4.3.1 Roboterbezogen

Bei der Konstruktion eines Roboters muss unbedingt auf die Abschirmung potenzieller Gefahrenquellen in Bezug auf die Mechanik geachtet werden. Dies gilt für Elemente die Objekte Greifen, Gelenke, mit denen sich der Roboter bewegt und diverse andere Schlitze und scharfe Kanten, an denen sich Personen entweder durch Berührung verletzen können, oder Körperteile in das Innere des Roboters gelangen könnten.⁸⁸

Diese äußere, mechanische Sicherheit kann durch ein abgerundetes Design erreicht werden. Alle Komponenten des Roboters sollten rund gestaltet sein und bewegliche Komponenten sollten zu mindestens einen Schutz haben, oder zur Gänze im Inneren des Roboters verbaut sein.

Je weniger Möglichkeiten der Mensch hat mit dem Roboter in Berührung zu kommen, desto besser. Dies gilt auch wenn alle Sicherheitsmaßnahmen eingehalten werden.⁸⁹

5.4.3.2 Umgebungsbezogen

Der Bereich, indem ein kollaborativer Roboter tätig ist, muss unbedingt gekennzeichnet sein. Dies sollte nicht nur mit einem Hinweisschild geschehen, sondern auch mit, am Boden angebrachten, Markierungen. Eine Grafik der aktuellen Bewegungsabläufe hilft ebenfalls sehr bei der Vermeidung von Kollisionen.

⁸⁷Frauenhofer 18.03.2024c

⁸⁸Frauenhofer 18.03.2024d

⁸⁹Frauenhofer 18.03.2024d

Durch die übervorsichtige Behandlung der MRK-Arbeitsbereiche, können unnötige Unterbrechungen der Roboterarbeit vermieden werden, wodurch die Effizienz des Roboters nicht ungewünscht verringert wird.⁹⁰

Der Zugang zum MRK-Bereich sollte durch physische Hindernisse wie Zäune, Scheiben oder Mauern erschwert werden. Einzig die, mit Robotern arbeitenden, Personen sollten Zugang zu diesen kritischen Umgebungen haben. Eine organisierte Auslegung des Arbeitsplatzes ist essenziell, um einen effizienten und sicheren Betrieb für den Menschen zu garantieren. Dies ist vor allem in Hinblick auf die sicherheitsrelevanten Einrichtungen wie Notschalter und Bewegungsregler des Roboters relevant.⁹¹

5.5 Fazit

MRK (Mensch-Roboter-Kollaborationen) sind in Zukunft essenziell, um die effiziente und effektive Herstellung von Produkten zu gewährleisten. Durch maschinelle Helfer werden Arbeitsprozesse beschleunigt, Menschen entlastet und unterstützt.

So spannend die Mensch-Roboter-Zusammenarbeit auch klingt, so viele Gefahren gibt es allerdings auch. Es ist unbedingt notwendig die schon vorhandenen Sicherheitsaspekte zu verstehen und anzuwenden. Dies gilt in Bezug auf den Arbeitsplatz, die sichere Entwicklung von Software und das Anbringen von kollisionspräventiven Sensoren.

Der Mensch muss zu jeder Zeit die Kontrolle über die Maschine haben, da sonst lebensgefährliche Situationen entstehen könnten. Um jederzeit über dem Roboter zu stehen, muss für jeden Betrieb ein individuelles, ausgeklügeltes Sicherheitssystem gegen Cyber-Angriffe entwickelt werden. Fakt ist nämlich, dass durch die immer komplexer werdende Technologie die Angriffsfläche für kriminelle im Internet immer größer wird. Jedoch muss das gesamte System auch gegen Angriffe von innen durch Mitarbeiter oder unerwünscht eingedrungene Personen immun sein.

Werden diese Sicherheitsmaßnahmen eingehalten und mit Hausverstand agiert, so steht der erfolgreichen MRK nichts mehr im Weg.

⁹⁰Frauenhofer 18.03.2024e

⁹¹Frauenhofer 18.03.2024e

6 Übersicht der eingesetzten Technologien

6.1 Flexsensor [Schweitzer]

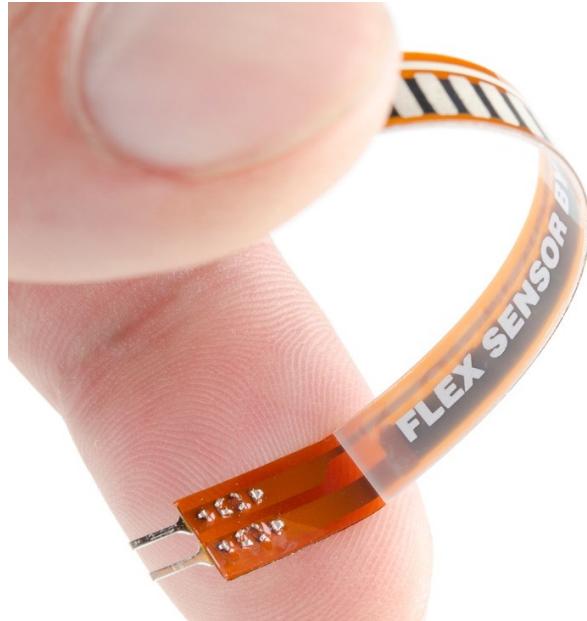


Abbildung 25: Flexsensor (Quelle: [Electronics 10.03.2024](#))

Ein Flexsensor (Biegesensor) misst die Biegung des aus Kunststoff bestehenden Streifens. Die Kohlenstoffbeschichtung macht diesen dann zu einem variablen Widerstand. Je mehr der Flexsensor gebogen wird, desto größer wird der Widerstand. Die Biegung kann somit gemessen werden. Diese Information wird dann in ein elektrisches Signal umgewandelt, was auch für das Einlesen in den Mikrocontroller nötig ist. Diese Flexsensoren können beispielsweise auf einem Handschuh angenäht werden, um zu messen, wie sehr ein Finger abgebogen wurde.

6.2 Servomotor [Schweitzer]



Abbildung 26: Servomotor (Quelle: Blogspot 10.03.2024)

Ein Servomotor ist ein kleiner Elektromotor. Er besteht aus einer Steuereinheit, sowie einer Antriebseinheit. Ein Servo kann die Winkelposition einstellen, die Drehgeschwindigkeit variieren und dadurch auch die Beschleunigung beeinflussen. Dies funktioniert über einen Sensor, der die Positionsbestimmung durchführen kann. Der Servo kann über die Software festlegen, wie sich dieser drehen soll. Durch Sollwerte wird angegeben, wie weit sich dieser drehen soll. Für die Ansteuerung von einzelnen 3D-gedruckten Fingern ist ein Servo die optimale Wahl, da dieser die an ihm befestigten Schnüre spannen oder entlasten kann.

6.3 ESP-NOW [Schweitzer]

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 Sendevorgang 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, an die man dann etwas sendet, in die Liste der Geräte aufgenommen werden. 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 Wert zurückgeliefert, der angibt, ob die Daten erfolgreich gesendet wurden oder nicht. Bei einem erfolgreichen Sendevorgang wird `ESP_NOW_SEND_SUCCESS` zurückgeliefert. Dies passiert, wenn sie erfolgreich am MAC-Layer der Empfängerseite 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 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_espnnow_rate()` kann die ESP-NOW Datenrate 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 meist durch eine Wand, in seltenen Fällen sogar durch zwei, abhängig von der Dicke kann man dann einstellen, wann sich der ESP einschalten soll.

Im Freien, ohne störende Wände oder Möbel, kann ESP-NOW Daten auf jeden Fall 100 bis 250 Meter weit übertragen. In geschlossenen Räumen funktioniert die Übertragung und anderen störenden Einflüssen.⁹²

Das OSI-Modell wird bei dem ESP-NOW Modell von sieben Schichten auf zwei reduziert. Daten müssen somit nicht den Network-Layer, den Transport-Layer, den Session-Layer, den Presentation-Layer und den Application-Layer durchlaufen. Nur der Data-Link-Layer (SLIP/PPP/MTU), sowie der Physical-Layer (802.11b/g/n), werden verwendet. 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, zu weniger Overhead und die Paketverluste werden dadurch in überlasteten Netzen reduziert. Dies führt zu einer deutlichen Verbesserung der möglichen Verzögerung, indem diese sehr niedrig gehalten werden kann.⁹³

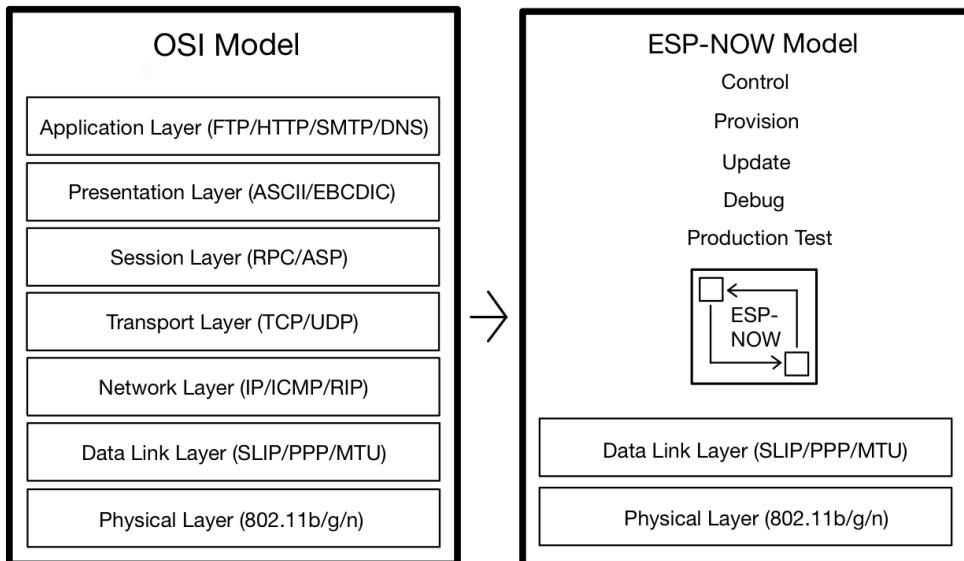


Abbildung 27: ESPNOW - Model

⁹²Ewald 21.02.2024

⁹³Espressif 21.02.2024

6.3.1 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.

6.3.1.1 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.

6.3.1.2 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.

6.3.1.3 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.

6.3.1.4 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.

6.3.1.5 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.

6.3.1.6 Presentation Layer

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.

6.3.1.7 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.

6.3.1.8 ESP-NOW Schichten

Es gibt bei ESP-NOW zwei Schichten, den Data Link Layer und den Physical Layer [siehe [Unterabschnitt 6.3.1](#)]. Dabei beruht der Physical Layer auf dem IEEE 802.11b/g/n 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.

6.3.1.9 IEEE 802.11b/g/n 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. Der 802.11b Standard hat eine maximale Datenübertragungsrate von 11Mbit/s, 802.11g eine maximale Datenübertragungsrate von 54Mbit/s und 802.11, kann bis zu 600Mbit/s übertragen. Der letztgenannte Standard ist der einzige, der auch das 5GHz-Band nutzen kann, alle drei können jedoch das 2,4GHz-Band zum Datenaustausch verwenden.

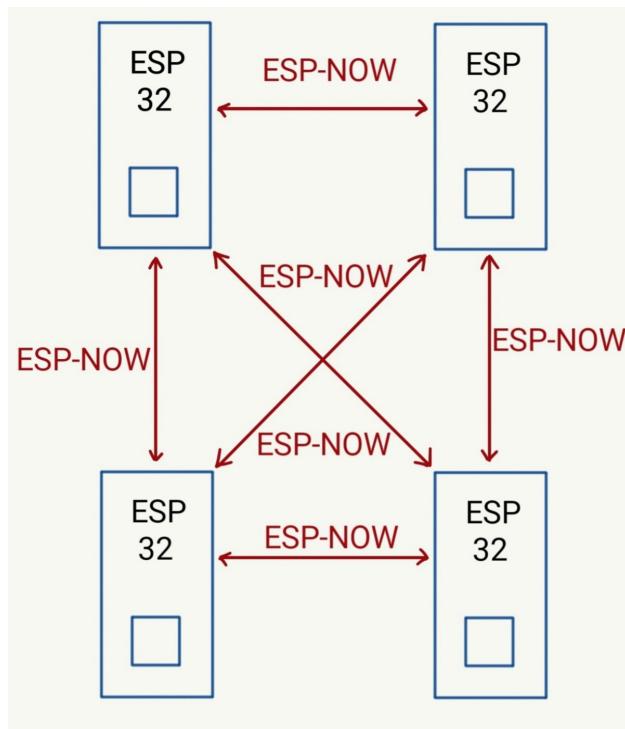


Abbildung 28: ESPNOW - Theorie

6.4 OPV Technologien [Szabo]

Ein Operationsverstärker, kurz OPV, ist ein analoger Gleich- und Wechselspannungsverstärker, 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.

6.4.1 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.

6.4.2 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.

6.4.3 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.

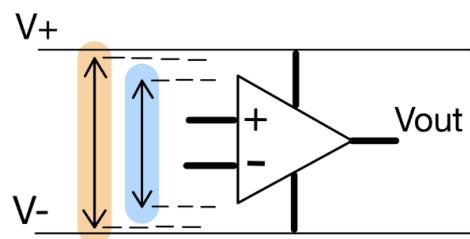


Abbildung 29: OPV Ausgangsspannungsbereiche

In [Abbildung 29] sind die Ausgangsspannungsbereiche eines normalen OPVs, in blau, und eines OPVs mit Rail-to-Rail Technologie, in Orange, dargestellt.

6.5 Analog-Digital-Wandler [Schweitzer]

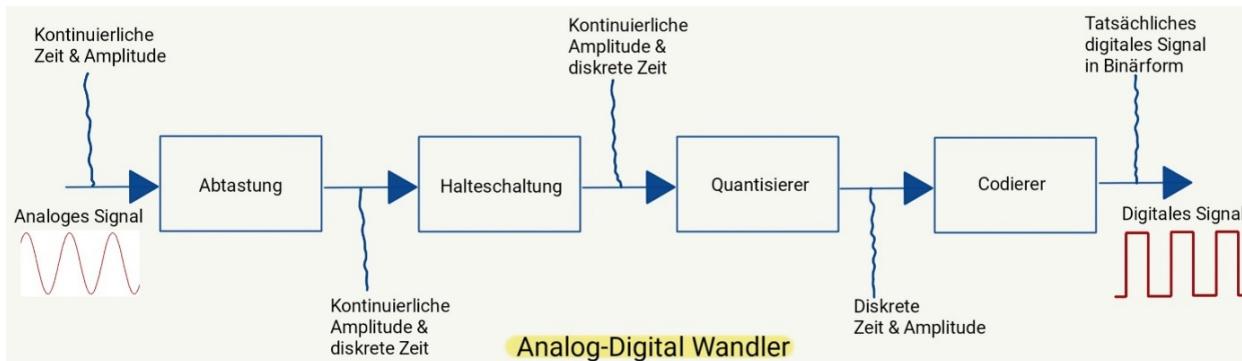


Abbildung 30: Blockschaltbild Analog-Digital-Wandler

Ein ADC (Analog-Digital-Converter) wandelt kontinuierliche analoge Signale (physikalische Größen) in digitale Signale um. Dies ist notwendig, damit ein Prozessor die Werte verarbeiten kann. Deshalb kommen ADCs in elektronischen Schaltungen häufig vor.

Abtastung:

Es werden kontinuierliche analoge Signale mit einer bestimmten Abtastrate abgetastet. Das kontinuierliche Signal wird hierbei zu einem zeitdiskreten, wobei die Amplitude stets kontinuierlich bleibt.

Halteschaltung:

Die nach der Abtastung vorhandenen Messwerte werden in der Halteschaltung so lange zurückgehalten, bis ein neuer die Halteschaltung erreicht.

Quantisierer:

Die Messwerte werden hier in diskrete Amplitudenwerte aufgeteilt. Das Signal ist ab dem Quantisierer zeitdiskret und besitzt nun eine diskrete Amplitude.

Codierer:

Der Codierer wandelt dann das quantisierte Signal in ein binäres um. Am Ende ist dann ein digitales Signal in Binärform vorhanden.

6.6 Multiplexer [Schweitzer]

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 Steuersignal schaltet noch zusätzlich.

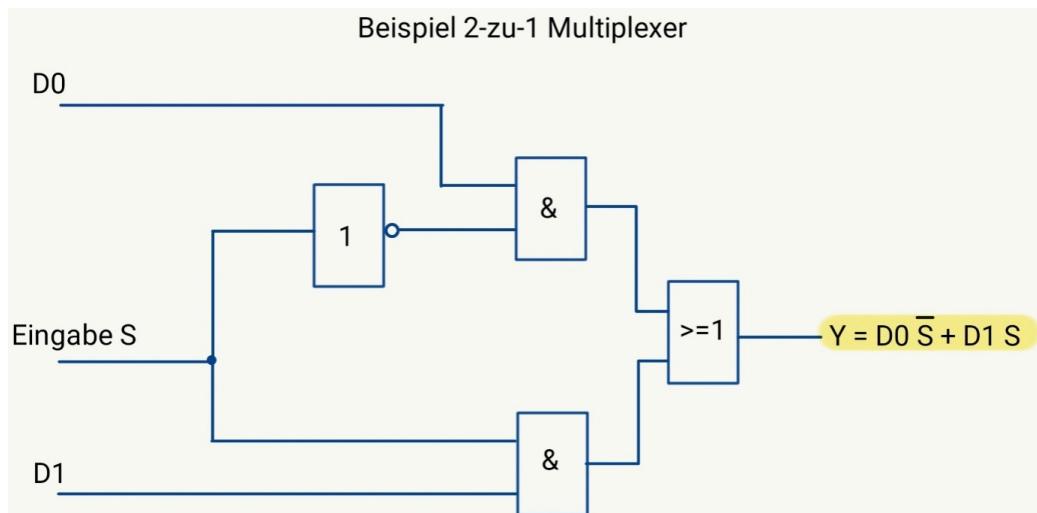


Abbildung 31: Multiplexer Beispiel

6.7 PWM-Signale [Schweitzer]

Ein PWM-Signal ist ein Rechtecksignal mit konstanter Frequenz. Die Pulsweite ist allerdings variabel. Mit der Pulsweite wird angegeben, wie lange ein Signal auf "High", also 1, gesetzt ist (danach wird das Signal auf "LOW", also 0, gesetzt). Analoge Systeme können mit digitalen Signalen gesteuert werden. Die Spannung kann durch die Veränderung der Pulsweite verändert werden. Durch ein PWM-Signal kann die Geschwindigkeit eines Gleichstrommotors gesteuert werden. Das Tastverhältnis, also das Verhältnis von der Pulslänge zu der Periodenlänge, wird in Prozent angegeben.

6.8 I2C Funktionsweise [Schweitzer]

6.8.1 Funktionsweise

I2C beschreibt eine Möglichkeit, über die zwei verschiedene Geräte miteinander kommunizieren können. Die Daten werden hintereinander gesendet und dies über zwei Datenleitungen. 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.

6.8.2 Beispiel Protokoll

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.

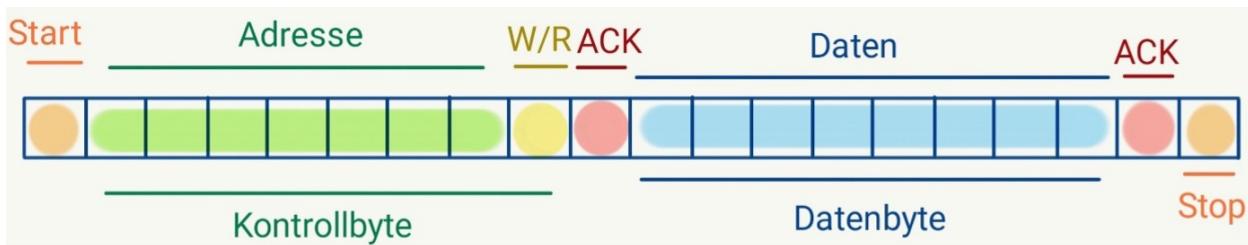


Abbildung 32: I2C Adressierung (Quelle: [FMH-Studios 10.03.2024](#))

6.9 UART Funktionsweise [Schweitzer]

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 Stopbits dar. Es sind zwei Datenleitungen vorhanden, wobei eine für das Senden (TX) und die andere für das Empfangen (Rx) von Daten zuständig ist. 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).

6.9.1 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 Stopbits (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. Bei der UART-Kommunikation bedeutet ein Paritybit von 0 (odd), dass die Summe der Highbits eine ungerade Zahl ist. Ein Paritybit von 1 (even) hingegen zeigt an, dass die Summe der Highbits eine gerade Zahl ist. Üblicherweise werden zwei Stopbits am Ende einer Übertragung gesendet, um eine verlängerte Ruhephase zu gewährleisten. 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.

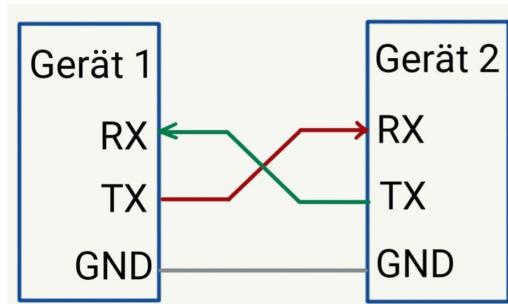


Abbildung 33: UART erklärendes Diagramm

6.10 WiFi [Schweitzer]



Abbildung 34: WiFi Logo (Quelle: [Afrank99 10.03.2024](#))

WLAN (Wireless Local Area Network) ist eine Technologie, die Geräte drahtlos in einem lokalen Netzwerk verbindet. Es wird häufig verwendet, um einen Zugang zum Internet herzustellen. Mobile Geräte wie Smartphones, Tablets und Laptops werden meistens über WLAN mit dem Internet oder untereinander verbunden. WIFI (Wireless Fidelity) ist eigentlich ein Markenname, der oft fälschlicherweise als Synonym für WLAN verwendet wird. Innerhalb eines WLANs können Datenpakete gesendet und empfangen werden. Der Vorteil dieser drahtlosen Verbindung liegt darin, dass die Geräte keine physische Verbindung per Datenkabel benötigen. Sie können innerhalb einer bestimmten Reichweite miteinander kommunizieren. Die Reichweite eines WLANs kann durch verschiedene Faktoren beeinflusst werden. Beispielsweise können physische Hindernisse wie Wände oder Möbel das Signal abschwächen. Auch andere drahtlose Geräte oder Netzwerke können Interferenzen verursachen und die Signalqualität beeinträchtigen.

7 Grundlegendes Systemkonzept [Szabo]

7.1 Gesamtsystemkonzept

7.1.1 Systembeschreibung

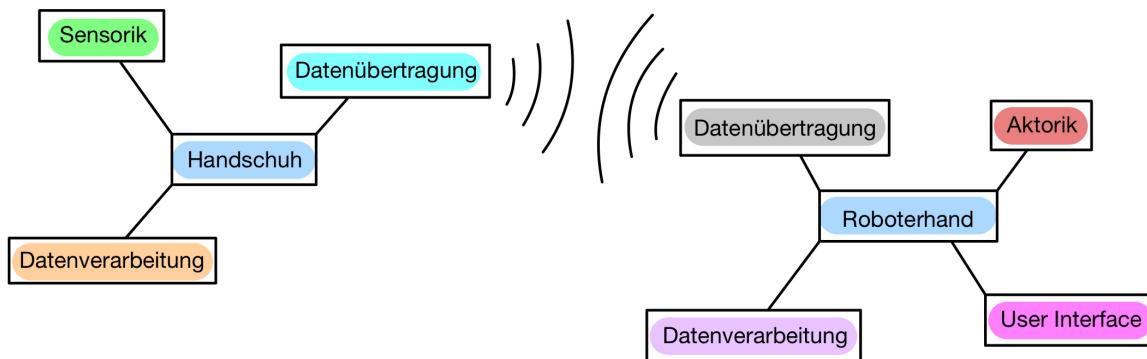


Abbildung 35: Blockschaltbild des Gesamtsystems

Das Gesamtsystem ist in [Abbildung 35] 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 anschließend 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.

7.2 Eingabesubsystem

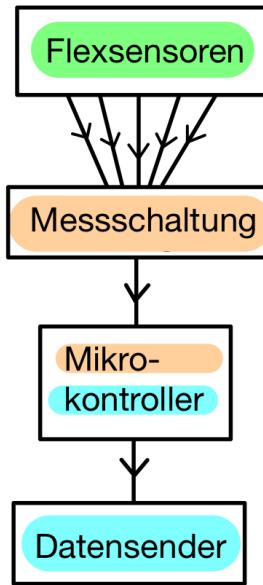


Abbildung 36: Blockschaltbild des Eingabesubsystems

Der Handschuh 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 des Sensors. Diese Änderungen werden von einem Mikrokontroller erfasst, der per Kabel über UART die Werte kontinuierlich ausliest. Anschließend wird die kabellose Übertragung über den Funkstandard ESP-NOW realisiert. Das Senden an die Roboterhand wird vorbereitet. Damit der Handschuh funktioniert, bedarf es einer Spannungsversorgung. Diese wird in Form einer Batterie oder eines Akkus vorgesehen sein, funktioniert aber allenfalls über ein USB-C Kabel. Für einen möglichen stationären Betrieb kann der Handschuh auch mit einem Netzteil betrieben werden. Die Passform des Handschuhs soll möglichst komfortabel sein, um eine möglichst lange Benützung zu ermöglichen. Dies setzt eine gut überlegte Integration der Elektronik voraus. Die Flexsensoren sollen fest auf dem Handschuh befestigt sein. Die Widerstandswerte sind ansonsten bei jedem Mal biegen unterschiedlich, wenn die Flexsensoren nicht an einer Stelle am Handschuh bleiben, sondern sich verschieben. Diese Montage wird bei diesem Projekt auch bestmöglich beachtet. Der Handschuh ist so gebaut, dass er auch von Personen ohne elektronische Ausbildung und ohne Vorwissen bedient werden kann. Das liegt daran, dass nur die Finger gebeugt oder gestreckt werden müssen. Jede Handbewegung kann also gemacht werden, die Werte werden per Software automatisch richtig verarbeitet.

7.3 Ausgabesubsystem

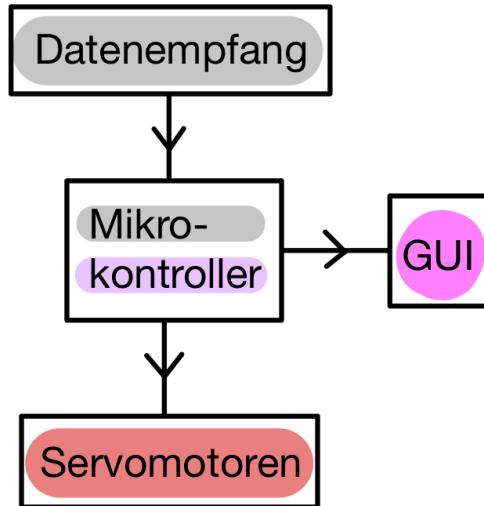


Abbildung 37: Blockschaltbild des Ausgabesubsystems

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 [Unterabschnitt 10.3] näher erklärt wird.

8 Mechanische Realisierung [Al-Maytah]

8.1 Handschuh

8.1.1 Anforderungen

Für eine korrekte Erfassung der Daten erfordert das Eingabesubsystem nicht nur ein zuverlässiges Messsystem oder eine effiziente Datenkorrektur per Software, sondern auch eine mechanische Komponente, welche die Sensorik entsprechend an den Fingern des Nutzers positioniert. Auch ist es wichtig, dass der Handschuh eine notwendige Biegung der Sensoren ermöglicht und damit keine Behinderung für die eigentliche Messung darstellt. Die Bewegung des Nutzers darf durch den Handschuh nicht eingeschränkt werden und soll so widerstandslos wie möglich sein. Demnach soll eine an die Hand montierbare physische Komponente entworfen werden, welche dies erfüllt.

8.1.2 Überlegungen

Die erste Überlegung war es unter anderem einen Stoff-Handschuh, besser gesagt einen Arbeitshandschuh, als Basis dieser Komponente zu nutzen, auf diesem sollen die Flex-Sensoren entsprechend angebracht werden. Wichtig ist, dass die Sensoren sich mit dem Finger mitbiegen sowie auch bewegen und dies der Fingerstellung entsprechend.

8.1.3 Versuche



Abbildung 38: Handschuhkonzept mit Sensor

Der initiale Versuch war es einen Stoff-Handschuh zu nutzen und an dessen Finger die Sensoren anzunähen. Jeder Flex-Sensor ist somit mit seinem Anfang, dem Punkt, an dem auch die Anschlüsse des Sensors sind, fest vernäht und fixiert. Weiters wurde er auch mit einer Naht ummantelt, in der er sich begrenzt nach vor und zurück bewegen kann. Er wird durch diese Ummantelung somit ständig am Finger gehalten, kann sich jedoch auch frei in ihr bewegen.

8.1.4 Testergebnisse

- Der Handschuh wirkt äußerst einschränkend auf die Hand des Nutzers, dies ist darauf zurückzuführen, dass er äußerst dick ist.
- Aufgrund dieser Dicke kann beim Anwinkeln des Fingers der Sensor nicht entsprechend geknickt werden, um eine ausreichendes Messergebnis zu liefern.

Nach weiteren Überlegungen kam es zu einem neuen Konzept, ohne einen Handschuh als Basis. Dieses Konzept schränkt die Bewegungen des Nutzers weniger ein als es das vorherige tat.

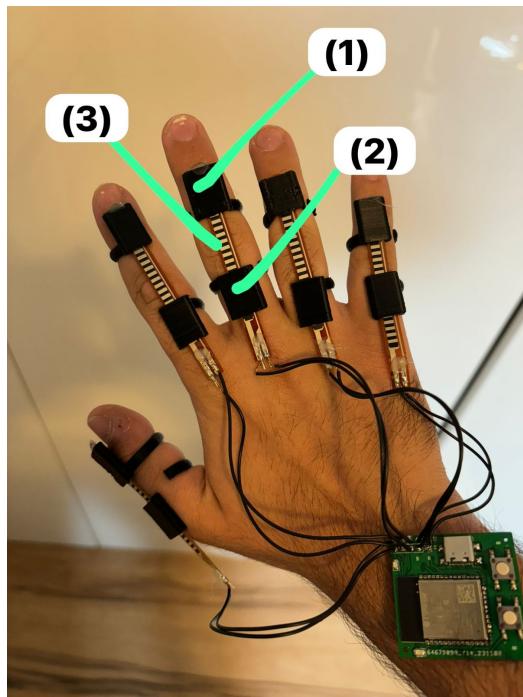


Abbildung 39: Veranschaulichung des Ringkonzepts

Bei dieser Realisierung, wird auf jeden Finger ein Aufsatz montiert, welcher eine ringartige Anschnallmöglichkeit und einen Flexsensor beinhaltet. Wie in der Abbildung ersichtlich besteht die Anschnallmöglichkeit aus zwei Ringen, Nummer (1) und (2), mit jeweils einer Führung auf diesen. Durch diese verläuft der Sensor (3), fixiert ist er an dem vordersten Ring, in der Grafik (1) und bewegt sich durch die Führung des Rings (2). In der Grafik lässt sich das Seitenprofil der Ringe am Daumen besser erkennen. Aufgrund dieser Montage kann der Sensor deutlich stärker gebogen werden, was dafür sorgt, dass aus mechanischer Sicht die besten Gegebenheiten für eine Messung geschaffen werden.

8.2 Roboterhand

8.2.1 Der Grundgedanke

Der Grundgedanke der Mechanik in der Roboterhand ist, alle drei Glieder eines Fingers, darunter das Fingergrundglied, das Fingermittelglied und das Fingerendglied mit ausschließlich der Bewegung eines einzelnen Servomotors auf- oder zuzuklappen. Umsetzbar ist dies durch ein Zugsystem, welches ein Aufklappen und ein Zuklappen des Fingers ermöglicht. Gezogen werden 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 befinden soll. Befestigt wird dies an einem mit dem Servomotor gesteuertem Zugmechanismus.

8.2.1.1 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 rasch 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 laufend 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 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, die Maximalbelastung 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.

Darunter gibt es mehrere Fertigungsmethoden. Die Methode FDM(Fused Deposition Modeling), welche von uns gewählt wurde ist die gängigste. Dieses Verfahren arbeitet hauptsächlich mit Kunststoffen. Dabei zeichnet ein Extruder mit eingeführtem Filament schichtweise ein Modell auf eine Druckplatte und formt damit ein reales Objekt. Kunststoffe, die für dieses Fertigungsverfahren verwendet werden, sind PLA, ABS, PETG und weitere.

Die Vorteile des FDM-Drucks sind, dass die Druckgeräte sowie das Filament billig zu erhalten sind, und dass das Verfahren einfach und nicht besonders komplex ist, sowie auch schnell.⁹⁴

⁹⁴FILAMENTworld 21.02.2024

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 rasche Prototypenherstellung. Von großer Bedeutung ist die Möglichkeit, jederzeit ein Modell in den Drucker zu laden und damit innerhalb weniger Stunden ein 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.

8.2.2 Versuchsaufbau

In diesem Versuchsaufbau war es das Ziel mit einem einfachen Testmodell Erkenntnisse über den Mechanismus zu erhalten und dadurch mehr aus ihm zu lernen. Dafür wurde in der CAD Software Fusion360 [[Unterabschnitt 16.1](#)] ein erstes Testmodell entworfen.

8.2.2.1 Aufbau

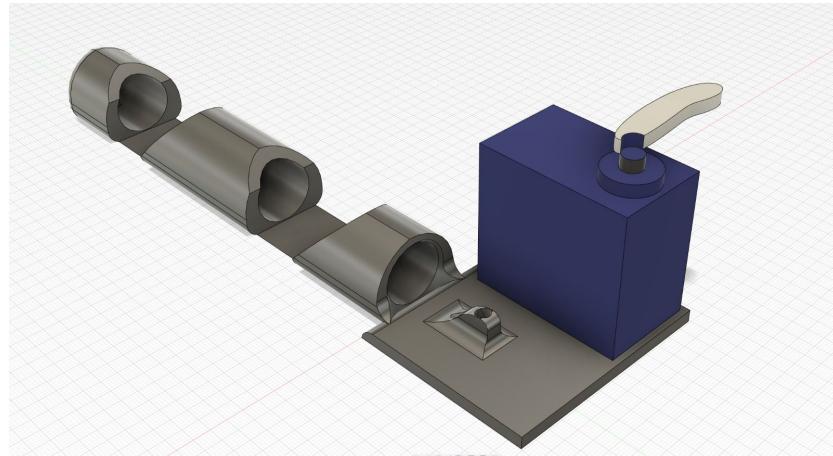


Abbildung 40: Darstellung des Versuchsmodells

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

Zwischen jedem Fingerglied befindet sich ein entsprechender Abstand, verbunden sind diese durch einen Steg. Dieser hat den Zweck sich beim Ziehen an der Schnur zu biegen, durch die Führungen wird eine Biegung an diesem Steg ermöglicht. Die Schnur wird an einer Halterung am Servomotor befestigt und dadurch bei Rotation des Servos entsprechend gespannt. Die Fingerglieder haben eine nach außen gewölbte Form und sind in Richtung des Stegs verjüngt, dies ermöglicht dem Finger sich auf noch engerem Raum zusammenzuziehen.

8.2.2.2 Versuchsresultat

Das Versuchsresultat war lehrreich und bot einen breiten Einblick in den angepeilten Faltmechanismus. Dabei gab es zahlreiche Erkenntnisse über die Reibung, Stabilität und mechanische Abnutzung sowie aber auch über das Verhalten der Gesamtmechanik bei Belastung.

Eine der Erkenntnisse war es, dass die Schnur eine gewisse Reißfestigkeit benötigt. Getestet wurden dabei mehrere Schnüre unter anderem auch Nylonschnüre. Als besonders stabil haben sich dann Angelschnüre bewiesen. Festgestellt wurde, dass ein mechanischer Rückzug benötigt wird, welcher den Finger wieder in seine Ursprungsposition, ausgestreckt, versetzt. Anfangs war dafür der Steg vorgesehen, dieser hat sich jedoch über die Zeit abgenutzt und hat den Finger nicht in die Ursprungsposition befördert. Eine der möglichen Lösungen sind Gummikordeln, elastische Schnüre, welche am „Fingerrücken“ platziert werden und sich bei Biegen des Fingers spannen. Daraus resultiert: Je kürzer die Zugschnur im Finger, desto länger die Gummikordel.

8.2.3 Entwicklungsstufe: initial

8.2.3.1 Konzept Einführung

Die erste Testhand zielt darauf ab ein Modell, welches durchgängig erweitert werden kann, zu schaffen. Mit Rücksicht auf etwaige Testergebnisse des Versuchsresultats [siehe [Absatz 8.2.2.2](#)] soll ein Modell geschaffen werden, welches den im Versuch aufgetretenen Problematiken trotzen kann, unter anderem dem schwachen Rückzug und der nicht reißfesten Schnur.

Als konkrete Lösung, um für mehr Zuverlässigkeit im Zusammenhang mit dem Zugsystem zu sorgen, wurde für diesen Aufbau eine Angelschnur gewählt, diese soll laut Hersteller äußerst reiß- und schnittfest sein.

Im Versuch [siehe [Unterunterabschnitt 8.2.2](#)] hat sich erwiesen, dass ein Steg aus dem Kunststoff PLA, welcher 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 ausstreckt.

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

8.2.3.2 Realisierung und Zusammenbau

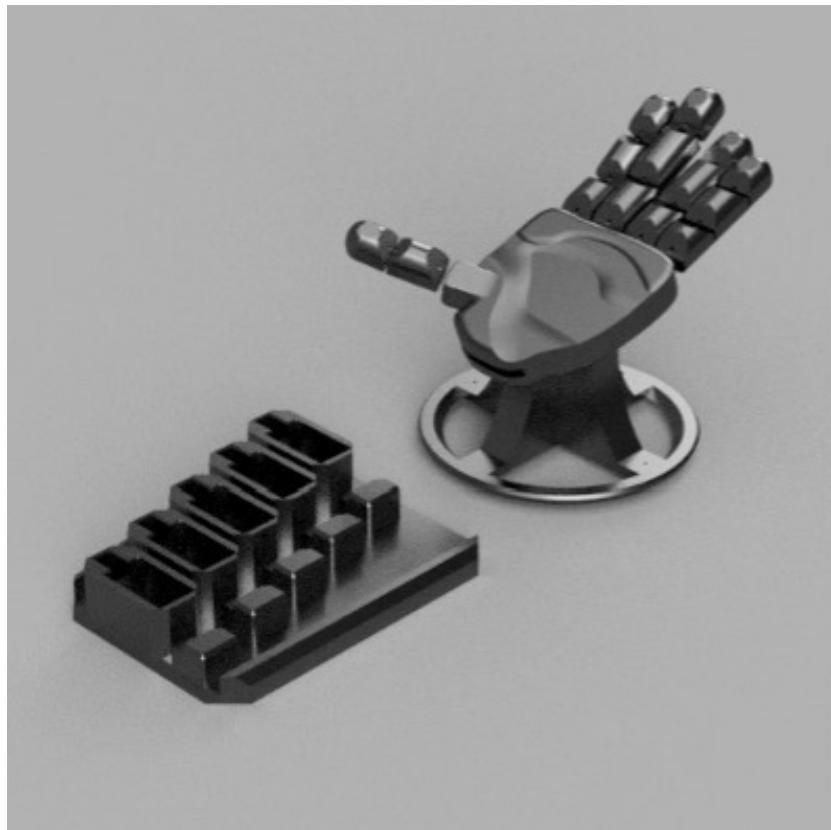


Abbildung 41: initiales Grundkonzept

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 Bewegungen der Motoren in der Bionic Hand umsetzt.

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 faltet.

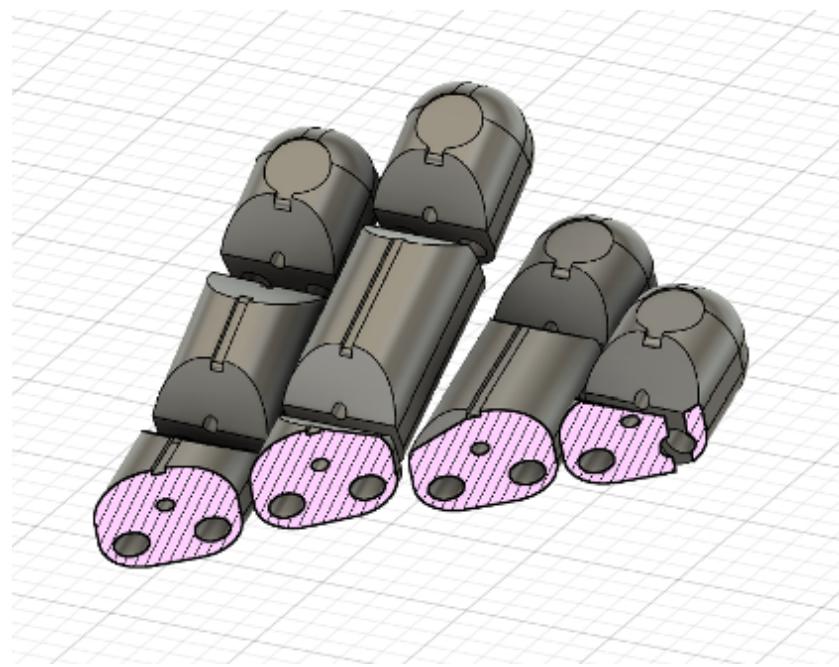


Abbildung 42: Querschnitt der Finger

Im Detail betrachtet beschränkt sich der Mechanismus des Fingers nicht nur auf das bloße Ziehen an ihm. Der Finger unterteilt sich 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 [Abbildung 42] ersichtlich, wird hier der Querschnitt aller Finger dargestellt, dabei ist es nicht von Relevanz, welches der jeweils drei Fingerglieder hier genommen wird. Alle Glieder, das untere, das mittlere sowie das obere Glied haben eine gemeinsame Eigenschaft: Durch jedes verlaufen drei Tunnel. Der oberste Tunnel hat den Zweck einen Durchgang für die Angelschnur zu schaffen, an dieser wird gezogen und das bewirkt das Falten des Fingers.

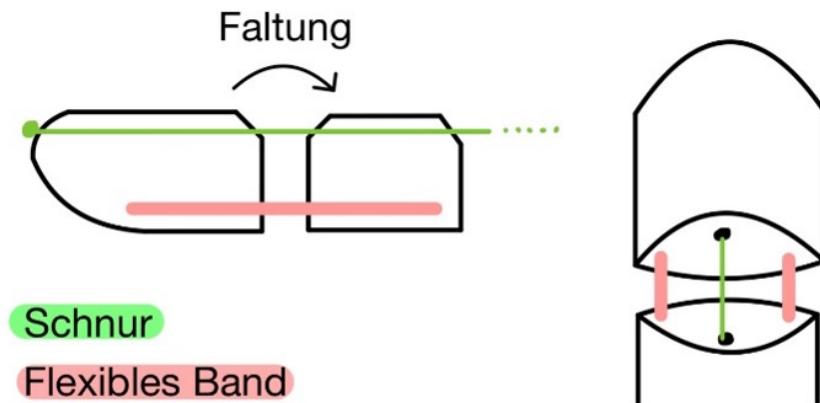


Abbildung 43: Faltmechanismus der Entwicklungsstufe: initial

In den beiden unteren Tunneln oder auch Kanälen, welche einen ersichtlich größeren Durchmesser besitzen, verläuft das Elastomer, ein elastisches Band. Durch Falten des Fingers, welcher durch das Ziehen an der Angelschnur ausgelöst wird, verlängert sich die Strecke, auf der sich das elastische Band spannt. Dies löst gegengleich zum Zug eine gegenwirkende Spannung aus. Anhand der durch das Band entstandenen Zugkraft behält der Finger seine Position bei, er wird somit gesichert, um nicht weiter in Zugrichtung der Angelschnur zu kippen und wiederum von der Angelschnur gesichert um nicht 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 Möglichkeit eines optionalen Kraftsensors frei. Mit so einem Sensor könnte bei Integration auch die Druckkraft gemessen werden.

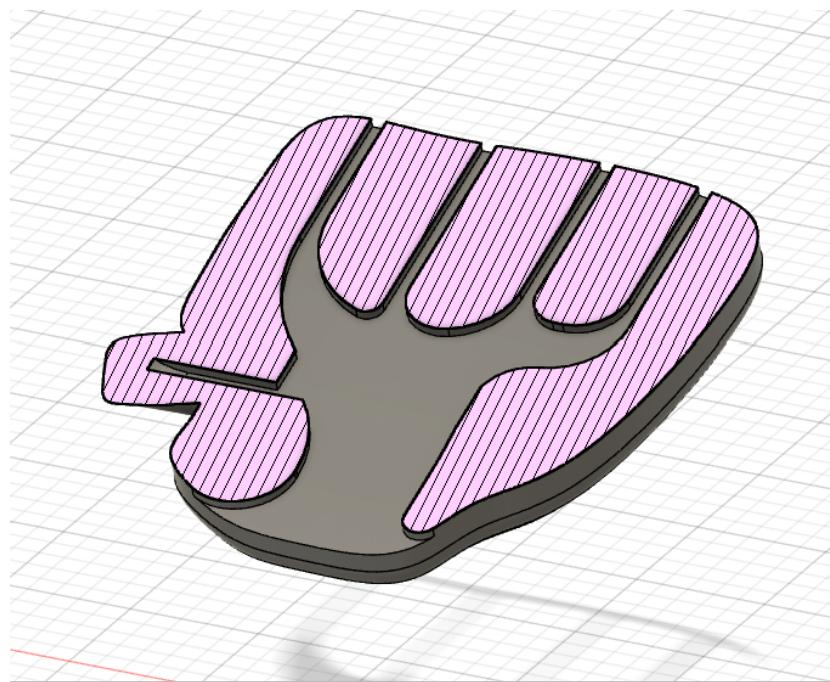


Abbildung 44: Querschnitt der Handfläche

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 [siehe [Abbildung 44](#)] 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 eventuell auch für die Kabel der optionalen Kraftsensoren.

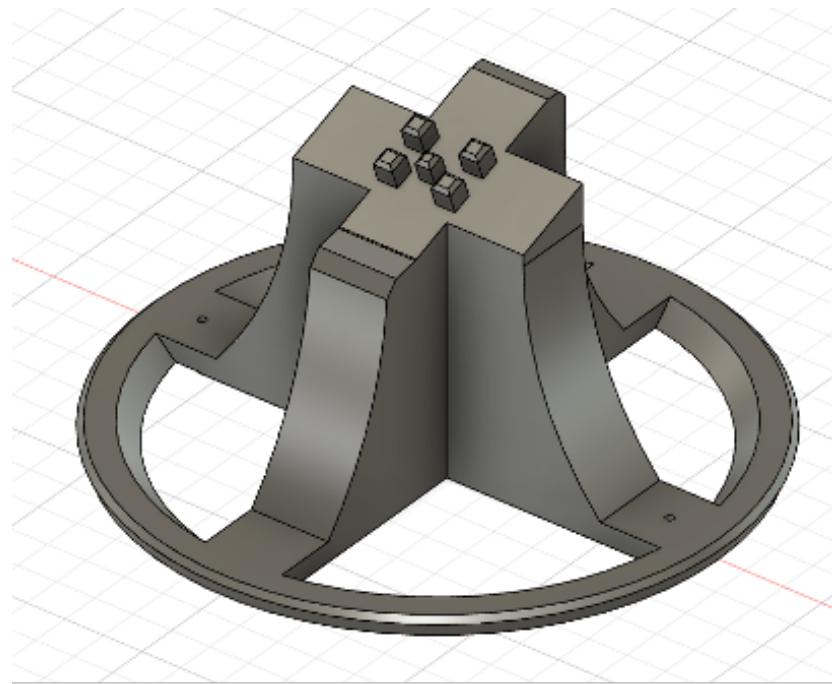


Abbildung 45: Ständer für die Handkomponente

Weiters wurde eine Halterung für die Roboterhand modelliert, diese soll mit der Roboterhand verbunden werden. Ihr Zweck ist, die Hand in eine erhöhte und leicht geneigte Position zu bringen. Durch das Neigen der Hand werden die fünf Angelschnüre bereits in Richtung Antriebsmechanik gerichtet, auch wird bewirkt, dass die Hand auf ihrer Höhe nicht unter dem Drehkopf des Servomotors positioniert wird. Für die Montage der gesamten Roboterhand auf der Halterung wird eine Aufsteckvorrichtung verwendet. Auf dem Gerüst sind fünf Pins mit einer Abschrägung und diese können in die Roboterhand mit Einkerbungen aufgesteckt werden.

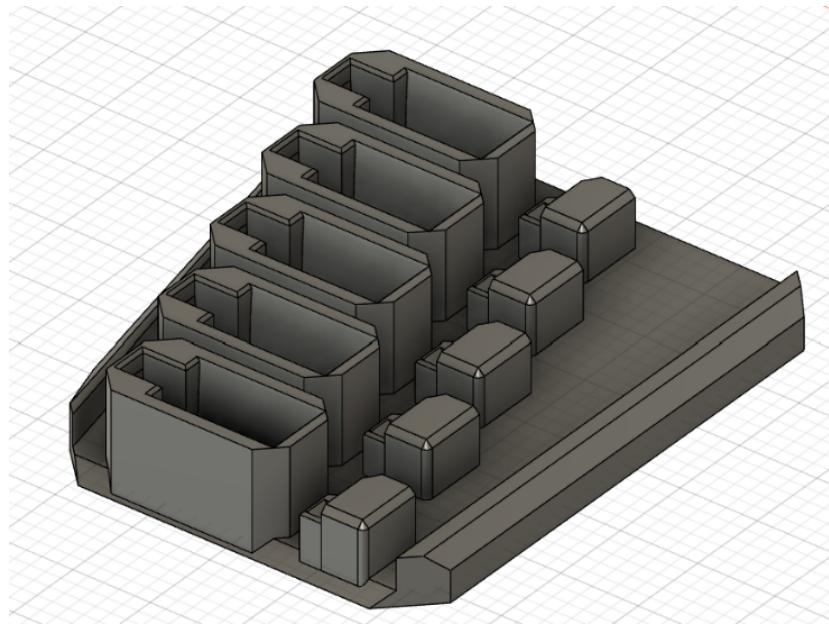


Abbildung 46: Servomotoren-Halterung und Umlenkungen

Letztlich beinhaltet das Modell der Roboterhand ein Element, welches hier als Motorblock bezeichnet wird. Dieses Element trägt diesen Namen, da es alle für die Antriebsmechanik relevanten Komponenten beinhaltet.

Das Modell setzt sich aus einer Grundplatte, der fünf Halterungen für die Motoren und jeweils einer passend angeordneten Umlenkung zusammen.

Die Halterungen besitzen eine Einkerbung in die der Servomotor eingesteckt werden soll, parallel dazu befindet sich eine 90° Umlenkung, welche dazu dient, dass, falls seitlich von unten die Schnur eingeführt wird, diese nach oben zum Servomotor geführt wird.

Zusammenbau

Wie bereits erwähnt, soll dieser Prototyp mit dem FDM-Druckverfahren gefertigt werden. Für den ersten Versuch wurden dabei ausschließlich die Glieder des Zeigefingers für den Druck gewählt. Die drei Fingerglieder wurden mit einem Band und der Schnur befestigt. Der erste Versuch, in dem ausschließlich der Faltmechanismus und sein Verhalten bei Zug am Finger in Erfahrung gebracht werden, hat weitlaufende Erkenntnisse geliefert. Diese haben zu einem frühzeitigen Abbruch weiterer Tests geführt. Die sich dabei erschlossenen Problematiken und Erkenntnisse werden in [Absatz 8.2.3.3] erläutert.

8.2.3.3 Fazit und Ergebnisse

Der Grundstein für eine bewegliche Hand, welche Finger mit einem Faltmechanismus inkludiert, wurde mit diesem ersten Entwurf bereits gelegt. Dennoch haben sich in der Realität anhand eines einzelnen Versuchs entsprechend viele unbekannte Problematiken ergeben, die zu einem Verwurf des Konzepts geführt haben.

Die entstandenen Problematiken:

- Da die einzelnen Fingerglieder bei ihren Verbindungen aneinander aufliegen und sich beim Falten mehr oder weniger aneinander abrollen, entsteht zusätzlich mehr Reibung. Dies führt dazu, dass für den Mechanismus mehr Zugkraft benötigt wird.
- Demnach ist die Verbindung für immer jeweils zwei Glieder über zwei parallel versetzte Bänder nicht die effizienteste Lösung oder gar die zuverlässigste. Der gewünschte Effekt, dass sich der Finger einklappt, beziehungsweise faltet, ist geschaffen, jedoch hat der Finger keine Stabilität. Würde man ihn nach hinten biegen wollen, obwohl er bereits zu 50% eingefaltet ist, hätte man ein Spiel, mit dem es möglich wäre ihn zu formen. Beim Anhängen einer Last direkt an der Fingerkuppe oder auf das mittlere Fingerglied müsste somit ausschließlich die Zugschnur dafür sorgen, dass der Finger weiterhin seine Form beibehält. Sinnhafter wäre es somit, die Fingerglieder so zu modellieren, dass sich der Finger nicht nach außen falten oder in diesem Fall besser gesagt biegen lässt, sondern ausschließlich nach innen. Weiters ist auch bei der Verbindung anzumerken, dass der Finger sich auch nach links oder rechts biegen kann. Diese Funktion ist jedoch nicht erwünscht und muss mechanisch blockiert werden, die alleinige Verwendung der Bänder ist dabei zu schwach um dies zu verhindern.

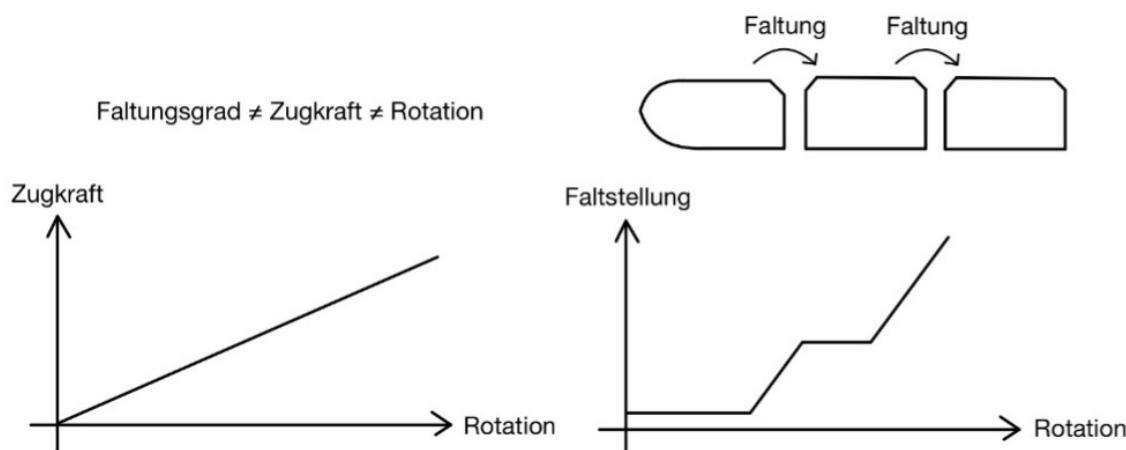


Abbildung 47: Skizzierung der unregelmäßigen Faltmechanik

- Der folgende Text bezieht sich auf [Abbildung 47]. Eine Fehlkonstruktion waren wie bereits erwähnt die Flächen zwischen den beiden Finger-

gliedern, welche zu einem für mehr Reibung gesorgt haben als auch den einzelnen Gliedern, aufgrund ihrer Form, nicht ermöglicht haben sich aneinander abzurollen. Dies führt dazu, dass sich der Finger bei ausreichend Zugkraft rapide einklappt und nicht gleichmäßig abrollt. Wobei dies von großer Bedeutung ist, da somit nicht bei linear ansteigender Zugkraft für eine gleichmäßige Faltung gesorgt werden kann.

- Ebenso führt auch der Durchgang, welcher für die Zugschnur ist, zu einem Problem. An jedem Ausgang des Tunnels reibt die Schnur stark an den Rändern und dies führt zu mehr Reibung, sowie zu einem Schaden am Finger. Somit muss zusätzlich mehr Kraft angewendet werden.

Fazit

Wie in [Absatz 8.2.3.2] erwähnt, wurde aufgrund dieser Erkenntnisse der weitere Zusammenbau der Hand vorzeitig beendet und das Modell der Hand erstmalig verworfen.

Dennoch ist dieser Versuch äußerst lehrreich für die Entwicklung eines weiteren Prototypen, denn Reibung, Stabilität und die dadurch benötigte Kraft sind nun weitere Einflussfaktoren, auf diese in weiteren Designs mehr geachtet werden muss.

Auch hat sich gezeigt, dass der Faltmechanismus umsetzbar ist, jedoch ein Konstrukt erfordert, welches dem Finger ermöglicht sich in einem gleichmäßigen Verhältnis zur Zugkraft zu falten.

8.2.4 Entwicklungsstufe: InMoov

8.2.4.1 Einführung

Im Versuch der Entwicklungsstufe „initial“ haben sich zahlreiche Problematiken und Erkenntnisse ergeben, demnach erfordert die Weiterentwicklung der Hand die Unterstützung externer Fachkenntnisse. Nach Recherche im Internet hat sich ergeben, dass der französische Bildhauer Gael Levin bereits 2012 für einen damaligen Kunden eine Handprothese entworfen hat und damit den Grundstein für sein heutiges Projekt InMoov gelegt hat. InMoov ist der erste Open-Source 3D druckbare humanoide Roboter im 1:1 Maßstab und ist gedacht für Forschung an Universitäten, in Laboratorien und auch für private Zwecke.

Ein großer Vorteil des Projekts ist es, dass bereits viele Erkenntnisse und Wissen in dieses eingeflossen sind. Ziel ist es, diese 3D druckbare Hand selbst zu realisieren, je nach Anforderung zu modifizieren und anhand dessen eine weitere Versuchshand zu schaffen.

8.2.4.2 Mechanismus

Der Mechanismus der zweiten Versuchshand, welche den Namen „Entwicklungsstufe: InMoov“ trägt, ist äußerst umfangreich und weist meist bessere Lösungen für Features der ersten Versuchshand, aus [Unterunterabschnitt 8.2.3], auf.

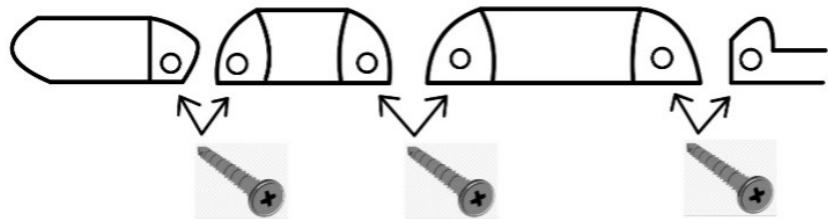


Abbildung 48: mechanische Verbindung der einzelnen Fingerglieder

Die Problematik, dass wie beim vorherigen Modell die beiden Glieder aneinander reiben und sich nicht parallel zur Zugkraft kontinuierlich umrollen, ist hier nicht vorhanden, da die Konstruktion von Grund auf andere Eigenschaften aufweist. Denn die jeweiligen Glieder werden hier nicht mit Bändern verbunden, sondern mit einer Schraube, welche die beiden Glieder, die ineinander gehen, verbinden. Durch diese Verbindung sind die Finger stabil, können nicht nach links und rechts kippen und sich ausschließlich vom ausgestreckten Zustand nach innen falten. Auch wird mechanisch ein Falten in die andere Richtung blockiert.

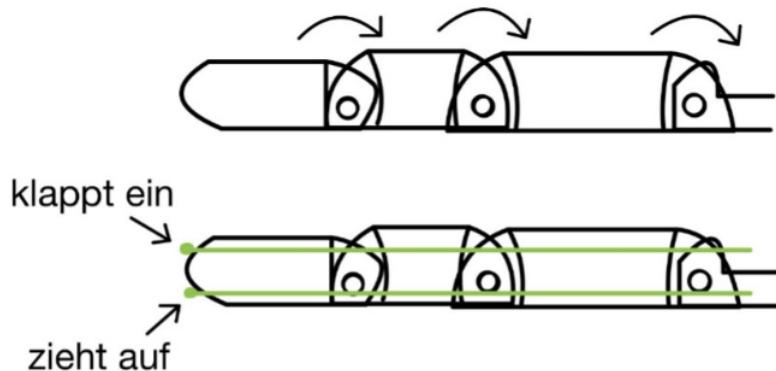


Abbildung 49: Der InMoov-Faltmechanismus

Am tatsächlichen Faltmechanismus hat sich bis auf eine Anpassung am Elastomer nicht viel geändert, denn der Rückzug erfolgt nicht mehr traditionell per elastischem Band. Diese Umsetzung des Faltmechanismus ist jedoch von großer Bedeutung, da nur der Rückzug sowie die Faltung von ein und demselben Motor ausgelöst wird. Im Detail funktioniert der Mechanismus wie folgt: Am Servomotor wird eine runde Vorrichtung montiert, diese hat an der Außenkante eine beidseitige Verjüngung, an dieser soll die Schnur entlanglaufen. Nun verlaufen beide Schnüre, die für den Ein- sowie Auszug verantwortlichen Schnüre, jeweils auf einer Seite an dieser runden Vorrichtung und sind an dem Ende dieser montiert. Dreht sich nun der Motor um 90°, gibt er mehr Schnur her und verkürzt die zweite Schnur. Bei diesem Vorgang müssen jedoch beide Schnüre so gespannt sein, dass keine der beiden nachgibt und sich bei Bewegung des Motors lockert.

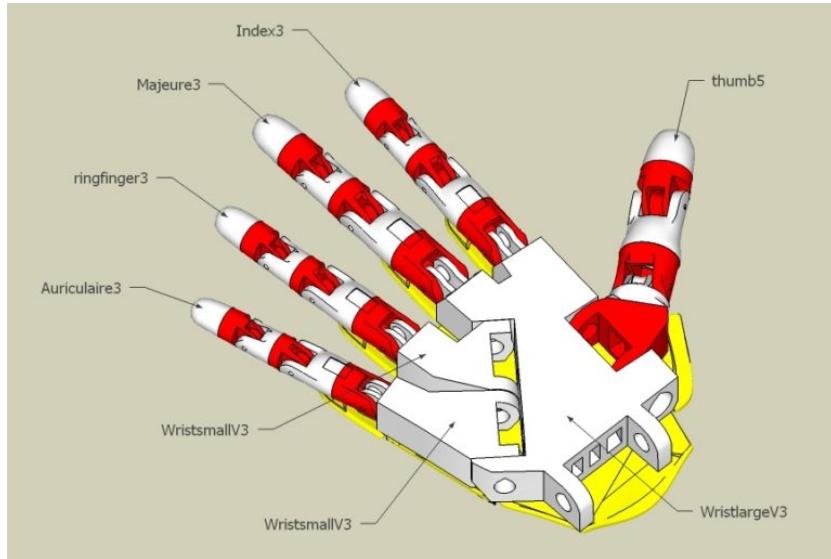


Abbildung 50: Inmoovhand und ihre Komponenten ([Quelle: Anar 27.03.2024](#))

Das Modell der Handfläche, an dem alle Finger und weitere Komponenten zentral zusammenkommen, setzt sich selbst aus insgesamt vier tatsächlichen Elementen und zwei Hilfselementen zusammen.

Das Hauptelement ist in dem Fall die Handfläche, dies ist das größte und zentralste Element. Durch dieses verlaufen 15 Kanäle, die mittleren fünf dienen optionaler Sensorik. Die oberen fünf Kanäle sind für die Schnüre, welche dem Einfalten dienen, die unteren Kanäle dienen den Schnüren für den Rückzug.

Um die Hand noch dynamischer zu gestalten, besitzen der Ringfinger sowie der kleine Finger ein zusätzliches Element, welches sich bei Zug auf wenige Grad mitfaltet. Der Daumen hat eine ähnliche Funktion.

Als Hilfselement werden hier die Stifte zur Verbindung zwischen dem Hauptelement sowie den weiteren Elementen bezeichnet.

Ein ebenso neuer und optionaler Mechanismus ist der des Handgelenks, dieser ermöglicht es der Hand um ihre eigene Achse zu rotieren. Umgesetzt wird dies mit einem Servomotor, welcher mit einer Übersetzung anhand zweier Zahnräder die Hand rotiert.

Montiert wird dieser Handgelenksmechanismus auf ein Unterarmkonstrukt, dieses besteht aus mehreren einzelnen Teilen um den Druck auf einem kleinen Drucker zu ermöglichen. Grundsätzlich sind alle Modelle des Projekts „InMoov“ für einen Drucker mit eine Druckfläche von 12x12cm ausgelegt.

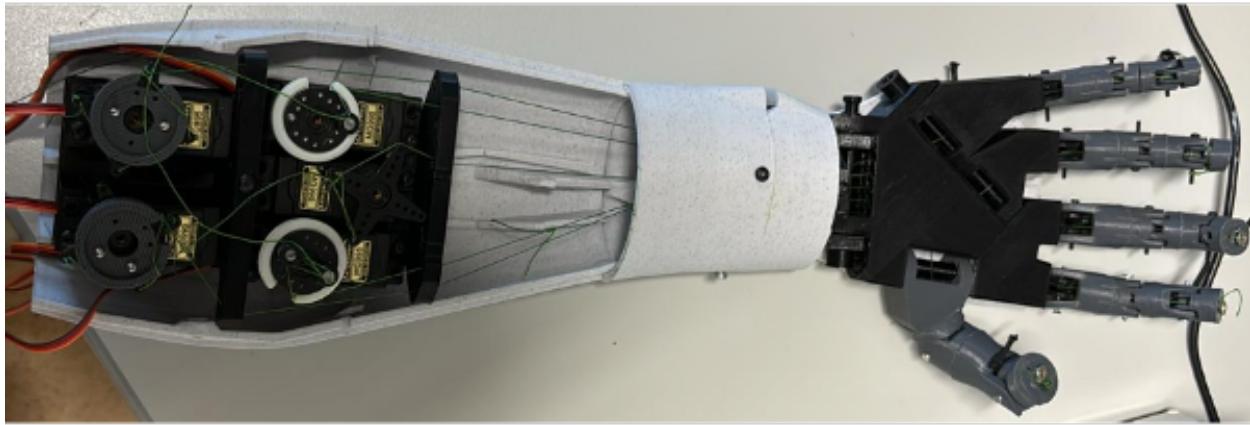


Abbildung 51: Realisierung der Entwicklungsstufe: InMoov

Im Unterarm befindet sich an der Innenseite eine Umlenkung, die die Schnüre über den Rotationsmechanismus des Handgelenks lenkt. Dies verhindert vor allem eine Reibung zwischen den Schnüren und dem Servomotor für das Handgelenk, welcher in der idealen Strecke zwischen Schnur und Zielmotor steht.

Weiters werden daraufhin die Schnüre zum Motorblock der Antriebsmechanik für den Faltmechanismus der Finger geführt. In diesem Block befinden sich fünf Motoren für die Finger. Dort wird der bereits beschriebene Mechanismus der beiden Schnüre umgesetzt.

Wurde ein Modell in einer CAD-Software wie beispielsweise Fusion 360 [[Unterabschnitt 16.1](#)] entworfen und soll nun in ein reales greifbares Objekt umgewandelt werden, so benötigt man eine sogenannte Slicer-Software. Die Bezeichnung „Slicer“ stammt dabei vom englischen Wort Slice (engl.) und bedeutet so viel wie Scheibe. Dies liegt daran, dass diese Software das 3D-Modell in einzelne Scheiben mit einer Sichthöhe geringer als 1mm teilt, denn wie bereits in [[Absatz 8.2.1.1](#)] erklärt, geht das 3D-Druck Verfahren FDM so beim Schaffen eines realen Objekts vor.

Gewählt wird die Open-Source Software Ultimaker Cura, in der Version 5.6.0, in dieser kann man zahlreiche Optionen wählen: Die Sichthöhe der einzelnen Scheiben, in Fachsprache „Layers“, die Druckgeschwindigkeit, die Fülldichte, ob Stützstrukturen für den Druck vorhanden sein sollen oder nicht. Durch das Regeln dieser Optionen wird die Druckqualität beeinflusst. Druckt der

Drucker zu schnell, so leidet die Qualität und es können Fehler im Druck auftauchen, ist die Schichthöhe zu hoch ist der Druck, äußerst ungenau und weist eine unschöne Textur an seiner Oberfläche auf.

Auch können Faktoren, wie die Drucktemperatur oder das Filament, gewählt werden. Je nach Filament gibt es bereits im Vorhinein konfigurierte Optionen.

Sind nun alle gewünschten Werte angepasst, kann „gesliced“ werden dabei wird nun von der Software das Objekt in einzelne Scheiben geteilt und ein g-code File erstellt, welches dem Drucker daraufhin Anweisungen gibt.

Ein Druck dauert in der Regel mehrere Stunden, dies variiert jedoch je nach Drucker – neuere schaffen das selbe Ergebnis in 20% der eigentlichen Druckzeit.

Nach einiger Zeit ist der Druck fertig und kann von der Druckplatte gelöst werden, vorhandene Stützstrukturen können im Bestfall einfach vom Druck gelöst werden.

Für den Zusammenbau der InMoov Hand werden neben dem Druck auch weitere Elemente benötigt, die nicht aus dem 3D-Drucker stammen. Als Auflistung die zusätzlich benötigten Komponenten:

- 16 Stück M3x20mm Schrauben
- 16 Stück M3-Muttern
- Superkleber
- Angelschnur: 3 Meter

8.2.4.3 Fazit und Ergebnisse

Der Versuchsaufbau hat nur kurzfristig und teilweise funktioniert. Für einen kurzen Moment konnten alle Finger, sowie der Daumen geöffnet und geschlossen werden. Der Faltmechanismus hat sich zwar bewiesen, jedoch mit einigen Unstimmigkeiten.

Während des Testens sind zwei Punkte besonders auffällig gewesen: Zu einem die Stabilität mit und ohne Belastung, sowie die Spannung der jeweils beiden Schnüre. Unter die Stabilität fallen in diesem Fall das gesamte Gerüst vom einzelnen Finger bis zum Motorblock, die Antriebsmechanik und ihre Halterung für die Umwicklung. Zum anderen die Schnüre, welche einige Probleme und demnach auch Schäden verursacht haben.

Problematik-1: „Unstimmigkeiten bei dem Umwickeln der jeweils beiden Schnüre“
Wie in [Absatz 8.2.4.2] erläutert, sollen sich beide Schnüre um eine runde Halterung wickeln und dabei je nach Drehung den verbundenen Finger ein -oder auffalten. Damit dieser Mechanismus funktioniert, müssen beide Schnüre ständig unter Spannung stehen, da sonst die Gegenwirkung des Systems nicht vorhanden ist und der Finger überklappen kann.

Es gab mehrere Lösungsversuche, unter anderem den Servomotor in 5°Schritten von 0 bis 180°zu approximieren und dabei während jedes Schrittes die Schnüre nachzuspannen, jedoch blieb auch dies erfolglos.

Problematik-2: „Instabilität der Halterungen auf dem Motor“

Die Angelschnur hat neben ihren Vorteilen auch einen trivialen Nachteil, denn sie ist sehr dünn und daraus folglich unter Spannung äußerst schneidend. Stand die Schnur unter zu hoher Spannung, hat dies dazu geführt, dass diese sich selbst aufgrund der zu hohen Reibung durch die Halterung am Motor geschnitten hat und ihn dabei meist auch horizontal zerteilt hält. Nach Erkenntnis dieses Problems gab es drei grundlegende Lösungsversuche:

- **Lösungsversuch 1:**

Hier wurde versucht, das gedruckte Objekt selbst härter und dicker zu drucken. Umgesetzt wurde das durch Erhöhen der Fülldichte von 25% auf 65%, dadurch ist das innere Modell dichter. Weiters wurde auch die Wandstärke und -dicke erhöht.

Das Ergebnis war ernüchternd, bereits nach neuem Anspannen führte es wieder zum selben Problem und die Halterung hielt nicht stand.

- **Lösungsversuch 2:**

Nach genauerem Hinblick wurde klar, es liegt am Druckverfahren, denn wie bereits erklärt drückt der Drucker in einzelnen Schichten. Das Problem: Die Schnur liegt parallel zu den einzelnen Schichten und genau zwischen diesen Schichten liegen die Schwachpunkte des Modells. Somit wurde die Entscheidung getroffen, das Modell so zu drucken, dass die Schnur und die einzelnen Schichten nicht parallel zueinander liegen, bewirkt wurde dies, indem die Halterung in einem 45°Winkel gedruckt wurde.

Der zweite Lösungsversuch ist somit erfolgreich und die Schnur schneidet oder halbiert nicht mehr die Halterung. Jedoch nicht perfekt, denn die Schnur reibt an der gerippten Oberfläche der Halterung. In diesem Fall muss ein anderes Material als PLA und damit auch ein anderes 3D-Druckverfahren verwendet werden. Ergeben hat sich der SLS (engl. Selective Laser Sintering). Dies ist ebenso eine additive Fertigungstechnologie, dabei verschmilzt ein Laser selektiv Pulverpartikel und das schichtweise, um daraus dann das gewünschte 3D-Objekt zu fertigen. Finalerweise entstanden dann für das Projekt Halterungen aus dem Material Nylon mit Glasfaserverstärkung.
⁹⁵

Problematik-3:

Zwar sind Angelschnüre sehr stabil und stark, tendieren jedoch unter ständiger Reibung trotz ihrer achtfachen Flechtung mit der Zeit zu reißen. Die Strecke von Fingerkuppe bis zum Motor beträgt dabei je nach Finger zwischen 20-30cm, auf dieser Strecke reibt sich die Schnur an mehreren Stellen des Modells auf. Da dieses Problem erst mit der Zeit auftritt und somit mit der Hand dennoch ausgiebig getestet werden kann bis zum nächsten Riss, wurde dieses Problem im Versuchsaufbau der zweiten Hand noch nicht behandelt.

Problematik-4:

Ein weiteres Problem ist die Befestigung der Schnur am Fingerende, der Fingerkuppe. Diese hat zwei Bohrungen bzw. Löcher, zwischen diesen werden beide Schnüre befestigt. Das Problem ist, da diese Schnüre so klein sind und dauerhaft unter Spannung stehen, dass die Fläche zwischen den Löchern meist einreißt und die Schnüre nicht mehr befestigt werden können.

⁹⁵SLS3D 24.02.2024

Das Modell löst einige Probleme und schafft neue Ansätze. Der Faltmechanismus wurde grundlegend erweitert, der Rückzug wird nun nicht mehr per Elastomer, sondern mit einer zweiten Schnur bewirkt. Die einzelnen Fingerglieder sind tatsächlich mechanisch durch eine Schraube miteinander verbunden.

All dies führt zu präziseren und genaueren Bewegungen, der Faltmechanismus erfolgt annähernd linear zur Zugkraft. Trotzdem hat sich herausgestellt, wie brüchig das Modell ist, besonders an den Fingern. Reibung ist weiterhin ein großes Thema und wird durch die zweite Schnur im Faltmechanismus noch trivialer.

Ziel ist es, im dritten Versuchsmodell die Problematik mit der Reibung zu verringern und daraus folglich auch ein stabileres Modell zu ermöglichen.

8.2.5 Entwicklungsstufe: Silikon

8.2.5.1 Das Konzept

Nachdem die vorherigen Versuche erwiesen haben, welche Problematiken sich aus einem festen Modell aus PLA ergeben, stand ein großes Umdenken im Raum. Auf Vorschlag einer Betreuungskraft stellte sich heraus, dass das Modell elastischer sein muss und ein hartes Material nicht immer die beste Lösung ist. Der Vorschlag war Silikon in das Modell der Hand zu integrieren, in einem ähnlichen Projekt wurde so bereits eine Hand realisiert. Ähnlich wie bei dem Modell aus [Unterunterabschnitt 8.2.3] bestanden dort die einzelnen Glieder aus einzelnen Teilen, zwar aus Silikon, waren jedoch auch per Elastomer verbunden. Die Handfläche bestand bei dem Modell aus dem Vorschlag dennoch aus hartem Kunststoff.

Für das Projekt „Bionic-Hand“ ergab sich eine neue Ebene und Vielfalt der Möglichkeiten. Die neue Idee ist es, die gesamte Hand vollständig aus Silikon zu entwickeln und somit Problemen wie der Reibung und Brüchen unter starker Last aus dem Weg zu gehen.

Genauer lässt sich das neue Konzept wie folgt beschreiben: Die gesamte Hand besteht aus dem Material Silikon, seien es die einzelnen Finger, der Daumen und die Handfläche. Daraus ergeben sich mehrere Vorteile. Zu einem ein hoher Grip (engl.), aufgrund des Silikons hat die Hand beim Greifen mehr Griff und Objekte können gehalten werden, ohne aus der Hand zu rutschen. Der nächste Vorteil ist, dass die Hand anpassbarer wird und sich aufgrund ihrer elastischen Struktur genau um das Objekt stülpen kann, dies ist eine große Verbesserung im Vergleich zu der festen Hand aus hartem Kunststoff.

Eine Hand aus Silikon springt von selbst wieder in ihre Ursprungsposition zurück, dies liegt an den Eigenschaften des Materials, dadurch wird sich ein externer Elastomer erspart, der Rückzug erledigt sich von selbst. Die Fingerglieder der Hand sollen ähnlich wie bei den vorherigen Modellen eine Verjüngung zueinander haben und durch Zug an der Schnur der Finger sich falten. Reibung dürfte nach Überlegungen nicht mehr existieren, da die Schnur bei Bewegung das Material eher bewegt und nicht wirklich reibt. Befestigt wird die Silikonhand dann an einer Vorrichtung am Handgelenk.

8.2.5.2 Gussform

Eine Herausforderung von diesem Versuchsmodell ist das Verfahren des Silikongusses. Um das Verfahren des Silikongießens zu verstehen, wird eine Gussform in der CAD-Software entworfen.

Als Testobjekt wurde ein einfacher Finger, welcher einen Faltmechanismus ermöglicht, entworfen.

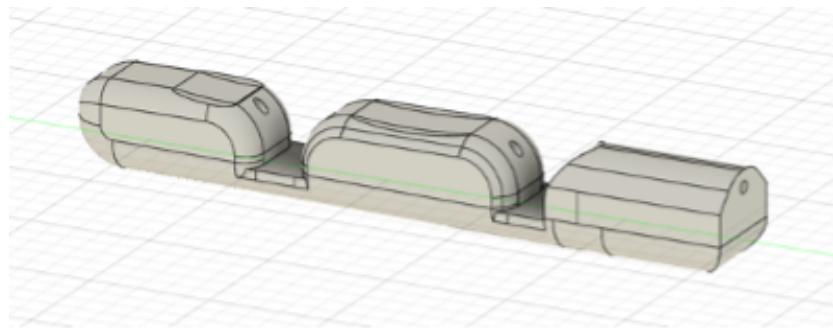


Abbildung 52: Innenseite des Silikonfingers

Im oberen Teil des Fingers verläuft durch jedes einzelne Glied ein Kanal für die Zugschnur, die Verbindung zwischen den einzelnen Gliedern wird durch einen Steg geschaffen. Bei Zug an der Schnur faltet sich dann der Finger an den dünneren Punkten, dem Steg, zwischen den Fingergliedern.

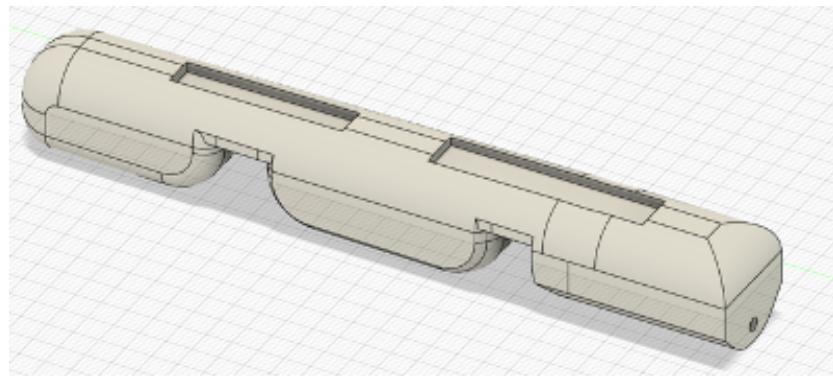


Abbildung 53: Außenseite des Silikonfingers

Um diese Fläche optional nochmals im Nachhinein zu verdicken und dadurch zu beeinflussen, wie stark der Rückzug ist, wurden zwei Einkerbungen in das Modell des Fingers implementiert. Durch das Aufgießen mit Silikon dieser rechteckigen Einkerbungen an den Biegungspunkten kann dies bewirkt werden.

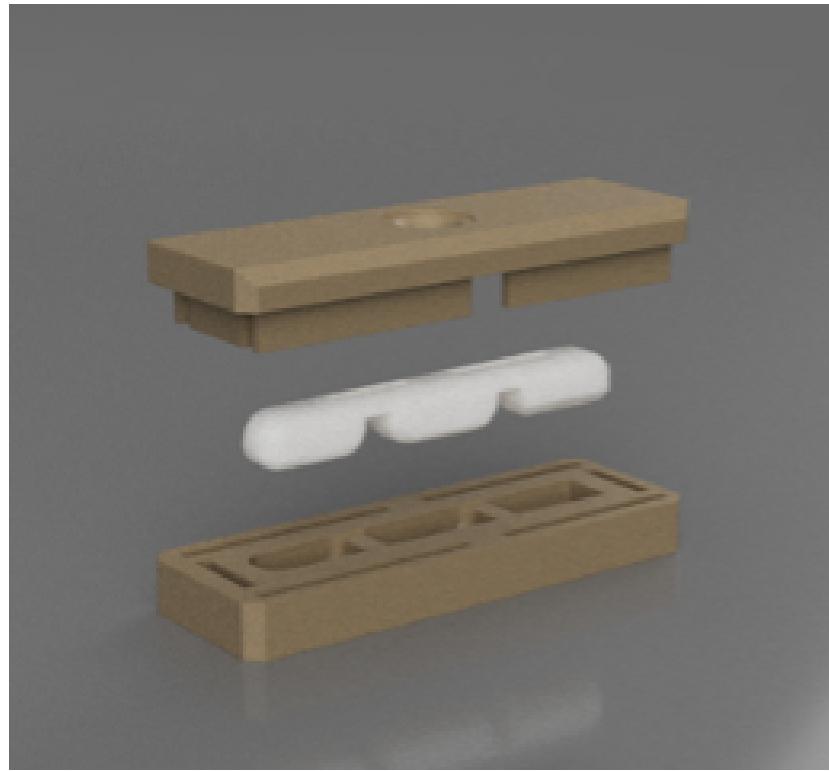


Abbildung 54: Gussform des ersten Gussversuchs

Der ganze Finger wird in eine Gussform gegossen, diese besteht aus zwei Teilen, um den Finger leicht aus der Form lösen zu können, ohne dabei die beiden Objekte zu beschädigen.

Verbunden sind beide Teile der Form mit einem Steckmechanismus, wie in der [Abbildung 54] ersichtlich. Am oberen Teil der Gussform befindet sich ein Loch. In dieses wird das flüssige Silikon später gegossen, das Loch wurde extra groß dimensioniert, damit gleichzeitig auch die Luft im Innenraum entweichen kann.

Das hier verwendete flüssige Silikon besteht aus zwei Komponenten, welche als Teil A und Teil B bezeichnet werden. Teil A ist die Hauptkomponente des Silikons und Teil B ist die Härtekomponente, zusammen vermischt führt dies zu einem festen elastischen Material.

Das Ergebnis nach dem ersten Guss: Während des Entwurfs der Gussform wurde nicht daran gedacht, dass das Loch für den Einguss auf derselben Höhe wie die höchste Fläche oder Decke des Innenraums sein muss. Durch diesen Fehler hat sich ab dieser Höhe ein Luftraum gebildet, welcher nicht mit Silikon gefüllt wurde.

Verbesserung:

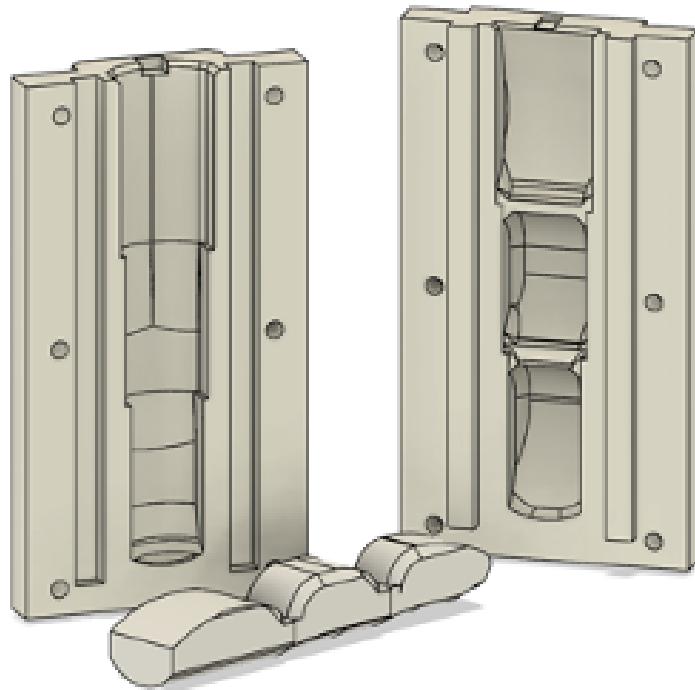


Abbildung 55: Gussform des zweiten Gussversuchs

Dies wurde durch eine Form, in der der Finger aufrechtstehend gegossen werden soll, verbessert. Das Loch ist somit am Anfang des Fingers und die Luft kann vollständig entweichen. Eine kleine Anpassung ist, dass neben dem Steckmechanismus auch eine Verschraubungsmöglichkeit geschaffen wurde um die beiden Teile der Gussform stärker aneinander zu pressen, dies verhindert das Austreten von Silikon während des Gusses.

Gezeigt hat sich nach dem Guss, dass das fertige Objekt aus Silikon sich auch in andere Richtungen biegen lässt als ausschließlich in die Faltrichtung. Um alle anderen Richtung außer die gewünschte zu verhindern, benötigt der Finger einen Stabilisator von innen, ähnlich dem Finger des Menschen, welcher einen Knochen hat.

8.2.5.3 Gelenke

Um zu verhindern, dass sich der Finger nach links, rechts, oder nach hinten biegt, also nicht in die Richtung in die er sich falten soll, wird im Inneren des Fingers etwas benötigt, das nur das Biegen in die Faltrichtung erlaubt. Somit benötigt man ein mechanisches Gelenk, welches durch den gesamten Finger verläuft.

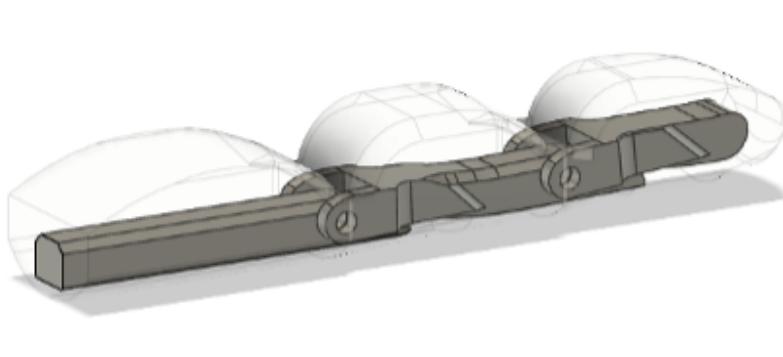


Abbildung 56: innere Ansicht des Fingergelenks

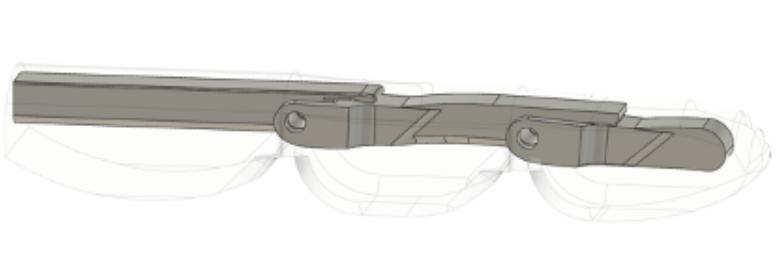


Abbildung 57: äußere Ansicht des Fingergelenks

Das Gelenk besteht aus drei Komponenten, verbunden sind diese durch eine Schraube, exakt an dem Punkt an dem sich der Finger beim Falten biegt. Durch eine mechanische Blockade kann sich das Gelenk ausschließlich in Faltrichtung falten.

Mit einer Erweiterung wird das gesamte Modell in der Gussform befestigt und positioniert, nach dem Guss findet sich dann das Gelenk eingegossen im Finger.

Ergebnis:



Abbildung 58: Silikonfinger mit eingegossenem Gelenk

Während des Gusses ist Silikon ausgetreten, obwohl bereits im Vorhinein vorgesorgt wurde, dass dies nicht passiert – wie beispielsweise durch die Verschraubungsmöglichkeiten, mit denen beide Teile aneinander gepresst werden sollen oder die Steckvorrichtung. Gelöst wurde dies mit Klebebändern, die zum Abdichten verwendet wurden.

Trotz der Komplikationen hat sich der Versuch als erfolgreich herausgestellt, denn der Finger funktioniert im Zusammenspiel mit dem Gelenk wie erwartet.

8.2.5.4 Entwurf einer neuen Gussform

Nachdem sich gezeigt hat, dass ein einzelner Finger umsetzbar ist, war der nächste Schritt eine gesamte Hand zu entwerfen. Für diese wird somit ein vollständiges Gelenksgerüst für die gesamte Hand benötigt, ein Modell einer Hand sowie eine dafür entworfene Gussform.

Grundsätzlich ist das Ziel die gesamte Hand aus Silikon zu verwirklichen und diese aus Silikon zu gießen. Der Faltmechanismus funktioniert dabei wie in [Absatz 8.2.4.2], mit der zusätzlichen Eigenschaft, dass die Finger früher in der Handfläche beginnen, damit sich diese besser um das gewünschte Objekt falten kann.

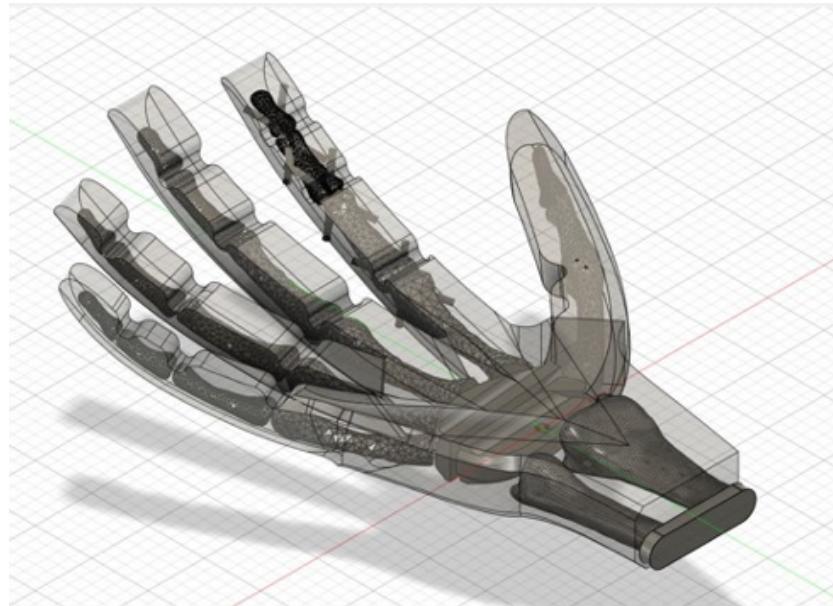


Abbildung 59: Modell der Silikonhand mit integrierten „Knochengelenken“

Ohne nun bereits auf das Gerüst einzugehen, ist in dieser Grafik zu sehen, dass die Handfläche zwischen den Fingern kein Material hat. Dies schafft auch die optionale Möglichkeit die Finger mit einem weiteren Mechanismus seitlich zu bewegen.

In [Abbildung 59] ist ebenso die sich von den anderen Fingern unterscheidende Anordnung des Daumens ersichtlich, dieser liegt seitlich und soll sich beim Falten ähnlich wie der echte Daumen des Menschen verhalten.



Abbildung 60: aktuelle Version des Gelenks

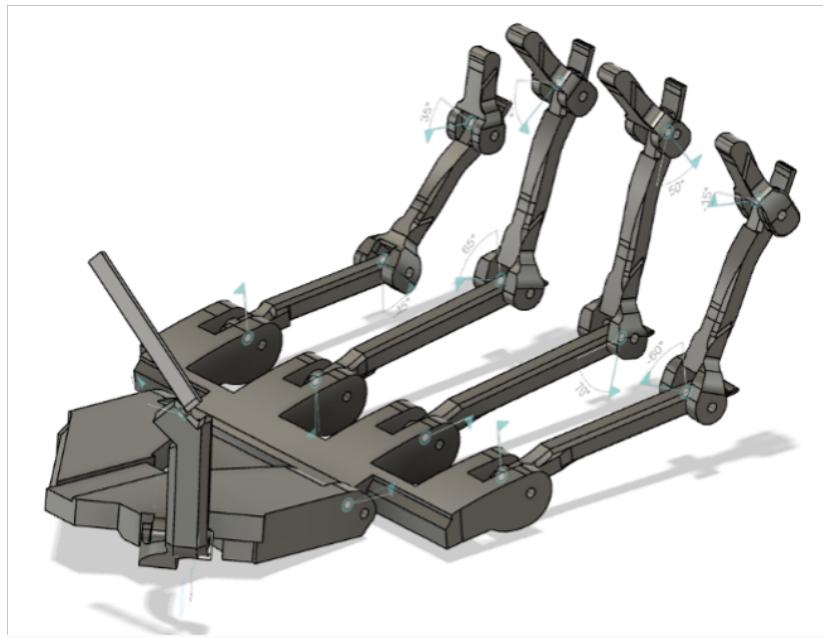


Abbildung 61: vorherige Version des Gerüsts

Das Gerüst hat dabei eine triviale Neuerung, denn es wurde sich an den tatsächlichen Knochen eines Menschen orientiert, damit soll für mehr Ähnlichkeit zur Anatomie der menschlichen Hand gesorgt werden.

Im Unterschied zu einer vorherigen Version des Gerüsts, ist zu erkennen, welche Vorteile die neue gegenüber der alten hat. Unter anderem ist diese viel flexibler und hat keine große und starre Handwurzel. Ein weiterer Unterschied ist die Verbindung der einzelnen Knochen in jedem Finger. Anders wie bei der alten Version werden hier keine Schrauben zur Verbindung einzelner Gelenksteile sondern Gummikordeln verwendet.



Abbildung 62: Verbindung der einzelnen Glieder mit Gummikordeln

Diese neue Form der Verbindung war notwendig um die einzelnen Elemente der Knochen platzsparend und effektiv zu verbinden. Zwar wurde kurzzeitig eine Verbindung anhand einer Schraube getestet, dies zeigte jedoch, dass das mit der Größe der Knochen und dem Raum im Finger nicht umsetzbar wäre. Zwar blockiert dieser Mechanismus nicht Bewegungen in alle anderen Richtungen außer die Faltrichtung, schafft jedoch mehr Flexibilität für den Finger – dennoch wurde jeder Finger so modelliert und an den Krümmungsstellen so verstärkt, dass er sich hauptsächlich in die Faltrichtung biegt.

8.2.5.5 Gussform und Gussversuch der gesamten Hand

Für den Guss der gesamten Hand wird ähnlich wie bei dem Finger aus [Absatz 8.2.5.2], eine Gussform benötigt, diese Gussform hat jedoch ein größeres Spektrum an Anforderungen. Mitunter muss berücksichtigt werden, dass das „Skelett“, auch bekannt als das Gelenksgerüst, präzise in der Mitte eines Fingers platziert werden muss.

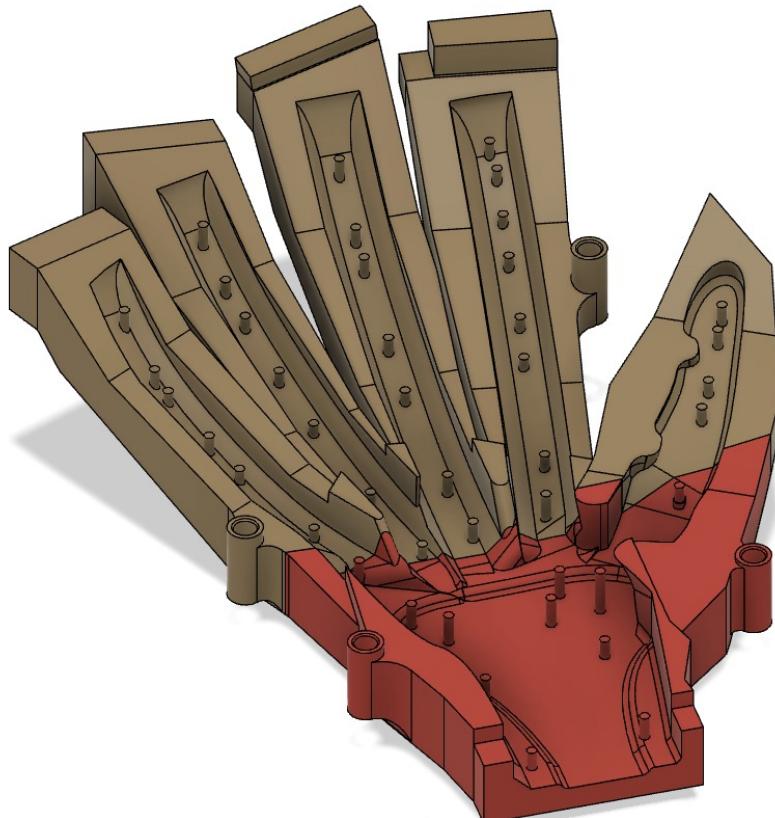


Abbildung 63: unteres Element der Gussfom

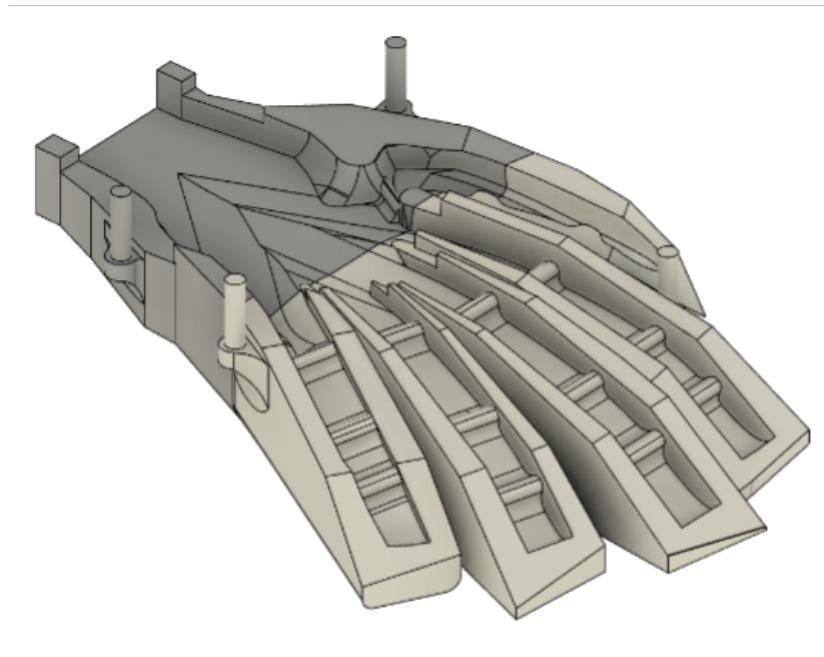


Abbildung 64: oberes Element der Gussform

Zu sehen sind in den beiden Grafiken vier Teile der Gussform. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Druckfläche des Druckers sonst überschritten werden würde. Daher muss jeweils der untere und der obere Teil der Form halbiert werden. Zu der unteren Hälfte der Gussform in [Abbildung 63] gehört das rote und braune Element und zu der oberen gehören wie in [Abbildung 64] sichtbar das beige und graue Element. Befestigt werden die beiden Teile jeweils mit vier Stiften in Form einer Steckvorrichtung. Sichtbar ist ebenso zwischen dem unteren und dem oberen Element der Gussform eine weitere Steckvorrichtung, durch diese werden beide Hälften der Form verbunden.

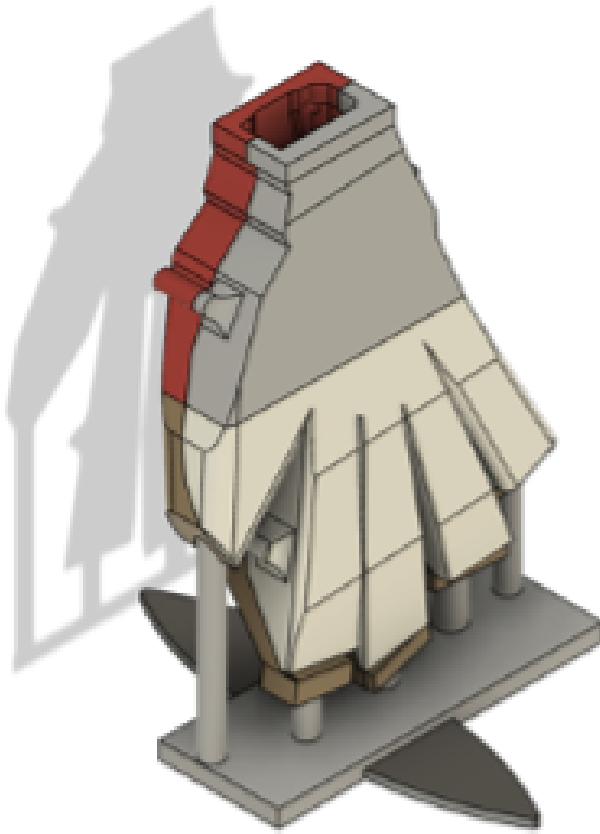


Abbildung 65: Gussform mit Halterung

Wie in dieser Veranschaulichung ersichtlich wird in aufrechtem Zustand der Gussform das Silikon in das obere Loch eingegossen. Wie in [Absatz 8.2.5.2] an einem Versuch zu sehen ist, ist es von großer Bedeutung, dass das Eingussloch an der höchsten Stelle des Innenraums liegt. Um sicherzustellen, dass die Hand stets aufrecht bleibt und während des Härteprozesses des Silikons gesichert in ihrer Position bleibt, wurde eine Halterung entworfen, auf welche die Form gesteckt werden kann. Das Loch wurde möglichst groß modelliert, damit die im Innenraum verbleibende Luft der Gussform ausreichend entweichen kann.

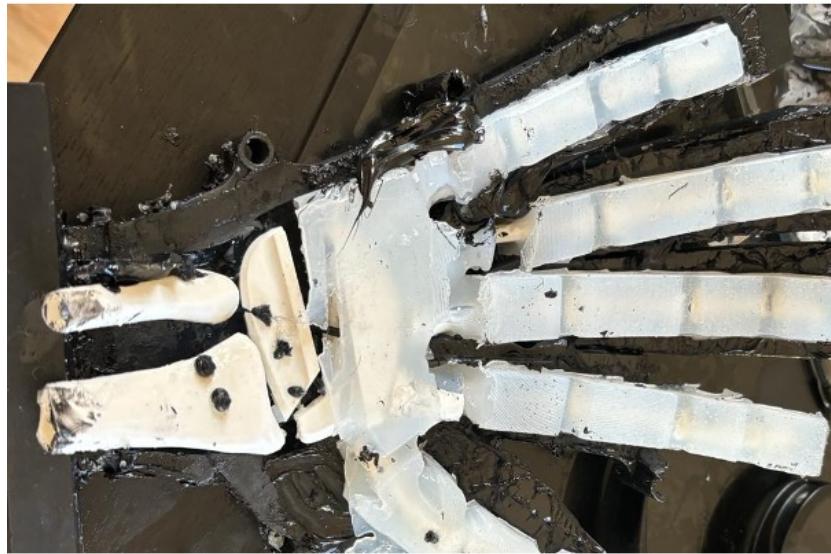
Resultate des Gussversuchs:

Abbildung 66: Silikonhand Fehlversuch

Der Gussprozess ist nicht einwandfrei verlaufen, mitunter lag dies hauptsächlich an den Lücken zwischen den einzelnen Elementen. Aufgrund des FDM-Druckverfahrens sind zwischen den einzelnen Flächen entweder Rillen oder versetzte Schichten und dies führt dazu, dass diese nicht exakt aufeinander aufliegen. Dort fließt das Silikon dann meist aus der Gussform aus.

Um diesem Problem entgegenzuwirken, ohne das Modell aus Kostengründen neu drucken zu müssen, gab es folgende Lösungsversuche:

- Ein Versuch war es, mit einem dichtenden Klebeband diese Freiräume von außen abzudichten. Dies hat kaum zu einer Verbesserung beigetragen. Das Band hat dem Druck vom Silikon meist nicht standgehalten und hatte keine ideale Haftung an den äußeren Wänden der Gussform.
- Weiters wurde versucht mit einer Dichtmasse abzudichten, doch selbst diese konnte das Modell nicht vollständig abdichten. Zwar wurde es besser, jedoch besonders an komplexeren Bereichen, wie bei dem Daumen gab es keine bemerkbare Verbesserung.

Letztlich konnte kein nutzbares Ergebnis mit der Gussform erzielt werden. Die Versuche das Modell abzudichten waren nur teilweise erfolgreich. Wie an dieser Abbildung ersichtlich konnten die Finger zwar gegossen werden, jedoch konnte das Silikon nicht die „Handfläche“ halten ohne auszurinnen.

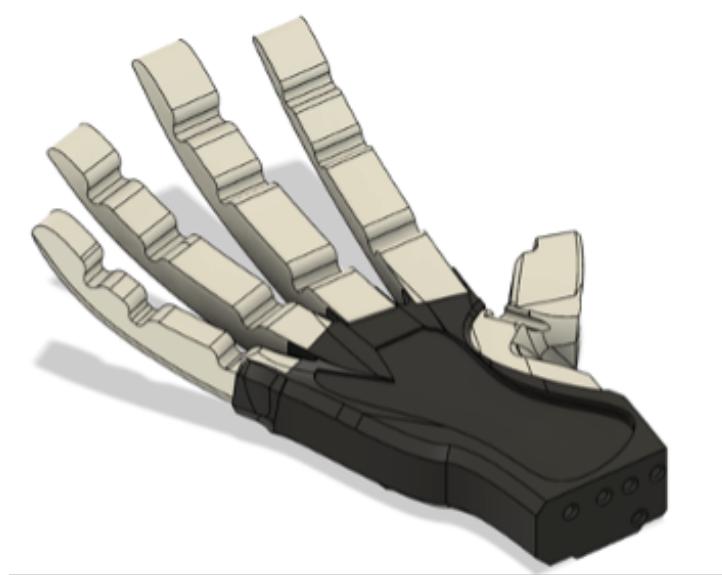


Abbildung 67: Notkonzept: Handfläche aus hartem Kunststoff (PLA)



Abbildung 68: Realisierung des Notkonzepts

Jedoch gab es einen Notlösungsversuch um das vorhandene Material zu retten, dafür wurden die Finger abgeschnitten bis zu dem Punkt, an dem der Guss nicht gelungen ist, daraufhin vermessen und ein Modell wurde modelliert. Dieses ersetzt die Handfläche aus Silikon mit einer 3D gedruckten und auf diese können die bestehenden Silikonfinger auf eine Einkerbung für diese gesteckt werden. In der Abbildung ist der Unterschied zwischen Silikon und Kunststoff anhand der Farben zu sehen, dunkelgrau steht für das 3D gedruckte Modell und die beige Farbe für das Silikon. Zu sehen sind auch fünf Kanäle, durch diese soll die Angelschnur gehen und an den Fingern ziehen.

In der Praxis hat sich dann herausgestellt, dass die Finger sehr weich sind und daher ihr eigenes Gewicht kaum halten können. Der Faltmechanismus funktioniert jedoch nicht ausreichend und auch nicht in gewünschtem Maße. Lösen könnte man die Instabilität der einzelnen Fingern mit härterem Silikon. Grundsätzlich wurde moderat hartes Silikon gewählt, mit dem Härtefaktor 25A, das doppelte somit 50A oder mehr wären notwendig um die Finger stabil zu halten.

Die Problematik mit dem Guss, dass das Modell sich nicht in einem gießen lässt und die Erkenntnis beim Notmodell, dass die Finger nicht stabil bleiben, haben gezeigt, dass dieses Konzept für unser Projekt nicht tauglich ist. Aufgrund dieser Ergebnisse wird das Konzept vorerst verworfen, dennoch soll Silikon weiterhin ein Bestandteil der zukünftigen Modelle bleiben, besonders aufgrund des Griffes, der damit gesichert werden kann.

8.2.6 Entwicklungsstufe: Hybrid

8.2.6.1 Erfahrung und Konzepterläuterung

Aus den Versuchen der letzten Kapitel konnte einiges an Erfahrung gesammelt werden. Nun ist klar, worauf bei dem Modell einer Hand geachtet werden muss.

Wie in [Unterunterabschnitt 8.2.3] hat sich gezeigt, dass sich die einzelnen Fingerglieder kontinuierlich um die anderen falten müssen. Auch hat sich im Kapitel der Entwicklungsstufe Inmoov gezeigt, wie wichtig es ist für ein Modell zu sorgen, das einer hohen Last standhält und nicht brüchig ist. In den letzten Versuchen hat sich gezeigt, dass die Zugschnur an sämtlichen Stellen auf Reibung trifft.

Entdeckt wurde eine erweiterte Version der Hand aus [Unterunterabschnitt 8.2.4] von Gael Levin. Diese hat sämtliche Optimierungen, unter anderem der zu bemängelnden Stabilität der vorherigen Version oder auch des problematisches Mechanismuses der Zugschnüre. Im neuen Modell der „i2Hand“ sind die Fingerglieder besonders an ihren Schwachstellen verstärkt worden, somit kann verhindert werden, dass die Verbindungen der einzelnen Glieder bei hoher Last oder gar der Montage brechen. Die Verbindungen haben vorgesehene Einkerbungen für den Kopf der Schraube oder eine Mutter, somit steht an den Seiten der Finger nichts ab.

Der Faltmechanismus besteht nicht mehr aus zwei Schnüren, sondern reduziert sich ausschließlich auf die Zugschnur, diese hat eine eigene Führung mit abgerundeten Kanten um die Reibung zu reduzieren. Der Rückzug wird durch eine Zugfeder verursacht, diese erstreckt sich durch den gesamten Finger und ist am Anfang und seinem Ende montiert.

Doch nicht alles war ideal an dem Modell der neuen Hand, denn der Motorblock wurde nicht optimiert und nutzt weiterhin den Mechanismus, bei dem sich die Zugschnur um einen Aufsatz auf dem Motor wickelt. Daher muss eigens ein neuer Mechanismus entworfen werden. In diesem soll die Drehbewegung des Servomotors in eine geradlinige Zugbewegung übersetzt werden.

8.2.6.2 Erster Entwurf

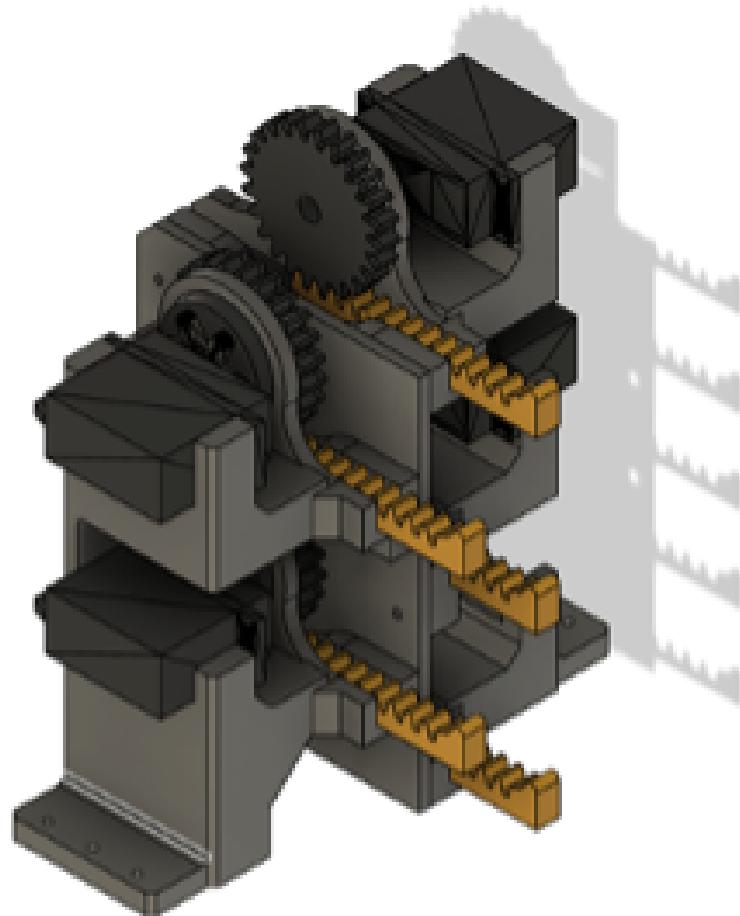


Abbildung 69: Rekonstruktion des Motorblocks

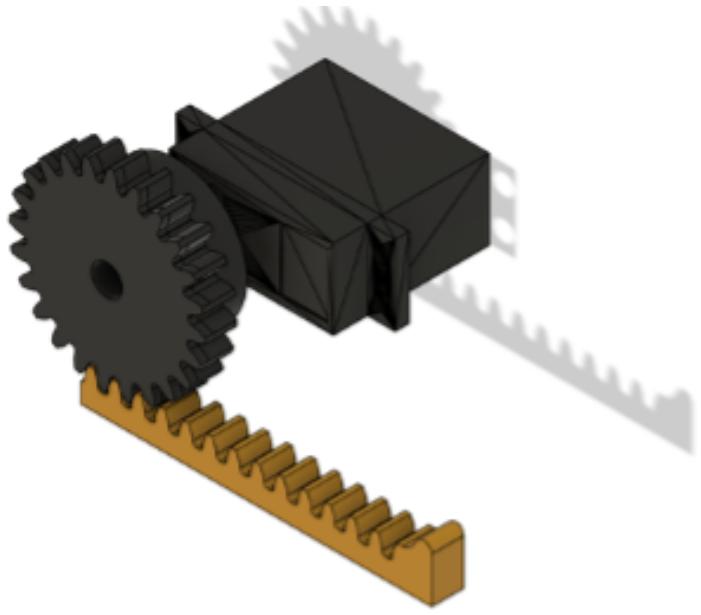


Abbildung 70: Mechanismus mit Zahnrad und Zahnstange

In der [Abbildung 69] ist ein Gerüst zu sehen, dieses wird in Kombination mit den fünf Motoren, den zugehörigen Zahnstangen und Zahnrädern als Motorblock bezeichnet. Auf jeden Motor wird ein Zahnräder befestigt. Dreht sich dieses Zahnräder, bewegt es die in der Fassung platzierte Zahnstange. Der Mechanismus nennt sich „Rack and Pinion“ (engl.) und wurde so dimensioniert um mit einer Drehung von 180° die Zahnstange um 60mm zu bewegen.

Nach dem Druck und einer ersten Inbetriebnahme hat sich die Funktionalität des Mechanismus erwiesen. Der Motor dreht sich und wandelt dies in eine geradlinige Zugbewegung um, auf der Zahnstange wird dann die Angelschnur montiert und somit kann an dieser kontrolliert gezogen werden.

8.2.6.3 Verbesserungen – zweiter Entwurf

Neben der Funktionalität hat sich gezeigt, dass das Modell in einer deutlich kleineren Form und raumeffizienter entworfen werden kann. Dafür spricht, dass sich die Zahnstange nur um 30mm bewegen muss um den Finger ausreichend zu falten. Dadurch konnte der Durchmesser des Zahnrades um ein Vielfaches verkleinert werden und dies bewirkt, dass die Halterung auch kleiner ausfällt.

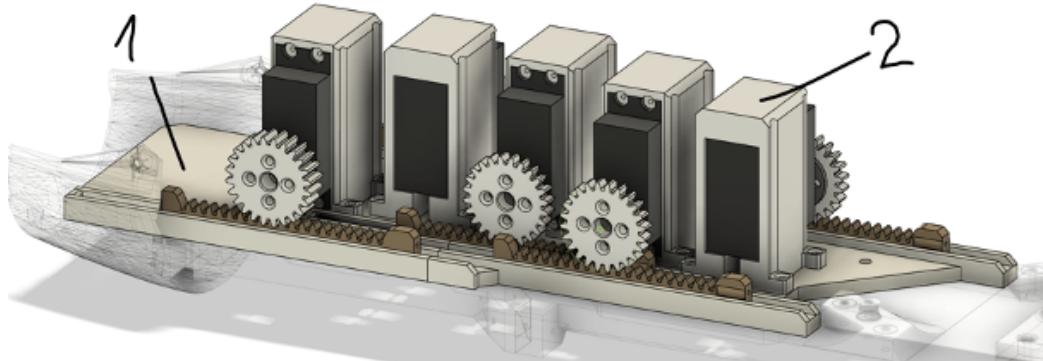


Abbildung 71: Verbesserung der ersten Rekonstruktion

In diesem Modell ist zu sehen, dass alle Servomotoren auf einer Höhe liegen. Diese werden auf einer Servohalterung (2) montiert, welche dann auf der Platte (1) montiert wird. Aufgrund der Toleranzen des 3D-Drucks können die Halterungen mit Langlöchern adjustiert werden. Das Modell wurde mit der Rücksicht entworfen, Schrauben und Muttern im Modell zu versenken.

8.2.6.4 Realisierung und Aufbau

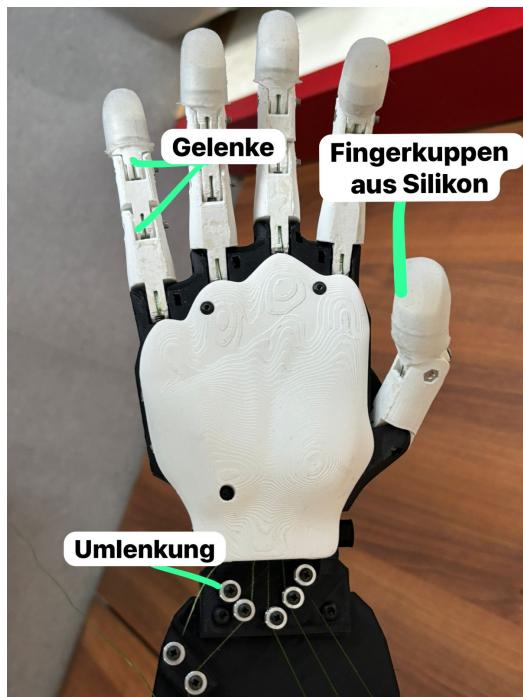


Abbildung 72: Roboterhand Entwicklungsstufe Hybrid

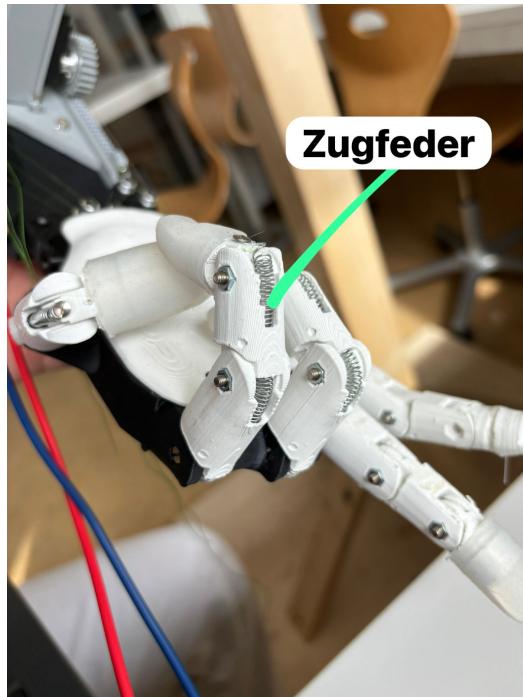


Abbildung 73: Rückzugsmechanismus der Entwicklungsstufe Hybrid

Die realisierte Hand, welche eine von Gael Levin erweiterte Version der modellierten Hand aus [Unterunterabschnitt 8.2.4] ist, weist auch in der Realität eine deutlich höhere Stabilität als die der vorherigen Hand auf. Besonders die Verbindung der Fingergelenke und deren Wandstärke hat sich bereits bei der Montage als äußerst stabil erwiesen. Zu Schwierigkeiten kam es beim Einbauen der Zugfeder, welche für den Rückzug des Fingers verantwortlich ist, da diese sich schwer durch die Führungen ziehen ließ und währenddessen gespannt werden musste. Auch wurden Fingerkuppen aus Silikon in einer entsprechenden Form gegossen, welche für mehr Grip sorgen sollen.

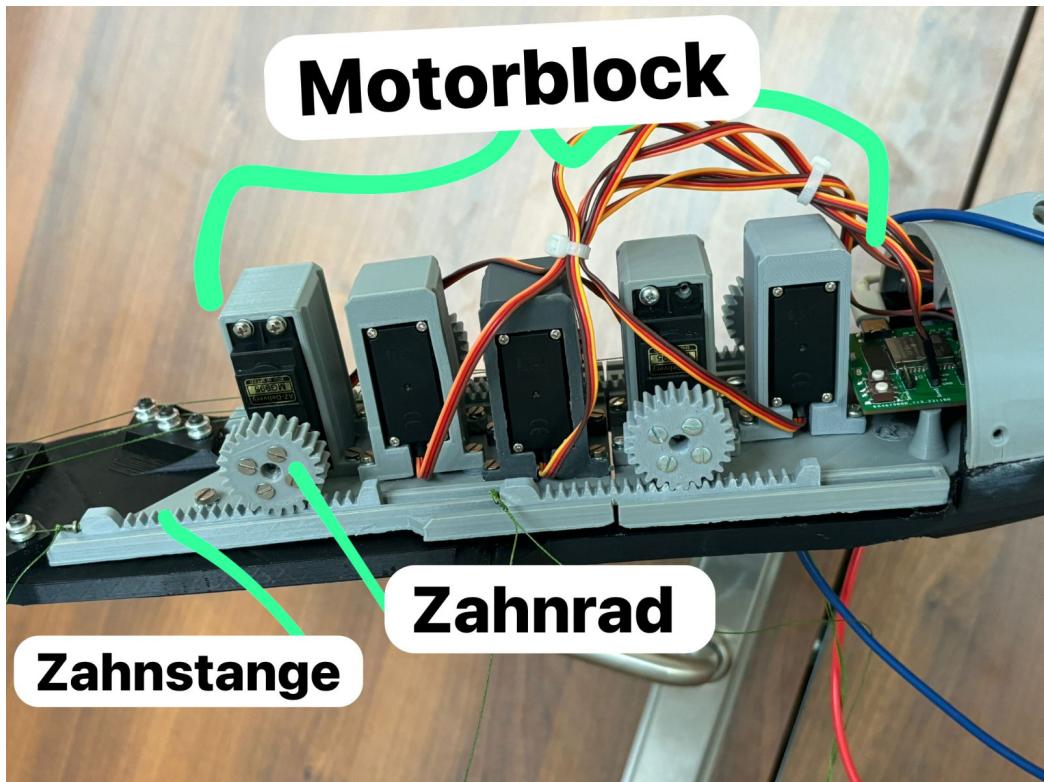


Abbildung 74: Mechanismus der Entwicklungsstufe Hybrid

In der [Abbildung 74] sind die gedruckten Komponenten des Motorblocks zu sehen, die Montage ist jedoch nur durch ein Zusammenspiel von Software und Hardware möglich. Der Servomotor muss in die Position 0 gestellt werden, folglich wird die Zahnstange mit gespannter Schnur entsprechend positioniert, daraufhin darf erst das Zahnrad montiert werden. Für die Zahnstangen war eine Anpassung notwendig, da diese etwas zu dick für die Führungen waren.

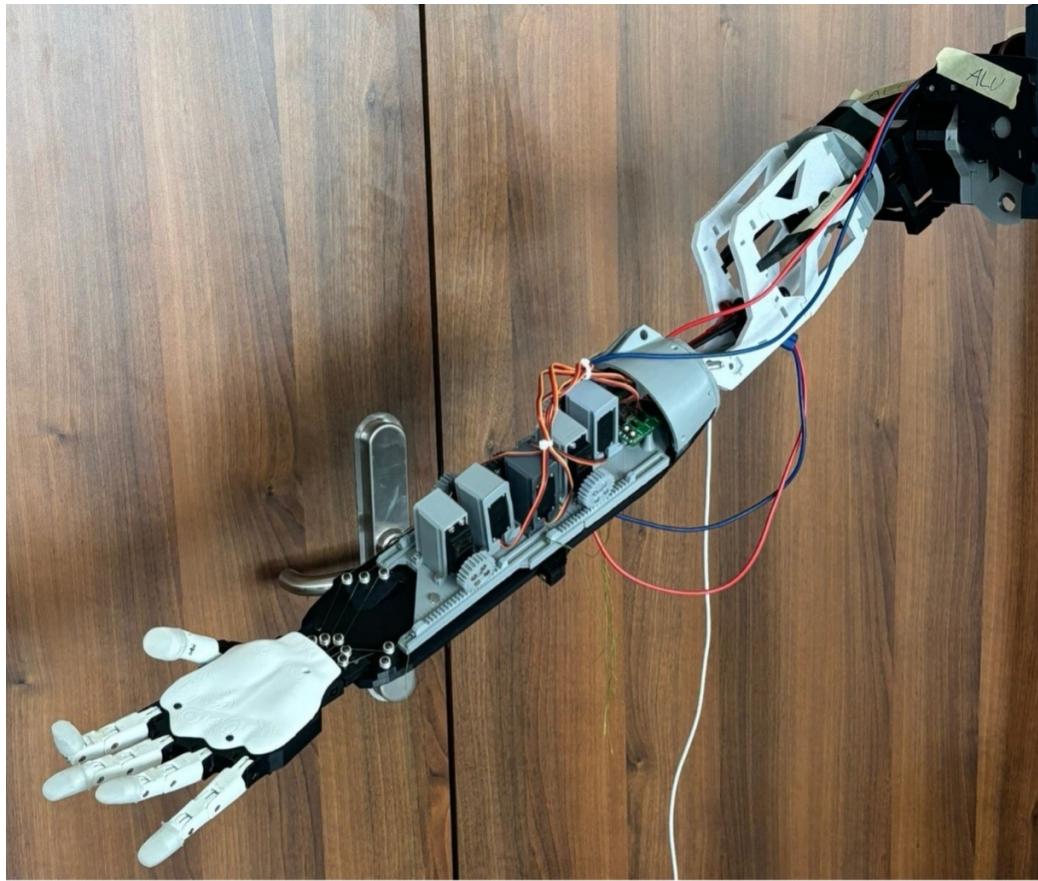


Abbildung 75: Mechanismus Entwicklungsstufe Hybrid mit Oberarmerweiterung

Neben dem Entwurf und der Realisierung des Unterarms wurde zusätzlich aus Eigeninitiative der von Gael Levin gefertigte Oberarm und das dazugehörige Schultergelenk gedruckt und an ein entsprechendes Gerüst befestigt. Jedoch ist diese Erweiterung nicht motorisiert worden, dies hat den Grund, dass das Diplomprojekt von der Abteilung „Elektronik und technische Informatik“ abgenommen und im Robotik-Unterricht erweitert werden soll.

Dabei können zahlreiche Erweiterungen vorgenommen werden, wie unter anderem die Ausstattung mit Motoren an vier möglichen Gelenken und weitere mechanische Anpassungen.

8.2.6.5 Versuche

Bei dieser finalen Entwicklungsstufe hat sich gezeigt, dass die Erkenntnisse der vorherigen Stufen zu einem nun stabilen und zuverlässigen Modell geführt haben. Die Versuchsergebnisse haben folgende Informationen geliefert:

- Die neue Mechanik ist äußerst präzise, sei es der Motorblock oder der Faltmechanismus. Die Finger können äußerst akkurat auf eine gewünschte Position gestellt werden.
- Der Griff, welcher durch die Fingerkuppen aus Silikon [siehe [Abbildung 72](#)] geschaffen wird, ermöglicht es passende Objekte fest zu greifen. Getestet wurde dies mit einer 250ml Flasche, einem Handschuh, einer menschlichen Hand und auch mit Werkzeug, wie einem Schraubendreher.
- Die Reibung konnte erheblich reduziert werden, besonders hilfreich waren dabei noch zusätzlich gefräste Umlenkungen [siehe [Abbildung 72](#)], welche die Zugschnur auch ausrichten.

8.2.7 Fazit und Reflexion

Die Entwicklung der Mechanik hatte viele Höhen und Tiefen, war jedoch äußerst lehrreich. Jede Entwicklungsstufe hat ihre Erkenntnisse mit sich gebracht, jedoch auch gezeigt, dass sich einige Probleme nicht eliminieren sondern ausschließlich minimieren lassen. Während des Prozesses der Entwicklung hat der Faltmechanismus einige Änderungen und Anpassungen erhalten, von der bloßen Verbindung mit Gummikordeln bis zu einer separaten Verbindung der Fingerglieder und einem Rückzug mit einer Zugfeder. Die letzte Entwicklungsstufe darf nun als Konzept betrachtet werden, welches alle positiven Eigenschaften der vorherigen Modelle vereint und daraus eine optimale Hand für unsere Anforderungen geschaffen hat.

9 Hardware Realisierung [Szabo]

9.1 Eingabesubsystem

9.1.1 Grundlegende Voraussetzungen

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.

9.1.2 Überlegungen, Simulationen und Berechnungen

9.1.2.1 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.

9.1.2.2 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.

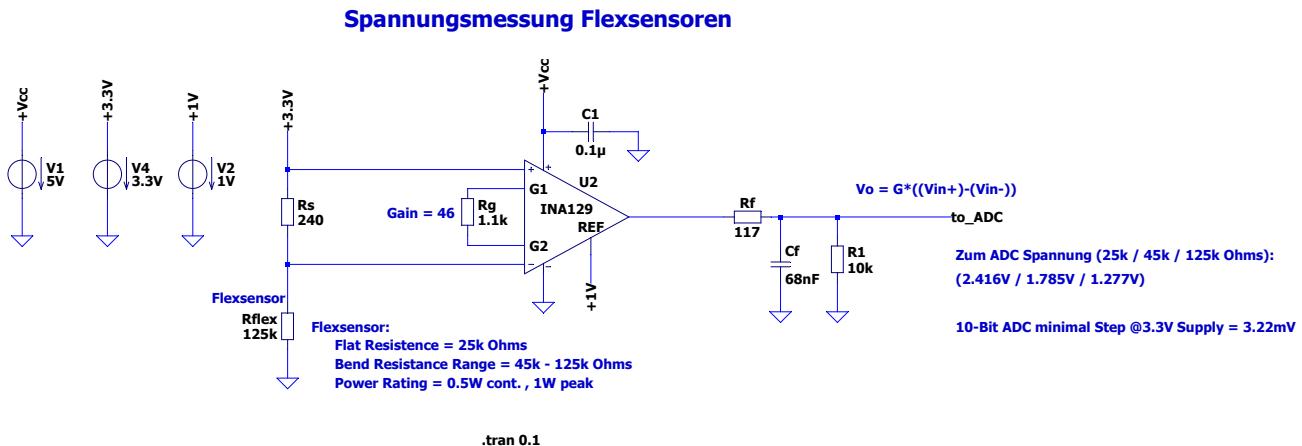


Abbildung 76: LTspice Simulation der Flexesnor - Messschaltung

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 Ausgangsspannungsspegl auf ein

9.1 Eingabesubsystem

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 störungssarmen Ausgangssignal des INA129, herauszufiltern. Der zu GND geschaltete Widerstand (R1), entlastet den Eingang des folgenden ADCs. Der Tiefpassfilter wurde folgendermaßen dimensioniert.

9.1.2.3 Berechnung des Tiefpassfilters

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

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

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

Der zum Kondensator parallel geschaltete Widerstand wurde bei der Berechnung des Filters nicht berücksichtigt, da dieser die Grenzfrequenz bei der physischen Anwendung nur unmerkbar beeinflusst. Die Komplexität stünde mit der zusätzlich erzielten Genauigkeit in keiner Relation.

9.1.2.4 Berechnung der OPV Verstärkung und Dimensionierung des Shuntwiderstands

$$\text{Verstärkungsgleichung laut Datenblatt: } G = 1 + \frac{49.4\text{k}\Omega}{R_g}$$

$$\text{Gain gewählt mit 46.} \quad R_g = 1.1\text{k}\Omega$$

Die Verstärkung wurde so gewählt, dass diese mit dem Shunt-Widerstand für den ADC optimal geeignet ist. Der Shunt-Widerstand wurde mithilfe der Simulation in [Abbildung 76] gewählt.

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 $25\text{k}\Omega - 125\text{k}\Omega$ 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.

9.1.2.5 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 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:

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

$$\text{bei 10Bit ADC: } LSB = 3.22mV$$

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

$$ADC\text{Ausgangsstufen} = \frac{2.3V}{3.22mV} = 713$$

Der reale Ausgangspegel des OPVs liegt, wie bei der Simulation in [Absatz 9.1.2.2] 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.

9.1.2.6 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.

9.1 Eingabesubsystem

- 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.

Bei der Umschaltdauer wird die volle Schnelligkeit des Chips verwendet, um eine minimale Verzögerung von der Bewegung des Sensors zur Bewegung der Roboterhand zu gewährleisten. Die Umschaltzeit von Kanal zu Kanal beträgt ca. 100ns.

9.1.2.7 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.

Wichtig zu beachten ist allerdings, dass dieser Sensor nur in Hardware auf der Platine integriert wurde und die Softwareansteuerung noch nicht vorhanden ist. Diese müsste im Zuge möglicher Erweiterungen [siehe [Abschnitt 13](#)] programmiert werden.

9.1.2.8 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 Mikrokontroller 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 Mikrokontroller 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 die wir bei der Schaltung einheitlich auf das I2C Bussystem setzen, muss zumindest dieses von dem gewählten Mikrokontroller unterstützt werden. Als zweite Pflichtunterstützung gilt die UART-Kommunikation. Die Funktion und Notwendigkeit dieser, wird in [Absatz 9.1.4.1] erläutert.

- Möglichkeiten der drahtlosen Übertragung:

Da die Flexsensorwerte drahtlos übertragen werden müssen, muss der Mikrokontroller 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 Mikrokontrollern ein extra Debugtool um viel Geld erworben werden muss. Eine Programmierung im Terminal kommt ebenfalls nicht in Frage.

- Größe und Formfaktor:

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.

9.1.3 Versuchsaufbauten und Messungen

In den folgenden Punkten, werden die praktischen Tests der, in [Unterunterabschnitt 9.1.2] beschriebenen Konzepte und Überlegungen, erläutert.

9.1.3.1 Messschaltung der Flexsensoren

Zunächst wurde die Schaltung aus [Absatz 9.1.2.2] 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 $27k\Omega$, $68k\Omega$ und $118k\Omega$ gewählt, da der Widerstandsbereich der Sensoren bei $25k\Omega - 125k\Omega$ liegt. In [Absatz 9.1.3.2] werden die Messergebnisse dargestellt.

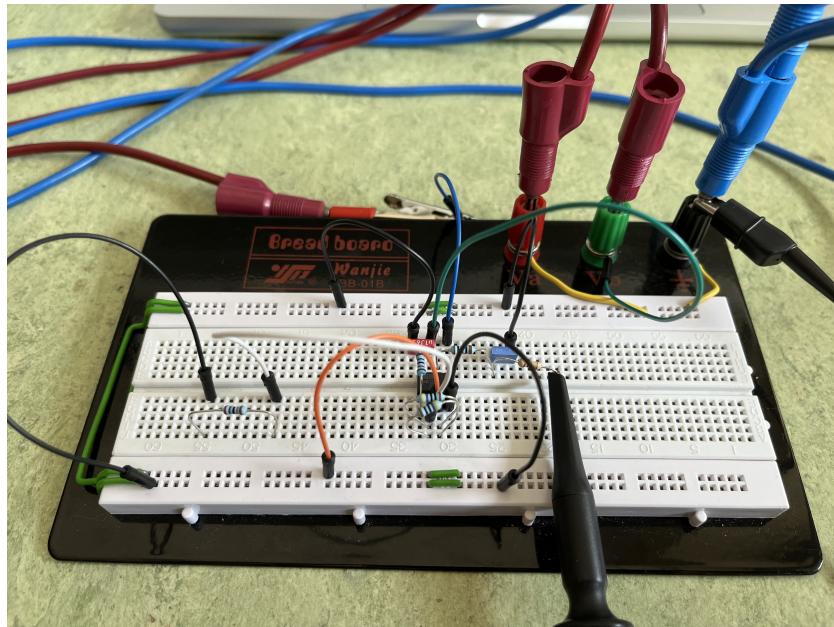


Abbildung 77: Steckbrettaufbau der Flexesnor - Messschaltung



Abbildung 78: Netzteileinstellungen

+3.3V für die Versorgung des Flexsensors (Last), simuliert mit drei normalen Widerständen.

+1V als Referenzspannung für den INA-129.

+5V zur Versorgung des INA-129.

9.1.3.2 Messergebnisse



Abbildung 79: Oszilloskopbild mit $R_L = 27k\Omega$

Das obige Oszilloskopbild zeigt die, mit einem Tastkopf, gemessene Ausgangsspannung des Operationsverstärkers, bei einem Flexsensorwiderstand von $27k\Omega$. Die gemessene Spannung ist rot eingekreist und beträgt 2.28V. Da bei der Simulation in LTspice mit einem Widerstand von $25k\Omega$ 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.

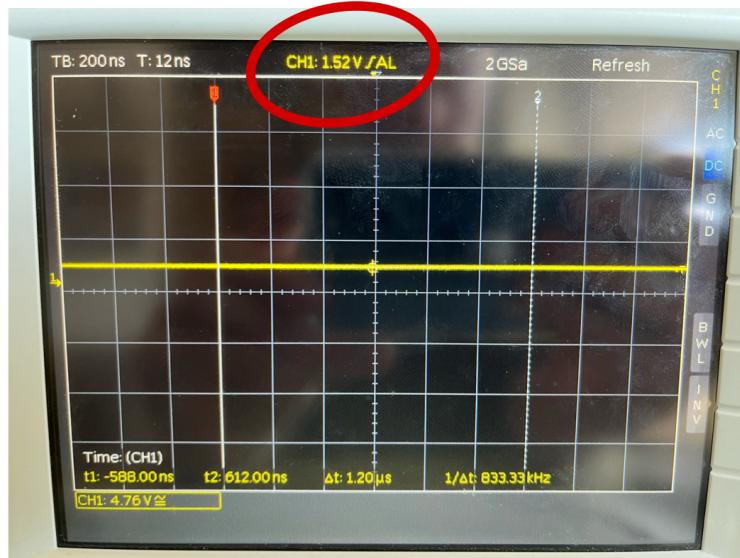


Abbildung 80: Oszilloskopbild mit $R_L = 67k\Omega$

Nun wurde die gleiche Messung erneut durchgeführt, allerdings mit einem Flexsensorwiderstand von $67k\Omega$. 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.

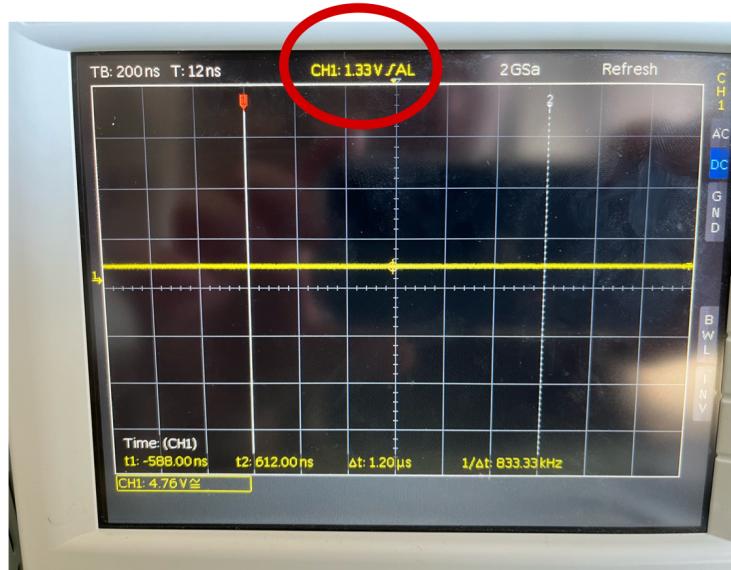


Abbildung 81: Oszilloskopbild mit $R_L = 118k\Omega$

Schlussendlich wurde noch ein Flexsensorwiderstand von $118k\Omega$ 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.

9.1.4 Schaltungsdesign

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

9.1.4.1 Externer Anschluss

- 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 Mikrokontroller lesbar zu machen, muss dieses für die UART-Kommunikation umgewandelt werden. Hierzu muss der Mikrokontroller 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 Mikrokontroller übertragen. Wichtig zu beachten ist hierbei, dass die UART-Leitungen ausgekreuzt sein müssen. Die Funktion der Anschlüsse RTS und DTR wird in [Absatz 9.1.2.8] erläutert.

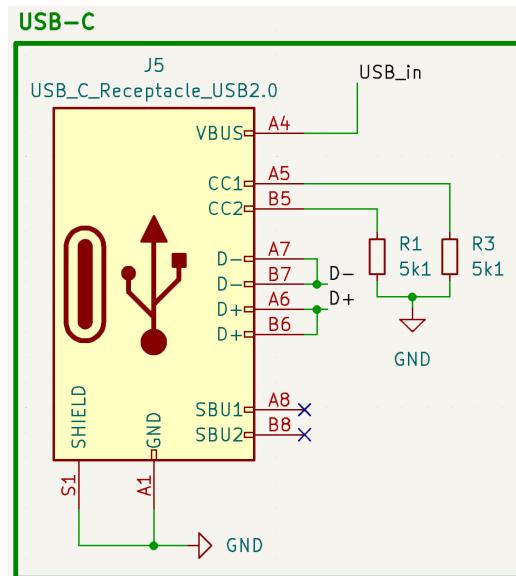


Abbildung 82: USB-C-Buchse

9.1.4.2 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 10kΩ 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.

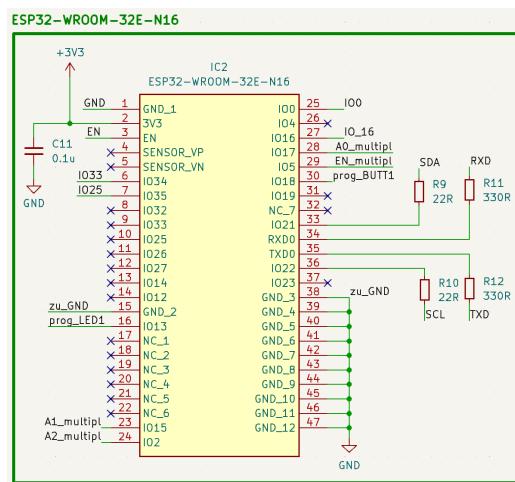


Abbildung 83: ESP32 Mikrokontroller

9.1.4.3 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.

9.1.4.4 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.

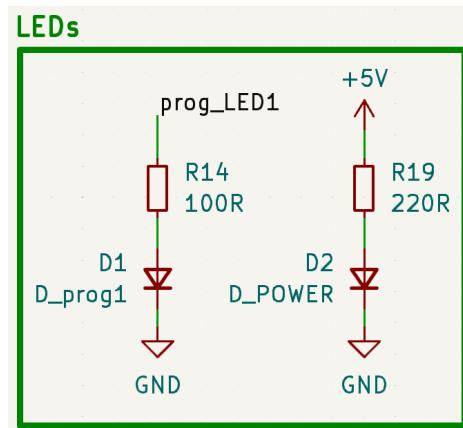


Abbildung 84: Status LEDs

9.1.4.5 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.

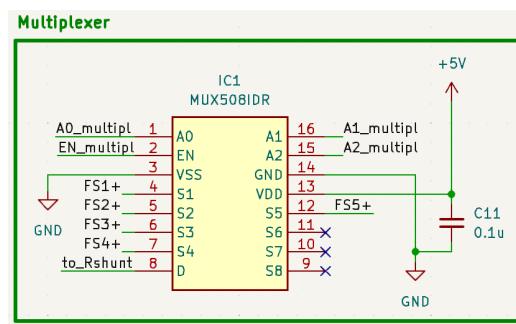


Abbildung 85: Multiplexer

9.1.4.6 Operationsverstärker

Für das Auslesen der Flexsensoren, wird eine Schaltung, wie in [Absatz 9.1.2.2] 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.

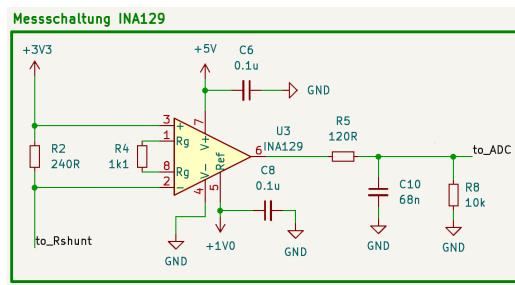


Abbildung 86: Operationsverstärker - Schaltung

9.1.4.7 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 [Absatz 9.1.2.5] 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 I^2C Leitungen an den Mikrokontroller übertragen.

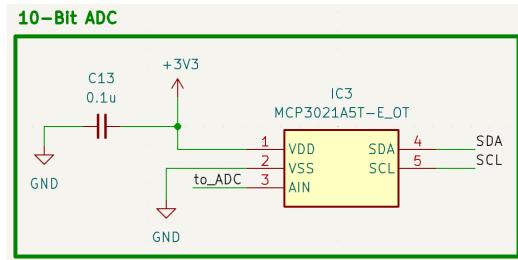


Abbildung 87: ADC - Schaltung

9.1.4.8 Gyroskop-Sensor

Der Gyroskopsensor ist dafür zuständig die Drehung des Handschuhs in X, Y -und Z Richtung wahrzunehmen. 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.

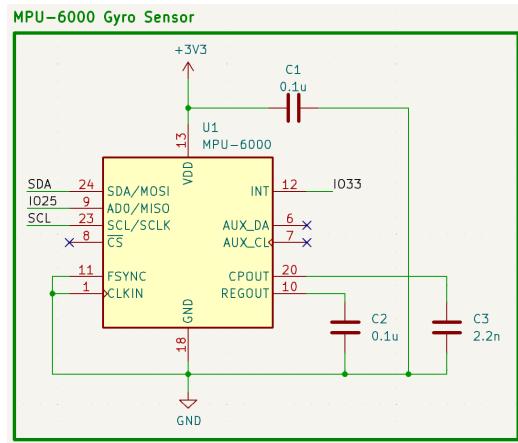


Abbildung 88: Gyroskopsensor - Schaltung

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 I^2C 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.

9.1.5 Platinendesign

9.1.5.1 Erste Testplatine

Die erste Testplatine wurde in der schuleigenen Werkstatt, mithilfe einer Platinenfräse, 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.

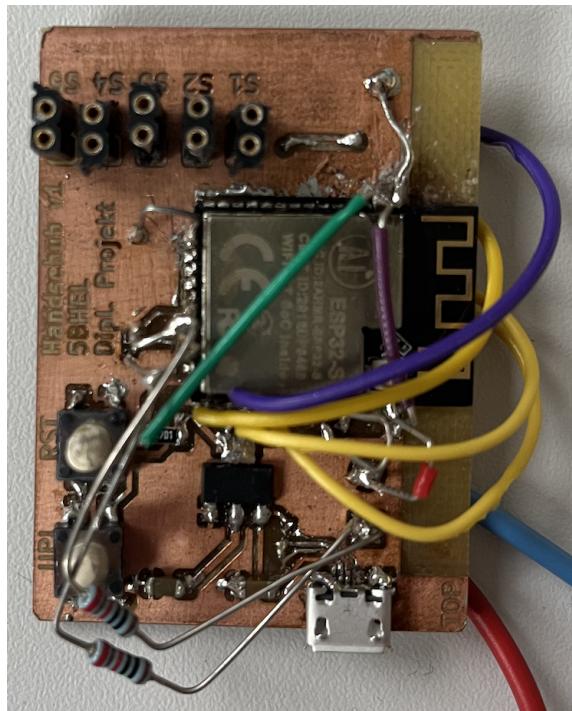


Abbildung 89: Platinenoberseite - erste Testplatine - Eingabesubsystem

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.

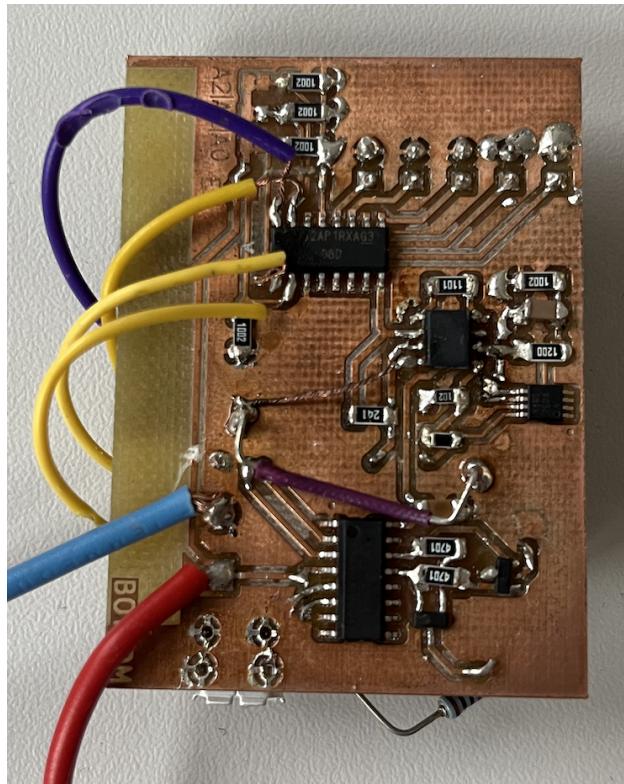


Abbildung 90: Platinenunterseite - erste Testplatine - Eingabesubsystem

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.

9.1.5.2 Zweite Version der Platine

Bei dem Design der zweiten Platinenversion, wurden schon einige Anforderungen für die Integration in das Gesamtsystem berücksichtigt. Zu nennen sind hier beispielsweise die Abmessungen, die Konnektivität und die visuelle Darstellung von Parametern für den Benutzer.

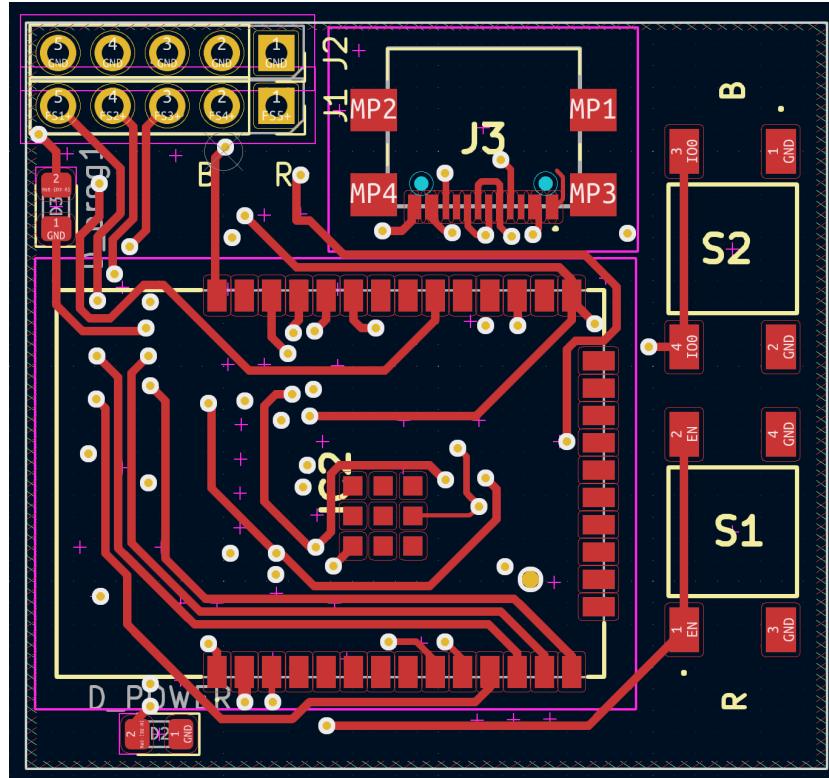


Abbildung 91: Toplayer des zweiten Platinenlayouts

In [Abbildung 91], ist der Toplayer des zweiten Platinenlayouts in KiCad [siehe Unterabschnitt 16.3] zu sehen. Der Großteil des Platzes wird vom Mikrokontroller, dem ESP32, eingenommen. An diesen sind alle anderen Komponenten angeschlossen. Wie in [Absatz 9.1.4.3] erläutert, sind zwei Buttons zur Steuerung des ESPs vorgesehen. Mit einem *R* ist der Reset-Button markiert mit einem *B* der Upload-Button.

In der linken oberen Ecke der [Abbildung 91], sind die Anschlüsse für die Flexsensoren zu sehen. Rechts daneben ist die USB-C-Buchse platziert. Außer den genannten Bauteilen, sind nur mehr die beiden Leuchtdioden, zur Visualisierung für den Benutzer, auf dem Toplayer angebracht.

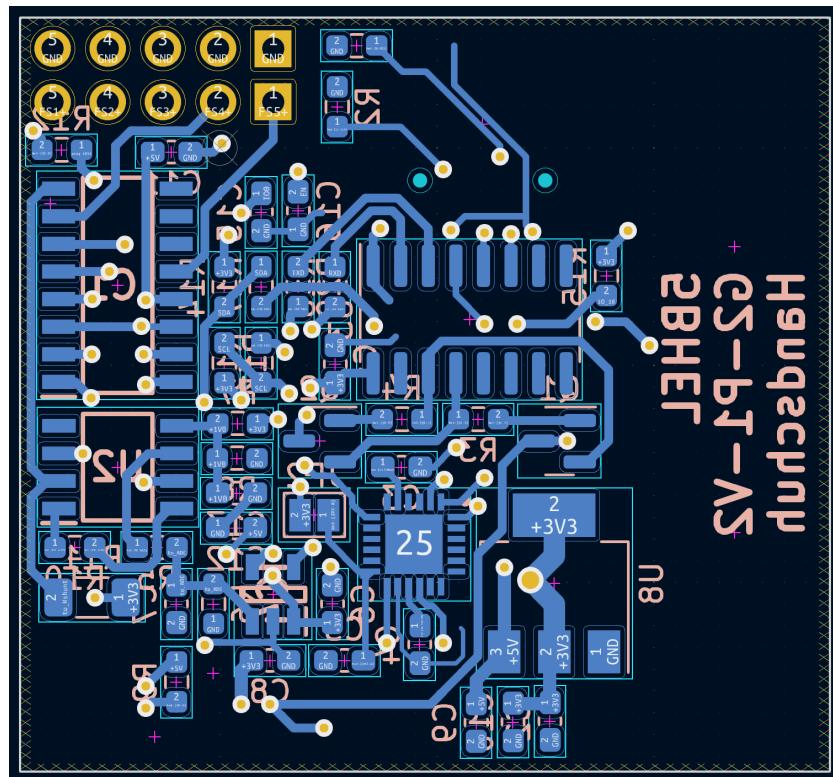


Abbildung 92: Bottomlayer des zweiten Platinenlayouts

In [Abbildung 92], ist der Bottomlayer der zweiten Platinenversion zu sehen. Hier sind alle Elemente der Messschaltung [siehe Absatz 9.1.2.2] verbaut. Dies beinhaltet den Multiplexer, Operationsverstärker, ADC, Gyroskopsensor, Spannungswandler und die Serial-UART Bridge. Alle Bauteile wurden möglichst Platzsparend platziert, damit die Dimensionen der Platine gering gehalten werden können. Die Abmessungen betragen ca. 3.5cm x 3.5cm.

Alle Leiterbahnen wurden so breit wie möglich gemacht, um mögliche Defekte ausschließen zu können. Dies gilt für die Fertigung, als auch für mechanische Abnützungen bei der Verwendung.

Der größte Fehler bei diesem Platinendesign ist, dass in der Zone des Funkmoduls vom Mikrocontroller, Leiterbahnen und Bauteile platziert wurden. Dies beeinträchtigt die Übertragung allerdings nur teilweise, indem diese nur mehr bis zu 10 Meter weit funktioniert. Dies ist allerdings zum Testen kein Problem und wird beim nächsten Platinenlayout behoben.

9.1 Eingabesubsystem



Abbildung 93: Topside des zweiten Platinenmodells

In [Abbildung 93], ist die bestückte Oberseite des zweiten Platinenmodells des Eingabesubsystems zu sehen.

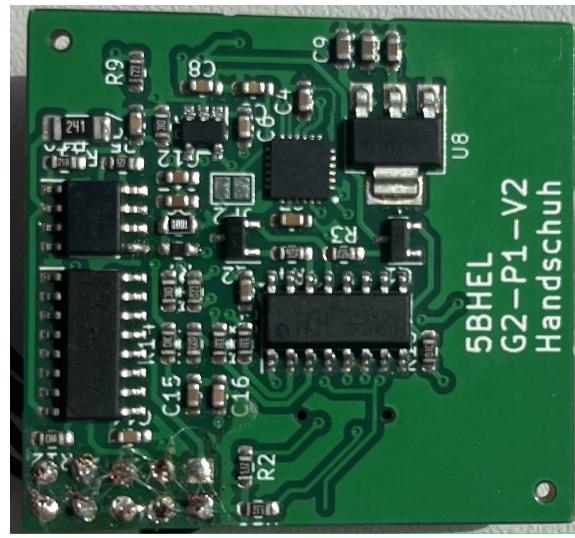


Abbildung 94: Bottomside des zweiten Platinenmodells

In [Abbildung 94], ist die bestückte Unterseite des zweiten Platinenmodells des Eingabesubsystems zu sehen. Diese wurde von JLCPCB bestückt.

9.2 Roboterhand

9.2.1 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.

9.2.2 Überlegungen, Simulationen und Berechnungen

9.2.2.1 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 anzusteuern 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.

9.2.2.2 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 [Unterunterabschnitt 10.2.2] 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. Genaue Designanforderungen, zum Layout der integrierten Antenne, werden in [Unterunterabschnitt 9.2.5] erklärt.

9.2.2.3 Ansteuerung der Motoren

Nachdem die Daten in Software verarbeitet wurden, müssen nun die Servomotoren angesteuert werden. Da diese über ein PWM-Signal [siehe [Unterabschnitt 6.7](#)] 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 Übertagungsprotokolls 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 fiel 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.

9.2.2.4 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.

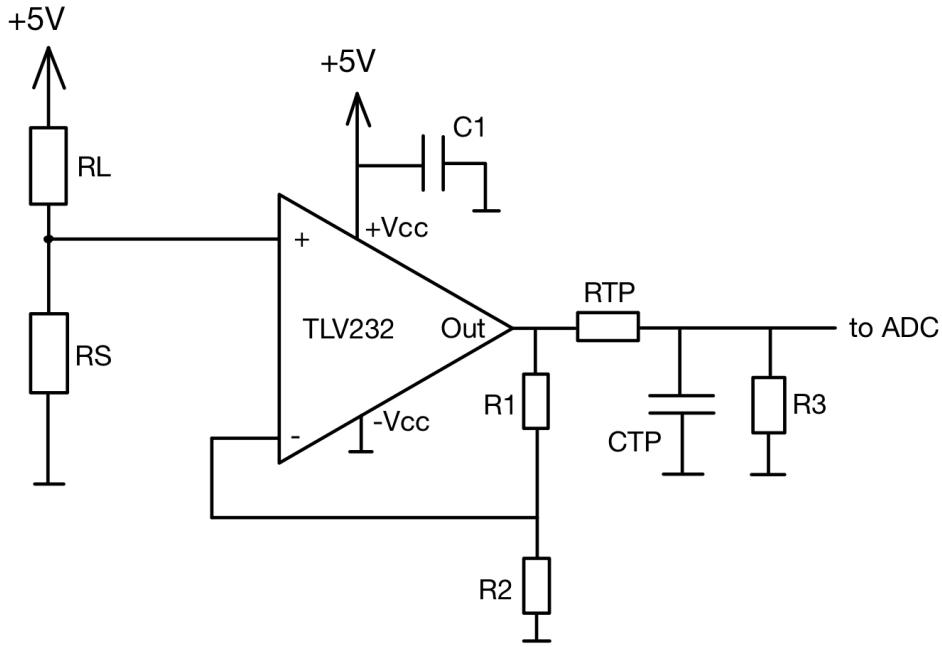


Abbildung 95: Schaltbild der Strommessschaltung

Diese Messung basiert auf dem gleichen Prinzip wie die der Flexsensorstellung in [Absatz 9.1.2.2]. 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 [siehe [Unterabschnitt 6.4](#)] 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 Versorgungspegel 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.

9.2.3 Versuchsaufbauten und Messungen

9.2.3.1 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.

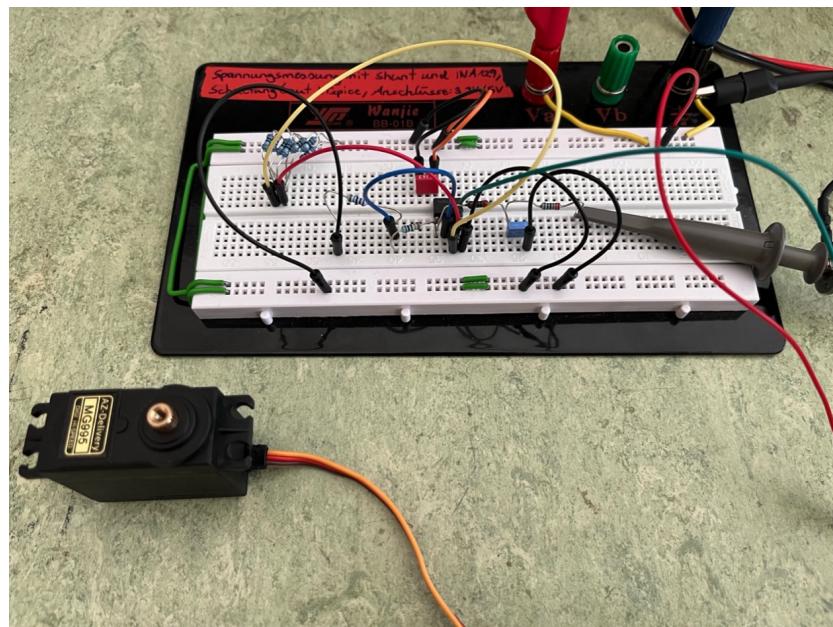


Abbildung 96: Steckbrettaufbau der Messschaltung zur Strommessung

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.

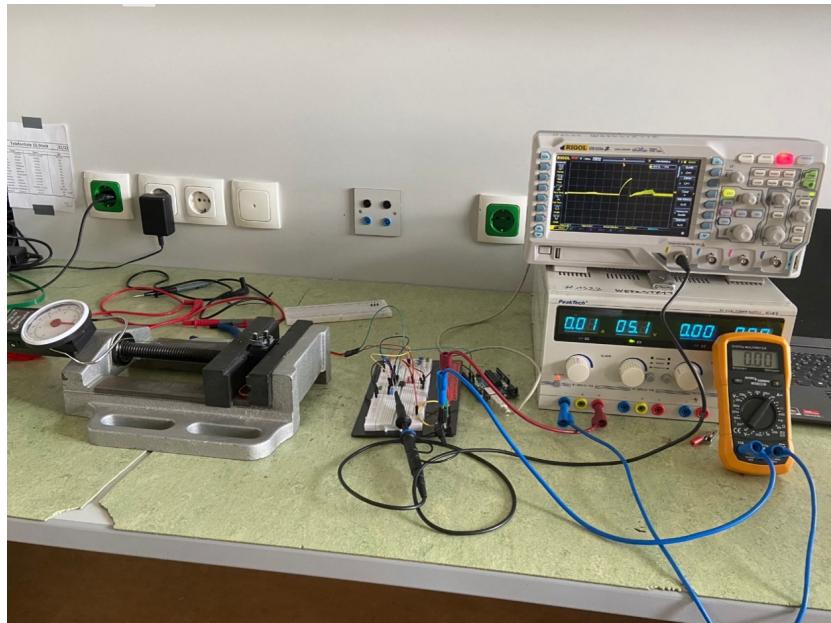


Abbildung 97: Testaufbau der Strommessung eines Servomotors

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

Abbildung 98: Messtabelle Strommessung

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.

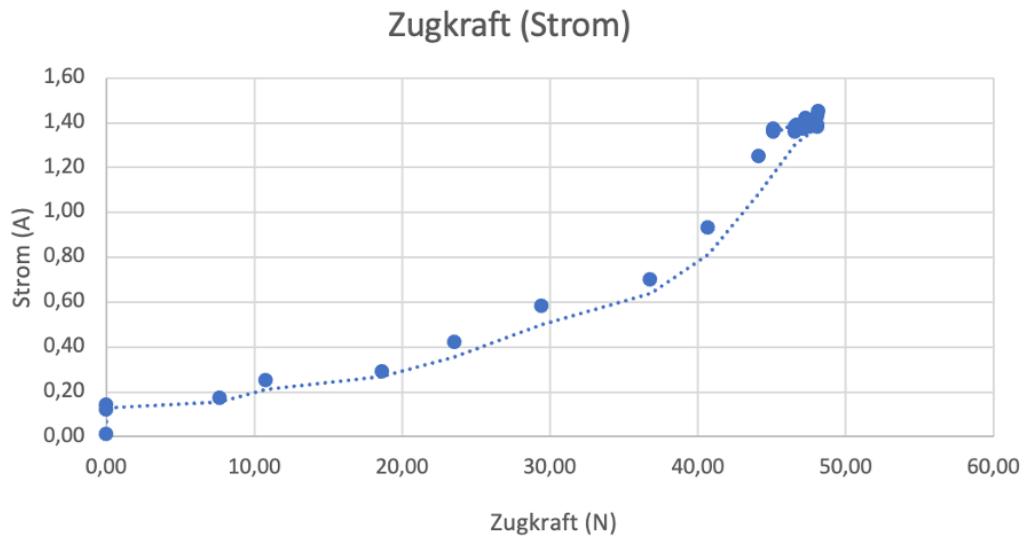


Abbildung 99: Diagramm der Strommessung in Abhängigkeit der Zugkraft

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 Ansatz, jedoch hat dies keinen wirklichen Einfluss auf die Funktion des Gesamtsystems, wenn der Kurvenverlauf in der Software berücksichtigt wird.

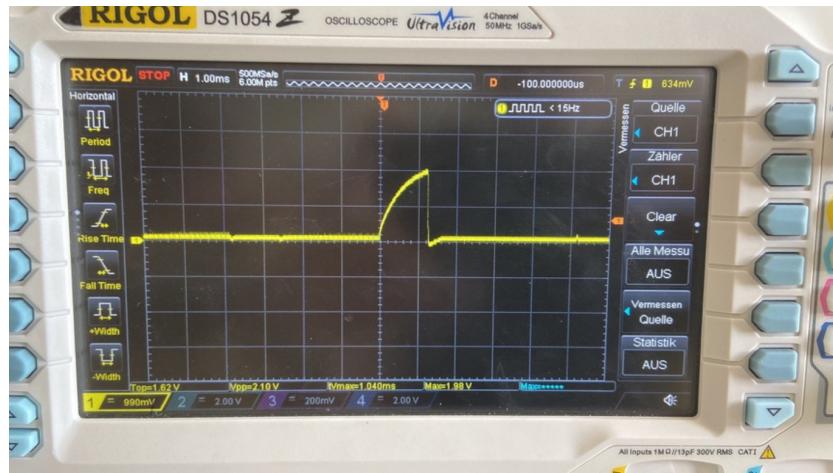


Abbildung 100: Oszilloskopbild - Stromanlaufverhalten eines Servomotors

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 Entgegnwirken einer mechanischen Last Strom benötigt.

9.2.4 Schaltungsdesign

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.

9.2.4.1 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.

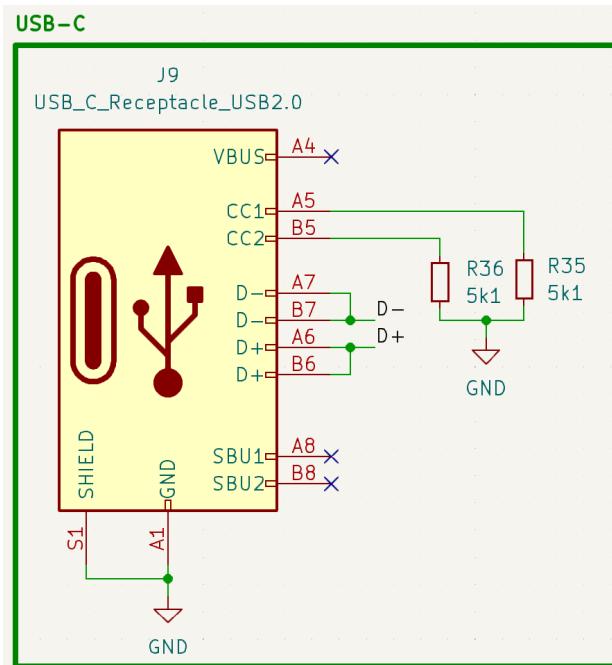


Abbildung 101: USB-C-Buchse

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.

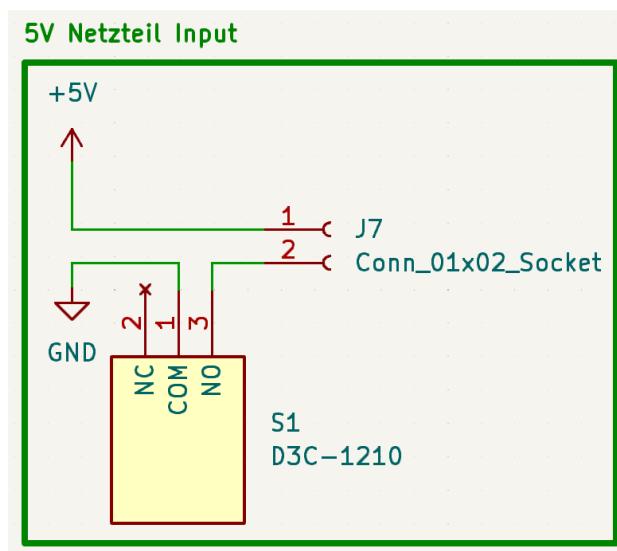


Abbildung 102: Netzteil Input Connector

9.2.4.2 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 ausgetauschten 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.

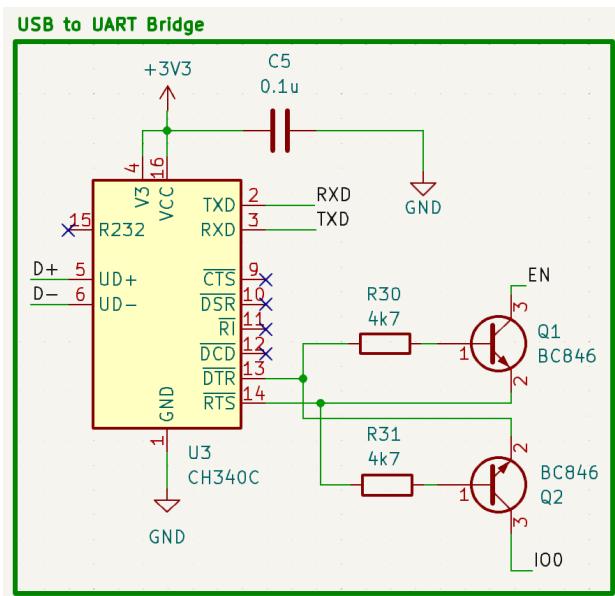


Abbildung 103: Serial-UART-Bridge

9.2.4.3 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 beigefügt. 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.

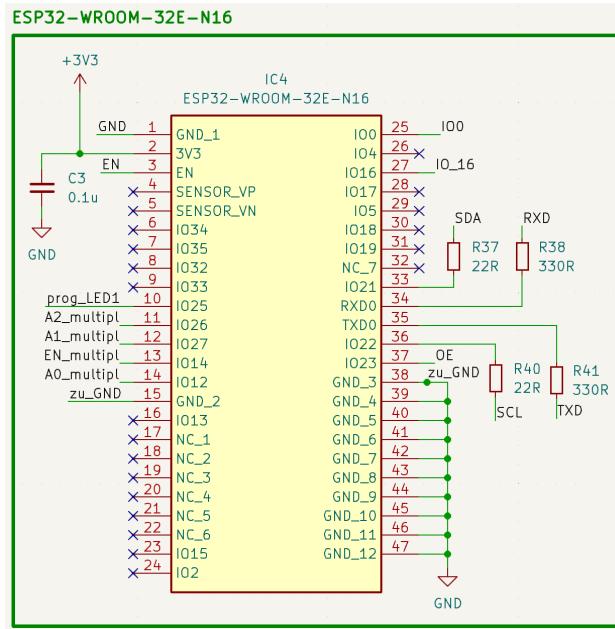


Abbildung 104: Mikrokontroller ESP32

9.2.4.4 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.

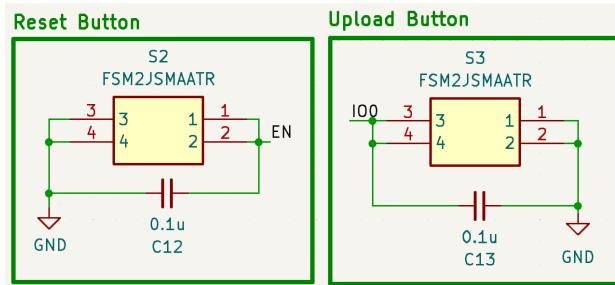


Abbildung 105: Mikrokontroller Buttons

9.2.4.5 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.

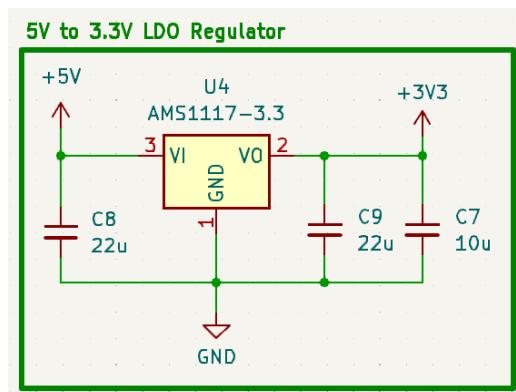


Abbildung 106: Spannungswandler 5V - 3.3V

9.2.4.6 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 [Absatz 9.2.2.3](#)], 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 Lötjumpern 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.

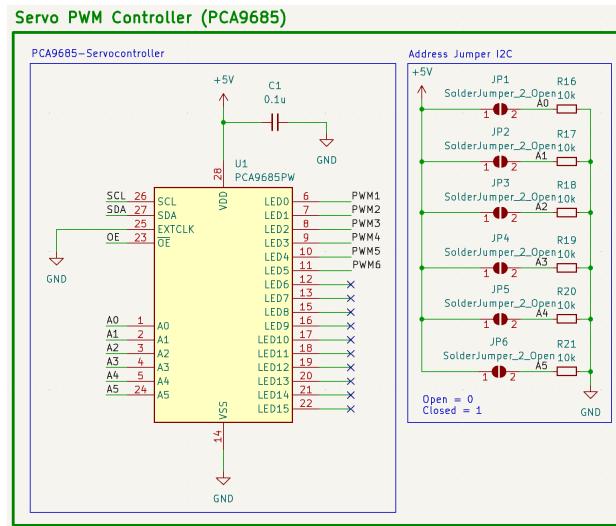


Abbildung 107: PWM Controller

9.2.4.7 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 Absatz 9.2.2.4] realisiert. Der Shuntwiderstandswert von $165\text{m}\Omega$ wird, aufgrund thermischer Verluste, durch zwei parallel geschaltete $330\text{m}\Omega$ Widerstände erzeugt, wodurch sich die Verlustleistung auf zwei Bauteile aufteilt. Die weitere Logik hinter dem $GND_{servo} – Anschluss$ wird im folgenden Punkt erklärt.

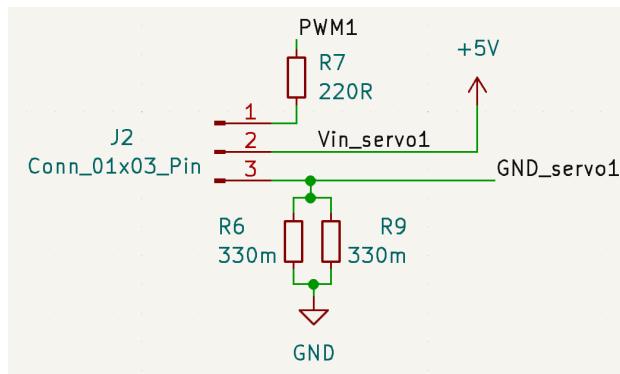


Abbildung 108: Servo Anschlüsse

9.2.4.8 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*.

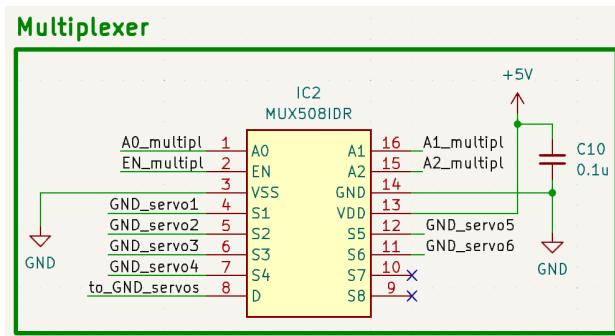


Abbildung 109: Multiplexer Schaltung

- Operationsversätker

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 [Absatz 9.2.2.4]

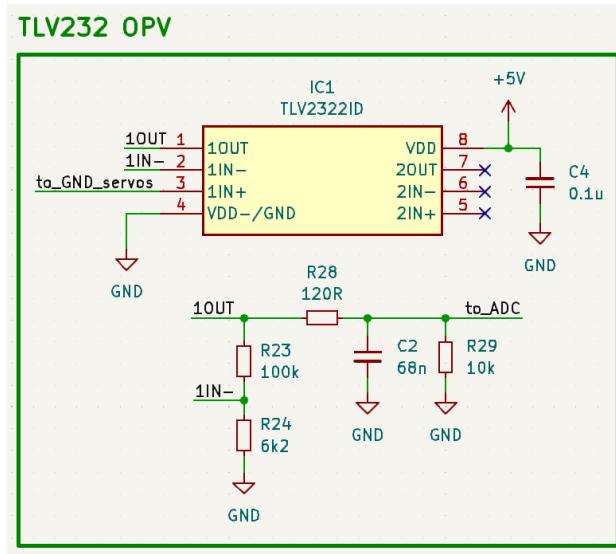


Abbildung 110: OPV Schaltung

- 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.

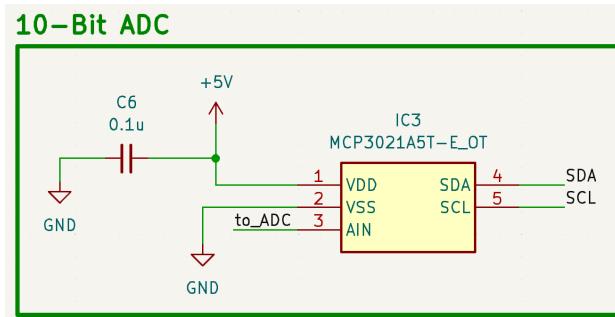


Abbildung 111: ADC Schaltung

9.2.4.9 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.

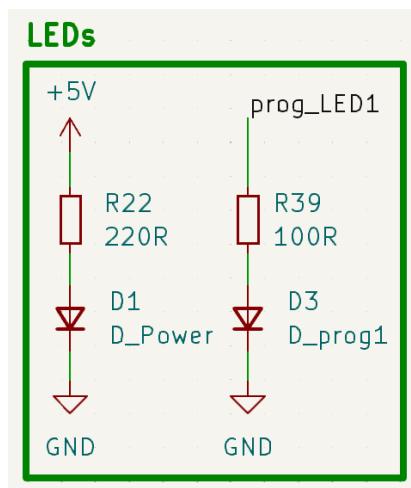


Abbildung 112: Status LEDs

9.2.5 Platinendesign

9.2.5.1 Erste Testplatine

Die erste Testplatine wurde in der schuleigenen Werkstatt, mithilfe einer Platinenfräse, 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 Footprint (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.

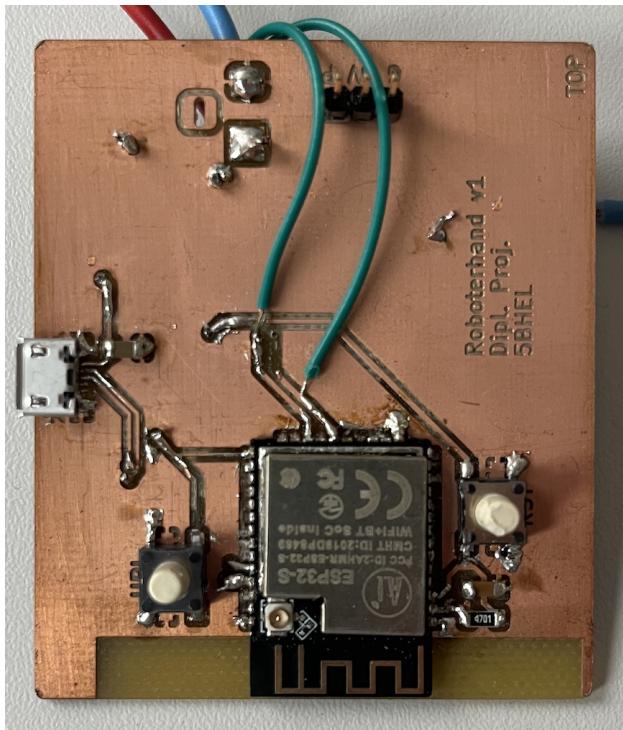


Abbildung 113: Oberseite erste Testplatine Ausgabesubsystem

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 Mikrocontrollers. Zu diesem Zeitpunkt der Entwicklung wurde noch eine Micro-USB-Buchse verwendet, da diese weitaus leichter zu löten ist als USB-C-Buchsen.

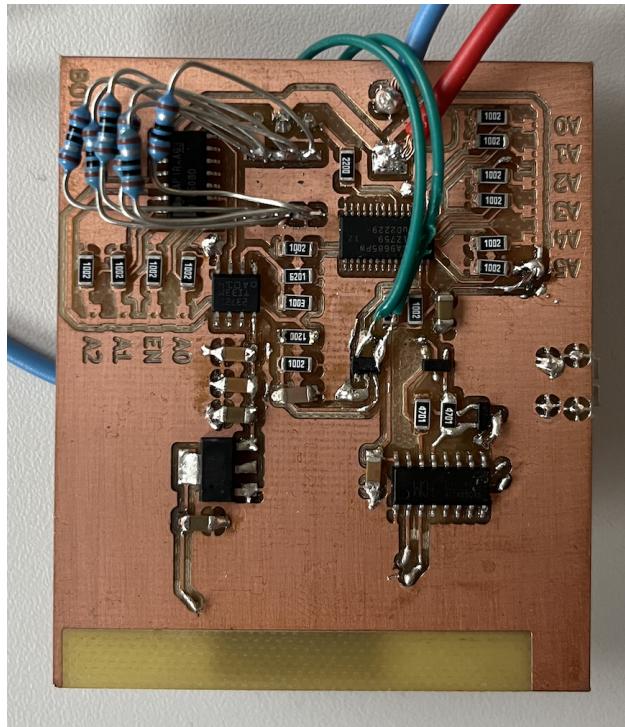


Abbildung 114: Unterseite erste Testplatine Ausgabesubsystem

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.

9.2.5.2 Zweite Version der Platine

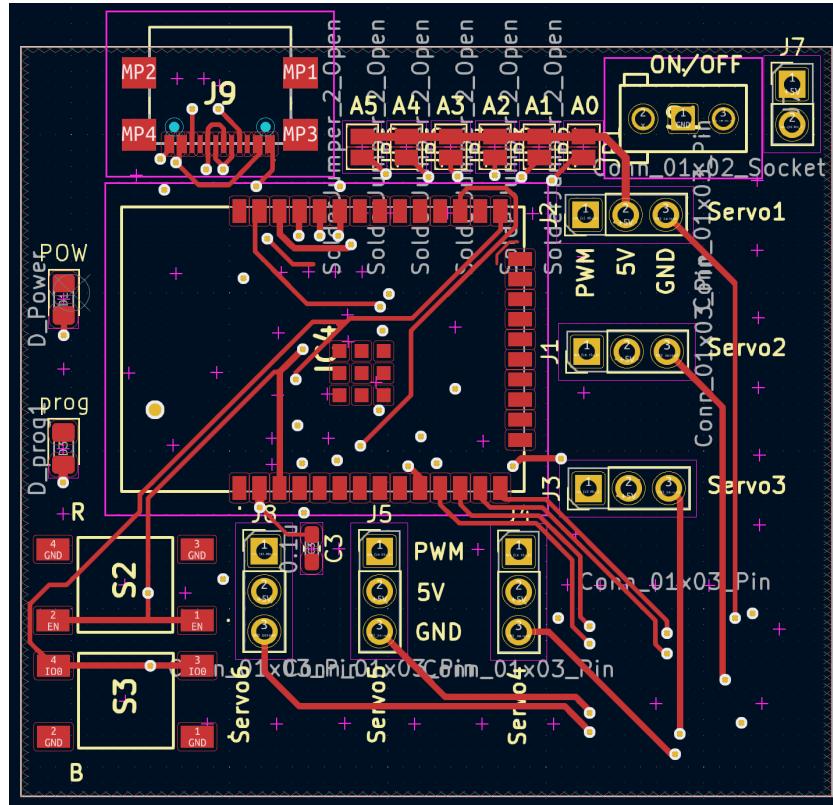


Abbildung 115: Toplayer zweites Platinendesign

In [Abbildung 115], ist der Toplayer des zweiten Platinenldesigns zu sehen. Auf der Oberseite des PCBs, sind alle Komponenten angebracht, die für Wartungszwecke zugänglich sein müssen. Dies umfasst alle Anschlüsse für die Servomotoren, die Adressjumper des PWM-Controllers, den Reset- und Upload-Button und die beiden Status-LEDs zur visuellen Überwachung der Schaltung. Bei diesem Layout wurde, im Gegensatz zur ersten Testplatine, auf die Größe geachtet. Diese sollte so klein wie möglich sein, muss aber trotzdem genügend Raum für die großen Shunt-Widerstände und dicken Leiterbahnen auf dem Bottom-Layer lassen.

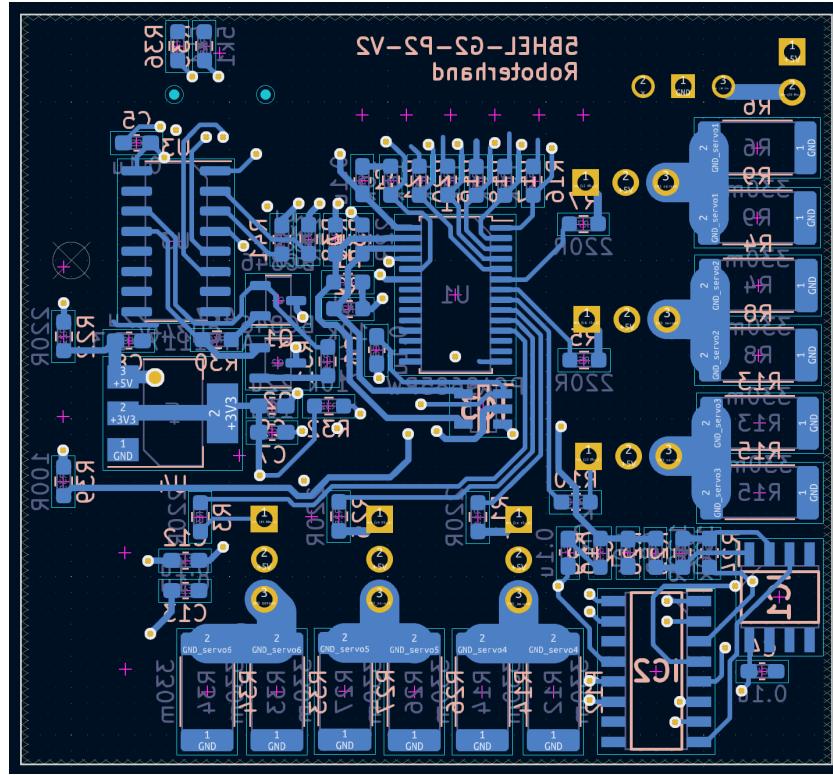


Abbildung 116: Bottomlayer zweites Platinendesign

Auf dem Bottom-Layer in [Abbildung 116], wurden alle Komponenten platziert, die zur Messung und Verarbeitung der Daten notwendig sind. Am unteren und rechten Rand der Platine, sind die Shunt-Widerstände zu sehen, die aufgrund der zu vertragenden Leistung einen größeren Footprint haben. Zusätzlich dazu, sind diese nochmals parallel geschaltet, wodurch die Verlustleistung auf zwei Widerstände aufgeteilt wird. Um lange Leiterbahnen, auf denen ein hoher Strom fließt, zu vermeiden, wurden die Shunts sehr nah an den 5V Anschlüssen der Servos positioniert.

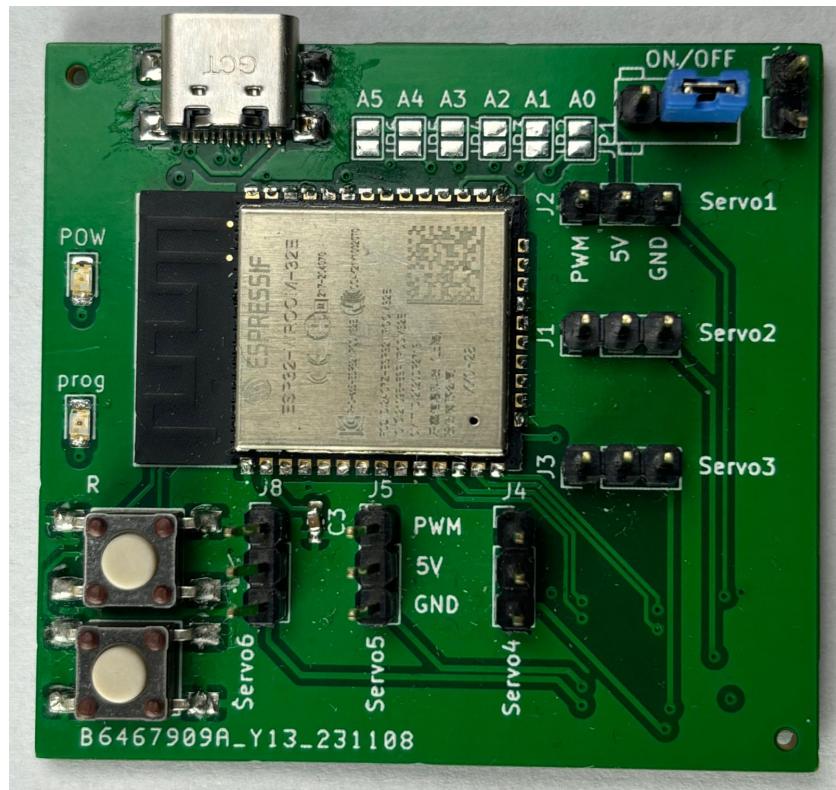


Abbildung 117: Oberseite zweites Platinenmodell

In [Abbildung 117], ist das 3D-Modell der Platine für das Ausgabebusystem zu sehen. In der rechten, oberen Ecke der Abbildung, sind die beiden Versorgungspins der Schaltung zu sehen. Diese sind bei der zweiten Platinenversion noch Pinheader, sollen später allerdings in Form eines Barrel-Jack realisiert werden. Links neben der Versorgungsanschlüssen, ist der Footprint für einen Ein-Ausschalter zu sehen, wie in [Absatz 9.1.4.1] zu sehen. Alle weiteren Schaltungsteile sind in [Unterunterabschnitt 9.2.4] näher erklärt.

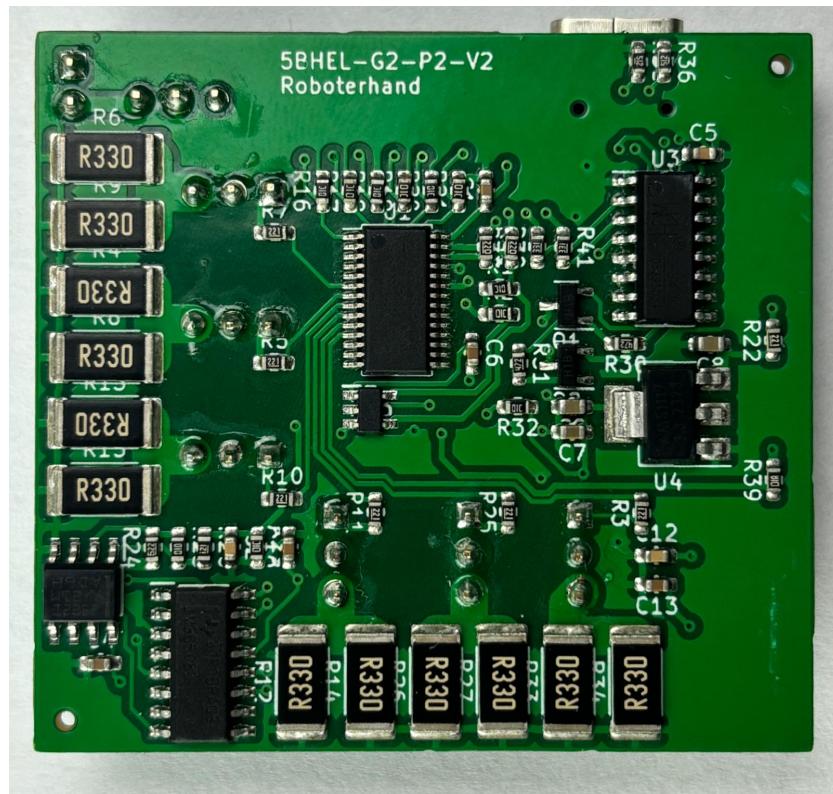


Abbildung 118: Unterseite zweites Platinenmodell

Zu sehen in [Abbildung 118], ist der Bottom-Layer als 3D-Modell. Es wurde auf eine möglichst effiziente Anordnung der Bauteile geachtet, damit die Platine so wenig Platz wie möglich in Anspruch nimmt.

10 Software Realisierung

10.1 Handschuh [Schweitzer]

10.1.1 Konzepte und Überlegungen

10.1.1.1 Datenübertragung

Es gibt viele Möglichkeiten die Werte, die man von jedem einzeln angebrachten Flexsensor [siehe [Unterabschnitt 6.1](#)] 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 [siehe [Unterabschnitt 6.2](#)] 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 [siehe [Unterabschnitt 6.10](#)] 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 [siehe [Unterabschnitt 6.5](#)] umgerechnet werden, nun versendet werden. Deshalb haben wir nach einer neuen Möglichkeit gesucht, die einfacher zu realisieren ist. Schlussendlich wurde es dann ESP-NOW [siehe [Unterabschnitt 6.3](#)], 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 [siehe [Absatz 6.3.1.9](#)], 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 Verbindungsaufbau. 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.

10.1.1.2 Programmiersprache/Entwicklungsumgebung

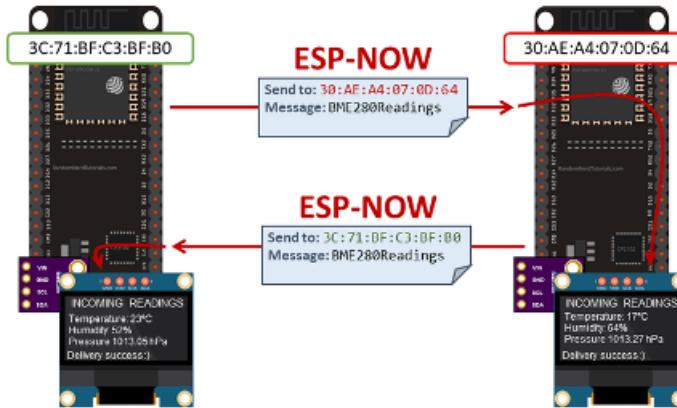
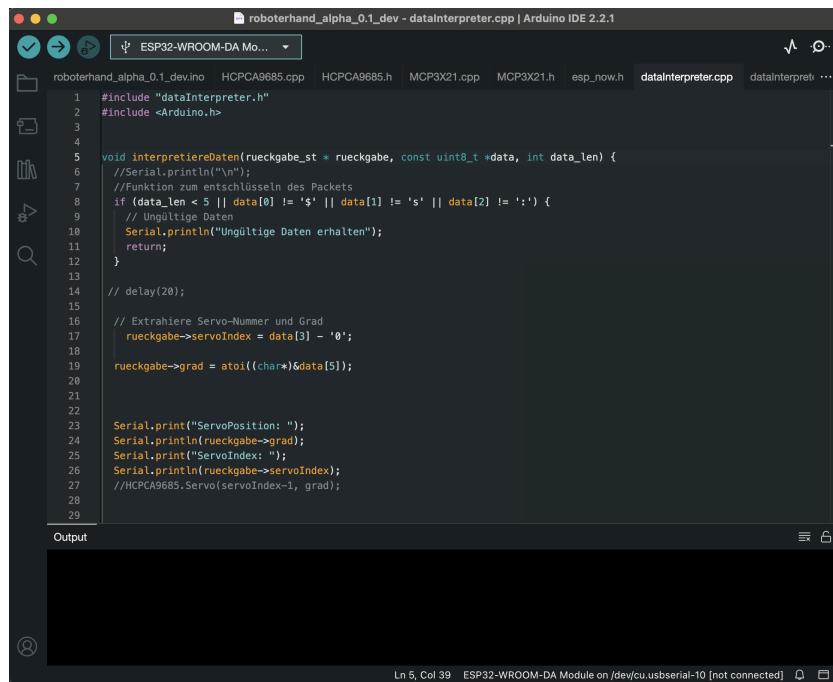


Abbildung 119: ESP NOW Datenübertragung ([Quelle: Wan-Ting 25.03.2024](#))

Die Arduino IDE (1. & 2. Version) [siehe [Unterabschnitt 16.4](#)] 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.

10.1 Handschuh [Schweitzer]



```
#include "dataInterpreter.h"
#include <Arduino.h>

void interpretiereDaten(rueckgabe_st * ruckgabe, const uint8_t *data, int data_len) {
    //Serial.println("n");
    //Funktion zum entschlüsseln des Packets
    if (data_len < 5 || data[0] != '$' || data[1] != 's' || data[2] != ':') {
        // Ungültige Daten
        Serial.println("Ungültige Daten erhalten");
        return;
    }
    // delay(20);
    // Extrahiere Servo-Nummer und Grad
    ruckgabe->servoIndex = data[3] - '0';
    ruckgabe->grad = atoi((char*)&data[5]);
    Serial.print("ServoPosition: ");
    Serial.println(ruckgabe->grad);
    Serial.print("ServoIndex: ");
    Serial.println(ruckgabe->servoIndex);
    //HCPCA9685.Servo(servoidx-1, grad);
}
```

Abbildung 120: Beispiel Arduino IDE 2

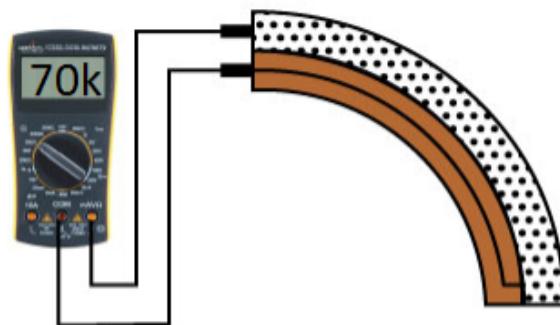
10.1.1.3 Einfache Bdienbarkeit

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 [siehe [Unterabschnitt 6.9](#)], 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.

10.1.1.4 Testen

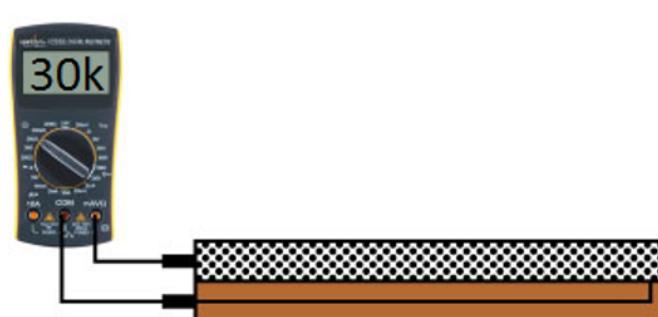
Jedes Programm muss ausführlich getestet werden. Die Tests bei der Senderplatine (Handschuh) beschäftigen sich vor allem mit dem Auslesen der Widerstandswerte der Flexsensoren. Es soll überprüft werden, ob sich die Werte in dem von dem Benutzer freiwillig ausgesuchten Bereich der map Funktion liegen. 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 [siehe Unterabschnitt 6.6] 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.



Conductive particles further apart - $70\text{k}\Omega$.

Abbildung 121: Beispiel maximaler Widerstand (Quelle: Roland 25.03.2024)



Conductive particles close together - $30\text{k}\Omega$.

Abbildung 122: Beispiel minimaler Widerstand (Quelle: Roland 25.03.2024)

10.1.1.5 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.

10.1.1.6 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 fix konfiguriert werden. Der minimale und maximale Wert jedes einzelnen Flexsensors muss unbedingt festgelegt werden. Diese sind dann in der Software hardcoded. 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.



Abbildung 123: Flexsensor minimaler Wert

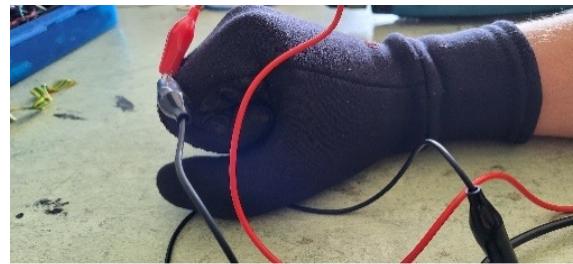


Abbildung 124: Flexsensor maximaler Wert

In [Abbildung 123] kann man sehen, dass der Flexsensor nicht gebogen wurde. Wenn allerdings auch eine leichte Biegung vorhanden wäre, würde noch der minimale Wert angenommen werden, um immer die niedrigste Grenze erreichen zu können. Das Gegenteilige gilt für [Abbildung 124], wo immer der maximale Wert bei beinahe vollständigem Abbiegen des Fingers angenommen wird.

10.1.1.7 Toleranz bei Werten

Da alle Widerstandswerte der Flexsensoren auf die Stelle genau und beinahe ohne Pause ausgelesen werden, wird jede kleinste Veränderung wahrgenommen. Die Finger der Roboterhand fangen zum Zittern an. Die gesamte Mechanik wird instabil, da durch diese kleinsten Änderungen diese nur noch am Zittern ist. Das könnte zu Schäden führen. Um dies zu vermeiden, wird ein Toleranzbereich festgelegt, in unserem Fall +10. Das bedeutet, dass Änderungen des digitalen Wertes erst ab +10, im Vergleich zum zuletzt gesendeten Wert, wahrgenommen und an die Empfängerseite drahtlos übertragen werden. Dies führt zu deutlich ruhigeren und realistischeren Bewegungen der Finger auf der Empfängerseite.

10.1.1.8 Verworfene Ideen

Vollständige Datenkorrektur auf Senderseite (arithmetischer Mittelwert)

Ursprünglich wurde mit dem Gedanken gespielt, dass die eingelesenen Werte bereits auf der Senderseite mit allen Korrekturalgorithmen korrigiert werden. Allerdings haben wir uns dann überlegt, dass es aus energietechnischer Sicht sinnvoller ist, wenn man alle, bis auf das Setzen des minimalen und maximalen Widerstandes, auf der Empfängerseite anwendet. 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.

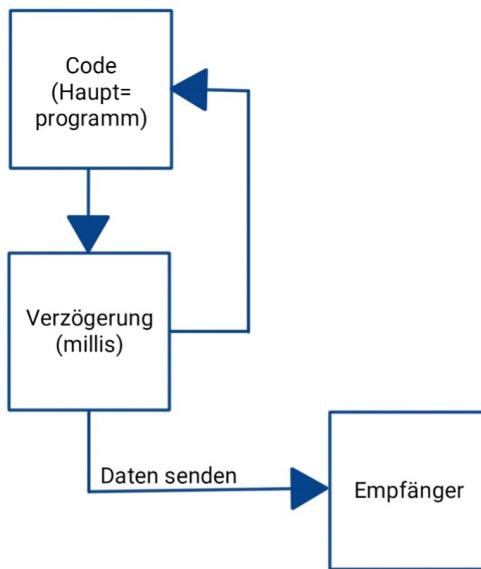


Abbildung 125: Beispielhafte Verzögerung vor dem Senden

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.

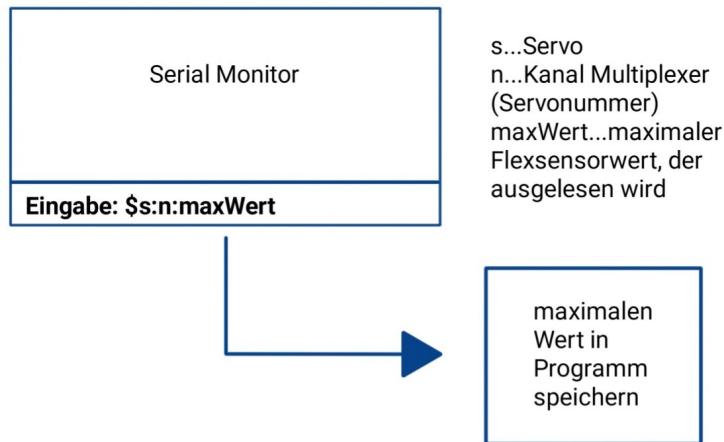


Abbildung 126: Beispiel: maximalen Wert über Serial Monitor festlegen (Werte manuell eintragen)

10.1.2 Realisierung und Gliederung

10.1.2.1 Realisierung

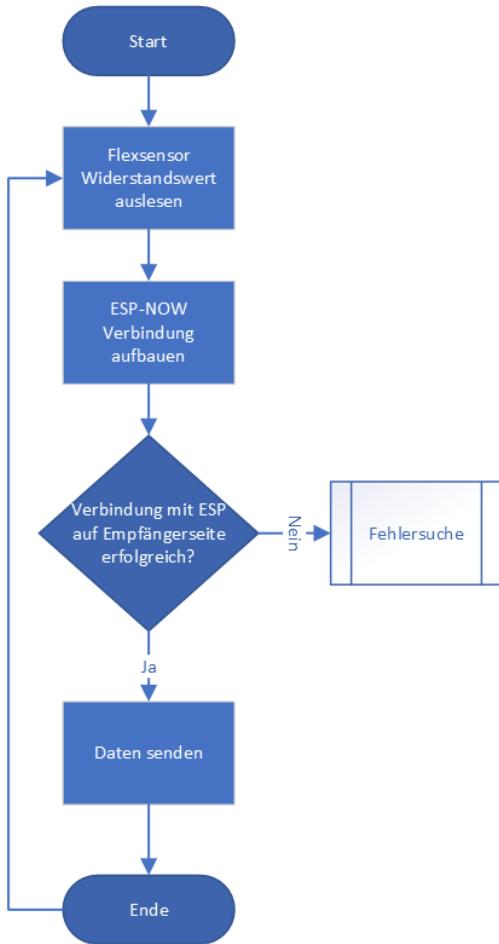


Abbildung 127: Flussdiagramm Software Eingabesubsystem

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 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.

10.1.2.2 Gliederung

```
//I2C & ADC
#include <Wire.h>
#include "MCP3X21.h"
//ESP - Now
#include <esp_now.h>
#include <WiFi.h>
```

Am Anfang des Senderprogramms werden die zu inkludierenden Bibliotheken eingebunden. Diese beinhalten die I2C Kommunikation [siehe [Unterabschnitt 6.8](#)] für den ADC, die Möglichkeit ESP-NOW zu verwenden, indem auch zusätzlich die Wifi Bibliothek inkludiert wird.

```
// ADC - Parameter
const uint8_t address = 0x48;
const uint16_t ref_voltage = 3300; // Handschuh
MCP3021 mcp3021(address);

//Multiplexer Pins
int EN = 27;
int A_0 = 26;
int A1 = 12;
int A2 = 14;
```

Danach werden die ADC-Parameter festgelegt, sowie die Ports zur Ansteuerung des Multiplexers. Minimale und maximale Widerstandswerte [siehe [Minimale und maximale Grenze in Absatz 10.1.2.3](#)] werden festgelegt, damit es bei einer kleinen Toleranz im ganz unteren und oberen Bereich trotzdem immer den minimalen oder maximalen Wert erreicht.

```
uint8_t broadcastAddress [] = { 0x70, 0xB8, 0xF6, 0xC4, 0xEB, 0x2D };
// Empfaenger-Adresse

void OnDataSent(const uint8_t *mac_addr, esp_now_send_status_t status) {
    Serial.print("\rEmpfangsstatus - : - Roboterhand:\t");
    Serial.println(status == ESP_NOW_SEND_SUCCESS ?
                  "empfangen\n" : "nicht-empfangen\n");
}
```

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.

```
// ADC-Setup
Wire.begin(SDA, SCL);
mcp3021.init(&Wire);
pinMode(EN, OUTPUT);
pinMode(A_0, OUTPUT);
pinMode(A1, OUTPUT);
pinMode(A2, OUTPUT);
```

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.

```
void loop () {
    for (int i = 1; i <= 5; i++) {
        selectMuxChannel( i );

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

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)) [siehe [Daten in speziellem Format \(als String\) senden in Absatz 10.1.2.3](#)]. Es wird dann noch im Serial Monitor ausgegeben, ob die Senderplatine (Handschuh) die Daten erfolgreich senden konnte oder nicht.

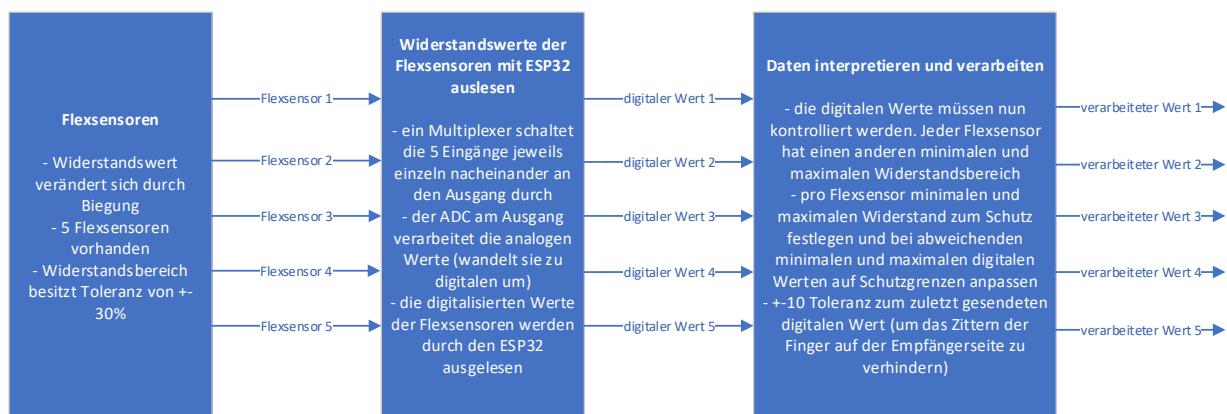


Abbildung 128: Softwaremap Eingabesubsystem



Abbildung 129: Softwaremap Eingabesubsystem

10.1.2.3 Wichtige Codezeilen

Minimale und maximale Grenze

```

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.

Datenkorrektur mit minimaler und maximaler Grenze

```

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.

Toleranz zur Verminderung von Schwankungen bei gemessenen Werten

```

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.

Multiplexer durchschalten

```

pinMode(EN, OUTPUT);
pinMode(A0, OUTPUT);
pinMode(A1, OUTPUT);
pinMode(A2, OUTPUT);

for (int i = 1; i <= 5; i++) {
    selectMuxChannel(i);
}

void selectMuxChannel(int channel) {
    if (channel == 1) {
        digitalWrite(EN, HIGH);
        digitalWrite(A0, LOW);
        digitalWrite(A1, LOW);
        digitalWrite(A2, LOW);
    } else if (channel == 2) {

    }
}

```

Multiplexer MUX508

Table 1. MUX508 Truth Table

EN	A2	A1	A0	STATE
0	X ⁽¹⁾	X ⁽¹⁾	X ⁽¹⁾	All channels are off
1	0	0	0	Channel 1 on
1	0	0	1	Channel 2 on
1	0	1	0	Channel 3 on
1	0	1	1	Channel 4 on
1	1	0	0	Channel 5 on
1	1	0	1	Channel 6 on
1	1	1	0	Channel 7 on
1	1	1	1	Channel 8 on

EN → GPIO 27
A0 → GPIO 26
A1 → GPIO 12
A2 → GPIO 14

Flexsensor 1 → Channel 1 (1 0 0 0)
 Flexsensor 2 → Channel 2 (1 0 0 1)
 Flexsensor 3 → Channel 3 (1 0 1 0)
 Flexsensor 4 → Channel 4 (1 0 1 1)
 Flexsensor 5 → Channel 5 (1 1 0 0)

Channel 6, 7 & 8 nicht verwendet!!

Abbildung 130: Multiplexer Kanäle ([Quelle: Instruments 10.03.2024](#))

In obenstehendem Codeabschnitt wird der Multiplexer richtig eingestellt. Je nach Channelnummer wird dann festgelegt, welcher Eingang zum ADC weitergeschalten werden soll. Dabei muss die in [Abbildung 130](#) stehende Wahrheitstabelle berücksichtigt werden. Durch einige if-Bedingungen kann somit immer sichergestellt werden, dass man zu jeder Zeit den richtigen, gewünschten Wert auslesen kann.

Daten in speziellem Format (als String) senden

```
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);
```

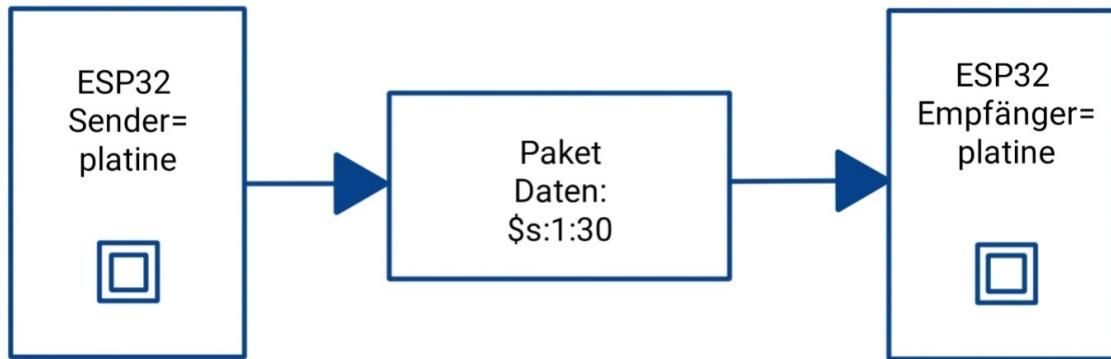


Abbildung 131: Beispiel: Paket nach bestimmtem Muster senden

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. Der 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“ per drahtloser Übertragung über ESP-NOW von der Sender- zu der Empfängerplatine gesendet.

10.2 Roboterhand [Al-Maytah]

10.2.1 Grundlegende Voraussetzungen

Die Software des Ausgabesbusystems fungiert als Herzstück der mechanischen Roboterhand und legt damit eine Brücke zwischen den auf dem Handschuh erfassten humanoiden Bewegungen und der Hand des Roboters. Empfangene Daten, sei es auf drahtlosem oder direktem Wege, müssen interpretiert, analysiert und bei Gegebenheit auch korrigiert werden. Die Software soll in der Lage sein, Fehler frühzeitig zu erkennen und entsprechend auf diese zu reagieren. Ein Zittern oder ungewünschte Bewegungen der Finger sollen durch diese Algorithmen verhindert werden. Da es zwei Steuerungsmöglichkeiten gibt, per Handschuh oder Userinterface, muss automatisch zwischen den gewollten Modis unterschieden werden. Eine intelligente Strommessung der Aktuatoren erweitert dieses System und liefert dem Userinterface relevante Daten.

10.2.2 Realisierung: Überblick

Die Vielfalt der Software fordert Struktur und eine systematische Gliederung. Empfangene Daten durchlaufen mehrere Strecken, an denen diese dann verarbeitet werden, um letztlich die gewünschte Bewegung des Fingers umzusetzen.

10.2.2.1 Programmfluss

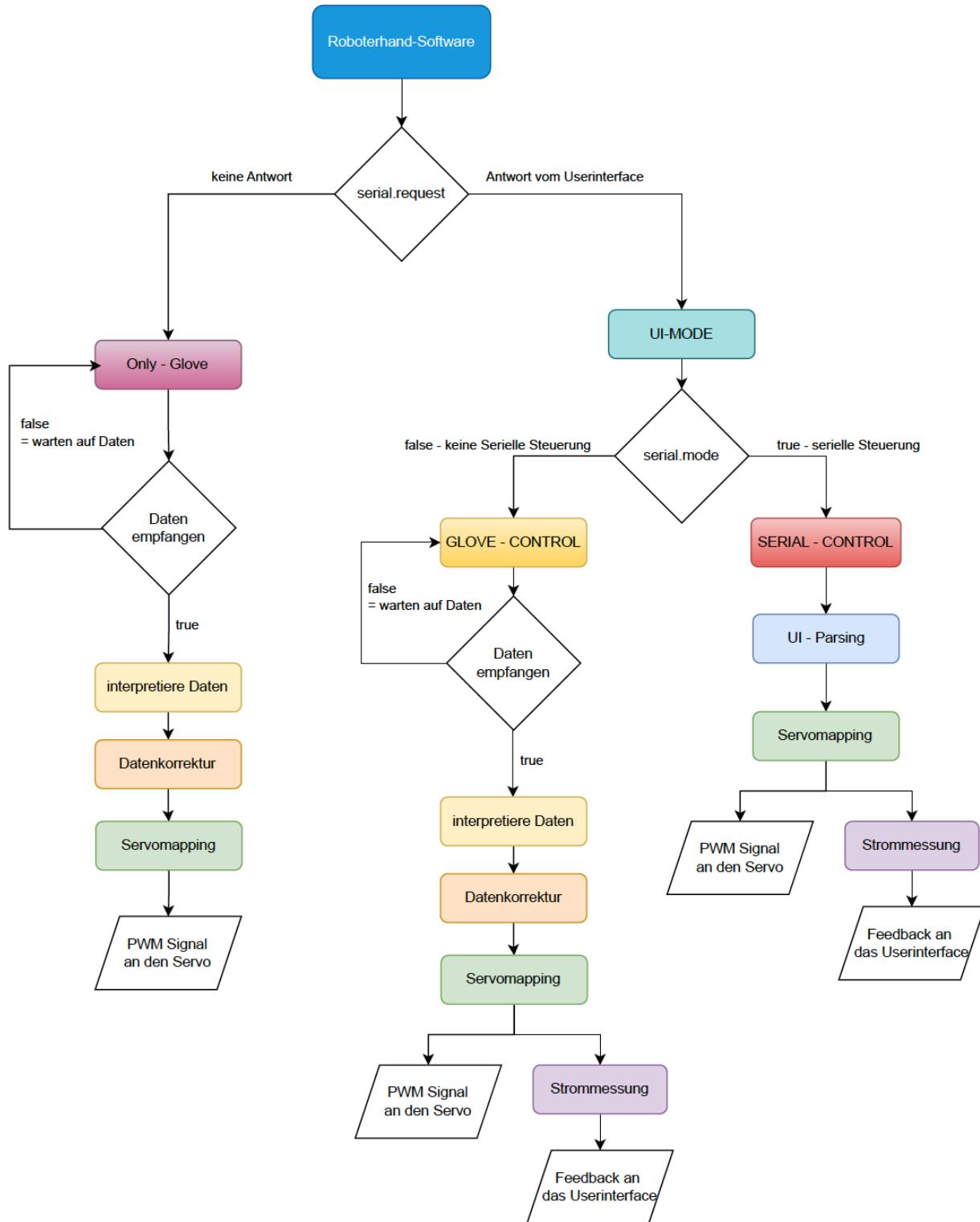


Abbildung 132: Flussdiagramm der Software des Ausgabesubsystems

Das Diagramm in [Abbildung 132] veranschaulicht den Fluss empfangener Daten, diese durchlaufen bedingungsabhängig verschiedene Routen und werden auf diesen verarbeitet und interpretiert. Zu Beginn der Software muss geklärt werden, ob ein seriell verbundenes Userinterface erkannt wurde oder nicht. Ermöglicht wird dies durch eine Anfrage, welche von der Roboterhand über die serielle Schnittstelle an das Userinterface gesendet wird. Dies erfolgt durch den String „\$req.UI“, welcher vom Userinterface als Anweisung zum Antworten interpretiert wird. Antwortet das Userinterface wie erwartet, versetzt sich die Roboterhand in den Userinterface-Modus, in der Grafik als „UI-MODE“ gekennzeichnet. Erfolgt keine Antwort, konfiguriert sich die Hand ausschließlich darauf, auf Daten welche über das drahtlose ESP-NOW Protokoll empfangen werden, zu reagieren. Der Modus, in dem die Hand ist, wird als „ONLY – GLOVE“ in dieser Grafik bezeichnet.

Ist die Hand im Userinterface-Modus, ist dennoch eine Kommunikation und Steuerung über die drahtlos verbundene Roboterhand möglich. Die Software unterscheidet somit, ob ausschließlich die Hand oder beides, das Unterinterface und die Hand, genutzt wird. Wird beides genutzt, gibt es jedoch auch ein Feedback an das Userinterface, beispielsweise Messdaten des Stromflusses.

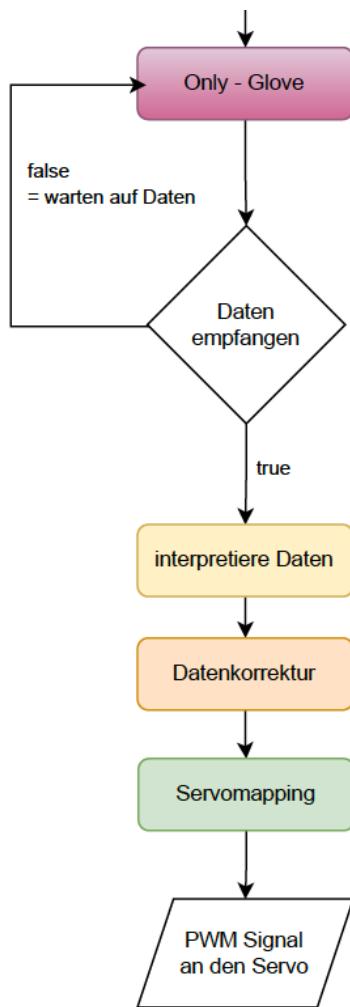


Abbildung 133: Route des Only-Glove-Modus im Ausgabesubsystem

ONLY-GLOVE Modus

Dieser Modus ist im Vergleich zum zweiten einfacher und besteht nur aus einer „Datenroute“. Die über das ESP-NOW Protokoll empfangenen Daten, welche die erfassten Fingerpositionen mitteilen, werden auf dieser Route interpretiert und verarbeitet.

Wurden Daten empfangen, wird die Zustandsvariable (data_received) auf den Wert (true) gesetzt und alle erfassten Daten werden in einem String gespeichert. Dieser String wird daraufhin an die Komponente „interpretiere Daten“ vom [Absatz 10.2.4.1] weitergegeben, dort werden diese interpretiert. Die extrahierte Fingerposition sowie der Index werden an die Komponente „Datenkorrektur“ übergeben, dort wird anhand eines Algorithmus die Sinnhaftigkeit der Daten überprüft. Eine genauere Erläuterung dieses Algorithmus ist in [Absatz 10.2.4.3] zu finden.

Wurden die Daten überprüft und je nach Situation auch korrigiert, wird dies an den Block „Servomapping“ übergeben, beschrieben in [Absatz 10.2.4.4], dort wird der Positionswert des Fingers noch auf den Motor und seine Zugcharakteristik gemappt. Letztlich wird dann die Position an den Motor übergeben.

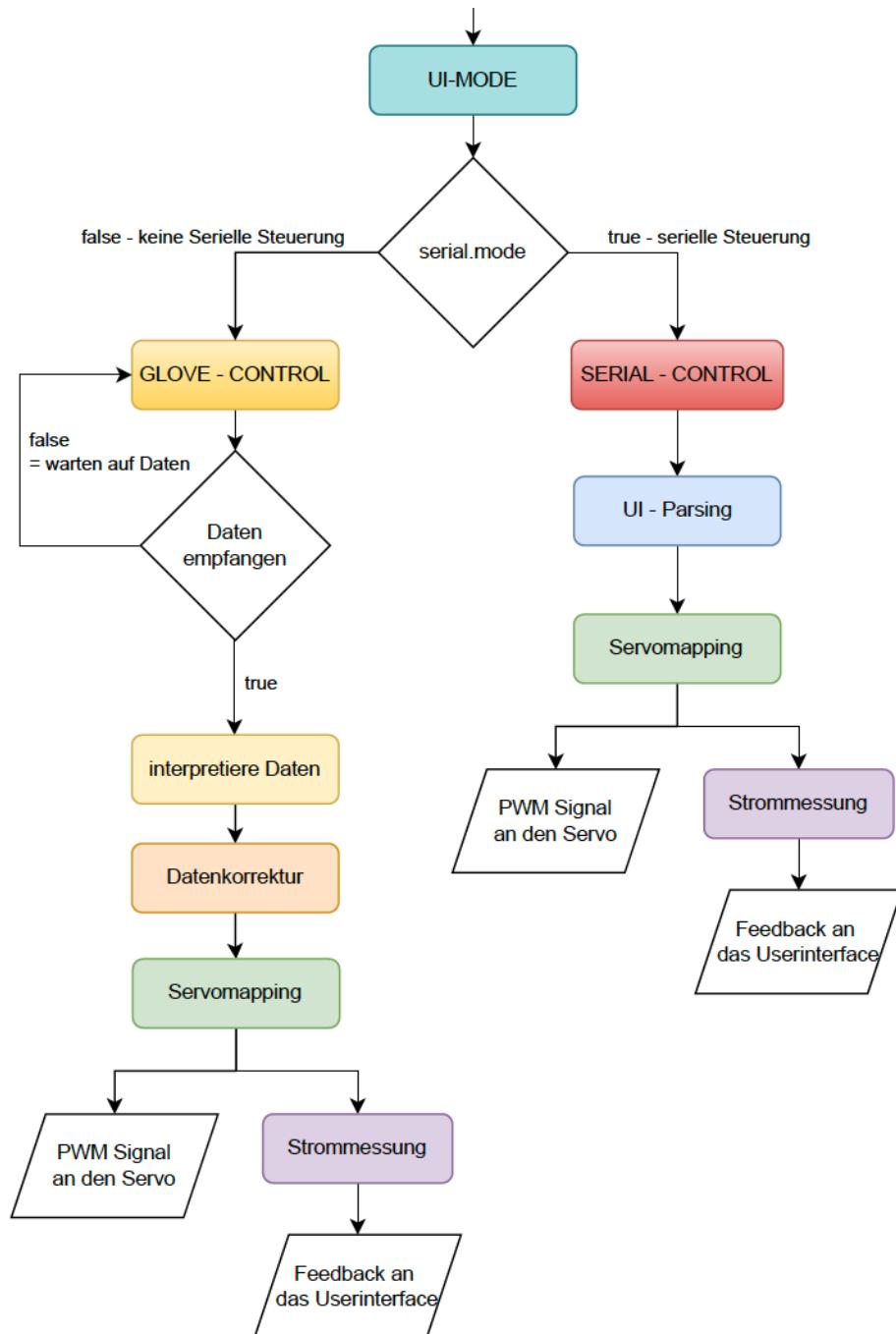


Abbildung 134: Route des UI-Mode im Ausgabesubsystem

User Interface Modus

Dieser Modus ermöglicht es, die Hand über jeweils das Userinterface und auch den Handschuh zu steuern, jedoch getrennt voneinander. Oft wird dieser Modus missverstanden, da interpretiert wird, dass er ausschließlich eine Steuerungsmöglichkeit über das Userinterface bietet. Welche Steuerungsmöglichkeit gewählt wird, kann über das Interface per „Switch-Button“ eingestellt werden. Das Userinterface sendet bei der nächsten Anfrage von der Roboterhand-Software die Information mit auf welchen Modus der Schalter gestellt wurde.

Erhält das Userinterface eine Anfrage, antwortet dieses entsprechend mit - \$answ.here und fügt daraufhin, je nachdem welcher Modus im Userinterface gewählt wurde, ein .han für die Steuerung per Handschuh oder ein .ser für eine Steuerung per Interface an diesen String an. Die Antwort vom Userinterface darf ausschließlich „\$answ.here.ser“ oder „\$answ.here.han“ sein. In [[Unterunterabschnitt 10.3.4](#)] sind zusätzliche Beschreibungen und Veranschaulichungen des Interfaces zu finden.

Wird nun über das Userinterface die Anweisung mitübergeben, dass die Steuerung ausschließlich per Handschuh erfolgt, werden alle empfangenen Befehle vom diesem ignoriert, außer die Anweisung die Steuerungsoption zu wechseln. Der Ablauf in dieser Option gleicht dem des im Only-Glove Modus. Die drahtlos empfangenen Daten werden interpretiert, daraufhin geprüft und eventuell korrigiert und letztlich gemappt bis sie dann an den Motor übergeben werden. Zusätzlich wird, direkt nachdem die Anweisungen an den Motor übergeben wurden, eine Strommessung gestartet – dessen Messergebnisse in der Form einer Rückmeldung an das Userinterface über die serielle Schnittstelle gesendet werden.

Entscheidet sich der Nutzer nun doch die Roboterhand mit den vom Userinterface gebotenen Bedienungsmöglichkeiten zu steuern, wird ebenso bei der nächsten erhaltenen Anfrage diese Änderung übergeben. Wird diese Änderung erkannt, reagiert die Software auf alle vom Interface übergebenen Positionsanweisungen. Die Anweisungen landen in erster Hand in der Komponente „UI-Interpreter“, dort werden diese Anweisungen in ihre Parameter geteilt und das Programm übergibt diese an die folgende Komponente des „Servomappings“. Unmittelbar nachdem die angepassten Werte dem Motor übergeben wurden, wird eine Strommessung von der Software aus gestartet. Diese sendet die erfassten Werte des Messfensters an das Userinterface.

10.2.2.2 Effiziente Gliederung essentieller Systemkomponenten

Der Programmcode wurde modular in Form einzelner Komponenten realisiert, anhand dessen wird die Möglichkeit geschaffen, diese mehrfach zu verwenden und die Komplexität der Software zu minimieren. Die bereits beschriebenen Routen, welche von einem Datenpaket durchlaufen werden, setzen sich aus diesen repetitiven Komponenten zusammen.

Die einzelnen Komponenten sind getrennt von dem Hauptprogramm und sind somit nicht in diesem vorhanden, jedoch werden sie mit einer .h Datei verknüpft. In Form einer Funktion können diese implementiert werden.

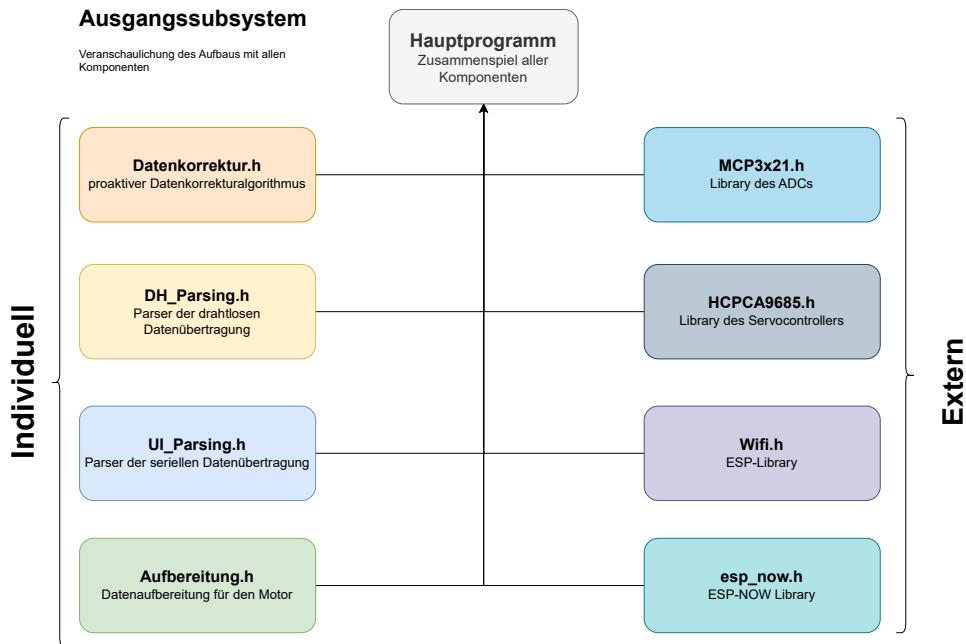


Abbildung 135: Überblick der Softwarekomponenten

Diese Struktur des Programms bringt zahlreiche Vorteile mit sich, unter anderem, dass sich wiederholende Code-Abschnitte nun anhand der Gliederung mit einer Komponente effektiv implementieren lassen. Aber auch die Übersicht spielt eine große Rolle. Das Hauptprogramm ist bereits äußerst überfüllt mit Konfigurationsmöglichkeiten für beispielsweise die drahtlose Kommunikation beider Subsysteme.

10.2.3 Kommunikation - Protokolle

Für den Datenaustausch zwischen dem Eingabe- und dem Ausgabesubsystem wird ein einheitliches Protokoll benötigt, welches auch während der Entwicklung ohne große Mühe interpretiert und verstanden werden kann. Dabei erleichtert ein einheitliches Protokoll die Realisierung der Komponenten, welche für das Interpretieren der Daten zuständig sind. Die Funktionalität beider Parser wird in [Absatz 10.2.4.1] und [Absatz 10.2.4.2] erklärt.

10.2.3.1 Drahtlose Kommunikation

Unter der drahtlosen Kommunikation kann der Datenaustausch zwischen dem Eingabesubsystem und dem Ausgabesubsystem, welches über ESP-NOW erfolgt, verstanden werden. Übergeben werden die Datenpakete auf dieser Strecke unidirektional, von dem Eingabesubsystem zu dem Ausgabesubsystem. Ein Datenpaket enthält immer jeweils die Position eines Fingers und dessen Index.

Beispiel für ein Paket:

$\$S : 1 : 50$

$\$$ ist der primäre Präfix von jedem gesendeten Datenpaket und die Grundvoraussetzung, dass der jeweilige Parser es überhaupt interpretiert.

Das folgende „S“ steht in diesem Fall für Servo und deutet daraufhin, dass nun ein variabler Wert folgt, welcher den Index des jeweiligen Motors angibt. Dieser kann in diesem Fall von 0-4 variieren und wird mit einem „:“ getrennt.

Es ist ein verpflichtender Teil des Protokolls, dass alle variablen Werte auf diese Weise getrennt werden.

Nach dem nächsten „:“ muss nun ein Wert zwischen 0 und 100 folgen. Dies ist ein gemappter Wert, welcher von der Software dann auf die Zugcharakteristik der Motoren rückgemappt wird, und gibt die Fingerstellung an.

Das Paket aus dem Beispiel bedeutet somit: „Der Servomotor-1 soll seinen Finger auf eine Faltung von 50% stellen“.

10.2.3.2 Serielle Kommunikation

Die serielle Kommunikation beschreibt den Datenverkehr zwischen dem Ausgabesubsystem und dem Userinterface. Aufgrund der vielfältigen Funktionen und auch der bidirektionalen Kommunikationslinie muss das Protokoll in mehrere Abschnitte unterteilt werden. Darunter Fingersteuerungen, Gesten und das Feedback.

Fingersteuerungen:

Finger	Index	Wert (in %)	Format
Daumen	Th_S	0 bis 100	$\$Th_S:Wert$
Zeigefinger	In_S	0 bis 100	$\$In_S:Wert$
Mittelfinger	Mi_S	0 bis 100	$\$Mi_S:Wert$
Ringfinger	Ri_S	0 bis 100	$\$Ri_S:Wert$
Kleinerfinger	Pi_S	0 bis 100	$\$Pi_S:Wert$
Alle Finger	Al_S	0 bis 100	$\$Al_S:Wert$

Dies ist ein Überblick des Protokolls welches beschreibt, wie das Userinterface Anweisungen an das Ausgabesubsystem sendet. Das Format ist wie folgt: \$FINGERINDEX:WERT, der Index des Fingers über gibt welcher Finger gemeint ist, der Wert besagt auf welche Position sich der Finger stellen soll. Es gibt auch eine Anweisung, welche alle Finger ansteuert, diese könnte beispielsweise wie folgt aussehen: \$All_S:50 und würde die Finger auf 50% Faltung stellen.

Neben dem einzelnen Steuern der Finger soll auch die Möglichkeit gegeben werden Gesten an die Hand zu übergeben.

Geste	Index	Format	Beschreibung
Standby	St_B	\$G : V ₁ , V ₂ , V ₃ , V ₄ , V ₅	Eine Stellung aller Finger auf 50%
Thumb Up	Th_B	\$G : V ₁ , V ₂ , V ₃ , V ₄ , V ₅	Die Geste Daumen hoch
Peace	Pe_B	\$G : V ₁ , V ₂ , V ₃ , V ₄ , V ₅	Friedensgeste - Peace
Open Hand	Op_B	\$G : V ₁ , V ₂ , V ₃ , V ₄ , V ₅	Hand öffnen
Yeah	Ye_B	\$G : V ₁ , V ₂ , V ₃ , V ₄ , V ₅	Rockergeste
Fist	Fi_B	\$G : V ₁ , V ₂ , V ₃ , V ₄ , V ₅	Eine faust formen

Das Format der Geste beschreibt sich wie folgt: \$G : V₁, V₂, V₃, V₄, V₅ – Das G sagt dem Parser, dass dies eine Anweisung ist, welche eine Geste beschreibt, darauf folgen fünf Werte von 0 bis 100, welche als V1 bis V5 benannt wurden, diese geben die Position in Prozent jedes einzelnen Fingers an.

Aufgrund des bidirektionalen Datenverkehrs zwischen dem Ausgangssubsystem und dem Userinterface muss nun auch ein Protokoll für das Feedback geschaffen werden.

An das Userinterface werden bei aktuellstem Entwicklungsstand ausschließlich Daten der Strommessung gesendet.

Dies erfolgt in folgendem Format:

\$A:INDEX:WERT

„A“ bedeutet für das Userinterface, dass nun mit einem Messwert der jeweiligen Ströme gerechnet werden muss. An der Stelle von „INDEX“ ist ein Wert von 0 bis 5 erlaubt, welcher angibt zu welchem Motor der Strom zuzuordnen ist. Darauf folgt dann der Messwert „WERT“.

10.2.4 Individuelle Komponenten

Wie in [Absatz 10.2.2.2] bereits erläutert, setzt sich das Hauptprogramm aus mehreren Unterprogrammen zusammen, diese werden als „Komponente“ bezeichnet und bringen zahlreiche Vorteile mit sich. Unter anderem ermöglichen diese, dass sich die jeweiligen Routen, die ein Datenpaket im Hauptprogramm durchlaufen kann, aus den einzelnen Komponenten zusammensetzen. Dadurch wird für mehr Überblick und Effizienz im Programm des Ausgabesubsystems gesorgt.

Unter „individuellen Komponenten“ können eigens entwickelte Unterprogramme verstanden werden, welche in diesem Fall Korrekturalgorithmen oder Parser bzw. Interpreter sind.

10.2.4.1 Parser und Interpretation: drahtloser Datenströme

Die Interpretation drahtloser Datenströme findet auf zwei Datenrouten im Programm ihre Anwendung. Einmal im „ONLY-GLOVE“ Modus und auch im Userinterface Modus, sofern dieses auch auf den „GLOVE“ Modus gestellt wurde.

```
void interpretiereDaten(rueckgabe_st * rueckgabe, const uint8_t * data, int data_len)
```

Die Systemkomponente erhält drei Parameter, der erste beinhaltet einen Zeiger auf die Struktur *rueckgabe_st*. Dieser ermöglicht es die später extrahierten Daten in einer Struktur zu speichern und diese im Hauptprogramm zu nutzen. Der nächste Parameter beinhaltet einen Zeiger auf den Speicherort des empfangenen Datenpakets. Der dritte Parameter gibt die Länge des Datenpakets an.

```
if (data_len >= 5 && data[0] != '$' && data[1] != 's' && data[2] != ':') {
    rueckgabe->servoIndex = data[3] - '0';
    rueckgabe->grad = atoi((char*)&data[5]);
}
else {
    Serial.println("Ungültige -Daten- erhalten");
    return;
}
```

Das Unterprogramm prüft ab, ob die Grundbedingung, somit das erforderliche Format wie in [Absatz 10.2.3.1] beschrieben, erfüllt wird.

Ist dies der Fall, wird in die Struktur „Rückgabe“ der extrahierte Servoindex und die gesendete Fingerposition gespeichert.

10.2.4.2 Parser und Interpretation serieller Datenströme

Sofern das Userinterface angeschlossen ist und eine Steuerung über das Interface vorgibt, kommt diese Komponente zum Einsatz. Ihr Zweck ist es die über die serielle Schnittstelle empfangenen Daten zu parsen. Wie in [Absatz 10.2.3.2] beschrieben, hat dieser Parser mit Datenpaketen zu rechnen, die umfangreichere Daten enthalten. Zum Beispiel Anweisungen für einzelne Finger, sowie auch Gesten.

10.2.4.3 proaktiver Datenkorrekturalgorithmus

Aufgrund der Volatilität der Flex-Sensoren, sowie auch der Verdrahtung, welche bei Bewegung eines Fingers mitbelastet wird, besteht eine Chance, dass es zu fehlerhaften Messwerten kommt. Um das Eingabesubsystem möglichst performant und einfach zu halten, wird ein Filter und Prüfsystem auf das Ausgabesubsystem ausgelagert. Benötigt wird ein Algorithmus, welcher Fehler erkennt und diese unmittelbar sinnhaft korrigiert.

Der proaktive Datenkorrekturalgorithmus basiert auf dem Prinzip der Verzögerung und lässt empfangene Daten einen Prozess durchlaufen, bis diese korrigiert und an den Motor übergeben werden.

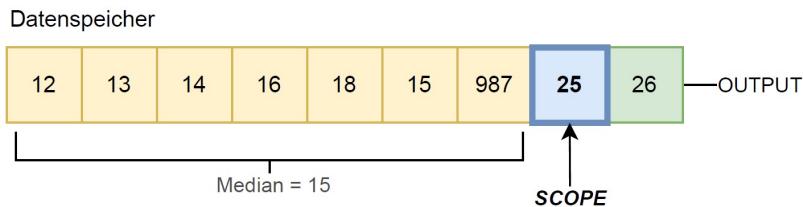


Abbildung 136: Median

Im Fokus des Algorithmus liegt ein Array, ein zusammenhängender Speicherblock, in diesem werden alle empfangenen Daten chronologisch gespeichert. Jedem der fünf Finger ist solch ein Array zugeordnet, welches beispielsweise die letzten zehn Fingerpositionsverläufe beinhaltet.

Parst das Ausgangssubsystem einen neuen Wert, landet dieser im Array des Fingers und alle bereits vorhandenen Werte werden um eine Position nach rechts verschoben.

Die Elemente des Arrays haben jeweils einen eigenen Nutzen. Aus dem ersten bis zum siebten Element wird bei jeder Iteration ein Median berechnet und in einer externen Variable gespeichert. Das achte Element ist der sogenannte „SCOPE“, dieser Wert ist die zweite Komponente einer Vergleichsoperation. Das neunte Element ist das letzte des Speichers, in diesem befindet sich der am aktuellsten geprüfte und je nach Umständen auch korrigierte Wert.

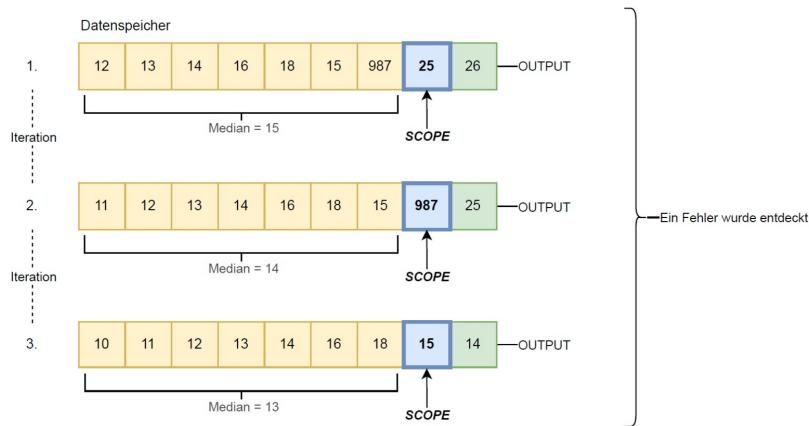


Abbildung 137: Median

In der [Abbildung 137] werden mehrere Iterationen gezeigt, welche die Fehlererkennung und Eliminierung dieses veranschaulichen. Gezeigt wird hier dasselbe Speicher, chronologisch wird gezeigt, wie von oben nach unten sich der Speicher pro Iteration ändert. Bei 1. ist zu sehen, dass sich im Scope der Wert „25“ befindet. Der berechnete Median beträgt 15.

Nun erfolgt eine Vergleichsoperation zwischen dem Wert im Scope und dem Median, überschreitet deren Differenz einen maximalen Grenzwert, muss dieser korrigiert werden. Da dies nicht der Fall ist, wird der Wert 25 in der nächsten Iteration auf das Element für den OUTPUT geschoben.

Bei der nächsten Iteration, in [Abbildung 137] an Stelle 2. zu finden, wurden alle Werte nach rechts verschoben. Nun steht der Wert 987 im Scope, bei der Vergleichsoperation mit dem Median von 14 ist ersichtlich, dass deren Differenz die maximal konfigurierte Grenze überschreitet. Das Ergebnis: Eine Korrektur ist erforderlich. Die nächste Iteration zeigt, dass dieser Wert korrigiert wurde. Der als fehlerhaft identifizierte Wert wurde mit dem berechneten Median von 14 ersetzt.

Anhand der Verzögerung der Elemente, welche im Falle des Beispiels neun Elemente beträgt, ist der Algorithmus in der Lage einen Wert anhand der zukünftigen zu beurteilen. Dies verhindert, dass eine rapide Änderung als Fehler identifiziert wird. Aufgrund des hohen Datenflusses sind Verzögerungen von rund zehn Elementen für den Gebraucher nicht wahrnehmbar.

10.2.4.4 Datenaufbereitung und Anweisung für Servoaktoren

Jeder der im Projekt verwendeten Servomotoren, der MG995R, hat im Originalzustand einen maximalen Drehwinkel von 180°- entsprechend auf diesen Winkel wurde der Mechanismus, wie in [Unterunterabschnitt 8.2.6] näher beschrieben, entworfen. Die Softwareansteuerung ist das letzte fehlende Glied, welches dafür sorgt, dass die Finger sich optimal bewegen.

Grundsätzlich steht keiner der Finger oder der Daumen in der gleichen Faltstellung, sobald sich der Motor um beispielsweise 30°dreht. Um ein einheitliches System zu schaffen, muss somit ermittelt werden bei welchem Drehwinkel der Finger bereits gestreckt oder in der maximalen Faltposition, sprich vollkommen eingefaltet, ist.

Finger	min. Drehwinkel _{ausgestreckt}	max. Drehwinkel _{max.gefaltet}
Zeigefinger	104°	0°
Mittelfinger	140°	20°
Ringfinger	4°	108°
Kleinerfinger	0°	108°
Daumen	52°	0°

Das Eingabesubsystem misst die Stellung der Flex-Sensoren und übersetzt diese dann auf einen Bereich von 0 bis 100%, das Ausgabesbusystem empfängt die prozentuale Faltstellung des Fingers.

Die Funktion „HPCA9685.Servo“ erfordert einen anderen Wertebereich als der empfangene Wert von 0 bis 100 und somit müssen diese Werte gemappt werden.

```
int value_out = map(rueckgabe.grad, 0, 100, fingerLimits[rueckgabe.servoIndex][0],  
fingerLimits[rueckgabe.servoIndex][1]);  
HPCA9685.Servo(rueckgabe.servoIndex, value_out);
```

10.3 User Interface [Szabo]

10.3.1 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 Verbindungsaufbau 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.

10.3.2 Entwicklungsumgebung

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

10.3.3 Konzepte und Überlegungen

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 Erstkonzept sieht folgendermaßen aus:

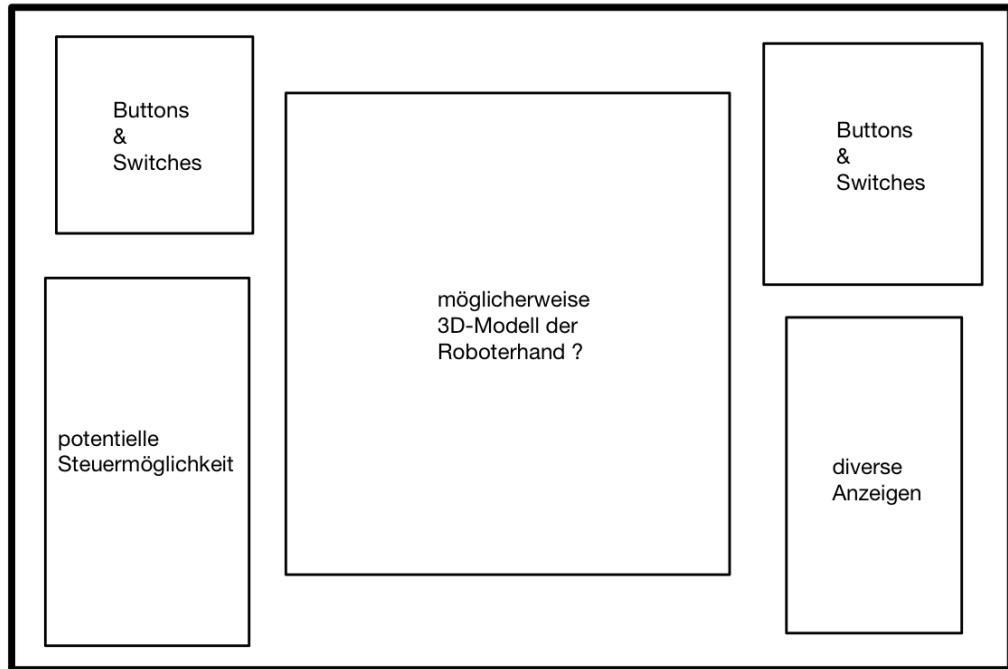


Abbildung 138: User-Interface Konzept

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.

10.3.4 Realisierung des Frontends

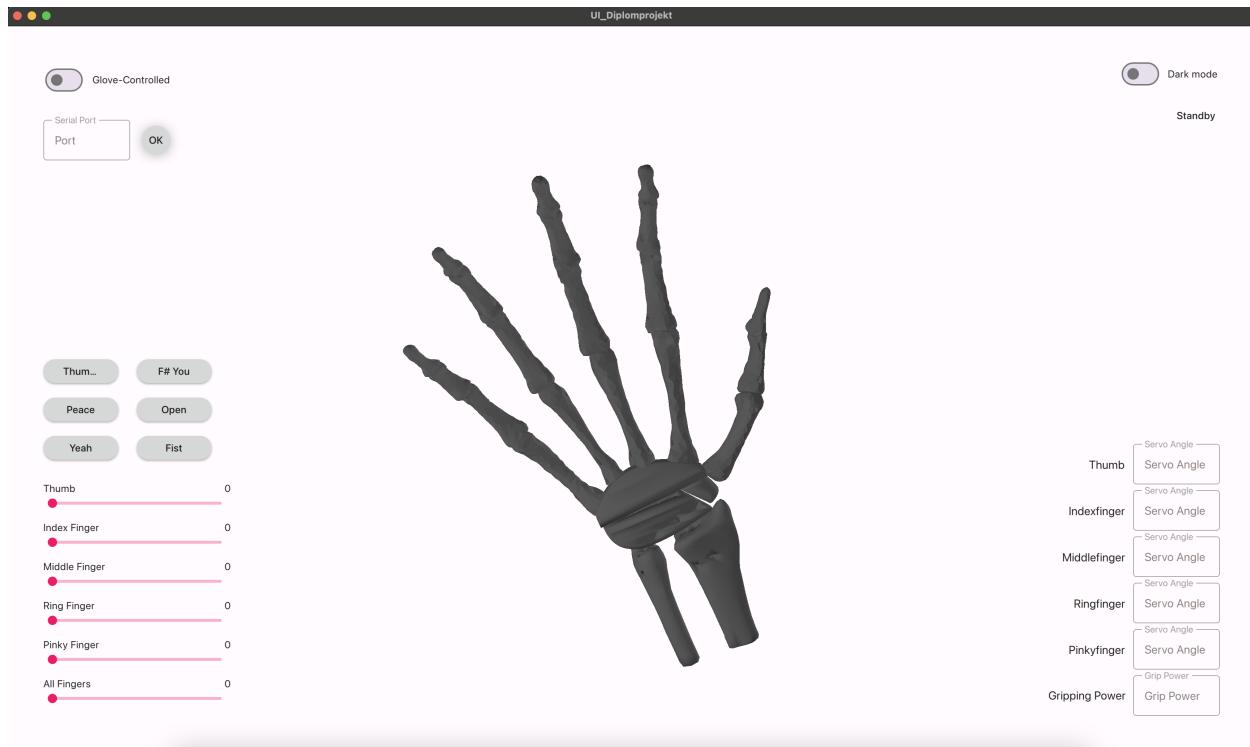


Abbildung 139: UI Benutzeroberfläche

Die Benutzeroberfläche wurde mit der Beschreibungssprache *QML* programmiert. Mit dieser können sehr einfach Tabellen und benutzerdefinierte Anordnungen erstellt werden, mit denen folglich ein visuell ansprechendes GUI kreiert werden kann.

10.3.5 Erläuterung der Grafikoberfläche

Einstellung des Steuermodus

Links oben in [Abbildung 139], sind zwei Elemente zu sehen. Der obere Schalter, ein sogenannter *Toggle-Switch*, ist dafür zuständig zwischen zwei Kontrolmodi für die Roboterhand zu wechseln. In der gezeigten Stellung, kann das Ausgabesubsystem ausschließlich vom Eingabesubsystem, mithilfe der angebrachten Flexsensoren gesteuert werden. Wird dieser Schalter betätigt, so kann die Roboterhand nur mehr mit dem User-Interface bewegt werden.

Als erweiterte Funktion für die Zukunft, kann auf der Platine des Eingabesubsystems ein Schalter angebracht werden, der bei Bestätigung den Steuermodus automatisch umstellt. Hierzu müsste ein kurzer String übergeben werden, der folglich in der QT-Entwicklungsumgebung verarbeitet und erkannt wird.

Serial-Port Initialisierung

Direkt unter dem Schalter zur Einstellung des Steuermodus, befindet sich das Eingabefeld für den Serial-Port, der vom Benutzer eingegeben werden muss. Durch einen Druck mit der Maus of den *OK – Button*, oder durch ein Drücken der *Enter – Taste* nach dem Eingeben des Portnamen, wird die Serial-Kommunikation mit der Platine des Ausgabesubsystems initialisiert und gestartet.

Dark-Mode-Switch

In der rechten, oberen Ecke der UI-Oberfläche, befindet sich ein Schalter, mit dem der *Theme* des Interfaces zwischen *Dark* und *Light* gewechselt werden kann. Dies dient ausschließlich der visuellen Darstellung und hat keinen Einfluss auf die Funktionalitäten der Anwendung. QT führt die Farbänderung aller Elemente automatisch durch, wodurch Programmieraufwand gespart wird.

Standby-Switch

Unterhalb des *Dark – Mode – Switches*, befindet sich ein *Standby – Button*. Wird dieser Knopf gedrückt, so bewegen sich alle Finger der Roboterhand in eine halbgeschlossene Stellung. Der Standby-Modus wird aufgehoben, sobald eine erneute Eingabe erfolgt. Wichtig zu beachten ist allerdings, dass die *Standby – Funktion* im User-Interface nur verwendet werden kann, wenn der Schalter zum Einstellen des Steuermodus auf *UI – Controlled* gestellt ist.

Als zukünftige Verbesserung, könnte, wie auch schon bei der Einstellung des Steuermodus erwähnt, eine Funktion auf der Platine des Eingabesubsystems eingebaut werden, mit der eine *Standby – Condition* ebenfalls bei der Steuerung mit dem Handschuh erzwungen werden kann. Um nicht zu viele Schalter und Drucktaster auf der Platine verbauen zu müssen, könnte diese Eingabe auch sprachlich realisiert werden.

Vorgefertigte Posen

Links, mittig im User-Interface, befindet sich eine Tabellenstruktur. Diese ist mit sechs *Buttons* bestückt, die, bei Betätigung dieser, eine schon vorgefertigte Pose an das Ausgabesubsystem schicken. Diese Handstellung wird folglich von der Roboterhand eingenommen.

Bei jeder, durch das User-Interface, initiierten Bewegung, wird ein *String* an das Ausgabesubsystem geschickt. Durch dieses, im Vorhinein, festgelegte Protokoll, wird die Servostellung übergeben, wodurch die Finger der Roboterhand in die gewünschte Position bewegt werden. Das Code des Ausgabesubsystems prüft die ankommenden Werte vor der Bewegung der Motoren auf Plausibilität.

Finger-Slider

Im unteren, linken Bereich des Grafikoberfläche, befindet sich ein *Stack – Layout*, das mit sechs *Slidern* gefüllt ist. Diese Schieberegler ermöglichen es dem Benutzer jeden Finger der Roboterhand einzeln zu steuern. Dies funktioniert allerdings wieder nur, wenn der *Steuermodusschalter* auf *UI – Controlled* gestellt ist. Mit dem untersten Slider, können auch alle Finger auf einmal bewegt werden. Steuermöglichkeiten wie diese sind vorgesehen, damit der Benutzer bei einer möglichen Fehlfunktion des Eingabesubsystems nicht handlungsunfähig wird. Mit dem User-Interface kann somit noch weitergearbeitet werden, wennauch nicht so praktikabel wie per Eingabesubsystem, nämlich dem Handschuh.

Die Übergabe der Steuerwerte erfolgt mit einem Protokoll [siehe [Unterunterabschnitt 10.2.3](#)]

Kontrollanzeigen

Im unteren, rechten Bereich von [[Abbildung 139](#)], befinden sich die *Kontrollanzeigen* für die Servostellungen und die Griffkraft. Mithilfe des Protokolls [siehe [Unterunterabschnitt 10.2.3](#)], werden die Servowinkelwerte jedes einzelnen Servos an das User-Interface gesendet. Diese werden interpretiert und auf Plausibilität geprüft. Folglich werden die vorherigen Werte, die im Anzeigefenster standen, überschrieben und der neue aktualisierte Wert angezeigt.

3D-Modell

In der Mitte der Grafikoberfläche, ist die, nicht übersehbare, Darstellung eines echten Handskelets zu sehen. Dieses 3D-Modell wurde in Fusion 360 [[Unterabschnitt 16.1](#)] erstellt. Jedes einzelne Teil wurde anschließend exportiert und im QT-DesignStudio korrekt positioniert. Wichtig hierbei ist es zu beachten, dass jedes Hand -und Fingerglied vor dem Export aus Fusion 360 genau an seinem Ursprung liegen muss, da die Beugung der Finger ansonsten nicht korrekt nachgestellt werden kann. Die Drehachse jedes Gelenks, wäre durch einen inkorrekt export verschoben.

10.3.6 Realisierung des Backends

Mithilfe von C++, wurde im QT-Designer das Backend programmiert. Dies beinhaltet alle Funktionen die für die Serial-Kommunikation notwendig sind und alle weiteren Funktionalitäten die bei der Benutzerinteraktion gefordert sind.

Das Backend ist in ein *Main – Programm*, ein *Header – File* und ein *Source – File* gegliedert. Im Header-File *functions.h*, werden alle benötigten Funktionen erstellt. Im Source-File *functions.cpp*, werden die Funktionen anschließend ausprogrammiert und miteinander verknüpft. Das Wort *Verknuepfen*, bezieht sich dabei auf das *Signal – Slot – System* von QT, durch das Funktionen anhand von bestimmten Ereignissen aufgerufen werden können. Im Main-Programm *main.cpp*, werden die *Signals* und *Slots* in Abhängigkeit gesetzt und somit die Funktionen des Backends miteinander verknüpft.

Bei der Programmierung des Backends, wurden grundlegende C++-Kenntnisse aus dem Unterricht angewendet, die in dieser Dokumentation nicht näher erläutert werden.

11 Testen der Flexsensoren [Schweitzer]

Ziel und Sinn der Messung

Jeder Flexsensor besitzt einen bestimmten Widerstandsbereich ($25k\Omega$ bis maximal $125k\Omega$). Laut Datenblatt muss allerdings von einer Toleranz von $+ - 30\%$ ausgegangen werden. Deshalb muss der Widerstandswert jedes einzelnen Flexsensors ausgelesen werden, um festzustellen, wie sehr dieser je Flexsensor variiert.

Als Erstes wurde eine Messung jedes einzelnen Flexsensors durchgeführt. Dabei wurden zuerst Punkte auf einem Blatt Papier aufgezeichnet [Abbildung 140]. Der Flexsensor, der am Anfang, bevor dieser gebogen wird, nur auf der y-Achse liegt, wird dann immer mehr Richtung der jeweilig gekennzeichneten Punkte gebogen. Der untere Teil des Flexsensors bleibt stets auf den Koordinaten (0|0), damit der Winkel von der y-Achse zur x-Achse gemessen werden kann. Punkt Nummer 1 liegt beispielsweise bei dem Winkel von 17° . Es wurde von zwei Flexsensoren der sich ändernde Widerstandswert mit dieser Methode ausgemessen. Man hat am Ende also sieben Widerstandswerte (Winkel von $0^\circ, 17^\circ, 27^\circ, 40^\circ, 53^\circ, 65^\circ, 76^\circ, 90^\circ$) bei jedem der beiden Flexsensoren gemessen [siehe Tabelle 5].

Man kann klar erkennen, dass die Widerstandswerte von Flexsensor 1 klar von jenen von Flexsensor 2 abweichen, gerade immer höheren Bereich des Biegsungsgrades. Flexsensor 1 erreicht bei einer Biegung von 90° einen maximalen Widerstandswert von $110k\Omega$, bei Flexsensor 2 sind es nur $45k\Omega$. Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass sich der Wert, aufgrund der Befestigung am Handschuh, welche keine stabile Position garantiert, teils bei jeder getätigten Messung wieder etwas verändert hat.

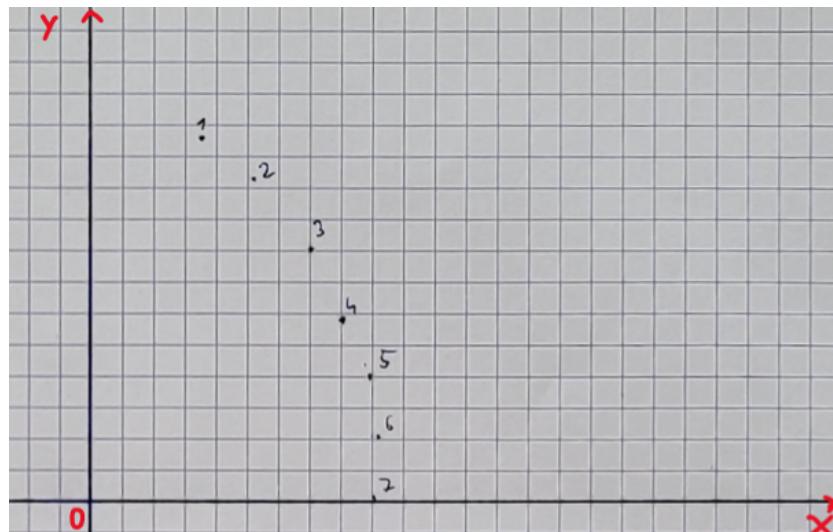


Abbildung 140: Punkte zur Messung (Winkel)

Flexsensor 1		Flexsensor 2	
Winkel ($^{\circ}$)	Widerstand ($k\Omega$)	Winkel ($^{\circ}$)	Widerstand ($k\Omega$)
0	44	0	25
17	55	17	28
27	65	27	31
40	75	40	36
53	85	53	39
65	92	65	41
76	102	76	42
90	110	90	45

Tabelle 5: Messergebnisse am Papier

Als Zweites wurden die ausgemessenen Werte von Flexsensor 2 [Tabelle 5] übernommen. Zusätzlich wurde nun der Flexsensor 2 auf den Handschuh am Bereich des Zeigefingers der rechten Hand montiert. Die in [Tabelle 6] zu sehende Einstellung ($x/8$), gibt den in der linken Tabelle nebenstehenden Winkel jeweils dazu an. Das bedeutet, dass man den Finger ungefähr bei der Einstellung von 2 um 17° abgebogen hat. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen das unterschiedlich starke Abbiegen des Zeigefingers je Einstellung (1-8).

Flexsensor 2 (Papier)		Flexsensor 2 (Handschuh)	
Winkel ($^{\circ}$)	Widerstand ($k\Omega$)	Einstellung ($x/8$)	Widerstand ($k\Omega$)
0	25	1	25
17	28	2	27
27	31	3	29
40	36	4	31
53	39	5	33
65	41	6	35
76	42	7	37
90	45	8	39

Tabelle 6: Messergebnisse am Handschuh



Abbildung 141: Einstellung 1



Abbildung 142: Einstellung 2



Abbildung 143: Einstellung 3



Abbildung 144: Einstellung 4



Abbildung 145: Einstellung 5



Abbildung 146: Einstellung 6



Abbildung 147: Einstellung 7



Abbildung 148: Einstellung 8

Tabelle 7: Messpositionen mit dem Handschuh

12 Ergebnisse und Erkenntnisse

12.1 Mechanik [Al-Maytah]

In der Entwicklungsphase der mechanischen Komponenten des Gesamtsystems kam es zu vielen Höhen und Tiefen. Dieser Prozess war lange geprägt von einer Serie an Rückschlägen, doch aufgrund der daraus entstandenen Erkenntnisse und Fortschritte konnte die Hand und die zugehörige Steuerungskomponente zuverlässig verwirklicht werden.

Während der gesamten Entwicklung der Prototypen war der 3D-Druck äußerst hilfreich und der Grundstein, welcher uns überhaupt die Chance geboten hat ausgiebige Modelle und deren Verbesserungen zu entwerfen. Eine der wichtigsten Erkenntnisse ist es, wie wichtig das Miteinbeziehen von Toleranzen des Druckers beim Entwerfen eines Modells sind. Aber auch der Umgang mit der CAD-Software Fusion 360 wurde von einem Entwurf zum Folgendem immer fortgeschrittlicher und professioneller. Dadurch konnten Hürden beim Entwerfen einer besseren Version der Hand stets überwunden werden.

Anfangen hat die Entwicklungsphase mit einem simplen Entwurf des Faltmechanismus, dabei gab es den ersten sogenannten „Proof of concept“, welcher gezeigt hat, dass durch das Ziehen an einer Schnur das Falten eines Fingers bewirkt werden kann.

Daraufhin folgte die Entwicklungsstufe „initial“, in der es sämtliche Probleme beim Abrollen des Fingers gab und eine gleichmäßige Faltung aufgrund einer Fehlkonstruktion nicht möglich war. Auch war Reibung eines der Probleme, welche dazu geführt haben, dass mehr Kraft beim Ziehen notwendig war.

Man muss nicht immer das Rad neu erfinden, sondern eher neu ausrichten. In der Entwicklungsstufe „InMoov“ wurde eine bereits fertige Hand, in der Hoffnung aus ihrem Entwurf zu lernen, realisiert. Jedoch gab es das Problem, dass diese Hand nicht zwingend dafür entworfen wurde um kräftig zu sein, sondern bei dieser mehr auf das Äußere, das Oberflächliche, geachtet wurde. Somit kam es aufgrund unserer Belastungstests zu sämtlichen Schäden, wie Rissen und Brüchen am Modell der Hand und ihrer Mechanik, sowie auch ständiger Reibung der Schnur an Kanten.

Da Reibung, Risse und Brüche am Modell zum Problem wurden und es an Griff fehlte, gab es die Idee, eine Hand aus Silikon zu entwerfen, welche jedoch nicht lange stand hielt. Neben dem hohen Zeit- und Kostenaufwand kam es dazu, dass dieses Konzept verworfen werden musste. Dies lag daran, dass das Gießen einer gesamten Hand nicht möglich war. Es kam während des Gusses ständig dazu, dass Silikon aus der Gussform ausgelaufen ist und dies konnte nicht behoben werden. Dennoch gab es einen positiven Aspekt dieser Phase der Entwicklung, denn während zahlreicher gescheiteter Versuche eine Hand zu gießen, wurde einiges über den Silikonguss gelernt, sogar über das Silikon an sich. Dies war für die abschließende Entwicklungsstufe äußerst hilfreich.

In der letzten Entwicklungsstufe, welche den Namen „Hybrid“ trägt, konnten alle aus Rückschlägen und Fehlern gewonnene Erkenntnisse und Learnings integriert werden. Der unzuverlässige Mechanismus der vorherigen Stufen wurde durch ein fortgeschrittenes Konstrukt ersetzt, was zu mehr Zugkraft, Präzision sowie Stabilität führte. Besonders hilfreich waren beim Entwurf dieses

Modells das gewonne Wissen in CAD Programmen und beim 3D-Druck im Laufe des Projekts. Da es nun Erfahrung im Umgang mit Silikon gab wurden auch Fingerkuppen aus diesem Material gefertigt um für mehr Griff in der Stufe „Hybrid“ zu sorgen.

Eine Besonderheit des Entwicklungsprozesses war es mitzuerleben, dass Rückschläge zu neuen Erkenntnissen und damit zu Fortschritten geführt haben. Bemerkenswert war auch, dass während des Prozesses Fähigkeiten im Umgang mit CAD-Programmen, dem 3D-Druck und im Bereich des Handwerks erweitert oder erlernt werden konnten.

12.2 Hardware [Szabo]

In diesem Punkt werden alle, im Laufe der Projektentwicklung gewonnenen, Erkenntnisse erläutert. Dazu zählen nicht nur die positiven Erfolge, sondern auch die negativen Aspekte und Rückschläge, die wir erfahren haben.

Zunächst wurde ein erstes Konzept entwickelt. In Zuge dessen, wurde hauptsächlich recherchiert und überlegt, wie die einzelnen Ideen zum Bau einer bionischen Hand umgesetzt werden können. Dies betrifft die Messung der Fingerbeugung durch geeignete Sensorik, die Datenübertragung und die Aktorik in Form von Motoren.

Anfangs war der Fortschritt sehr groß. Jede Woche wurden neue Konzepte getestet und durchdacht. Es war sehr schnell klar, dass wir Flexsensoren als Sensorik verwenden wollen und somit konnte der Schaltungsentwurf beginnen. Entscheidungsfreudigkeit am Anfang des Projekts zahlt sich im Laufe der Entwicklung aus, da nicht unnötige Zeit verschwendet wird unnütze und nicht funktionierende Konzepte durchzusetzen. Dieser Fehler wurde bei uns vermieden und somit hatten wir schon sehr früh Schaltungen und Testplatinen. Durch diese konnten wir Verbesserungen vornehmen und Fehler frühzeitig erkennen.

Frühzeitige Fehler bei der Testschaltung des Eingabesubsystems waren keine Seltenheit. Rund ein -bis zwei Wochen wurden damit verbracht die Platine funktionsfähig zu machen, da durch die Schuliinterne Fertigung einige Fehler beim Fräsen der Leiterbahnen aufgetreten sind. Nicht nur Probleme bei der Fertigung, sondern auch beim Anlöten der Bauteile stoppten den Entwicklungsprozess kurzzeitig. Nachdem mit Jumper-Kabeln alle kaputten elektrischen Leitungen überbrückt worden sind, konnte die Schaltung auf Funktionalität durchgemessen werden. Diese Messungen verliefen, nach der Behebung aller Leitungsdefekte, reibungslos und das Konzept der Messschaltung wurde bestätigt. Dies gab uns die Sicherheit nun die zweite Version der Platine für das Eingabesubsystem zu entwerfen und extern, bei der Firma JLCPCB, fertigen zu lassen.

Durch diese relativ gut verlaufene Phase der Schaltungsentwicklung, hat sich gezeigt, dass es sich auszahlt im Vorhinein zu planen, Schaltungen zu simulieren und zu berechnen und das initiale Konzept mehrmals durchzudenken.

Ein sehr ähnlicher Entwicklungsprozess kam bei der Fertigung der Platine für das Ausgabesubsystem zu tragen. Nach dem Entschluss Servomotoren für die Ansteuerung der Roboterfinger zu

verwenden, begann das erneute Überlegen. Diesmal musste allerdings der beste und einfachste Weg für eine Motoransteuerung, bestenfalls mit einer Griffkraftüberwachung, konzeptioniert werden. Die gewählte Schaltung wurde erneut simuliert und auf einem Steckbrett aufgebaut. Danach wurde in der Schule eine Testplatine gefertigt und bestückt. Erneut sind allerdings die gleichen Probleme wie bei der Entwicklung der Schaltung für das Eingabesubsystem aufgetreten. Leiterbahnen haben sich beim Löten der elektronischen Bauteile gelöst, weshalb Jumper-Kabel verwendet werden mussten. Nach der Überbrückung der kaputten Leitungen, wurde die Platine erneut durchgemessen und ein Betrieb simuliert. Dadurch konnten wir die korrekte Funktion der Schaltung nachweisen und mit dem Design der zweiten Platine für das Ausgabesubsystem beginnen. Diese wurde ebenfalls bei der Firma JLCPCB bestellt.

Erneut war zu erkennen, dass sich die Mühe am Anfang der Entwicklung ausgezahlt hat um mögliche Probleme, die später im Entwicklungsprozess auftreten könnten, auszuschließen.

12.3 Software

12.3.1 Eingabesubsystem [Schweitzer]

Als Erstes wurde ein Konzept entwickelt, was das Eingabesubsystem alles machen soll. Es wurden etliche Überlegungen getroffen, inwiefern welche Funktionen implementiert werden sollen oder nicht, um eine zuverlässige Steuerung des Ausgabesystems zu ermöglichen. Nachdem das Grundkonzept für die Hardware fertiggestellt worden war, konnte mit der detaillierten Planung für das Eingabesubsystem angefangen werden.

Anfangs waren zu viele verschiedene Funktionen, die das Eingabesubsystem unterstützen soll, angedacht gewesen. Es wurde die ersten Wochen mit sehr optimistischen Zügen in die Zukunft geschaut. Es stellte sich jedoch nach nicht allzu langer Zeit heraus, dass es nicht möglich ist, all diese Funktionalitäten zu integrieren. Deshalb wurde ein erneut ein Konzept erstellt, in dem die wichtigsten davon vorhanden waren.

Das Konzept sah wie folgt aus: Es soll über einen ESP32 jeder einzelne Widerstandswert der Flexsensoren beinahe pausenlos ausgelesen werden. Diese Werte sollen dann verarbeitet und, falls die durch den ADC umgewandelten Werte außerhalb des festgelegten Wertebereichs liegen sollten, korrigiert werden.

Mit der Überlegung, welche Datenübertragung gewählt werden soll, wurde ebenfalls Zeit verbracht. Die zu Beginn angestrebte Übertragung per Bluetooth wurde schlussendlich verworfen. Schlussendlich wird diese nun per ESP-NOW Protokoll (ähnlich zu Wifi) durchgeführt. Einige Wochen vergingen, bis klar war, inwiefern die Datenübertragung per ESP-NOW realisiert werden kann. Als es aber dann möglich war, einen stabilen Datenaustausch zwischen Eingabe- und Ausgabesubsystem herzustellen, wurde dieser Schritt, nicht Bluetooth zu verwenden, als der absolut richtige angesehen.

Nachdem das Auslesen der Daten der Flexsensoren vom Eingabesubsystem erfolgreich durchgeführt

werden konnte, wurde eine Datenkorrektur angestrebt. Zwischendurch wurde angedacht, keine Korrektur durchzuführen, aber schlussendlich wurde eine Schutzmaßnahme eingeführt, um das Zittern der Finger des Ausgabesubsystems zu verringern, indem die Werte, die aus dem ADC ausgelesen werden, nur dann gesendet werden, wenn diese um +10 vom zuletzt gesendeten Wert abweichen. Durch diese Maßnahme konnte eine deutliche Verbesserung der natürlich aussehenden Bewegung der Roboterhand vom Ausgabesubsystem sichergestellt werden. Schäden an der Mechanik konnten hiermit vermieden werden.

Die Arduino IDE hat sich durchwegs als passende Entwicklungsumgebung bewährt. Sie ermöglicht es, den Code problemlos zu interpretieren, zu formatieren, zu kompilieren und auf den ESP32 hochzuladen. Allerdings kann es zu einem Problem mit der Arduino IDE 2 kommen, da sie einen bestimmten Codeabschnitt nicht korrekt interpretieren kann. Dies liegt an den Unterschieden in den Bibliotheken im Vergleich zur Arduino IDE 1. Durch Anpassungen am Code kann dieses Problem jedoch gelöst werden, sodass beide Versionen der Arduino IDE genutzt werden können.

Im Verlauf des Entwicklungsprozesses können immer wieder Rückschläge auftreten, unabhängig von deren Ursache. Oft wird die Komplexität bei der Umsetzung bestimmter Funktionen unterschätzt und im Laufe der Zeit muss erkannt werden, dass entweder ein neues Konzept entwickelt oder mehr Zeit in die Realisierung investiert werden muss.

In der Regel erfordert die Umsetzung verschiedener Softwareblöcke mehr Zeit, als ursprünglich angenommen. Der Code funktioniert meist erst nach mehreren Überarbeitungen so, wie es sich von Anfang an gewünscht wurde. Dennoch können zahlreiche neue Bereiche im Softwarebereich erschlossen werden, einschließlich der Ansteuerung und Datenverarbeitung.

Letztendlich erweisen sich die Überlegungen, die bereits am Anfang angestellt wurden, als sinnvoll. Dies führt dazu, dass nicht alle Überlegungen zwischendurch verworfen werden müssen.

12.3.2 Ausgabesubsystem [Al-Maytah]

Die Software des Ausgabesubsystems, welche dessen intelligente Komponente ist, hat gezeigt von welcher Bedeutung Ordnung während eines langfristigen Entwicklungsprozesses ist. Dass der entwickelte Code funktioniert, ist die Grundvoraussetzung für dieses System, doch ohne die entsprechende Organisation und Ordnung rückt dieser Aspekt schnell in den Hintergrund.

Somit wurde recht früh in der Entwicklungsphase bemerkt, dass es an Struktur im Bereich der Software fehlt. Zahlreiche Maßnahmen wurden ergriffen um dem entgegen zu wirken. Zu einem eine bessere und einheitliche Organisation des Eingabe- sowie Ausgabesubsystems im GitHub-Repository und das Einführen gewisser Entwicklungsstufen und Branchen. Wodurch es immer eine Version gab die getestet ist und zuverlässig funktioniert, sowie auch eine Entwickler-Version welche unter ständiger Bearbeitung stand.

Im Laufe der Zeit hat sich ergeben, dass es zu unübersichtlich ist, den gesamten Code in eine einzelne Datei zu schreiben. Demnach wurde das Gesamtsystem in einzelne Komponenten

gegliedert. die Software unterteilt sich somit in Komponenten, welche im Hauptprogramm integriert werden. Dies hat dazu geführt, dass die Wartung und Entwicklung der Software rapide voran ging. Fehler wurden schneller entdeckt, oder es konnten fehlerhafte Code-Abschnitte einfach ausgetauscht werden.

Als Beispiel wurde der Datenkorrekturalgorithmus extern entwickelt und in einem eigenem Sketch ausgiebig getestet. Hat dieser funktioniert, wurde er als Komponente in das Hauptprogramm eingebunden. Meist waren wenige Tests notwendig bis die Implementierung vollendet war.

Äußerst lehrreich war die drahtlose Übertragung der Daten zwischen dem Eingabe- und Ausgabe-subsystem. Diese hat für eine lange Zeit nicht funktioniert und war auch nicht äußerst stabil. Als die Datenübertragung erstmals möglich war, konnte die Hand mit dem Handschuh das erste Mal bedient werden.

Dadurch wurde ein Zittern der Hand erkannt, welche softwareseitig behoben wurde.

Im Großen und Ganzen hat sich gezeigt, dass Software mehr als nur Programmieren ist. Ordnung und eine entsprechende Organisation sind ein großer Bestandteil des Endprodukts und haben vieles ermöglicht.

12.4 Gesamtintegration [Schweitzer]

In diesem Abschnitt reflektieren wir die Vielfalt an Erkenntnissen, die wir während der Projektentwicklung gesammelt haben. Dabei nehmen wir sowohl die positiven Errungenschaften als auch die Herausforderungen und Rückschläge in den Blick, die wir erlebt haben.

Zunächst möchten wir die Bedeutung eines detaillierten Konzepts hervorheben. Dieses dient als solide Grundlage, auf die wir im weiteren Verlauf zurückgreifen können. Es ermöglicht uns, eine erneute Gesamtüberlegung des Projekts nach einigen Wochen zu vermeiden, obwohl es natürlich unmöglich ist, alle zukünftigen Probleme im Voraus zu antizipieren.

Unser Hauptziel bestand darin, ein umfassendes Konzept für die Integration aller Komponenten zu entwickeln. Im Klartext bedeutet dies, dass Hardware, Software und Mechanik am Ende harmonisch zusammenarbeiten und ein funktionierendes Gesamtsystem bilden sollten. In unserem Konzept haben wir von Anfang an festgelegt, was wir grundsätzlich entwickeln wollen.

Nachdem wir uns darauf geeinigt hatten, einen Roboterarm mittels eines Handschuhs zu steuern, konnten wir uns den Details zuwenden. Es stand schnell fest, dass wir die Position der Fingergelenke mithilfe von Flexsensoren erfassen würden, die auf der Außenseite der Finger angebracht sind.

Ebenso war schnell klar, dass wir den Roboterarm mit einem 3D-Drucker herstellen würden. Es gibt schlichtweg keine einfachere Methode, um in kürzester Zeit manuell mit einer Modellierungssoftware Fusion 360 [siehe [Unterabschnitt 16.1](#)] erstellte Teile zu produzieren.

Die Entwicklung der Hardware konnte beginnen, sobald wir festgelegt hatten, welche elektronischen Bauteile zum Einsatz kommen sollten. Jede einzelne Verbindung, die wir in der Elektronik-Design-Automatisierung Software KiCad [siehe [Unterabschnitt 16.3](#)] erstellt haben, wurde sorgfältig durchdacht. Gleiches gilt für die Anordnung der Bauteile, um mögliche Störungen verschiedener Signale zu vermeiden.

Die Softwareentwicklung wurde von Anfang an mithilfe der Entwicklungsumgebung Arduino IDE [siehe [Unterabschnitt 16.4](#)] durchgeführt. Der Mikrocontroller ESP32, der eine zentrale Rolle in unserem Projekt spielt, wurde von Anfang an für das Auslesen, Verarbeiten und Senden der Daten ausgewählt.

Nachdem wir unseren ersten 3D-Druck eines Open-Source Projekts der Roboterhand gedruckt hatten, konnten wir uns überlegen, inwiefern wir die Finger bewegen können und wie dies realisiert werden kann. Angelschnüre wurden als Zugmechanismus verwendet, welche durch jeden der einzelnen 3D-gedruckten Fingern verliefen und dann jeweils an einem Servomotor befestigt wurden. Mit der Zeit zeigte sich, dass die Angelschnur allerdings immer mehr an Stabilität verliert und abreißt oder aber auch, dass sie die 3D-gedruckten Teile einschneidet, was wiederum die Mechanik großflächig beschädigt.

Die Platinen waren nicht immer fehlerfrei, durch kreative Ansätze konnte allerdings jedes Mal eine Lösung gefunden werden, wie diese doch verwendet werden können, wie beispielsweise das Setzen von Drahtbrücken, falls Leiterbahnen beschädigt waren.

Die Software war anfangs sehr fehlerbehaftet und hat zu ungewünschten Situationen geführt. Es musste überlegt werden, wie weit sich beispielsweise die Servos drehen dürfen, sodass die Mechanik keinen Schaden davonträgt. Dies war nicht immer leicht, allerdings konnten diese Probleme schlussendlich behoben werden, sodass nun alle Funktionen der Software gezielt an die Hardware und die Mechanik angepasst worden sind.

Schlussendlich konnten wir eine harmonische Interaktion zwischen Hardware, Software und Mechanik erreichen. Die Software liest die Werte der Flexsensoren aus, der Code auf dem ESP32 interpretiert und überprüft diese Daten und leitet sie vom Eingabesystem zum Ausgabesystem weiter. Das Ausgabesystem interpretiert die empfangenen Daten und verarbeitet sie entsprechend. Letztendlich werden die Servomotoren mit diesen Daten angesteuert. Im Code sind Schutzzgrenzen eingebaut, um ein Überdrehen der Servos zu verhindern.

Die Hardware, einschließlich der Messschaltungen, funktioniert einwandfrei und erfüllt alle Anforderungen. In der Endversion gibt es keine Störungen bei den einzelnen Signalen mehr. Die Mechanik wurde mehrfach überarbeitet, insbesondere die Integration der Servos. Durch die Verwendung von Metallhülsen an den erforderlichen Stellen schneiden die Angelschnüre nicht mehr in den 3D-Druck ein.

Insgesamt funktioniert die Steuerung sowohl auf der Seite des Eingabesystems als auch die Ausführung am Ausgabesystem sehr gut. Es ist uns gelungen, eine sehr natürliche Bewegung der menschlichen Hand nachzuahmen.

Während der gesamten Entwicklungsphase konnten wir zahlreiche Erfahrungen sammeln. Es gab viele Herausforderungen, aber auch daraus resultierende Erfolge waren keine Seltenheit. Oft waren wir etwas zu optimistisch, aber letztendlich konnten wir alle Meilensteine rechtzeitig erreichen. Mit dem Wissen, das wir während der gesamten Entwicklungsphase gesammelt haben, können wir nun effizienter an ähnlichen Projekten arbeiten.

13 Ausblick

Das Projekt bietet eine gute Basis für zukünftige, aufbauende Erweiterungen. Einige Änderungs- oder Verbesserungsvorschläge des Gesamtdesigns sind in Folge beschrieben.

Handgelenksrotation

Auf der Platine des Eingabesystems könnte eine Steuerung für einen Gyroskopsensor integriert werden. Dieser Sensor, am Handschuh befestigt, wäre in der Lage, die Drehbewegungen des Handgelenks zu erfassen. Die erfassten Daten könnten dann durch eine speziell dafür entwickelte Software auf der Platine ausgelesen und verarbeitet werden. Dies würde es ermöglichen, nicht nur die Finger des Roboterarms zu bewegen, sondern auch eine Rotation des Handgelenks zu realisieren. Ein solches Feature würde den zusätzlichen Vorteil bieten, dass Objekte aus verschiedenen Winkeln gegriffen werden könnten.

Taktile Sensoren an den Fingerspitzen

Taktile Sensoren an den Fingerspitzen der Roboterhand könnten den auf jeden einzelnen Finger ausgeübten Druck messen. Durch eine spezielle Messschaltung könnten die Daten dieser Sensoren ausgelesen und verarbeitet werden. Dies würde es ermöglichen, zu bestimmen, ob ein bestimmter Druckpunkt erreicht ist, bei dem ein gehaltenes Objekt beschädigt oder sogar zerstört werden könnte. Bei einem zu hohen gemessenen Druck (der je nach Objekt variieren und möglicherweise manuell eingestellt werden könnte) könnte eine Sicherheitsfunktion in der Software aktiviert werden. Diese würde die Roboterhand in ihrer aktuellen Position verharren lassen und keine zusätzliche Kraft auf das Objekt ausüben.

Akku auf Platine des Eingabesubsystems

Es wurde bereits ein Akku für die Platine des Eingabesubsystems eingeplant. Dieser ist auch bereits in der neuesten Version der Platine vorhanden und sollte auch funktionieren. Damit wäre auch ein Betrieb dieser ohne ein Netzteil möglich. Das hat den Vorteil, dass man mit dem Handschuh nicht mehr von der Anbindung des Netzteils an die Platine abhängig und kann sich schlussfolgernd leichter durch den Raum bewegen. Die Daten werden genauso wie zuvor übertragen, da alles für beide Betriebsmöglichkeiten (Akku und Netzteil) konzipiert wurde.

Mehrere Modi im User-Interface

Es soll möglich sein, dass mehrere voreingestellte Modi im User-Interface ausgewählt werden können. Über diese soll es möglich gemacht werden, dass man beispielsweise einen bestimmten Gegenstand einer definierten Liste auswählen kann. Darüber soll es dann möglich sein, dass das Ausgabesubsystem ja nach eingestelltem Modus die Gegenstände mit der richtigen Intensität greift, ohne, dass diese beschädigt oder zerstört beziehungsweise aber auch nicht fallengelassen werden. Ein anderer Modus wiederum könnte beispielsweise den Befehl an die Platine senden, dass die Roboterhand in der derzeitigen Position halten soll.

Sicherheit beim Senden von Daten

Es könnte auf eine Verschlüsselung beim Senden von Daten gesetzt werden, damit diese kein Unbefugter abfangen und auswerten kann. In unserem Fall stellt es kein Problem dar, dass die Daten keine Verschlüsselung besitzen, aber in anderen Bereichen, beispielsweise in der Industrie, wird eine zuverlässige und verschlüsselte Übertragung der Daten essenziell sein. Keiner soll dadurch das System manipulieren können.

Größere Analyse von Daten

Durch einen zusätzlichen Datenträger, wie zum Beispiel einer SD-Karte, können Daten dauerhaft gespeichert werden. Dadurch wäre es möglich eine Analyse dieser über einen festgelegten Zeitraum durchzuführen. Es könnte dadurch herausgefunden werden, wie viel Strom bei einem festgelegten Gegenstand beispielsweise bei einer bestimmten Drehung des Servos von der Schaltung verbraucht wird. Wenn dies über einige erneut folgende Messungen beinahe gleich ist, dann kein der arithmetische Mittelwert herausgefunden werden. Dieser kann dann für bestimmte Sicherheitsvorkehrungen verwendet werden. Umso öfter Daten gesammelt und analysiert wurden, umso leichter ist es, festzulegen, wann die Schaltung nicht mehr richtig funktioniert. Außerdem kann über eine ausführliche Analyse verschiedenster gemessener Werte besser analysiert werden, wie oft gewisse Stromspitzen auftreten.

Mechanische Komponenten kompakter verbauen

Das mechanische Gehäuse für den Motorblock kann kompakter modelliert werden. Des Weiteren ist der 3D-gedruckte Unterarm etwas zu groß geraten. In Zukunft müsste hier auf Maße geachtet werden, die dem menschlichen Unterarm entsprechen, um eine realistischere Darstellung zu gewährleisten. In vielen Bereichen des modellierten Roboterarms sind momentan zu viele Lufträume, die bei zukünftigen Modellierungen deutlich reduziert werden können.

Professionell gefertigte mechanische Teile

Zwar eignet sich der 3D-Druck mit dem Kunststoff PLA für einen Anfangsprototypen, führt jedoch auch dazu, dass die daraus gewonnene Qualität langfristig keine Option ist. Somit müssen besonders mechanische Komponenten mit Verfahren gefertigt werden, die auch industriell ihre Anerkennung finden. Besonders Zahnräder und Zahnstangen sollten aus zuverlässigen Kunststoffen oder Metallen bestehen, die belastbar und haltbar sind. Weiters stehen die Finger und deren Glieder unter ständiger Belastung, besonders während des Faltvorgangs und müssen demnach auch aus einem härteren Kunststoff gefertigt werden.

14 Abkürzungsverzeichnis

ADC Analog-Digital-Wandler

CAD-Software Computer Aided Design Software

FDM Fused Deposition Modelling

GUI Graphical User Interface

GND Ground

IC Integrated Circuit

I2C Inter-Integrated Circuit

IP-Adresse Internet Protocol Address

MAC-Adresse Media Access Control Address

OPV Operationsverstärker

PCB Printed Circuit Board

PLA Polyactid

SLS Selective Laser Sintering

SMD Surface Mount Device

THT Through Hole Technology

UART Universal Asynchronous Receiver / Transmitter

UI User Interface

USB Universal Serial Bus

VWTT Vorwissenschaftlicher Theorieteil

WIFI Wireless Fidelity

WLAN Wireless Local Area Network

15 Projektmanagement

15.1 Milestoneplan

Milestonenummer	Beschreibung	Fälligkeitsdatum
1	Lastenheft fertig	10.10.2023
2	Kostenkalkulationen fertig	24.10.2023
3	Prototypen proof of concept	21.11.2023
4	Hardwaredesign fertig	05.12.2023
5	PCB-Design fertig	09.01.2024
6	Softwareimplementierung für Integrationstest fertig	30.01.2024
7	Integration aller Komponenten	06.02.2024
8	User Interface fertiggestellt	13.02.2024
9	Abnahme durch die Projektbetreuer	12.03.2024

Tabelle 8: Milestoneplan

15.2 Arbeitstunden

Datum	Arbeitstunden	Uhrzeit	Person	verrichtete Arbeit
07.09.2023	3,5	9:50 - 13:20	Fabian Schweitzer	Datenbanktexte fertigstellen, mechanische Überlegungen für Roboterhand konkretisieren
07.09.2023	3,5	9:50 - 13:20	Amir Al-Maytah	Datenbanktexte fertigstellen, mechanische Überlegungen für Roboterhand konkretisieren
07.09.2023	3,5	9:50 - 13:20	Ladislaus Szabo	Datenbanktexte fertigstellen, mechanische Überlegungen für Roboterhand konkretisieren
12.09.2023	3,5	13:20 - 16:50	Fabian Schweitzer	Kostenkalkulationen begonnen
12.09.2023	3,5	13:20 - 16:50	Amir Al-Maytah	Testaufbau der Roboterhand mit Servomotoren, Netzteil und Potentiometern
12.09.2023	3,5	13:20 - 16:50	Ladislaus Szabo	Platinen fertig bearbeitet und Prof. Fuchsberger zur Inspektion und möglichen Bestellung gegeben
19.09.2023	3,5	13:20 - 16:50	Fabian Schweitzer	Kostenkalkulationen weitergeführt
19.09.2023	3,5	13:20 - 16:50	Amir Al-Maytah	Testaufbau der Roboterhand weitergemacht
19.09.2023	3,5	13:20 - 16:50	Ladislaus Szabo	Hardwaredesign der Messschaltungen für Strom und Spannung mittels ADC
20.09.2023	3,5	12:30 - 16:00	Fabian Schweitzer	Mindmap für Programmierung erstellt, Software Roadmap erstellt
20.09.2023	3,5	12:30 - 16:00	Amir Al-Maytah	Testaufbau Roboterhand, Konzept für die Programmierung überlegt

Datum	Arbeitstunden	Uhrzeit	Person	verrichtete Arbeit
20.09.2023	3,5	12:30 - 16:00	Ladislaus Szabo	Hardwareentwicklung Spannungs - und Strommessung, Kicad Schaltplan bearbeiten
21.09.2023	3,5	9:50 - 13:20	Fabian Schweitzer	Softwareentwicklung, Übertragungsraten der ADCs angeschaut
21.09.2023	3,5	9:50 - 13:20	Amir Al-Maytah	Überarbeitung der Mechanik
21.09.2023	3,5	9:50 - 13:20	Ladislaus Szabo	Hardwareentwicklung, Simulationen
26.09.2023	3,5	13:20 - 16:50	Fabian Schweitzer	Flexsensoren ausmessen
26.09.2023	3,5	13:20 - 16:50	Amir Al-Maytah	Servomotor ausmessen
26.09.2023	3,5	13:20 - 16:50	Ladislaus Szabo	bei beiden Messungen unterstützt
27.09.2023	3,5	12:30 - 16:00	Fabian Schweitzer	Ausmessung der Flexsensoren und Dokumentieren der Ergebnisse
27.09.2023	3,5	12:30 - 16:00	Amir Al-Maytah	Kalibrierung der Roboterhand
27.09.2023	3,5	12:30 - 16:00	Ladislaus Szabo	Versuchsaufbau Spannungsmessung mit INA129 und Hardwareentwicklung
28.09.2023	3,5	9:50 - 13:20	Fabian Schweitzer	Dokumentation und Testen der Flexsensoren
28.09.2023	3,5	9:50 - 13:20	Amir Al-Maytah	Verbesserung der Roboterhand
28.09.2023	3,5	9:50 - 13:20	Ladislaus Szabo	Hardwareentwicklung und PCB-Design, Bauteilliste aktualisieren
03.10.2023	3,5	13:20 - 16:50	Fabian Schweitzer	Software für das Auslesen der Flexsensoren geplant und Strommessung mitaufgebaut
03.10.2023	1,5	12:30 - 14:00	Amir Al-Maytah	Strommessschaltung (Servoansteuerung)

15.2 Arbeitstunden

Datum	Arbeitstunden	Uhrzeit	Person	verrichtete Arbeit
03.10.2023	3,5	13:20 - 16:50	Ladislaus Szabo	Auswertung der Strommessung am Steckbrett
04.10.2023	3,5	12:30 - 16:00	Fabian Schweitzer	Servomessung und Versuchsaufbau
04.10.2023	3,5	12:30 - 16:00	Amir Al-Maytah	Servomessung und Versuchsaufbau
04.10.2023	3,5	12:30 - 16:00	Ladislaus Szabo	Richtlinien heraussuchen und Pflichtenheft verfasst
05.10.2023	3,5	9:50 - 13:20	Fabian Schweitzer	Dokumentation der Richtlinien und das Projekthandbuch weitergemacht
05.10.2023	3,5	9:50 - 13:20	Amir Al-Maytah	Programmierung des User-Interface
05.10.2023	3,5	9:50 - 13:20	Ladislaus Szabo	Platinen fräsen und in der mechanischen Werkstatt wegen dem Fräsen von Teilen fragen
10.10.2023	3,5	13:20 - 16:50	Fabian Schweitzer	Platinen gelötet
10.10.2023	3,5	13:20 - 16:50	Amir Al-Maytah	Roboterhand zusammengebaut
10.10.2023	1,0	13:20 - 14:20	Ladislaus Szabo	Dokumentation und Hilfe beim Löten
11.10.2023	3,5	12:30 - 16:00	Fabian Schweitzer	Platinen gelötet
11.10.2023	3,5	12:30 - 16:00	Amir Al-Maytah	Roboterhand zusammengebaut
11.10.2023	3,5	12:30 - 16:00	Ladislaus Szabo	Dokumentation und Messprotokoll erstellt
12.10.2023	3,5	9:50 - 13:20	Fabian Schweitzer	Am Programm zum Auslesen der Flexsensoren weitergearbeitet
12.10.2023	3,5	9:50 - 13:20	Amir Al-Maytah	Roboterhad kalibriert
12.10.2023	3,5	9:50 - 13:20	Ladislaus Szabo	Dokumentation und Messprotokolle erstellt

Datum	Arbeitstunden	Uhrzeit	Person	verrichtete Arbeit
17.10.2023	3,5	13:20 - 16:50	Fabian Schweitzer	Bestücken der Platinen
17.10.2023	3,5	13:20 - 16:50	Amir Al-Maytah	Mechanik und erste Überlegungen für die Programmierung
17.10.2023	3,5	13:20 - 16:50	Ladislaus Szabo	Bestückung der Platinen
18.10.2023	3,5	12:30 - 16:00	Fabian Schweitzer	Flussdiagramm für die Softwareentwicklung erstellt
18.10.2023	3,5	12:30 - 16:00	Amir Al-Maytah	Programmierung der Handschuhplatine
18.10.2023	3,5	12:30 - 16:00	Ladislaus Szabo	Löten der Platinen
19.10.2023	3,5	9:50 - 13:20	Fabian Schweitzer	Programmierung der ESPs
19.10.2023	3,5	9:50 - 13:20	Amir Al-Maytah	Programmierung der ESPs
19.10.2023	3,5	9:50 - 13:20	Ladislaus Szabo	Löten der Platinen
24.10.2023	3,5	13:20 - 16:50	Fabian Schweitzer	Programmierung der ESPs und Besprechung des generellen Aufbaus der Programme mit Prof. Diemberger
24.10.2023	0,0	/	Amir Al-Maytah	/
24.10.2023	3,5	13:20 - 16:50	Ladislaus Szabo	Löten der Platinen und ausbessern von diversen Fehlern und Kurzschlüssen
18.10.2023	3,5	12:30 - 16:00	Fabian Schweitzer	Programmierung der Übertragung zwischen zwei ESPs
18.10.2023	3,5	12:30 - 16:00	Amir Al-Maytah	Programmierung der Übertragung zwischen zwei ESPs
18.10.2023	3,5	12:30 - 16:00	Ladislaus Szabo	Löten der Platinen und ausbessern von Fehlern
07.11.2023	3,5	13:20 - 16:50	Fabian Schweitzer	ESP32 Programmierung
07.11.2023	3,5	13:20 - 16:50	Amir Al-Maytah	ESP32 Programmierung
07.11.2023	3,5	13:20 - 16:50	Ladislaus Szabo	Letzter Check der Platinen und diese bei JLCPCB bestellt

15.2 Arbeitstunden

Datum	Arbeitstunden	Uhrzeit	Person	verrichtete Arbeit
09.11.2023	3,5	9:50 - 13:20	Fabian Schweitzer	ESP32 Programmierung
09.11.2023	3,5	9:50 - 13:20	Amir Al-Maytah	ESP32 Programmierung
09.11.2023	3,5	9:50 - 13:20	Ladislaus Szabo	Dokument "Hardwarebeschreibung" verfasst
21.11.2023	3,5	13:20 - 16:50	Fabian Schweitzer	Programmierung der drahtlosen Schnittstelle zwischen beiden ESPs
21.11.2023	3,5	13:20 - 16:50	Amir Al-Maytah	Programmierung der drahtlosen Schnittstelle zwischen beiden ESPs
21.11.2023	3,5	13:20 - 16:50	Ladislaus Szabo	Testen der neuen Platinen
22.11.2023	0,0	11:30 - 16:00	Fabian Schweitzer	Programmierung der Übertragung zwischen zwei ESPs
22.11.2023	4,5	11:30 - 16:00	Amir Al-Maytah	Programmierung der Übertragung zwischen zwei ESPs
22.11.2023	4,5	11:30 - 16:00	Ladislaus Szabo	Löten der Platinen und ausbessern von Fehlern
23.11.2023	3,5	9:50 - 13:20	Fabian Schweitzer	ESP32 Programmierung und Platinentesting
23.11.2023	3,5	9:50 - 13:20	Amir Al-Maytah	ESP32 Programmierung und Platinentesting
23.11.2023	3,5	9:50 - 13:20	Ladislaus Szabo	Testen und Durchmesen der Platinen gemeinsam mit Softwareüberprüfung
28.11.2023	3,5	13:20 - 16:50	Fabian Schweitzer	erste Servoansteuerung mit der neuen Platine
28.11.2023	3,5	13:20 - 16:50	Amir Al-Maytah	Weiterentwicklung der Roboterhand und erneutes Testen der Handschuhplatine nach beheben eines Lötfehlers
28.11.2023	3,5	13:20 - 16:50	Ladislaus Szabo	Fehlersuche an den Platinen und Messtabellen für die Messschaltung der Flexsensoren erstellt

Datum	Arbeitstunden	Uhrzeit	Person	verrichtete Arbeit
29.11.2023	3,5	12:30 - 16:00	Fabian Schweitzer	Programmierung des ESP Senderprogramms
29.11.2023	3,5	12:30 - 16:00	Amir Al-Maytah	Programmierung des ESP Empfängerprogramms
29.11.2023	3,5	12:30 - 16:00	Ladislaus Szabo	Unterstützung bei der Programmierung
30.11.2023	3,5	9:50 - 13:20	Fabian Schweitzer	Überlegungen für Algorithmus zur Korrektur der Flexsensortoleranz
30.11.2023	3,5	9:50 - 13:20	Amir Al-Maytah	Entwicklung des Algorithmus für Fehlerwertkorrektur auf der Roboterhandplatine
30.11.2023	3,5	9:50 - 13:20	Ladislaus Szabo	ESPnow Interface testing und Datenübertragung
05.12.2023	1,5	12:30 - 14:00	Fabian Schweitzer	Testen der Strommessung der Roboterhandplatine
05.12.2023	0,0	/	Amir Al-Maytah	/
05.12.2023	1,5	12:30 - 14:00	Ladislaus Szabo	Testen der Strommessung der Roboterhandplatine
06.12.2023	3,5	12:30 - 16:00	Fabian Schweitzer	ESP Programmierung
06.12.2023	3,5	12:30 - 16:00	Amir Al-Maytah	ESP Programmierung
06.12.2023	0,0	/	Ladislaus Szabo	/
07.12.2023	3,5	9:50 - 13:20	Fabian Schweitzer	ESP Programmierung und erste Inbetriebnahme aller Komponenten gemeinsam
07.12.2023	3,5	9:50 - 13:20	Amir Al-Maytah	ESP Programmierung und erste Inbetriebnahme aller Komponenten gemeinsam
07.12.2023	3,5	9:50 - 13:20	Ladislaus Szabo	Überprüfung aller Schaltungsteile bei der ersten Komplettinbetriebnahme
12.12.2023	3,5	13:20 - 16:50	Fabian Schweitzer	ESP Programmierung
12.12.2023	3,5	13:20 - 16:50	Amir Al-Maytah	Roboterhand 3D-Design

15.2 Arbeitstunden

Datum	Arbeitstunden	Uhrzeit	Person	verrichtete Arbeit
12.12.2023	3,5	13:20 - 16:50	Ladislaus Szabo	Platinendesign letzte Iteration
13.12.2023	3,5	12:30 - 16:00	Fabian Schweitzer	ESP Programmierung
13.12.2023	3,5	12:30 - 16:00	Amir Al-Maytah	Roboterhand 3D-Design
13.12.2023	3,5	12:30 - 16:00	Ladislaus Szabo	Platinendesign letzte Iteration
14.12.2023	3,5	9:50 - 13:20	Fabian Schweitzer	ESP Programmierung
14.12.2023	3,5	9:50 - 13:20	Amir Al-Maytah	Roboterhand 3D-Design
14.12.2023	3,5	9:50 - 13:20	Ladislaus Szabo	Platinendesign letzte Iteration
19.12.2023	3,5	13:20 - 16:50	Fabian Schweitzer	ESP32 Programmierung
19.12.2023	3,5	13:20 - 16:50	Amir Al-Maytah	Design der Roboterhand
19.12.2023	3,5	13:20 - 16:50	Ladislaus Szabo	UI Programmierung
20.12.2023	3,5	12:30 - 16:00	Fabian Schweitzer	ESP32 Programmierung
20.12.2023	3,5	12:30 - 16:00	Amir Al-Maytah	Design der Roboterhand
20.12.2023	3,5	12:30 - 16:00	Ladislaus Szabo	UI Programmierung
21.12.2023	3,5	9:50 - 13:20	Fabian Schweitzer	ESP32 Programmierung
21.12.2023	3,5	9:50 - 13:20	Amir Al-Maytah	Design der Roboterhand
21.12.2023	0.0	/	Ladislaus Szabo	/
09.01.2024	3,5	13:20 - 16:50	Fabian Schweitzer	ESP Programmierung
09.01.2024	3,5	13:20 - 16:50	Amir Al-Maytah	Modellierung der Roboterhand
09.01.2024	3,5	13:20 - 16:50	Ladislaus Szabo	Handschuh mit Sensoren bestückt und verdrahtet
10.01.2024	3,5	12:30 - 16:00	Fabian Schweitzer	Handschuhplatine programmiert
10.01.2024	3,5	12:30 - 16:00	Amir Al-Maytah	C++ Dateien für Roboterhand zusammengeführt
10.01.2024	3,5	12:30 - 16:00	Ladislaus Szabo	UI Programmierung
11.01.2024	3,5	9:50 - 13:20	Fabian Schweitzer	ESP Programmierung
11.01.2024	3,5	9:50 - 13:20	Amir Al-Maytah	Roboterhand - 3D Druck
11.01.2024	3,5	9:50 - 13:20	Ladislaus Szabo	UI Programmierung

Datum	Arbeitstunden	Uhrzeit	Person	verrichtete Arbeit
16.01.2024	3,5	13:20 - 16:50	Fabian Schweitzer	ESP Programmierung
16.01.2024	3,5	13:20 - 16:50	Amir Al-Maytah	ESP Programmierung
16.01.2024	3,5	/	Ladislaus Szabo	/
17.01.2024	3,5	12:30 - 16:00	Fabian Schweitzer	ESP Programmierung
17.01.2024	3,5	12:30 - 16:00	Amir Al-Maytah	Mechanik der Roboterhand verbessert
17.01.2024	3,5	/	Ladislaus Szabo	/
18.01.2024	3,5	9:50 - 13:20	Fabian Schweitzer	ESP Programmierung
18.01.2024	3,5	9:50 - 13:20	Amir Al-Maytah	ESP Programmierung
18.01.2024	3,5	9:50 - 13:20	Ladislaus Szabo	finalen Schaltlan der Handschuhplatine erstellt
23.01.2024	3,5	13:20 - 16:50	Fabian Schweitzer	ESP Programmierung
23.01.2024	3,5	13:20 - 16:50	Amir Al-Maytah	ESP Programmierung
23.01.2024	3,5	13:20 - 16:50	Ladislaus Szabo	ESP Programmierung
24.01.2024	3,5	12:30 - 16:00	Fabian Schweitzer	ESP Programmierung
24.01.2024	3,5	12:30 - 16:00	Amir Al-Maytah	Mechanik der Roboterhand zum 3D drucken fertig gemacht
24.01.2024	3,5	12:30 - 16:00	Ladislaus Szabo	Dokumentation fortgesetzt
25.01.2024	3,5	9:50 - 13:20	Fabian Schweitzer	Tag der offenen Tür Projektvorstellung
25.01.2024	3,5	9:50 - 13:20	Amir Al-Maytah	Tag der offenen Tür Projektvorstellung
25.01.2024	3,5	9:50 - 13:20	Ladislaus Szabo	Tag der offenen Tür Projektvorstellung
30.01.2024	0,0	/	Fabian Schweitzer	/
30.01.2024	0,0	/	Amir Al-Maytah	/
30.01.2024	0,0	/	Ladislaus Szabo	/
31.01.2024	3,5	12:30 - 16:00	Fabian Schweitzer	Strommessung der Roboterhandplatine in Betrieb genommen
31.01.2024	3,5	12:30 - 16:00	Amir Al-Maytah	Zusammenbau der gedruckten Teile der Mechanik

15.2 Arbeitstunden

Datum	Arbeitstunden	Uhrzeit	Person	verrichtete Arbeit
31.01.2024	3,5	12:30 - 16:00	Ladislaus Szabo	Dokumentation fortgesetzt und beim Zusammenbau der Mechanik geholfen
01.02.2024	3,5	9:50 - 13:20	Fabian Schweitzer	Finetuning der Sensorik am Handschuh
01.02.2024	3,5	9:50 - 13:20	Amir Al-Maytah	Feinsjustierung der Mechanik
01.02.2024	3,5	9:50 - 13:20	Ladislaus Szabo	Dokumentation fortgeführt und Verbesserungen für die Mechanik überlegt
13.02.2024	0,0	/	Fabian Schweitzer	/
13.02.2024	3,5	13:20 - 16:50	Amir Al-Maytah	Feinsjustierung der Mechanik
13.02.2024	3,5	13:20 - 16:50	Ladislaus Szabo	Dokumentation fortgeführt
14.02.2024	3,5	12:30 - 16:00	Fabian Schweitzer	an der Dokumentation weitergearbeitet
14.02.2024	3,5	12:30 - 16:00	Amir Al-Maytah	an der Dokumentation weitergearbeitet
14.02.2024	3,5	12:30 - 16:00	Ladislaus Szabo	an der Dokumentation weitergearbeitet
15.02.2024	3,5	9:50 - 13:20	Fabian Schweitzer	an der Dokumentation weitergearbeitet
15.02.2024	3,5	9:50 - 13:20	Amir Al-Maytah	an der Dokumentation weitergearbeitet
15.02.2024	3,5	9:50 - 13:20	Ladislaus Szabo	an der Dokumentation weitergearbeitet
20.02.2024	3,5	13:20 - 16:50	Fabian Schweitzer	an der Dokumentation weitergearbeitet
20.02.2024	3,5	13:20 - 16:50	Amir Al-Maytah	Feinjustierung der Mechanik und weiterarbeiten an der Dokumentation
20.02.2024	3,5	13:20 - 16:50	Ladislaus Szabo	Feinjustierung der Mechanik und weiterarbeiten an der Dokumentation

Datum	Arbeitstunden	Uhrzeit	Person	verrichtete Arbeit
21.02.2024	3,5	12:30 - 16:00	Fabian Schweitzer	an der Dokumentation weitergearbeitet
21.02.2024	3,5	12:30 - 16:00	Amir Al-Maytah	an der Dokumentation weitergearbeitet
21.02.2024	3,5	12:30 - 16:00	Ladislaus Szabo	an der Dokumentation weitergearbeitet
22.02.2024	3,5	9:50 - 13:20	Fabian Schweitzer	an der Dokumentation weitergearbeitet
22.02.2024	3,5	9:50 - 13:20	Amir Al-Maytah	an der Dokumentation weitergearbeitet
22.02.2024	3,5	9:50 - 13:20	Ladislaus Szabo	an der Dokumentation weitergearbeitet
27.02.2024	3,5	13:20 - 16:50	Fabian Schweitzer	an der Dokumentation weitergearbeitet
27.02.2024	3,5	13:20 - 16:50	Amir Al-Maytah	an der Dokumentation weitergearbeitet
27.02.2024	3,5	13:20 - 16:50	Ladislaus Szabo	an der Dokumentation weitergearbeitet
28.02.2024	3,5	12:30 - 16:00	Fabian Schweitzer	an der Dokumentation weitergearbeitet
28.02.2024	3,5	12:30 - 16:00	Amir Al-Maytah	an der Dokumentation weitergearbeitet
28.02.2024	3,5	12:30 - 16:00	Ladislaus Szabo	an der Dokumentation weitergearbeitet
29.02.2024	3,5	9:50 - 13:20	Fabian Schweitzer	an der Dokumentation weitergearbeitet
29.02.2024	3,5	9:50 - 13:20	Amir Al-Maytah	an der Dokumentation weitergearbeitet
29.02.2024	3,5	9:50 - 13:20	Ladislaus Szabo	an der Dokumentation weitergearbeitet
05.03.2024	3,5	13:20 - 16:50	Fabian Schweitzer	an der Dokumentation weitergearbeitet
05.03.2024	3,5	13:20 - 16:50	Amir Al-Maytah	an der Dokumentation weitergearbeitet
05.03.2024	3,5	13:20 - 16:50	Ladislaus Szabo	an der Dokumentation weitergearbeitet

15.2 Arbeitstunden

Datum	Arbeitstunden	Uhrzeit	Person	verrichtete Arbeit
06.03.2024	3,5	12:30 - 16:00	Fabian Schweitzer	an der Dokumentation weitergearbeitet
06.03.2024	3,5	12:30 - 16:00	Amir Al-Maytah	an der Dokumentation weitergearbeitet
06.03.2024	3,5	12:30 - 16:00	Ladislaus Szabo	an der Dokumentation weitergearbeitet
07.03.2024	3,5	9:50 - 13:20	Fabian Schweitzer	an der Dokumentation weitergearbeitet
07.03.2024	3,5	9:50 - 13:20	Amir Al-Maytah	an der Dokumentation weitergearbeitet
07.03.2024	3,5	9:50 - 13:20	Ladislaus Szabo	an der Dokumentation weitergearbeitet
12.03.2024	3,5	13:20 - 16:50	Fabian Schweitzer	Finetuning an der Roboterhand und Adaptierung der Software
12.03.2024	3,5	13:20 - 16:50	Amir Al-Maytah	Finetuning an der Roboterhand und Adaptierung der Software
12.03.2024	3,5	13:20 - 16:50	Ladislaus Szabo	an der Dokumentation weitergearbeitet
13.03.2024	3,5	12:30 - 16:00	Fabian Schweitzer	Projekthandbuch für die Werkstatt bearbeitet
13.03.2024	3,5	12:30 - 16:00	Amir Al-Maytah	Projekthandbuch für die Werkstatt bearbeitet
13.03.2024	3,5	12:30 - 16:00	Ladislaus Szabo	Projekthandbuch für die Werkstatt bearbeitet
14.03.2024	3,5	9:50 - 13:20	Fabian Schweitzer	an der Dokumentation weitergearbeitet
14.03.2024	3,5	9:50 - 13:20	Amir Al-Maytah	an der Dokumentation weitergearbeitet
14.03.2024	3,5	9:50 - 13:20	Ladislaus Szabo	an der Dokumentation weitergearbeitet
19.03.2024	0,0	13:20 - 16:50	Fabian Schweitzer	krank
19.03.2024	3,5	13:20 - 16:50	Amir Al-Maytah	an der Dokumentation weitergearbeitet
19.03.2024	3,5	13:20 - 16:50	Ladislaus Szabo	an der Dokumentation weitergearbeitet

Datum	Arbeitstunden	Uhrzeit	Person	verrichtete Arbeit
20.03.2024	3,5	12:30 - 16:00	Fabian Schweitzer	an der Dokumentation weitergearbeitet
20.03.2024	3,5	12:30 - 16:00	Amir Al-Maytah	an der Dokumentation weitergearbeitet
20.03.2024	3,5	12:30 - 16:00	Ladislaus Szabo	an der Dokumentation weitergearbeitet
21.03.2024	3,5	9:50 - 13:20	Fabian Schweitzer	an der Dokumentation weitergearbeitet
21.03.2024	3,5	9:50 - 13:20	Amir Al-Maytah	an der Dokumentation weitergearbeitet
21.03.2024	3,5	9:50 - 13:20	Ladislaus Szabo	an der Dokumentation weitergearbeitet

Gesamtstundenanzahl

Fabian Schweitzer: 211,5

Amir Al-Maytah: 219,5

Ladislaus Szabo: 209

16 Programme, Installationen und Plugins

16.1 Fusion 360

Fusion 360 ist eine CAD-Software, die es ermöglicht 3D-Modelle zu erstellen, diese zu bearbeiten und anschließend zu exportieren.

16.2 UltiMaker Cura

Ultimaker Cura ist eine Software, die es ermöglicht 3D-Modelle für den 3D-Druck vorzubereiten und Problemstellen auszubessern. Die Software bietet einige Einstellmöglichkeiten, wie beispielsweise für das Slicen von Objekten.

16.3 KiCad

KiCad ist ein Tool zum Erstellen von Schaltplänen und Platinenlayouts. Es können Footprints zugewiesen, Schaltungsfunktionen überprüft und anschließend Bauteile auf einem Platinenmodell angeordnet werden.

16.4 Arduino IDE

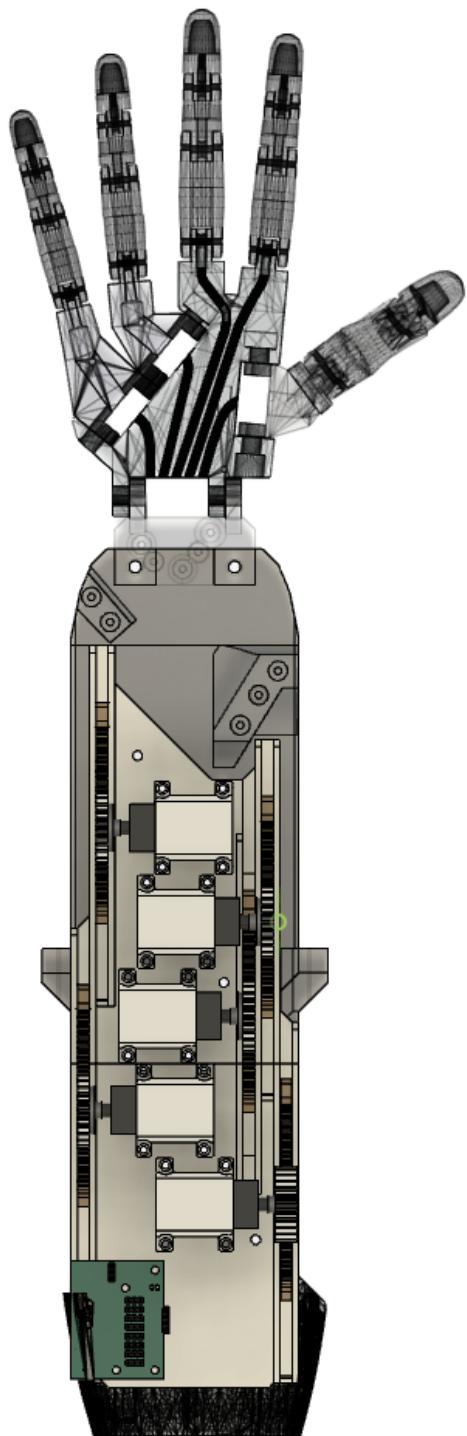
Die Arduino IDE ist eine Entwicklungsumgebung zur Programmierung von Arduino-Mikrokontrollern. Durch diverse Plugins können auch andere Mikrokontakte programmiert werden, wie in unserem Fall der ESP23.

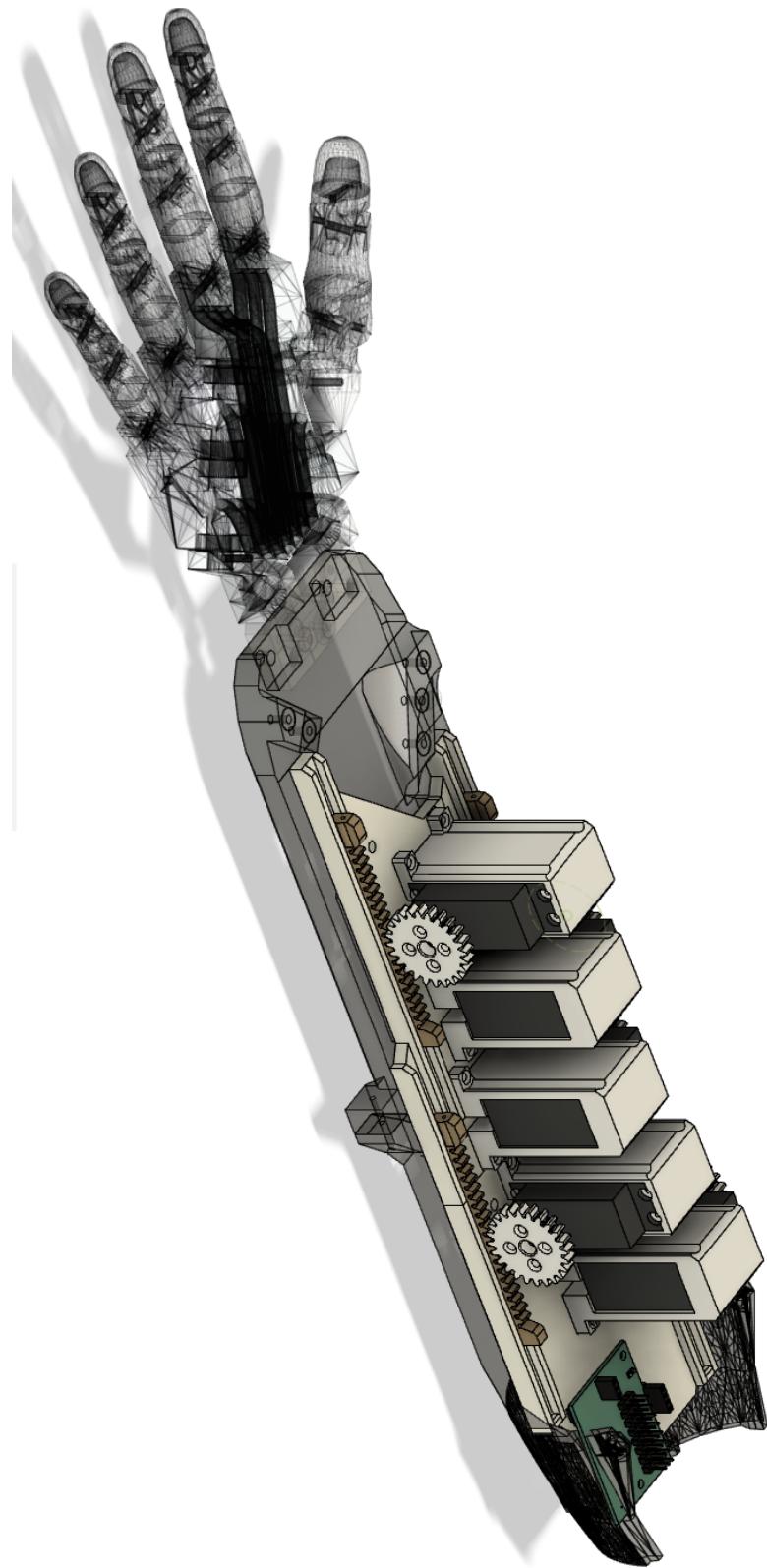
16.5 QT Framework

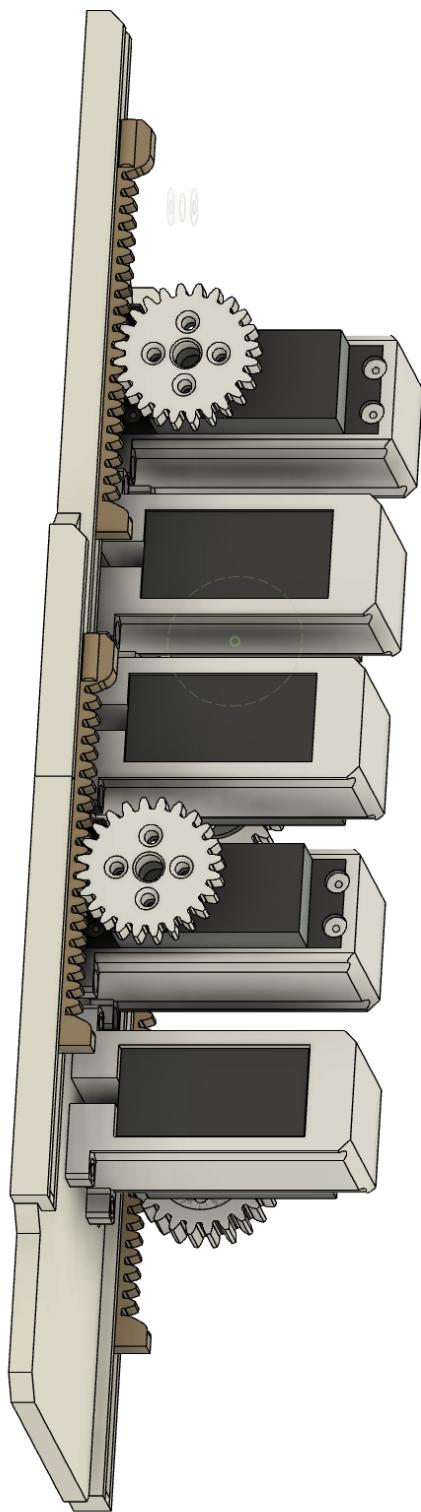
QT ist ein Softwareentwicklungstool, das eine plattformunabhängige Programmierung von Anwendungen ermöglicht. Apps können ohne Änderungen des Quellcodes für Linux, Windows und Mac kompiliert werden. Es können ebenfalls Mobile-Anwendungen erstellt werden.

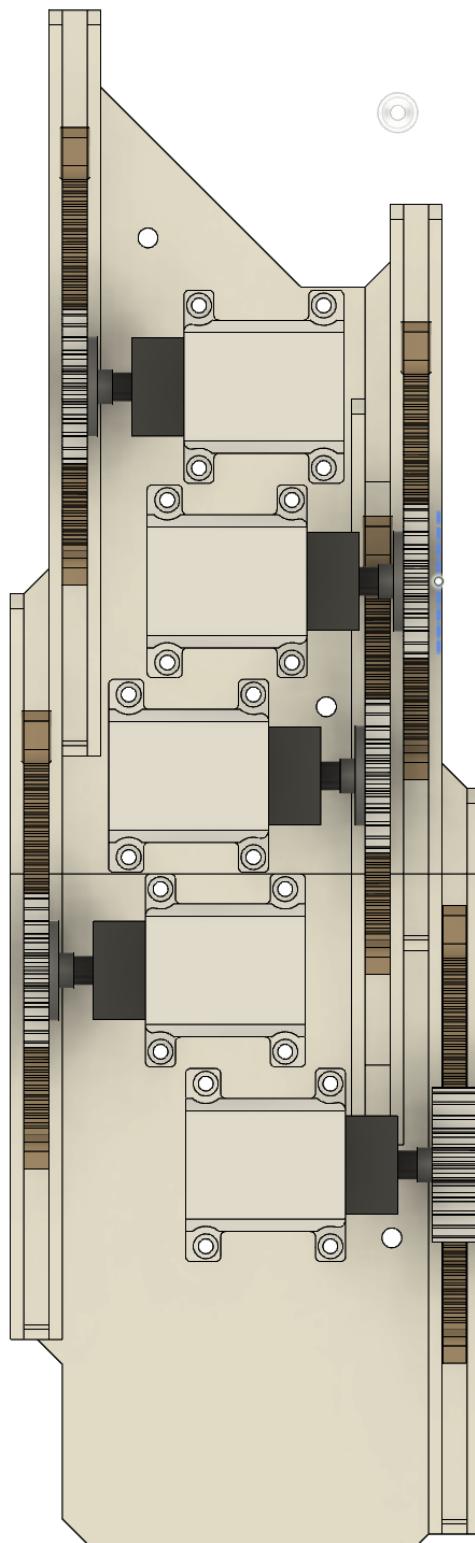
17 Fertigungsunterlagen

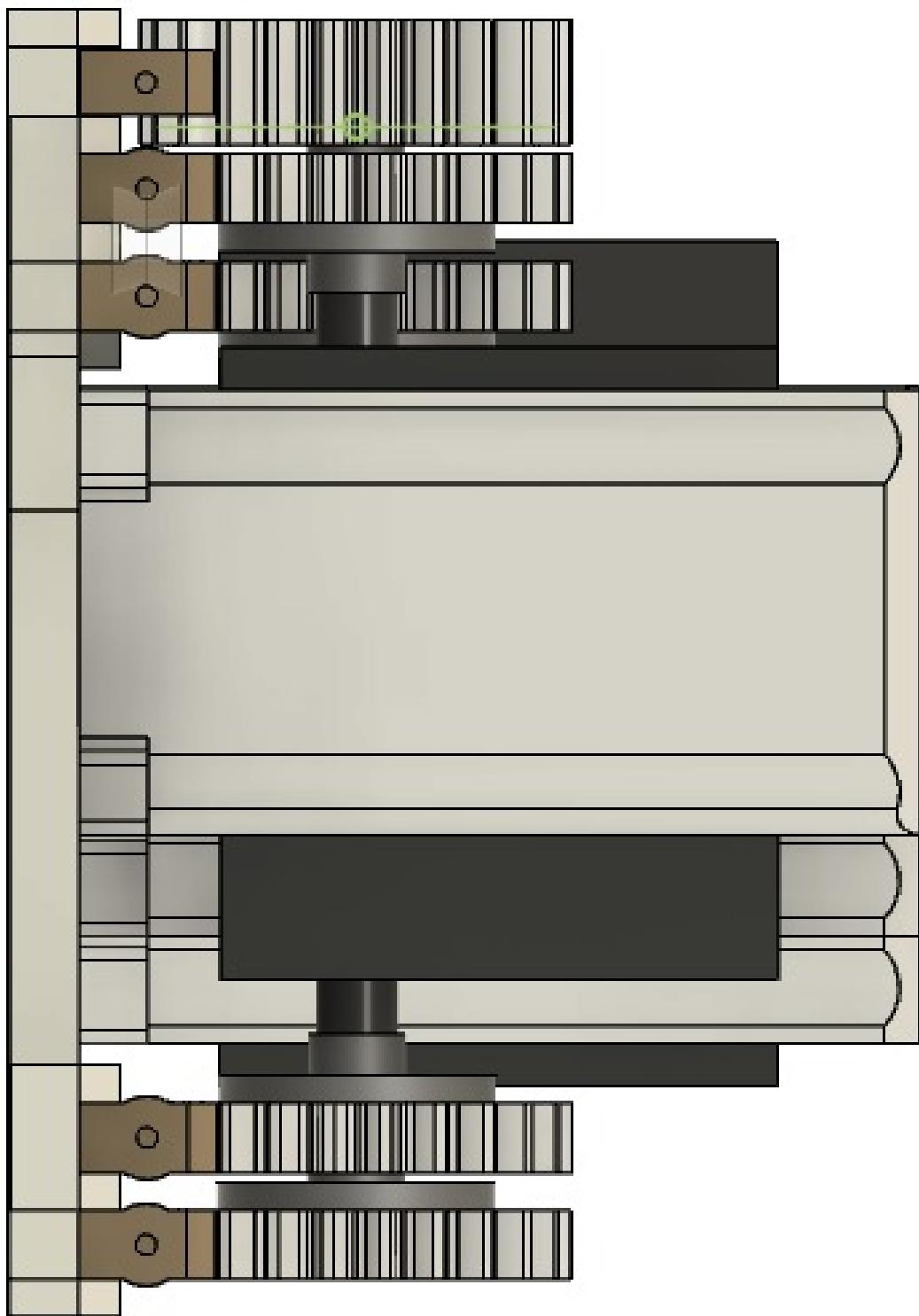
17.1 Mechanik

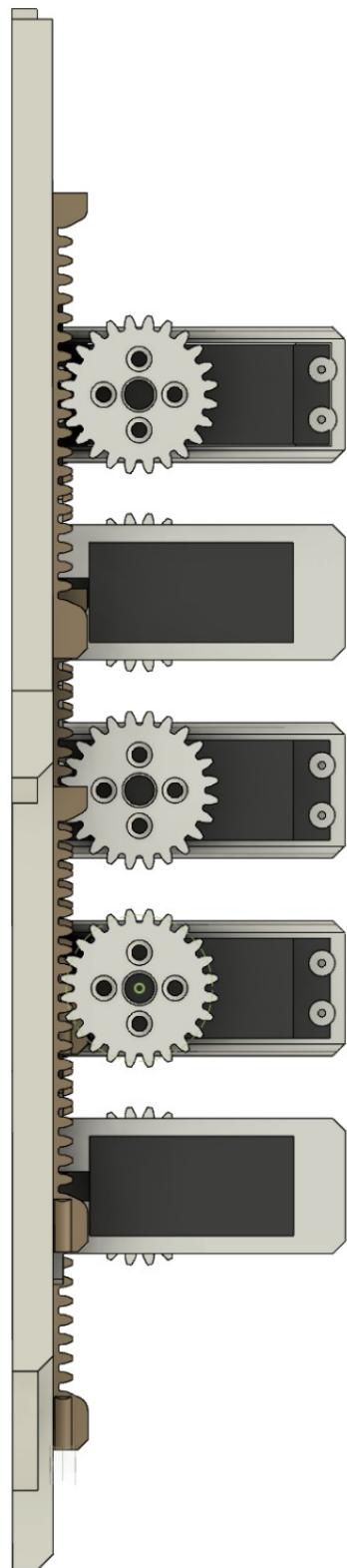


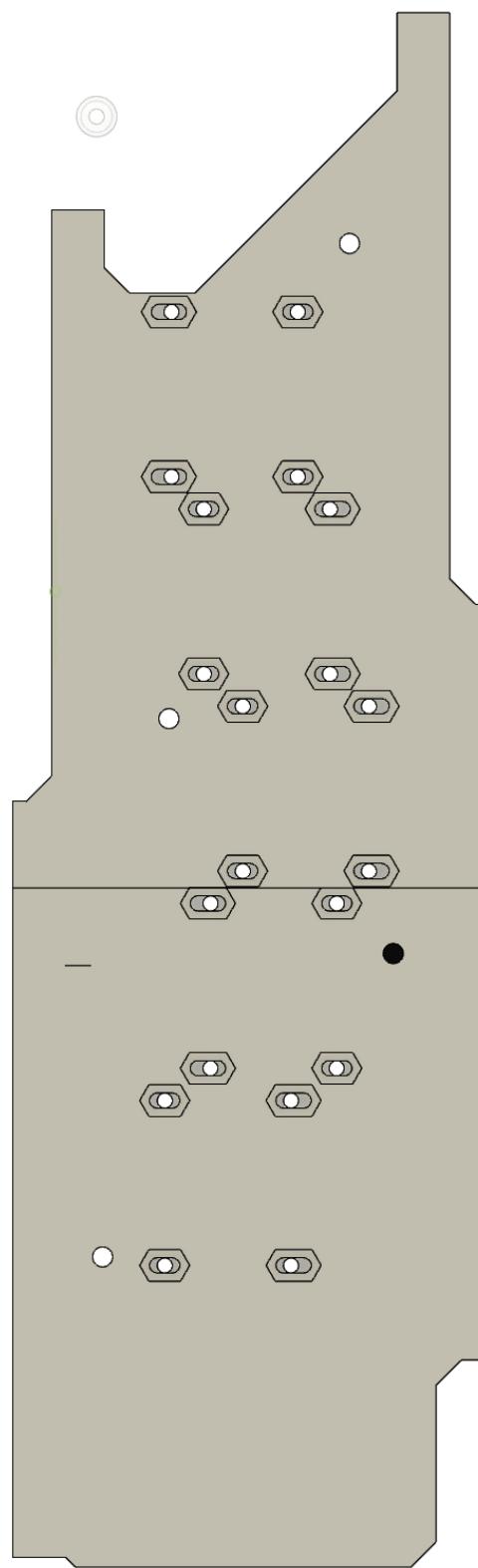


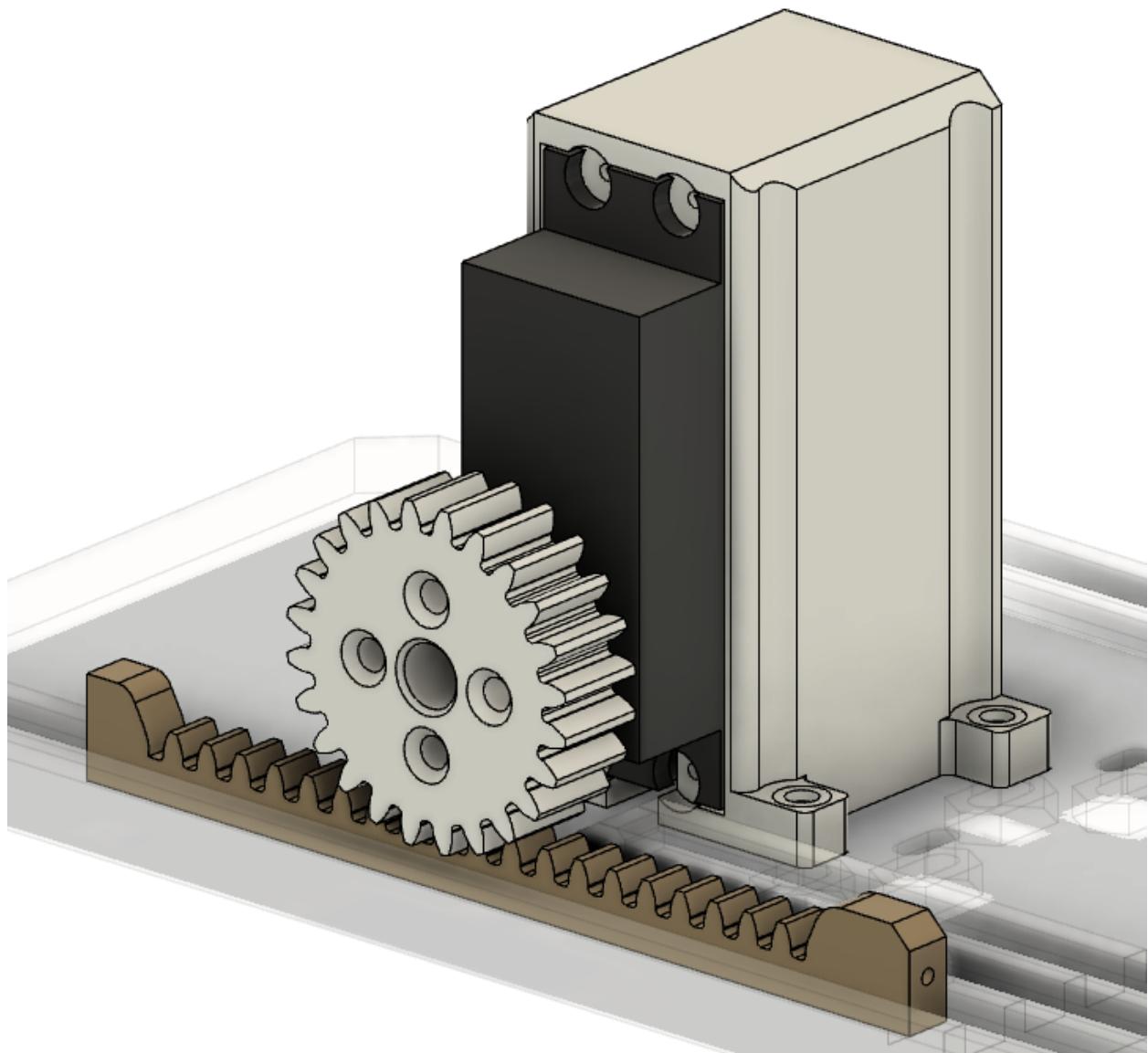


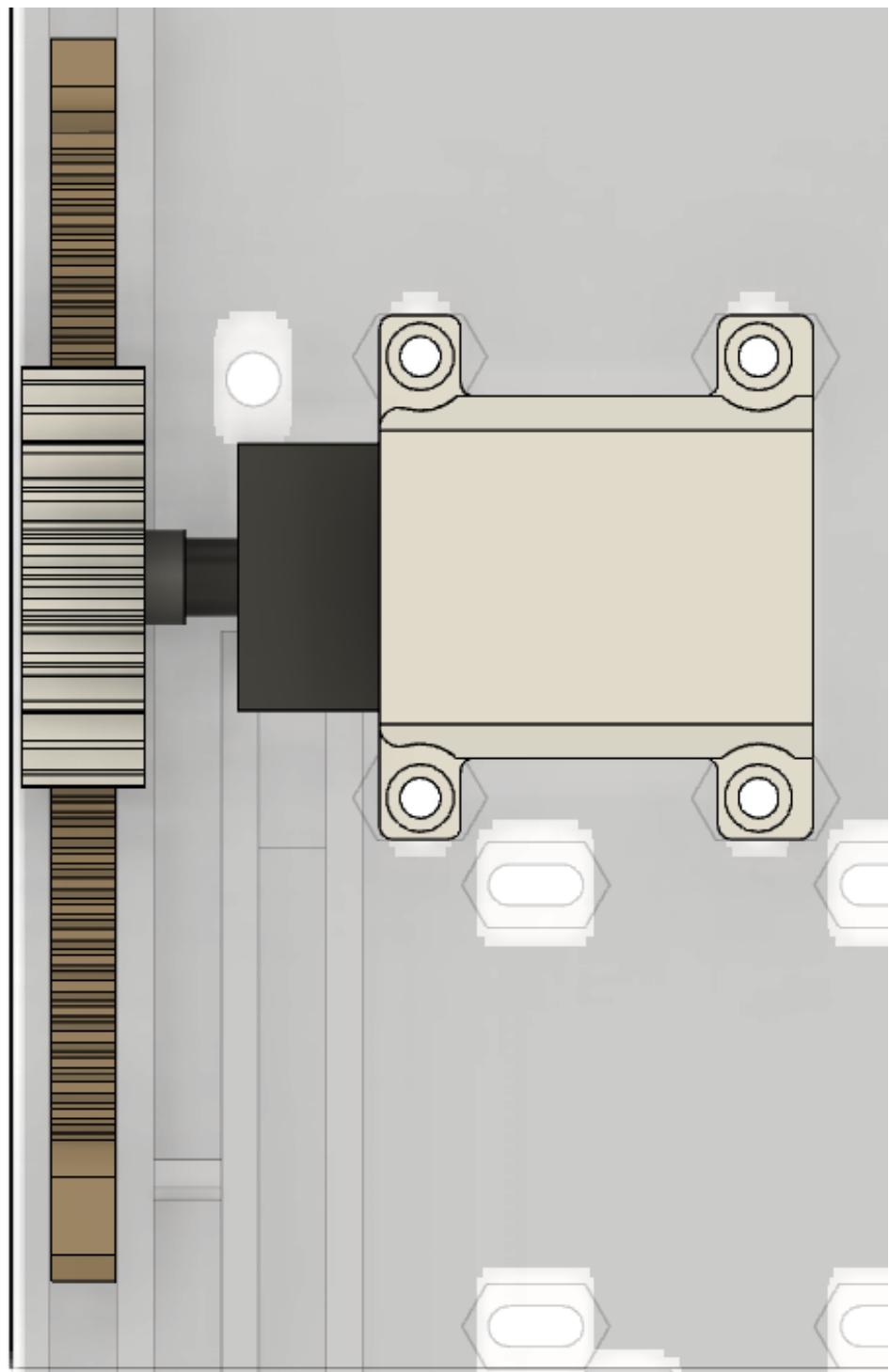


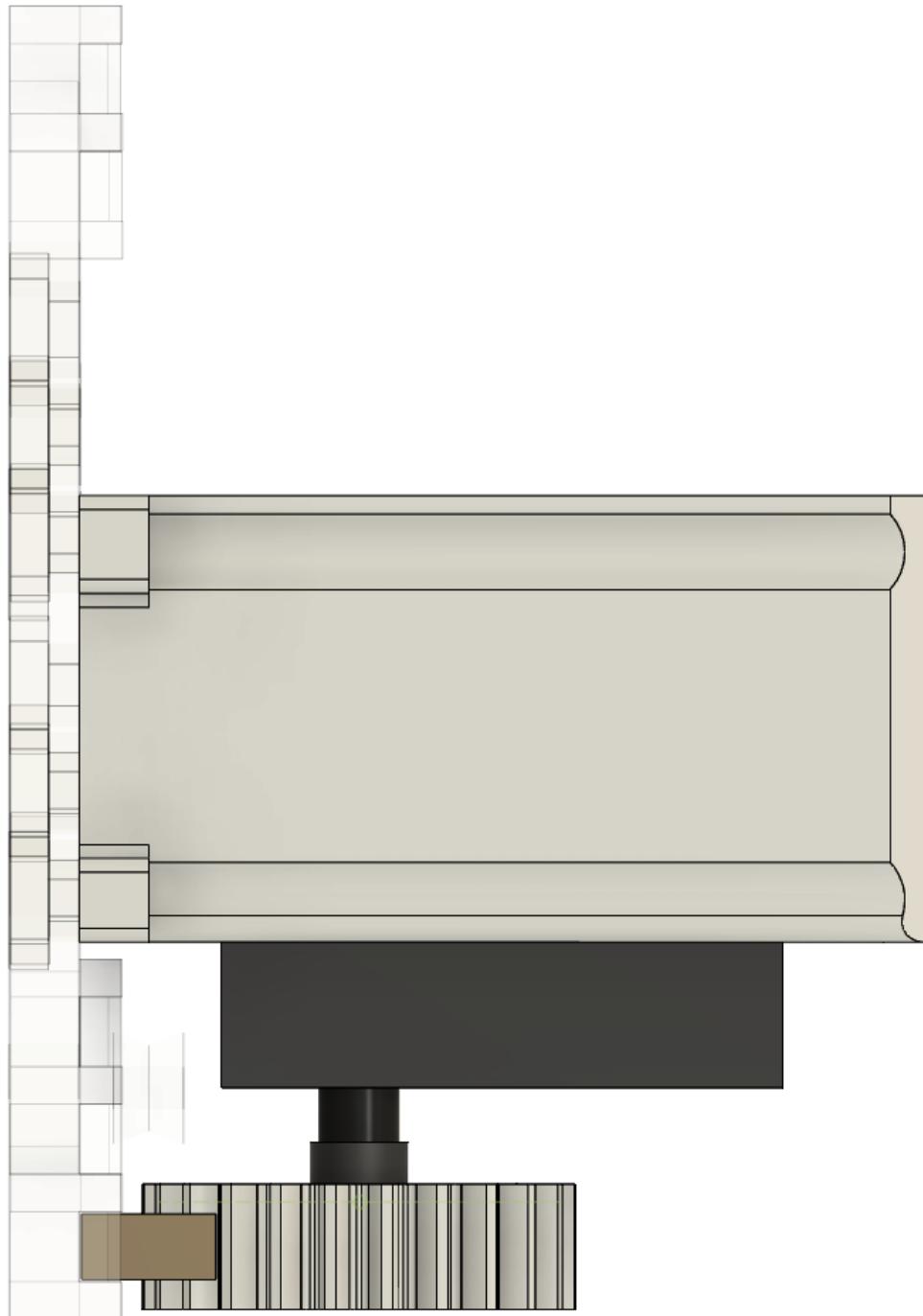


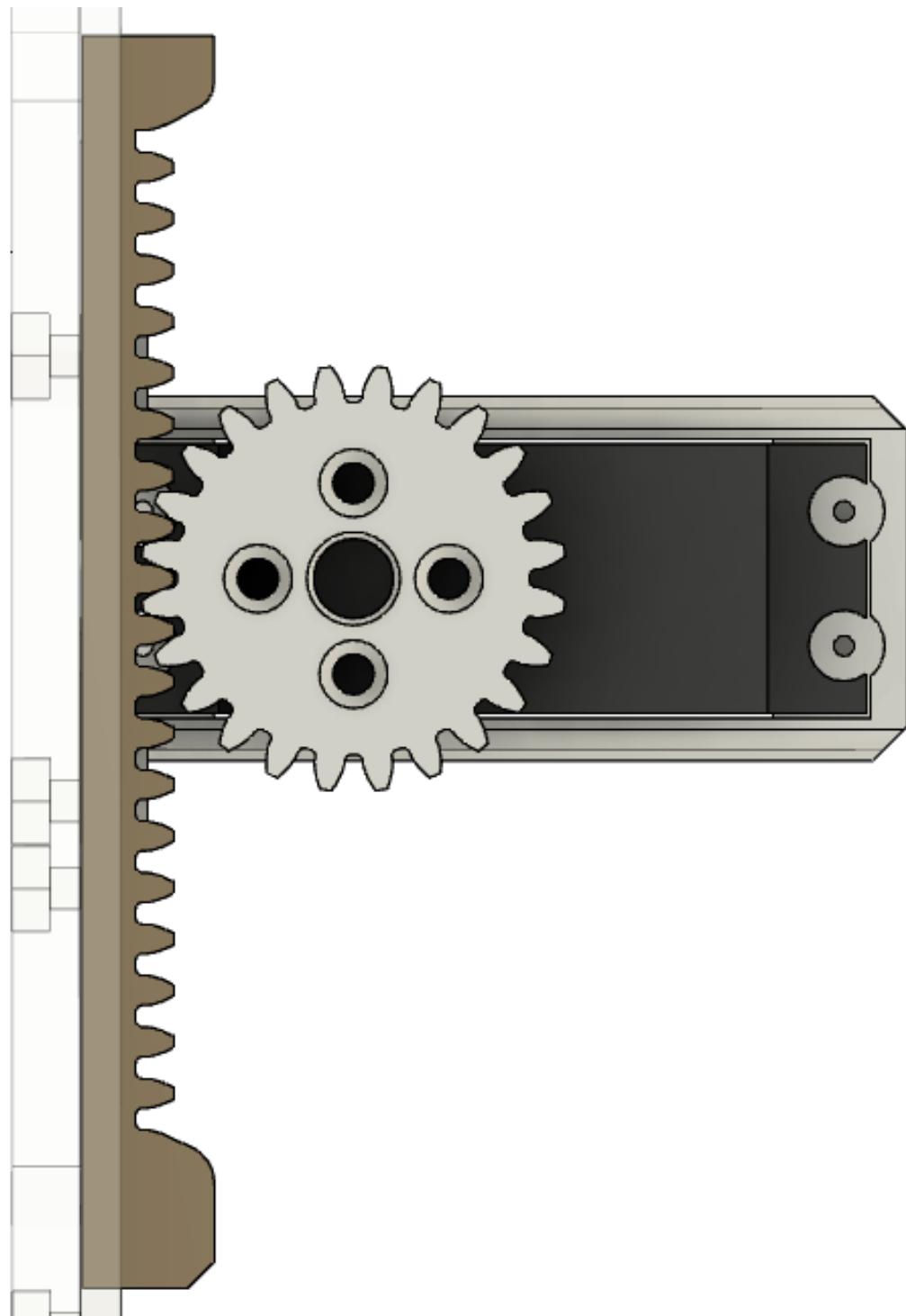










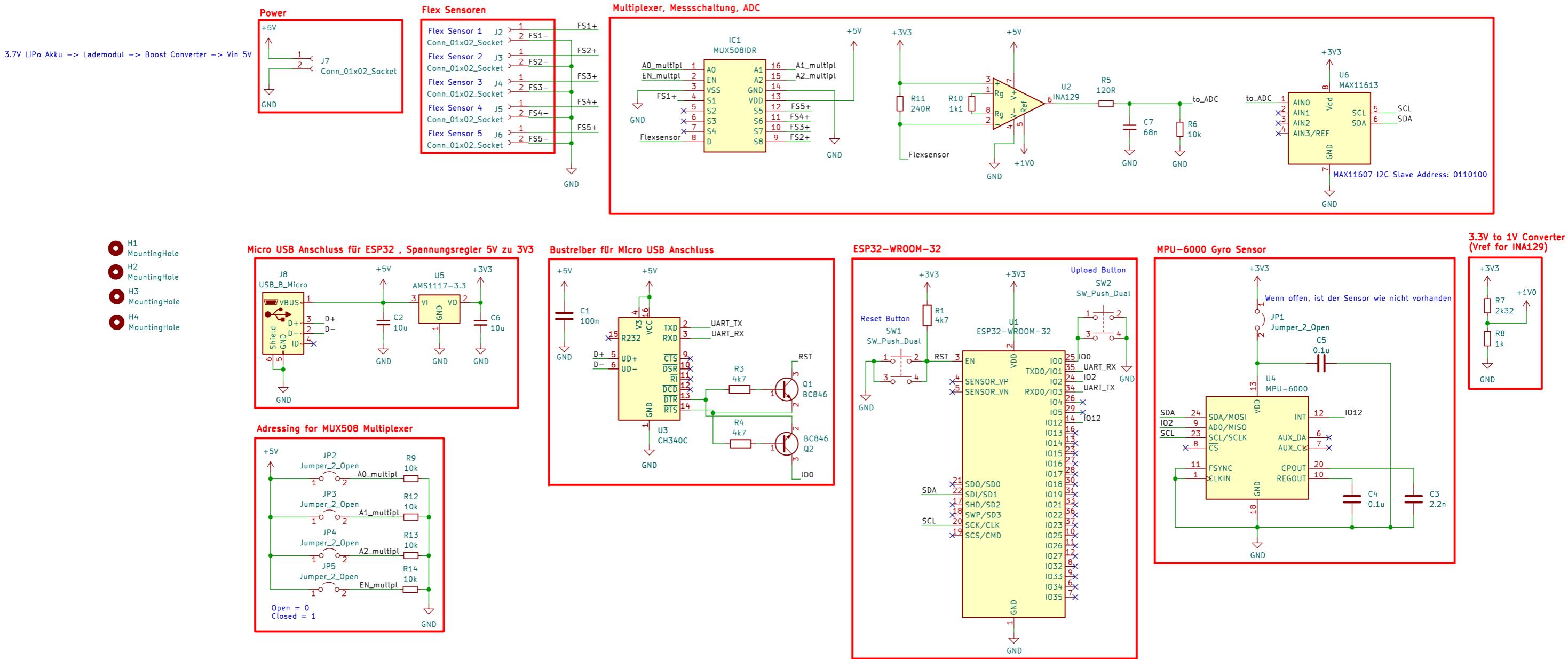


17.2 Hardware

17.2.1 Stromlaufpläne

siehe kommende Seiten !

Handschoen



erste Version

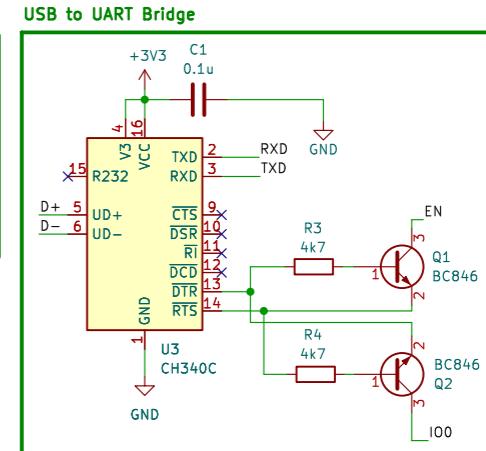
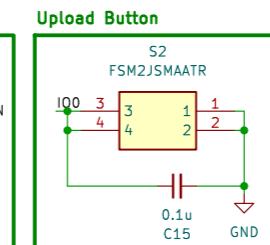
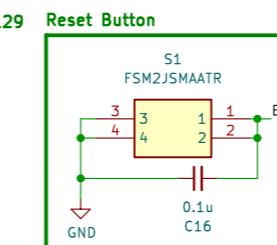
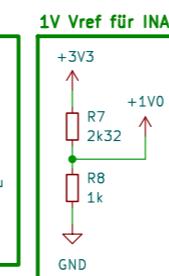
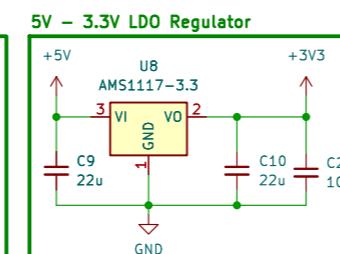
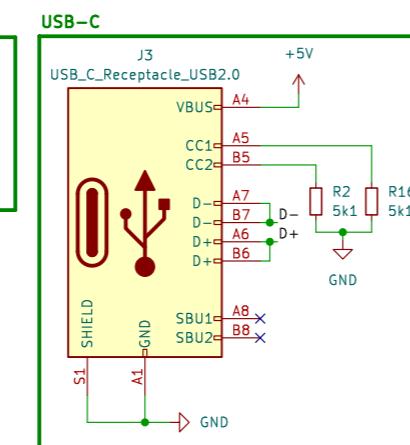
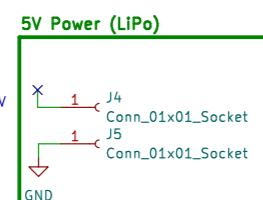
Sheet: /
File: Handschuh.kicad_sch

Title: Schaltplan_Handschuh
Size: A3 Date: 2023-06-27
KiCad E.D.A. kicad 7.0.7

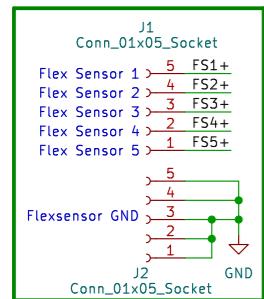
Rev: v1
Id: 1/1

Handschoen

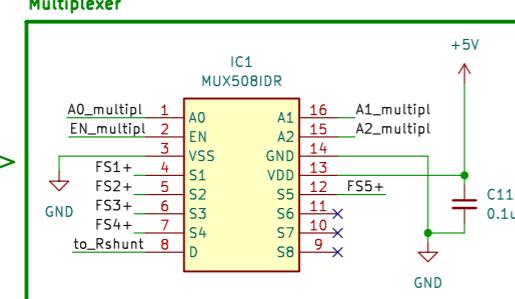
3.7V LiPo Akku -> Lademodul -> Boost Converter -> Vin 5V



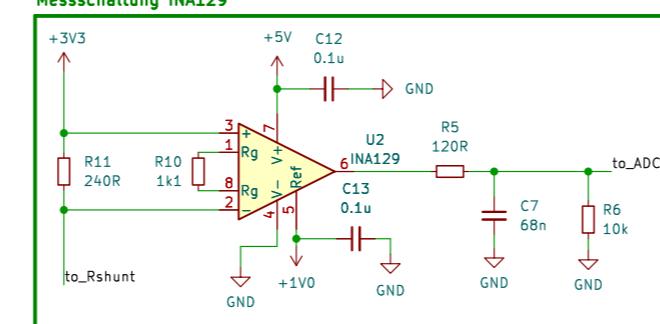
Anschlüsse Flexsensoren



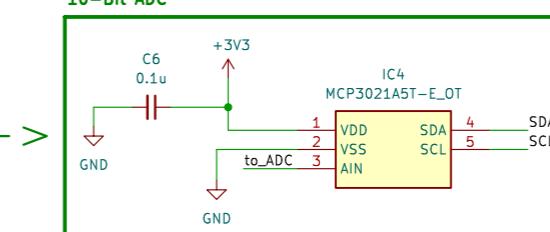
Multiplexer



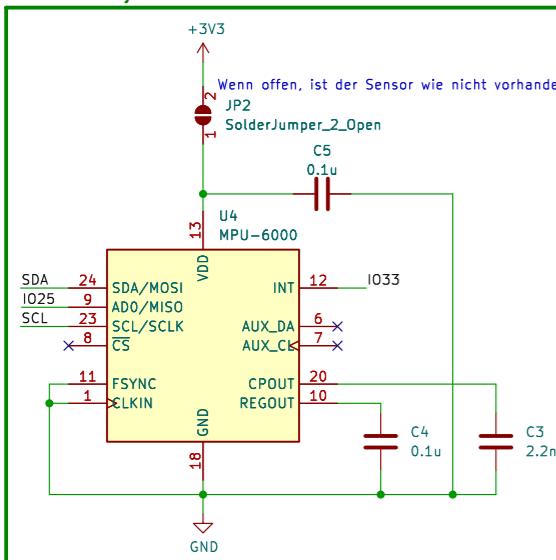
Messschaltung INA129



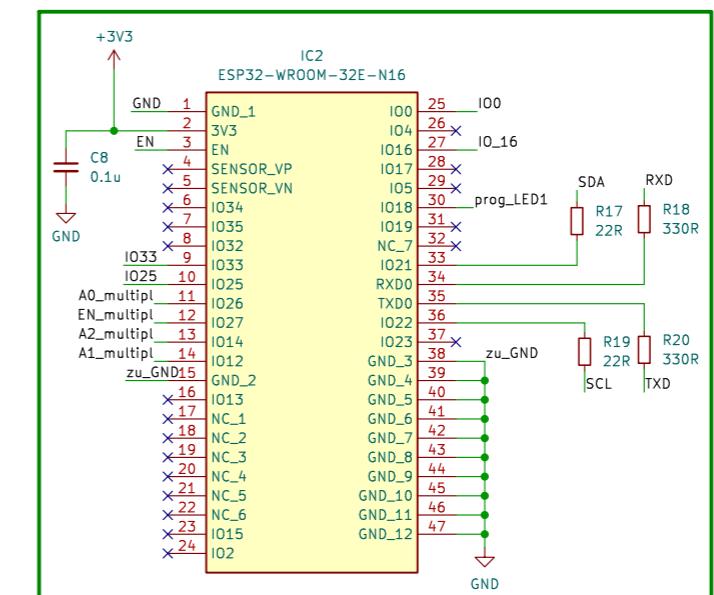
10-Bit ADC



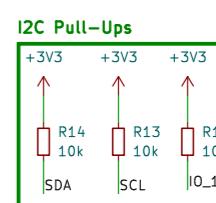
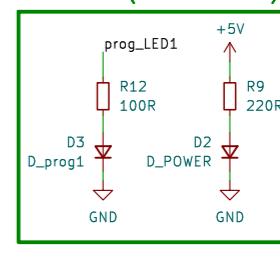
MPU-6000 Gyro Sensor



ESP32-WROOM-32E-N16



Power LEDs (Transmitter LED)



zweite Version

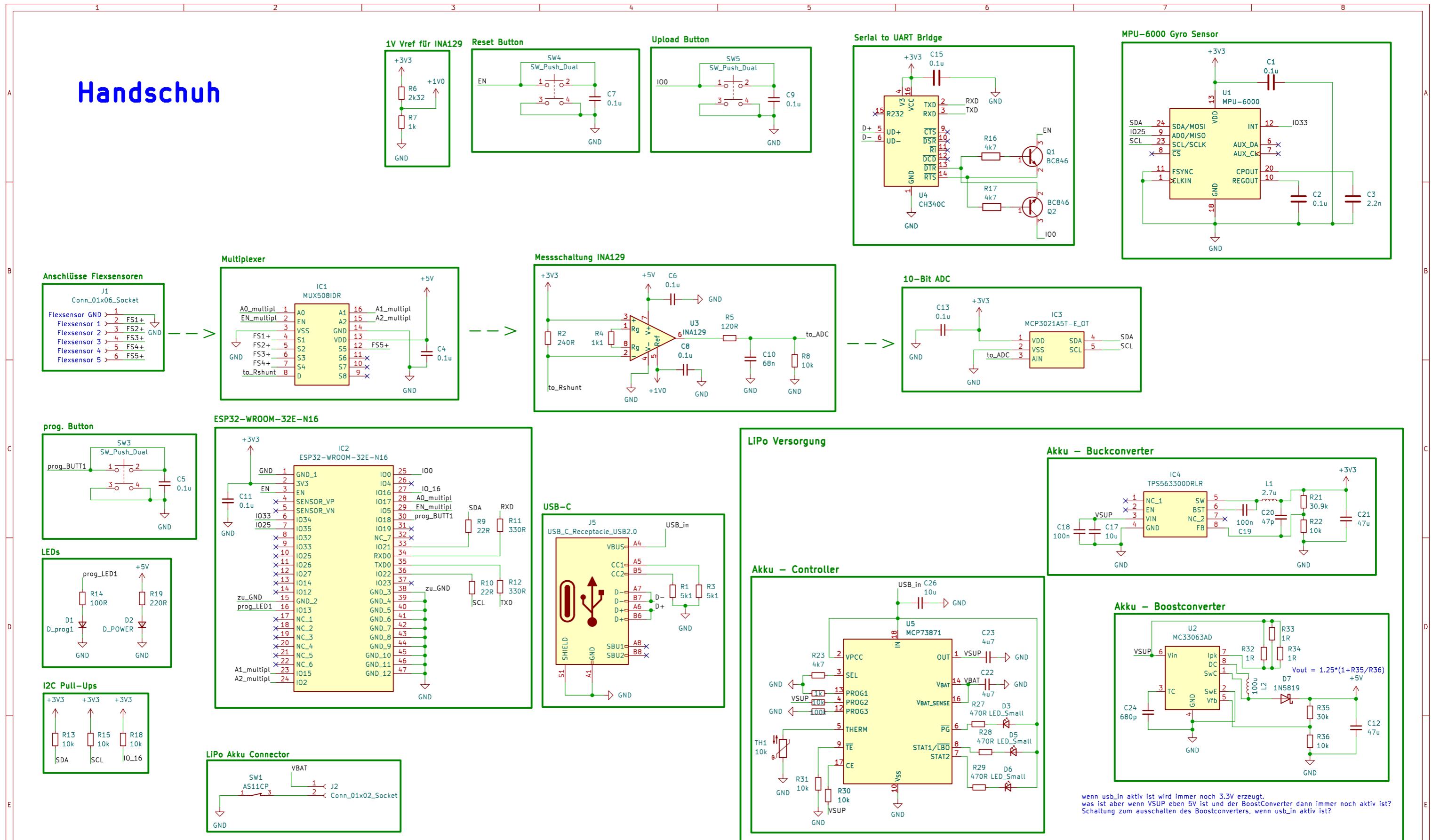
Sheet: / File: Handschuh.kicad_sch

Title: Schaltplan_Handschuh

Size: A3 Date: 2023-10-18
KiCad E.D.A. kicad 7.0.7

Rev: v2 Id: 1/1

Handschuh



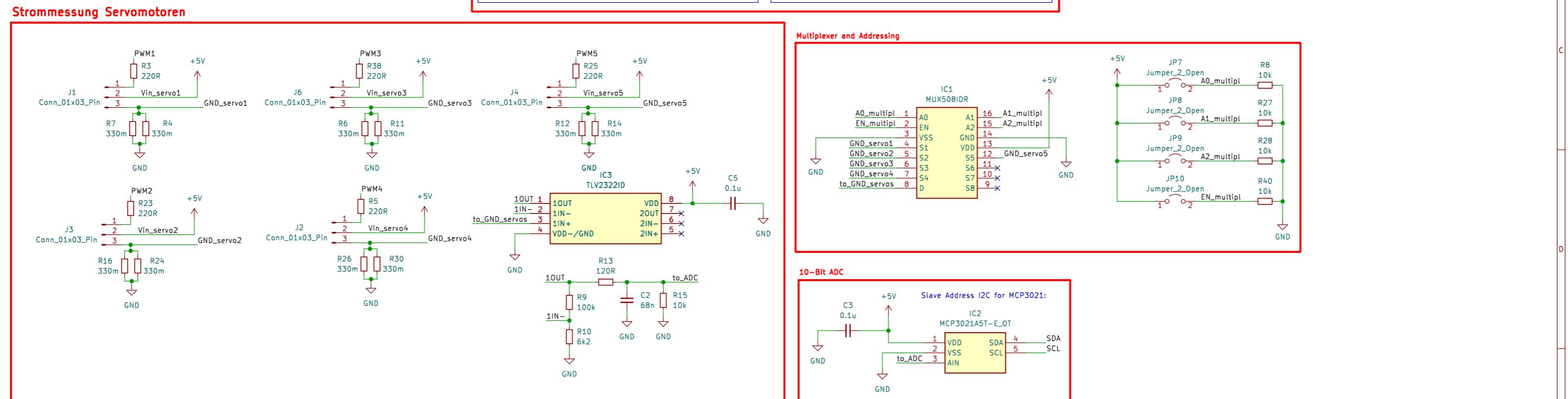
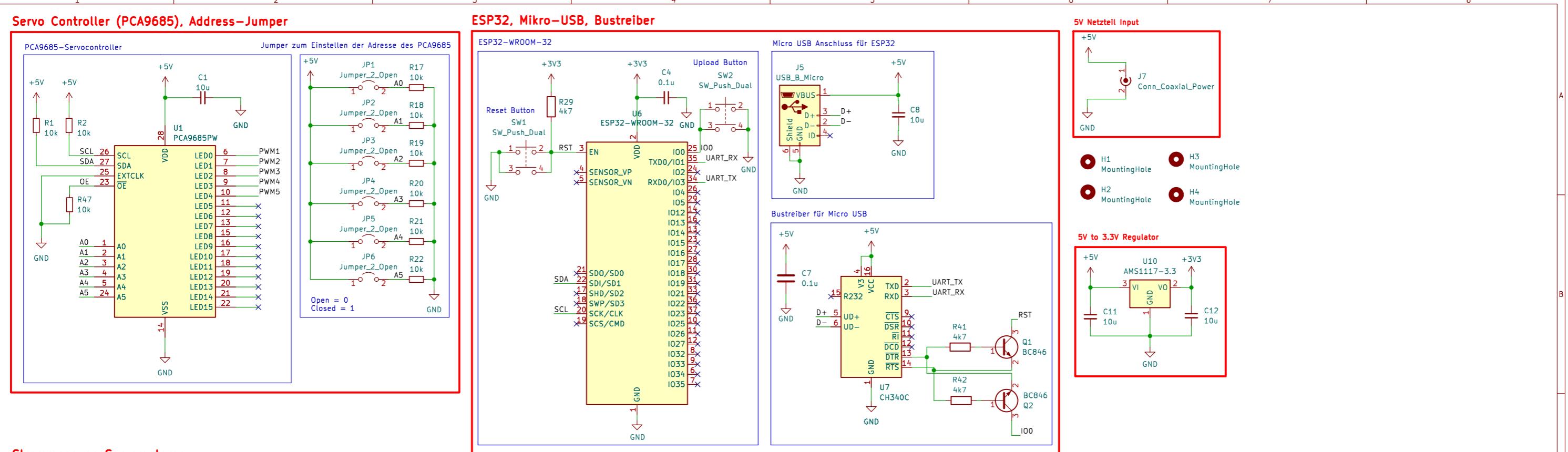
dritte Version

Sheet: /
File: Handschuh_v3.kicad_sch

Title: Schaltplan Handschuh

Size: A3 Date: 2023-11-30
KiCad E.D.A. kicad 7.0.7

Rev: v3
Id: 1/1



erste Version

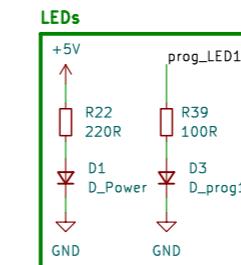
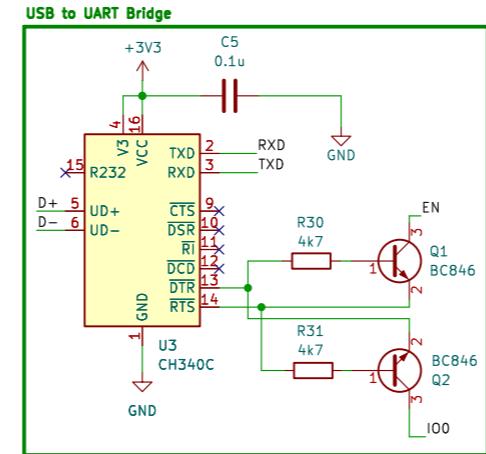
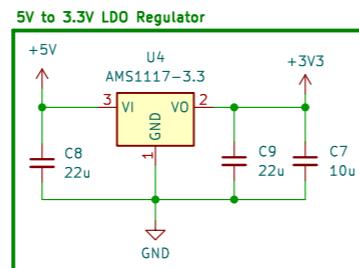
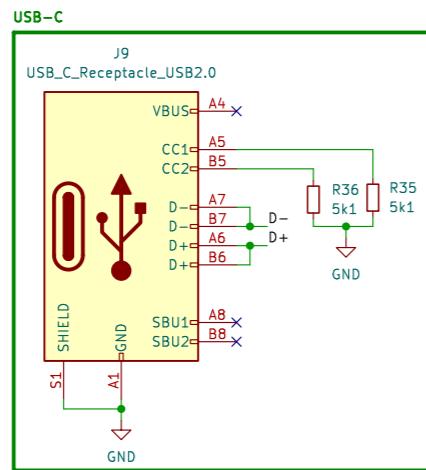
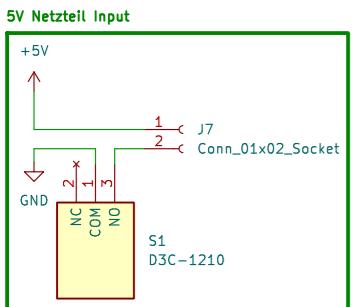
Sheet: /
File: Roboterhand.kicad_sch

Title: Schaltplan_Roboterhand

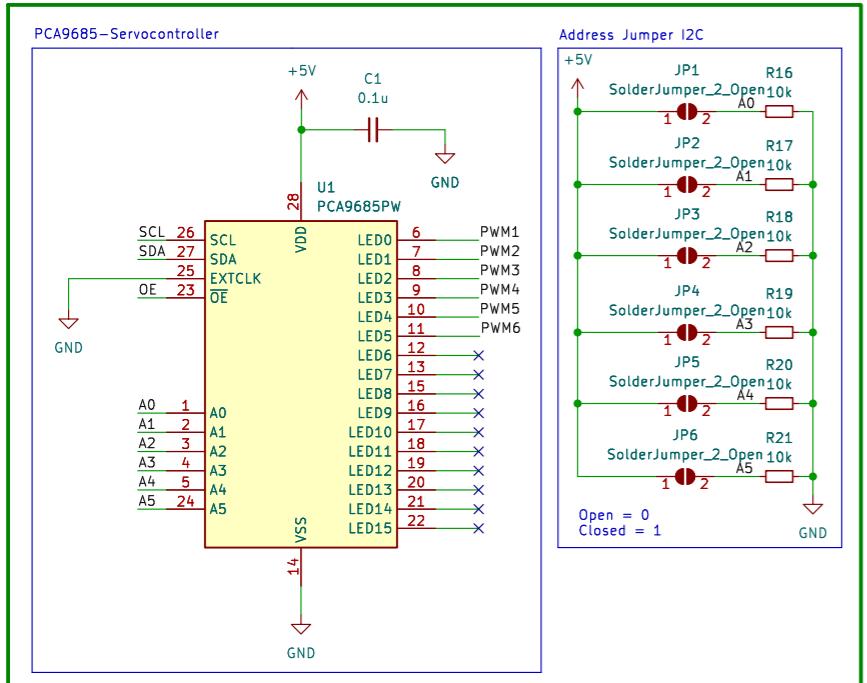
Size: A3 Date: 2023-06-27
KiCad E.D.A. kicad 7.0.7

Rev: v1
Id: 1/1

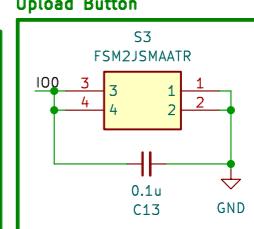
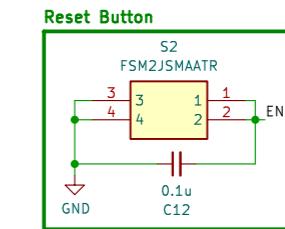
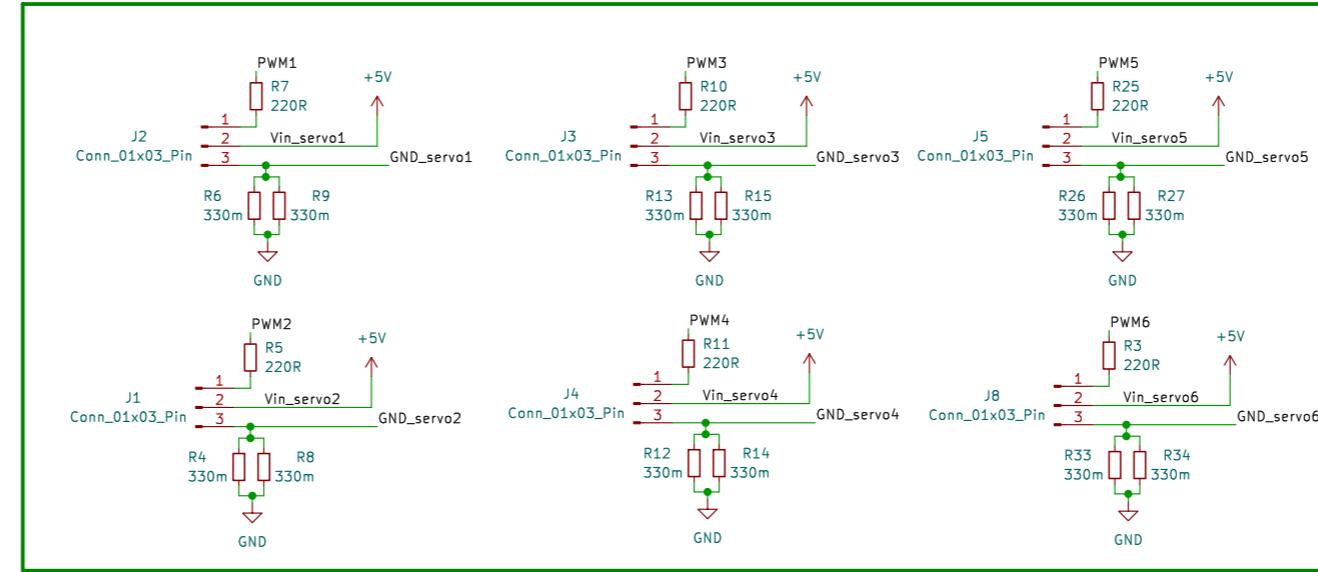
Roboterhand



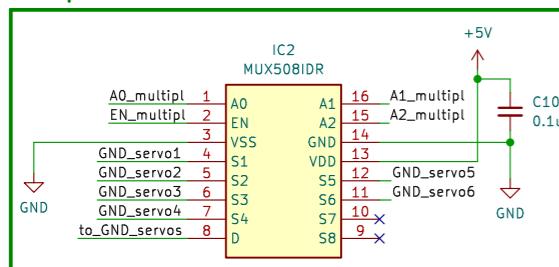
Servo PWM Controller (PCA9685)



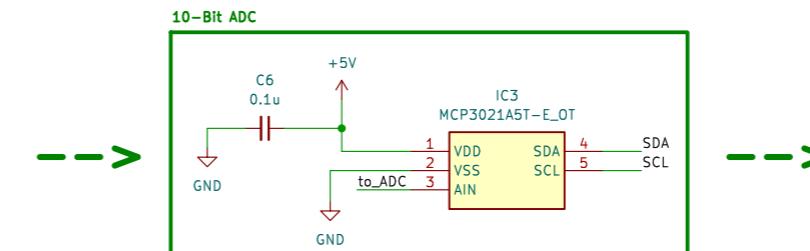
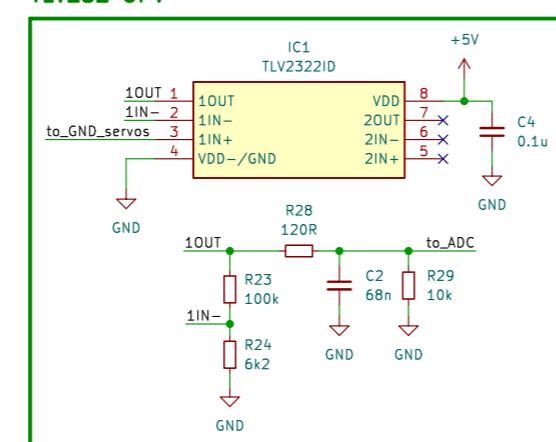
Messschaltung und Servo Anschlüsse



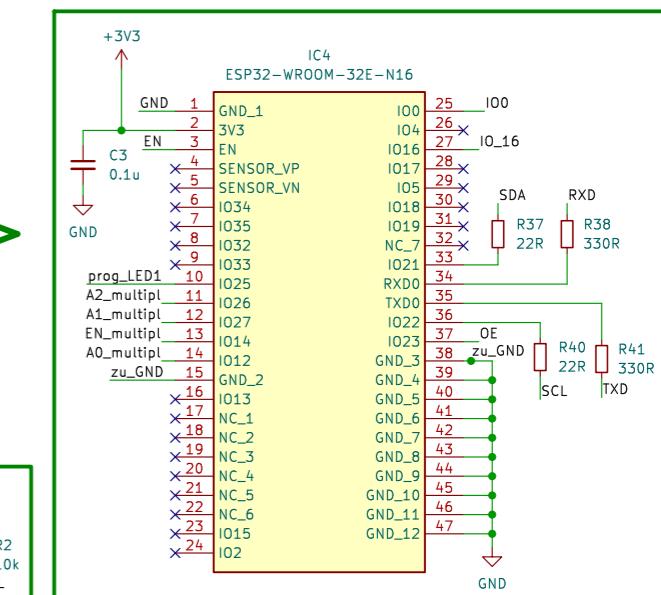
Multiplexer



→ →



ESP32-WROOM-32E-N16



zweite Version

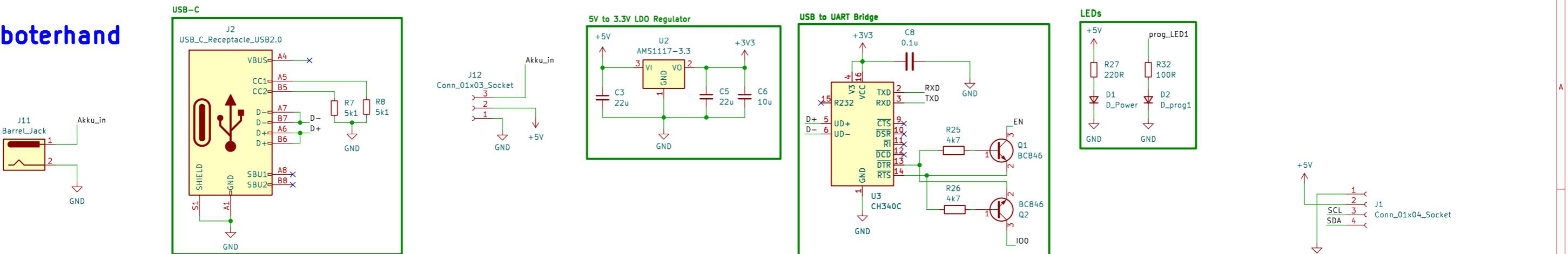
Sheet: /
File: Roboterhand.kicad_sch

Title: Schaltplan Roboterhand

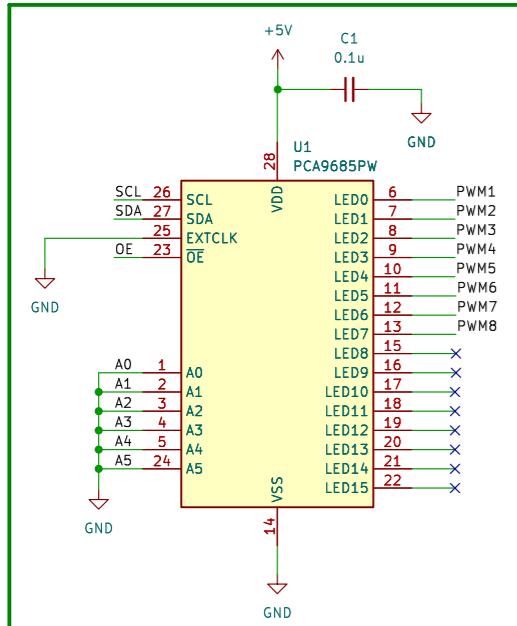
Size: A3 Date: 2023-10-18
KiCad E.D.A. kicad 7.0.7

Rev: v2
Id: 1/1

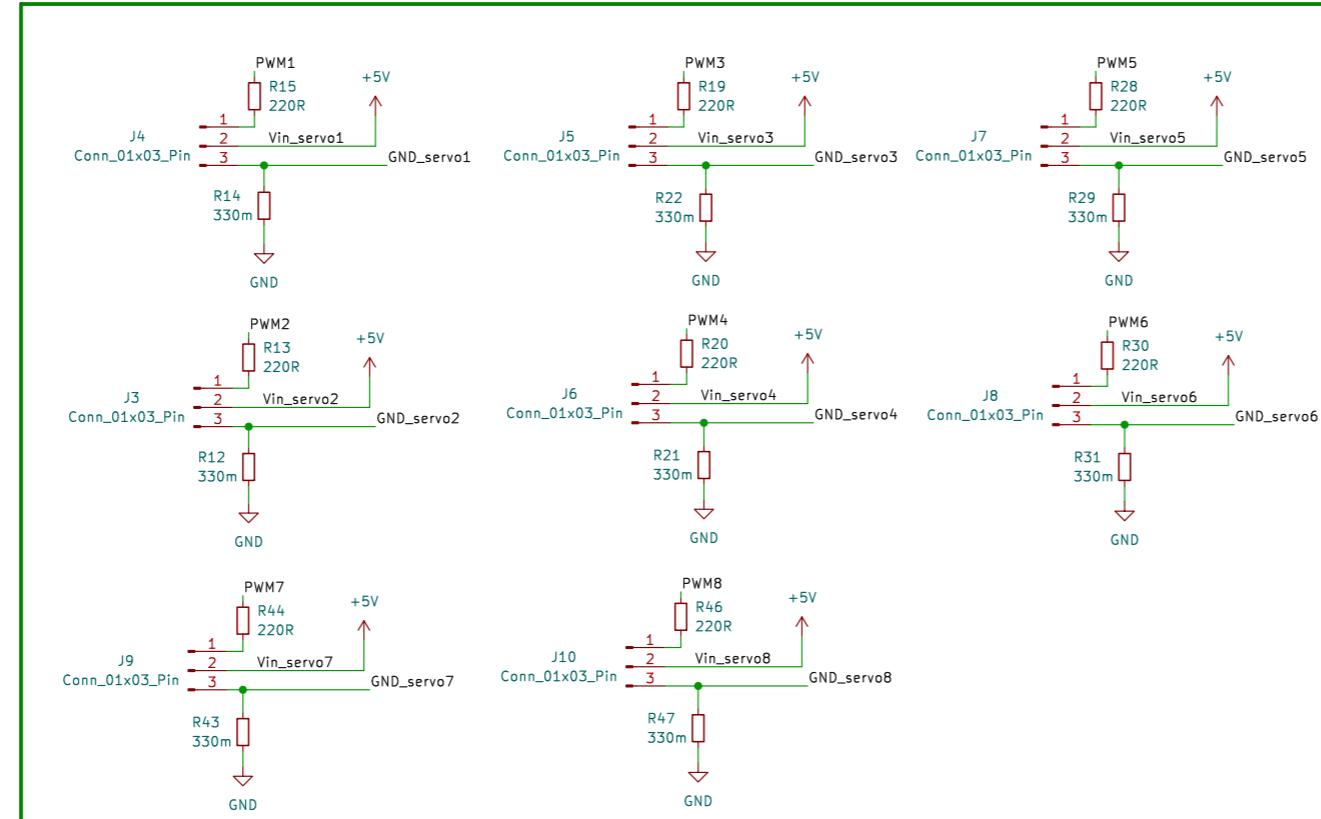
Roboterhand



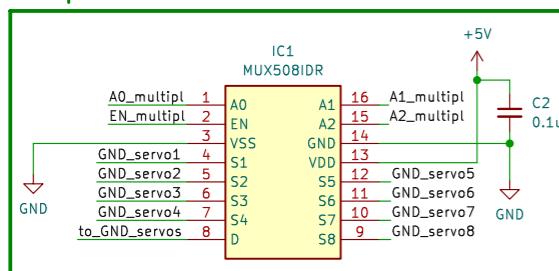
Servo PWM Controller (PCA9685)



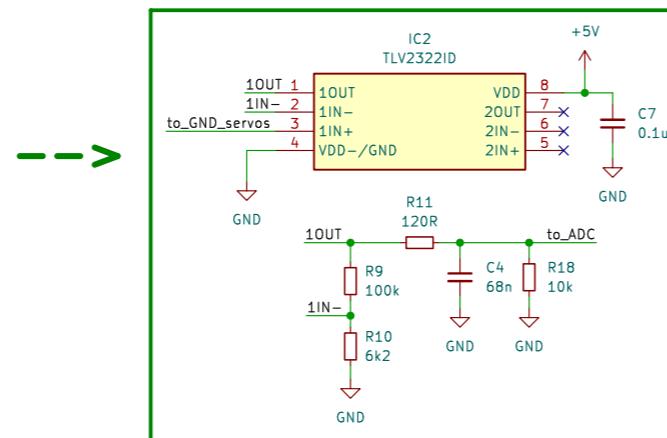
Messschaltung und Servo Anschlüsse



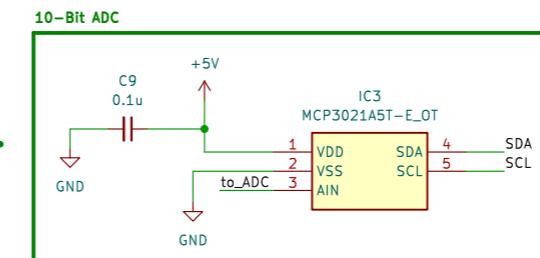
Multiplexer



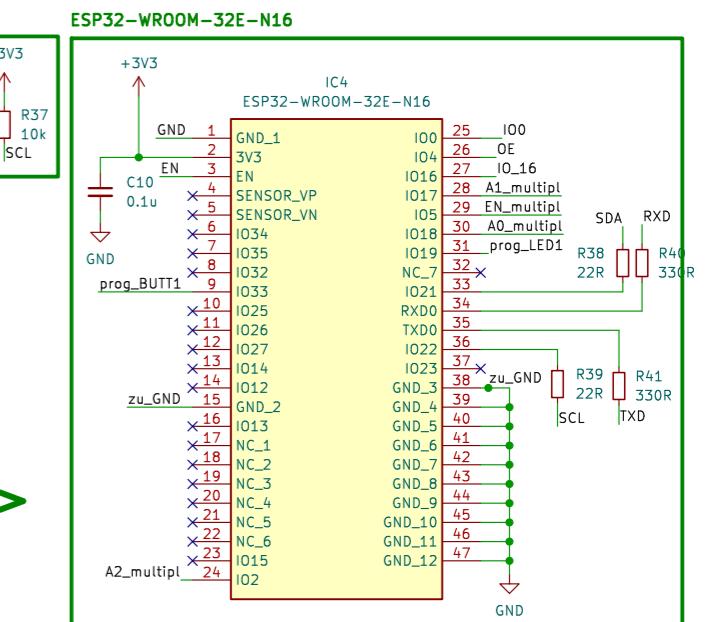
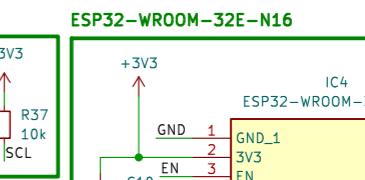
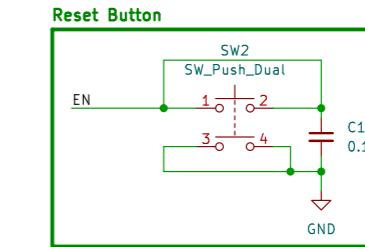
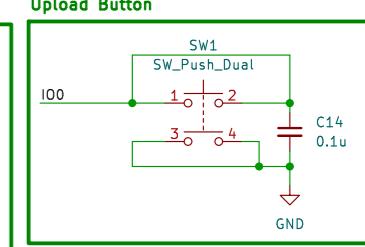
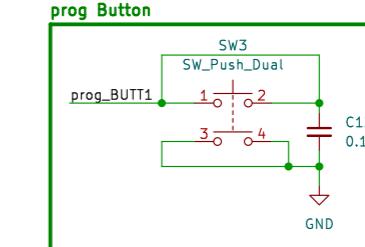
TLV232 OPV



→ → →



dritte Version
Sheet: /
File: Roboterhand_v3.kicad_sch
Title: Schaltplan Roboterhand
Size: A3 Date: 2023-11-30
KiCad E.D.A. kicad 7.0.7 Rev: v3
Id: 1/1



17.2.2 Platinenlayouts

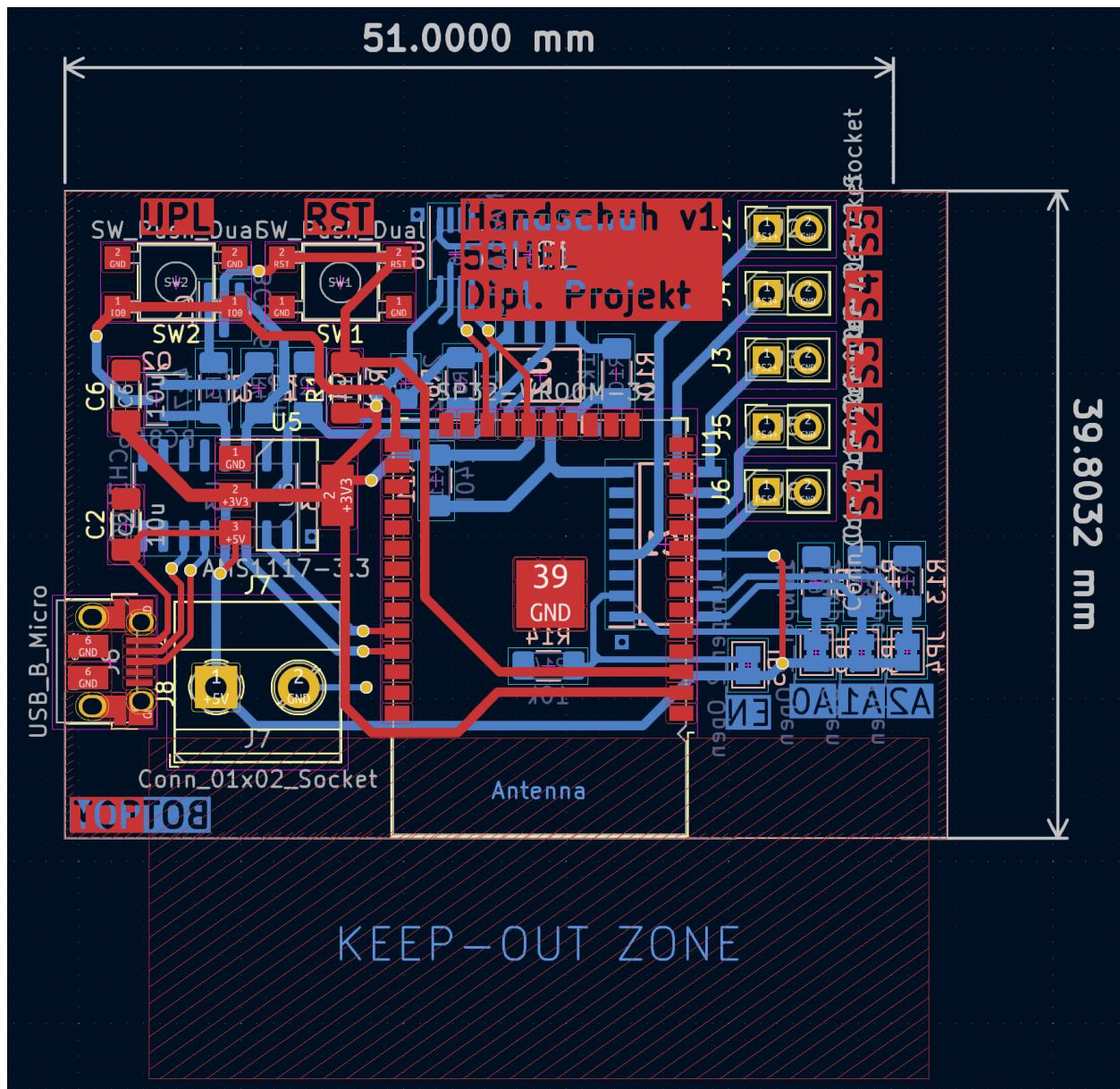


Abbildung 149: PCB Layout Eingabesubsystem Version 1

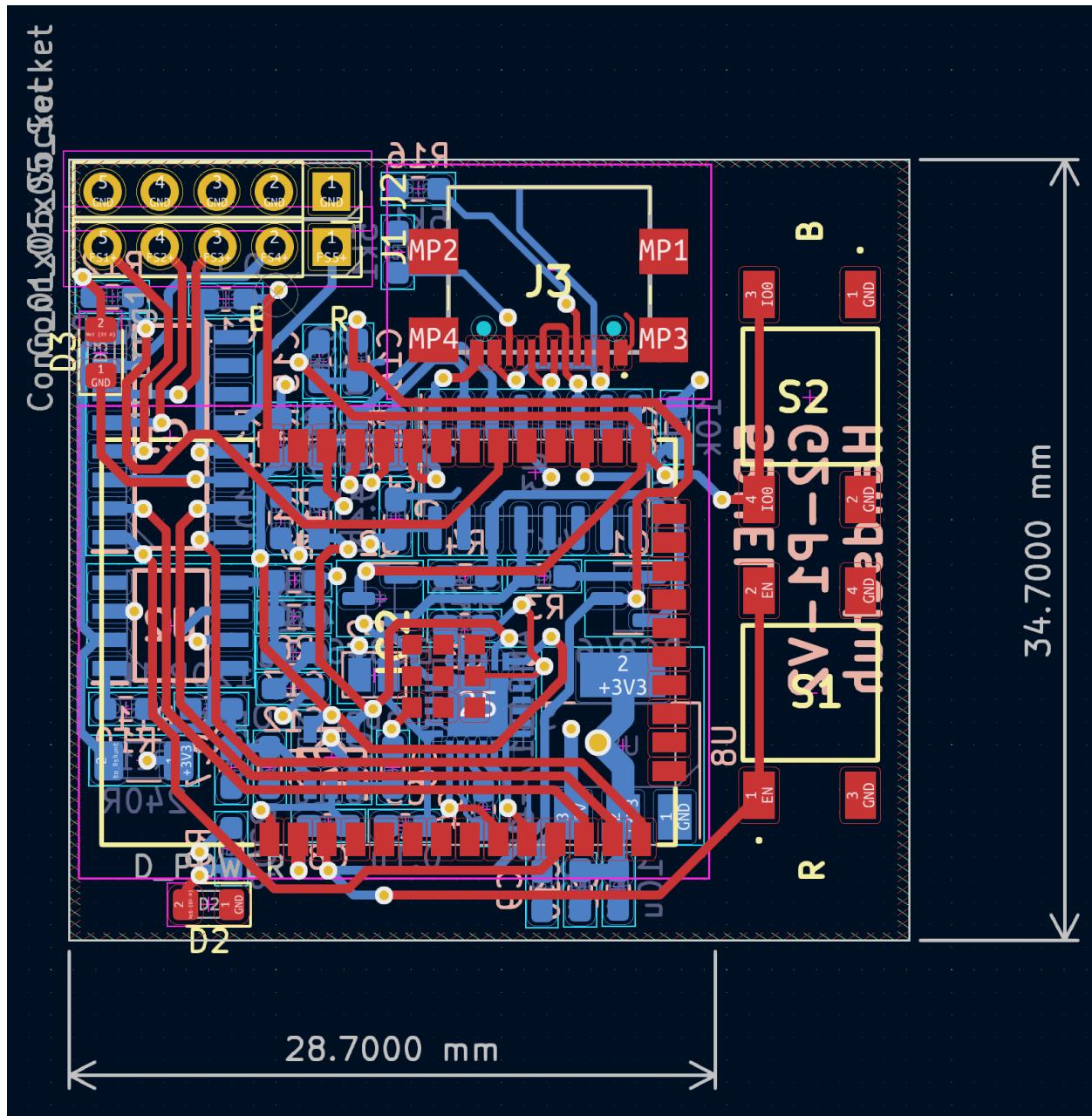


Abbildung 150: PCB Layout Eingabesubsystem Version 2

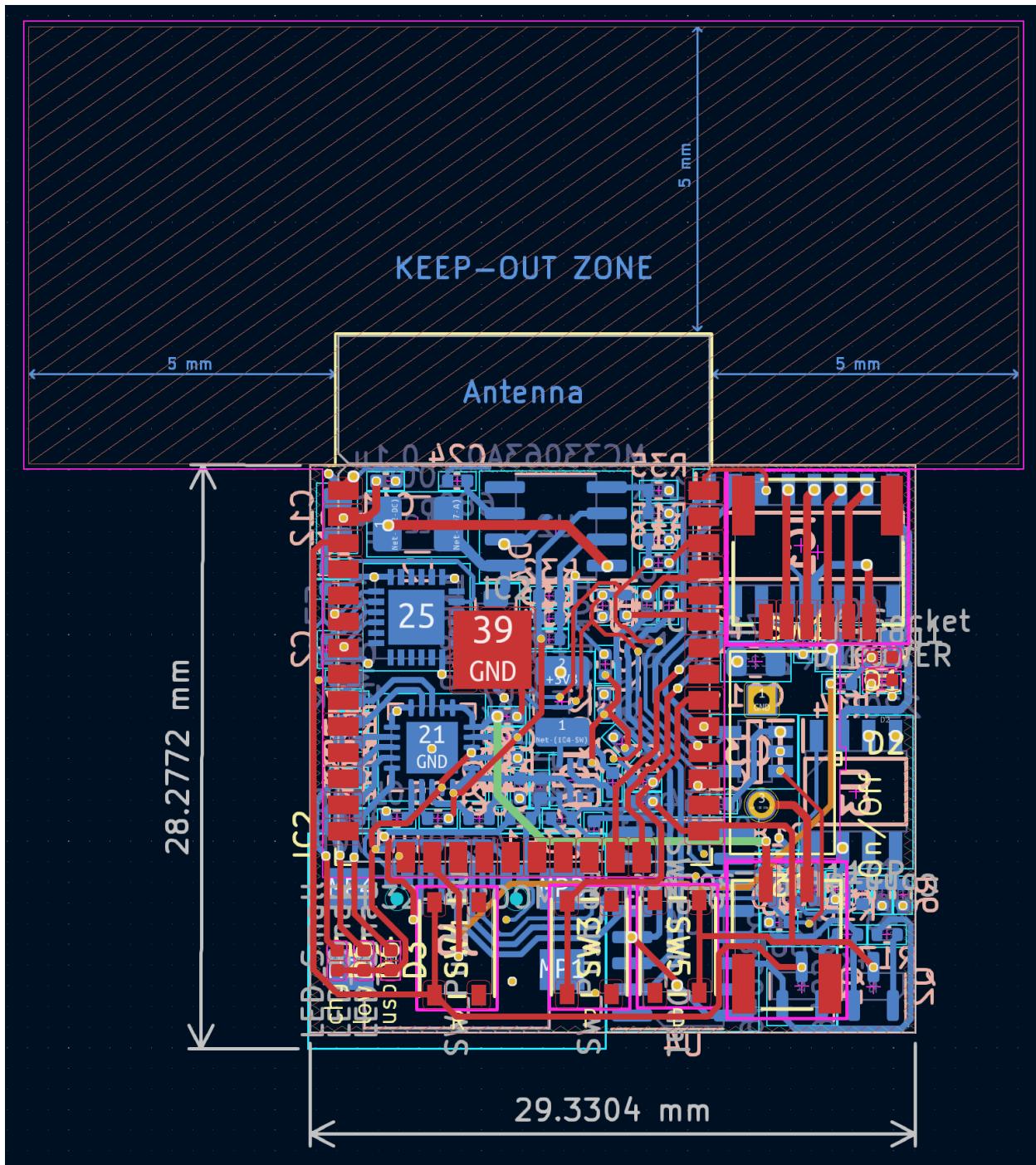


Abbildung 151: PCB Layout Eingabesubsystem Version 3

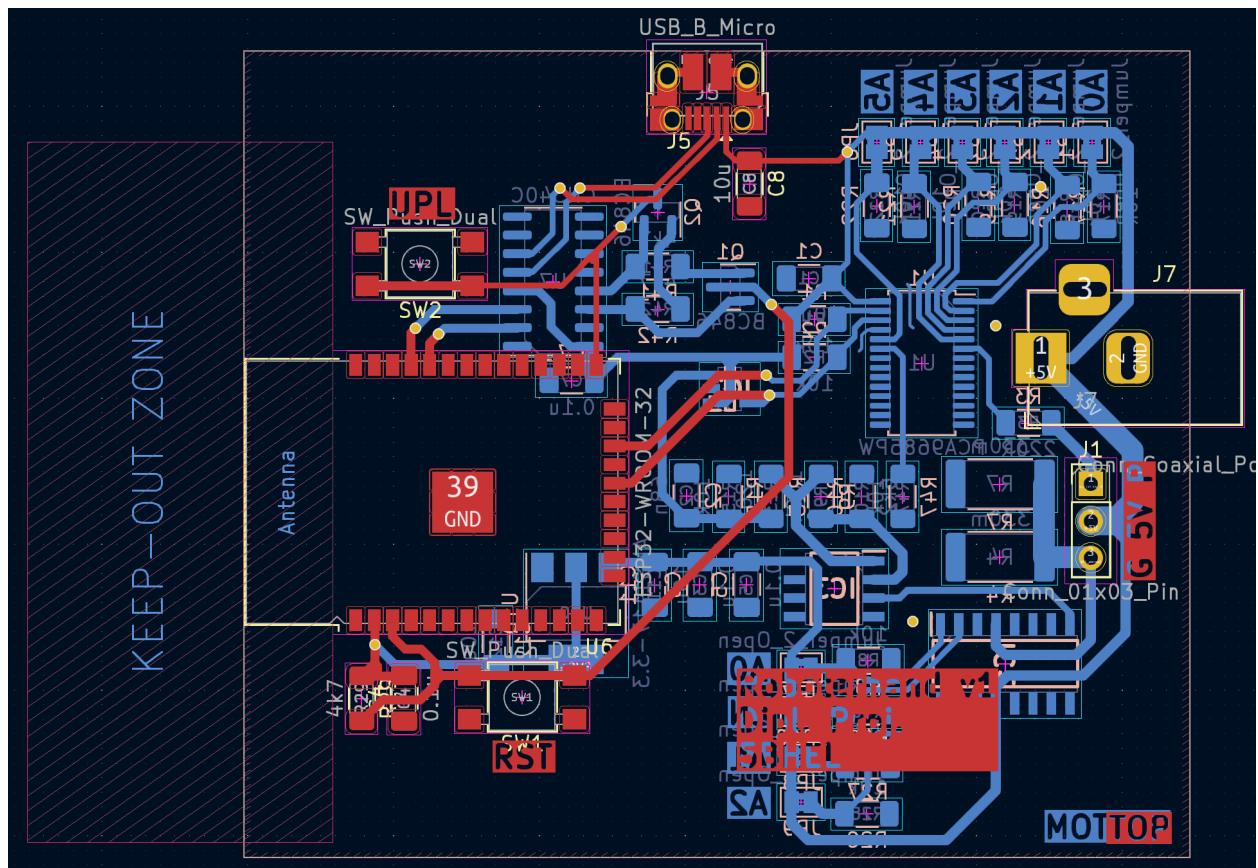


Abbildung 152: PCB Layout Ausgabesubsystem Version 1

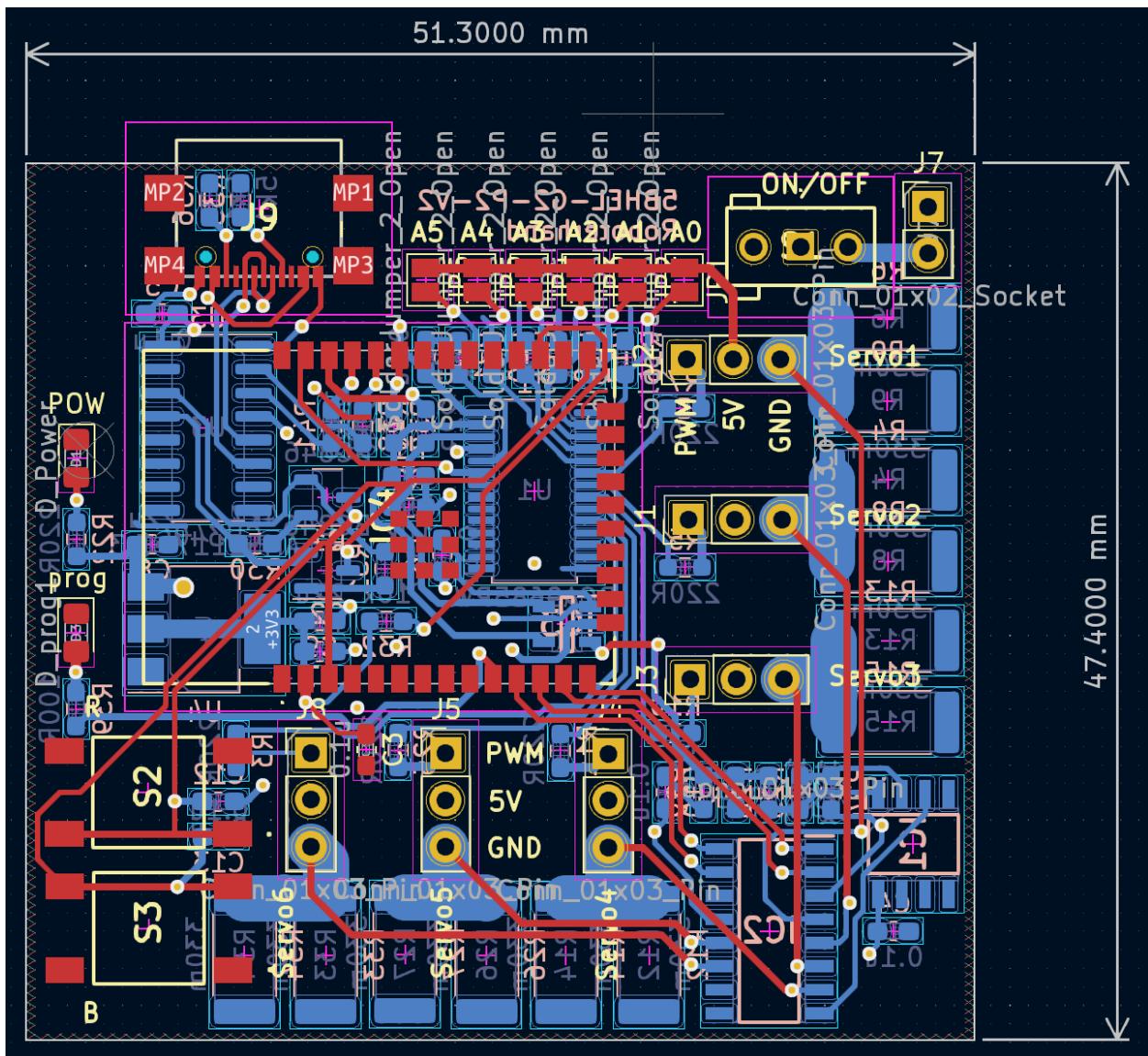


Abbildung 153: PCB Layout Ausgabesubsystem Version 2

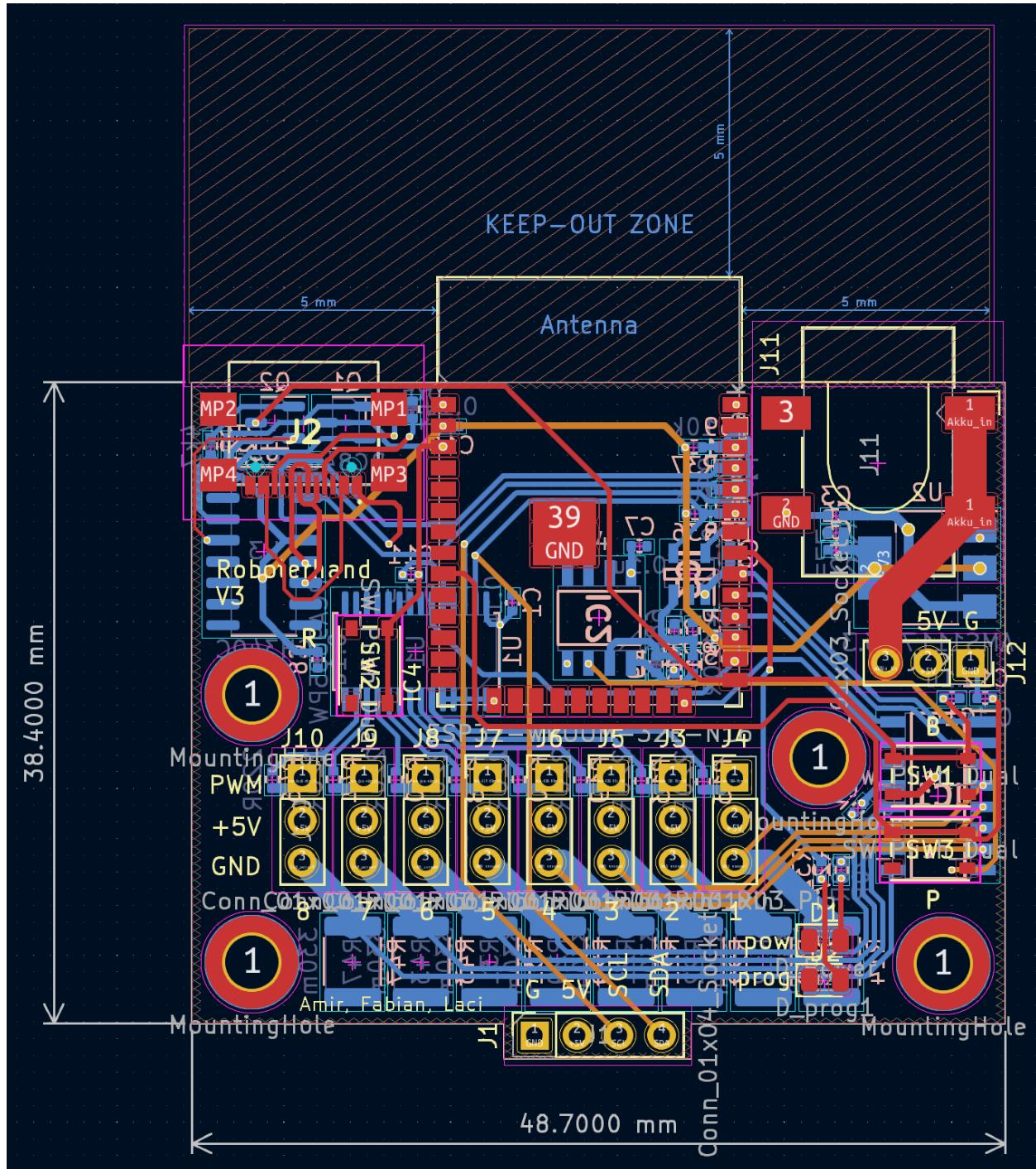


Abbildung 154: PCB Layout Ausgabesubsystem Version 3

17.2.3 Bestückungslisten

References	Value	Footprint	Quantity
C2, C6	10u	C_1206_3216Metric_Pad1. 33x1.80mm_HandSolder	2
C1	100n	C_1206_3216Metric_Pad1. 33x1.80mm_HandSolder	1
C7	68n	C_1206_3216Metric_Pad1. 33x1.80mm_HandSolder	1
R6, R9, R12, R13, R14	10k	C_1206_3216Metric_Pad1. 33x1.80mm_HandSolder	5
R1, R3, R4	4k7	C_1206_3216Metric_Pad1. 33x1.80mm_HandSolder	3
R5	120R	C_1206_3216Metric_Pad1. 33x1.80mm_HandSolder	1
R7	2k32	C_1206_3216Metric_Pad1. 33x1.80mm_HandSolder	1
R8	1k	C_1206_3216Metric_Pad1. 33x1.80mm_HandSolder	1
R10	1k1	C_1206_3216Metric_Pad1. 33x1.80mm_HandSolder	1
R11	240R	C_1206_3216Metric_Pad1. 33x1.80mm_HandSolder	1
U1	ESP32-WROOM-32	ESP32-WROOM-32	1
U2	INA129	SOIC127P600X175-8N	1
U3	CH340C	SOIC-16_3.9x9.9mm _P1.27mm	1
U5	AMS1117-3.3	SOT-223-3_TabPin2	1
U6	MAX11613	MSOP-8_3x3mm_P0.65mm	1
SW1, SW2	SW_Push_Dual	SW_SPST_TL3305A	2
JP2, JP3, JP4, JP5	Jumper_2_Open	SolderJumper-2_P1.3mm _Bridged2Bar_Pad1.0x1.5mm	4
Q1, Q2	BC846	SOT-23	2
IC1	MUX508IDR	SOIC127P600X175-16N	1
J2, J3, J4, J5, J6	Conn_01x02_Socket	PinSocket_1x02_P2.54mm _Vertical	5

Tabelle 9: Betückungsliste Platine Eingabesubsystem Version 1

References	Value	Footprint	Quantity
J7	Conn_01x02_Socket	TerminalBlock_Phoenix _MKDS-1,5-2-5.08_1x02 _P5.08mm_Horizontal	1
J8	USB_B_Micro	USB_Micro-B_Amphenol _10103594-0001LF_Horizontal	1

Tabelle 10: Betückungsliste Platine Eingabesubsystem Version 1

References	Value	Footprint	Quantity
C1, C4, C5, C6, C8, C11, C12, C13, C15, C16	0.1u	C_0603_1608Metric_Pad1. 08x0.95mm_HandSolder	10
C9, C10	22u	C_0603_1608Metric_Pad1. 08x0.95mm_HandSolder	2
C2	10u	C_0603_1608Metric_Pad1. 08x0.95mm_HandSolder	1
C3	2.2n	C_0603_1608Metric_Pad1. 08x0.95mm_HandSolder	1
C7	68n	C_0603_1608Metric_Pad1. 08x0.95mm_HandSolder	1
R6, R13, R14, R15	10k	R_0603_1608Metric_Pad1. 08x0.95mm_HandSolder	4
R2, R16	5k1	R_0603_1608Metric_Pad1. 08x0.95mm_HandSolder	2
R3, R4	4k7	R_0603_1608Metric_Pad1. 08x0.95mm_HandSolder	2
R17, R19	22R	R_0603_1608Metric_Pad1. 08x0.95mm_HandSolder	2
R18, R20	330R	R_0603_1608Metric_Pad1. 08x0.95mm_HandSolder	2
R5	120R	R_0603_1608Metric_Pad1. 08x0.95mm_HandSolder	1
R7	2k32	R_0603_1608Metric_Pad1. 08x0.95mm_HandSolder	1
R8	1k	R_0603_1608Metric_Pad1. 08x0.95mm_HandSolder	1
R9	220R	R_0603_1608Metric_Pad1. 08x0.95mm_HandSolder	1
R10	1k1	R_0603_1608Metric_Pad1. 08x0.95mm_HandSolder	1
R11	240R	R_1206_3216Metric_Pad1. 30x1.75mm_HandSolder	1
R12	100R	R_0603_1608Metric_Pad1. 08x0.95mm_HandSolder	1
D2	D_POWER	D_0805_2012Metric_Pad1. 15x1.40mm_HandSolder	1

Tabelle 11: Betstückungsliste Platine Eingabesubsystem Version 2

References	Value	Footprint	Quantity
D3	D_prog1	D_0805_2012Metric_Pad1. 15x1.40mm_HandSolder	1
U2	INA129	SOIC127P600X175-8N	1
U3	CH340C	SOIC-16_3.9x9.9mm _P1.27mm	1
U4	MPU-6000	QFN50P400X400X95-25N	1
U8	AMS1117-3.3	SOT-223-3_TabPin2	1
Q1, Q2	BC846	SOT-23	2
S1, S2	FSM2JSMAATR	FSM2J_1	2
IC1	MUX508IDR	SOIC127P600X175-16N	1
IC2	ESP32-WROOM-32E-N16	ESP32WROOM32EN16	1
IC4	MCP3021A5T-E_OT	SOT95P280X145-5N	1
JP2	SolderJumper_2_Open	SolderJumper-2_P1.3mm _Open_Pad1.0x1.5mm	1
J1, J2	Conn_01x05_Socket	PinSocket_1x05_P2.54mm _Vertical	2
J3	USB_C_Receptacle_USB2.0	USB4110GFA	1

Tabelle 12: Betückungsliste Platine Eingabesubsystem Version 2

References	Value	Footprint	Quantity
C1, C2, C4, C5, C6, C7, C8, C9, C11, C13, C15, C18, C19	100n	C_0402_1005Metric	13
C12, C21	47u	C_0402_1005Metric	2
C17, C26	10u	C_0402_1005Metric	2
C22, C23	4.7u	C_0402_1005Metric	2
C3	2.2n	C_0402_1005Metric	1
C10	68n	C_0402_1005Metric	1
C20	47p	C_0402_1005Metric	1
C24	680p	C_0402_1005Metric	1
R8, R13, R15, R18, R22, R25, R30, R31, R36	10k	R_0402_1005Metric	9
R16, R17, R23	4.7k	R_0402_1005Metric	3
R27, R28, R29	470R	R_0402_1005Metric	3
R32, R33, R34	1R	R_0402_1005Metric	3
R1, R3	5.1k	R_0402_1005Metric	2
R7, R24	1k	R_0402_1005Metric	2
R9, R10	22R	R_0402_1005Metric	2
R11, R12	330R	R_0402_1005Metric	2
R2	240R	R_0402_1005Metric	1
R4	1.1k	R_0402_1005Metric	1
R5	120R	R_0402_1005Metric	1
R6	2.32k	R_0402_1005Metric	1
R14	100R	R_0402_1005Metric	1
R19	220R	R_0402_1005Metric	1
R21	30.9k	R_0402_1005Metric	1
R26	100k	R_0402_1005Metric	1
R35	30k	R_0402_1005Metric	1
L1	2.7u	L_1210_3225Metric_Pad1. 42x2.65mm_HandSolder	1
L2	100u	L_1210_3225Metric_Pad1. 42x2.65mm_HandSolder	1

Tabelle 13: Betückungsliste Platine Eingabesubsystem Version 3

References	Value	Footprint	Quantity
D3, D5, D6	LED_Small	LED_0402_1005Metric	3
D1	D_prog1	LED_0402_1005Metric	1
D2	D_POWER	LED_0402_1005Metric	1
D7	1N5819	D_SOD-123	1
U1	MPU-6000	QFN50P400X400X95-25N	1
U2	MC33063AD	SOIC-8_3.9x4.9mm_P1.27mm	1
U3	INA129	SOIC127P600X175-8N	1
U4	CH340C	SOIC-16_3.9x9.9mm _P1.27mm	1
U5	MCP73871	QFN-20-1EP_4x4mm _P0.5mm_EP2.5x2.5mm	1
SW3, SW4, SW5	SW_Push_Dual	SW4 PTS815 SJM 250 SMTR LFS_CNK	3
SW1	AS11CP	SW_AS11CP	1
Q1, Q2	BC846	SOT-23	2
IC1	MUX508IDR	SOIC127P600X175-16N	1
IC2	ESP32-WROOM-32E-N16	ESP32-WROOM-32D	1
IC3	MCP3021A5T-E_OT	SOT95P280X145-5N	1
IC4	TPS563300DRLR	SOTFL50P160X60-8N	1
TH1	10k	R_0402_1005Metric	1
J1	Conn_01x06_Socket	CONN_SMO6B_JST	1
J2	Conn_01x02_Socket	CONN_SM02B-NSHSS_JST	1
J5	USB_C_Receptacle_USB2.0	USB4110GFA	1

Tabelle 14: Betückungsliste Platine Eingabesubsystem Version 3

References	Value	Footprint	Quantity
C1, C8, C11, C12	10u	C_1206_3216Metric_Pad1. 33x1.80mm_HandSolder	4
C3, C4, C5, C7	0.1u	C_1206_3216Metric_Pad1. 33x1.80mm_HandSolder	4
C2	68n	C_1206_3216Metric_Pad1. 33x1.80mm_HandSolder	1
R1, R2, R8, R15, R17, R18, R19, R20, R21, R22, R27, R28, R40, R47	10k	R_1206_3216Metric_Pad1. 33x1.80mm_HandSolder	14
R29, R41, R42	4k7	R_1206_3216Metric_Pad1. 33x1.80mm_HandSolder	3
R4, R7	330m	R_2512_6332Metric_Pad1. 40x3.35mm_HandSolder	2
R3	220R	R_1206_3216Metric_Pad1. 33x1.80mm_HandSolder	1
R9	100k	R_1206_3216Metric_Pad1. 33x1.80mm_HandSolder	1
R10	6k2	R_1206_3216Metric_Pad1. 33x1.80mm_HandSolder	1
R13	120R	R_1206_3216Metric_Pad1. 33x1.80mm_HandSolder	1
U1	PCA9685PW	TSSOP-28_4.4x9.7mm _P0.65mm	1
U6	ESP32-WROOM-32	ESP32-WROOM-32	1
U7	CH340C	SOIC-16_3.9x9.9mm _P1.27mm	1
U10	AMS1117-3.3	SOT-223-3_TabPin2	1
SW1, SW2	SW_Push_Dual	SW_SPST_TL3305A	2
JP1, JP2, JP3, JP4, JP5, JP6, JP7, JP8, JP9, JP10	Jumper_2_Open	SolderJumper-2_P1.3mm _Bridged2Bar_Pad1.0x1.5mm	10
Q1, Q2	BC846	SOT-23	2
IC1	MUX508IDR	SOIC127P600X175-16N	1
IC2	MCP3021A5T-E_OT	SOT95P280X145-5N	1
IC3	TLV2322ID	SOIC127P600X175-8N	1

Tabelle 15: Bestückungsliste Platine Ausgabesubsystem Version 1

References	Value	Footprint	Quantity
J1	Conn_01x03_Pin	PinHeader_1x03_P2.54mm_Vertical	1
J5	USB_B_Micro	USB_Micro-B_Amphenol_10103594-0001LF_Horizontal	1
J7	Conn_Coaxial_Power	BarrelJack_Horizontal	1

Tabelle 16: Betückungsliste Platine Ausgabesubsystem Version 1

References	Value	Footprint	Quantity
C1, C4, C5, C6, C8, C11, C12, C13	0.1u	C_0603_1608Metric_Pad1. 08x0.95mm_HandSolder	8
C8, C9	22u	C_0603_1608Metric_Pad1. 08x0.95mm_HandSolder	4
C2	68n	C_0603_1608Metric_Pad1. 08x0.95mm_HandSolder	1
C7	10u	C_0603_1608Metric_Pad1. 08x0.95mm_HandSolder	1
R4, R6, R8, R9, R12, R13, R14, R15, R26, R27, R33, R34	330m	R_2512_6332Metric_Pad1. 40x3.35mm_HandSolder	12
R1, R2, R16, R17, R18, R19, R20, R21, R29, R32	10k	R_0603_1608Metric_Pad1. 08x0.95mm_HandSolder	10
R3, R5, R7, R10, R11, R22, R25	220R	R_0603_1608Metric_Pad1. 08x0.95mm_HandSolder	7
R30, R31	4k7	R_0603_1608Metric_Pad1. 08x0.95mm_HandSolder	2
R35, R36	5k1	R_0603_1608Metric_Pad1. 08x0.95mm_HandSolder	2
R37, R40	22R	R_0603_1608Metric_Pad1. 08x0.95mm_HandSolder	2
R23	100k	R_0603_1608Metric_Pad1. 08x0.95mm_HandSolder	1
R24	6k2	R_0603_1608Metric_Pad1. 08x0.95mm_HandSolder	1
R28	120R	R_0603_1608Metric_Pad1. 08x0.95mm_HandSolder	1
R39	100R	R_0603_1608Metric_Pad1. 08x0.95mm_HandSolder	1
D1	D_Power	D_0805_2012Metric_Pad1. 15x1.40mm_HandSolder	1
D3	D_prog1	D_0805_2012Metric_Pad1. 15x1.40mm_HandSolder	1
U1	PCA9685PW	TSSOP-28_4.4x9.7mm _P0.65mm	1
U3	CH340C	SOIC-16_3.9x9.9mm _P1.27mm	1

Tabelle 17: Betstückungsliste Platine Ausgabesubsystem Version 2

References	Value	Footprint	Quantity
U4	AMS1117-3.3	SOT-223-3_TabPin2	1
JP1, JP2, JP3, JP4, JP5, JP6	Jumper_2_Open	SolderJumper-2_P1.3mm _Bridged2Bar_Pad1.0x1.5mm	6
Q1, Q2	BC846	SOT-23	2
S2, S3	FSM2JSMAATTR	FSM2J_1	2
IC1	TLV2322ID	SOIC127P600X175-8N	1
IC2	MUX508IDR	SOIC127P600X175-16N	1
IC3	MCP3021A5T-E_OT	SOT95P280X145-5N	1
IC4	ESP32-WROOM-32E-N16	ESP32WROOM32EN16	1
S1	D3C-1210	D3C1210	1
J1, J2, J3, J4, J5, J8	Conn_01x03_Pin	PinHeader_1x03_P2.54mm _Vertical	6
J7	Conn_01x02_Socket	PinHeader_1x02_P2.54mm _Vertical	1
J9	USB_C_Receptacle_USB2.0	USB4110GFA	1

Tabelle 18: Betückungsliste Platine Ausgabesubsystem Version 2

References	Value	Footprint	Quantity
C1, C2, C7, C8, C9, C10, C11, C12, C14	0.1u	C_0402_1005Metric	9
C3, C5	22u	C_0402_1005Metric	2
C4	68n	C_0402_1005Metric	1
C6	10u	C_0402_1005Metric	1
D1	D_Power	D_0805_2012Metric_Pad1. 15x1.40mm_HandSolder	1
D2	D_prog1	D_0805_2012Metric_Pad1. 15x1.40mm_HandSolder	1
D3	D_Zener_Small	D_SOD-123	1
H1, H2, H3, H4	MoutingHole	MountingHole_3.2mm_M3 _DIN965_Pad_TopBottom	4
IC1	MUX508IDR	SOIC127P600X175-16N	1
IC2	TLV2322ID	SOIC127P600X175-8N	1
IC3	MCP3021A5T-E_OT	SOT95P280X145-5N	1
IC4	ESP32-WROOM-32E-N16	ESP32WROOM32EN16	1
J1	Conn_01x04_Socket	PinHeader_1x04_P2.54mm _Vertical	1
J9	USB_C_Receptacle_USB2.0	USB4110GFA	1
J3, J4, J5, J6, J7, J8, J9, J10	Conn_01x03_Pin	PinHeader_1x03_P2.54mm _Vertical	8
J11	Barrel_Jack	BarrelJack_CLIFF_FC681465 S_SMT_Horizontal	1
J12	Conn_01x03_Socket	PinSocket_1x03_P2.54mm _Vertical	1
Q1, Q2	BC846	SOT-23	2
Q3	PMOS	TO-252-3_TabPin2	1
R7, R8	5k1	R_0402_1005Metric	2
R9, R42	100k	R_0402_1005Metric	2
R10	6k2	R_0402_1005Metric	1
R11	120R	R_0402_1005Metric	1
R12, R14, R21, R22, R29, R31, R43, R47	330m	R_1812_4532Metric	8

Tabelle 19: Betückungsliste Platine Ausgabesubsystem Version 3

References	Value	Footprint	Quantity
R13, R15, R19, R20, R27, R28, R30, R44, R46	220R	R_0402_1005Metric	9
R18, R35, R36, R37	10k	R_0402_1005Metric	4
R25, R26	4k7	R_0402_1005Metric	2
R32	100R	R_0402_1005Metric	1
R38, R39	22R	R_0402_1005Metric	2
R40, R41	330R	R_0402_1005Metric	2
SW1, SW2, SW3	SW_Push_Dual	SW4 PTS815 SJM 250 SMTR LFS_CNK	3
U1	PCA9685PW	TSSOP-28_4.4x9.7mm _P0.65mm	1
U2	AMS1117-3.3	SOT-223-3_TabPin2	1
U3	CH340C	SOIC-16_3.9x9.9mm _P1.27mm	1

Tabelle 20: Betückungsliste Platine Ausgabesubsystem Version 3

Abbildungsverzeichnis

1	Actuator (Quelle: REAC 10.03.2024)	7
2	Äußere Betrachtung eines Servomotors (Quelle: Ingenieursmentalität 10.03.2024@3 min 51 Sekunden)	9
3	Servomotor von Innen (Quelle: Ingenieursmentalität 10.03.2024@4 min 16 Sekunden)	10
4	Servomotor von Innen (Quelle: A comparative study on the position control method of dc servo motor with position feedback by using arduino 19.03.2024)	11
5	P-Glied (Quelle: Wilhelm 2022p.101)	12
6	I-Glied (Quelle: Wilhelm 2022p.101)	13
7	D-Glied (Quelle: Wilhelm 2022p.101)	13
8	Makrodarstellung des Regelkreises	14
9	Abschnitt des Regelkreises für die Sollgröße	15
10	Abschnitt des Regelkreises Motor	15
11	Diagram Positionsregler	16
12	CC BY (Quelle: Creative Commons Bilder 10.03.2024)	27
13	CC BY-SA (Quelle: Creative Commons Bilder 10.03.2024)	28
14	CC BY-NC (Quelle: Creative Commons Bilder 10.03.2024)	28
15	CC BY-NC-SA (Quelle: Creative Commons Bilder 10.03.2024)	28
16	CC BY-ND (Quelle: Creative Commons Bilder 10.03.2024)	29
17	BY-NC-ND (Quelle: Creative Commons Bilder 10.03.2024)	29
18	CCO (Quelle: Creative Commons Bilder 10.03.2024)	29
19	Koexistenz Quelle: Wannöffel 05.03.2024b	31
20	Synchronisation Quelle: Wannöffel 05.03.2024b	32
21	Kooperation Quelle: Wannöffel 05.03.2024b	33
22	Kollaboration Quelle: Wannöffel 05.03.2024b	34
23	Schmerzbereiche eines Menschen (Quelle: Frauenhofer 18.03.2024b)	37
24	Flexsensor (Quelle: Mazzari 18.03.2024)	42
25	Flexsensor (Quelle: Electronics 10.03.2024)	46
26	Servomotor (Quelle: Blogspot 10.03.2024)	47
27	ESPNOW - Model	49
28	ESPNOW - Theorie	52
29	OPV Ausgangsspannungsbereiche	53
30	Blockschaltbild Analog-Digital-Wandler	54
31	Multiplexer Beispiel	55
32	I2C Adressierung (Quelle: FMH-Studios 10.03.2024)	56
33	UART erklärendes Diagramm	57
34	WiFi Logo (Quelle: Afrank99 10.03.2024)	58
35	Blockschaltbild des Gesamtsystems	59
36	Blockschaltbild des Eingabesubsystems	60
37	Blockschaltbild des Ausgabesubsystems	61
38	Handschuhkonzept mit Sensor	63
39	Veranschaulichung des Ringkonzepts	64
40	Darstellung des Versuchsmodells	66
41	initiales Grundkonzept	68
42	Querschnitt der Finger	69

43	Faltmechanismus der Entwicklungsstufe: initial	70
44	Querschnitt der Handfläche	71
45	Ständer für die Handkomponente	72
46	Servomotoren-Halterung und Umlenkungen	73
47	Skizzierung der unregelmäßigen Faltmechanik	74
48	mechanische Verbindung der einzelnen Fingerglieder	76
49	Der InMoov-Faltmechanismus	76
50	Inmoovhand und ihre Komponenten (Quelle: Anar 27.03.2024)	77
51	Realisierung der Entwicklungsstufe: InMoov	78
52	Innenseite des Silikonfingers	82
53	Außenseite des Silikonfingers	82
54	Gussform des ersten Gussversuchs	83
55	Gussform des zweiten Gussversuchs	84
56	innere Ansicht des Fingergelenks	85
57	äußere Ansicht des Fingergelenks	85
58	Silikonfinger mit eingegossenem Gelenk	86
59	Modell der Silikonhand mit integrierten „Knochengelenken“	87
60	aktuelle Version des Gelenks	88
61	vorherige Version des Gerüsts	88
62	Verbindung der einzelnen Glieder mit Gummikordeln	89
63	unteres Element der Gussfom	90
64	oberes Element der Gussform	91
65	Gussform mit Halterung	92
66	Silikonhand Fehlversuch	93
67	Notkonzept: Handfläche aus hartem Kunststoff (PLA)	94
68	Realisierung des Notkonzepts	94
69	Rekonstruktion des Motorblocks	97
70	Mechanismus mit Zahnrad und Zahnstange	98
71	Verbesserung der ersten Rekonstruktion	99
72	Roboterhand Etnwicklungsstufe Hybrid	100
73	Rückzugsmechanismus der Entwicklungsstufe Hybrid	100
74	Mechanismus der Entwicklungsstufe Hybrid	101
75	Mechanismus Entwicklungsstufe Hybrid mit Oberarmerweiterung	102
76	LTspice Simulation der Flexesnor - Messschaltung	105
77	Steckbrettaufbau der Flexesnor - Messschaltung	110
78	Netzteileinstellungen	111
79	Oszilloskopbild mit $R_L = 27k\Omega$	112
80	Oszilloskopbild mit $R_L = 67k\Omega$	113
81	Oszilloskopbild mit $R_L = 118k\Omega$	114
82	USB-C-Buchse	115
83	ESP32 Mikrokontroller	116
84	Status LEDs	117
85	Multiplexer	117
86	Operationsverstärker - Schaltung	118
87	ADC - Schaltung	119
88	Gyroskopsensor - Schaltung	119

89	Platinenoberseite - erste Testplatine - Eingabesubsystem	120
90	Platinenunterseite - erste Testplatine - Eingabesubsystem	121
91	Toplayer des zweiten Platinenlayouts	122
92	Bottomlayer des zweiten Platinenlayouts	123
93	Topside des zweiten Platinenmodells	124
94	Bottomside des zweiten Platinenmodells	124
95	Schaltbild der Strommessschaltung	127
96	Steckbrettaufbau der Messschaltung zur Strommessung	129
97	Testaufbau der Strommessung eines Servomotors	130
98	Messtabelle Strommessung	131
99	Diagramm der Strommessung in Abhängigkeit der Zugkraft	132
100	Oszilloskopbild - Stromanlaufverhalten eines Servomotors	132
101	USB-C-Buchse	134
102	Netzteil Input Connector	135
103	Serial-UART-Bridge	136
104	Mikrokontroller ESP32	137
105	Mikrokontroller Buttons	138
106	Spannungswandler 5V - 3.3V	138
107	PWM Controller	139
108	Servo Anschlüsse	140
109	Multiplexer Schaltung	141
110	OPV Schaltung	142
111	ADC Schaltung	143
112	Status LEDs	143
113	Oberseite erste Testplatine Ausgabesubsystem	144
114	Unterseite erste Testplatine Ausgabesubsystem	145
115	Toplayer zweites Platinendesign	146
116	Bottomlayer zweites Platinendesign	147
117	Oberseite zweites Platinenmodell	148
118	Unterseite zweites Platinenmodell	149
119	ESP NOW Datenübertragung (Quelle: Wan-Ting 25.03.2024)	151
120	Beispiel Arduino IDE 2	152
121	Beispiel maximaler Widerstand (Quelle: Roland 25.03.2024)	153
122	Beispiel minimaler Widerstand (Quelle: Roland 25.03.2024)	153
123	Flexsensor minimaler Wert	155
124	Flexsensor maximaler Wert	155
125	Beispielhafte Verzögerung vor dem Senden	157
126	Beispiel: maximalen Wert über Serial Monitor festlegen (Werte manuell eintragen)	158
127	Flussdiagramm Software Eingabesubsystem	159
128	Softwaremap Eingabesubsystem	161
129	Softwaremap Eingabesubsystem	162
130	Multiplexer Kanäle (Quelle: Instruments 10.03.2024)	164
131	Beispiel: Paket nach bestimmtem Muster senden	165
132	Flussdiagramm der Software des Ausgabesubsystems	167
133	Route des Only-Glove-Modus im Ausgabesubsystem	169
134	Route des UI-Mode im Ausgabesubsystem	170

135	Überblick der Softwarekomponenten	172
136	Median	176
137	Median	177
138	User-Interface Konzept	180
139	UI Benutzeroberfläche	181
140	Punkte zur Messung (Winkel)	184
141	Einstellung 1	186
142	Einstellung 2	186
143	Einstellung 3	186
144	Einstellung 4	186
145	Einstellung 5	186
146	Einstellung 6	186
147	Einstellung 7	186
148	Einstellung 8	186
149	PCB Layout Eingabesubsystem Version 1	229
150	PCB Layout Eingabesubsystem Version 2	230
151	PCB Layout Eingabesubsystem Version 3	231
152	PCB Layout Ausgabesubsystem Version 1	232
153	PCB Layout Ausgabesubsystem Version 2	233
154	PCB Layout Ausgabesubsystem Version 3	234

Tabellenverzeichnis

1	Lastenheft	3
2	Lastenheft	4
3	Lastenheft	5
4	Lastenheft	6
5	Messergebnisse am Papier	185
6	Messergebnisse am Handschuh	185
7	Messpositionen mit dem Handschuh	186
8	Milestoneplan	197
9	Betückungsliste Platine Eingabesubsystem Version 1	235
10	Betückungsliste Platine Eingabesubsystem Version 1	236
11	Betückungsliste Platine Eingabesubsystem Version 2	237
12	Betückungsliste Platine Eingabesubsystem Version 2	238
13	Betückungsliste Platine Eingabesubsystem Version 3	239
14	Betückungsliste Platine Eingabesubsystem Version 3	240
15	Betückungsliste Platine Ausgabesubsystem Version 1	241
16	Betückungsliste Platine Ausgabesubsystem Version 1	242
17	Betückungsliste Platine Ausgabesubsystem Version 2	243
18	Betückungsliste Platine Ausgabesubsystem Version 2	244
19	Betückungsliste Platine Ausgabesubsystem Version 3	245
20	Betückungsliste Platine Ausgabesubsystem Version 3	246

Literatur

- A comparative study on the position control method of dc servo motor with position feedback by using arduino (19.03.2024). URL: https://www.researchgate.net/publication/313384504_A_comparative_study_on_the_position_control_method_of_dc_servo_motor_with_position_feedback_by_using_arduino.
- Afrank99 (10.03.2024). WiFi Logo. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:WiFi_Logo.svg#/media/Datei:WiFi_Logo.svg.
- Anar (27.03.2024). Inmoovhand. URL: <http://www.reppersdelight.spacymen.com>.
- Apache (10.03.2024). URL: <https://apache.org/licenses/LICENSE-1.0>.
- Austria, TÜV (6.03.2024). Mensch Roboter Kollaboration Einfluss der ITsecurity. URL: https://tr.tuv.at/fileadmin/user_upload/docs/group/innovation/tuv-austria-white-paper-deutsch/003_tuv_austria_white_paper_III_einfluss_it_security_sicherheit_in_der_mensch_roboter_kollaboration_fraunhofer_DE_WEB.pdf.
- Automation, International Society of (13.03.2024). ISA/IEC 62443 Series of Standards. URL: <https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-standards/isa-iec-62443-series-of-standards>.
- Beetz, Matthias (10.03.2024). Grundlagen: Der Servomotor – Funktionsweise, Kühlung und Anwendungsbereiche. URL: <https://www.baumueller.com/de/insights/grundlagen/servomotor-funktionsweise-eigenschaften-anwendungsbereiche#:~:text=Der%20Servoantrieb%20bietet%20vor%20allem,Abbremsungen%20auf%20bestimmte%20Drehzahlen%20durchf%C3%BChren.>
- Blogspot (10.03.2024). Futaba S3003 Servo.jpg. URL: https://3.bp.blogspot.com/-Qhk9HK3tI/UVQhc8-bxSI/AAAAAAAABT4/bWZ8dEICtZY/s640/Futaba_S3003_Servo.jpg.
- Commons, Creative (10.03.2024a). Und was habe ich als Rechtinhaber davon? URL: <https://de.creativecommons.net/was-ist-cc/>.
- (10.03.2024b). Was ist CC? URL: <https://de.creativecommons.net/was-ist-cc/>.
- (10.03.2024c). Wozu solch vorgefertigte Erklärungen? URL: <https://de.creativecommons.net/was-ist-cc/>.
- Creative Commons Bilder (10.03.2024). URL: <https://creativecommons.org/mission/downloads/>.
- Creative Commons Lizenz (10.03.2024). URL: <https://creativecommons.org/share-your-work/cclicenses/>.
- Düngler Sebastian, FH Vorarlberg (11.03.2024). Mensch Roboter Kollaboration (MRK) Gestaltungshilfe für MRK Anwendungen. URL: https://opus.fhv.at/frontdoor/deliver/index/docId/4600/file/MRK_Gestaltungshilfe_fuer_MRK-Anwendungen.pdf.
- Electronics, SparkFun (10.03.2024). Flexsensor. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Flex_Sensor.jpg#/media/File:Flex_Sensor.jpg.
- Espressif (21.02.2024). ESP-NOW. URL: <https://www.espressif.com/en/solutions/low-power-solutions/esp-now>.
- Ewald (21.02.2024). ESP-NOW. URL: <https://wolles-elektronikkiste.de/esp-now#range>.
- FILAMENTworld (21.02.2024). 3D DRUCKVERFAHREN EINFACH ERKLÄRT. URL: <https://filamentworld.de/3d-druckverfahren/>.
- FMH-Studios (10.03.2024). I2C Zeitdiagramm. URL: <http://fmh-studios.de/theorie/informationstechnik/i2c-bus/>.

- Frauenhofer (18.03.2024a). *Sicherheit in der Mensch-Roboter-Kollaboration*. URL: https://www.fraunhofer.at/content/dam/austria/documents/WhitePaperTUEV/White%20Paper_Sicherheit_MRK_Ausgabe%202.pdf.
- (18.03.2024b). *Sicherheit in der Mensch-Roboter-Kollaboration*. URL: https://www.fraunhofer.at/content/dam/austria/documents/WhitePaperTUEV/White%20Paper_Sicherheit_MRK_Ausgabe%202.pdf.
- (18.03.2024c). *Sicherheit in der Mensch-Roboter-Kollaboration*. URL: https://www.fraunhofer.at/content/dam/austria/documents/WhitePaperTUEV/White%20Paper_Sicherheit_MRK_Ausgabe%202.pdf.
- (18.03.2024d). *Sicherheit in der Mensch-Roboter-Kollaboration*. URL: https://www.fraunhofer.at/content/dam/austria/documents/WhitePaperTUEV/White%20Paper_Sicherheit_MRK_Ausgabe%202.pdf.
- (18.03.2024e). *Sicherheit in der Mensch-Roboter-Kollaboration*. URL: https://www.fraunhofer.at/content/dam/austria/documents/WhitePaperTUEV/White%20Paper_Sicherheit_MRK_Ausgabe%202.pdf.
- GNU (9.03.2024). URL: <https://www.gnu.org/licenses/copyleft.de.html>.
- GPL, Wikipedia (7.03.2024a). *Entstehung*. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/GNU_General_Public_License.
- (7.03.2024b). *Geschichte*. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/GNU_General_Public_License.
- (7.03.2024c). *GPL Version 3*. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/GNU_General_Public_License.
- Holton (24.03.2024a). *Beispiele für Software unter MIT License*. URL: https://www.esono.de/blog/softwareentwicklung/mit-lizenz-eine-einfuehrung_aid_1083.html.
- (24.03.2024b). *Der Einsatz von MIT-lizenzierten Komponenten in eigener Software*. URL: https://www.esono.de/blog/softwareentwicklung/mit-lizenz-eine-einfuehrung_aid_1083.html.
- (24.03.2024c). *MIT Lizenz Einführung*. URL: https://www.esono.de/blog/softwareentwicklung/mit-lizenz-eine-einfuehrung_aid_1083.html.
- Ingenieursmentalität (10.03.2024). *Servomotor erklärt*. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=g4BM1pjM64s>.
- Instruments, Texas (10.03.2024). *MUX50x 36-V, Low-Capacitance, Low-Charge-Injection, Precision, AnalogMultiplexers*. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/mux508.pdf?ts=1711326326881>.
- Ionos (6.03.2024a). *Bedingungen für den Urheberrechtsschutz: Software als geistiges Eigentum*. URL: <https://www.ionos.at/digitalguide/websites/online-recht/urheberrecht-bei-software/>.
- (6.03.2024b). *Nicht unter das Urheberrecht fallen hingegen*. URL: <https://www.ionos.at/digitalguide/websites/online-recht/urheberrecht-bei-software/>.
- (6.03.2024c). *Unter den urheberrechtlichen Schutz fallen*. URL: <https://www.ionos.at/digitalguide/websites/online-recht/urheberrecht-bei-software/>.
- (6.03.2024d). *Urheberrecht bei Software*. URL: <https://www.ionos.at/digitalguide/websites/online-recht/urheberrecht-bei-software/>.
- Josh, Fruhlinger (21.03.2024). *The CIA triad: Definition, components and examples*. URL: <https://www.csoonline.com/article/568917/the-cia-triad-definition-components-and-examples.html>.

- Joy, Anju Thangam (10.03.2024). *Was ist ein Aktuator - Arten und Anwendungen*. URL: <https://tameson.de/pages/aktuator>.
- Kreutzer, T. (10.03.2024). *bpb*. URL: <https://www.bpb.de/lernen/digitale-bildung/oer-material-fuer-alle/220550/die-sechs-creative-commons-lizenztypen-im-ueberblick/>.
- Mazzari, Vanessa (18.03.2024). *Ultraschallsensoren für Kollisionvermeidung*. URL: <https://www.generationrobots.com/blog/de.ultraschallsensoren-fur-kollisionvermeidung/>.
- Opensource (7.03.2024). URL: <https://opensource.org/osd>.
- REAC (10.03.2024). *Was ist ein Aktuator?* URL: https://www.reac-group.com/de_de/wissenswertes/aktuatoren/was-ist-ein-aktuator/.
- Roland, Pelayo (25.03.2024). *How to Use a Flex Sensor*. URL: <https://www.teachmemicro.com/use-flex-sensor/>.
- Saferinternet p.10 (6.03.2024). URL: <https://www.saferinternet.at/themen/urheberrechte>.
- Saferinternet p.11 (6.03.2024). URL: <https://www.saferinternet.at/themen/urheberrechte>.
- Saferinternet p.29 (6.03.2024). URL: <https://www.saferinternet.at/themen/urheberrechte>.
- Saferinternet p.7 (6.03.2024). URL: <https://www.saferinternet.at/themen/urheberrechte>.
- Saferinternet p.8 (6.03.2024). URL: <https://www.saferinternet.at/themen/urheberrechte>.
- Safety, Pilz: The Spirit of (13.03.2024). *EN 61508: Funktionale Sicherheit von Steuerungssystemen*. URL: <https://www.pilz.com/de-DE/support/law-standards-norms/functional-safety/en-iec-61508>.
- Schanze, R. (7.03.2024). *Giga*. URL: <https://www.giga.de/artikel/was-ist-open-source-einfach-erklaert/>.
- Scholze, M. (7.03.2024a). *PWC*. URL: <https://www.pwc.de/de/digitale-transformation/open-source-software-management-und-compliance/open-source-software-aktuelle-trends-und-entwicklungen.html>.
- (7.03.2024b). *Unternehmen und Behörden setzen auf Open Source Software*. URL: <https://www.pwc.de/de/digitale-transformation/open-source-software-management-und-compliance/open-source-software-aktuelle-trends-und-entwicklungen.html>.
- Simpleclub (7.03.2024a). *Freie Softwarelizenzen*. URL: <https://simpleclub.com/lessons/fachinformatikerin-softwarelizenzen>.
- (7.03.2024b). *Kommerzielle Softwarelizenzen*. URL: <https://simpleclub.com/lessons/fachinformatikerin-softwarelizenzen>.
- (7.03.2024c). *Softwarelizenzen einfach erklärt*. URL: <https://simpleclub.com/lessons/fachinformatikerin-softwarelizenzen>.
- SLS3D (24.02.2024). *Was ist selektives Lasersintern?* URL: [https://sls3d.de/wissen/what-is-selective-lasersintering/#:%5C%text=SLS%5C%20%5C%E2%80%93%20eng1.,\(3D%5C%2DDruck\)%5C%20aufzubauen](https://sls3d.de/wissen/what-is-selective-lasersintering/#:%5C%text=SLS%5C%20%5C%E2%80%93%20eng1.,(3D%5C%2DDruck)%5C%20aufzubauen).
- Studyflix (10.03.2024). *PID Regler*. URL: <https://studyflix.de/informatik/pid-regler-1450>.
- Süd, TÜV (13.03.2024). *MASCHINENRICHTLINIE 2006/42/EG EINFACH ERKLÄRT*. URL: <https://www.tuv-sud.com/de-de/indust-re/maschinensicherheit-info/maschinenrichtlinie>.
- Wan-Ting, Hsieh (25.03.2024). *Week 13: Networking and Communications*. URL: <https://fabacademy.wantinghsieh.com/assignment/13-networking-and-communications#build-esp32-wirel-two-way-communication-project---built-in-touch-sensors--conductive-fabrics--led>.

- Wannöffel, Prof. Dr. Manfred (5.03.2024a). *LEITFADEN ZUR EINFÜHRUNG VON MENSCH ROBOTER KOLLABORATION: PERSPEKTIVEN DER BETRIEBLICHEN INTERESSENVERTRETUNG*. URL: https://www.rubigm.ruhr-uni-bochum.de/rubigm/mam/content/publications/scipub/mrk_leitfaden.pdf.
- (5.03.2024b). *LEITFADEN ZUR EINFÜHRUNG VON MENSCH ROBOTER KOLLABORATION: PERSPEKTIVEN DER BETRIEBLICHEN INTERESSENVERTRETUNG*. URL: https://www.rubigm.ruhr-uni-bochum.de/rubigm/mam/content/publications/scipub/mrk_leitfaden.pdf.
- Wikipedia (7.03.2024a). URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Open_Source.
- (7.03.2024b). *Definition*. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Open_Source.
- (7.03.2024c). *Eigenschaften*. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Apache-Lizenz>.
- (7.03.2024d). *Geschichte*. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Open_Source.
- (10.03.2024a). *PT1-Glied*. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/PT1-Glied>.
- (10.03.2024b). *Servomotor*. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Servomotor>.
- Wikipedia *GPL* (7.03.2024). URL: https://de.wikipedia.org/wiki/GNU_General_Public_License.
- Wikipedia *Linux* (10.03.2024). URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Linux_\(Kernel\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Linux_(Kernel)).
- Wilhelm, Haager (2022). *Regelungstechnik*. Auflage 2. Wien: Hölder-Pichler-Tempsky.
- Wintergerst, R. (10.03.2024). *bitkom*. URL: <https://www.pwc.de/de/digitale-transformation/bitkom-open-source-monitor-2023.pdf>.