



Hochschule für Technik,
Wirtschaft und Kultur Leipzig

FAKULTÄT INGENIEURWISSENSCHAFTEN

E469 - AUSGEWÄHLTE THEMEN DER
AUTOMATISIERUNGSTECHNIK

**Bau und Programmierung eines
Deltaroboters**

Autor Corvin Pohle, Reiner Lange

Betreuer Professor Jens Jäkel, Marco Braun

18. September 2023

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	ii
Abkürzungsverzeichnis	ii
1 Einführung	1
1.1 Beschreibung der Ausgangslage	1
1.2 Zielstellung	3
2 Durchführung	4
2.1 Abweichung vom B&R-Bauplan	4
2.1.1 Andere Schrittmotoren	4
2.1.2 Alternative Steuerungselektronik	4
2.2 Montage	5
2.2.1 Neue Motorbefestigung	5
2.2.2 Alternative Zahnräder	5
2.2.3 Verarbeitung der Kohlefaserstangen	6
2.2.4 Achse der Hebelarme	6
2.2.5 Neue Endstopps	6
2.2.6 Montage des Elektromagneten	7
2.2.7 Montage im Gehäuse	8
2.2.8 Verdrahtung der Elektronikkomponenten	9
2.3 Programmierung	10
2.3.1 Funktionen des Programms	10
2.3.2 Umsetzung der Programmierung	10
2.4 Zeitplanung	11
3 Zusammenfassung	12
Anhang	13

Abbildungsverzeichnis

1	veränderte Motorplatten	5
2	neue Motorzahnräder	6
3	CFK-Stangen	6
4	neue Endstopps	7
5	Halterung Magnet	8
6	Roboter im Gehäuse	8
7	Verdrahtung	9
8	Zeitplan des Projektes	11
9	Roboter in Gesamtheit	12
10	Eidesstattliche Erklärung	57

Abkürzungsverzeichnis

CFK carbonfaserverstärkter Kunststoff

CNC Computerized Numerical Control

HMI Human Machine Interface

IDE Integrated Development Environment

POM Polyoxymethylene - hochmolekulare thermoplastische Kunststoffe

SPS speicherprogrammierbare Steuerung

1 Einführung

1.1 Beschreibung der Ausgangslage

Delta-Roboter sind Parallelarmroboter mit Stabkinetik. Die Basis befindet sich oberhalb der bewegenden Teile, der Roboter ist also hängend an einem Tragegestell montiert. Die drei Gelenkkarre sind nach unten gerichtet und bestehen jeweils aus einem, mit einem Motor bewegtem, Arm, an welchem mit Kugelgelenken zwei Stangen befestigt sind. Die Stangen sind mit ihren Enden, ebenfalls mit Kugelgelenken, an der Parallelplatte befestigt. Diese bewegt sich immer parallel zur Basisplattform, daher der Name. Der Roboter verfügt außerdem über eine Dreheinrichtung, um eine rotierende Bewegung zu ermöglichen. Diese sind im Bild zwar nicht mit dargestellt, in der Bauanleitung allerdings integriert. Da die Motoren an der Basis befestigt sind, können Delta-Roboter sehr schnelle Bewegungen ausführen, nicht auch zuletzt aufgrund der Leichtigkeit ihrer Arme.

Von der Firma „B&R“ gibt es eine Beschreibung mit Bauanleitung des Plotbots. Zusätzlich gibt es einen Ordner mit .stl-Dateien, welche zum Fertigen von Bauteilen mittels eines 3D-Druckers verwendet werden. Alle zusätzlich aufgeführten Komponenten müssen anderweitig erworben werden. Die Bauanleitung ist nicht besonders detailliert, weshalb wir beim Aufbau mit Problemen und höherem Zeiteinsatz rechnen. Einige Teile, wie Schrauben, ähnliches Verbrauchsmaterial und benötigtes Werkzeug, sind in den Räumlichkeiten der HTWK vorhanden und können für das Projekt verwendet werden. Auch die zu druckenden Bauteile können mithilfe der, in der HTWK befindlichen, 3D-Drucker gefertigt werden. Alle Dateien und Dokumente das Projekt betreffend sind in einem Repository gespeichert und abrufbar. Dieses ist über den folgenden Link erreichbar:

Repository

Nachfolgend ist die erste Seite des „Quick Start Guides“ von „B&R“, mit einer Abbildung des Deltaroboters, zu sehen.

PlotbotDelta@B&R

Quick Start Guide



1.2 Zielstellung

In diesem Projekt soll ein Delta-Roboter, nach der Vorlage der Automatisierungsfirma „B&R“, gebaut werden. Dabei werden Verbesserungen durchgeführt. Alle Änderungen werden mit Begründung in diesem Beleg dargelegt. Des Weiteren soll die Arbeit dokumentiert werden, sodass jemand mithilfe der Dokumentation das Projekt ebenfalls durchführen kann. Änderungen werden immer dann vorgenommen, wenn es einen Weg gibt die Durchführung zu vereinfachen und zu verschnellern, als auch im Fall finanzieller Einsparung. Es ist unser Anspruch, Personen die eigene Erarbeitung des Projektes mithilfe dieser Dokumentation deutlich zu erleichtern. Besonders bezüglich der Aspekte Zeit, Geld und Aufwand

Im zweiten Kapitel werden die Veränderungen aufgezeigt, warum diese vorgenommen wurden und mit der Umsetzung von „B&R“ verglichen.

2 Durchführung

2.1 Abweichung vom B&R-Bauplan

Direkt zu Beginn war sicher, dass wir von der ursprünglichen Vorlage abweichen werden. Beispielsweise wurden andere Motoren und ein Arduino zur Steuerung, anstelle der speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS), verwendet. Dies geschah zum einen aus Kostengründen - allein die Motoren von „B&R“ hätten rund 1500 € gekostet - zum anderen, um das System einfacher zu gestalten. Ein Arduino kann leichter und ohne kostenpflichtige Programmierumgebung beschrieben werden. Zudem gibt es verschiedenste Ressourcen dazu im Internet. Der Umgang mit Programmierwerkzeugen von Automatisierungsfirmen hingegen erfordert im Normalfall eine umfangreiche Einarbeitung.

Diese Abweichungen haben einige notwendige Veränderungen und Probleme nach sich gezogen, welche in den folgenden Teilabschnitten beschrieben werden. In der Dokumentation wird der gesamte Aufbau mit den neuen Komponenten mithilfe von Bildern erklärt. Die Dokumentation ist sowohl im Anhang dieses Belegs, als auch im Repository des Projektes zu finden. Dieser Beleg dient nur der Erklärung, warum spezifische Veränderungen vorgenommen wurden.

2.1.1 Andere Schrittmotoren

Wie bereits beschrieben wurden wegen des Kostenfaktors andere Schrittmotoren genutzt, wie sie beispielweise bei 3D-Druckern zum Einsatz kommen. Da nur ein Kreissegment von den Motoren genutzt wird und innerhalb dieses Positionen sehr genau angefahren werden müssen, liegt die Nutzung von Schrittmotoren auf der Hand. Auch im Entwurf von „B&R“ wurden Schrittmotoren eingesetzt, allerdings sind diese für die industrielle Verwendung vorgesehen, weswegen der Preis um ein Vielfaches höher ist, als bei den jetzt verwendeten Motoren.

2.1.2 Alternative Steuerungselektronik

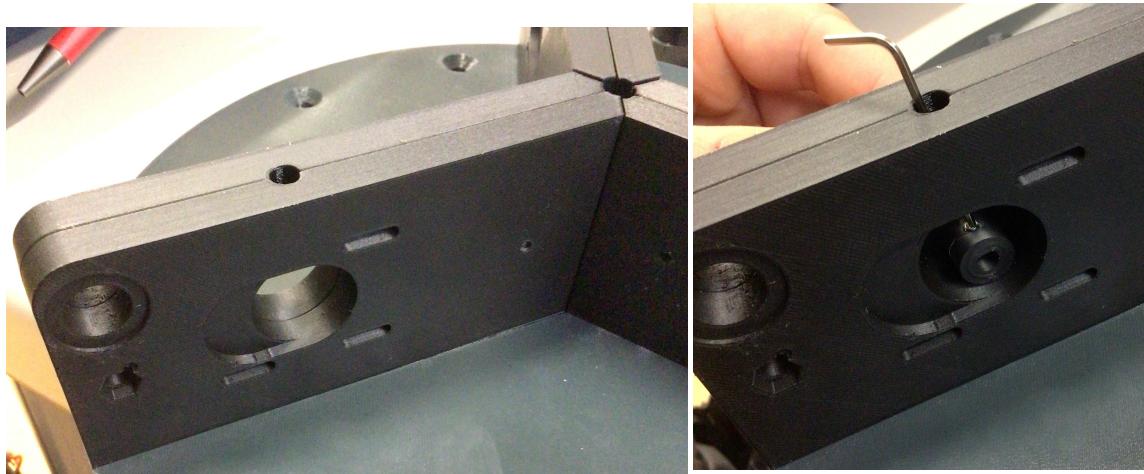
Zur Steuerung des Roboters war original eine SPS mit extra Ein- und Ausgangsmodulen vorgesehen. Wie bereits beschrieben, wäre die Verwendung dieser Komponenten zum einen sehr preisintensiv, zum anderen wäre eine entsprechende Engineering-Software von „B&R“ nötig gewesen. Verwendet wurde stattdessen ein Arduino Mega 2560, auf welchen ein Arduino UNO Computerized Numerical Control (CNC)-Shield aufgesteckt wird.

Die Wahl fiel auf einen Arduino, da dieser genug Rechenleistung für die Anwendung besitzt und weniger kostet als ein Raspberry Pi. Der Kostengrund war das Hauptargument zwischen den beiden Varianten, denn auch für den Raspberry Pi gibt es ein Motorshield, dieses wird ebenfalls an der Oberseite appliziert. Ein Arduino Mega 2560 wurde deshalb gewählt, da das CNC-Shield bei einem Arduino UNO R3 zwar auch passt, dort aber alle Pins belegt. Für den Elektromagneten wird allerdings ein binärer Ausgang benötigt, um den Magneten ein- und auszuschalten zu können, weswegen der UNO R3 ausschied. Das Shield besitzt eine eigene Spannungsversorgung und hält die Motortreiber. Des Weiteren, wurden ein Prototyping Shield und zwei WAGO-Klemmen mit je fünf Klemmpositionen verwendet. Das Prototyping Shield dient dazu die Litze einer Leitung an eine Steckverbindung am Arduino anzuschließen.

2.2 Montage

2.2.1 Neue Motorbefestigung

Da die neuen Motoren andere Maße besitzen, mussten die Motorplatten zur Aufnahme verändert werden. Die Abstände der Löcher zur Befestigung mussten verringert, das Achsloch verkleinert und auf einer Seite eine Vertiefung für den Motor eingesetzt werden, damit dieser richtig positioniert werden kann. Außerdem wurde an der Unterseite mittig ein Loch erzeugt, damit die Madenschraube, zur Befestigung der Zahnräder auf den Motorwellen, angezogen werden kann. Dafür wurden die .stl-Dateien genutzt um die ursprünglichen 3D-Modelle zu erzeugen, welche dann an die neuen Anforderungen angepasst werden konnten.



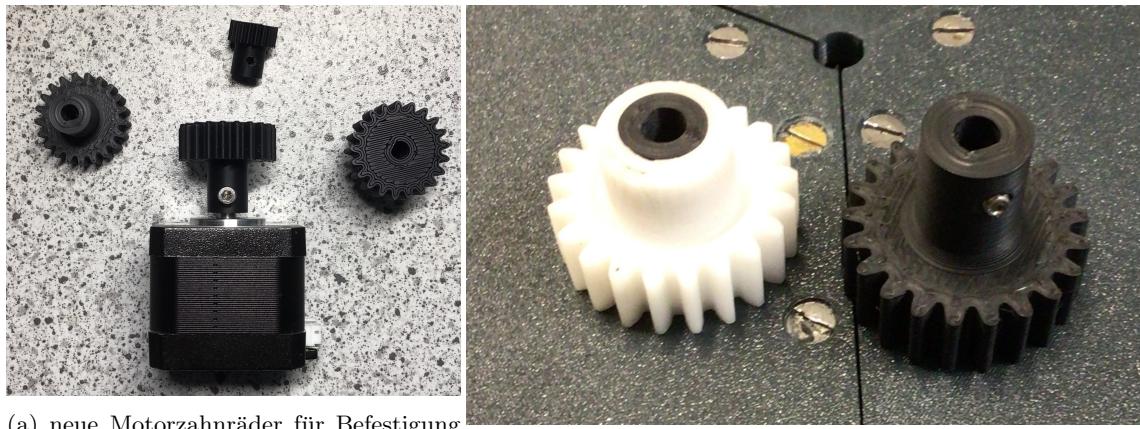
(a) neue Grundplatte zur Aufnahme der Schrittmotoren

(b) Detailansicht Loch zur Befestigung der Madenschraube

Abbildung 1: veränderte Motorplatten

2.2.2 Alternative Zahnräder

Nach der originalen Bauanleitung sollen einige gekaufte Zahnräder nachbearbeitet werden. Die technischen Zeichnungen dafür sind in Dokumenten von „B&R“ enthalten. Allerdings ist Polyoxytmethylene - hochmolekulare thermoplastische Kunststoffe (POM) ein zähes, sprödes Material, welches sich nicht so einfach bearbeiten lässt. Besonders beim Bohren frisst sich der Bohrer schnell in das weiche Material, dieses ist allerdings so fest, dass schnell große Drehmomente entstehen. Außerdem neigt POM zum reißen, was das Einspannen in einen Schraubstock erschwert. Da die Bearbeitung umständlich ist und teilweise viel Können und Feingefühl erfordert, beispielsweise die Fertigung des Zahnkranzes, wurde entschieden, die benötigten Zahnräder nach den technischen Zeichnungen zu modellieren und zu drucken. Das erleichtert außerdem die Arbeit für alle, die das Projekt ebenfalls bearbeiten wollen. Zusätzlich ist diese Lösung schneller und deutlich komfortabler. Es müssen nach abgeschlossenem Druck nur die M3-Gewinde für die Madenschrauben gebohrt werden, was in wenigen Minuten erledigt ist. Da die neuen Zahnräder mit Madenschrauben befestigt werden, musste, genau wie die Grundplatten für die Motoren, auch die Parallelplatte nachbearbeitet werden. Diese trägt den Mechanismus zur Drehung des Werkzeugkopfes, die vierte Achse, und wird von den anderen Schrittmotoren über die Arme bewegt. Das Achsloch musste vergrößert werden, damit das Zahnrad für die vierte Achse dort hindurch passt, weil dieses vor Montage des Motors auf der Welle befestigt werden muss. Dies wurde mit der gleichen Methode, wie bei den Grundplatten getan, sodass der Schrittmotor mitsamt des Zahnrads leicht daran befestigt werden kann.



(a) neue Motorzahnräder für Befestigung auf Flachwelle

(b) Zahnräder im Vergleich, links POM, rechts 3D gedruckt

Abbildung 2: neue Motorzahnräder

2.2.3 Verarbeitung der Kohlefaserstangen

Eine Herausforderung stellten auch die carbonfaserverstärkter Kunststoff (CFK)-Stangen dar, welche auf die entsprechende Länge von 300 mm zugeschnitten werden mussten. Die Stangen sind sehr spröde, weswegen ein Sägen per Hand ausschied. Die betreffende Stelle mit etwas Isolierband umwickeln und mit einer Miniaturschleifmaschine mit Trennscheibe schneiden, funktionierte allerdings sehr gut. Auch das Verkleben der Kugelgelenke gestaltete sich schwieriger als gedacht, da mehrere Klebersorten nicht aushärteten. Die Nutzung von 2-Komponenten-Kleber ist zu empfehlen und hat schlussendlich zu festen Resultaten geführt.

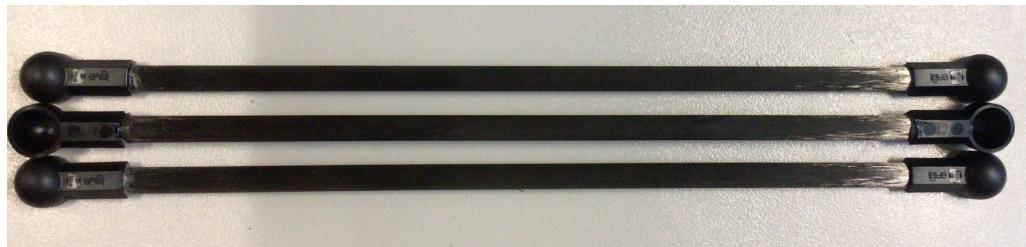


Abbildung 3: fertige CFK-Stäbe mit verklebten Kugelgelenken

2.2.4 Achse der Hebelarme

In der Montageanleitung wurde gezeigt, dass man als Achse für die Hebelarme einen 13 mm Rundstab aus Aluminium verwenden soll. Ein Rundstab in dieser Größe ist aber nur sehr schwer zu organisieren, weshalb auch dieser modelliert (allerdings mit 12,8 mm) und gedruckt wurde. Dies funktioniert gut, ist kostengünstiger und weniger aufwendig, als ein entsprechendes Angebot für Aluminium im Internet zu suchen, da die designte Achse zusammen mit dem Rest der Bauteile gedruckt werden kann. Auch hier muss im Nachgang zum Drucken wieder ein M3-Gewinde gebohrt werden, was in Kunststoff allerdings deutlich leichter geht, als in Aluminium, in welches vorher ein extra Loch gebohrt werden müsste.

2.2.5 Neue Endstopps

Der Roboter verfügt über drei induktive Sensoren, um die Hebelarme zu referenzieren und diese vor Beschädigung zu schützen. Dafür ist das Armzahnrad mit einer Madenschraube ausgestattet, welche vom Sensor in der Grundposition erkannt wird. Dadurch werden die Motoren über die

Programmierung abgeschaltet. Die ursprünglich vorgesehenen Sensoren werden mit 24 V Gleichspannung betrieben und haben einen Öffnerkontakt - wechseln also von High-Signal auf Low-Signal, wenn Metall erkannt wird. Diese sind mit dem Arduino jedoch nicht kompatibel, denn die digitalen Eingangs-Pins sind nur für 5 V ausgelegt und können Schaden erleiden, wenn diese Spannung überschritten wird. Aus diesem Grund wurden andere Sensoren beschafft, welche mit 5 V Betriebsspannung arbeiten. Beim Testen ist allerdings aufgefallen, dass die Sensoren intern einen sehr großen Spannungsabfall haben, sodass am Schaltausgang nur 1,5 V anliegen. Die endgültige Lösung boten Endtaster, welche nahezu keinen Spannungsabfall über dem Schaltkontakt haben. Die neuen Endstopps werden mit 5 V vom CNC-Shield versorgt und schalten diese bei Betätigung auf die entsprechenden Endstopp-Pins durch. Die Taster werden außen an den Motorplatten montiert und mechanisch von den Hebelarmen betätigt.

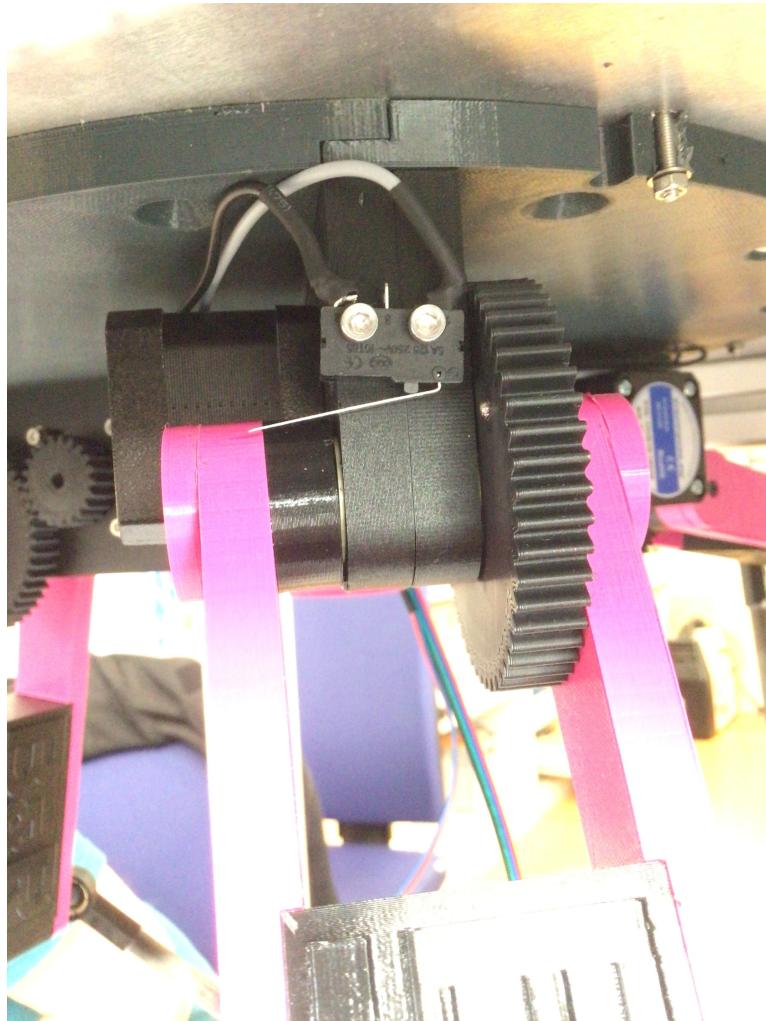


Abbildung 4: neue Endstopps

2.2.6 Montage des Elektromagneten

An der Drecheinrichtung in der originalen Anleitung wird kein Werkzeug montiert, um dem Delta-Roboter trotzdem eine Funktion zu geben, wurde ein Elektromagnet verbaut. Zudem ist dieser leicht zu steuern - er kann durch Anlegen einer Spannung ein- und ausgeschaltet werden. Dieser war aber nicht ohne Weiteres an der Drecheinrichtung zu befestigen. Daher wurde eine entsprechende Halterungsplatte modelliert, die an die Drecheinrichtung geschraubt wird. An dieser kann der Magnet angeschraubt werden. Im folgenden Bild ist das pinke Bauteil die Drecheinrichtung und die schwarze runde Platte am Boden die neu modellierte Halteplatte für den Elektromagneten.

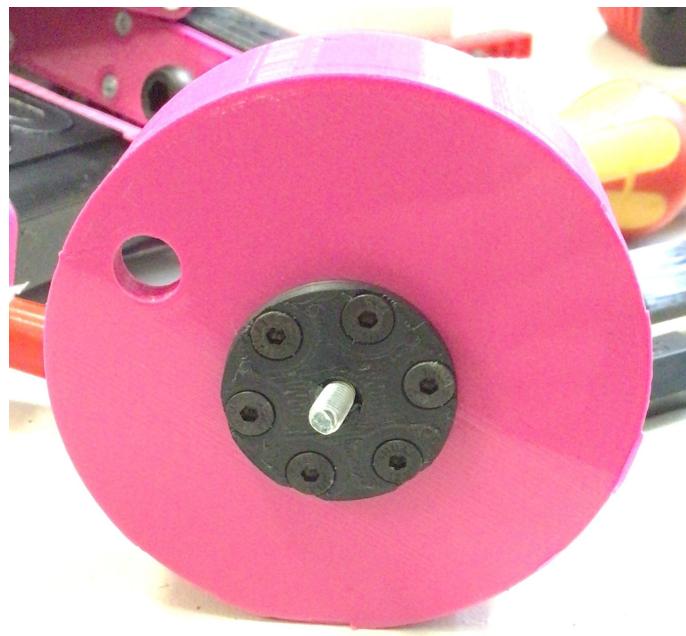
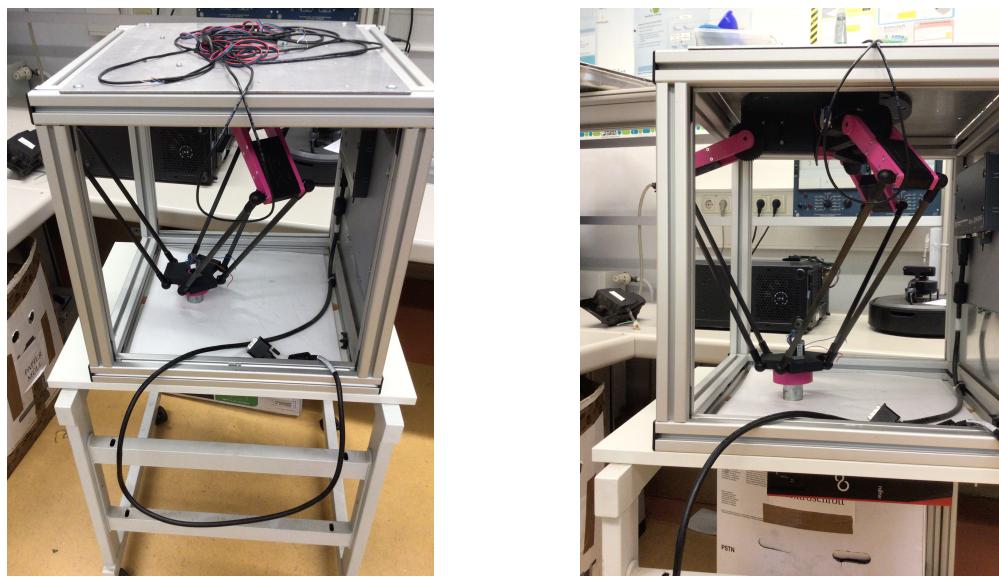


Abbildung 5: Halteplatte für Elektromagnet an Dreheinrichtung

2.2.7 Montage im Gehäuse

Der Deltaroboter ist für die hängende Anordnung vorgesehen, weswegen er ein Gehäuse oder zumindest ein Tragesystem benötigt. Dafür wurde ein Würfel aus Aluminium-Profilen verwendet, welcher in einem der hochschuleigenen Labore übrig war. Zur Befestigung des Roboters wurde eine Aluminium-Platte, welche bereits bei dem Würfel dabei war, oben auf dem Käfig befestigt. An dieser Platte wurde dann die Grundplatte des Roboters mit sechs Schrauben fixiert und drei Löcher zur Durchführung der Kabel gebohrt. Der Roboter im Gehäuse wurde dann auf einem kleinen Rollwagen befestigt, sodass dieser leicht bewegt werden kann, aber trotzdem immer die gleiche Unterlage hat.



(a) Ansicht von schräg oben

(b) Ansicht von der Seite

Abbildung 6: Roboter im Gehäuse

Die Befestigung der originalen Bauteile zur Steuerung wurde nirgends gezeigt oder beschrieben, weswegen dafür eine Lösung gefunden werden musste. Die elektronischen Bauteile zur Steuerung sollen auf die Oberseite der Aluminium-Platte montiert werden. Dafür wurde ein Gehäuse mit Deckel modelliert und gedruckt. Dieses bietet außerdem einen mechanischen Schutz der Komponenten und einen Berührungsschutz vor elektrischem Schlag. Das Gehäuse hat entsprechende Halterungen, um den Arduino mit dem CNC-Shield und die Anschlussklemmenplatine, zu befestigen. Auch für die Steckerbuchse und die WAGO-Klemmen wurden Halterungen vorgesehen. Das Gehäuse aus Kunststoff bietet eine Isolierung der spannungsführenden Teile und kann ebenfalls gedruckt werden, was Freiheit für die Konfiguration zulässt. Zusätzlich wurden für spätere Projekte an diesem Objekt ein Human Machine Interface (HMI) und ein Computer montiert. Über den Computer lässt sich das HMI ansteuern, welches der Visualisierung und möglicherweise auch der Bedienung des Roboters dienen kann.

2.2.8 Verdrahtung der Elektronikkomponenten

Die Verdrahtung bestand an vielen Stellen aus einfachen Steckverbindungen, es mussten aber auch einige Lötstellen gesetzt werden. Der Arduino wurde mit dem CNC-Shield an der Oberseite ausgestattet. Das Shield besitzt eine eigene Spannungsversorgung und hält die Motortreiber, an welche die vier-poligen Stecker der Schrittmotoren angesteckt werden. Zur Verteilung der Gleichspannung werden WAGO-Klemmen verwendet. Das CNC-Shield nutzt 24 V zum Antreiben der Schrittmotoren. Der Arduino erhält dabei von einem Spannungsregler-Board eine verringerte Spannung von 12 V, genauso wie der Elektromagnet über einen Optokoppler. Der Optokoppler wird mit 5 V vom Arduino betrieben und über einen binären Pin geschaltet, sodass er den 12 V Stromkreis des Elektromagneten öffnen und schließen kann. Um die binären Signale der Sensoren auf dem CNC-Shield für die Erkennung der Endlagen anzuschließen, wurde weiterhin ein Prototyping Shield verwendet, um die Litzen der Sensoren mit Jumper-Kabeln am CNC-Shield anzuschließen.

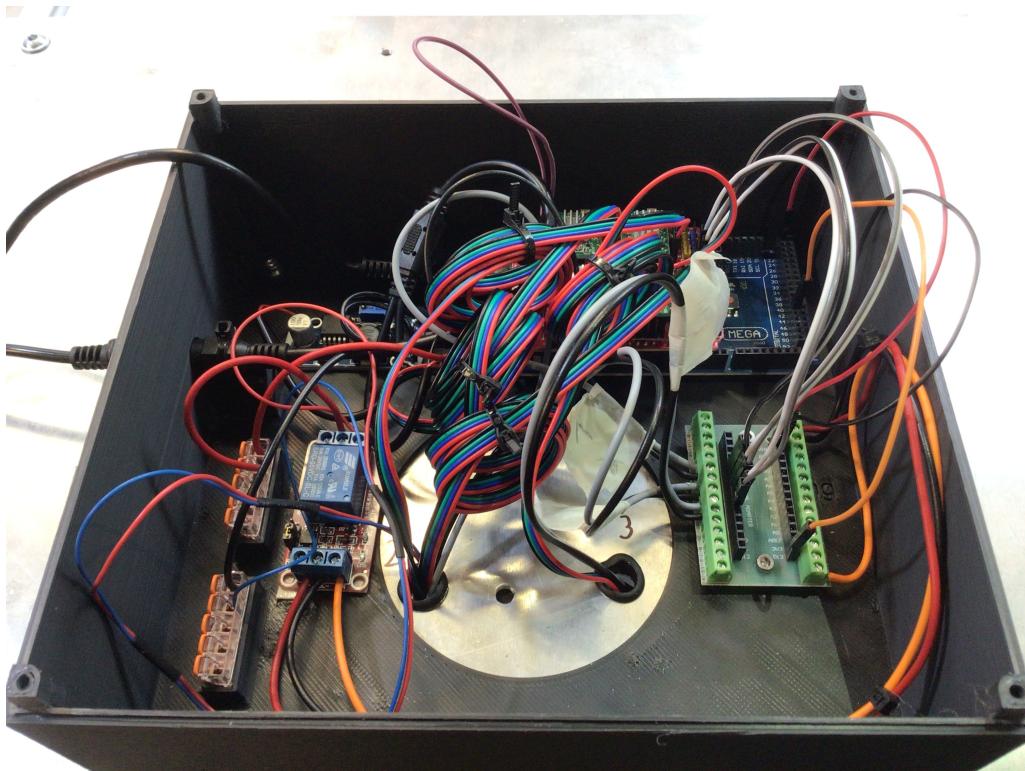


Abbildung 7: Verdrahtung im Gehäuse

2.3 Programmierung

2.3.1 Funktionen des Programms

Die Hauptfunktion des Arduino Programms ist die Ansteuerung der vielen verschiedenen Komponenten, die die Funktion des Deltaroboters ermöglichen. So müssen zur Ansteuerung der Schrittmotoren zum Beispiel Richtungs- und Schritt-Pins gesetzt werden. Auch der Elektromagnet, wird mithilfe eines Ausgangspins des Arduinos geschaltet. Des Weiteren werden auch die Endschalter vom Arduino versorgt und die Schaltsignale ausgewertet. Diese verschiedenen Komponenten und ihre zugehörigen Pins müssen im Programm definiert und gesteuert werden. Nur so kann der Deltaroboter überhaupt funktionieren.

Durch die freie Programmierbarkeit mithilfe der Arduino Integrated Development Environment (IDE) können viele verschiedene Aufgaben mithilfe des Roboters bewältigt werden. Mit kleinen Modifikationen, wie dem Anbau von zusätzlichen Sensoren, können diese Programme noch umfangreicher und komplexer werden. Im derzeitigen Zustand sind Pick-and-Place-Anwendungen und Plotter-Anwendungen besonders gut möglich.

Das Ziel des Programms ist die Ausführung einer einfach gehaltenen Pick-and-Place Aufgabe. Hierbei wird zuerst die Home-Position angefahren. Dies ermöglicht einen gleichbleibenden Startpunkt nach jedem Neustart und ist notwendig, da nur auf einer Seite des jeweiligen Bewegungsraumes der Achsen ein Endschalter vorhanden ist. Somit muss der zweite Endpunkt in Abhängigkeit von diesem Endtaster programmiert werden. Nach dem Homing wird die erste Position angefahren. Hier wird der Elektromagnet eingeschaltet und es kann ein kleines Metallwerkstück aufgenommen werden. Anschließend wird eine zweite Position angefahren und dort das Werkstück, durch das Ausschalten des Elektromagneten, wieder abgelegt. Nach einer kurzen Pause startet dieser Ablauf in umgekehrter Richtung. So wird nun das Werkstück an der Position Zwei aufgenommen und an der ersten Position wieder abgelegt. Dieser Ablauf wird, bis zum Abbruch des Programms wiederholt.

Beim Erstellen dieses Programms sind mehrere Fehler aufgetreten. So mussten für die Ansteuerung der Schrittmotoren, Adern der Anschlussleitung getauscht werden. Dies lag an unterschiedlichen Pinbelegungen bei den Geräten. Außerdem funktionierte die Inbetriebnahme des Elektromagneten aufgrund eines Defekts des Arduinos nicht. Dabei hatte einer der steuerbaren Pins eine Fehlfunktion und ließ sich nicht mehr Abschalten. Die Verwendung eines anderen Pins schaffte Abhilfe.

2.3.2 Umsetzung der Programmierung

Es ist möglich, den verwendeten Microcontroller in den Sprachen C, C++ oder der eigenen Arduino-Programmiersprache (basierend auf C) zu beschreiben. Zudem lassen sich viele hilfreiche Ressourcen - wie Anleitungen und Codebestandteile - im Internet finden. Genutzt wurde die Arduinosprache, da diese weitestgehend intuitiv ist und simple Zugriffe auf alle Funktionen ermöglicht. Zum Schreiben des Codes und Hochladen auf den Microcontroller wurde die Arduino IDE verwendet, welche kostenlos heruntergeladen werden kann und auf so gut wie jedem Laptop oder Computer funktioniert. Zur Steuerung des Arduinos sind außerdem verschiedene Bibliotheken notwendig. Für die Berechnung der Roboterbewegungen wurde die "Delta-Kinematics-Library" genutzt. Hierbei werden die Maße der Achsen des Deltaroboters hinterlegt und aufgrund dieser Angaben die nötigen Motoransteuerungen zur Ausführung der Bewegung berechnet. Eine weitere genutzte Bibliothek ist die Accel-StepperBibliothek. Diese ist grundsätzlich eine Erweiterung zur normalen Arduino-Bibliothek, die zur Ansteuerung von Schrittmotoren genutzt wird. Die restlichen verwendeten Funktionen befinden sich nativ in der Arduino-Programmierumgebung. Dies umfasst zum Beispiel die Ansteuerung bestimmter Pins oder die Programmierung mithilfe von Schleifen.

2.4 Zeitplanung

Am Anfang des Projektes wurde zur besseren Planung und Strukturierung eine Zeittabelle erstellt, in der durchzuführende Tätigkeiten mit einem Zeitansatz festgehalten wurden. Dabei wurden außerdem die Aufgaben verteilt, um möglichst effizient zu arbeiten.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1																
Zeitplan Deltaroboter																
2		Woche	Monat 1 (Vorbereitung)				Monat 2			Monat 3			Monat 4			
3			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
4	Orientierungs- und Planungsphase		Orientierung													
5	Thema finden															
6	Erste Informationssichtung															
7	Bestellung benötigter Komponenten															
8	3D-Druckteile in Auftrag geben															
9	Aufgaben und Abläufe planen															
10	Dokumentation beginnen und Ziele formulieren															
11	Materialbeschaffung und Montage															
12	Umarbeiten von Modellen															
13	Mechanik zusammenbauen															
14	Verdrahtung durchführen															
15	Programmierung vornehmen															
16	Dokumentation															
17	Arbeiten dokumentieren															
18	Bauanleitung verfassen															
19	Github erstellen															
20	begleitende Informationen und Dokumente erstellen															
21	Abschlussphase															
22	Korrekturlesen (lassen)															
23	inhaltliche Prüfung vornehmen															
24	Präsentation erstellen															

Abbildung 8: Zeitplan des Projektes

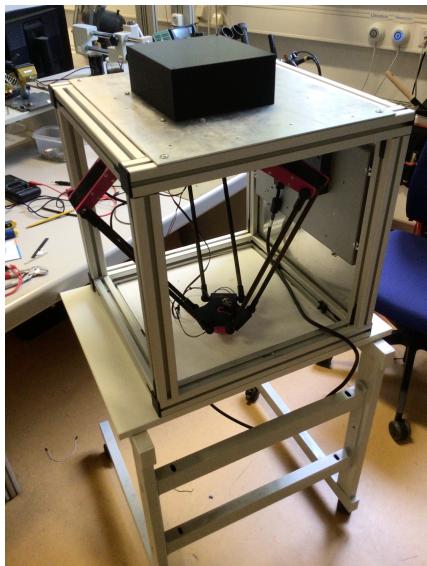
Abschließend betrachtet war die Zeittabelle zwar komplex genug, allerdings war die Zeiteinteilung und -nutzung nicht optimal. Die Beschaffung der benötigten Bauteile hat sehr viel länger gedauert, als ursprünglich angenommen. Auch haben andere Aufgaben in der Hochschule, wie z. B. Belege, Praktika und Prüfungen, dazu geführt, dass besonders die Anfangszeit nicht so intensiv genutzt wurde, wie es nötig gewesen wäre. Zudem wäre es sinnvoll gewesen, mit der Programmierung bereits vor dem fertigen Aufbau zu beginnen, da die Ansteuerung der Motoren Schwierigkeiten bereitet hat. Das führte dazu, dass gegen Ende des Projektes ein großes Pensum abzuarbeiten war, was zu deutlich erhöhtem Stress und vermutlich auch Einbußen bei der Qualität der Arbeiten geführt hat.

3 Zusammenfassung

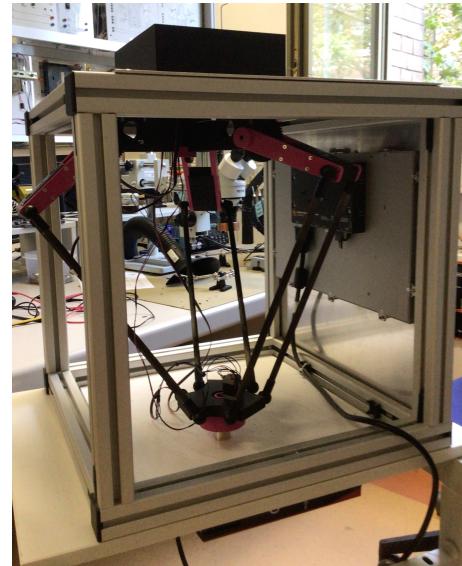
In diesem Projekt ging es darum, den Roboter anhand der Vorlage zu bauen und zu programmieren. In erster Linie sollten dabei aber die entstandenen Probleme betrachtet werden und wie diese bewältigt wurden. Wie bereits dargelegt, sind Schwierigkeiten nicht zu knapp aufgetreten und es gab reichlich Raum für Verbesserungen, welche alle mit Fokus auf die Wiederholbarkeit gemacht wurden. Das Ziel war es, das Projekt entsprechend zu erweitern und verbessern, sodass es in Zukunft von anderen Gruppen deutlich leichter und schneller durchführbar ist. Betrachtet man die kürzere Teileliste, die neu modellierten 3D-Modelle und die neue Montageanleitung, dürfte deutlich werden, dass dies erreicht wurde. Außerdem sind die Kosten für das Projekt, im speziellen für die benötigten Komponenten, stark gesunken. Zukünftige Gruppen müssen keine Teile neu modellieren, alles was an Komponenten benötigt wird, kann aus der Bestelliste online bestellt und der Rest gedruckt werden. Durch neu erstellte Teile, wie den Zahnrädern, entfallen einige aufwendige und fehleranfällige Arbeitsschritte. Dadurch kann ein zügigerer Zusammenbau und eine höhere Wiederholgenauigkeit erreicht werden.

Bei der Bearbeitung ist allerdings auch aufgefallen, dass die Verwendung von günstigeren Bauteilen, welche kein aufeinander abgestimmtes Automatisierungskonzept bilden, auch Nachteile hat. So hat die Verwendung eines Arduinos zu einem Mehraufwand, was die Spannungsversorgung betrifft, geführt. Mit einer SPS und passenden Ein- und Ausgangsbaugruppen können durchweg 24 V Gleichspannung verwendet werden. Durch den Arduino wird neben der 24 V Spannungsebene auch eine mit 12 V für den Arduino selbst und den Elektromagneten benötigt, sowie eine Ebene mit 5 V, um die Sensoren zu versorgen. Dementsprechend wurde beim Fertigen der Zahnräder zwar Arbeit gespart, beim Verdrahten jedoch, hat sie zugenommen. Es lässt sich also als eine Verschiebung des Arbeitsaufwandes betrachten.

Nachfolgend ist der fertige Delta-Roboter dargestellt und man sieht, dass deutlich mehr zur Nutzung nötig ist, als auf dem Bild von „B&R“ zu sehen ist.



(a) Ansicht von vorne/ oben



(b) Ansicht von der Seite

Abbildung 9: Roboter in Gesamtheit

Anhang

Quellen

Informationen zu Delta-Robotern:

<https://wiki.induux.de/Delta-Roboter> 13.9.2023 11:16 Uhr

Informationen zum Umgang mit Github:

<https://www.youtube.com/watch?v=eGaImwD8fPQ> 7.9.2023 14:05 Uhr

<https://www.youtube.com/watch?v=g-EfC7SPDAM> 7.9.2023 14:41 Uhr

Informationen zur Programmierung des Arduino:

<https://hypertriangle.com/alex/delta-robot-tutorial/> 12.9.2023 16:32 Uhr

<https://www.zyltech.com/arduino-cnc-shield-instructions/> 15.9.2023 17:56 Uhr

Projektdokumentation

Die nachfolgende Dokumentation zeigt den gesamten Aufbau des Roboters und kann als Bauanleitung verwendet werden, um das Projekt erneut durchzuführen.



Hochschule für Technik,
Wirtschaft und Kultur Leipzig

FAKULTÄT INGENIEURWISSENSCHAFTEN

E469 - AUSGEWÄHLTE THEMEN DER
AUTOMATISIERUNGSTECHNIK

**Bauanleitung zur Konstruktion eines
Deltaroboters**

Autor Corvin Pohle, Reiner Lange
Betreuer Professor Jäkel, Marco Braun

18. September 2023

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	ii
Abbildungsverzeichnis	ii
1 Vorwort	1
2 Vorbereitung	2
2.1 Befestigungsmittel	5
2.2 Elektronikbauteil und weitere Komponenten	5
2.3 Gehäusekomponenten	6
3 Aufbau Mechanik	7
3.1 Aufbau Grundplatte	7
3.2 Endlagentaster verbauen	9
3.3 Aufbau Haltearme	10
3.4 Fertigung Kohlefaser-Verbindungsstäbe	14
3.5 Aufbau Parallelplatte	16
3.6 Dreheinrichtung	18
3.7 Montage an Grundplatte	19
3.8 Montage Parallelplatte	24
3.9 Zusammenbau Mechanik	26
4 Gehäuse und Verdrahtung	29
4.1 Robotergehäuse	29
4.2 Elektronikgehäuse	30
4.3 Verdrahtung	33
5 Programmierung	39

Tabellenverzeichnis

1	zu druckende Bauteile	2
2	Befestigungsmittel	5
3	Elektronikbauteil und weitere Komponenten	5
4	Gehäusekomponenten	6

Abbildungsverzeichnis

1	Roboter Gesamtansicht	3
2	beschriftete 3D-gedruckte Bauteile	4
3	Gewinde in Motorplatten bohren	7
4	Zylinderstift in Motorplatte	7
5	Motorplatten verbinden	8
6	Trägerplatte mit Motorplatten verbinden	8
7	Abstützung Mitte verkleben	9
8	Kabel anlöten an Endstopps	9
9	Endstopps anschrauben	10
10	Gewinde in Armzahnräder bohren	11
11	Gewinde in Armzahnräder bohren	11
12	Zylinderstifte in seitliche Platten stecken	12
13	Anbau an seitliche Arme	12
14	M8 Gewinde für Kugelköpfe bohren	13
15	Einschrauben der Kugelköpfe	13
16	fertige Haltearme	14
17	Kohlefaserstäbe zuschneiden	14
18	Schrauben in Gelenkpflanen	15
19	Schraubenhäupter absägen	15
20	Gelenkköpfe verkleben	16
21	Gewinde in Parallelplatte bohren	16
22	Kugelköpfe in Parallelplatte schrauben	17
23	fertige Parallelplatte	17
24	Zahnkranz aufstecken	18
25	Magnethalterung verschrauben	18
26	Befestigung Elektromagnet	19
27	Anlaufscheiben einlegen	20

28	Haltearm aufgeschoben	21
29	Haltearm mit Achse fixiert	21
30	Motor befestigen	22
31	Anbau Motorzahnrad	23
32	richtiger Abstand der Zahnräder	23
33	Position Motorzahnrad 4. Achse	24
34	Motor 4. Achse festschrauben	25
35	Dreheinrichtung einstecken	25
36	Dreheinrichtung befestigen	26
37	Gelenkeinsätze aufstecken	26
38	Gelenke zusammenstecken	27
39	fertige Mechanik	27
40	Gehäuse	29
41	Robotergehäuse	30
42	Gewinde in Elektronikgehäuse bohren	30
43	Befestigung des Elektronikgehäuses	31
44	Gehäuseträger auf Alu-Platte verschrauben	31
45	Platinen im Gehäuseträger verschrauben	32
46	Montage des CNC-Shields	32
47	Stromlaufplan Delta-Roboter	33
48	Vorbereitung Spannungsversorgung	34
49	Spannungsversorgung installiert	35
50	Anschluss Optokoppler	36
51	abschließende Verdrahtung mit Jumperkabeln	37
52	Gehäusedeckel verschließen	38

1 Vorwort

In dieser Dokumentation wird Schritt für Schritt die Montage eines Delta-Roboters beschrieben. Diese Bauanleitung basiert auf der Anleitung der Firma „B&R“. Zur Kostenreduzierung, Verkürzung des Arbeitsaufwandes und Verbesserung wurde das Projekt abgewandelt. Mehr zu den Einzelheiten lässt sich dem Beleg-Dokument „Bau und Programmierung eines Delta-Roboters“ entnehmen. Aufgrund der Veränderungen am Projekt und der unzureichenden Beschreibung in der Anleitung von „B&R“ wurde diese neue Bauanleitung erstellt. Diese ist in den Aufbau der Mechanik und der anschließenden Verdrahtung der Elektronik untergliedert.

2 Vorbereitung

Dieses Projekt erfordert Grundkenntnisse im handwerklichen Bereich - von Schraubverbindungen, über Gewinde schneiden, bis hin zum Löten. Zusätzlich werden entsprechende Werkzeuge benötigt, um diese Arbeiten durchführen zu können. Die Fähigkeit im Umgang mit den Werkzeugen wird vorausgesetzt und als bekannt angenommen. Ist dem nicht so, sollten diese vor Beginn des Projektes erworben werden.

Zuerst müssen alle Komponenten für den Bau zusammengetragen werden. Dafür sind alle Modelle im Ordner „verwendete 3D-Modelle“ im github mit einem 3D-Drucker zu drucken. Die Teile müssen entsprechend der Anzahl zu Beginn des Dateinamens gefertigt werden („6x Arm_seitliche_Platte“ muss also sechs Mal gedruckt werden). Steht keine Anzahl davor, ist dies als eins zu interpretieren. Die Anzahl kann außerdem der unten stehenden Tabelle entnommen werden. Die Teile können aus PLA gedruckt werden, PETG, ABS o. ä. sind aber auch möglich. Eine Schichthöhe von 0,2 mm ist für alle Teile ausreichend, große Teile können auch mit einer größeren Schichtdicke gedruckt werden. Es sollten Wandstärken von mindestens 1,2 mm und 20 % Füllung eingestellt werden, damit die Teile die benötigte Stabilität haben. Zum besseren Verständnis sind in den folgenden Bildern alle gedruckten Bauteile markiert und in der Tabelle beschriftet. Bei den Bauteilen 5, 6, 11, 13 und 15 sind wir zwar Urheber der 3D-Modelle, allerdings kommen die Spezifikationen von B&R, die technischen Zeichnungen sind mit im Ordner, mit den Originaldateien von B&R. Zum Verbinden der Bauteile werden meist Gewinde in die gedruckten Kunststoffkörper gebohrt. Beim nachfolgenden Verschrauben dürfen die Schrauben daher nur handfest angezogen werden, um ein Ausreißen der Gewindegänge zu vermeiden.

Tabelle 1: zu druckende Bauteile

Nummer	Bauteilname	zu druckende Anzahl	Urheber
1	Trägerplatte Teilstück	3	B&R
2	Motorplatte rechts (überarbeitet)	3	B&R (von uns angepasst)
3	Motorplatte links (überarbeitet)	3	B&R (von uns angepasst)
4	Abstützung Mitte	1	B&R (von uns angepasst)
5	Motorzahnrad klein	3	wir
6	Armzahnrad	3	wir
7	Arm Achse Abstandshalter	3	B&R
8	Arm seitliche Platte	6	B&R
9	Arm Achse Deckplatte	6	B&R
10	Arm innere Füllung	3	B&R
11	Achse	3	wir
12	Parallelplatte	1	B&R (von uns angepasst)
13	Motorzahnrad 4. Achse	1	wir
14	Dreheinrichtung	1	B&R
15	Zahnkranz	1	wir
16	Magnethalterung	1	wir
17	Elektronikgehäuse Träger	1	wir
18	Elektronikgehäuse Deckel	1	wir

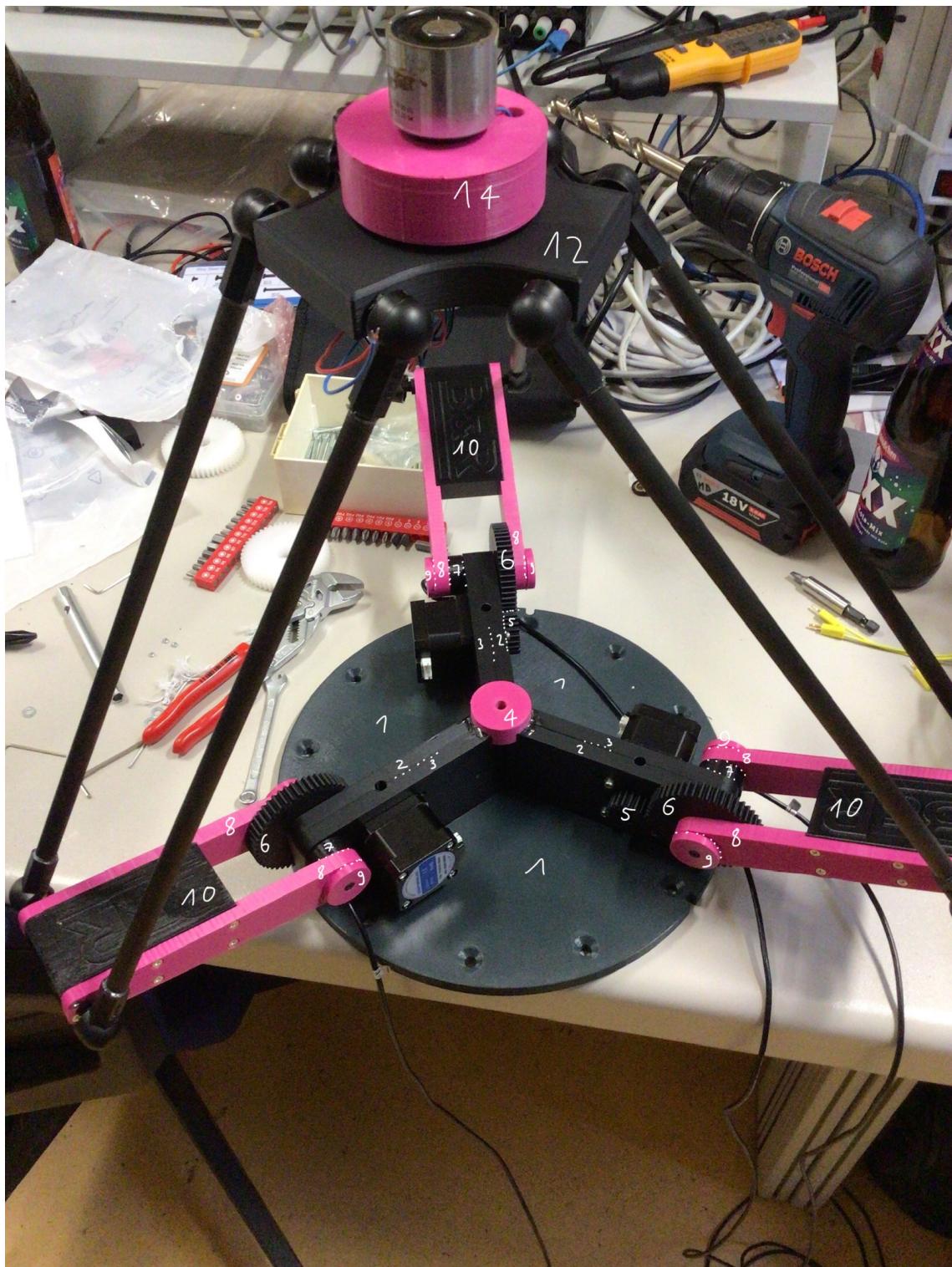


Abbildung 1: Roboter Gesamtansicht

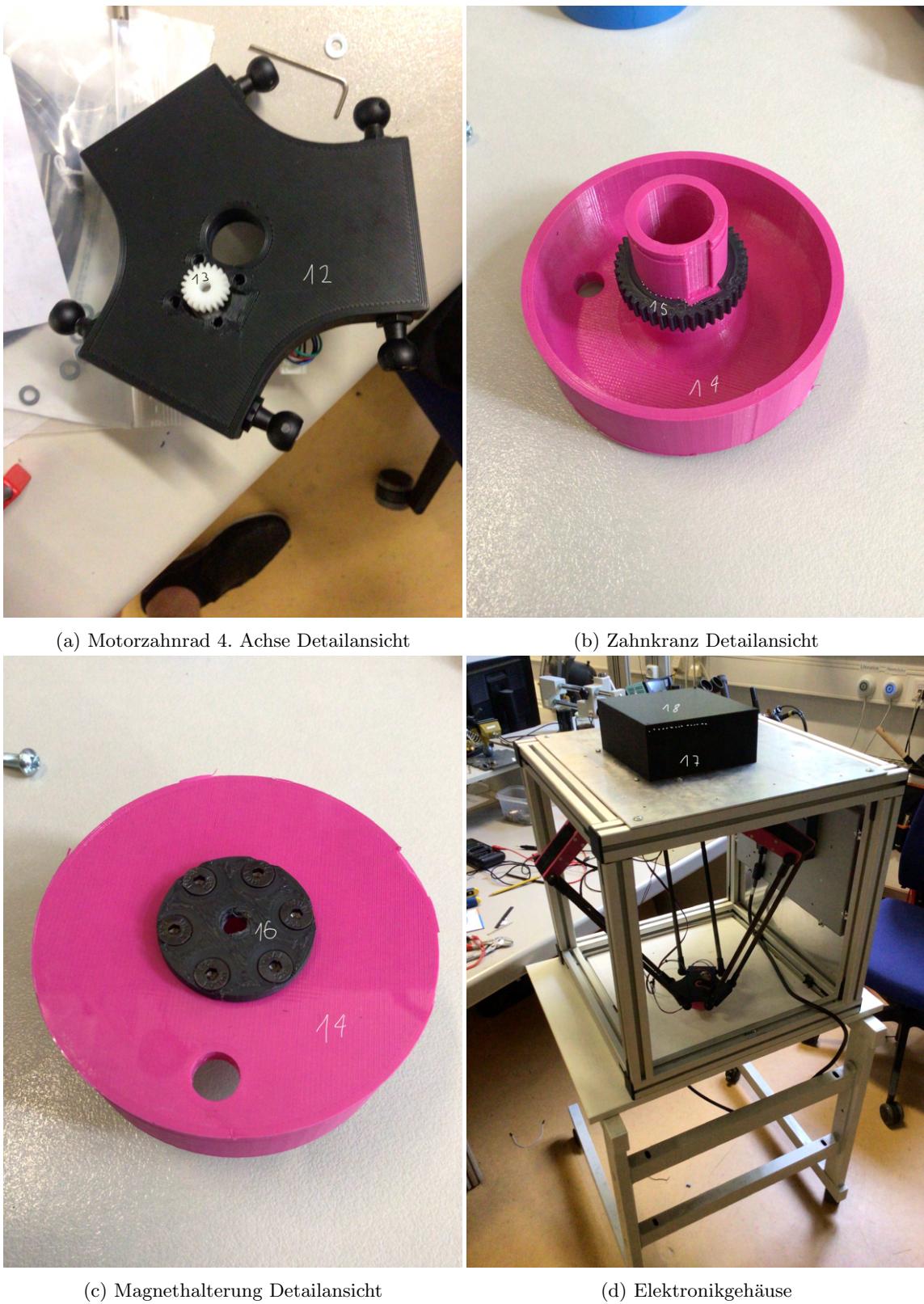


Abbildung 2: beschriftete 3D-gedruckte Bauteile

Alle anderen Komponenten sind entsprechend der nachfolgenden Listen zu kaufen oder anderweitig zu organisieren, beispielsweise aus Beständen zu nutzen.

2.1 Befestigungsmittel

Folgende Befestigungsmittel werden benötigt:

Tabelle 2: Befestigungsmittel

Bauteil	Anzahl	Information	Link
M2x14 Senkkopf	4	zur Motorbefestigung 4. Achse	Amazon
M3x10 Senkkopf	70		Amazon
M3x10 Flachkopf	6	Befestigung Endstopps	Amazon
M3x16 Senkkopf	70		Amazon
M3x25 Flachkopf	9	Befestigung Schrittmotoren	Amazon
M3 Unterlegscheiben	9	Befestigung Schrittmotoren	Amazon
M3x4 Madenschrauben	7		Schrauben-express
M3x16 Zylinerstifte	18		Kalmbach
M4x10 Flachkopf	1	Befestigung Elektromagnet	Amazon
M8x35 Kunststoffschauben	12	Verbindung Kugelgelenk mit Carbonstangen	Habermann

2.2 Elektronikbauteil und weitere Komponenten

Folgende zusätzliche Komponenten werden außerdem benötigt:

Tabelle 3: Elektronikbauteil und weitere Komponenten

Bauteil	Anzahl	Information	Link
Elektromagnet	1		Asperon
Schrittmotoren	3	Motoren für Hebelarme	Amazon
Schrittmotor	1	Motor für 4. Achse	Farnell
Arduino Mega 2560	1	Steuerung des Roboters	Reichelt
Arduino UNO CNC Shield v3	1	Motortreiber (zur Ansteuerung der Motoren)	Amazon
Proto Shield	1	Klemmen zum Anschluss der Sensoren	Amazon
Netzteil	1	24 V; 3 A DC	Amazon
Spannungsregler	1	24 V auf 12 V verringern für Arduino	Amazon
Relais (Optokoppler)	1	Schalten des Elektromagneten	Amazon
Endstopps	3	Taster zur Endlagenerkennung der Hebelarme	Amazon
12 V DC Splitter	1	Spannungsversorgung und -aufteilung	Amazon
Jumperkabel	1	Verdrahtung der Platinen	Amazon
Sicherungsring Din 471 20 mm	1	Halterung Dreieinrichtung	Strefa
Anlaufschiben 14 mm Innen-durchmesser	6	Reduzierung Reibung an Armen	Igus
Kugelgelenke	12		Igus
CFk Stangen	2 (6x 300 mm)	10x8 mm, 1000 mm Zuschnitt auf 300 mm	Composites
2K-Kleber	1	Kleber zum Verbinden von teilen	Pattex

2.3 Gehäusekomponenten

Die nachfolgenden Bauteile und Befestigungsmittel sind nur für das Gehäuse, beziehungsweise die Aufhängung des Roboters. Die Montage des Gehäuses wird nachfolgend erklärt, allerdings ist diese nicht zwingend so auszuführen und dient als Beispiel, bezüglich einer Umsetzung.

Tabelle 4: Gehäusekomponenten

Bauteil	Anzahl	Information	Link
Alu-Profil 40x40x500 mm	4	Kanten für Gehäusewürfel	Amazon
Alu-Profil 40x40x420 mm	8	Kanten für Gehäusewürfel (auf 420 mm Zuschneiden)	Amazon
Winkelverbinder	32	Verbindung der Alu-Profile	Amazon
Abdeckkappen	8		Amazon
Alu-Platte 500x500 mm	1	Aufhängung Roboter	Amazon
Nutensteine 8 mm	4	Befestigung Platte an Gehäusewürfel	Amazon
M4x10 Flachkopfschrauben	4	Befestigung Platte an Gehäusewürfel	Amazon
M4x16 Senkkopfschrauben	6	Befestigung Roboter an Platte	Amazon
M4x60 Flachkopfschrauben	8	Befestigung Gehäusewürfel an Rollwagen	Amazon
M4 Unterlegscheiben	16	Befestigung Gehäusewürfel an Rollwagen	Amazon
M4 Muttern	14	Befestigung Gehäusewürfel an Rollwagen und Roboter an Platte	Amazon
Motorkabel	1	Verlängerung Motorkabel 4. Achse	Amazon
M3x20 Flachkopfschraube	4	Befestigung Elektronikgehäuse an Platte	Amazon
M3x10 Senkkopfschraube	4	Gehäusedeckel verschließen	Amazon
M3x5 Flachkopfschraube	5	Befestigung Platinen in Gehäuse	Amazon
M3 Muttern	4	Befestigung Elektronikgehäuse an Platte	Amazon
M3 Unterlegscheiben	8	Befestigung Elektronikgehäuse an Platte	Amazon

3 Aufbau Mechanik

3.1 Aufbau Grundplatte

Zuerst müssen die seitlichen Löcher der sechs Bauteile „Motorplatte rechts“ und „Motorplatte links“ mit M3-Gewinden versehen werden. Ebenso die Löcher auf der äußeren Stirnseite zur Be-festigung der Endlagentaster.



Abbildung 3: Gewinde in Motorplatten bohren

Dann werden in die drei rechten Motorplatten jeweils zwei M3x16 Zylinderstifte gesteckt. Diese sollten nicht vollends durchgeschoben werden, damit die Stifte hinterher mittig in den Bauteilen sitzen.

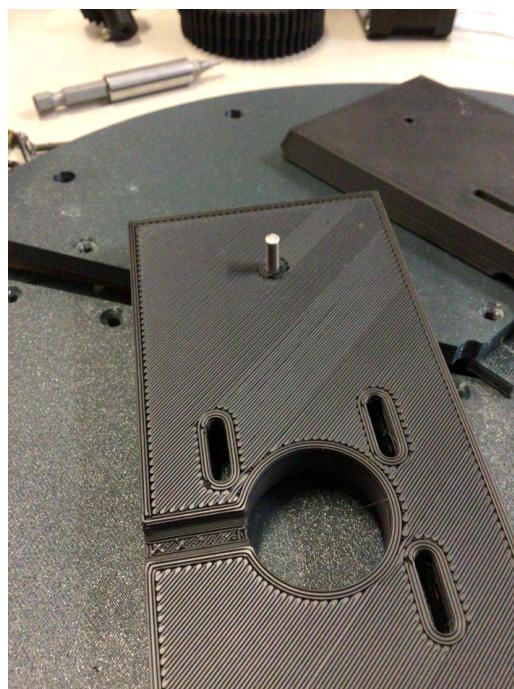
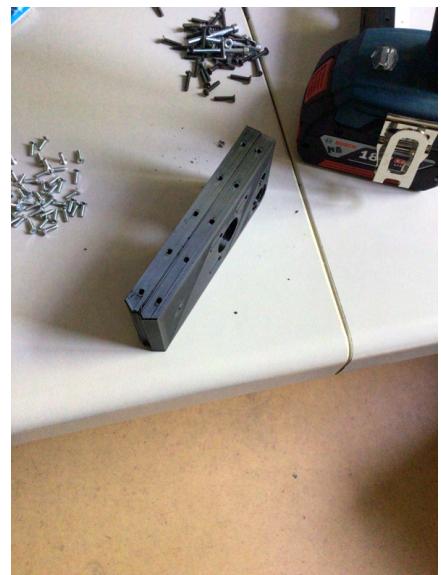


Abbildung 4: Zylinderstift in Motorplatte

Ist dies geschehen, kann eine linke Motorplatte mit einer rechten verbunden werden.



(a) Motorplattenhälften zusammenstecken



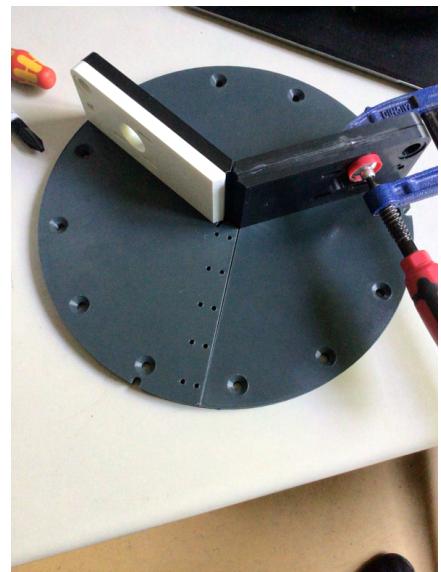
(b) fertige Motorplatten

Abbildung 5: Motorplatten verbinden

Im nächsten Schritt wird die Trägerplatte aus den drei einzelnen Teilen zusammengesetzt und an den Motorplatten mit M3x16 Senkkopfschrauben befestigt, sodass ein komplettes Gebilde entsteht. Die Schrauben sollten nicht zu fest gezogen werden, da sonst das Kunststoffgewinde in den Motorplatten ausreißen kann.



(a) Trägerplatte Ansicht von oben



(b) Trägerplatte Ansicht von unten

Abbildung 6: Trägerplatte mit Motorplatten verbinden

Zum Schluss wird auf den Motorplatten noch die „Abstützung Mitte“ verklebt. Dafür sollte der 2K-Kleber verwendet werden und das Konstrukt sollte mit einer Schraubzwinge - nicht zu fest - fixiert werden, bis der Kleber ausgehärtet ist.

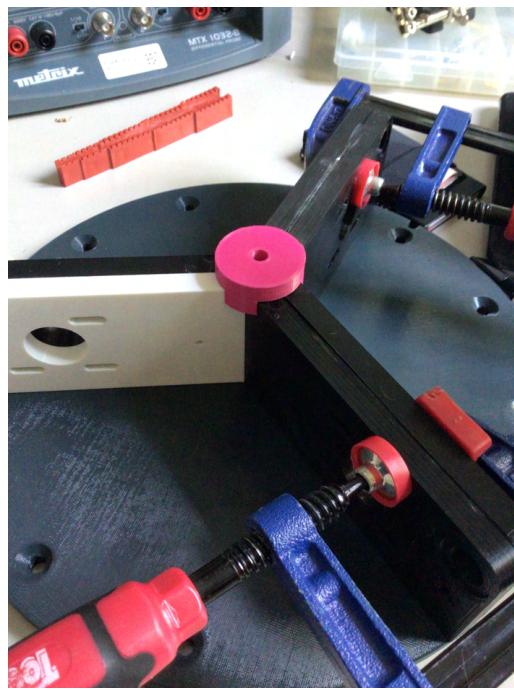


Abbildung 7: Abstützung Mitte verkleben

3.2 Endlagentaster verbauen

Zur Endlagenerkennung der Haltearme kommen Taster mit verlängertem Betätigungsarm zum Einsatz. An diese sollten vor dem Einbau die Kabel zur Stromversorgung angelötet werden. An die Kontakte 1 (C) und 2 (NC) wird jeweils ein Kabel mit 35 cm Länge gelötet und anschließend mit Schrumpfschlauch isoliert.



Abbildung 8: Kabel anlöten an Endstopps

Danach werden die Taster mit M3x10 Flachkopfschrauben an die äußeren Stirnseiten der Motorplatten angeschraubt. Der Betätigungshebel zeigt dabei nach unten und wird vom Hebelarm in der Grundposition geschaltet.

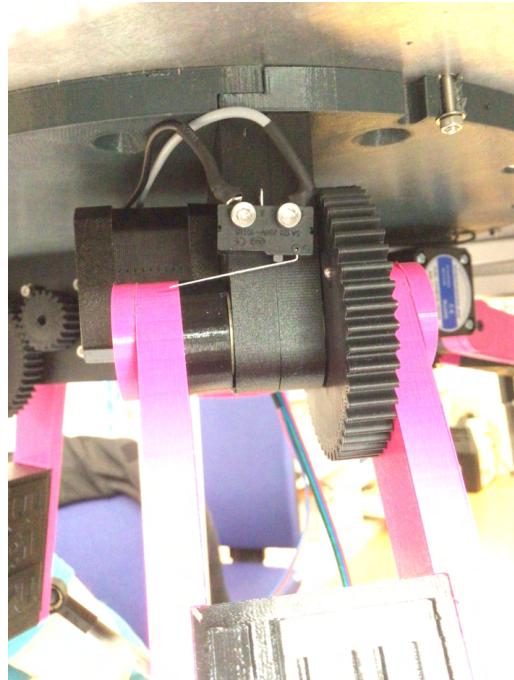


Abbildung 9: Endstopps anschrauben

3.3 Aufbau Haltearme

Die Haltearme sind die elektrisch bewegten Teile des Roboters und sorgen über die Kugelgelenke für eine Bewegung der Parallelplatte und damit des Magneten.

Zuerst müssen die 2,5 mm großen Löcher der großen Armzahnräder und der „Arm Achse Abstandshalter“ mit M3-Gewinden versehen werden. Die zwei Löcher je Zahnrad liegen auf einer Linie und dienen der Befestigung am Haltearm. Auch die kleinen Löcher der Bauteile „Arm innere Füllung“ müssen mit M3 Gewinden ausgestattet werden.



Abbildung 10: Gewinde in Armzahnräder bohren

Sind die Gewinde fertig, können die „Arm seitliche Platte“ mit M3x10 Senkkopfschrauben an den inneren Füllungsblöcken befestigt werden.



Abbildung 11: Gewinde in Armzahnräder bohren

Zur Befestigung der Zahnräder und der „Arm Achse Abstandshalter“ werden in die zwei, 3 mm großen, Löcher der seitlichen Platte Zylinderstifte gesteckt, sodass diese, sich zugewandt, auf den Innenseiten herausschauen.

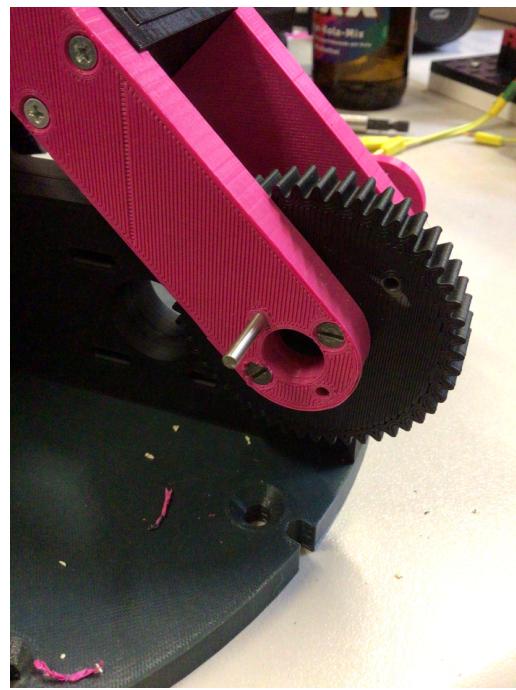
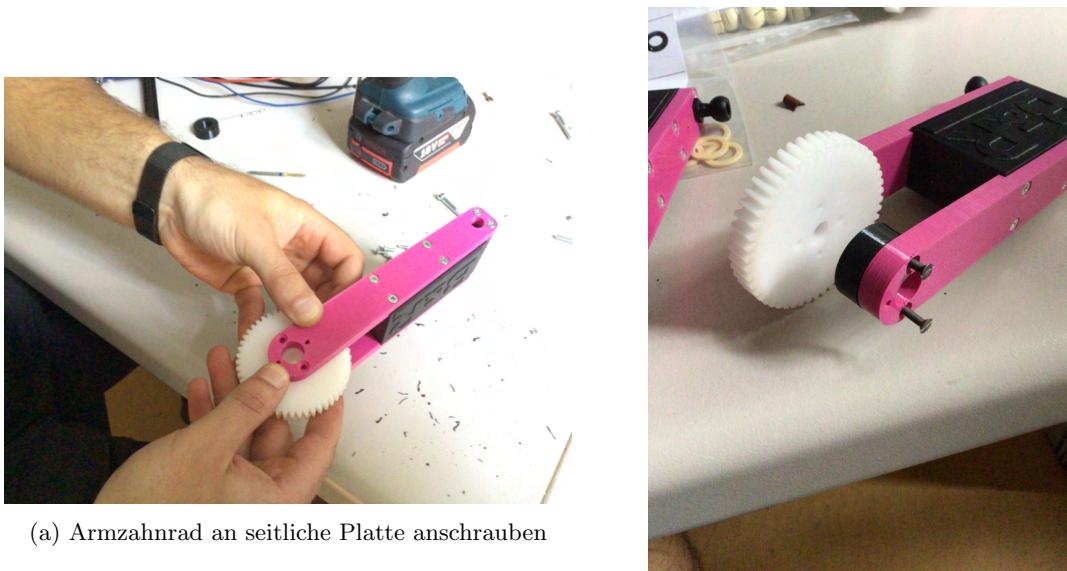


Abbildung 12: Zylinderstife in seitliche Platten stecken

Ist dies geschehen, können die Zahnräder auf der einen und die Abstandshalter auf der gegenüberliegenden Seite mit M3x16 Senkkopfschrauben fixiert werden.



(a) Armzahnrad an seitliche Platte anschrauben
(b) Abstandshalter an seitliche Platte anschrauben

Abbildung 13: Anbau an seitliche Arme

Zum Schluss müssen in die großen Löcher in den Füllblöcken M8 Gewinde gebohrt werden.



Abbildung 14: M8 Gewinde für Kugelköpfe bohren

In diese Gewinde werden dann die Kugelköpfe eingeschraubt.



Abbildung 15: Einschrauben der Kugelköpfe

Damit sind die Haltearme fertig und können im späteren Verlauf an den Motorplatten verbaut werden.

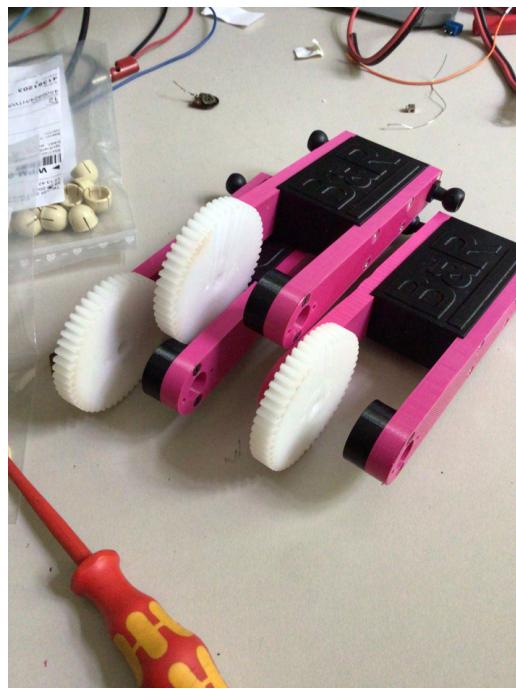


Abbildung 16: fertige Haltearme

3.4 Fertigung Kohlefaser-Verbindungsstäbe

Um die radiale Bewegung der Haltearme in eine dreidimensionale Bewegung umzuwandeln, werden diese mittels den Kugelgelenken und Verbindungsstangen mit der Parallelplatte verbunden, welche den rotierbaren Werkzeugkopf trägt. Zuerst müssen die Kohlefaserstäbe auf die richtige Länge von 300 mm zugeschnitten werden. Dafür sollte der Schnittbereich einlagig mit Isolierband, oder einem ähnlichen Klebeband umwickelt werden, um dann mit einer Miniaturbohrmaschine (z. B. Dremel) und einer Trennscheibe den Stab zu zerschneiden. Es ist zu empfehlen, dabei eine Schutzbrille zu tragen und darauf zu achten, dass der Kohlefaserstaub nicht übermäßig eingeatmet wird. Sind die Schnittkanten nicht ganz sauber, können diese mit etwas Schleifpapier, vorsichtig begradigt werden. Insgesamt werden sechs Stäbe mit je 300 mm Länge benötigt.

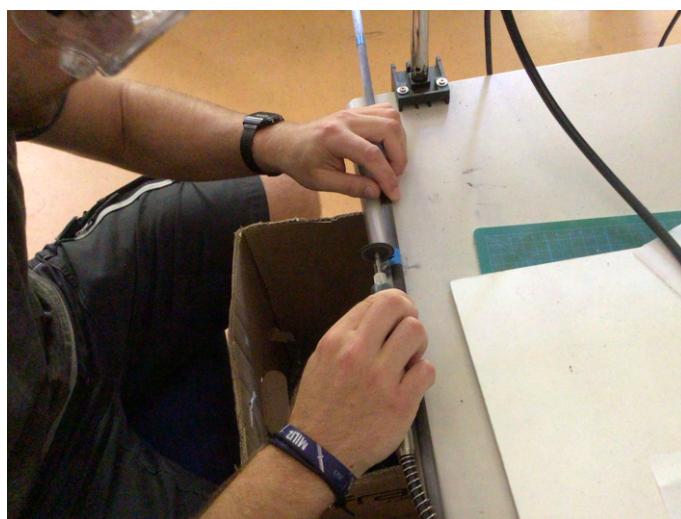


Abbildung 17: Kohlefaserstäbe zuschneiden

Im nächsten Schritt werden in die zwölf Gelenkpflanen je eine M8 POM-Schraube geschraubt. Diese sollen fest sitzen, doch da man nur in Kunststoff schraubt, muss man auf die richtige Dosierung des Drehmoments achten.



Abbildung 18: Schrauben in Gelenkpflanen

Sind die Schrauben festgezogen, können die Schraubenköpfe abgesägt werden, da die verbleibenden Gewindestifte anschließend in die Kohlefaserstäbe eingesteckt werden. Zum Absägen eignet sich beispielsweise eine kleine Eisensäge.

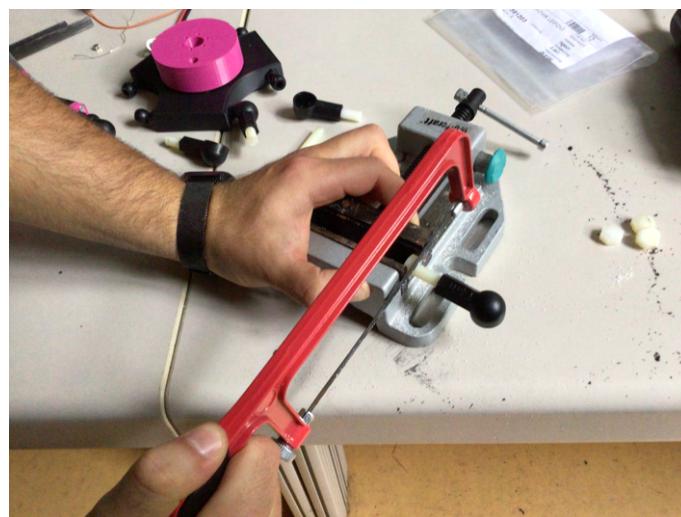


Abbildung 19: Schraubenköpfe absägen

Zuletzt werden die Gelenkpflanen mit den Gewindestiften in die Kohlefaserstäbe eingeschoben und verklebt. Dafür wird der 2K-Kleber verwendet. Wichtig ist die Kontaktflächen vorher gründlich zu säubern, besonders in den Verbindungsstäben können Kohlefaserreste verbleiben. Zur Ausrichtung der Gelenkpflanen an den Enden macht es sich gut, die Stäbe auf eine glatte Oberfläche zu legen und die Enden flach auf die Oberfläche zu drücken.



Abbildung 20: Gelenkköpfe verkleben

3.5 Aufbau Parallelplatte

Die Parallelplatte ist wie bereits beschrieben über die Kohlefaserstäbe mit den Haltearmen verbunden. Damit diese Verbindung möglich ist, muss die Parallelplatte mit sechs Kugelköpfen versehen werden. Dafür werden in die seitlichen Löcher M8 Gewinde gebohrt.



Abbildung 21: Gewinde in Parallelplatte bohren

In diese Gewinde können anschließend die Kugelköpfe eingeschraubt werden.



Abbildung 22: Kugelköpfe in Parallelplatte schrauben

Damit ist die Parallelplatte fertig und wird später mit der Dreheinrichtung verbunden.



Abbildung 23: fertige Parallelplatte

3.6 Drecheinrichtung

Die Drecheinrichtung wird an der Parallelplatte befestigt, trägt das Werkzeug (den Elektromagneten) und sorgt dafür, dass dieser um 360° drehbar ist. Zuerst wird der gedruckte Zahnkranz auf die Welle aufgesteckt, die Phase muss dabei nach unten orientiert sein.



Abbildung 24: Zahnkranz aufstecken

Danach werden in die sechs Löcher am Boden M3-Gewinde gebohrt, in denen die Magnethalterung mit M3x10 Senkkopfschrauben befestigt werden kann.

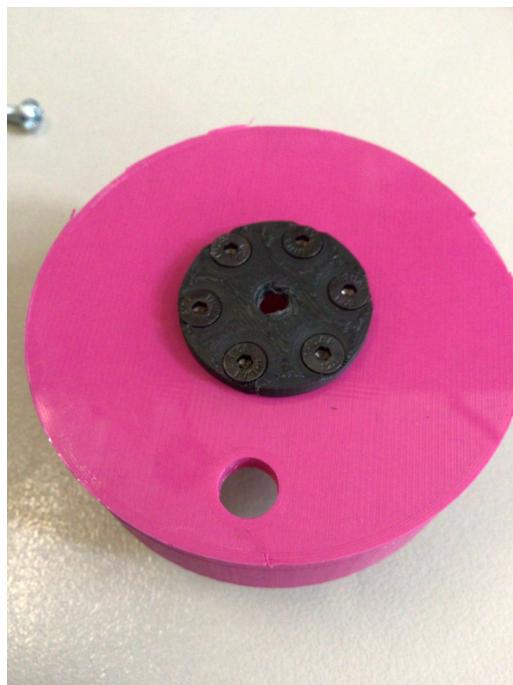


Abbildung 25: Magnethalterung verschrauben

Durch das mittlere Loch kann von oben die M4x10 Flachkopfschraube zum Halten des Elektromagneten gesteckt werden. Die Kabel des Magneten können durch das Loch in der hohlen Welle nach oben heraus geführt werden.



Abbildung 26: Befestigung Elektromagnet

3.7 Montage an Grundplatte

Nachdem alle einzelnen Baugruppen fertig gestellt wurden, können diese im Folgenden zusammengefügt werden. Zuerst werden die Haltearme an der Grundplatte montiert. Dazu werden in die Vertiefungen in den Motorplatten die Anlaufscheiben gelegt, welche die Reibung der Mechanik verringern.

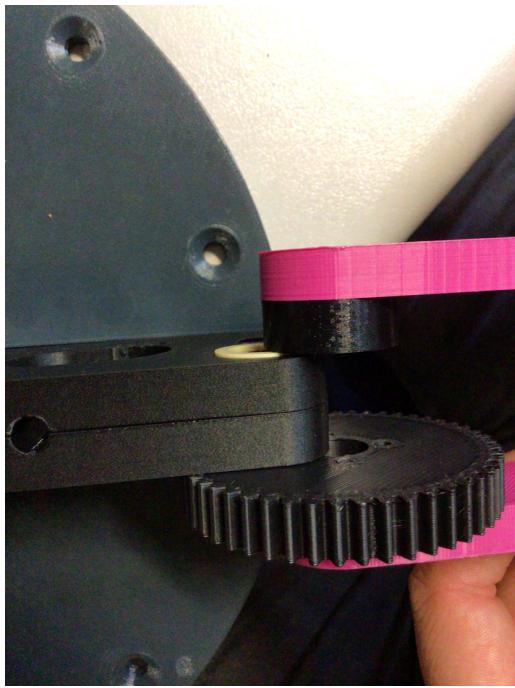


Abbildung 27: Anlaufscheiben einlegen

Über die Anlaufscheiben werden dann die Haltearme geschoben, sodass sich die Motorplatten dazwischen befinden. Die Haltearme sind dabei so auszurichten, dass sich die großen Zahnräder, von unten betrachtet, immer rechts der Motorplatten befinden, so wie im Bild gezeigt.



Abbildung 28: Haltearm aufgeschoben

Nachdem der Haltearm aufgeschoben wurde, muss dieser mit der gedruckten Achse befestigt werden. Dafür müssen in die Löcher an den Enden M3-Gewinde gebohrt werden, damit die „Arm Achse Deckplatte“ mit M3x16 Senkkopfschrauben befestigt werden können, um die Achse in ihrer Position zu fixieren.



Abbildung 29: Haltearm mit Achse fixiert

Sind die Haltearme mit den Achsen gesichert, müssen die Motoren angebaut werden. Dafür werden die M3x25 Flachkopfschrauben jeweils mit einer M3 Unterlegscheibe versehen und durch die Langlöcher in den Motorplatten gesteckt, um die Schrittmotoren zu befestigen. Die Motoren müssen sich dabei auf der Plattenseite mit der Aussparung neben dem Achsloch befinden und die Steckerranschlüsse sollten zur Mitte orientiert sein. Dabei sollten die Motoren noch nicht endgültig festgeschraubt werden, sondern sich noch verschieben lassen, um später den Abstand der Zahnräder einzustellen zu können.

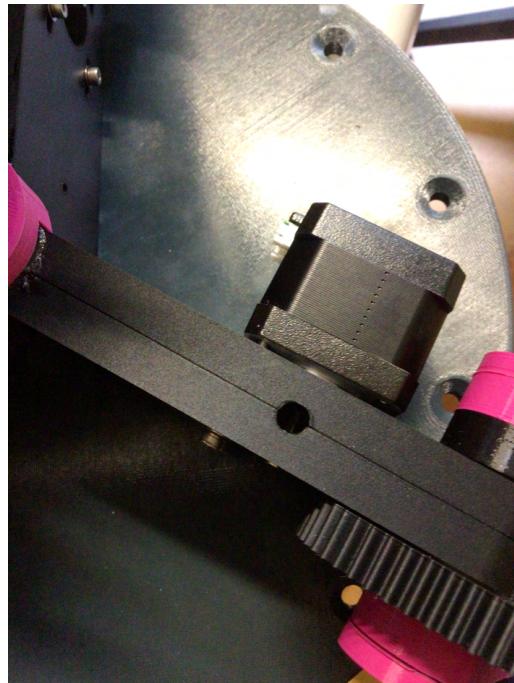
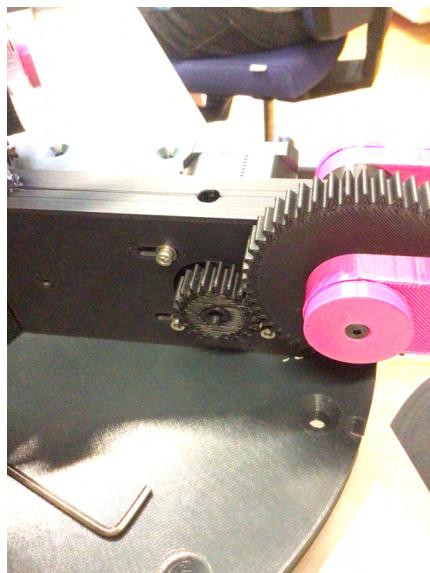


Abbildung 30: Motor befestigen

Danach wird das seitliche Loch des „Motorzahnrad klein SH12521HF“ mit einem M3 Gewinde versehen und eine M3x4 Madenschraube eingeschraubt. Die Motorzahnräder werden dann auf die Flachwelle der Motoren aufgesteckt und mit der Madenschraube nach unten (also unter das Loch) ausgerichtet. Durch das mittige Loch in den Motorplatten kann die Madenschraube dann festgezogen werden, sodass die Zahnräder fest auf den Wellen sitzen.



(a) Motorzahnrad aufstecken



(b) Motorzahnrad festschrauben

Abbildung 31: Anbau Motorzahnrad

Nachdem das Motorzahnrad befestigt wurde, muss der Motor nach außen geschoben werden, bis die beiden Zahnräder sauber ineinander greifen, und dann angeschraubt. Im nachfolgenden Bild ist gezeigt, wie die Zahnräder den richtigen Abstand zueinander haben, dass die Zähne die benötigte Überdeckung haben.



Abbildung 32: richtiger Abstand der Zahnräder

3.8 Montage Parallelplatte

Um die Dreheinrichtung rotieren zu können, muss zuerst der Motor dafür verbaut werden. Das gedruckte „Motorzahnrad 4. Achse 28202000“ hat ebenfalls ein seitliches Loch, in welches ein M3-Gewinde gebohrt werden muss. Danach wird eine M3x4 Madenschraube eingeschraubt und das Zahnrad auf die Motorwelle geschoben. Wird nun der Motor mitsamt Zahnrad kopfüber in das äußere Loch in der Motorplatte gesteckt, müssen die Zähne des Zahnrads mit der Unterseite der Parallelplatte bündig sein. Ist dadurch die richtige Position des Zahnrads auf der Motorwelle bestimmt, kann dieser wieder herausgenommen und das Zahnrad festgeschraubt werden.

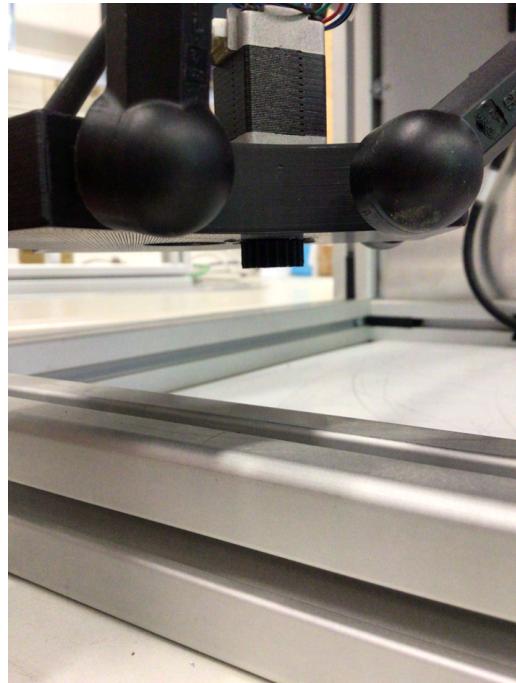


Abbildung 33: Position Motorzahnrad 4. Achse

Danach muss der Motor selbst mit den vier M2x14 Senkkopfschrauben von unten an der Parallelplatte befestigt werden. Der Steckeranschluss ist auch hier wieder zur Mitte auszurichten.

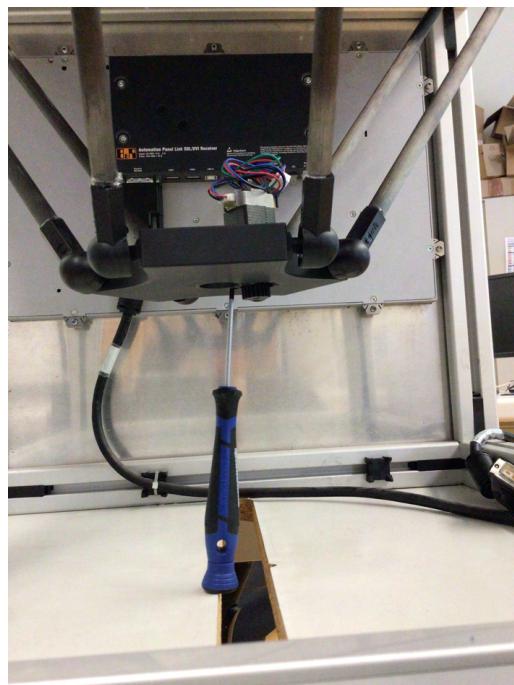


Abbildung 34: Motor 4. Achse festschrauben

Anschließend wird die Dreheinrichtung von unten mit der Hohlwelle durch das mittige Loch in der Parallelplatte geseckt. Dabei müssen das Zahnrad am Motor und der Zahnkranz ineinander greifen.

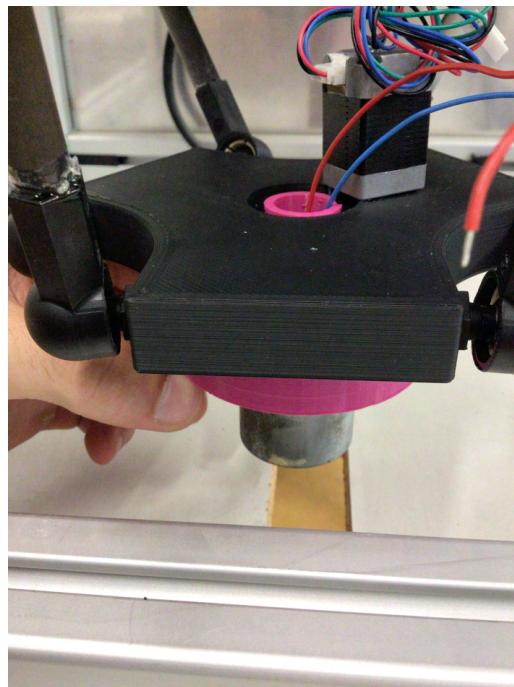


Abbildung 35: Dreheinrichtung einstecken

Zum Schluss wird die Dreheinrichtung mit dem 20 mm Sicherungsring von oben fixiert, sodass sie nicht wieder herausfallen kann.

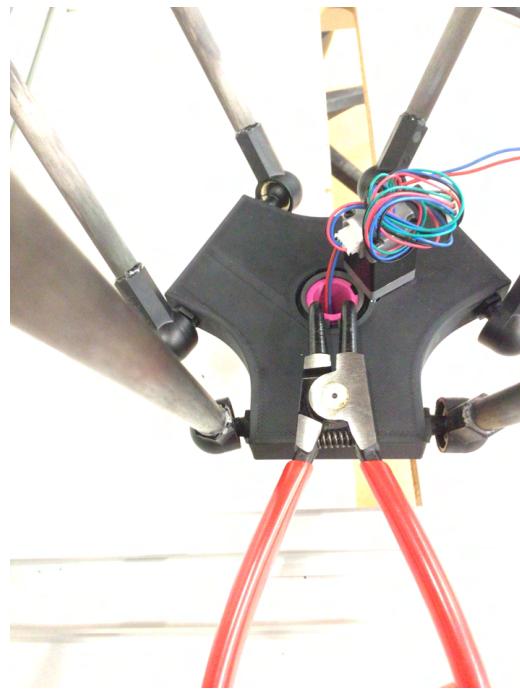


Abbildung 36: Dreheinrichtung befestigen

3.9 Zusammenbau Mechanik

Für die Fertigstellung muss abschließend die Mechanik zusammengefügt werden. Dafür müssen auf alle Kugelköpfe an der Parallelplatte und an den Haltearmen die beigen Gelenkeinsätze aufgesetzt werden.



Abbildung 37: Gelenkeinsätze aufstecken

Danach werden die Kohlefaserstangen mit den Gelenkpfannen an den Haltearmen aufgeklipst. Dabei liegt die Grundplatte mit der Oberseite auf dem Tisch, sodass die Verbindungsstangen nach

oben abstehen.

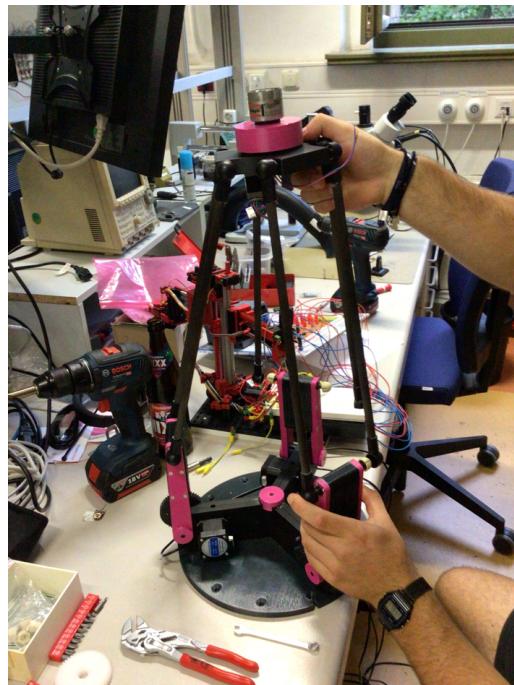


Abbildung 38: Gelenke zusammenstecken

An die abstehenden Kohlefaserstangen kann jetzt die Parallelplatte gesteckt werden. Wichtig ist, dass die Dreheinrichtung dabei nach oben zeigt (bei der vorher beschriebenen Position der Grndplatte).

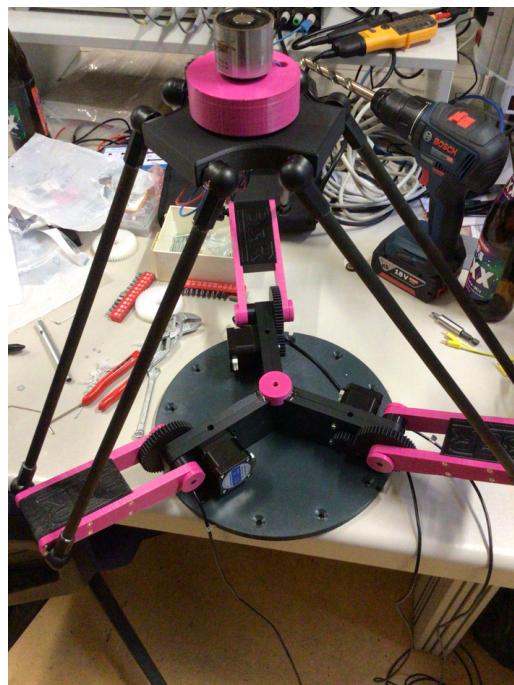


Abbildung 39: fertige Mechanik

Damit ist der Aufbau der Mechanik des Roboters abgeschlossen. Nachfolgend wird das System in ein Gehäuse verbaut, die Elektronik verdrahtet und ein kleines Programm zur Steuerung geschrieben.

ben.

4 Gehäuse und Verdrahtung

4.1 Robotergehäuse

Für die Nutzbarkeit des Roboters ist es wichtig, diesen in einem Gehäuse aufzuhängen. Verwendet wurde dazu ein Würfel aus Bosch-Profilen mit einer Kantenlänge von 500 mm. Dieser existierte bereits ungenutzt in einem der Labore der HTWK, daher wird auf den Aufbau hier nicht weiter eingegangen. Mit den Bildern sollte der Aufbau allerdings selbsterklärend sein. Die Bauteile sind in der entsprechenden Tabelle im Kapitel Vorbereitung aufgeführt.

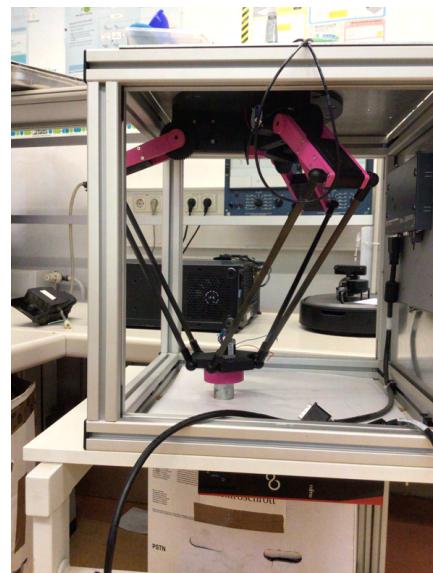


Abbildung 40: Gehäuse

Dieser Würfel wurde mit acht M4x60 Flachkopfschrauben, zwei pro Kante, auf einen Rollwagen geschraubt und oben drauf mit einer Aluminiumplatte versehen, welche den Roboter trägt. Dabei wurden pro Schraube je zwei Unterlegscheiben genutzt, eine zwischen Schraubenkopf und Profil und eine zwischen Tischplatte und Mutter. Die Aluminium-Platte wurde mit vier M4x10 Flachkopfschrauben und 8 mm großen Nutensteinen in den Profilen befestigt. Für den Roboter wurden sechs Löcher mit 4,5 mm Durchmesser in die Platte gebohrt, durch welche mit M4x16 Senkkopfschrauben und M4 Muttern die Grundplatte am Gehäuse befestigt wurde.



(a) Robotergehäuse oben



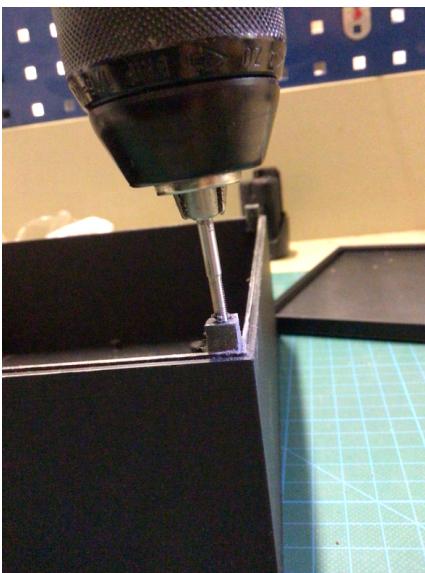
(b) Robotergehäuse seitlich

Abbildung 41: Robotergehäuse

Für die jeweils drei Motor- und Sensorkabel wurden drei 10 mm Löcher gebohrt, um diese durch die Grundplatte nach oben zu führen, wo sie dann in das Gehäuse, welches die Steuerung und Spannungsversorgung trägt, enden.

4.2 Elektronikgehäuse

Das gedruckte Gehäuse für die Elektronik besitzt in seinem Unterteil neun Löcher mit einem Durchmesser von 2,5 mm, welche alle mit einem M3-Gewinde versehen werden müssen. Die Fünf am Boden dienen der Befestigung der Platinen, die anderen Vier in den oberen Ecken zur Befestigung des Deckels.



(a) Gewinde in Löcher am Boden bohren



(b) Gewinde in Deckelhalterungen bohren

Abbildung 42: Gewinde in Elektronikgehäuse bohren

Das Gehäuse wird im Anschluss oben auf die Aluminiumplatte aufgesetzt und die vier Löcher zur Befestigung angezeichnet. An den angezeichneten Stellen werden mit einem 3,5 mm Bohrer Löcher durch die Aluminiumplatte gebohrt.



(a) Anzeichnen der Bohrlöcher



(b) Löcher zur Befestigung bohren

Abbildung 43: Befestigung des Elektronikgehäuses

Mit vier M3x20 Flachkopfschrauben, zwei Unterlegscheiben pro Schraube und jeweils einer Mutter wird das Gehäuse auf der Platte verschraubt. Dafür wird zuerst eine Unterlegscheibe auf die Schraube gesteckt, die Schraube dann durch das Loch im Gehäuse und der Platte gesteckt und von unten mit einer Unterlegscheibe und abschließend einer Mutter befestigt.

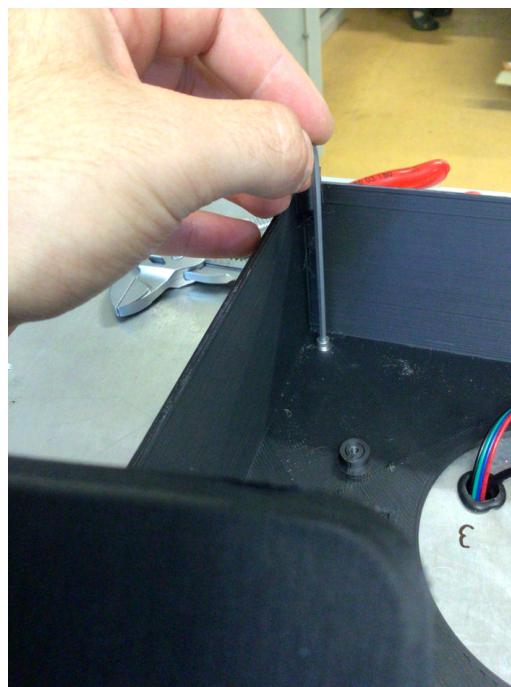


Abbildung 44: Gehäuseträger auf Alu-Platte verschrauben

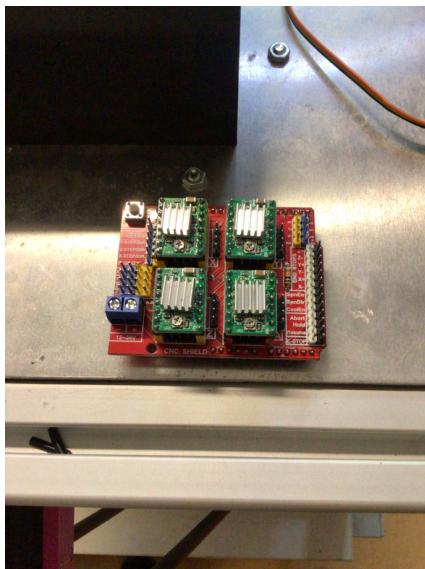
Anschließend werden der Arduino, noch ohne aufgestecktes CNC-Shield, und das Prototyping

Shield am Boden verschraubt, mit M3x5 Flachkopfschrauben. Diese sollten dabei nur leicht festgezogen werden, um eine Beschädigung der Platinen zu vermeiden.

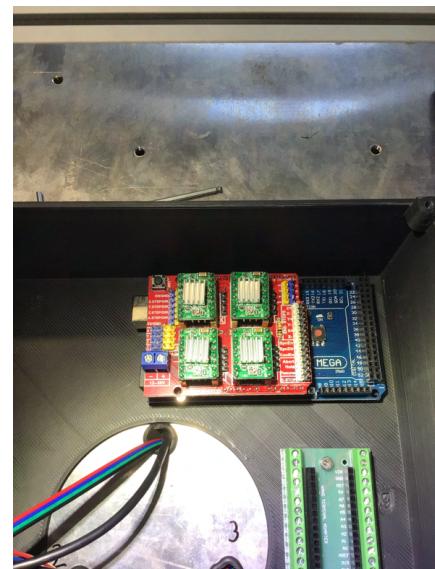


Abbildung 45: Platinen im Gehäuseträger verschrauben

Zum Schluss wird das CNC-Shield mit den Motortreibern ausgestattet. Dabei ist es sehr wichtig auf die Orientierung zu achten. Der „Enable“-Pin eines Treibers muss auch mit dem „Enable“-Pin auf dem CNC-Shield übereinstimmen, müssen also übereinander liegen. Die mitgelieferten kleinen Kühlkörper sollten zur besseren Wärmeableitung auf die Prozessoren der Treiber geklebt werden. Ist dies geschehen, kann das Shield auf den Arduino aufgesteckt werden. Auch hierbei muss auf die richtige Positionierung geachtet werden. Ein guter Anhaltspunkt sind die analogen Pins A5 auf Arduino und Shield, diese müssen ineinander greifen. Wenn es schwer aufzustecken ist, ist es vermutlich die falsche Position.



(a) Motortreiber aufstecken



(b) CNC-Shield auf Arduino stecken

Abbildung 46: Montage des CNC-Shields

4.3 Verdrahtung

Zur besseren Verständlichkeit der Verdrahtungsbeschreibung ist nachfolgend ein Stromlaufplan abgebildet. Dieser ist zur Einzelansicht ebenfalls im github zu finden.

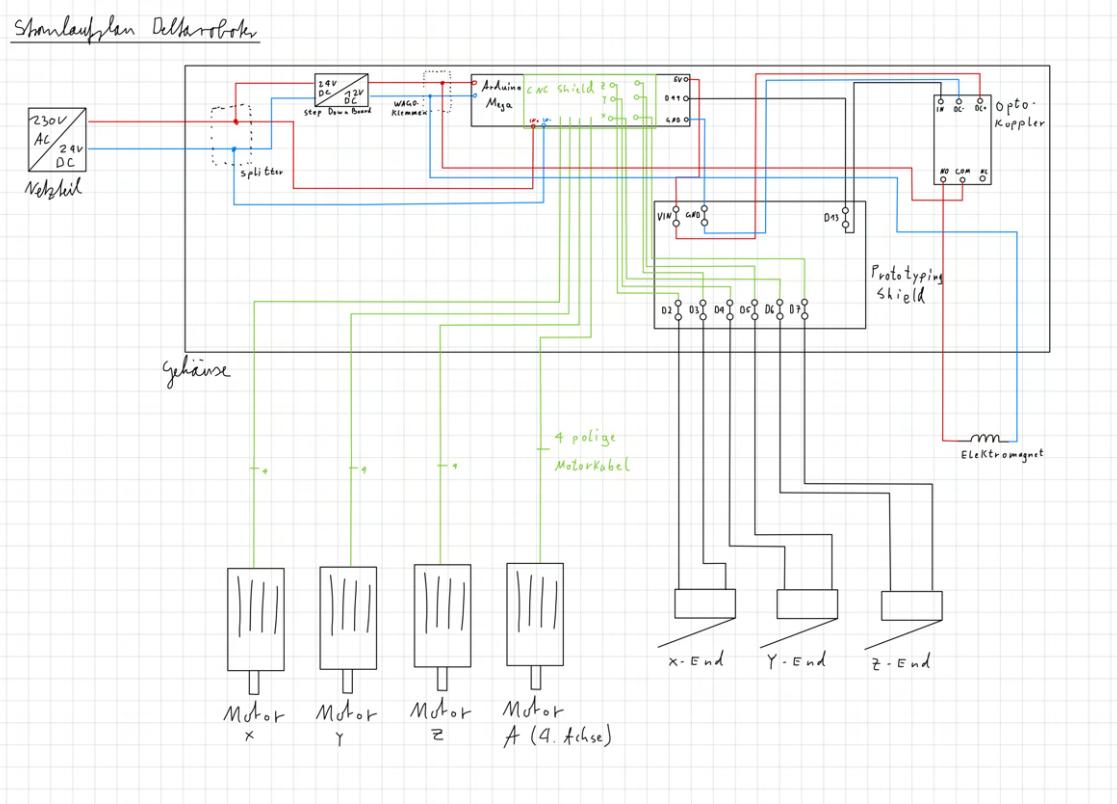


Abbildung 47: Stromlaufplan Delta-Roboter

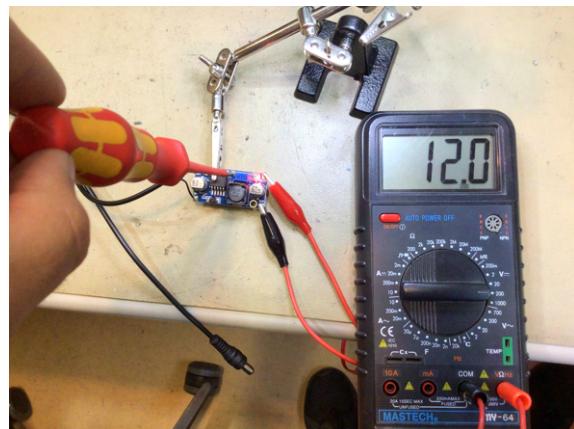
Zuerst wird die Spannungsversorgung vorbereitet und installiert. Der eine männliche Anschluss des Splitters muss abgeschnitten werden, dabei sollte das Kabel mittig durchtrennt werden, da ein Step-Down-Board dazwischen geschaltet werden muss. Dieses sollte mit der Eingangsseite an den Splitter angelötet werden, dabei unbedingt die Polung beachten.

Danach sollte das Netzteil eingesteckt werden, um die Ausgangsspannung auf 12 V einzustellen. Dafür muss die Spannung ausgangsseitig mit einem Voltmeter gemessen werden und über die kleine Schlitzschraube am Potentiometer (kleiner blauer Kasten) eingestellt werden. Ist die Anpassung abgeschlossen, die Spannungsversorgung wieder von der Steckdose trennen und zwei Kabelstücken an die Ausgänge des Spannungsreglers anlöten. Zur besseren Trennung sollten schwarze und rote Kabel mit 15 cm Länge verwendet werden. Die freien Enden der Kabel werden in je eine WAGO-Klemme eingespannt. Der abgeschnittene männlichen Stecker wird ebenfalls an den WAGO-Klemmen angeschlossen. Die leitende Außenhülle des Steckers muss dabei mit dem Minuspol verbunden werden, die innere Kontaktfläche mit dem Pluspol. Dieser Stecker mit 12 V DC dient der Versorgung des Arduinos.

Der andere männliche Anschluss des Splitters muss ebenfalls abgeschnitten, die Adern abisoliert und mit Lötzinn verzinkt werden. Die Litzen werden anschließend in die Klemmen des CNC-Shields geschraubt und versorgen dieses mit 24 V.



(a) Spannungsregler-Board anlöten



(b) Ausgangsspannung auf 12 V einstellen



(c) 24 V Versorgung vorbereiten

Abbildung 48: Vorbereitung Spannungsversorgung

Der Splitter für die 24 V bzw 12 V DC wird mit seinem weiblichen Ende durch das Loch geschoben und auf dem Podest verklebt. Optional kann er auch mit einem Kabelbinder im Gehäuse fixiert werden. Das Spannungsregler-Board wird mit Doppelseitigem Klebeband am Boden des Gehäuses befestigt.

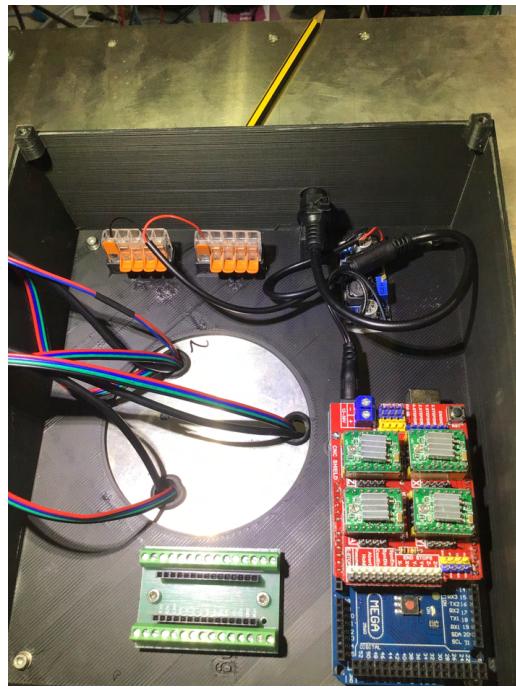


Abbildung 49: Spannungsversorgung installiert

Im nächsten Schritt wird der Optokoppler angeschlossen. Dafür müssen vier Leitungsstücke mit 15 cm Länge abisoliert und die Enden verzinnt werden. Zwei in rot, eines in schwarz und eines beispielsweise in orange. Dieses dient zur Übertragung des Schaltsignals vom Arduino. Eines der roten Kabel wird vom VIN-Pin des Prototyping-Boards zum DC+ Kontakt des Optokopplers gelegt. Das Andere rote von der Plus-WAGO-Klemme zum COM-Anschluss. Das schwarze Kabel verbindet den GND-Anschluss des Prototyping-Boards mit der DC-Klemme des Optokopplers. Das orangene Kabel wird von der Klemme D13 zur IN-Klemme verdrahtet. Zum Schluss wird eines der Kabel vom Elektromotor in die NO-Klemme des Kopplers geschraubt, das andere in die Minus-WAGO-Klemme. Der Optokoppler kann anschließend ebenfalls mit doppelseitigem Klebeband im Gehäuse befestigt werden.

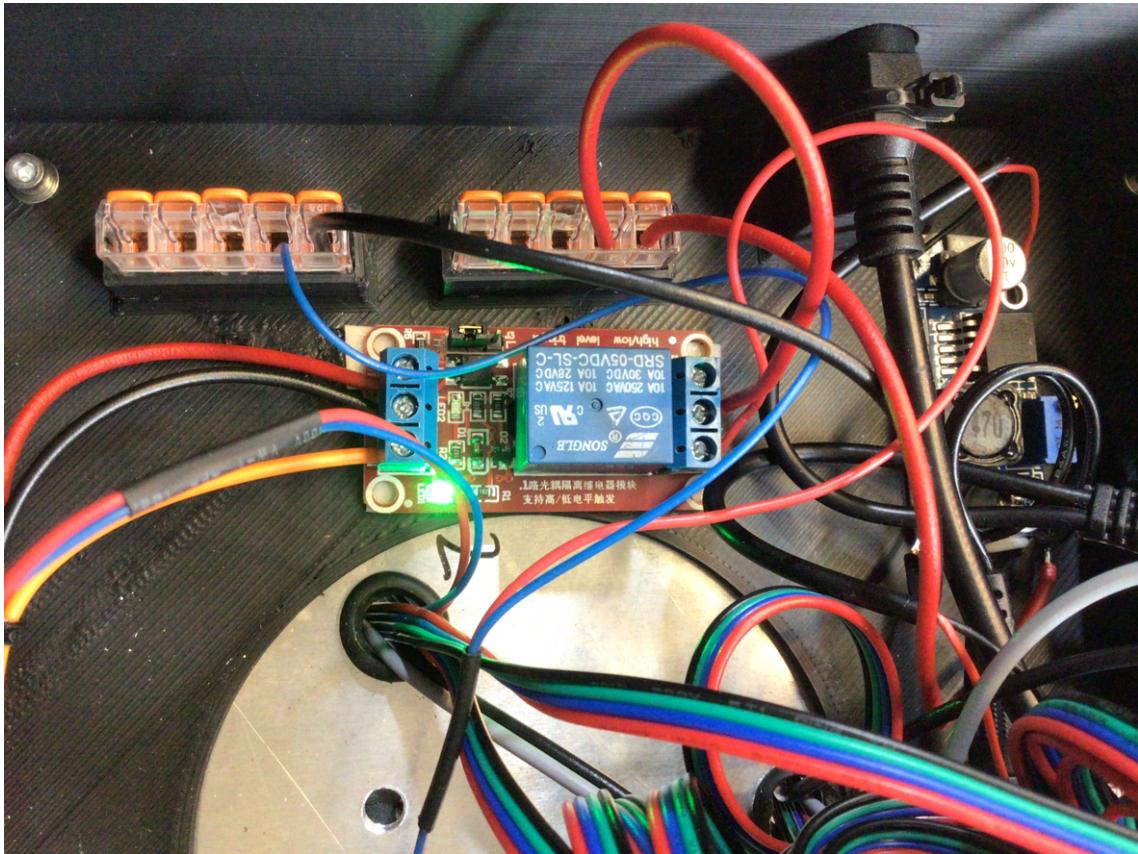
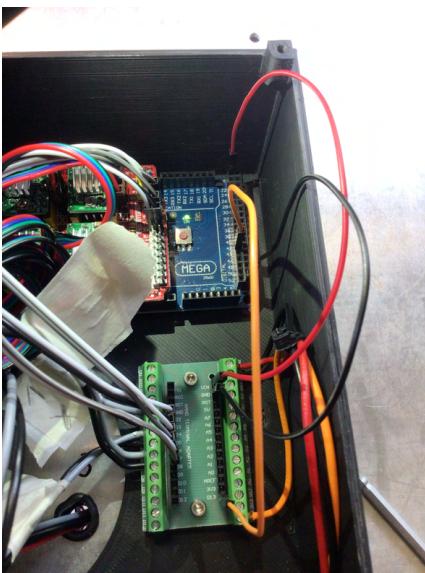


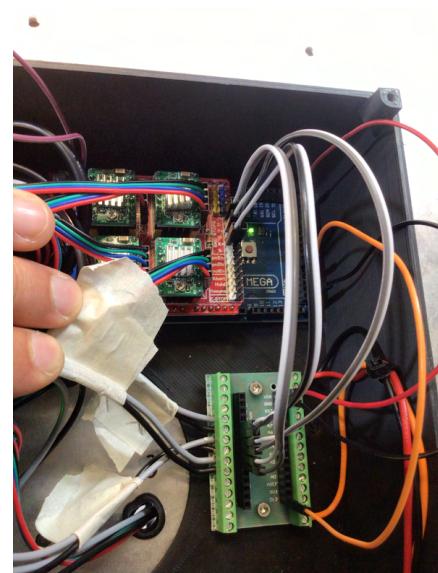
Abbildung 50: Anschluss Optokoppler

Die Endtaster, welche bereits mit Kabeln ausgestattet wurden, werden mit den freien Enden am Prototyping-Board verschraubt. Dabei ist wichtig, dass der Motor und der zugehörige Endtaster am gleichen Treiber angeschlossen sind. Die drei Motorkabel mit den vier-poligen Steckern werden an die Pins neben den Motortreibern angeschlossen. Der Motor für die vierte Achse fällt dabei aus der Reihe, da er einen JST-Stecker besitzt. Das Kabel ist allerdings zu kurz um ihn oben am Board anzuschließen. Daher wurde eines der Motorkabel, welche an einem Ende einen 4-Pin-Dupont-Stecker besitzen, genutzt, um das Anschlusskabel zu verlängern. Dafür wurden die einzelnen Adern entsprechend der Farbe zusammengelötet und mit Schrumpfschlauch isoliert. Der Motor für die 4. Achse wurde an A angeschlossen.

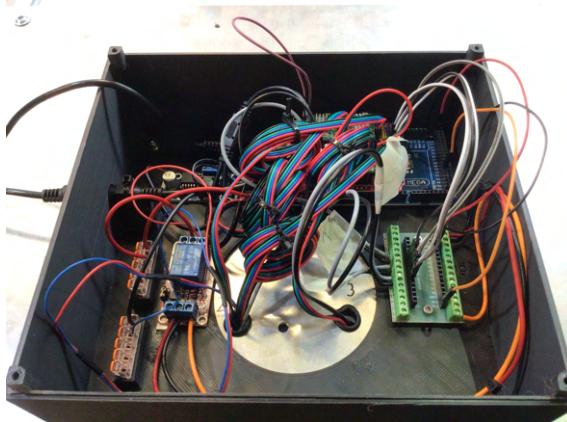
Sind alle Lötarbeiten abgeschlossen, müssen noch die Jumperkabel gesteckt werden. Mit männlich-männlich Kabeln werden die Verbindungen vom Arduino zum Prototyping-Board vorgenommen, um den Optokoppler zu schalten. Mit weiblich-männlich Kabel werden die Endtaster -über das Prototyping-Board - an das CNC-Shield angeschlossen. Die Pin-Belegung ist dem Stromlaufplan zu entnehmen.



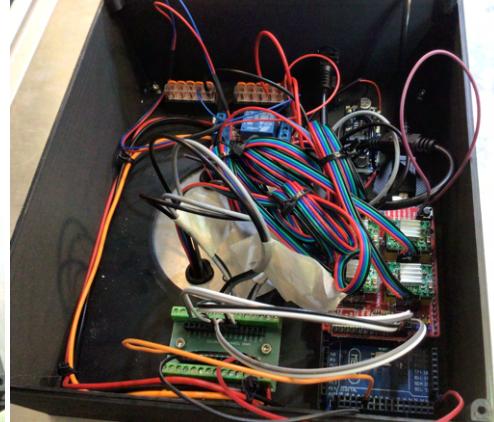
(a) Optokoppler an Arduino angeschlossen



(b) Endstopps an CNC-Shield angeschlossen



(c) fertige Verdrahtung



(d) fertige Verdrahtung

Abbildung 51: abschließende Verdrahtung mit Jumperkabeln

Zum Schluss wird der Deckel des Elektronikgehäuses mit den M3x10 Senkkopfschrauben verschlossen und der Roboter ist fertig für die Programmierung. Zur Spannungsversorgung muss bloß noch das 24 V Netzteil eingesteckt werden.

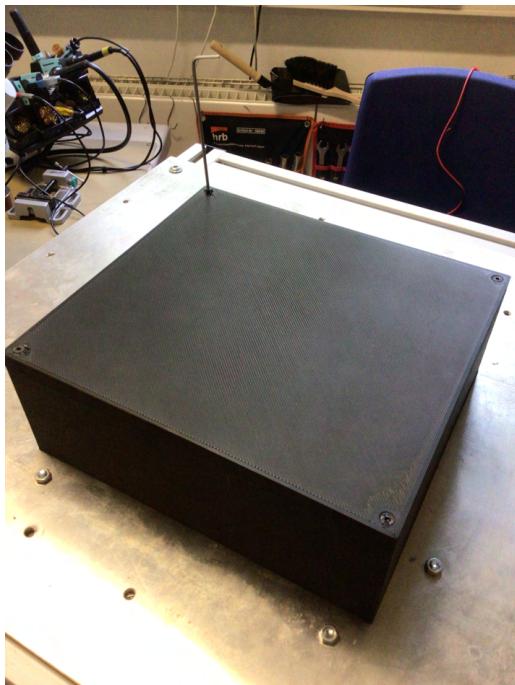


Abbildung 52: Gehäusedeckel verschließen

5 Programmierung

Die Programmierung kann in der Arduino IDE durchgeführt werden, welche kostenlos herunterladbar ist. Zu Beginn muss der Arduino mit dem Rechner verbunden werden, dies geschieht über ein USB-A zu USB-B Kabel. Anschließend sollte jegliche angeschlossene Peripherie auf korrekte Funktionsweise getestet werden. Dies umfasst die Schrittmotoren, die Endtaster und den Magneten.

Bevor man mit den Schrittmotoren beginnen kann, müssen die Schrittmotor-Treiber eingestellt werden. Hier lässt sich über ein kleines Potentiometer der maximale Strom am Motor begrenzen, um diese vor Zerstörung zu schützen. Anschließend können die Motoren an das CNC-Shield angeschlossen und getestet werden. Dafür lässt man diese beispielsweise in Intervallen von drei Sekunden in wechselnde Richtungen drehen. Sollte dies nicht funktionieren, gibt es 3 typische Fehler. Entweder werden die falschen Schritt- und Richtungspins angesteuert, die Einstellung am Schrittmotor-Treiber war falsch oder die Anschlusskabel des Motors müssen gedreht werden.

Die Schritt- und Richtungspins der X-Achse liegen auf Pin 2 und 5, die der Y-Achse auf 3 und 6 und die der Z-Achse auf Pin 4 und 7. Dies muss bei der Programmierung dringend beachtet werden. Am Schrittmotor-Treiber muss die Referenzspannung eingestellt werden. Mithilfe dieser Einstellung wird der maximale Strom begrenzt. Sollte diese zu gering sein, kann der Motor nicht die volle Leistung erbringen, ist sie zu hoch, kann es zur Zerstörung des Motors kommen. Der letzte Fehler beruht darauf, dass es sich bei den Schrittmotoren um zweiphasig angeschlossene Motoren handelt. Sind dabei Anschlusskabel vertauscht, so können die Magnetfelder nicht aufgebaut werden. Dies erkennt man daran, dass der Motor anstatt sich zu drehen, nur zittert.

Zum Testen der Endtaster kann das bereits bestehende Programm angepasst werden. Dafür schaltet werden die Motoren bei Betätigung des zugehörigen Endstopps ausgeschaltet. So können nacheinander alle Endtaster zu den Motoren zugeordnet werden. Falls hierbei andere Endtaster verwendet werden, die selbst noch einen gewissen Energieverbrauch aufweisen, muss die geringe verfügbare Leistung der Anschlusspins beachtet werden.

Zum Schluss der Einrichtung erfolgt der Anschluss des Elektromagneten. Da die Spannung vom Arduino nicht zum Betrieb ausreicht, wird die Stromversorgung mithilfe eines Relais (Optokoppler) und einer externen 12 V Versorgung gelöst. Der Steuereingang des Relais wird auf einen digitalen I/O-Pin des Arduinos gelegt. Dieser Pin wird als Ausgang im Programm definiert und in einem Intervall von fünf Sekunden wird zwischen 5 V und 0 V umgeschalten. Damit wird eine logische Eins oder Null erreicht. Somit wird der Magnet an- und abgeschaltet. Falls dies nicht funktioniert, sollte ein anderer digitaler I/O-Pin ausprobiert werden. Einige dieser Pins haben spezielle Funktionen und verhalten sich anders. Außerdem sind diese ziemlich empfindlich und es kann dazu kommen, dass ein Pin nicht mehr eindeutig zwischen den zwei Schaltzuständen wechselt.

Damit sind die Tests der angeschlossenen Peripherie abgeschlossen und es kann mit der Programmierung begonnen werden. Dabei werden zuerst alle Variablen und Konstanten definiert. Danach erfolgt die Initialisierung, sowie das Setzen der Startzustände der Variablen. Im Hauptteil wird mit dem sogenannten "Homing" gestartet. Dabei bewegen sich alle Achsen solange nach oben, bis der jeweilige Endstop aktiviert wird. Dies ist der Nullpunkt des Systems. Anschließend kann der erste Punkt angefahren werden. Dieser wird über Koordinaten definiert und das "Delta-Robot-Library" berechnet die nötigen Bewegungen der Motoren, um diesen Punkt zu erreichen. Hier wird über das Setzen des Ausgangs, über den der Magnet gesteuert wird, eine metallisches Werkstück angezogen. Daraufhin wird die nächste Position angefahren. Das funktioniert wieder über die Berechnungen mithilfe der Koordinaten. Nach Erreichen dieses Punktes wird das Werkstück abgelegt. Jetzt wird wieder das Homing ausgeführt, um in die Startposition zurückzukehren. Daraufhin startet der Ablauf wieder in umgekehrter Reihenfolge. Es wird diesmal also zuerst Position zwei angefahren und das dort befindliche Werkstück zur Position eins transportiert. Dieser Ablauf wird endlos, bis zum Abbruch des Programms, ausgeführt.

Eidesstattliche Erklärung

Nachfolgend sind die Eidesstattlichen Erklärungen der beiden Projektmitglieder eingefügt.

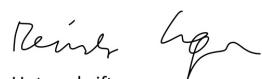
Eidesstattliche Erklärung

Name: Reiner Lange

Hiermit versichere ich eidesstattlich, dass ich die vorliegende Arbeit eigenständig und ausschließlich unter Verwendung der im Quellen- und Literaturverzeichnis aufgeführten Werke angefertigt habe.

Leipzig, 18.09.2023

Ort, Datum



Unterschrift

Eidesstattliche Erklärung

Name: Corvin Pohle

Hiermit versichere ich eidesstattlich, dass ich die vorliegende Arbeit eigenständig und ausschließlich unter Verwendung der im Quellen- und Literaturverzeichnis aufgeführten Werke angefertigt habe.

Leipzig, 18.09.23

Ort, Datum



Unterschrift

Abbildung 10: Eidesstattliche Erklärung