

HOCHSCHULE MANNHEIM

FAKULTÄT FÜR INFORMATIK
AUTONOME MOBILE ROBOTER

Technische Optimierungen am vierbeinigen Krabbler

Projektarbeit

Betreuer: Prof. Dr. Thomas Ihme

Semester: Sommer 2024

Name: Maximilian Kühn

Matr.-Nr.: 3009677

Studiengang: Master Informatik: Medical Data Science

Abgabedatum: 31. Juli 2024

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund und Zielsetzung	1
1.2 Projektumfang	2
2 Verbesserungsmaßnahmen	3
2.1 Neue Leiterplatte	3
2.1.1 Idee	3
2.1.2 Herangehensweise	4
2.1.3 Ergebnisse	6
2.2 Rutschfeste Füße	7
2.2.1 Idee	7
2.2.2 Herangehensweise	8
2.2.3 Ergebnisse	13
2.3 Ein-/Aus-Schalter	14
2.3.1 Idee	14
2.3.2 Herangehensweise	14
2.3.3 Ergebnisse	15
2.4 Verbesserte 3D-Modelle	15
2.4.1 Idee	15
2.4.2 Herangehensweise	15
2.4.3 Ergebnisse	15
3 Ausblick	18
4 Fazit	19
A Anhang	i

1 Einleitung

Bei dem Krabbler handelt es sich um einen vierbeinigen Roboter, gesteuert durch einen Arduino Nano Mikrocontroller. Die vier Beine werden durch Servos bewegt, ebenso wie der Kopf, auf dem sich ein Infrarotsensor zur Entfernungsmessung befindet. Die Stromversorgung erfolgt über vier AAA-Batterien, die auf beiden Seiten des Krabblers angebracht sind. Sämtliche Teile für den Roboterkörper sind 3D-gedruckt.

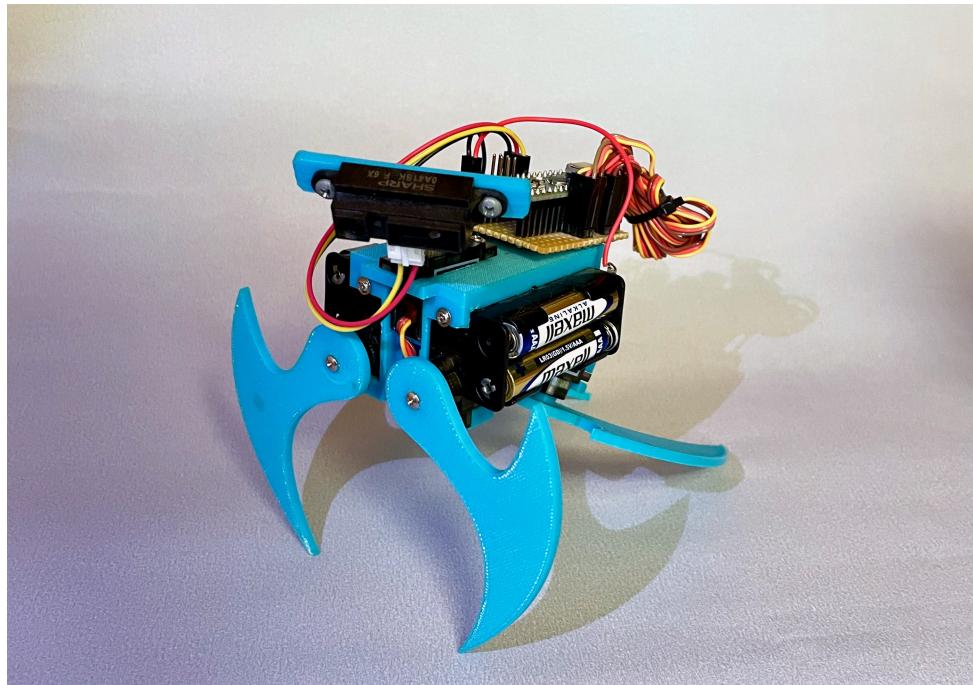


Abbildung 1.1: Der Krabbler, Version 1

1.1 Hintergrund und Zielsetzung

Durch die geringe Anzahl an elektronischen Komponenten eignet sich der Krabbler hervorragend als Lehrbeispiel für die Mikrocontroller-Programmierung. Denn er ist sowohl vergleichsweise leicht zu programmieren, als auch leicht zu reproduzieren, etwa um einen kompletten Bachelor-Kurs damit auszustatten. Es gab bereits einige Iterationen des Krabblers, in denen der Roboter weiterentwickelt wurde (die letzte wird in dieser Arbeit Version 1 genannt) und in diesem Projekt wird die nächste Iteration mit weiteren Verbesserungen vorgestellt (Version 2).

1.2 Projektumfang

Dieses Projekt fand im Rahmen der Master-Veranstaltung *Autonome Mobile Roboter* statt und dauerte ein Semester. Es wurde in Einzelarbeit durchgeführt.

Dabei wurden nur Änderungen an der Hardware des Krabblers vorgenommen; die Software war nicht Teil des Projekts.



Alle Dateien zu diesem Projekt sind auf *GitHub* gehostet unter:
https://github.com/maxikuehn/AMR_Krabbler. Da die vorderen bzw. hinteren Füße jeweils symmetrisch sind, liegt hier immer nur eine der beiden Seiten vor.

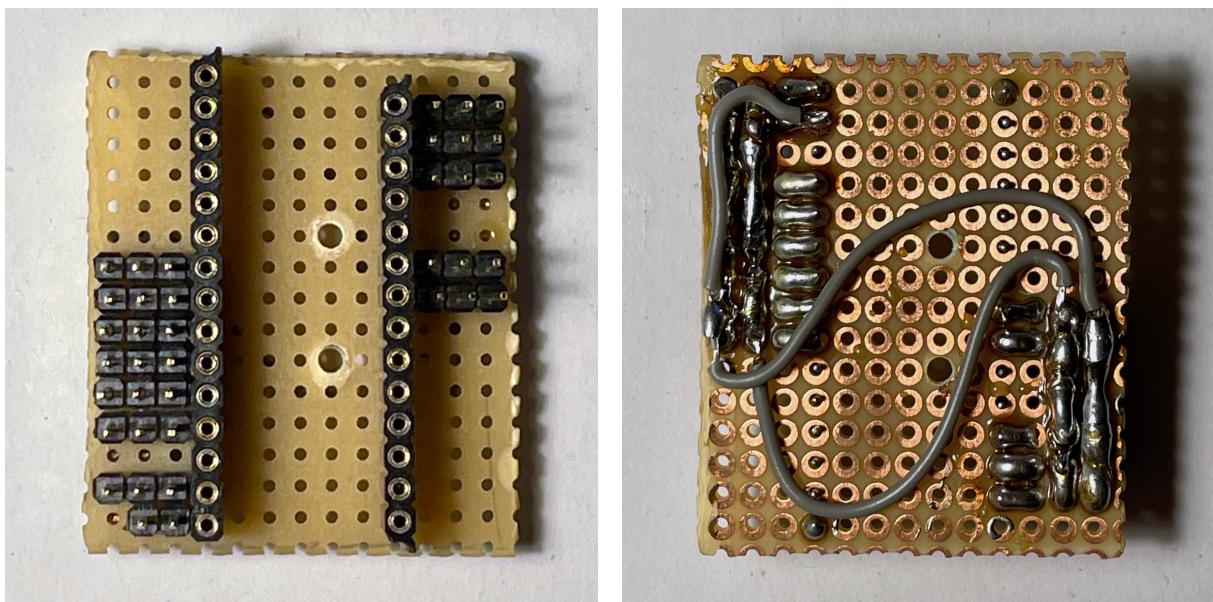
2 Verbesserungsmaßnahmen

Zunächst wurden einige Ideen gesammelt, wie der Krabbler verbessert werden kann. Schlussendlich fiel die Entscheidung auf vier Bereiche, die in diesem Kapitel vorgestellt werden.

2.1 Neue Leiterplatte

2.1.1 Idee

Bei der Version 1 des Krabblers ist eine von Hand gelötete Leiterplatte verbaut, auf der alle elektronischen Komponenten angeschlossen werden (siehe Abbildung 2.1). Die Herstellung dieser Platine ist mit erheblichem Zeitaufwand verbunden, da sowohl alle Buchsenleisten als auch alle Kabelverbindungen manuell gelötet werden müssen. Zudem ist dieser Prozess anfällig für menschliche Fehler, da eine generische Lochrasterplatine ohne Markierungen für die Bauteile verwendet wird. Fehler wie kalte Lötstellen oder fehlende Verbindungen könnten unter Umständen erst bei der Inbetriebnahme auffallen, was die Herstellung verzögern oder im schlimmsten Fall zu einem Kurzschluss führen kann.



(a) Ansicht oben

(b) Ansicht unten

Abbildung 2.1: Leiterplatte Version 1

Um hier Abhilfe zu schaffen, soll eine Leiterplatte für den Krabbler entworfen werden, welche anschließend professionell und in Serie produziert werden kann. Die neue Leiterplatte verfügt dann bereits über alle nötigen Verbindungen zwischen den Komponenten und lediglich die Buchsenleisten müssen angelötet werden. Das spart Zeit und minimiert

Fehlerquellen. Das Anbringen der elektronischen Komponenten soll durch Beschriftungen auf der Platine selbsterklärend gestaltet werden. Außerdem kann die Platine mit minimal benötigten Dimensionen konstruiert werden.

2.1.2 Herangehensweise

Für das Design der Leiterplatine wurde die Open-Source-Anwendung *KiCad*¹ verwendet. Diese bildet den kompletten Entwurfsprozess ab, vom Schaltplan über die Anordnung auf der Leiterplatte, bis zur Erstellung der Dateien für die Fertigung.

Im ersten Schritt wird ein Schaltplan gezeichnet, auf dem der Mikrocontroller und die Anschlüsse zu den weiteren Komponenten dargestellt werden (siehe Abbildung A.1). Hier werden ebenfalls alle Verbindungen eingetragen zwischen den Komponenten und den entsprechenden Pins des Mikrocontrollers (MC).

Für die kommenden Iterationen des Krabblers, wurden zusätzliche Anschlüsse für analoge Sensoren und für I²C (*Inter-Integrated Circuit*) eingeplant.

Folgende Elemente sind Bestandteil der neuen Platine (mit Referenzen zur Schematik in Abbildung A.1):

Mikrocontroller MC1: Für den Krabbler wird ein Arduino Nano verwendet. Dieser bildet das Herzstück der Elektronik und verbindet Software mit Hardware.

Stromversorgung P1-P3: Die Stromversorgung des Krabblers soll sowohl über Batterien als auch über ein USB-Kabel am MC erfolgen können. Die drei Pins an P1 ermöglichen es durch umstecken eines Jumpers alle Komponenten entweder über die Batterien, oder über die Stromversorgung des MC zu betreiben.

Ein Schalter, der an P2 angeschlossen wird, kann die Stromversorgung unterbrechen und damit den Roboter ein- und ausschalten.

An P3 werden vier 1.5V AAA-Batterien in Reihe angeschlossen.

Diode D1: Der VIN-Pin des Arduino Nanos fungiert ebenfalls als Ausgabe, falls der MC über USB versorgt wird. Damit es keine Rückkopplung gibt, wenn der Jumper bei P1 auf „Batterie“ gestellt ist, wird vor dem VIN-Pin eine Diode platziert.

Servos M1-M5: Jeweils ein Stecker mit drei Pins um die fünf Servos zu verbinden.

¹<https://www.kicad.org/>

Analoge Anschlüsse A1-A4: Vier weitere Stecker mit drei Pins, um analoge Sensoren mit dem MC zu verbinden.

I²C Anschlüsse I1-I2: hier können weitere Komponenten über I²C mit dem MC verbunden werden.

Mit abgeschlossenem Schaltplan können nun alle Bauteile auf einer Platine angeordnet werden. Dies geschieht mit dem *PCB Editor* von *KiCad*. Bei der Anordnung wurde beachtet, dass die Anschlüsse in der Nähe der betroffenen Pins des Mikrocontrollers platziert werden. Das erleichtert das Verdrahten, das im nächsten Schritt geschieht.

Als Letztes werden die Bauteile beschriftet und Anschlüsse mit ähnlicher Funktion gruppiert. Diese Beschriftung wird bei der Produktion per Siebdruck auf die Leiterplatte gebracht und erleichtert das Bestücken.

Die fertige Leiterplatte im *PCB Editor* ist im Anhang in Abbildung A.2 zu sehen. Abbildung 2.2 zeigt ein gerendertes Bild der Platine.

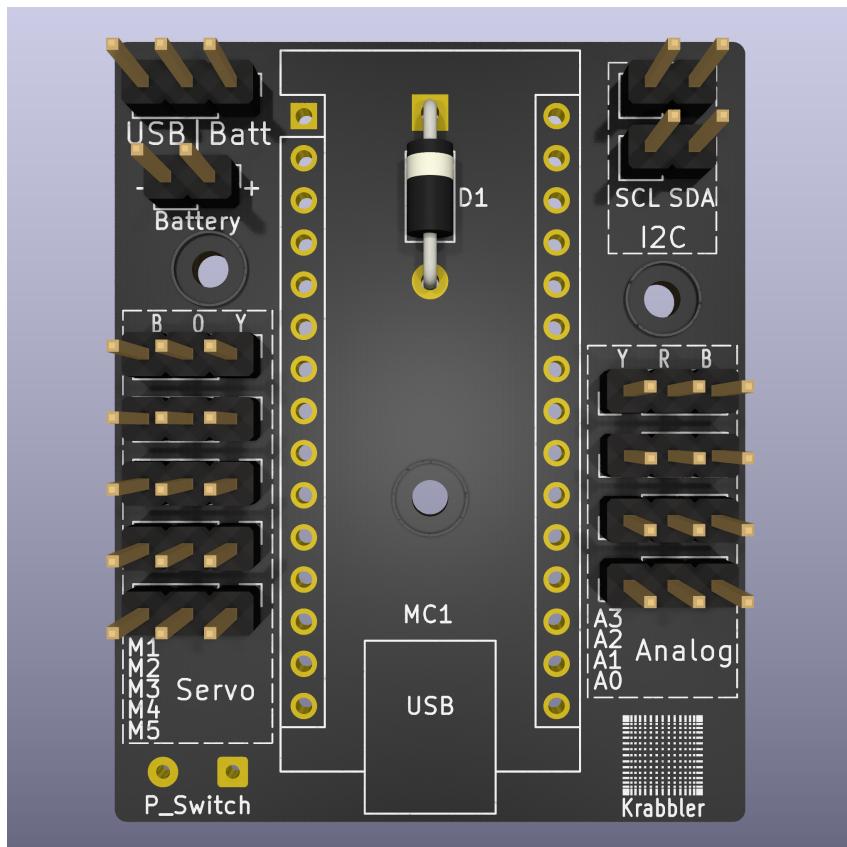


Abbildung 2.2: 3D-Render der Leiterplatte mit einer teilweisen Bestückung.

Nach einer Sichtprüfung aller Verbindungen können Dateien im Gerber-Format² erstellt und anschließend an einen Hersteller für Leiterplatten gesendet werden. Für dieses Projekt wurde der Hersteller *JLCPCB*³ gewählt. Auf Abbildung 2.3 ist nun die neue Platine für den Krabbler zu sehen.

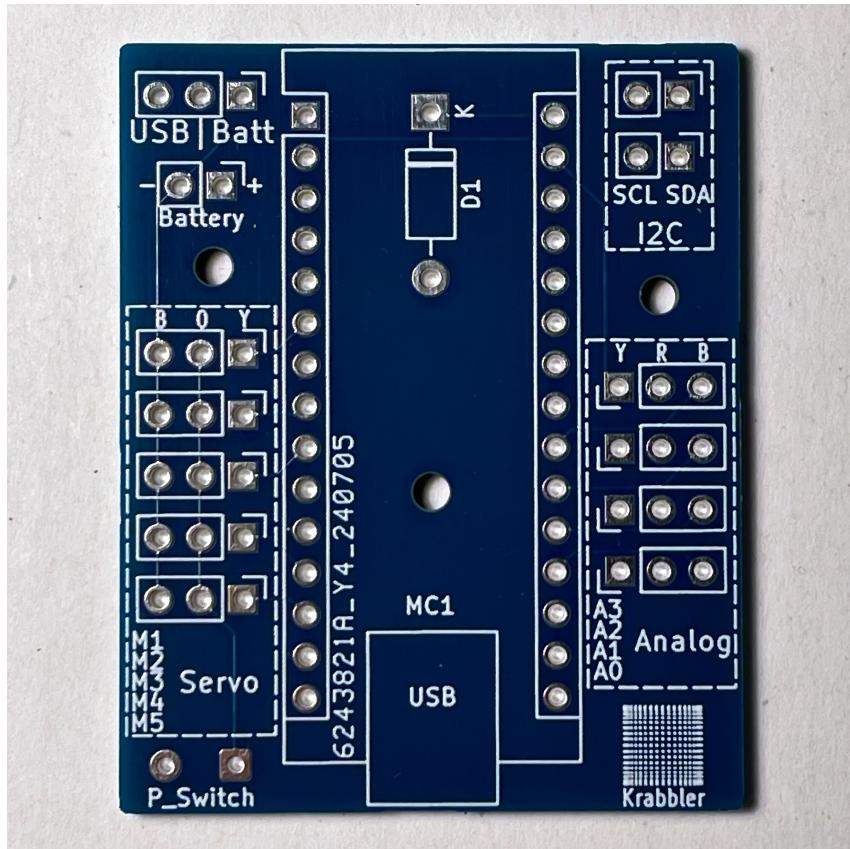


Abbildung 2.3: Die produzierte neue Platine

Das Löten aller benötigten Pins war durch die Markierungen selbsterklärend und damit schnell erledigt. Das galt auch für das Verbinden der Servos und des analogen Sensors.

2.1.3 Ergebnisse

Abbildung 2.4 zeigt die neue Platine, nachdem sie auf dem Krabbler montiert und alle Stecker verbunden wurden.

Das Entwickeln einer passenden Leiterplatte für den Krabbler stellte sich als herausfordernd, aber auch äußerst belohnend heraus. Die Planung und das Design der Platine

²„Das Gerber-Format ist eine Standard-Dateistruktur im ASCII-Format, die den Datenaustausch zwischen CAD (Entwicklung) und CAM (Produktion) ermöglicht.“ [Wikipedia, Gerber-Format, Stand 20. Juli 2024, <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Gerber-Format&oldid=238171302>]

³<https://jlpcb.com/>

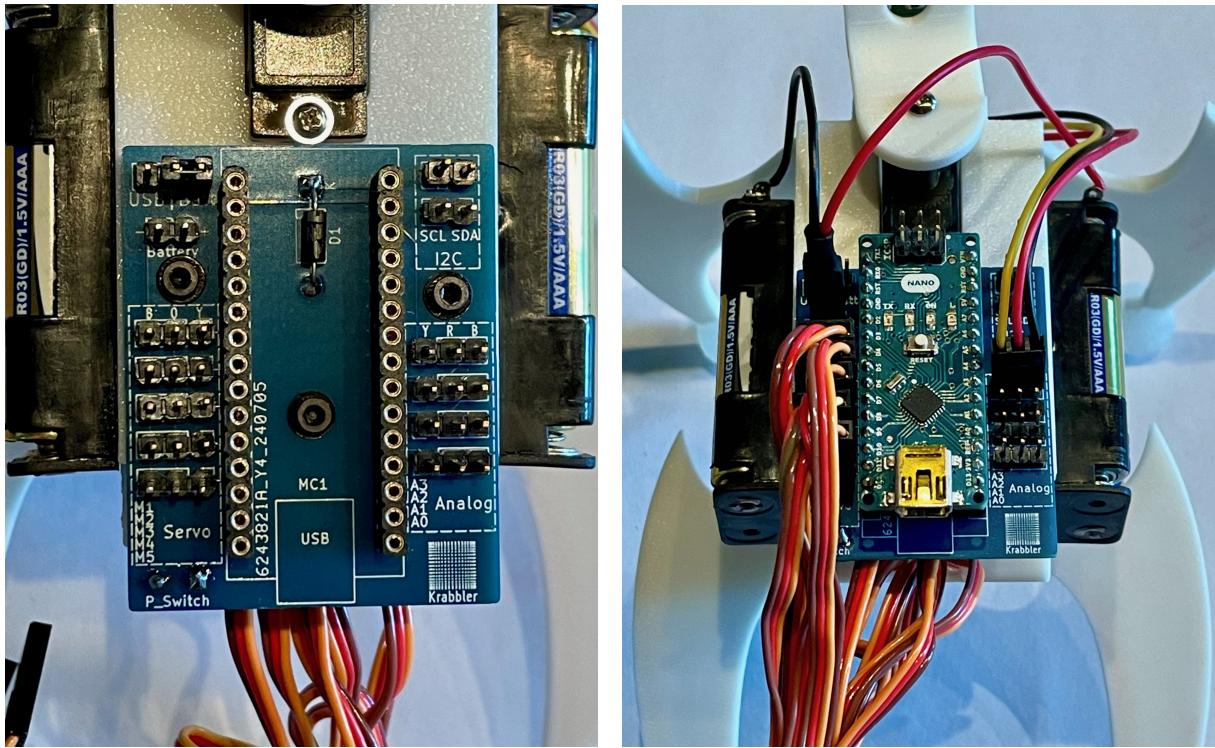


Abbildung 2.4: Die neue Platine montiert auf dem Krabbler.

mit *KiCad* ermöglichte es, eine robuste und leicht zu montierende Lösung zu schaffen, die zukünftige Iterationen des Krabbler unterstüzt und gleichzeitig die Herstellung vereinfacht.

Die neue Leiterplatte reduziert nicht nur den Zeitaufwand und die Fehleranfälligkeit bei der Produktion erheblich, sondern bietet auch eine klare Struktur und intuitive Beschriftungen für das Anbringen der Komponenten. Die Integration zusätzlicher Anschlüsse für analoge Sensoren und I²C-Komponenten eröffnet neue Möglichkeiten für Erweiterungen und Anpassungen des Krabbler. Außerdem konnte durch die professionelle Fertigung der Platine durch *JLCPCB* eine hohe Qualität sichergestellt werden.

2.2 Rutschfeste Füße

2.2.1 Idee

Die Version 1 des Krabbler hat 3D-gedruckte Füße, die vorne spitz zulaufen, wie in Abbildung 2.5 zu sehen ist. Der Kunststoff alleine bietet keine Haftung auf glatten Oberflächen, wodurch der Krabbler auf der Stelle rutscht, anstatt vorwärtszulaufen.

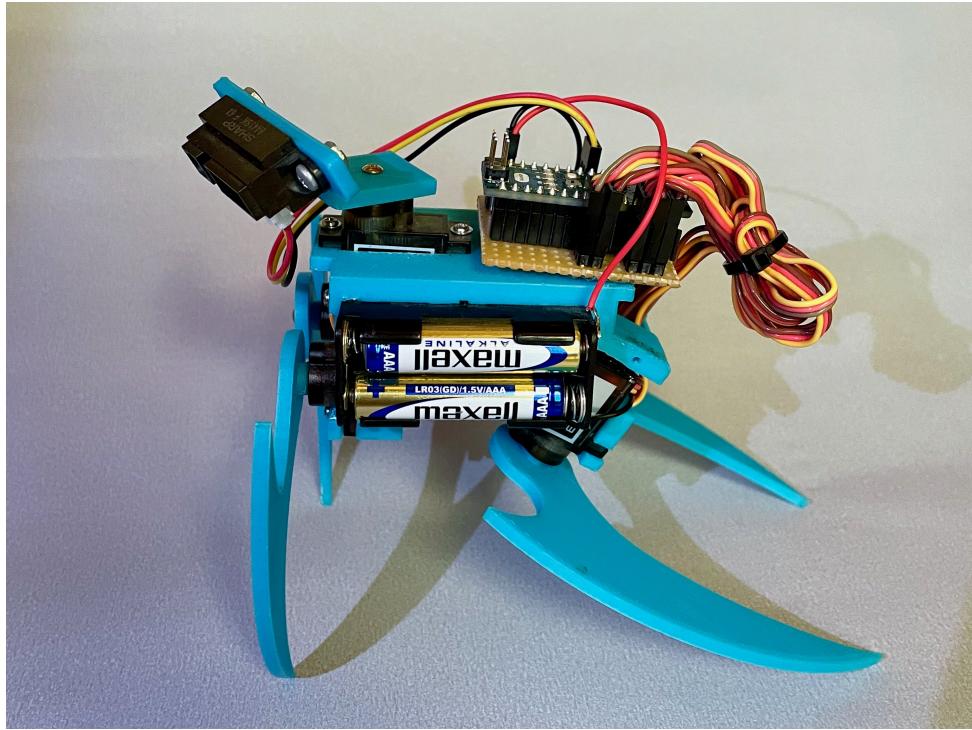


Abbildung 2.5: Der alte Krabbler von der Seite

Um dieses Problem zu lösen, sollen die Spitzen der Füße gummiert werden. Dafür wurde mit drei Varianten getestet:

1. Silikon wird um die Spitze herum gegossen.
2. Spitze des Fußes wird mit TPU separat gedruckt.
3. Haushaltsgummi wird um die Spitze des Fußes gespannt.

2.2.2 Herangehensweise

In diesem Kapitel werden die drei Varianten nacheinander vorgestellt.

Silikon

Silikon ist ein vielseitiges und flexibles Material, das durch seine Widerstandsfähigkeit gegen Verschleiß und Temperaturschwankungen ideal für zahlreiche Anwendungen in der Robotik geeignet ist. Außerdem hat Silikon eine ausgezeichnete Reibung auf verschiedenen Oberflächen, die einen rutschfesten Halt gewährleistet. Diese Eigenschaft macht Silikon zu einer hervorragenden Wahl für Anwendungen, bei denen Stabilität und Grip entscheidend sind, wie zum Beispiel bei den rutschfesten Füßen des Krabblers.

Es wäre auch denkbar eine dünne Schicht Silikon direkt auf die Füße aufzutragen, doch im Rahmen dieses Projekts wurde ein anderer Ansatz gewählt. Mithilfe einer 3D-gedruckten Gussform soll eine Kugel um die Spitze herum gegossen werden. Damit der Fuß nach dem Gießen nicht wieder aus dem Silikon herausrutscht, wird die Spitze des Fußes mit Widerhaken bestückt um einen festen Halt zu gewährleisten. Abbildung 2.6 zeigt ein 3D-Render des Aufbaus. Die Gussform besteht aus zwei Teilen, die durch vier Halbkugeln genau passend aufeinander gesteckt werden können. Der obere Teil der Gussform hat ein großes Einfüllloch und zwei kleinere Löcher aus denen die Luft beim Gießen entweichen kann.

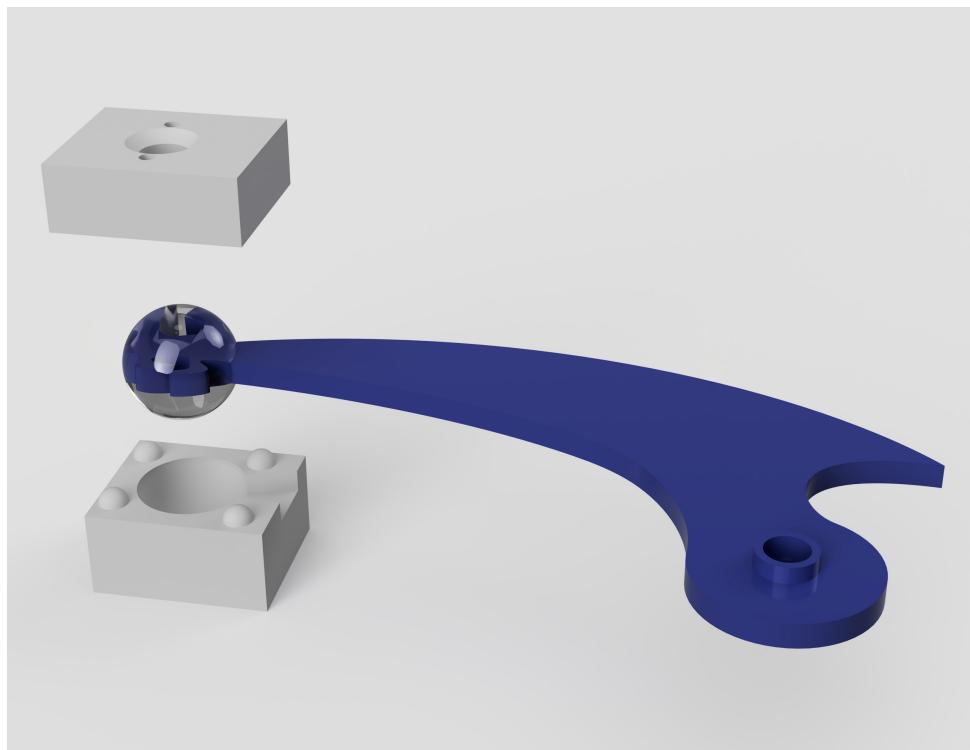


Abbildung 2.6: 3D-Modell eines Fußes mit Widerhaken, Silikonkugel und Gussform.

Gegossen wird mit einem RTV⁴ Silikon der Shorehärte 33 ShA, was in etwa der Härte eines Radiergummis entspricht.

Zu beachten ist außerdem, dass das verwendete Filament beim 3D-Druck mit Silikon-guss kompatibel ist. Hierfür wurde PETG verwendet, das genauso wie PLA zu keinen Komplikationen führt.

⁴RTV steht für „Room Temperature Vulcanizing“, was bedeutet, dass das Silikon bei Raumtemperatur aushärtet. Die „2“ zeigt an, dass es sich um ein System mit zwei Komponenten handelt, die vor der Anwendung miteinander vermischt werden müssen.

Bevor das Silikon gegossen werden kann, müssen die Formen behandelt werden, damit das Silikon an diesen nicht haftet. Dafür wurde ein Trennspray auf Wachsbasis verwendet. Abbildung 2.7 zeigt eine Gussform, nachdem sie mit dem Wachsspray behandelt wurde.

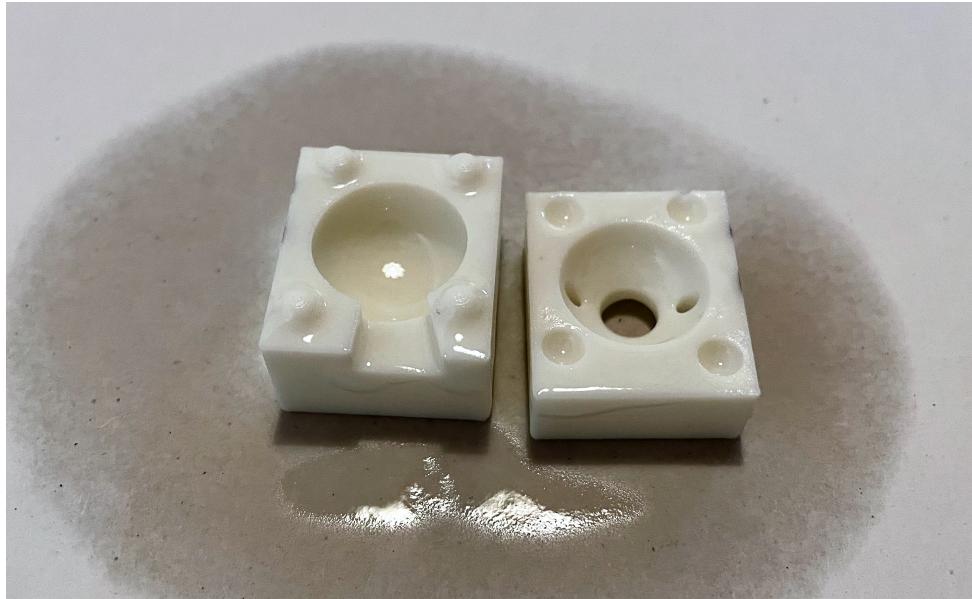


Abbildung 2.7: Gussform mit Trennspray vorbehandelt bevor es vollständig abgelüftet ist.

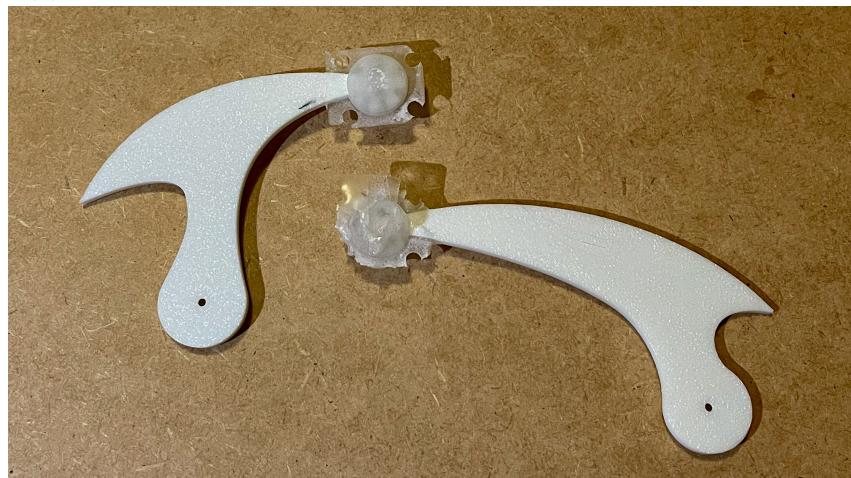
Anschließend kann ein Fuß in die Gussform geklemmt werden. Diese wird dann mit Klebeband befestigt und das Silikon kann gegossen werden (Abbildung 2.8a). Nach drei Stunden ist das Silikon vollständig vernetzt und die Form kann wieder gelöst werden (Abbildung 2.8b). Die überstehenden Silikonreste können nun mit einer Schere abgeschnitten werden und damit ist der Prozess beendet (Abbildung 2.8c).

TPU

Thermoplastisches Polyurethan (TPU) ist ein beliebtes 3D-Druck-Filament, das sich durch seine hohe Flexibilität, Abriebfestigkeit und ausgezeichnete Haftung auf verschiedenen Oberflächen auszeichnet, was es ideal für Anwendungen macht, die sowohl Robustheit als auch Elastizität erfordern. Da die Füße des Krabblers weiterhin stabil sein müssen, wird lediglich die Spitze des Fußes mit TPU gedruckt und mit einer Puzzle-Verbindung an den Fuß gesteckt, wie in Abbildung 2.9 zu sehen.



(a) Füße mit Gussformen, nachdem das Silikon gegossen wurde.



(b) Füße mit Silikonkugel, direkt, nachdem sie aus der Form genommen wurden.



(c) Füße mit gesäuberter Silikonkugel.

Abbildung 2.8: Prozess des Silikongießens.



(a) 3D-Modell

(b) Modell gedruckt mit TPU und PETG

Abbildung 2.9: Fuß mit einer Spitze aus TPU.

Haushaltsgummi

Bei der dritten Variante wird ein einfaches Haushaltsgummi über die Spitze gespannt und soll so für eine besser Haftung sorgen. Diese Variante ist besonders attraktiv, da sie sehr einfach herzustellen ist. Es muss nur ein Teil pro Fuß gedruckt werden und das Haushaltsgummi wird in Halterungen geklemmt, sodass auch kein Klebstoff notwendig ist. Abbildung 2.10a zeigt die gerenderte Spitze, mit der seitlichen Einkerbung und den Halterungen für das Gummi. In Abbildung 2.10b sind die fertigen Füße zu sehen.



(a) 3D-Modell

(b) Füße gedruckt und mit Haushaltsgummi

Abbildung 2.10: Fuß mit einem Haushaltsgummi über der Spitze.

2.2.3 Ergebnisse

Die Silikonfüße waren am aufwändigsten in der Produktion. Es müssen mehrere Teile gedruckt, das Silikon muss angemischt und gegossen werden und anschließend mehrere Stunden aushärten. Dafür ist das Endergebnis sehr stabil und rutschfest, verändert allerdings auch das Aussehen des Krabblers am stärksten.

Die TPU-Spitze ist ebenfalls aufwändig in der Herstellung, da TPU zu den komplizierteren Materialien zum Drucken gehört. Nur 3D-Drucker mit *Direct-Extrusion*⁵ können mit TPU-Filamenten umgehen und selbst dann müssen häufig die passenden Druckparameter zuerst ausprobiert werden. Das Ergebnis ist jedoch auch ein rutschfester Fuß, der leichter in Serie produziert werden kann, als die Variante aus Silikon. Ein Nachteil bei dem Design aus Abbildung 2.9 ist, dass die Puzzle-Verbindung alleine nicht gut hält. Hier muss mit Klebstoff nachgeholfen werden. Allerdings kann das Design auch abgeändert werden. Ein Beispiel für ein weiteres Design ist in Abbildung A.3 zu sehen.

Die dritte Variante mit dem Haushaltsgummi ist die einfachste der drei, mit ebenfalls guter Haftung. Es könnte allerdings sein, dass das Gummi nach längerer Zeit spröde wird und bricht, da es durchgängig auf Spannung gehalten wird. Ebenfalls ist das Design aus Abbildung 2.10b nur für die Vorderbeine geeignet. Die Hinterbeine sind in einem flachen Winkel zum Boden ausgerichtet, weshalb das Gummi hier noch anders platziert werden muss.

⁵Der Motor, der das Filament fördert, sitzt direkt über der Düse. Im Gegensatz dazu ist dieser Motor bei einem Bowden-System am Rahmen des Druckers angebracht.

2.3 Ein-/Aus-Schalter

2.3.1 Idee

Bisher konnte der Krabbler nur ausgeschaltet werden, wenn das Kabel zur Batterie oder USB-Verbindung getrennt wird. Das ist nicht sehr handlich und kann bei der Batterieverbindung auch zu einer falschen Polarität führen. Deshalb, soll der Krabbler einen Ein-/ und Aus-Schalter erhalten.

2.3.2 Herangehensweise

Beim Design der Leiterplatte wurde bereits das Integrieren des Schalters berücksichtigt. An den Pads mit der Referenz P2 bzw. Beschriftung `P_Switch` kann dieser verbunden werden. Der tatsächliche Schalter ist ein Subminiatür Kippschalter und findet zwischen den Hinterbeinen am Körper des Krabblers Platz (Abbildung 2.11).

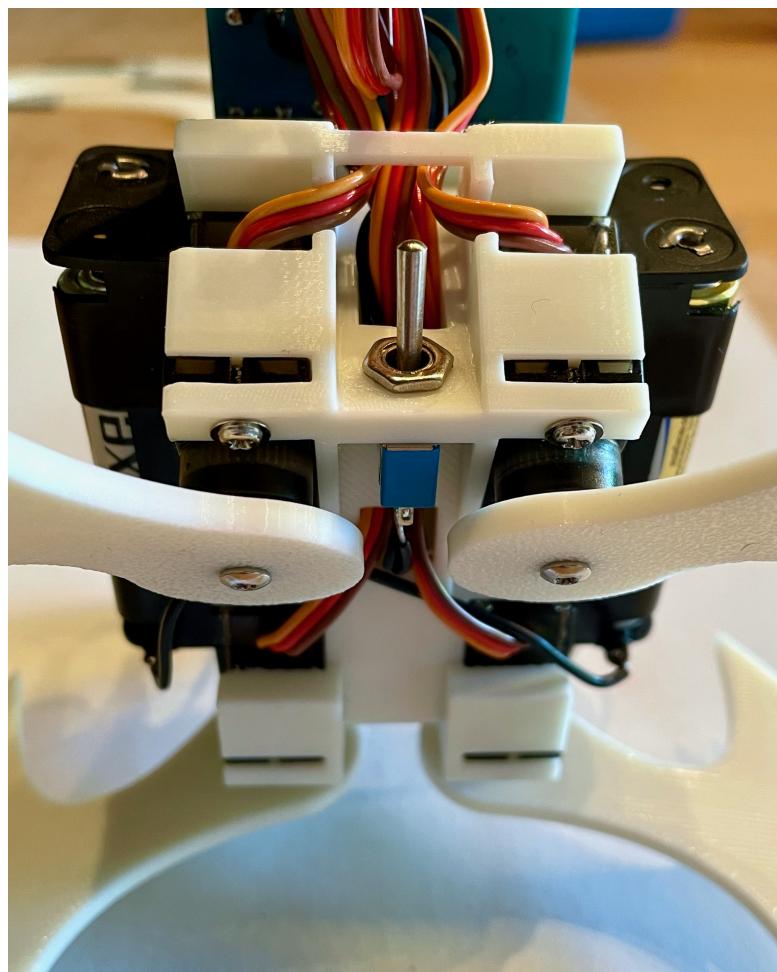


Abbildung 2.11: Schalter am Roboter

2.3.3 Ergebnisse

Hier handelte es sich um eine simple, aber sehr hilfreiche Verbesserung, die intuitiv funktioniert.

2.4 Verbesserte 3D-Modelle

2.4.1 Idee

Die vierte Kategorie an Verbesserungen widmet sich den 3D-Modellen des Krabblers. Beim Betrachten der ersten Version des Krabblers, sind einige Stellen aufgefallen, an denen Teile abgebrochen sind, was auf unzureichende Stabilität zurückzuführen sein könnte. Außerdem musste das 3D-Modell auch für die Änderungen in drei vorherigen Kapiteln angepasst werden.

2.4.2 Herangehensweise

Die Bruchstellen am alten Krabbler wurden in der 3D-Software identifiziert und entweder verstärkt oder entfernt.

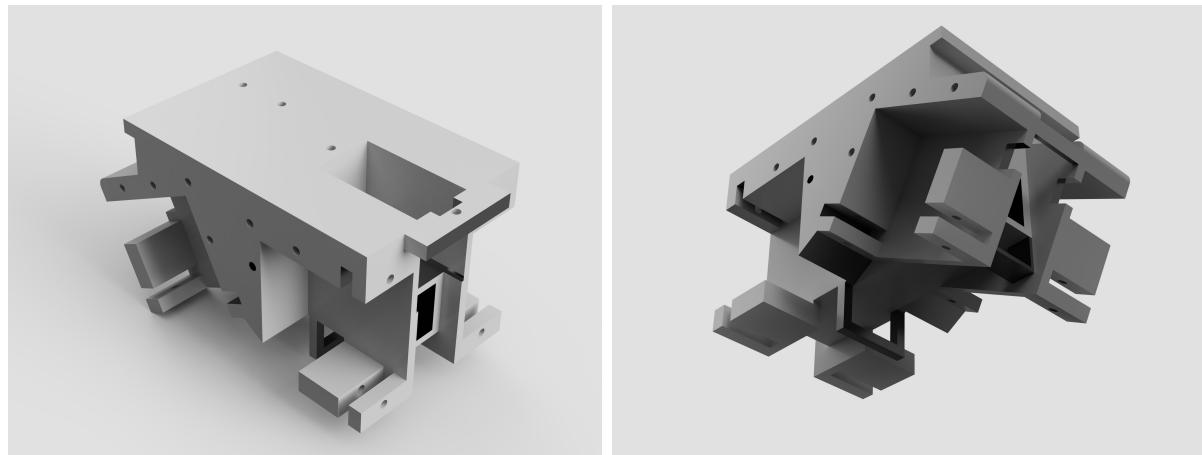
Damit die Platine einfach auf dem Gehäuse montiert werden kann, wurden Löcher für Gewindegarnituren auf der Oberseite des Körpers angebracht. Es wurden Gewindegarnituren für M2 Schrauben mit einer Länge von 4 mm verwendet, die mit einem Lötkolben in das Gehäuse gedrückt werden. Dadurch schmilzt das Plastik an der Stelle und der Gewindegarnitur sitzt nach dem Abkühlen fest.

Für den Ein-/ und Aus-Schalter wurde ebenfalls ein Loch vorgesehen zwischen den Hinterbeinen am Körper des Krabblers.

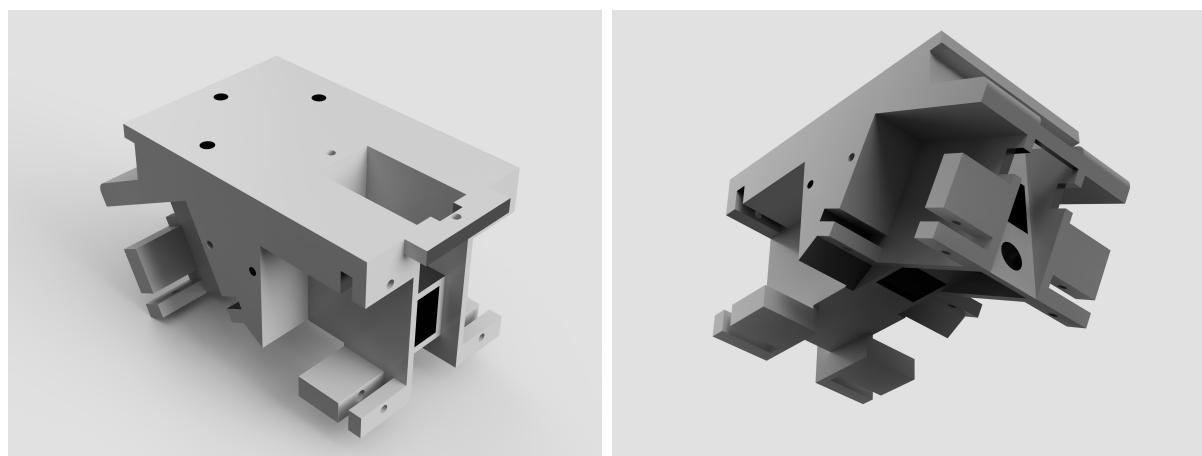
Zuletzt wurde auch die Kabelführung verbessert, indem sie nicht mehr durch Halterungen außen am Körper entlang läuft, sondern stattdessen durch einen Kanal im Inneren des Körpers.

2.4.3 Ergebnisse

Abbildung 2.12 zeigt das 3D-Modell des Körpers von Version 1 und Version 2. Auf Abbildung 2.13 ist das 3D-Modell des zusammengebauten Krabblers in der Version 2 zu sehen.



(a) Version 1



(b) Version 2

Abbildung 2.12: Vergleich zwischen dem alten Krabbler-Körper und dem neuen.

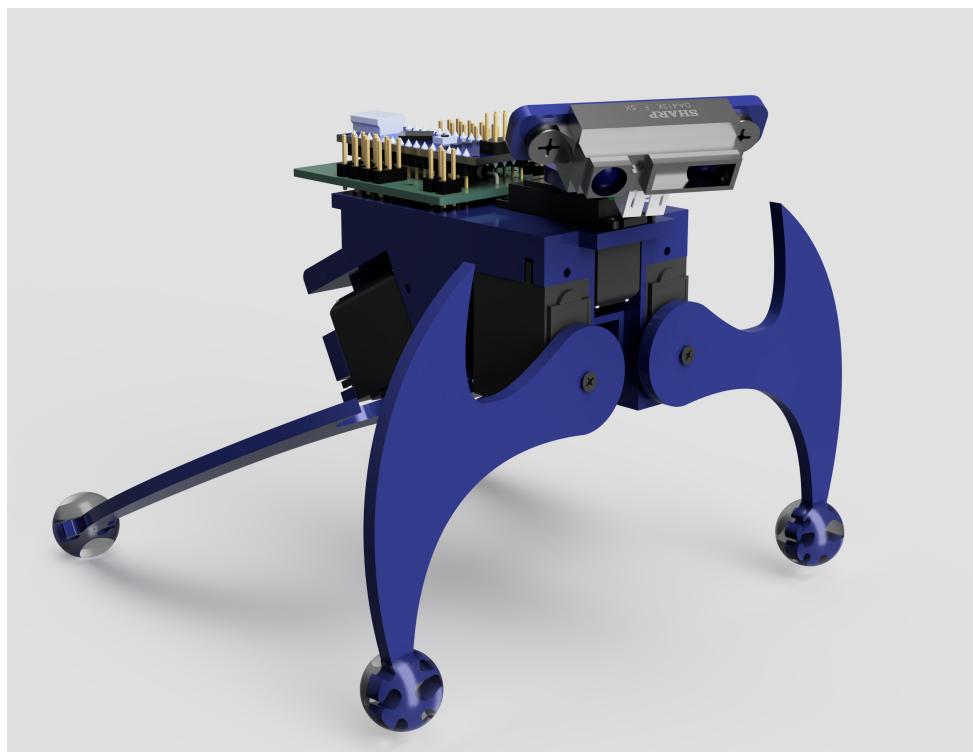


Abbildung 2.13: 3D-Model des Krabblers Version 2

3 Ausblick

Aus Zeitgründen konnten in diesem Projekt nicht alle Ideen umgesetzt werden. Deshalb sollen diese Ideen in diesem Kapitel aufgezeigt werden, um die nächsten Iterationen zu inspirieren.

Taster an der Spitze der Füße sind eine spannende Erweiterung. Mit diesen erlangt der Krabbler Wissen darüber, ob die Füße den Boden berühren. Das könnte beispielsweise in einem Hindernislauf eingesetzt werden. Um die Optik des Fußes dadurch nicht zu sehr zu verändern, könnte der Schalter weiter oben an einer breiten Stelle angebracht und durch einen Metallstab, der durch den Fuß gleitet, betätigt werden.

Silikonüberzug für die Füße: wie in Kapitel 2.2.2 erwähnt, könnte man durch einen Silikonüberzug rutschfeste Füße erlangen, ohne den aufwendigen Prozess des Silikongießens. Dafür könnte ein Verdickungsmittel (Thixotropiermittel) eingesetzt werden.

Mehr Sensoren: hier gibt es keine Grenzen. Ein Gyro-Sensor, der misst ob der Krabbler in Schräglage kommt, oder ein genauerer Sensor um Abstände zu messen, sind nur zwei Ideen von vielen. Und dank der I²C- und zusätzlichen Analog-Anschlüsse ist das Verbinden neuer Sensoren auch leicht getan.

Batteriemanagement: aktuell kommen die vier 1.5V Batterien an ihre Grenzen. Die Spannung reicht nicht immer aus um die Servos und den Mikrocontroller zu versorgen. Ein Akkupack aus dem Modellbau größere Lithium-Ionen-Akkus könnte hier helfen.

Software: ein kurzes Demoprogramm, in dem verschiedene Eigenschaften des Krabblers gezeigt werden.

4 Fazit

In diesem Projektbericht wurde die neue Iteration des vierbeinigen Krabblers vorgestellt. Es wurden vier Verbesserungen durchgeführt, die positive Auswirkungen auf die Herstellung, als auch auf die Verwendung des Roboters erzielten.

Eine neue Leiterplatte, die professionell hergestellt werden kann erleichtert das Anbringen aller elektronischen Komponenten und verringert mögliche Fehlerquellen. Neue Füße mit einem Silikonball an der Spitze sorgen für einen rutschfesten Halt auf glatten Oberflächen. Ein Schalter ermöglicht es nun den Roboter unkompliziert ein- und auszuschalten. Die 3D-Modelle für den 3D-Druck wurden überarbeitet, um mögliche Bruchstellen zu verhindern und die vorherigen Verbesserungen zu ermöglichen.

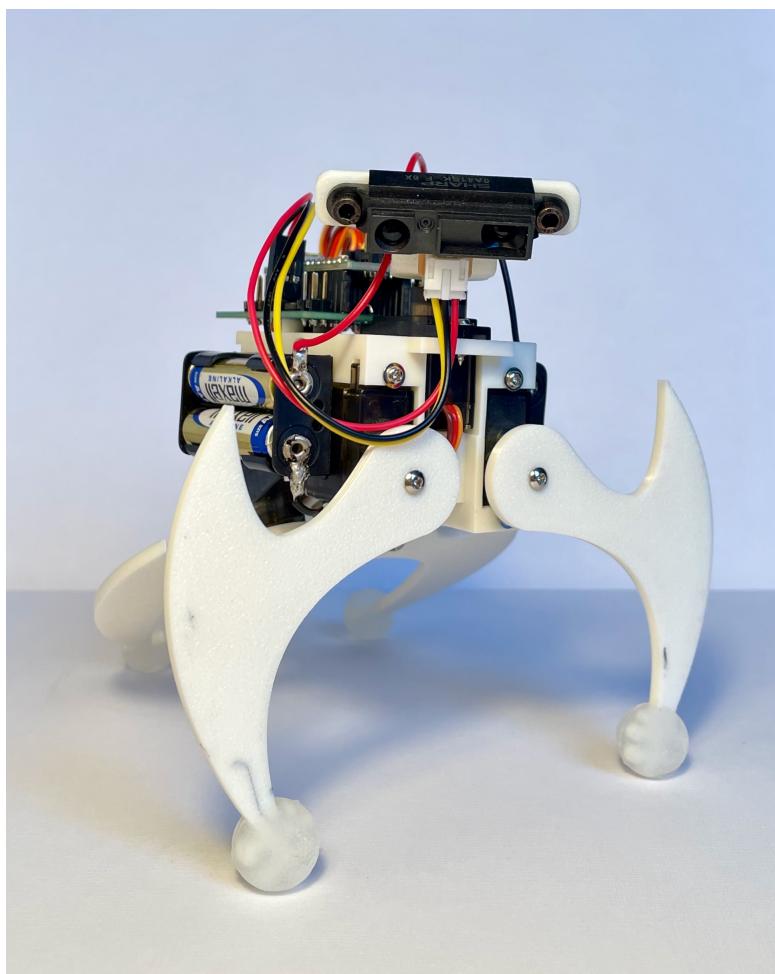


Abbildung 4.1: Krabbler Version 2

A Anhang

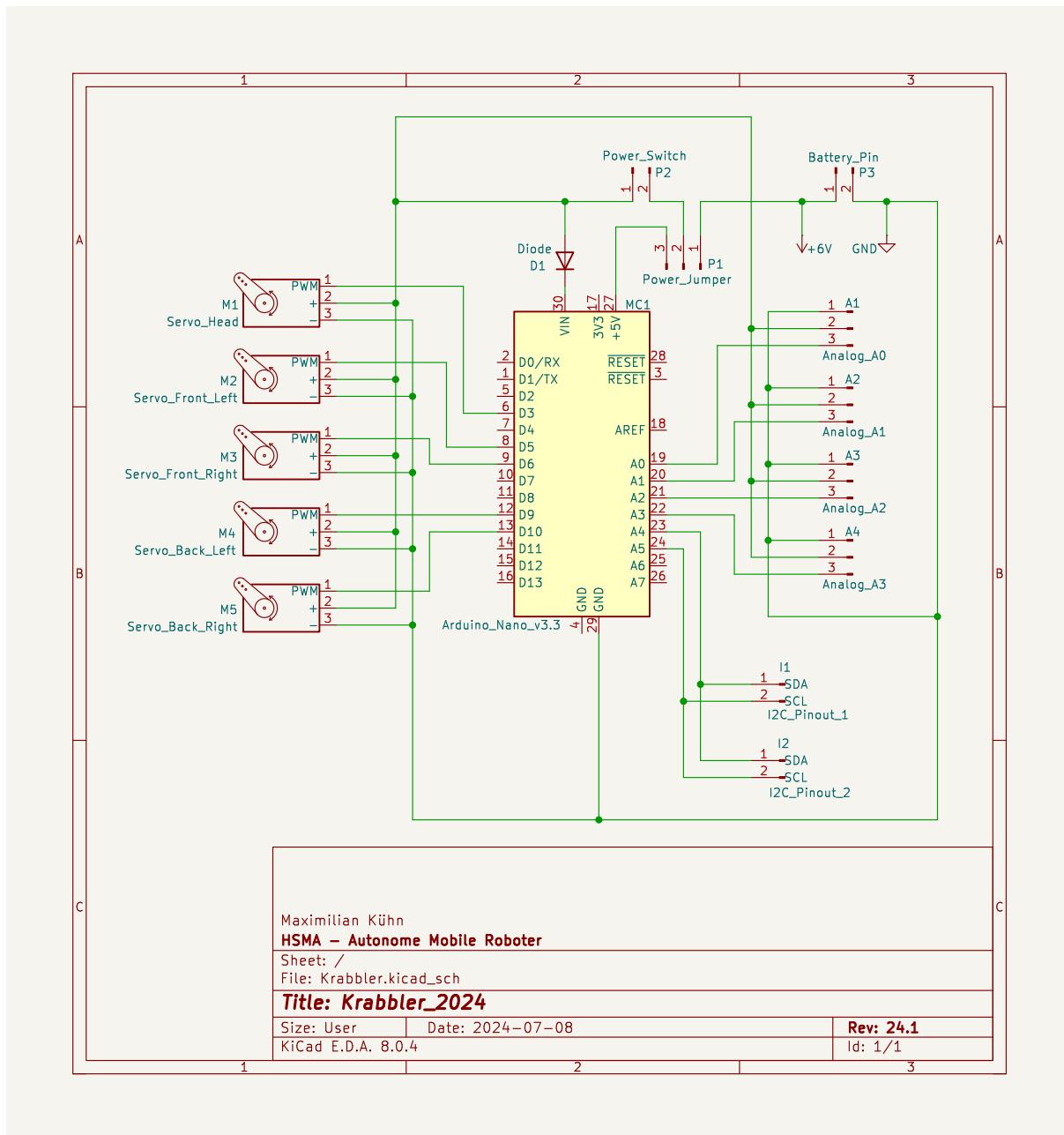


Abbildung A.1: Schaltplan der Leiterplatte

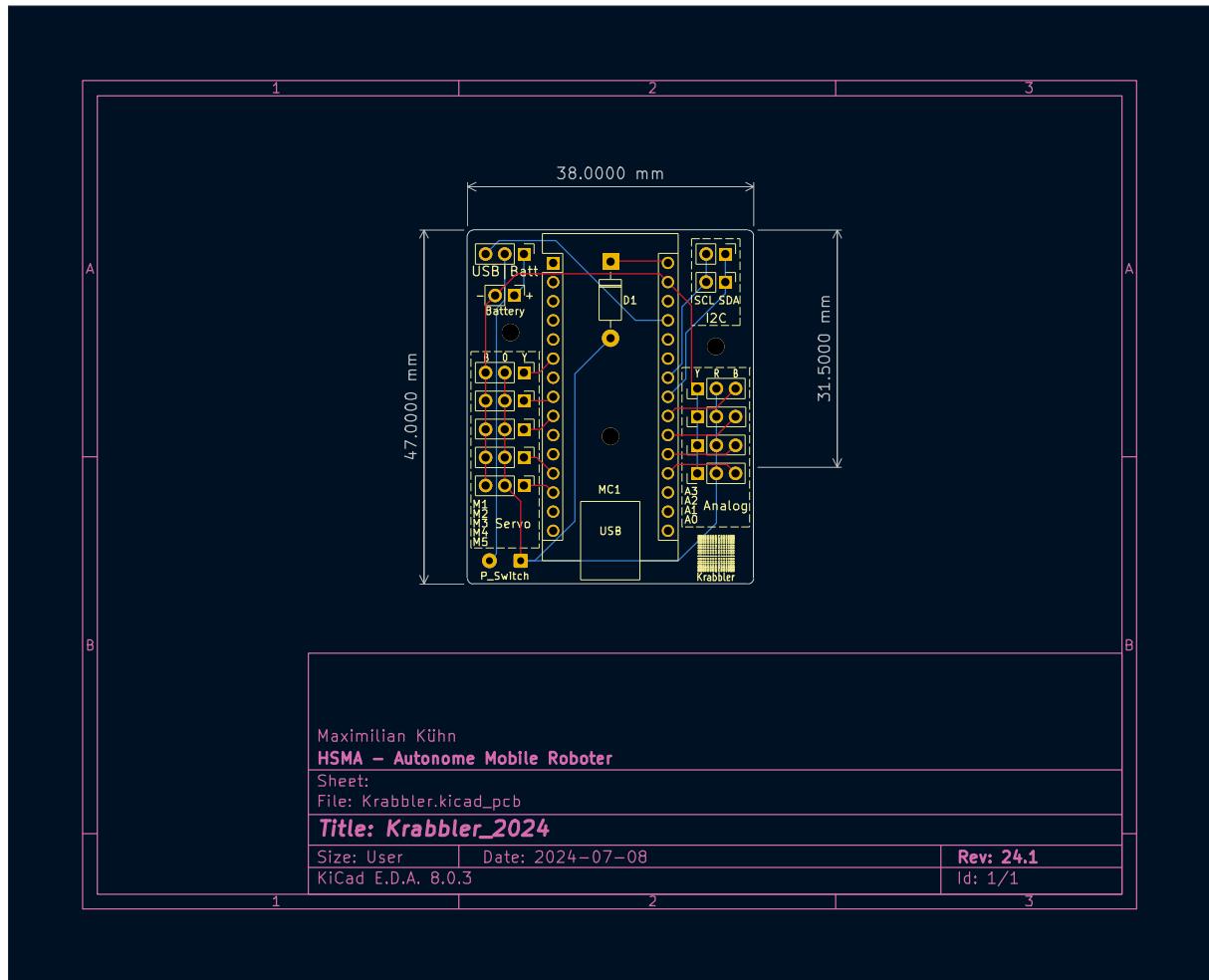


Abbildung A.2: Verdrahtung der Leiterplatte



Abbildung A.3: Fuß mit einer Spitze aus TPU. (Idee für bessere Verbindung)