

# **Optimierung einer Behandlungsdüse zur autonomen Bekämpfung der Ampfer-Pflanze**

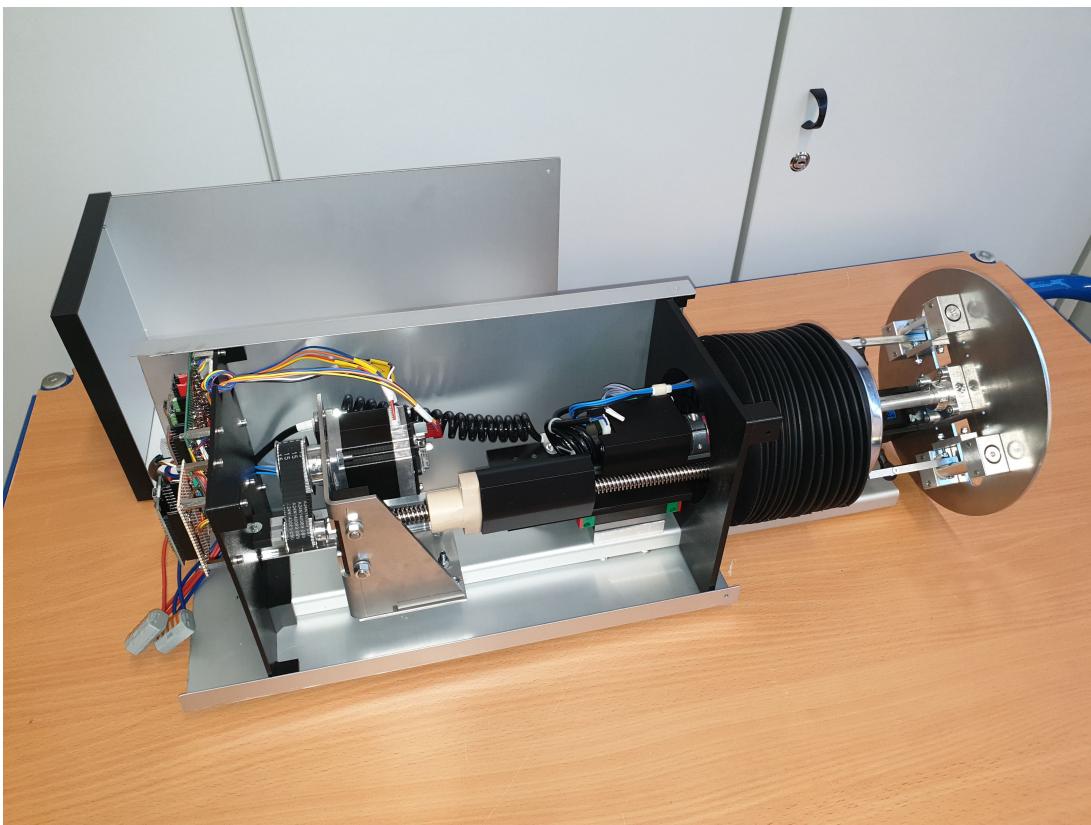
Lukas Reitemeier

18. Dezember 2020

Semesterarbeit HS20  
Maschinentechnik | Innovation

**Betreuer:** Prof. Dr. Dejan Šeatović

lukas.reitemeier@ost.ch  
Strasse: Bubental 4  
Wohnort: 8852, Altendorf



# Optimierung einer Behandlungsdüse zur autonomen Bekämpfung der Ampfer-Pflanze

Semesterarbeit HS20  
Maschinentechnik | Innovation

**Autor:** Lukas Reitemeier

**Betreuer:** Prof. Dr. Dejan Šeatović

## Abstract

**Hintergrund:** Das WeedEraser Projekt der Fachhochschule OST und Agroscope setzt sich das Ziel, die Ampfer-Pflanze (*Rumex*) autonom zu bekämpfen. Diese Pflanze gilt als Schädling und breitet sich schnell auf landwirtschaftlichen Nutzflächen aus. Das Behandlungsverfahren wurde von Agroscope entwickelt und sieht vor, die Wurzel mittels 90 °C heißem Wasser unter 130 bar Druck direkt durch den Erdboden hindurch abzuspritzen und so abzutöten. Dies ist umweltfreundlicher und ökonomischer, als konventionelle Methoden.

**Problem:** Anhand des bisherigen Prototypen soll ein optimierter Prototyp der Behandlungsdüse entwickelt werden. Dieser soll über ein mechatronisches System verfügen, welches erlaubt die Neigung der Düsen, die Rotation des Düsen-Kopfs und die Höhe der Behandlung über dem Boden anzupassen. Die Hitze durch das Wasser, wie auch die Verschmutzung und die Belastungen, bei der Anwendung in der Landwirtschaft, stellen eine Herausforderung für die Konstruktion dar.

**Methoden:** Im Entwicklungsprozess wurde der Vorgänger-Prototyp analysiert und basierend auf dem Behandlungsverfahren von Agroscope ein Konzept erarbeitet. Nach diesem wurde eine neue Behandlungsdüse konstruiert und realisiert.

**Resultat:** Der Prototyp konnte zum grössten Teil fertig realisiert werden. Die Behandlungsdüse besteht aus einer tragenden Struktur, einem Schienen-System, einem Spindel-System und dem Düsen-Kopf. Der Entwicklungsprozess, wie auch der fertige Prototyp ist in vorliegender Arbeit dokumentiert.

**Fazit:** Alle im Pflichtenheft genannten Anforderungen konnten berücksichtigt werden und Probleme bezüglich der Hitze und Verschmutzung der Mechanik wurden konstruktiv gelöst. Noch zu erledigende Arbeiten, Verbesserungsvorschläge und mögliche Erweiterungen wurden aufgezeigt.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Ausgangslage . . . . .	1
1.2 Ziele der Arbeit . . . . .	2
<b>2 Projektorganisation</b>	<b>3</b>
<b>3 Projektplan</b>	<b>3</b>
3.1 Verwendete Tools . . . . .	3
3.2 Dokumentation . . . . .	3
<b>4 Entwicklungsprozess</b>	<b>4</b>
4.1 Phase: Klären . . . . .	4
4.1.1 Inspektion WeedEraser . . . . .	4
4.1.2 Analyse bisheriger Prototyp von Agroscope . . . . .	6
4.1.3 Herausforderungen . . . . .	7
4.2 Phase: Konzipieren . . . . .	8
4.2.1 Design . . . . .	8
4.2.2 Aufbau . . . . .	8
4.3 Phase: Entwerfen . . . . .	9
4.3.1 CAD-Assembly . . . . .	9
4.3.2 Berechnungen . . . . .	9
4.4 Phase: Ausarbeiten . . . . .	10
4.4.1 Fertigung . . . . .	10
4.4.2 Zusammenbau . . . . .	11
<b>5 Realisierung des Prototypen</b>	<b>12</b>
5.1 Mechanik . . . . .	12
5.1.1 Schienen-System . . . . .	12
5.1.2 Spindel-System . . . . .	13
5.1.3 Düsen-Kopf . . . . .	14
5.1.4 Tragende-Struktur . . . . .	15
5.1.5 Erläuterung zentraler Komponenten . . . . .	16
5.2 Elektronik . . . . .	18
5.2.1 Elektro-Schema & Komponenten . . . . .	19
5.2.2 Antriebe . . . . .	20
5.2.3 Code: Arduino Nano . . . . .	21
5.2.4 Code: ESP32 . . . . .	23
5.3 Aktueller Stand . . . . .	23
5.4 Zu erledigende Arbeiten . . . . .	24
5.5 Inbetriebnahme . . . . .	25
<b>6 Fazit</b>	<b>26</b>
6.1 Zufriedenheit . . . . .	26
6.2 Kostenaufstellung . . . . .	26
6.3 Aufwand . . . . .	26
6.4 Potential zur Optimierung . . . . .	27
6.5 Ausblick . . . . .	28

## 1 Einleitung

### 1.1 Ausgangslage

Die Ampfer-Pflanze (Rumex) gilt als widerstandsfähige Schädlings-Pflanze, welche sich sehr schnell auf landwirtschaftlichen Nutzflächen ausbreiten kann. Folgende Behandlungsverfahren werden angewendet, um die Ampfer-Pflanze zu bekämpfen [1]:

- Chemische Behandlungsverfahren: Mit Herbiziden wird die Ampfer-Pflanze abgetötet. Die Schädigung ist jedoch nur schwer einzugrenzen, wodurch die umgebende Natur ungewollte Nebeneffekte erfährt.
- Thermische Behandlungsverfahren: Hitze in den Boden bringen, sodass die Wurzeln abgetötet werden, indem deren Enzyme nachhaltig geschädigt werden.
- Mechanische Behandlungsverfahren: Herausstechen der Pflanze samt Wurzel, sodass sich die Pflanze möglichst nicht regenerieren kann.

Chemische und thermische Behandlungsverfahren sind im heutigen Zeitalter der BIO-Landwirtschaft aus gesetzlichen und wirtschaftlichen Gründen keine vertretbaren Optionen. Deshalb werden vorwiegend mechanische Verfahren von Hand angewendet, wie zum Beispiel das verbreitete "Blackenstechen". Dies ist sehr zeitintensiv und erfordert menschliche Arbeitskraft.

Die Forschungsanstalt Agroscope in Tänikon verfolgt das Ziel, die Ampfer-Bekämpfung wirtschaftlicher und weniger belastend zu gestalten. Im Zuge dessen hat Agroscope ein Heisswasser-Behandlungsverfahren entwickelt, welches die Ampfer-Pflanze mit einer Kombination aus Hitze und Druck nachhaltig bekämpft. Die Behandlung muss jedoch nach wie vor von Hand durchgeführt werden und bleibt somit zeitintensiv[2].

Das WeedEraser Projekt verfolgt das Ziel, das von Agroscope entwickelte Heisswasser-Behandlungsverfahren zu automatisieren und die Machbarkeit der autonomen Ampfer-Bekämpfung nachzuweisen. Dazu wird ein autonom mobil agierendes Trägerfahrzeug, basierend auf einem Golf cart, als Machbarkeits-Studie entwickelt, an welchem eine Ampfer-Behandlungseinheit integriert wird, welche nach dem von Agroscope entwickelten Prinzip funktioniert[3].

Um einen Überblick über das WeedEraser-Projekt im Kontext dieser Arbeit zu erhalten und die zu implementierende Behandlungsmethode zu verstehen, wird folgende Literatur als relevant erachtet:

- Optimisation of hot-water application technology for control of broad-leaved dock (Rumex obtusifolius)[1]
- Bio-Blackenbekämpfung - Heisswasser öffnet neue Perspektiven[2]
- Semesterarbeit von Herrn Gamenisch[4]

## 1.2 Ziele der Arbeit

In dieser Semesterarbeit soll ein Prototyp weiterentwickelt und realisiert werden. Die Behandlungsdüse soll an Hand von Erkenntnissen umfangreicher Versuche der Forschungsanstalt Agro-scope, sowie den Erfahrungen mit dem gegenwärtigen Prototypen konstruiert werden.

Die neue Hochdruckdüse muss so konzipiert und realisiert werden, dass die Düsen das 80 - 90 °C heisse Wasser bei 130 bar Druck mit variablem Winkel in den Boden richten können. Dabei ist zu beachten, dass die Düsenhalter während der Behandlung rotieren müssen, um die Wurzel der Pflanze rundum zu behandeln. Folgende Rahmenbedingungen wurden für die Arbeit definiert (siehe Aufgabenstellung im Anhang):

- Ein Mechatronisches System der Düse muss konzipiert und realisiert sein.
- Die Behandlungsdüse wird von einem Mikrocontroller gesteuert.
- Die Aktivierung des Systems erfolgt extern und wird per RS232, WiFi, Bluetooth, etc. pp. durchgeführt.
- Der gegenwärtige Prototyp ist zur Analyse vorhanden.
- Der Prototyp soll am 27. November 2020 demonstriert werden können.

## 2 Projektorganisation

## 3 Projektplan

Der Projektplan wurde auf GitLab mittels Meilensteinen erstellt. Folgende Meilensteine wurde definiert:

Geplantes Datum	Realisiertes Datum	Meilenstein
16.10.2020	rechtzeitig	Design festlegen
23.10.2020	6.11.2020	CAD fertig
23.10.2020	10.11.2020	Komponenten bestellt
20.11.2020	26.11.2020	Erster Zusammenbau
27.11.2020	rechtzeitig	DEMO
18.12.2020	rechtzeitig	Abgabe der schriftlichen Arbeit

Tabelle 1: Zeitplan mittels Meilensteinen in GitLab

### 3.1 Verwendete Tools

- Siemens NX 12 für das CAD-Assembly.
- GitLab zur Versionsverwaltung von Code, des Schaltplans und CAD-Daten.
- Fritzing zur Dokumentation der Elektronik.
- Arduino IDE zur Programmierung eines ESP32 Mikrocontrollers.
- Visual Studio Code mit der Erweiterung Platform.io zur Programmierung eines Arduino Nano.

### 3.2 Dokumentation

Um den Entwicklungsprozess festzuhalten und Rückschlüsse aus verrichteter Arbeit ziehen zu können, wurde die Arbeit dokumentiert.

**Alle in dieser Arbeit erzeugten Daten sind im Anhang zu finden.**

## 4 Entwicklungsprozess

Die Entwicklung wurde in folgende Phasen gegliedert:

1. Klären: Die Aufgabenstellung wurde analysiert und die Anforderungen in einem Pflichtenheft festgehalten.
2. Konzipieren: Erste Skizzen wurden angefertigt und Teilfunktionen gebildet. Grobe Berechnungen zur Konstruktion dienten zu einer Vorauswahl an Komponenten.
3. Entwerfen: Das Konzept wurde in Siemens NX als CAD-Assembly umgesetzt. Die zentralen Komponenten wurden gemäss Berechnungen ausgewählt und bestellt.
4. Ausarbeiten: Alle Komponenten wurden bestellt, Teile aus Aluminium in der HSR-Werkstatt gefertigt, 3D-Druck-Teile gedruckt und Code zur Ansteuerung geschrieben. Beim Zusammenbau wurden laufend Verbesserungen vorgenommen.

### 4.1 Phase: Klären

Zur Grundlage des ganzen Projekts wurde in dieser Phase die Aufgabe möglichst genau beschrieben und zugehörige Informationen studiert, was schlussendlich im Pflichtenheft resultierte.

#### 4.1.1 Inspektion WeedEraser

Damit die Behandlungsdüse zum gesamtem System passt, wurde der WeedEraser inspiert. Die Schnittstelle zur Behandlungsdüse stellt eine Adapterplatte am Ende des Roboterarmes dar (siehe Abbildung 1).

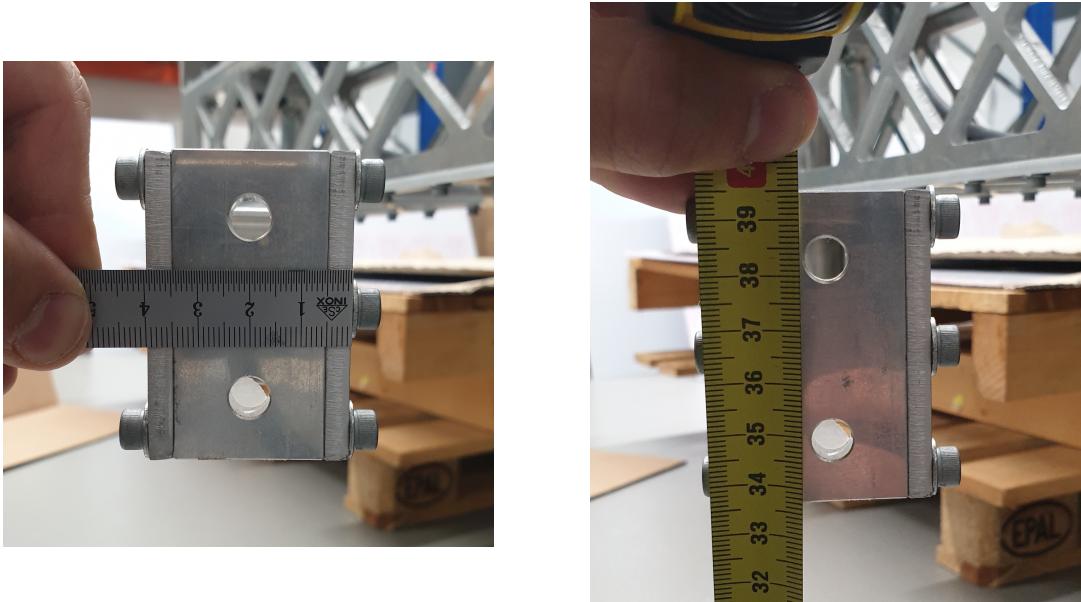


Abbildung 1: Adapter-Platte am Roboterarm des WeedErasers

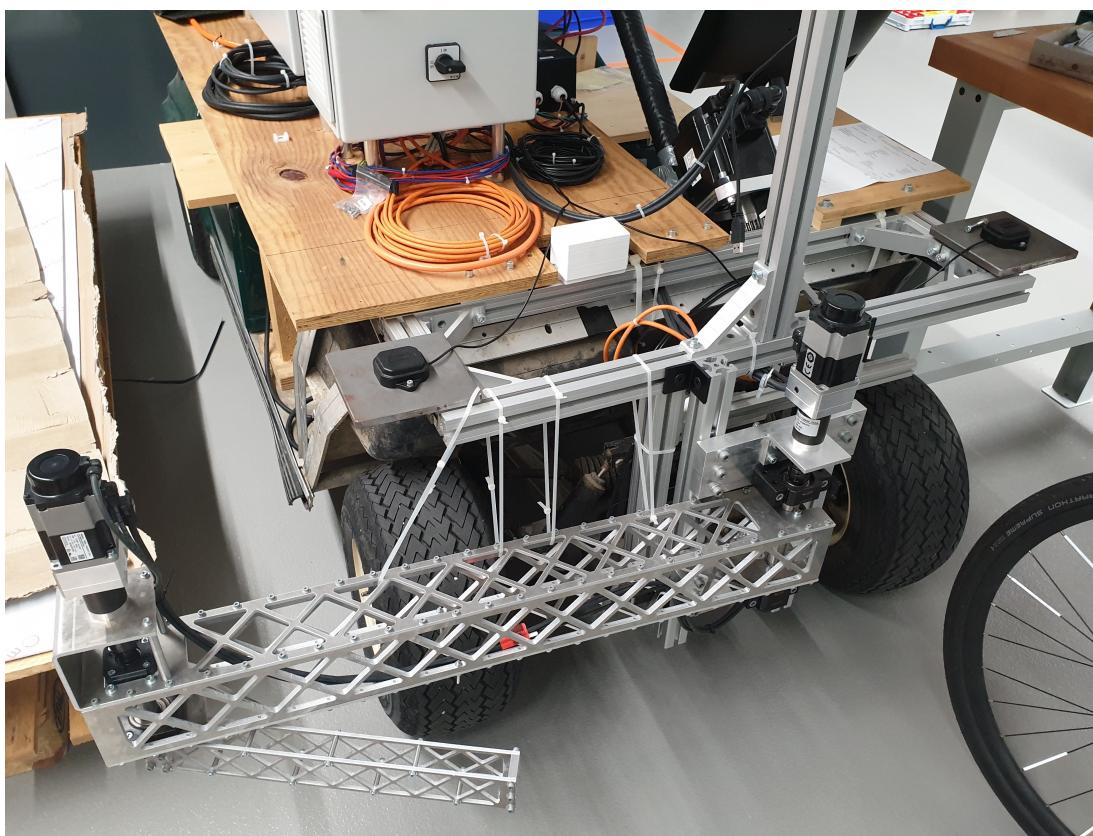


Abbildung 2: Roboter-Arm des WeedEraser

Bei der Inspektion ist aufgefallen, dass der Arm nicht bezüglich der Höhe verstellbar ist und dies in der Aufgabenstellung der Behandlungsdüse auch nicht gefordert ist. Es wird erwartet, dass ohne verstellbare Höhe der autonome Einsatz der Düse nicht gewährleistet ist. Die Düse würde

Gefahr laufen mit Objekten auf dem Boden zu kollidieren. Ausserdem ist man bei Tests flexibler, wenn die Höhe einfach angepasst werden kann. So macht es Sinn diese Funktionalität bei der Konstruktion der Behandlungsdüse zu berücksichtigen, was so auch im Pflichtenheft definiert wurde (siehe Pflichtenheft im Anhang).

Weiter ist aufgefallen, dass der Roboterarm in der vertikalen steif ist, jedoch in der Horizontalen am Ende des Arms ca. 2 cm Spiel zulässt (siehe Video im Anhang). Dies könnte bei Bewegungen mit einer schweren Behandlungsdüse zu ungewolltem Schwingen führen, was die Zielgenauigkeit beeinträchtigt und das Material zusätzlich belastet.

Es sind noch keine Strom-, Wasser- oder Signal-Leitungen zur Adapterplatte geführt. Strom kann aus dem Steuerungskasten (24V) bezogen werden. Von da aus soll mittels einer Beckhoff SPS die Düse gesteuert werden. Das heisse Wasser wird von einem Durchlauferhitzer erzeugt, welcher von Agroscope bereitgestellt wird. Dieser ist aber noch nicht fest auf dem WeedEraser installiert.

#### 4.1.2 Analyse bisheriger Prototyp von Agroscope

Agroscope hat bereits einen einfachen Prototyp eine Behandlungsdüse realisiert. Dieser wurde von Herrn Thomas Hämmerli (Landmaschinenmechaniker und für den Bau von Gegenständen der Forschungen zuständig) bei Agroscope gebaut. Aussagen zu diesem Prototypen stützen sich auf eigene Beobachtungen und Informationen von Herrn Markus Sax von Agroscope (siehe Fragenkatalog im Anhang).



Abbildung 3: Prototyp von Agroscope

Folgende Schwachpunkte, sind aufgefallen:

- Ungenaue rotation der Düsen: Die Rotationsgeschwindigkeit des DC-Motors wird über die angelegte Spannung geregelt. Dies hat zur Folge, dass die Drehung der Düsen nicht genau gesteuert werden kann. Wird eine tiefe Geschwindigkeit eingestellt und der Düsen-Teller festgehalten, dreht dieser nur wieder weiter, wenn er aktiv wieder in die entsprechende Richtung „angeschubst wird“. Dementsprechend hat Widerstand bezüglich der Rotation einen direkten Einfluss auf die Drehgeschwindigkeit. So ist ohne Feedback unklar, wann die Wurzel rundum behandelt wurde.

- Hitze: Die Drehachse des Düsen-Kopfs ist gleich das Rohr, welches das heisse Wasser zu den Düsen leitet. Dies hat zur Folge, dass sich die gesamte Konstruktion erwärmt, was bei einer Wassertemperatur von bis zu 90 °C für gewisse Komponenten problematisch sein kann.
- Komplexe Lagerung: Durch den hohen Druck von 130 bar und die hohe Wassertemperatur von 90 °C musste auf ein Keramiklager zurückgegriffen werden, welches dem Düsenkopf die freie Drehung erlaubt. Dieses ist, laut Angaben von Markus Sax (Agroscope), während den Tests kaputtgegangen und kostet 180 CHF (siehe Fragenkatalog im Anhang). So wird dieses als nicht robust genug für die Anwendung in der Landwirtschaft befunden.
- Keine Verstellbarkeit Höhe: Eine Verstellbarkeit der Behandlungs-Höhe ist auch am Roboterarm des WeedEraser nicht gegeben, wodurch dies als Behandlungs-Parameter nicht optimiert werden kann. Weiter kann die Düse beim Verfahren nicht durch ein Hochfahren von Kollisionen geschützt werden.
- Fixer Düsen-Winkel: Der Einfallwinkel des Düsen-Strahls kann nicht eingestellt werden.

#### 4.1.3 Herausforderungen

Folgende Herausforderungen wurde identifiziert:

- Schmutz: Bei der Anwendung in der Landwirtschaft wird das System Staub und Dreck ausgesetzt. Dies kann die Funktion beeinträchtigen und Material schädigen.
- Hitze: Bei der Behandlung mit heissem Wasser unter hohem Druck ist damit zu rechnen, dass Erdklumpen auf der Konstruktion landen und diese aufgrund der hohen Temperatur verkrusten. Dies stellte auch bei ersten Tests mit dem Vorgänger-Prototyp ein Problem dar. Außerdem ist eine Temperatur von 90 °C nicht mit allen Teilen verträglich, was eine thermische Trennung oder speziell thermisch resistente Komponenten erfordert.
- Kondenswasser: Aufgrund von Temperaturschwankungen (Tageszeit abhängig oder auf Grund der Behandlungs-Zyklen) könnte sich Kondenswasser in der Konstruktion bilden. Dies kann elektronische Komponenten beschädigen oder zur Korrosion metallischer Teile führen.
- Belastung: Der Einsatz in der Landwirtschaft beansprucht die Konstruktion auf verschiedene Weisen. Dies kann zum frühzeitigen Verschleiss oder sogar zum Ausfall führen. Dazu kommt, dass für den Einsatz in der Landwirtschaft die auftretenden Belastungen nur schwer abzuschätzen sind.
- Sicherheit: Dies in Kombination aus 90 °C heissem Wasser und 130 bar Druck stellt ein erhebliches Gefahrenpotential dar. Dies muss bei der Konstruktion in Betracht gezogen werden.
- Zeitrahmen: Zwischen Pflichtenheft (02.10.2020) und Demonstration (27.11.2020) bleiben lediglich 8 Wochen für Konstruktion und Realisierung.

## 4.2 Phase: Konzipieren

Die nötigen Teilfunktionen wurden definiert und demnach erste Skizzen erstellt (siehe Anhang). Anhand dieser ersten Entwürfe wurde eine Komponentenliste erstellt und mit der Beschaffung dieser begonnen (siehe Teilfunktionen- Komponenten-Liste im Anhang). Dazu wurde erst eine Kostenschätzung erstellt, welche bis zur fertigen Kostenaufstellung am Ende des Projekts überarbeitet wurde (siehe Kostenaufstellung im Anhang).

### 4.2.1 Design

Es wurde der Ansatz verfolgt, heisse Komponenten thermisch von der restlichen Konstruktion abzutrennen. Umgesetzt werden soll dies, indem ein Schlauch, welcher das heisse Wasser fördert, ausserhalb der Konstruktion geführt wird. Dies ist nur möglich, wenn die Düsen bei der Behandlung nicht kontinuierlich gedreht werden, da ansonsten die Rotation durch den Schlauch, je nach Länge, irgendwann behindert wird. Gelöst soll dies werden, indem kontinuierlich nur leicht über 180 ° hin und her rotiert wird.

Bezüglich Staub und Schmutz soll die gesamte Konstruktion abgeschlossen sein und keine anfälligen Komponenten der Umgebung exponieren. Um dennoch die Höhe der Düse dennoch variieren zu können, muss die Konstruktion von einem beweglichen, dennoch abdeckenden Teil geschützt werden, was mit einem Faltenbalg realisiert werden soll.

Die ganze Konstruktion wird möglichst simpel und robust gehalten, um den Anforderungen in der Landwirtschaft gerecht zu werden.

### 4.2.2 Aufbau

- Tragende Struktur: Grundbaustein ist ein Aluminium-Profil, welches direkt mit dem Roboterarm verbunden ist. An diesem sind die meisten Komponenten befestigt.
- Wasserversorgung: Ein Schlauch fördert das Wasser bis zum Düsenkopf, wo nach einem T-Stück das heisse Wasser auf beide Düsen verteilt wird. Dieser wird ausserhalb der eigentlichen Konstruktion geführt, was diese thermisch entkoppelt.
- Düsen-Halterung: Hält die beiden Düsen, welche gelagert sind, sodass diese ausgerichtet werden können.
- Düsen-Kopf: Hält die Düsen-Halterung und ermöglicht das Rotieren des Kopfes.
- Schienen-System: Verbindet den Düsenkopf mit der tragenden Struktur, sodass dieser in der Vertikalen beweglich ist.
- Spindel-System: Ermöglicht das vertikale Verfahren des Schienen-Systems.
- Elektronik: Steuert die Behandlung und treibt alle Achsen entsprechend an.

Nach dieser Liste wurde das CAD-Assembly aufgebaut und die Beschaffung der Komponenten eingeleitet. Aus den Teilstrukturen wurde eine Liste mit benötigten Komponenten erarbeitet (siehe Teilstrukturen- und Komponenten-Liste im Anhang).

## 4.3 Phase: Entwerfen

### 4.3.1 CAD-Assembly

**Plazierung der Komponenten:** Die wichtigsten Komponenten wurden selber modelliert oder importiert und positioniert. Dadurch ergaben sich Massen für tragende und verbindende Teile.

**Assembly-Struktur:** Die Assembly-Struktur lehnt sich an die definierten Teilstrukturen an. Aus CAD-Sicht machen aber andere Strukturen Sinn, als eine theoretische Liste mit Teilstrukturen.

**Ausführlichkeit:** Das CAD-Assembly ist keine exakte Abbildung des fertigen Prototypen. Dies, weil nicht genügend Zeit zur Verfügung stand alle Komponenten genau zu modellieren und dies für einen Prototypen als nicht zielführend erachtet wurde. Das CAD-Modell diente hauptsächlich zum plazieren und dimensionieren der Komponenten. Vielfach wurde auch defensiv konstruiert, sodass beim Zusammenbau mit kleinen Änderungen der Prototyp mit Sicherheit funktioniert.

### 4.3.2 Berechnungen

Gewisse Komponenten bedürfen einer Auslegung basierend auf Berechnungen. Diese wurden zentral in einem einzigen Excel-Dokument gemacht (siehe Berechnungen im Anhang). Grobe Berechnungen wurden bereits in der Phase Konzipieren gemacht, die ergänzt und überarbeitet wurden.

Wichtigste Berechnungen:

- Rückstosskraft der Düsen.
- Maximal ertragbare dynamische Belastung der Profilschienenführung.
- Maximal ertragbare Belastung der Achse des Düsen-Kopfs.
- Auslegung des Spindeltriebes.
- Antriebs-Kräfte zum Ausrichtung der Düsen und rotieren des Düsen-Kopfes.

## 4.4 Phase: Ausarbeiten

**Beschaffung der Komponenten:** Die Beschaffung der Komponenten musste fortlaufend während der Phasen Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten geschehen, um den knappen Zeitplan einhalten zu können. So erfolgten die Bestellungen in "Wellen". Dies war nicht optimal und verursachte zusätzlichen Aufwand für das ILT-Personal. Dies wurde gemacht, um in Anbetracht des sehr knappen Zeitplans, möglichst alle Komponenten rechtzeitig zu erhalten. Weiter konnten so Fehler früher erkannt und noch korrigiert werden. So wurden zwei Teleskop-Schienen der Firma CHAMBRELAN zurückgesendet und durch eine Profilschienenführung von HIWIN ersetzt. Festgehalten sind alle Bestellungen in der Bestelliste und in eigenen Dokument (siehe Bestelliste, Teilfunktionen und Komponenten im Anhang).

### 4.4.1 Fertigung

Es wurde darauf geachtet möglichst günstige und zweckmässige Fertigungsverfahren einzusetzen. Die folgende Fertigungsverfahren wurden hauptsächlich eingesetzt.

**Metallbearbeitung:** Die Düsenhalterung am Kopf der Konstruktion wurde aus Aluminium gefertigt, welches als Halbzeug in der HSR-Werkstatt schon vorhanden war. An einer Fräse mit Digitalanzeige und einer einfachen Drehbank konnten diese Teile gefertigt werden. Das ITEM-Aluprofil musste mit Bohrungen versehen werden, damit weitere Komponenten daran festgeschraubt werden können. Die Spindel musste nur abgedreht und gekürzt werden, sodass diese in den Festlager-Block fixiert werden kann und über Zahnriemenscheiben angetrieben.

**3D-Druck:** Alle 3D-Druckteile wurden aus HTPLA<sup>1</sup> von 3D-Ware auf einem privaten Prusa i3 Mk3 gedruckt. Die Extruder-Temperatur betrug 220 °C und die Heizbett-Temperatur 70 °C. Aufgefallen ist, dass das HTPLA nicht ganz so einfach zu drucken ist, wie normales PLA. Es wird vermutet, dass sich das HTPLA viskoser verhält bei gleicher Temperatur. Aus diesem Grund wurden die Drucktemperaturen vergleichsweise hoch gehalten, sodass das Filament gut aus der Düse gepresst werden kann. Weiter ist aufgefallen, dass die Teile während dem Drucken empfindlich gegenüber schnellen Temperaturschwankungen sind, so haben sich einige Teile stellenweise vom Druckbett gelöst, wenn zum Bsp. ein Fenster geöffnet wurde. Um die angegebene Hitzebeständigkeit zu verifizieren, wurde ein einfacher Versuch durchgeführt (siehe HTPLA-Versuch im Anhang).

**Blechbiegeteile:** Die Halterung für den Spindeltrieb, den Düsen-Teller und die Haube wurden bei Blexon bestellt. Damit der limitierte Online-Editor die Teile rechnen konnte, mussten diese vereinfacht werden. Die Haube aus 1 mm dickem Aluminium (AlMg1) konnten nicht gleich geschweisst werden, weswegen diese verschraubt sind. Der Düsenteller wurde aus 3 mm dickem Chromstahl (1.4301) geschnitten. Die Halterung für den Spindeltrieb ist aus dem gleichen Chromstahl mittels Laser ausgeschnitten und gebogen worden.

<sup>1</sup>High Temperature PLA (HTPLA) ist ein Kunststoff für den 3D-Druck, welcher hitzebeständiger als normales PLA ist. Dieser soll Formfest bis 120 °C sein (siehe Datenblatt im Anhang).

#### 4.4.2 Zusammenbau

Für die Präsentation am 27.11.2020 wurden die zentralen Komponenten der Konstruktion ein erstes Mal zusammengebaut. Es zeigte sich, dass alles passt und keine ungeahnten Probleme auftauchen. Bis zum Ende des Projekts sollte die Elektronik noch vollständig implementiert und Verbesserungen an der Mechanik vorgenommen werden. Folgendes ist zum Zusammenbau noch zu erwähnen:

- Schrauben: Diese wurden aus der HSR-Werkstatt bezogen. Da als Senkkopfschrauben nur Schlitz-Schrauben zur Verfügung standen, wurden diese zunächst verbaut und später möglichst gegen Innensechskant-Schrauben ersetzt.
- Änderungen: Beim Zusammenbau sind einige Verbesserungen zusammengekommen, speziell bei den 3D-gedruckten Teilen. Diese wurde jeweils gleich ins CAD-Assembly übertragen.
- Software & Hardware: Die Elektronik wurde auf eine Trägerplatte gelötet. Dies wurde nicht im Detail geplant, da sich bis zum Schluss noch Änderungen aufgetreten sind und der Projektverlauf dafür keine Zeit geboten hat. In der Phase Entwerfen wurde bereits erste Teile des Codes geschrieben. Dieser sollte dann vervollständigt und optimiert werden.

## 5 Realisierung des Prototypen



Abbildung 4: Zusammengebauter Prototyp

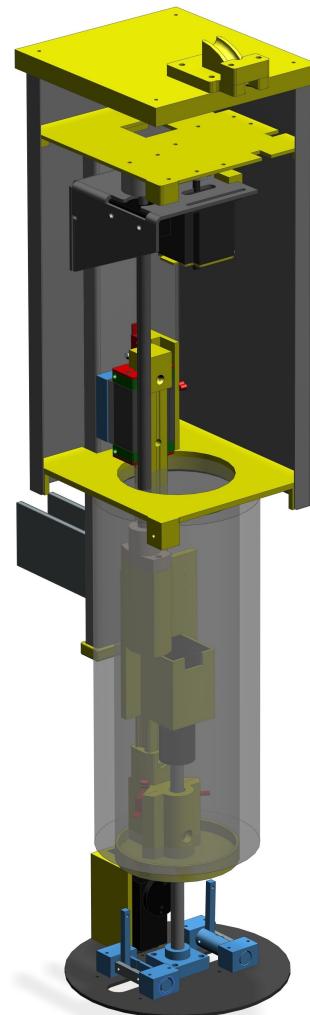


Abbildung 5: Ganzes CAD-Assembly

### 5.1 Mechanik

Die Mechanik kann in folgende Subsysteme unterteilt werden: Die tragende Struktur, das Schienen-System, das Spindel-System und den Düsen-Kopf. 3D-gedruckte Teile sind in den Abbildungen jeweils gelb eingefärbt.

#### 5.1.1 Schienen-System

Das Schienen-System besteht aus einer Profilschienenführung von HIWIN, welche mit dem Schlitten über eine Adapter-Platte am ITEM Alu-Profil verschraubt ist. Diese Verwendung der Schiene ist nicht konventionell, zumal die Schiene selbst ein Teil der tragenden Struktur ist.

Gemäss Berechnungen (siehe Anhang) und einem Telefongespräch mit einem Berater von HI-WIN (siehe Arbeits-LOG 03.11.2020 im Anhang) sollte dies für die zu erwartenden Belastungen taugen. Auf der Schiene ist eine 3D-gedruckte Halterung für den Schrittmotor, welcher für die Drehung des Düsenkopfes zuständig ist. An dieser Halterung ist auch die Mutter der Spindel angebracht. Am oberen Ende ist eine 3D-gedruckte Kappe auf der Schiene, welche als Mechanischer Endanschlag dient. Am gegenüberliegenden Ende der Schiene dient der 3D-gedruckte Deckel als Endanschlag, welcher den Faltenbalg nach unten schliesst und die Achse des Düsen-Kopfes lagert. Die Endschalter werden durch die Happe und eine Schraube an der Schrittmotorenhalterung auf der Schiene ausgelöst. Angebracht sind die Endschalter auf einer kleinen Trägerplatte an der Seite des Schienen-Schlittens.

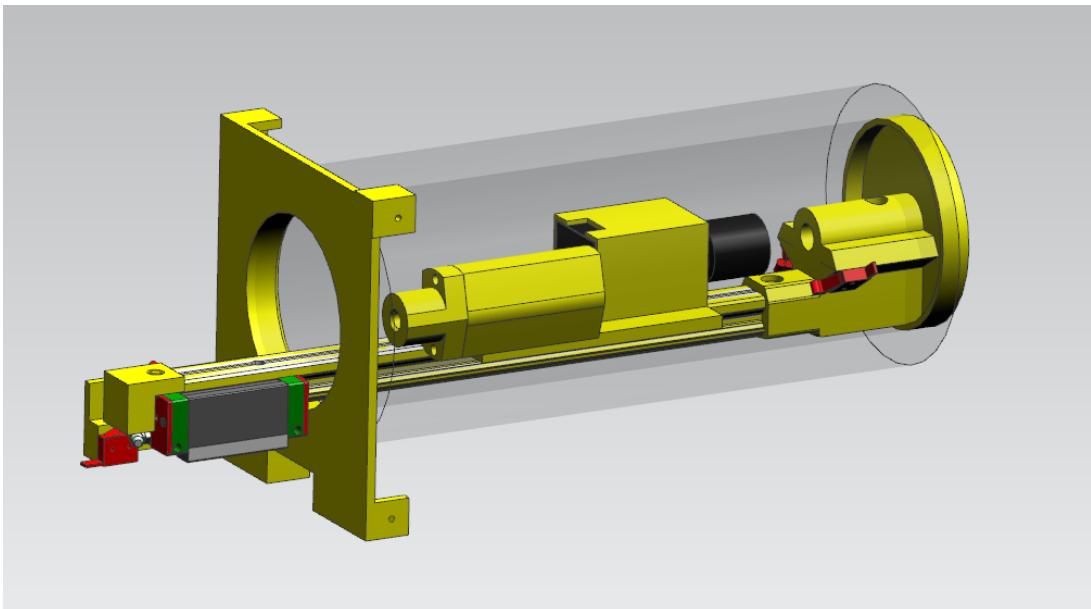


Abbildung 6: CAD-Assembly: Schienen-System

### 5.1.2 Spindel-System

Die Spindel ist mit einem Festlager-Block gelagert, welcher an der Spindel-Halterung aus einem Blechbiegeteil von Blexon befestigt ist. An der Halterung ist auch der Schrittmotor befestigt. Dieser ist über einen HTD3-Zahnriemen und zwei Zahnriemenscheiben mit der Spindel verbunden. Die Spindel-Mutter aus Kunststoff ist über ein 3D-gedrucktes Teil mit der Schiene verbunden und überträgt somit die erzeugte axiale Bewegung der Mutter auf die Schiene. Ein Loslager konnte auf Grund der Konstruktion nicht eingebaut werden. Dies sollte auf Grund der kurzen freien Länge von 311 mm und der ringläufigen Kunststoff-Mutter kein Problem sein.

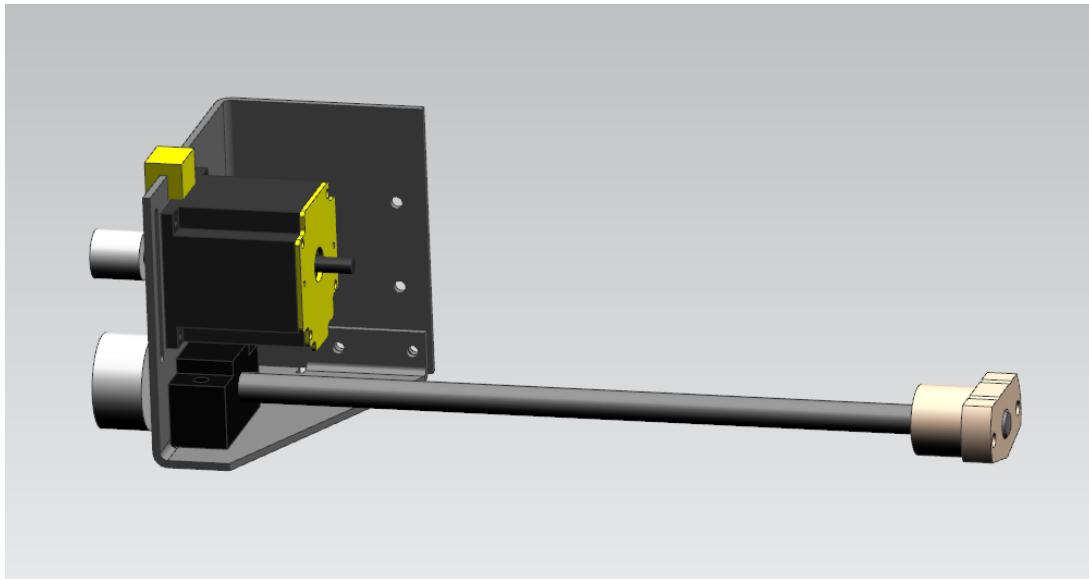


Abbildung 7: CAD-Assembly: Spindel-System

### 5.1.3 Düsen-Kopf

Die Achse des Düsen-Kopfs ist im unteren Deckel des Faltenbalges gelagert. Auf dem Düsen-Teller sind die beiden Vollstrahl-Düsen mittels der Düsenhalterung in Lager-Blöcken mit Kunststoffgleitlagern gelagert und werden mittels des Servo-Motors über Steuerstangen ausgerichtet. Der Abstand zwischen beiden Düsen kann variiert werden, indem die Lager-Blöcke an anderen Positionen verschraubt werden. Dazu muss die Länge der Steuerstangen angepasst werden. Die Rotation des Düsenkopfs erfolgt über den Schrittmotor, der auf der Schiene befestigt und über eine Klauen-Kupplung direkt mit der Welle verbunden ist. Die Welle ist axial mittels zwei Stellringen gesichert. Der obere Klemmring dient zugleich als mechanischer Endanschlag. Die Stellschraube des oberen Klemmrings stösst zuerst an den Endschaltern an und dann an der Schiene.

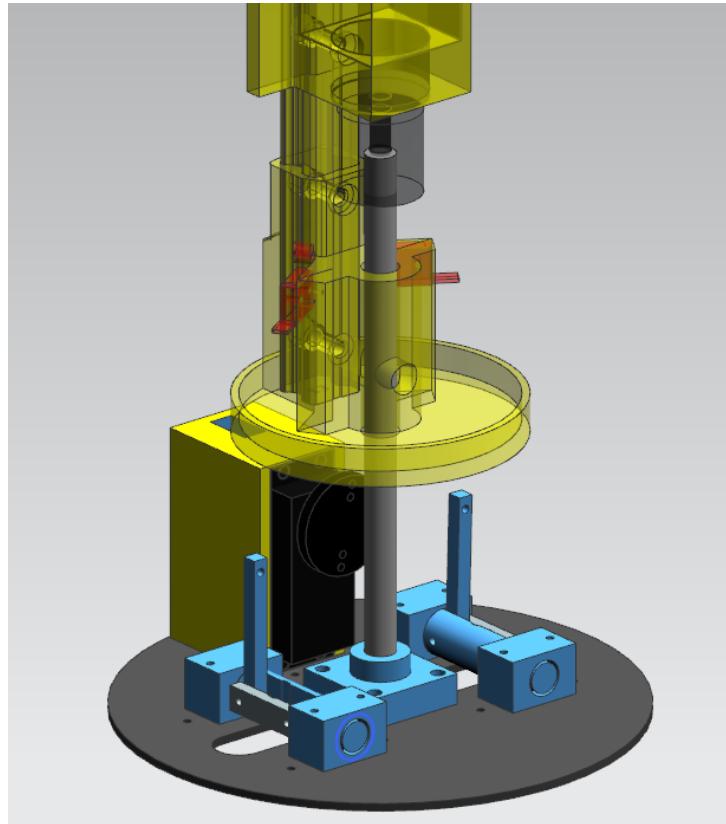


Abbildung 8: CAD-Assembly: Düsen-Kopf

#### 5.1.4 Tragende-Struktur

Ein Aluminium-Profil von ITEM (Profil 10 50x20 E) verbindet die Konstruktion mit dem Roboterarm. Die Bohrungen und Schrauben befestigen alle Komponenten am Aluminium-Profil. Das Profil ist mittels zwei Nutensteinen am Roboterarm befestigt. So kann die vertikale Lage des Hubs, also die minimale und maximale Position über Boden, mittels der Nutensteinen um 60 mm nach unten oder um 50 mm nach oben justiert werden. Über zwei weitere Nutensteinen ist die Aluminium-Haube angebracht. Am oberen Ende des Profils ist die Trägerplatte für die Elektronik aufgesteckt. Die Halterung für das Spindel-System, der Schlitten des Schienen-Systems und der obere Deckel am Faltenbalg sind über Bohrungen mit dem Aluminium-Profil verschraubt.

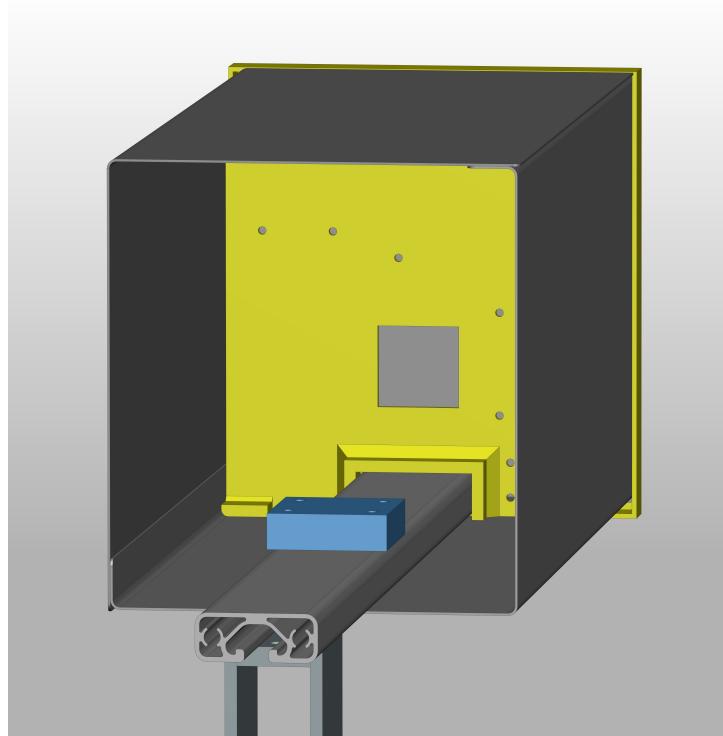


Abbildung 9: CAD-Assembly: tragende Struktur

### 5.1.5 Erläuterung zentraler Komponenten

Dieses Kapitel soll die Auswahl zentraler Komponenten nachvollziehbar machen und diese genauer beschreiben. Alle angegebenen Informationen sind in den Datenblätter im Anhang ersichtlich.

**Profilschienenführung:** Die zentrale Komponente ist eine Schiene (HGH25CA1R460Z0H) von HIWIN, welche die Verstellbarkeit der Höhe ermöglicht. Andere Komponenten richten sich nach diesem Bauteil, da sie direkt oder indirekt mit diesem Bauteil verbunden sind. Deswegen wurde diese Komponente auch früh bestellt. Ursprünglich sollten zwei Teleskopschienen (ST508) aus Chromstahl der Firma CHAMBRELAN verwendet werden. Als diese geliefert wurde, fiel jedoch ein merkliches Spiel auf von ca. 5 mm bei vollem Auszug, was als für zu viel erachtet worden ist. So wurde diese zurückgesendet und als alternative eine Profilschienenführung von HIWIN bestellt. Der Nachteil dieser Führung ist, dass die Hub-Länge von 275 mm 1:1 als freier Platz vorhanden sein muss, sodass die ganze Schiene den kompletten Hub nach oben fahren kann. Die Teleskopschiene hätte bei 250 mm Einbau-Länge einen Hub von 275 mm ermöglicht. Weiter ist die Schiene von HIWIN nicht aus Chromstahl verfügbar. Auf die verzinkte Ausführung wurde verzichtet, da diese extra in AAuftrag gegeben werden muss, was sich im Preis und der Lieferzeit niederschlägt. Mit Korrosion wird dennoch nicht gerechnet, da die Schiene von einem Schmierfett-Film geschützt ist und höchstens mit Kondenswasser in Berührung kommen könnte.

**Faltenbalg:** Der F-1216-NBR der Firma Steinbock GmbH bezogen schliesst das Gehäuse beweglich und schützt die Mechanik vor Schmutz. Seine Minimal-Länge beträgt 55mm und seine Maximal-Länge 330 mm, was 275 mm Hub ermöglicht. Ohne diese Trennung hätte die Mechanik und Elektronik so konstruiert werden müssen, dass diese direktem Schmutz stand hält, was die gesamte Konstruktion komplexer und teurerer macht.

**Spindel:** Es wurde eine zweigängige Trapez-Spindel aus Chromstahl mit 6 mm Steigung von IGUS (PTGSG-12X6P3-02-R-ES) verwendet. Diese wurde gemäss den Berechnungen (siehe im Anhang) ausgewählt. Dazu wurde ebenfalls von IGUS eine Kunststoffmutter (JFRM-2835TR12X6P3) verwendet, da diese bezüglich Schmutz und Korrosion weniger anfällig ist, als zum Bsp. eine Mutter aus Bronze.

**Kunststoff-Gleitlager:** Die Welle des Düsenkopfs, sowie die Düsenhalterung sind mit dem gleichen Kunststoff-Gleitlager (W360FM-1214-12) von IGUS gelagert. Dieses ist geeignet für eine feuchte Umgebung, ist Schmiermittel- und Wartungsfrei, sehr verschleissfest und für Temperaturen bis 180 °C geeignet.

**3D-Druck-Filament:** Von 3DWare wurde schwarzes HTPLA der Firma Proto Plant für alle Teile verwendet. Laut Beschreibung ist dieses Filament bis 120 °C hitzebeständig. Diese Eigenschaft ist wichtig, da zu erwarten ist, dass Teile im Innern der Konstruktion durch Sonneneinstrahlung oder Abwärme von elektronischen Komponenten stark erwärmt werden und aussen offen liegenden Teile in Kontakt mit dem 90 °C heissen Wasser kommen können. Da keine genaueren Daten zum Filament auffindbar waren, wurde noch ein einfacher Test durchgeführt (siehe HTPLA-Test im Anhang).

## 5.2 Elektronik



Abbildung 10: Elektronik auf Trägerplatte

Die Ansteuerung erfolgt zu Testzwecken über ein Webinterface, welches von einem ESP32 "ge-hosted" wird. Dieser sendet per I<sup>2</sup>C Parameter & Befehle an den Arduino Nano, der die restliche Elektronik steuert. Die Idee dahinter ist, dass die Steuerung der elektronischen Komponenten gleich bleibt, egal wie die Steuerbefehle schlussendlich empfangen werden (WiFi, Bluetooth, RS332 etc.). Die Steuerbefehle können von irgend einem I<sup>2</sup>C-fähigen Gerät oder auch über die UART-Schnittstelle an den Arduino übermittelt werden.

### 5.2.1 Elektro-Schema & Komponenten

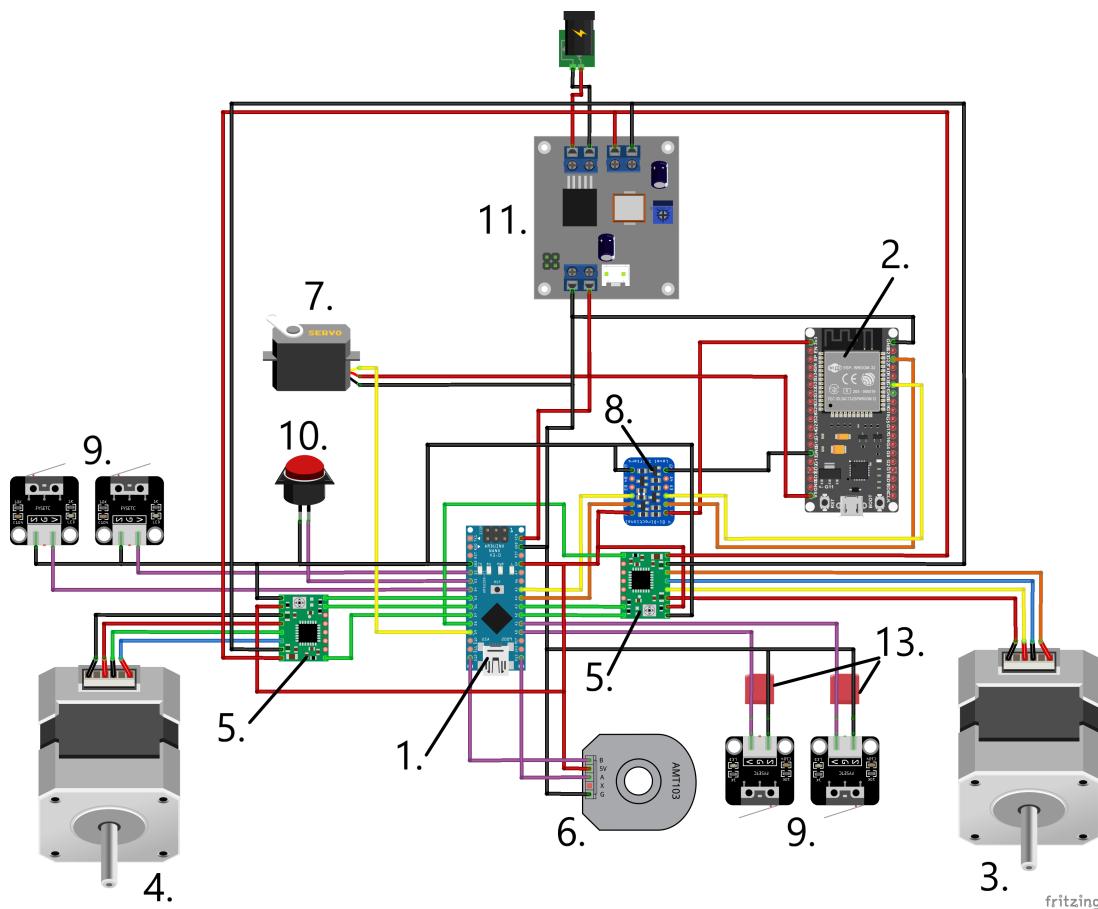


Abbildung 11: Elektroschema

Die Elektronik besteht aus folgenden Komponenten:

1. Arduino Nano: steuert die Elektronik der Behandlungsdüse.
2. ESP32-Development-Board: Gibt Befehle per I<sup>2</sup>C an den Arduino Nano weiter.
3. Schrittmotor (23KM-K049-99V): Treibt die Spindel über eine 2:1 Übersetzung an,
4. Schrittmotor (Nema 17): Rotiert den Düsen-Kopf über ein 1:5 Planeten-Getriebe.
5. Schrittmotor-Treiber (A4988): Zur einfachen Ansteuerung der Schrittmotoren.
6. Encoder (AMT103-V): Misst die rotation an der Welle des Schrittmotors des Spindeltriebs.
7. Servo-Motor (SW-0241MG): Richtet die Düsen über Steuerstangen aus.
8. Logik-Level-Wandler: Ermöglicht die I<sup>2</sup>C Kommunikation zwischen Arduino Nano (5V) und ESP32 (3.3V).

9. 4 Mikroschalter (DC1C-C3RB): Dienen als Endschalter zur Kalibrierung und verhindern von Kollisionen des Schienen-Systems, wie auch des Düsen-Kopfs.
10. Not-Aus-Schalter: Schnelles stoppen der Antriebe und entsperren der Achsen.
11. Step-Down-Converter (GS2678): Versorgt den Arduino Nano, den ESP32 und den Servo-Motor mit 7.4 Volt.
12. Kondensatoren (ElKo, 200 uF): Zum Betrieb der Schrittmotor-Treibern und des Servo-Motor.
13. Kondensatoren (MelKul, 22 nF): Stabilisieren die Pull-Up-Konfigurationen der Endschalter, deren Kabel in mehradrigem Spiralkabel zusammen mit den Schrittmotor-Phasen geführt sind. Bei ersten Versuchen ist aufgefallen, dass der Strom für den Schrittmotor im Spiralkabel einen Strom in den Adern der Endschalter induziert und so die Interrupt-Service-Routine ständig auslöst. Dies wurde mittels Kondensatoren gelöst, sodass die Spannung nicht gleich abfällt. Dies hätte auch durch einen kleineren Pull-Up-Widerstand gelöst werden können.

Strom bezieht die Elektronik vom Steuerkasten des WeedErasers. Gespiesen werden die Komponenten direkt ab 24V, 7.4V des Step-Down-Converters und über 5V Board-Spannung des Arduino-Nano.

Stromversorgung						
Komponente	Bezeichnung	min. [V]	max. [V]	max. [A]	Kommentar	Quelle
Schrittmotor-Treiber Spindel	A4988	24.00	35.00	1.60	passt Strom auf Motor selber an	Direkt ab Roboterarm
Schrittmotor-Treiber Düsenkopf	A4989	24.00	35.00	1.00	passt Strom auf Motor selber an	Direkt ab Roboterarm
Microcontroller	Arduino Nano	7.00	12.00	0.20	Stromaufnahme geschätzt	Step-Down-Converter
Servo SAVÖX	SW-0241MG	5.00	7.40	1.00	Stromaufnahme geschätzt	Step-Down-Converter
Encoder des Spindelantriebs	AMT103-V	3.30	5.50	0.05	Stromaufnahme geschätzt	Microcontroller
Endschalter	DC1C-C3RB	3.30	5.00	0.02	max. 5 V weil Logik Microcontroller	Microcontroller

Totaler Verbrauch				
Quelle	Kennwerte	[V]	Max. [A]	Max.[W]
Direkt ab Roboterarm	24V	24.00	2.60	62.40 (Werte ohne Step-Down-Modul)
Step-Down-Modul 25W	3.3-25 V, 5 A	7.40	1.20	8.88 (Werte ohne Arduino)
Arduino Nano	5 V, ca. 0.1 A	5.00	0.13	0.65

Abbildung 12: Stromversorgung aus Zusammenbau.xlsx im Anhang

**Alle Datenblätter zu den Komponenten sind im Anhang zu finden.**

## 5.2.2 Antriebe

**Antrieb der Spindel:** Es wurde ein Schrittmotor (23KM-K049-99V) von der Firma NMB Technologies Corporation verwendet. Die Welle liegt an beiden Enden offen, wodurch ein Encoder (AMT103-V) der Firma CUI Devices angebracht werden kann. Das Übersetzungsverhältnis des Riementriebs zwischen Schrittmotor und Spindel beträgt 2:1, damit ein möglichst schnelles Verfahren möglich ist. Ein solches Verhältnis ist ungewöhnlich, macht jedoch Sinn, wenn man bedenkt, dass der Schrittmotor bei hohen Drehzahlen deutlich weniger Drehmoment liefern kann

als bei tiefen Drehzahlen. So kann die nötige lineare Geschwindigkeit bei relativ tiefer Motordrehzahl realisiert werden, ohne dass Schritte verloren gehen auf Grund von zu geringem Drehmoment. Gemäss Berechnungen muss der Motor mit 458 u/min drehen, damit die Spindel in 3 Sekunden komplett nach unten bewegt werden kann (siehe Berechnungen Anhang).

Aus dem Schrittmotor führen 6 Kabel, da der Motor unipolar oder auch bipolar angesteuert werden kann. Angesteuert wird dieser Bipolar über einen A4988 Treiber. Dies schlicht auf Grund der Einfachheit, da dieser nur ein Richtungs-Signal und einen Impuls zur Schrittausführung als Input benötigt. Der Strom muss gemäss Datenblatt im bipolaren Betrieb von 2 A auf 70 % davon reduziert werden, was über ein Potentiometer am Treiber gemacht wurde. Mikrostepping ist deaktiviert, da dieses für die ein genaues Verfahren des Spindeltriebs nicht nötig ist. Die maximal mögliche Verfahr-Geschwindigkeit des Spindle-Triebs beträgt 140 % der im Code implementierten "Default-Geschwindigkeit". 100 % entsprechen einem Delay von 1000 Mikrosekunden vor und nachdem ein Schritt ausgelöst wurde.

**Antrieb zur Rotation des Düsen-Kopfs:** Direkt mit der Achse des Düsen-Kopfs ist ein NEMA17-Schrittmotor (42BYGH40-18-22A-C5.18) über eine Klauen-Kupplung verbunden. Dieser verfügt über ein Planeten-Getriebe mit 1:5 Übersetzung. Dieses erhöht das zu Verfügung stehende Drehmoment, mit welchem die Düsen bei der Behandlung konstant rotieren werden. Wobei das Verhältnis nicht so hoch ist, dass Stöße von aussen am Getriebe gleich einen Schaden verursachen.

Der Schrittmotor ist bipolar anzusteuern, wofür ebenfalls ein A4988 Treiber verwendet wurde. Dies auch wieder auf Grund der Einfachheit. So kann zweimal der gleiche Treiber verwendet werden, was auch den Code vereinfacht.

**Servo-Motor zur Positionierung der Düsen:** Die Positionierung der Düsen erfolgt über einen Servo-Motor (SW-0241MG) der Firma Savöx. Der Servo ist wasserdicht, verfügt über ein Metall-Getriebe und zwei Kugellager an der Antriebsachse. Mit 400 N/cm kann dieser enorm viel mehr Drehmoment liefern, als bei der Behandlung anfällt (durch Extensität der Düse an der Halterungs-Achse, einen ungenauen Wasserstrahl oder Rückstosskraft des Schlauches beim öffnen des Ventils). Deswegen wird erwartet, dass kleinere, aber längere andauernde Drehmomente bei der Behandlung keinen Schaden verursachen.

### 5.2.3 Code: Arduino Nano

Der vollständige Code für den Arduino Nano befindet sich im Anhang und ist im Code mittels Kommentaren dokumentiert.

**Interrupts:** Insgesamt können 6 Pins einen Interrupt auslösen. Zwei für die Endlage der Schiene oben und unten. Zwei für die Endlagen der Rotation des Kopfes. Einer für den B-Kanal des Encoders am Schrittmotor der Spindel und ein weiterer Interrupt wurde für einen Not-Aus-Schalter reserviert. Da die Arduino-Library nur 2 Interrupts auf den Pins 2 und 3 mittels der "attach-Interrupt()" Methode unterstützt[5]. Da der ATmega328P aber eigentlich fast alle IO-Pins auf Interrupt-Vektoren gelegt hat[6], wurde dies manuell gemacht. Die Interrupt-Register wurde so

maskiert, dass die Endschalter der Spindel mit dem Endschalter auf einem Vektor liegen (PCINT2\_vect), die Endschalter für die Rotation des Düsen-Kopfs auf einem (PCINT1\_vect) und der Kanal A des Encoders auf einem eigenen Interrupt-Vektor (PCINT0\_vect). Die Interrupt-Vektoren rufen die Funktion “ISR()“ auf, mit dem Vektor-Namen als Mitgabewert. In dieser Funktion muss dann noch ausgewertet werden, welcher Pin des gleichen Interrupt-Vektors den Interrupt ausgelöst hat.

**Entprellen der Endschalter:** Bei ersten Versuchen ist aufgefallen, dass beim Betätigen eines Endschalters die Interrupt-Service-Routine (ISR) bis zu 5 mal ausgelöst wird. Dies ist mit der enormen Zyklus-Geschwindigkeit des ATmega328P zu erklären. Beim Betätigen des Schalters wird der entsprechende IO-Pin mit “ground“ verbunden und die Spannung fällt von 5V (Pull-Up-Konfiguration) auf 0V. Dies geschieht jedoch nicht perfekt kontinuierlich, da zum Bsp. Spannungen induziert werden durch andere Ströme in der Umgebung oder auch weil die Board-Spannung schwankt. So schwankt die gemessene Spannung am Pin über mehrere Prozessor-Zyklen hinweg um die Grenz-Spannung und löst demnach mehrmals die ISR aus. Dies wird prellen genannt und konnte mit einem Zeit-Stempel gelöst werden. Nun wird beim Auslösen abgefragt, ob die gleiche ISR in den letzten 50 Mikrosekunden schon einmal ausgelöst hat und mehrfaches Auslösen wird ignoriert.

**Aufrufen der Zustände:** Durch die Funktion “void stateHandler(int state)“ können alle Zustände mittels nur eines Integers aufgerufen werden. So muss nur die Zahl des gewünschten Zustandes per I<sup>2</sup>C an den Arduino Nano übermittelt werden. Dazu kommen, falls nötig, Parameter, welche ebenfalls per I<sup>2</sup>C übermittelt werden. Dies soll die Befehls-Übergabe vereinfachen.

**Ansteuerung der Schrittmotor-Treiber:** Die Schrittmotoren-Treiber sind über je 3 IO-Pins mit dem Arduino Nano verbunden. Wird der Pin “enable“ durch den Arduino auf LOW gezogen, wird kein Strom mehr durch die Spulen gelassen und die Achse des Motors ist frei beweglich. Wird der “step“ Pin auf HIGH und wieder LOW gezogen, wird ein Schritt ausgeführt und der logische Zustand des Pins “direction“ gibt die gewünschte Drehrichtung an. Um die gewünschte Anzahl Schritte zu fahren, wird eine For-Schleife durchlaufen, welche den “step“ Pin HIGH abwechselnd LOW zieht mit einer variablen Verzögerung dazwischen, wodurch die Motordrehzahl gesteuert werden kann.

**Serielle-Kommunikation:** Über eine serielle Eingabe können gewünschte Zustände ausgelöst werden. Weiter quittiert der Arduino Nano alle ausgeführten Zustände über eine Nachricht per serieller Ausgabe.

**I<sup>2</sup>C-Kommunikation:** Der Arduino Nano ist als “slave“ im I<sup>2</sup>C Bus registriert. Er kann bereits Daten des ESP32 empfangen und gibt diese seriell aus. Es fehlt noch die Implementation, dass dieser die gewünschten Zustände gleich ausführt.

### 5.2.4 Code: ESP32

Der vollständige Code für den Arduino Nano befindet sich im Anhang und ist im Code mittels Kommentaren dokumentiert.

**Webserver:** Der Webserver auf dem ESP32 wird mittels der “ESPAsyncWebServer“ [7] Library realisiert. Das Web-Interface erlaubt es, die Achsen der Behandlungsdüse manuell zu steuern oder die Behandlung-Sequenz gemäss eingegebener Parameter ablaufen zu lassen.

**Interface:** Als Interface dient eine Webseite (index.html & style.css). Darüber können explizit Zustände aufgerufen und Parameter mitgegeben werden. Bei der “response“ des Webservers können Parameter in das HTML-File eingebunden werden, was aber noch nicht implementiert ist.

**I<sup>2</sup>C-Kommunikation:** Der ESP32 ist als “master“ im I<sup>2</sup>C Bus registriert. Gemäss der Eingabe über das Web-Interface sendet dieser Nachrichten mit dem gewünschten Zustand und Parametern gemäss folgender Konvention an den Arduino Nano:

Befehl	Form	Beispiel
Spezifischer Zustand	“z“ + “stateNumber“	“z1“
Gewünschte Bewegung Spindel	“s“ + “millimeters“	“s100“
Gewünschte Rotation des Düsen-Kopfs	“r“ + “degrees“	“r30“
Gewünschter Winkel der Düsen	“d“ + “degrees“	“d8“
Behandlungs-Zeit als Parameter	“t“ + “seconds“	“t12“
Behandlungs-Höhe als Parameter	“h“ + “millimeters“	“h120“
Behandlungs-Winkel als Parameter	“a“ + “degrees“	“a12“

Tabelle 2: I<sup>2</sup>C-Nachrichten

## 5.3 Aktueller Stand

Die Mechanik ist zusammengebaut und funktioniert. Alle elektronischen Komponenten sind korrekt verbunden und erfüllen ihre Funktion. Der Code zur Ansteuerung konnte leider nicht fertig implementiert werden. Dies schlicht auf Grund des knappen zeitlichen Rahmens. Alle Achsen können manuell über die Serielle-Schnittstelle des Arduino Nano angesteuert werden. Bis jetzt können die Achsen aber nur relativ verfahren werden. Die Funktionen, um die Achsen absolut zu auf einen Wert zu Verfahren, müssen noch fertig implementiert werden. Der Code sollte auf jeden Fall ergänzt werden und auf Fehler getestet.

## 5.4 Zu erledigende Arbeiten

Folgende Arbeiten müssen noch ausgeführt werden, bevor die Behandlungsdüse am WeedEraser integriert werden kann.

- 3D-Druckteile gegen Wasser schützen: Aufgrund der Porosität der 3D-gedruckten Struktur sollten die Teile, welche in direktem Kontakt mit Wasser stehen (Servo-Halterung am Düsen-Kopf, Hauben-Kappe, Deckel unten am Faltenbalg und Deckel oben am Faltenbalg) mit wasserfestem Lack überzogen werden.
- Verbesserungen: Da der Prototyp unter hohem Zeitdruck entstanden ist, haben sich sicherlich einige Fehler eingeschlichen. Es wird stark empfohlen, dass ein Ingenieur die Konstruktion analysiert und wenn nötig Verbesserungen anbringt.
- Verlier-Sicherung: Die Düsenhalterung klemmt die Düse samt Adapter nur zwischen der Halterungs-Achse und einer Klemmbacke ein. Da die Düse mit 90 °C heissem Wasser bei 130 bar beaufschlagt wird, sollte eine zusätzliche Sicherung angebracht werden, sodass sich die Düse nicht lösen kann und so unkontrolliert heisses Wasser herumsprüht.
- Test auf Dichtigkeit: Im Rahmen der Semesterarbeit konnte kein Test mit dem Durchlauferhitzer und Pumpe durchgeführt werden. Dies sollte unbedingt gemacht werden, um zu Prüfen, ob die Schraubverbindung zum Durchlauferhitzer, die Verbindung am T-Stück und der Adapter zu den Düsen dicht sind. Falls nicht, könnten diese mittels PTFE-Band (bereits vorhanden) abgedichtet werden.
- Schlauch-Halterung: Auf der Hauben-Kappe sollte noch eine temperaturfeste Halterung realisiert werden. Dazu muss das Servo-Kable mit der vorhandenen Spiral-Kabelführung an den Heiss-Wasserschlauch gebunden und zur Elektronik-Trägerplatte geführt werden.
- Löcher für Kabel: Da die genaue Implementation am WeedEraser noch unklar ist, sind noch noch keine Löcher für Kabel in die Aluminium-Haube gebohrt worden. Dies sollte gemacht werden, sobald deren optimale Lage bekannt ist.
- Spiralkabel anders anbringen: Beim Herunterfahren scheuert das Spiralkabel leicht am oberen Deckel des Faltenbalges. Die Befestigung oben sollte zwischen Schrittmotor und ITEM-Profil zu liegen kommen, sodass es keine Berührung gibt.
- Code ergänzen und optimieren:
  - Definierte Maximal-Werte für den Servo-Motor: Zu grosse Bewegungen würden die Düsen-Halterung zerstören.
  - Funktionen zur absoluten Positionierung: Nachdem sich das System kalibriert hat, sollen die Maximal-Werte der Achse als Referenz-Werte dienen und die Achsen demnach absolut positioniert werden können.

## 5.5 Inbetriebnahme

Folgendes muss gemacht werden, um die Behandlung-Düse am WeedEraser zu integrieren:

- Verbindung zur SPS: Die Anbindung an den WeedEraser kann über WiFi, Bluetooth oder eine serielle Schnittstelle erfolgen. Dazu müssen an den Arduino-Nano lediglich Steuerbefehle per I<sup>2</sup>C übermittelt werden und dieser übernimmt die Ansteuerung der Elektronik.
- Befestigung am Roboterarm: Am ITEM-Aluminiumprofil sind bereits zwei Nutenstein inkl. Schrauben vorhanden, sodass die Behandlungsdüse an die Adapterplatte geschraubt werden kann. Dank der Nutensteinen kann die gesamte Behandlung-Düse in der Höhe justiert werden, sodass der zur Verführung stehende Hub optimal zu liegen kommt.
- Wasserversorgung: Der Durchlauferhitzer muss auf dem WeedEraser installiert werden und mit dem Schlauch der Düse verbunden werden. Dieser ist mit 6 m genügend lang, sodass kein Zwischenstück benötigt wird und das Ende ist mit einem G3/8-19 Gewinde konfektioniert worden, sodass dieses (gemäß den Angaben von Herrn Hämmerlei von Agroscope) direkt koppelbar ist.
- Stromversorgung: Aus dem Steuerkasten muss die Behandlungsdüse mit 24V Spannung versorgt werden.
- Schmierung: Die Spindel sollte gefettet werden, so auch die Schiene. Am Schlitten der Profilschienenführung kann ein Schmiernippel angebracht werden und Fett darüber eingepresst werden. Die Kunststoffgleitlager zur Lagerung des Düsen-Kopfs und der Vollstrahl-Düsen bedürfen keiner Schmierung.

## 6 Fazit

Der Prototyp konnte zum grössten Teil fertig realisiert werden und ist mit genannten Ergänzungen bereit zur Implementation am WeedEraser. Die Arbeit gestaltete sich als äusserst zeitintensiv und zum Schluss hin als sehr hektisch. In der zweiten Hälfte des Projektes, musste der Entwicklungsprozess zum Teil parallel laufen, um die DEMO am 27.11.2020 und die Abgabe der Arbeit am 18.12.2020 termingerecht erreichen zu können. Dies liegt nicht zuletzt daran, dass der Umfang der Arbeit den zeitlichen Rahmen einer Semester-Arbeit übersteigt. Dennoch konnten die im Pflichtenheft definierten Ziele grösstenteils erfüllt werden.

### 6.1 Zufriedenheit

Mit dem Endresultat des Projekts bin ich persönlich zufrieden. Über das ganze Projekt hinweggesehen hätte ich zum Ende hin gerne methodischer gearbeitet, was aufgrund des knappen Zeitrahmen mir nicht gelang. Beim Definieren der Aufgabenstellung war mir klar, dass die Arbeit vergleichsweise aufwendig sein wird. Dies nahm ich aber für eine für mich sehr interessante Arbeit gerne in Kauf. So definierte ich auch selbst die Verstellbarkeit der Höhe als zusätzliches Ziel der Arbeit, da dies aus meiner Sicht sinnvoll erschien.

Der Lerneffekt war für mich persönlich enorm. Dies nicht zuletzt, weil ich die gesamte Konstruktion inklusive Fertigung machen konnte. So bemerkte ich eigene Fehler direkt und konnte diese korrigieren. Weiter konnte das methodische Vorgehen bei grösseren CAD-Assemblies geübt werden, dies war auch absolut essenziell. Im Bereich Elektronik konnte ich auch viel profitieren. Die Ansteuerung von Schrittmotoren war für mich neu und der Zugang zu diversen spezifischen Werkzeugen und Maschinen erlaubte es mir auch handwerklich von der Arbeit zu profitieren.

### 6.2 Kostenaufstellung

In Absprache mit Herrn Prof. Dr. Dejan Šećatović wurde im Verlauf der Arbeit das Budget von 1600 CHF auf 2000 CHF erhöht. Dies war in der Kostenschätzung absehbar und wird als angemessen erachtet, zumal die Höhenverstellbarkeit ursprünglich nicht gefordert war und einen grossen Teil der Ausgaben ausmacht.

Die Gesamtkosten dieser Arbeit belaufen sich auf 2005.99 CHF. Die letzte Abrechnung der HSR-Werkstatt ist noch ausstehend und wurde demnach geschätzt. Weiter wurden 100 CHF für sonstige Kosten (Material von ILT, unbekannte Lieferkosten etc.) aufgeführt. So kann gesagt werden, dass das Budget eingehalten werden konnte. Die Kostenschätzungen, Bestellliste und gesamte Kostenaufstellung sind im Anhang zu finden.

### 6.3 Aufwand

Die Arbeitszeit wurde nur bis zum 15.10.2020 exakt dokumentiert. Bis dahin waren es 29 Stunden. Ab dem Zeitpunkt bis zur Abgabe des Projekts wird angenommen, dass pro Woche durch-

schnittlich 35 Stunden für die praktische & schriftliche Arbeit aufgewendet wurden. Dies resultiert in total 347 Stunden für diese Arbeit (siehe Arbeitszeit\_SA.xlsx im Anhang).

## 6.4 Potential zur Optimierung

Speziell beim Zusammenbau fielen mögliche Verbesserungen auf. Verbesserungen oder Ideen zur Erweiterung, welche noch nicht umgesetzt wurden, sind hier aufgeführt:

- Sensor zur Distanzmessung zum Boden: Direkt auf der Haube könnte mittels eines Laser- oder Ultraschall-Distanzsensor die Distanz zum Boden ermittelt werden und so eine konstante Höhe zum Ackerboden bei der Behandlung garantiert werden. Eine adaptive Anpassung der Höhe über jeder individuellen Pflanze, an Hand der Bild-Daten ist auch denkbar.
- Gewichtsreduzierung: Das Gewicht von 9.8 Kg weicht vom Zielgewicht von 5 Kg merklich ab. Einen Teil des Überschusses wird mit der zusätzlichen Funktionalität der variablen Höhe begründet. Bei einer allfälligen Überarbeitung der Behandlungsdüse, könnte sicherlich einiges an Gewicht eingespart werden. Dies zum Beispiel durch eine noch kompaktere Konstruktion (Gewicht hängt kubisch von den Abmassen der Konstruktion ab). Der vorliegende Prototyp wurde konservativ dimensioniert, was zum Teil auch sinnvoll ist für die Anwendung in der Landwirtschaft. Nach längerem Einsatz sollte klar sein, welche Komponenten überdimensioniert sind und wo an Gewicht und Platz gespart werden kann. Eine kompaktere Konstruktion würde auch Sinn ergeben vor dem Hintergrund, dass der WeedEraser “schlanker” werden soll.
- Robusterer Düsenkopf: Diese wird stark verschmutzen beim Einsatz in der Landwirtschaft. Es wird erwartet, dass diese für die Tests im Rahmen eines Prototypen genügen. Für die breite Anwendung sollte die Mechanik besser geschützt sein und ein robusterer Antrieb, als ein einfacher Servo-Motor verwendet werden. Eine Bremse beispielsweise würde den Antrieb bei der Behandlung schonen. Bei länger einwirkenden Momenten auf den Servo-Motor muss dieser ständig Strom durch die Spulen lassen, um die Position zu halten. Im schlimmsten Fall könnte die Elektronik so überhitzen.
- Weglassen des Aluminium-Deckels: Da die Behandlungsdüse nach oben schon durch die Hauben-Kappe als 3D-gedrucktes Teil geschlossen ist, kann der Bug im Aluminiumbiegeteil zur Schliessung nach oben weggelassen werden. So kann das WiFi Signal zur Ansteuerung die Haube auch besser passieren.
- Anlauf-Rampe implementieren: Die Schrittmotoren verfahren momentan mit einer konstanten Geschwindigkeit. Durch eine Anlaufphase könnte man möglicherweise höhere Geschwindigkeiten erzielen, ohne Schritte zu verlieren. Momentan versagt der Motor-Treiber, wenn man direkt mit einer hohen Geschwindigkeit anfährt, obwohl diese Geschwindigkeit dynamisch möglich wäre.
- Ansteuerung über H-Brücken: Wie man aus der Bestelliste entnehmen kann, wurden 2 H-Brücken bestellt. Mittels diesen könnte eine angepasstere Ansteuerung realisiert werden, falls die verbauten A4988 Treiber nicht genügen.

---

**Wenn ich einen Monat mehr Zeit hätte, würde ich folgende Verbesserungen ausführen:**

- Ein PCB zeichnen und bei der Firma JLCPCB bestellen: Dies würde den Zusammenbau einiges erleichtern und die Elektronik robuster machen.
- Die Wasser-Versorgung auf Dichtigkeit prüfen: Dies konnte nicht gemacht werden, da keine Zeit bestand und außerdem der Durchlauferhitzer wie auch die Hochdruck-Pumpe noch nicht am ILT sind.
- Den Düsenkopf optimieren: Unter anderem würde eine Verlier-Sicherung für die beiden Düsen anbringen.
- Den geschriebenen Code erweitern: Die Ansteuerung der Hardware ist noch nicht vollends implementiert. Gerne würde ich den Code fertig schreiben und testen.
- Eine Schlauch-Halterung auf der Hauben-Kappe realisieren, welche den Temperaturen mit Sicherheit standhält.

## 6.5 Ausblick

Die Behandlungs-Düse wird am WeedEraser implementiert werden, nachdem genannte Arbeiten verrichtet wurden. Damit sollen Tests gemacht werden mit dem Ziel herauszufinden, wie die Behandlungsdüse gemäss der Behandlungsmethode von Agroscope am effizientesten autonom angewendet werden kann. Zu Optimieren wird es gelten die Dauer der Behandlung, sowie deren Parameter, sodass eine Behandlung möglichst schnell und effektiv die Ampfer-Pflanze bekämpft.

Bei den Tests ist zu erwarten, dass viel Erfahrungswerte zur Konstruktion gewonnen werden können. Anhand dieser wird die Behandlungsdüse sicherlich optimiert werden können. Weiter ist zu erwarten, dass zusätzliche Funktionen, wie zum Bsp. eine separate Düse zum Reinigen der Behandlungsdüse den Prototyp ergänzen.

## **Abbildungsverzeichnis**

1	Adapter-Platte am Roboterarm des WeedErasers . . . . .	5
2	Roboter-Arm des WeedEaser . . . . .	5
3	Prototyp von Agroscope . . . . .	6
4	Zusammengebauter Prototyp . . . . .	12
5	Ganzes CAD-Assembly . . . . .	12
6	CAD-Assembly: Schienen-System . . . . .	13
7	CAD-Assembly: Spindel-System . . . . .	14
8	CAD-Assembly: Düsen-Kopf . . . . .	15
9	CAD-Assembly: tragende Struktur . . . . .	16
10	Elektronik auf Trägerplatte . . . . .	18
11	Elektroschema . . . . .	19
12	Stromversorgung aus Zusammenbau.xlsx im Anhang . . . . .	20

## **Tabellenverzeichnis**

1	Zeitplan mittels Meilensteinen in GitLab . . . . .	3
2	I2C-Nachrichten . . . . .	23

## Literatur

- [1] R. Latsch and J. Sauter, “Optimisation of hot-water application technology for the control of broad-leaved dock (*Rumex obtusifolius*),” *Journal of Agricultural Engineering*, vol. 45, no. 4, p. 137, 2014. [Online]. Available: <https://www.agroengineering.org/index.php/jae/article/view/jae.2014.239>
- [2] L. Roy and S. Joachim, “Bio-Blackenbekämpfung – Heisswasser öffnet neue Perspektiven,” *ART-Berichte*, vol. Juni 2013, no. 764, pp. 1–12, 2013. [Online]. Available: <https://ira.agroscope.ch/de-CH/publication/32072>
- [3] e. Prof. Dr. Dejan, “Robotik in der Landwirtschaft.” [Online]. Available: <https://ilt.hsr.ch/index.php?id=19569>
- [4] C. Gilgames, “WeedEraser 3 -Treatment Arm I,” Semesterarbeit, HSR, Rapperswil, 20. Dezember 2019.
- [5] Arduino, “attachInterrupt(): Digitalpins, die Interrupts unterstützen.” [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/reference/de/>
- [6] “Datenblatt ATmega328P: 8-bit AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System Programmable Flash.” [Online]. Available: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATmega328p>
- [7] “ESPAsyncWebServer,” GitHub. [Online]. Available: <https://github.com/me-no-dev/ESPAsyncWebServer>

# Eigenständigkeitserklärung

Lukas Reitemeier

18. Dezember 2020

Ich, Lukas Reitemeier, erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit ohne Hilfe Dritter angefertigt habe. Ich habe nur die Hilfsmittel benutzt, die ich angegeben habe. Gedanken, die ich aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommen habe, sind kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

**Unterschrift:** Lukas Reitemeier



Rapperswil, 18.12.2020