

# Digitalisierung einer Gartenhochbahn

## STUDIENARBEIT

für die Prüfung zum

Bachelor of Science

der Studiengänge Informationstechnik und Mechatronik

an der

Dualen Hochschule Baden Württemberg

von

**Moritz Knapp und Jan Bantle**

Abgabedatum 02.05.2022

Bearbeitungszeitraum	6 Monate
Matrikelnummer Moritz Knapp	3591447
Matrikelnummer Jan Bantle	6644333
Kurse	TINF19B3/TMT19B2
Ausbildungsfirma	Sick AG Waldkirch
Gutachter der Studienakademie	Dominik Weickgenannt

## Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich meine Studienarbeit mit dem Thema: »Digitalisierung einer Gartenhochbahn« selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Ich versichere zudem, dass die eingereichte elektronische Fassung mit der gedruckten Fassung übereinstimmt.

\_\_\_\_\_  
Ort      Datum

\_\_\_\_\_  
Unterschrift

## Sperrvermerk

Der Inhalt dieser Arbeit darf weder als Ganzes noch in Auszügen Personen außerhalb des Prüfungsprozesses und des Evaluationsverfahrens zugänglich gemacht werden, sofern keine anderslautende Genehmigung vom Dualen Partner vorliegt.

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	i
Tabellenverzeichnis	ii
Codelistingverzeichnis	iii
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Vorwort . . . . .	1
1.2 Problemstellung und Zielsetzung . . . . .	1
<b>2 Grundlagen</b>	<b>2</b>
2.1 Distanzmessung mit Ultraschall . . . . .	2
2.2 Der Schrittmotor . . . . .	4
2.2.1 Der Reluktanz-Schrittmotor (VR) . . . . .	6
2.2.2 Der Permanentterrete Schrittmotor (PM) . . . . .	6
2.2.3 Der Hybrid-Schrittmotor (HY) . . . . .	7
2.3 MQTT . . . . .	9
<b>3 Anforderungsanalyse</b>	<b>10</b>
3.1 Ausgangslage . . . . .	10
3.2 Anforderungen . . . . .	11
3.2.1 Antrieb . . . . .	11
3.2.2 Bestellsystem . . . . .	11
3.2.3 Sensorik . . . . .	11
<b>4 Vorgehensweise</b>	<b>12</b>
4.1 Projektorganisation . . . . .	12
4.1.1 Projektstrukturplan . . . . .	13
4.1.2 Projektablaufplan . . . . .	14
4.1.3 Arbeitsmangement . . . . .	15
<b>5 Konzept</b>	<b>16</b>
5.1 Grundaufbau . . . . .	17
5.2 Aktorik . . . . .	17
5.2.1 Motor . . . . .	18

## INHALTSVERZEICHNIS

5.2.2	Getriebe . . . . .	18
5.3	Energieversorgung . . . . .	20
5.4	Sensorik . . . . .	21
5.4.1	Kollisionsvermeidung . . . . .	21
5.4.2	Positionserfassung . . . . .	22
5.5	Schnittstelle . . . . .	23
5.6	Software . . . . .	25
5.6.1	Web-Applikation . . . . .	25
5.6.2	Server . . . . .	26
5.6.3	Client . . . . .	26
5.6.4	Steuerung und Positionserkennung . . . . .	26
<b>6</b>	<b>Umsetzung</b>	<b>27</b>
6.1	Konstruktion . . . . .	27
6.1.1	Getriebe . . . . .	27
6.1.2	Fertigung . . . . .	30
<b>7</b>	<b>Diskussion und Ausblick</b>	<b>31</b>
7.1	Anfang vom Ende . . . . .	31
7.2	Lorem ipsum . . . . .	31
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>iv</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>iv</b>

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Prinzipieller Aufbau eines PM-Schrittmotors ([R. Kennel 2021], S.432) . .	4
2.2	Zeitlicher Verlauf der mechanischen Winkelgeschwindigkeit $\Omega_m$ und des Verdrehwinkels $\beta_m$ in Folge elektrischer Impulse in den Statorwicklungen (hier: VR-Schrittmotor); [R. Kennel 2021] S.433 . . . . .	5
2.3	Aufbau eines Hybrid-Schrittmotors (HY) ([R. Kennel 2021] S. 438) . . .	7
2.4	Halbschritt- und Vollschrittbetrieb eines HY-Schrittmotors mit zwei Statorwicklungen ([R. Kennel 2021] S. 454) . . . . .	8
2.5	MQTT-Datenübertragung über den Broker . . . . .	9
4.1	Projektstrukturplan mechatronischer Komponenten . . . . .	13
4.2	Projaktablaufplan mechatronischer Komponenten . . . . .	14
4.3	Bildausschnitt aus dem Kanban-Board . . . . .	15
5.1	Grundaufbau von Trieb- und Stützwagen . . . . .	17
5.2	Konzepte für die Kraftübertragung von Riemenrad auf das Laufrad . . .	19
5.3	Schema zur Leistungskonvertierung der elektrischen Komponenten . . . .	20
5.4	Schematische Anordnung der Ultraschallsensoren HC-SR04 auf dem Tablett zur Kollisionsvermeidung . . . . .	21
5.5	Schnittstellenübersicht der verwendeten Komponenten . . . . .	23
6.1	Detaillierte Ansicht der Getriebekonstruktion . . . . .	27
6.2	Konstruktion des Laufrades . . . . .	28
6.3	Konstruktion des treibenden Riemenrades (Ritzel) . . . . .	29
6.4	Konstruktion des getriebenen Riemenrades mit Laufrad . . . . .	29
6.5	Detailansicht der verschiebbaren Motoraufhängung . . . . .	29
6.6	Detailansicht der verschiebbaren Motoraufhängung . . . . .	30

# Tabellenverzeichnis

# CodeListingverzeichnis

# Kapitel 1

## Einleitung

### 1.1 Vorwort

### 1.2 Problemstellung und Zielsetzung

2018 entwickelten Moritz Knapp und sein Vater Johannes Knapp eine Gartenhochbahn, welche vom Küchenfenster bis zur Terrasse fährt. Sinn und Zweck dieser Bahn ist der Transport von Essen und Getränken wie Frühstück oder Cafe. Bedient wird sie mit drei Knöpfen, über welche drei verschiedene Stationen anfahrbar sind. Allerdings ist die Bahn durch die analoge Ansteuerung über Taster in ihrer Funktionsweise eingeschränkt. Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines digitalen Bestellprozesses, bei dem der Liefervorgang automatisch abläuft. Im Zuge dessen soll die Bahn mit einer neuen Antriebstechnik ausgestattet sowie einer intelligenten, digitalen Ansteuerung erweitert werden.



# Kapitel 2

## Grundlagen

### 2.1 Distanzmessung mit Ultraschall

Die Distanzmessung mit Ultraschall ist ein berührungsloses Verfahren. Die Messung beruht auf dem Prinzip der Laufzeitmessung. Der Frequenzbereich von Ultraschalls liegt zwischen 20Khz - 1Ghz (vgl. [*Akustische Phänomene - Ultraschall* 2012]) und somit außerhalb des hörbaren Bereichs (20Khz). Das Frequenzspektrum bei technischen Anwendungen ist kleiner.

Ein Ultraschallsensor besteht aus einer Sende- und Empfangseinheit. Die Schallwellen werden meist auf Basis des piezoelektrischen Effekts impulsartig ausgesandt und ausgewertet. Der Ultraschallimpuls pflanzt sich mit Schallgeschwindigkeit im Ausbreitungsmedium fort. Das zu messende Objekt reflektiert die Schallwelle. Die Empfangseinheit nimmt das entstandene Echo auf. Durch die verstrichene Zeit von der Aussendung bis zum Empfangen des Impulses kann die Entfernung des Objektes bestimmt werden.

Dabei gilt:

$$d = \frac{1}{2} \cdot t \cdot c_U \quad (2.1)$$

$$\text{mit } c_U \approx 340m/s \quad (2.2)$$

Die maximale Messdistanz hängt dabei von der maximal möglichen Intensität der ausgesandter Wellen ab. Die minimale Messdistanz wird durch die Frequenz der Messung bestimmt (vgl. [Oubbati 2012]).

Prinipbedingt unterliegen Ultraschallsensoren einigen Messfehlern. Dazu gehört, dass schallschluckende Oberflächen eine zu geringe Intensität reflektieren. Dasselbe gilt für Objekte mit rauer Oberfläche. Messfehler können außerdem durch sog. Scheinechos entstehen, wenn der Ultraschallimpuls von mehreren Objekten reflektiert wird. Aufgrund des Öffnungswinkels der Schalwelle ist der gleichzeitige Betrieb mehrerer Sensoren nur eingeschränkt möglich. (vgl. [Benz 2013])

## 2.2 Der Schrittmotor

Der Schrittmotor zählt zu den Synchronmaschinen. Mit den Motoren können Positionen sehr exakt ohne weitere Regler angefahren werden. Schrittmotoren finden sich beispielsweise in Druckern, CD-Laufwerken und computergesteuerte Werkzeugmaschinen. Schrittmotoren besitzen ein Haltemoment, das ebenfalls in vielen Anwendungen genutzt wird. (vgl. [Ziganow 2016], S. 2) In Abbildung 2.1 ist der Aufbau eines Schrittmotors (*hier: PM-Motors*) dargestellt.

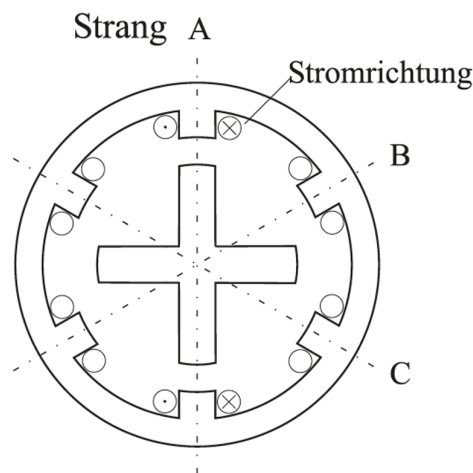


Abbildung 2.1: Prinzipieller Aufbau eines PM-Schrittmotors ([R. Kennel 2021], S.432)

Prinzipiell folgt bei einem Schrittmotor ein Rotor dem sprungförmigen Weiterschalten des Statormagnetfeldes. Dadurch ergibt sich ein schrittweises Drehen um den Schrittwinkel  $\alpha$ . Nach der Umschaltung der Statorwicklung erfolgt die Drehung des Rotors nach einer kurzen Verzögerung. Nach einem Einschwingvorgang verharrt der Rotor für einen kurzen Moment in dieser Position.

Abbildung 2.2 zeigt den zeitlichen Verlauf der mechanischen Winkelgeschwindigkeit  $\Omega_m$  und des Verdrehwinkels  $\beta_m$  nach dem sprunghaftigen Umschalten der Statorwicklung.

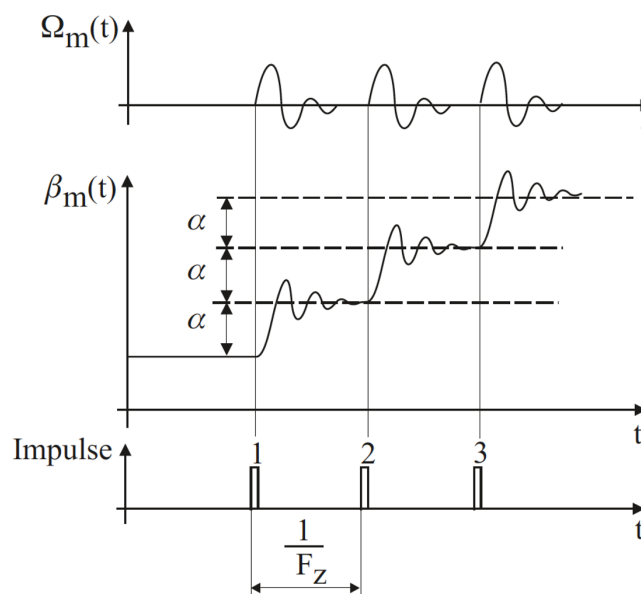


Abbildung 2.2: Zeitlicher Verlauf der mechanischen Winkelgeschwindigkeit  $\Omega_m$  und des Verdrehwinkels  $\beta_m$  in Folge elektrischer Impulse in den Statorwicklungen (hier: VR-Schrittmotor); [R. Kennel 2021] S.433

Da der Verdrehwinkel  $\beta_m$  ein ganzzahliges Vielfaches des Schrittwinkels  $\alpha$  ist, wird eine diskrete Positionierung ohne zusätzliche Sensorik möglich. Diese Art der Positionsbestimmung ist nur möglich, solange das maximale Drehmoment des Schrittmotors nicht überschritten wird. Ist das Lastmoment zu hoch, kommt es zu Schritterverlusten oder gar zum Stillstand. Für die Ansteuerung eines Schrittmotors werden durch eine Steuerlogik Impulse erzeugt. Damit wird ein Leistungselektronik-Stellglied gesteuert, das die Statorwicklungen bestromt (vgl. [R. Kennel 2021], S. 432).

Folgende Grundtypen von Schrittmotoren werden unterschieden:

- Reluktanz-Schrittmotor (VR)
- Permanenterregter Schrittmotor (PM)
- Hybrid-Schrittmotor (HY)

### 2.2.1 Der Reluktanz-Schrittmotor (VR)

Beim Reluktanz-Schrittmotor ist der Rotor magnetisch und dessen Zahnteilung ungleich der Polteilung des Stators. Nach einem Umschalten des Statormagnetfeldes bewegt sich der Rotor in die Position des geringsten magnetischen Widerstands (Reluktanz). Diese Stellung wird auch als Koinzidenzstellung bezeichnet. Die Stärke des magnetischen Feldes hängt von der Stromstärke ab. Diese ist veränderlich und verleiht dem Motortyp seine Bezeichnung VR-Motor ( $VR = \text{variable reluctance motor}$ ). Kennzeichnend für diesen Motortyp ist das Haltemoment im stromlosen Zustand. (vgl. [Ziganow 2016], S.2)

Für die Anzahl der Schritte je Umdrehung gilt:

$$z = Z_R \cdot m_S \quad (2.3)$$

$$\text{mit } Z_R = \text{Anzahl Rotorzähne und } m_S = \text{Strangzahl im Stator} \quad (2.4)$$

Bei einem mit vier Rotorzähnen und 3 Strängen würde sich somit bei einem Umschaltvorgang ein Verdrehwinkel  $\beta$  von  $30^\circ$  einstellen. Um das Drehmoment zu erhöhen, werden bei einem alle Spulen gleichzeitig bestromt. Die Änderung des Magnetfeldes wird durch Umpolungen erreicht.

### 2.2.2 Der Permanenterreter Schrittmotor (PM)

Beim PM-Motor ist der Rotor permanentmagnetisch. Dieser stellt sich ebenfalls in Abhängigkeit vom Statormagnetfeld in polaritätsrichtige Koinzidenzstellung. Durch den Permanentmagneten bildet der Motor ein Haltemoment im stromlosen Zustand aus. Die Anzahl gleichzeitig erregter Wicklungen wird mit  $n$  bezeichnet. Bei Verdopplung von  $n$  halbiert sich der Schrittwinkel  $\alpha$ . Bleibt  $n$  konstant, dreht sich der Rotor im *Vollschrittbetrieb*. Bei einem PM-Motor kann zwischen Vollschritt- und Halbschrittbetrieb gewechselt werden. Dabei ist  $n$  im Volschrittbetrieb und wechselt im Vollschrittbetrieb (vgl. [R. Kennel 2021], S. 436f).

### 2.2.3 Der Hybrid-Schrittmotor (HY)

Der Hybrid-Schrittmotor (HY) ist eine Kombination aus beiden Bauformen. Der Motor besitzt einen permanentmagnetischen Rotor sowie variabel ansteuerbare Statorwicklungen. Dadurch vereint die Bauform die Vorteile des hohen Drehmoments des PM-Motors sowie die große Auflösung des VR-Motors. Im Vergleich zum PM-Motor sind beim Hybrid-Schrittmotor Nord- und Südpol axial versetzt und um einen halben Zahn verdreht. Der Aufbau eines HY-Motors ist in Abbildung 2.3 dargestellt.

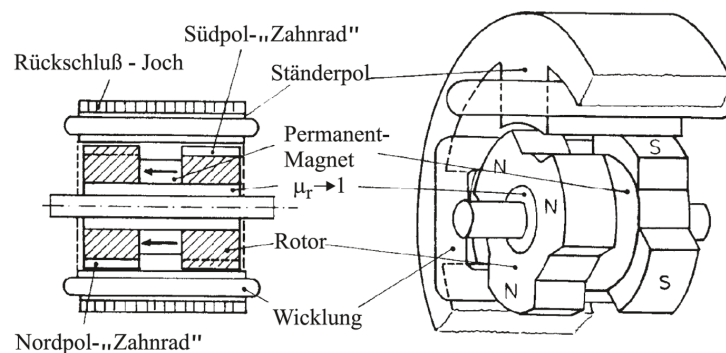


Abbildung 2.3: Aufbau eines Hybrid-Schrittmotors (HY) ([R. Kennel 2021] S. 438)

Wie beim PM-Motor ermöglicht der HY-Motor ebenfalls den Betrieb im Vollschritt und Halbschritt. Im Vollschrittbetrieb ist Anzahl  $n$  konstant. Im Halbschrittbetrieb wechselt  $n$ . In Abbildung 2.4 sind die Umschaltvorgänge der beiden Statorwicklungen dargestellt.

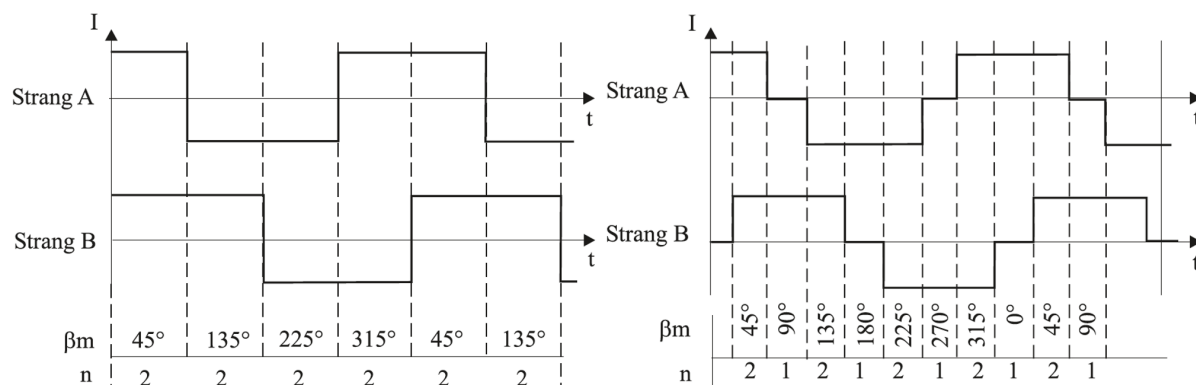


Abbildung 2.4: Halbschritt- und Vollschrittbetrieb eines HY-Schrittmotors mit zwei Statorwicklungen ([R. Kennel 2021] S. 454)

Wird  $n$  größer, steigt dadurch Drehmoment  $M$  des Motors. Dadurch kann sich im Halbschrittbetrieb ein un rundes Laufverhalten ausprägen. Eine weitere Betriebsart ist der Mikroschrittbetrieb. Dabei wird die Stromstärke in den Statorwicklungen durch den Treiber sinusförmig gesteuert. (vgl. [R. Kennel 2021], S.438, 454; [Ziganow 2016], S.3)

## 2.3 MQTT

MQTT ist ein Protokoll, welches zur digitalen Datenübertragung in ethernet-basierten Systemen dient. Es benötigt nur wenig Bandbreite und Ressourcen und verwendet eine Publish/Subscribe - Architektur. Das bedeutet, dass Nachrichten sogenannter Topics von Publishern bereitgestellt und von Subscribern empfangen werden. Der Datenverkehr wird über einen zentralen Broker verwaltet. Um die Publish Subscribe Architektur zu verstehen ist es hilfreich die Analogie zum Fernsehen zu bilden. Dabei sendet ein TV-Sender sein Programm an einen bestimmten Kanal. Auf diesen Kanal können nun beliebig viele Fernseher (Subscriber) zugreifen. Auch wenn keine aktive Verbindung zwischen Sender und Empfänger aufgebaut wird, erhalten beliebig viele Empfänger die benötigten Daten. In Abbildung 2.5 ist zu erkennen, wie die Daten nicht zwischen Publisher und Subscriber direkt, sondern über den zentralen Broker versendet werden. (Vgl. [Cope 2021])

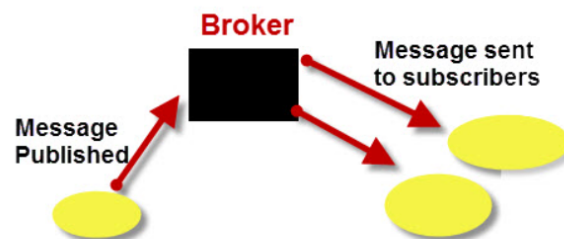


Abbildung 2.5: MQTT-Datenübertragung über den Broker



# Kapitel 3

## Anforderungsanalyse

Der bisherige Aufbau der Gartenhochbahn soll verbessert und in einigen Bereichen erneuert werden. In diesem Kapitel wird mit Abschnitt 3.1 zunächst das bisherige System beschrieben. Mit Abschnitt 3.2 folgen die resultierenden Anforderungen unterteilt in die jeweiligen Bereiche.

### 3.1 Ausgangslage

Die Gartenhochbahn stellt ein Transportsystem dar. Hauptbestandteil des Systems ist eine Gondel, die sich über Laufräder auf einer Schiene fortbewegt.

Der Antrieb der Gondel erfolgt durch einem Gleichstrommotor, der über Pulsweitenmodulation (PWM) angesteuert wird. Für die Bereitstellung der Energie ist eine Batterie in der Gondel installiert. Diese wird in der Parkstellung am Ende der Schiene aufgeladen. Als Abschaltung des Motors an den hinteren Endlagen sind Tastsensoren verbaut. Ein Reed-Kontakt in der Gondel erkennt außerdem Magnete entlang der Strecke. Dadurch kann bereits vor Erreichen der Endlage die Geschwindigkeit reduziert werden. Für die Signalverarbeitung und Steuerung des Motors ist ein Arduino Nano im Einsatz.

Die Kraftübertragung des Motors auf das treibende Laufrad erfolgt bislang reibschlüssig. Das Getriebe weist dadurch einen hohen Verschleiß auf und ist nicht ausreichend zuverlässig.

Durch die Sensorik ist eine Abschaltung bei Erreichen der Endlage möglich. Somit können einzelne Fahrzyklen der Hochbahn automatisiert durchgeführt werden.

## 3.2 Anforderungen

### 3.2.1 Antrieb

Insgesamt soll der Antrieb eine hohe Verfügbarkeit aufweisen und verschleißarm sein. Die Kraftübertragung soll mit einer passenden Übersetzung erfolgen. Durch den elektrischen Motor soll eine Regelung der Geschwindigkeit und Drehrichtung möglich sein. Wünschenswert wäre außerdem eine Rückmeldung der Umdrehungen. Das Prinzip der Energieversorgung über eine Batterie soll beibehalten bleiben.

### 3.2.2 Bestellsystem

Das Bestellsystem soll es Nutzern ermöglichen, die Hochbahn von der Terrasse aus mit einem Bestellauftrag zur Küche zu schicken. Dort soll ein Tablet die aktuelle Bestellung anzeigen. Ist alles für den Transport vorbereitet, kann ein Nutzer aus der Küche den Auftrag bestätigen und die Bahn fährt zur gewünschten Position zurück. Ein Webserver soll diese Funktionen über ein benutzerfreundliches Graphical User Interface (GUI) bereitstellen, welches über beliebige Engeräte ( z.B. Samrtphone oder Tablet) erreichbar ist. Zudem soll die Möglichkeit bestehen, den Bestand zu erfassen. Das System soll selbstorganisierend sein, sodass sich auch das Kontingent durch Bestellungen aktualisiert. Dadurch soll verhindert werden, dass mehr bestellt werden kann als vorhanden ist. Ebenfalls sollen Nutzer, die etwas bestellt haben, den aktuellen Lieferzustand einsehen können. D. h. es soll angezeigt werden, wo sich die Bahn befindet und welche Bestellung gerade bearbeitet wird.

### 3.2.3 Sensorik

Die erforderliche Sensorik kann in zwei Bereiche gegliedert werden:

- a) Positionserkennung
- b) Kollisionsvermeidung

Die Positionserkennung soll entlang der Strecke erfolgen. Die Information soll der Steuerung zur Verfügung gestellt werden. Dabei sollend die Positionswerte so exakt wie nötig ermittelt werden.

Die Kollisionsvermeidung soll Hindernisse im Fahrweg der Gondel erkennen und dadurch einen rechtzeitigen Stillstand gewährleisten. Dafür muss die Sensorik den kritischen Bereich ausreichend prüfen.

# Kapitel 4

## Vorgehensweise

In diesem Kapitel wird die Vorgehensweise zur Bewerksstellung des Projektzieles beschrieben. Um das Ziel zu erreichen, stand zunächst die die Projektorganisation im Vordergrund. Diese wird im Abschnitt 4.1 erläutert.

### 4.1 Projektorganisation

Die Projektorganisation erfolgte anhand der folgenden Stufen:

1. Projektstrukturplan
2. Projektablaufplan
3. Kanban

In einem ersten Schritt wurden mithilfe eines Projektstrukturplans die Teilbereiche definiert. Dadurch stellten sich die Wirkzusammenhänge der Bereiche heraus. Nachfolgend wurden die zugehörigen Aufgaben erstellt. Durch die Übersicht in einer Roadmap wurden die Aufgaben in einen zeitlichen Zusammenhang gebracht. In einem letzten Schritt folgte das Definieren der Aufgaben in einem Kanban-Board.

### 4.1.1 Projektstrukturplan

In Abbildung 4.1 ist der Projektstrukturplan mit den mechatronischen Komponenten dargestellt.

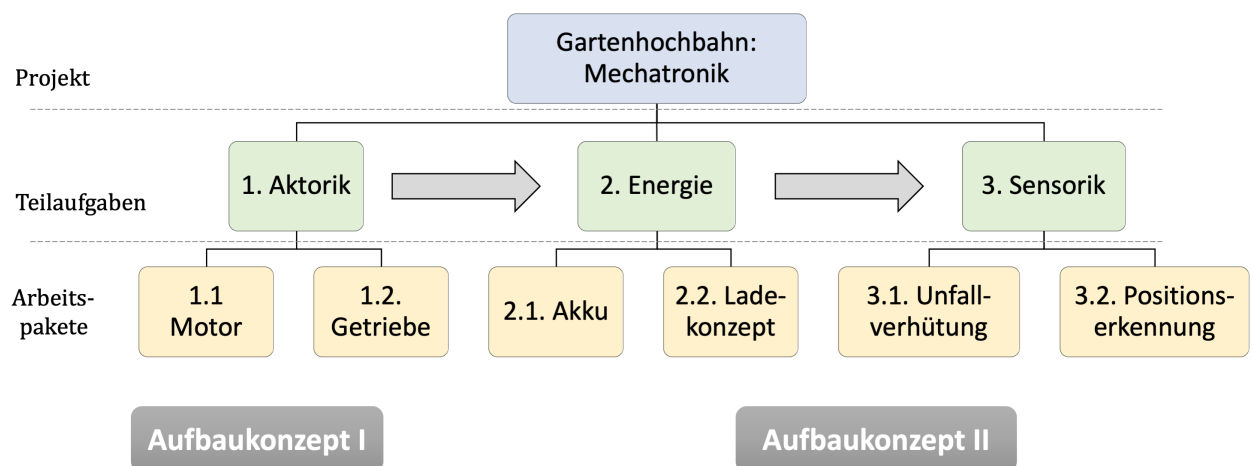


Abbildung 4.1: Projektstrukturplan mechatronischer Komponenten

Das Projekt ist untergliedert in drei Teilaufgaben. Diese werden in der nächsten Ebene in Arbeitspakete untergliedert. Da die Bereiche aufeinander aufbauend sind, können Zusammenhänge analysiert werden. In dem Schaubild sind die Bereiche entsprechend der zeitlichen Abfolge aufgetragen. Dementsprechend soll in einem ersten Schritt die Aktorik konzeptioniert werden. Dazu zählt die elektrische und mechanische Komponente des Antriebs. Dieser erste Entwurf des Antriebs wird im Aufbaukonzept I festgehalten. Mit den elektrischen Leistungsdaten der Aktorik wird im nächsten Schritt das Energiekonzept ausgearbeitet. Auf diesen Bereich baut final die Konzeptionierungsphase der Sensorik auf. Durch weitere Anforderungen aus den Bereichen Energie und Sensorik folgt das Aufbaukonzept II.

### 4.1.2 Projektablaufplan

Aus dem Projektstrukturplan geht der Projektablaufplan hervor. Darin werden die zuvor definierten Arbeitspakete aus den Teilaufgaben terminiert.

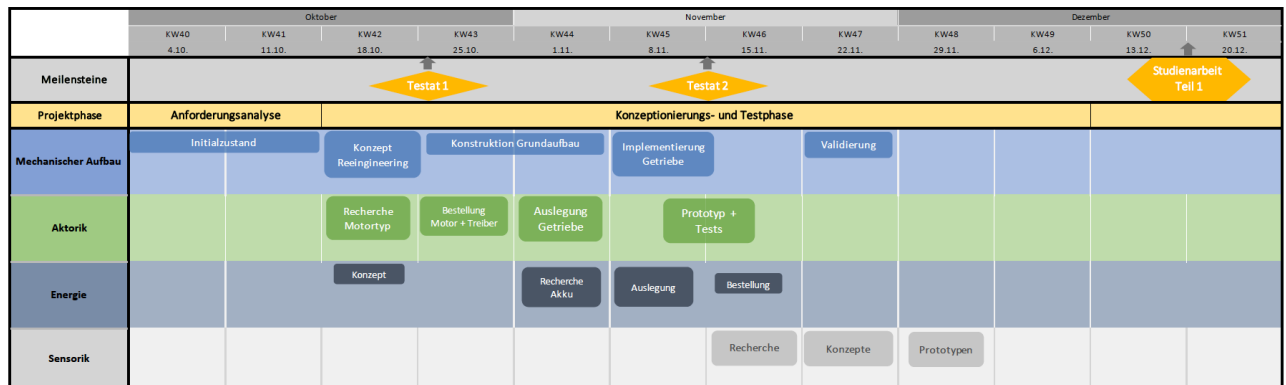


Abbildung 4.2: Projektablaufplan mechatronischer Komponenten

Der Projektablaufplan wird noch ausgearbeitet!

### 4.1.3 Arbeitsmangement

Für das Arbeitsmanagement wird die Kanban-Methode verwendet. Dabei werden die Teilaufgaben dem Bearbeitungsstatus zugeordnet. Im Rahmen des Projektes wurden die Stati *Backlog*, *Todo*, *In Progress*, *Testing* und *Done* unterschieden. Die Aufgaben wurden mit den Bearbeitungszeiträume aus dem Projektablaufplan definiert und dem entsprechenden Bearbeiter zugewiesen. Für die Kanban-Methode kam das Tool "trello" zum Einsatz. Ein Bildausschnitt aus dem Kanban-Board ist in Abbildung 4.3 dargestellt.

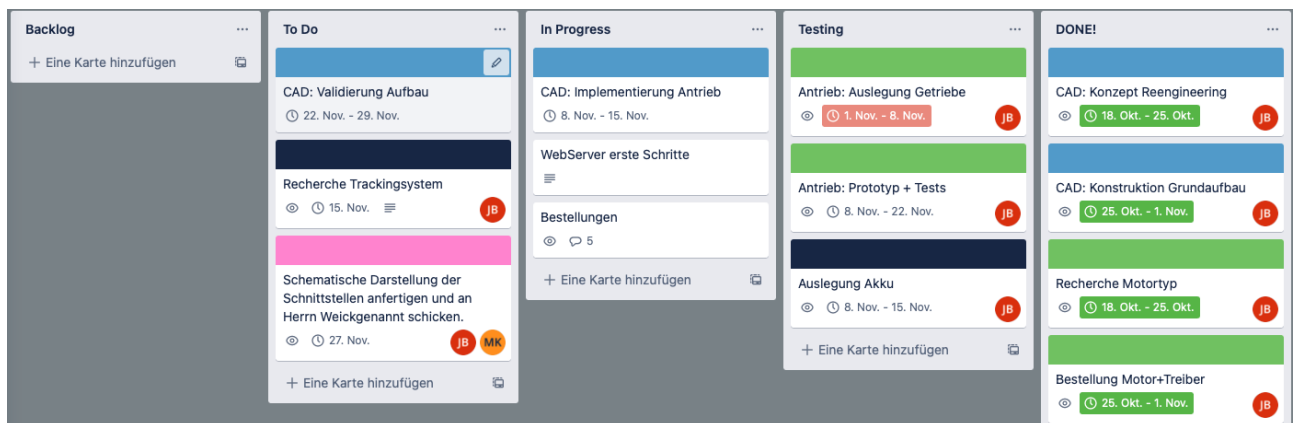


Abbildung 4.3: Bildausschnitt aus dem Kanban-Board

# Kapitel 5

## Konzept

Aufgrund der gestellten Anforderungen werden in diesem Kapitel die Konzepte zum Erreichen der Teilaufgaben erläutert.

## 5.1 Grundaufbau

Platzhalter:Begründung, weshalb Neuaufbau nötig

In Abbildung 5.1 ist das Konzept des Grundaufbaus der Gondel dargestellt. Dieser soll aus den beiden Baugruppen *Triebwagen* und *Stützwagen* bestehen. Im *Triebwagen* sind Motor und Getriebe verbaut. An die beiden Wagen anschließend werden nach unten Verbindungselemente für die Befestigung des Tablett sowie für die Elektronik angebracht. Die detaillierte Konzeptionierung der dargestellten Komponenten erfolgt in den nachfolgenden Abschnitten.

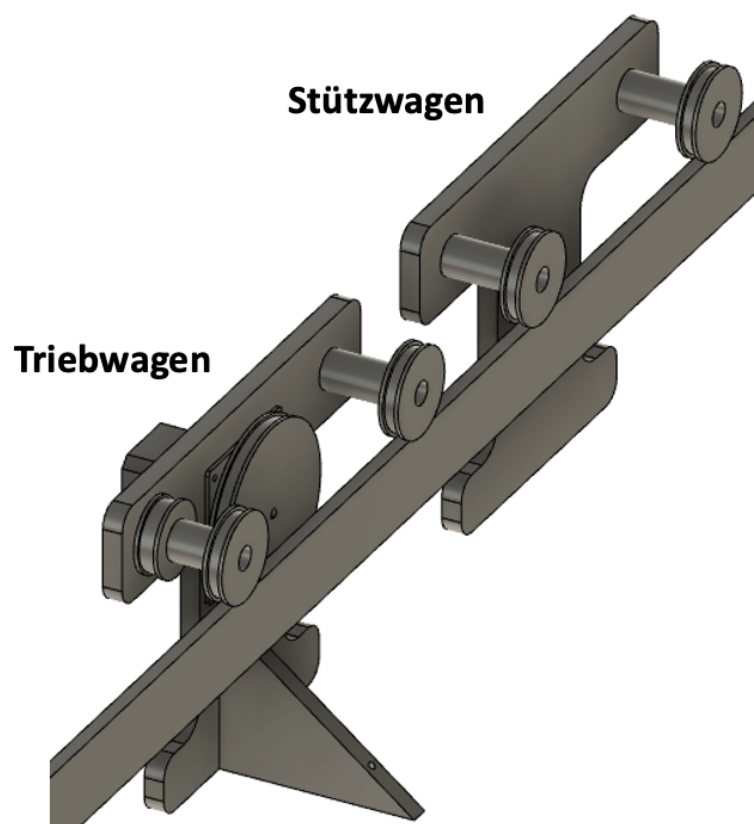


Abbildung 5.1: Grundaufbau von Trieb- und Stützwagen

## 5.2 Aktorik

In diesem Abschnitt wird die Konzeptionierung des Antriebs der Gartenhochbahn beschrieben. In Unterabschnitt 5.2.1 wird zunächst die Auswahl und Auslegung des Motors beschrieben. Das Drehmoment des Motors soll anschließend auf ein Laufrad übertragen werden. Die Beschreibung des dafür zuständigen Getriebes folgt mit Unterabschnitt 5.2.2



### 5.2.1 Motor

Für den Antrieb der Gartenhochbahn wurde zwischen einem DC-Motor und einem Schrittmotor ausgewählt. Bei einem DC-Motor wird das Signal zur Steuerung der Drehzahl vom Arduino mit PWM an einen Motortreiber übermittelt. Dieser ist für die Leistungsübersetzung des Signals und die Implementierung der Richtungsumkehr zuständig.

Bei der Steuerung eines Schrittmotors werden von einem Treiber positive Taktflanken ausgewertet. Bei jeder Taktflanke erfolgt eine Umpolung der Spulen in der Art, dass sich ein Inkrementalschritt ergibt. Umgekehrt können aufgrund der erzeugten Taktflanken Rückschlüsse auf die Umdrehungen des Motors und somit auf die Wegstrecke gemacht werden.

Diese Information kann für die Positionsbestimmung der Gartenhochbahn genutzt werden. Aus diesem Grund soll für den Antrieb ein Schrittmotor verwendet werden. Dafür kommt der Motor Nema 17-04 von Joy-IT zum Einsatz. Als Schrittmotortreiber wird der DRV8825 von Texas Instruments verwendet.

### 5.2.2 Getriebe

Das Getriebe sorgt für die Kraftübertragung des Motordrehmoments auf die Schiene. Zusätzlich ist die Geschwindigkeit der Hochbahn vom Übersetzungsverhältnis des Getriebes abhängig. Nachfolgend wird die Auswahl der Getriebeart und anschließend die Auslegung beschrieben.

#### Getriebeart

Für die Auswahl der Getriebe steht ein Zahnradgetriebe und ein Zugmittelgetriebe im Raum. Das Zahnradgetriebe besitzt eine formschlüssige Kraftübertragung der beiden Räder. Damit diese mit dem geeigneten Kopfspiel zustande kommt, müssen die beiden Wellen in einem exakten Abstand zueinander stehen. Das bedarf einem hohen Grad an Präzision bei der Fertigung. Bei einem Zugmittelgetriebe kann eine Spannrolle dafür sorgen, dass das Zugmittel ausreichend gespannt ist. Dadurch muss der Abstand der beiden Räder zueinander ein niedrigeres Maß an Genauigkeit besitzen. Für das Projekt wird ein Zugmittelgetriebe verwendet. Um dabei Schlupf zu vermeiden, wird ein T-Profil bei Riemen und Rad verwendet.

#### Konstruktion und Fertigung

Der Antrieb besteht aus den folgenden Komponenten: getriebenes- und treibendes Riemen-

rad, Laufrad und Zahnriemen. Zunächst wird das Konzept für das getriebene Riemenrad und das Laufrad beschrieben. Anschließend erfolgt die Beschreibung des gesamten Antriebs anhand der Konstruktion.

Das Laufrad kommt für den Abtrieb auf der Schiene zum Einsatz. Eine Herausforderung stellt dabei die Kraftübertragung vom Laufrad auf das getriebene Riemenrade dar. Dazu wurden zwei Konzept entwickelt. Die Gegenüberstellung ist in Abbildung 5.2 dargestellt.

Konzept	a) Radpaarung mit Normteilen	b) Abtriebsselement additiv gefertigt
Komponenten	Laufrad + Riemenrad (jew. Normteil)	Kombinierte Baugruppe (Laufrad + Riemenrad)
Ausführung der Welle	Drehend	Stehend
Lagerung	Gelagerte Welle	Lager in Antriebselement
Anpassung an Schienenprofil	-	+
Konstruktionsaufwand	+	-
Gewicht	-	+
Kosten	-	+

Abbildung 5.2: Konzepte für die Kraftübertragung von Riemenrad auf das Laufrad

Bei Konzept a) wird für Laufrad und Riemenrad jeweils ein Normteil verwendet. Die Kraftübertragung zwischen den beiden Rädern erfolgt über eine Welle. Diese ist gelagert während die beiden Räder stehend auf der Welle montiert sind. Bei Konzept b) handelt es sich um eine Baugruppe, bestehend aus Laufrad und Riemenrad. Das kombinierte Bauteil wird additiv gefertigt. Es ist stehend auf der Welle gelagert. Die Welle selbst ist stehend ausgeführt. Durch die additive Fertigung muss eine Konstruktion des Bauteils erfolgen. Dadurch ergibt sich in diesem Punkt ein höherer Aufwand als bei der Verwendung von Normteilen. Die Konstruktion bietet jedoch den Vorteil, dass das Laufrad an das Profil der Schiene angepasst werden kann. Die Normteile der beiden Räder sind meist für hohe Krafteinwirkungen in industriellem Einsatz ausgelegt. Dadurch ergibt sich bei Verwendung der Räder ein hohes Gewicht. Zusätzlich sind die Bauteile mit hohen Kosten verbunden. Die additive Fertigung des Bauteils sollte für die Krafteinwirkung ausreichend sein. Aufgrund der genannten Vorteile kommt für das Projekt Konzept b) zum Einsatz.

### 5.3 Energieversorgung

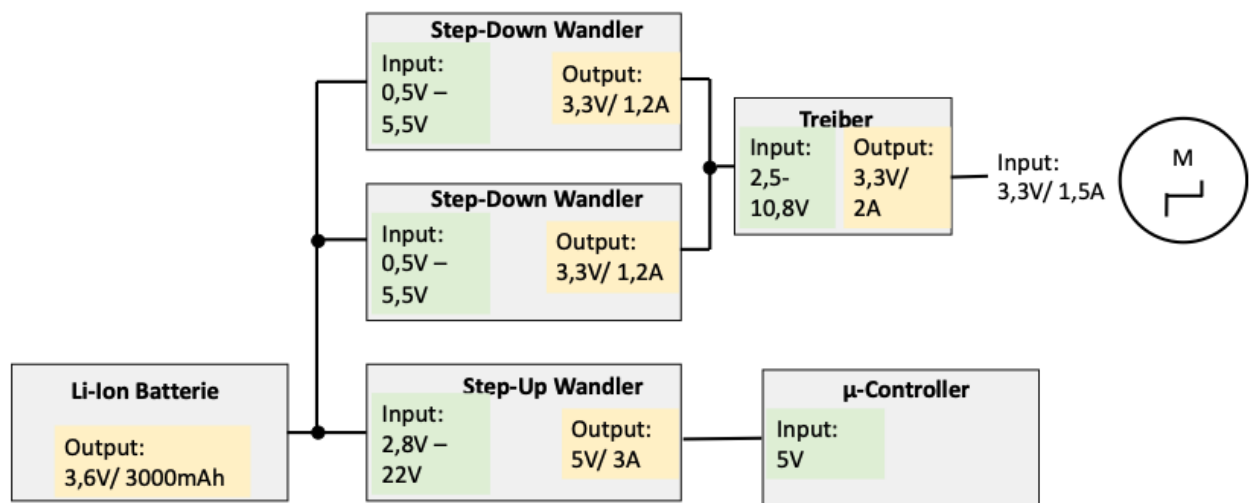


Abbildung 5.3: Schema zur Leistungskonvertierung der elektrischen Komponenten

To be continued...

## 5.4 Sensorik

### 5.4.1 Kollisionsvermeidung

Für die Kollisionsvermeidung soll mithilfe von Ultraschallsensoren kontinuierlich die Distanz  $d$  zum nächsten Objekt gemessen werden. Als Sensor kommt der HC-SR04 auf dem Tablett angebracht. Der Messbereich beträgt  $0,02m - 5m$  ([Plate 2017]). Die Kollisionsvermeidung soll anhand von einem Warn- und einem Schutzfeld geschehen. Das Warnfeld wird ausgelöst, wenn bei mindestens einem der beiden Sensoren  $d < 1,5m$  erfüllt ist. Eine Schutzfeldverletzung erfolgt bei  $d < 0,7m$ . Die Breite  $b$  des kleinsten zu erfassenden Objektes beim Öffnungswinkel  $\alpha = 30^\circ$  beträgt  $b = \tan(\alpha) \cdot d \cdot 2$ . Dabei beträgt das kleinste erfassbare Objekt am Ende des Schutzfelds  $b_S \approx 0,4m$  und am Ende des Warnfelds  $b_W \approx 0,8m$ .

In Abbildung 5.4 sind die beiden Ultraschallsensoren sowie Warn- und Schutzfeld dargestellt.

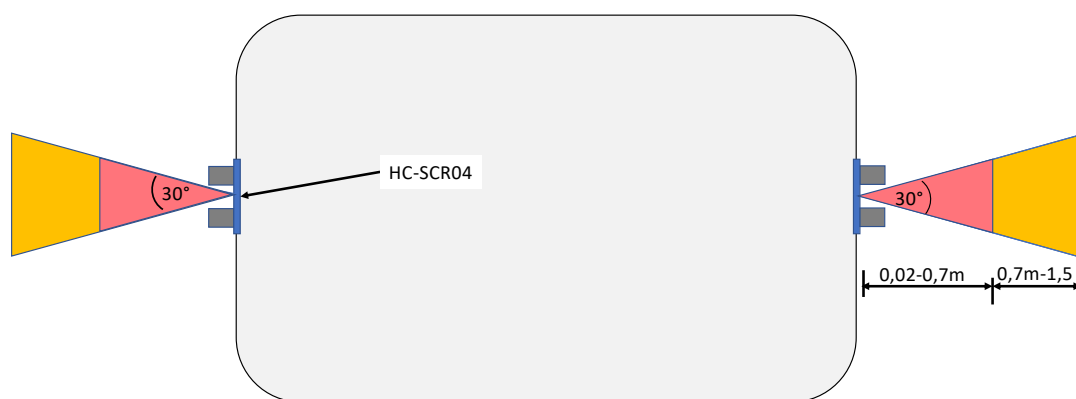


Abbildung 5.4: Schematische Anordnung der Ultraschallsensoren HC-SR04 auf dem Tablett zur Kollisionsvermeidung

Der Ultraschallsensor HC-SCR04 Ultraschallsensor verfügt für die Messung der Schalllaufzeit über die beiden Pins *TRIG* und *ECHO*. Die Messung wird durch eine fallende Flanke von 10µs am Triggereingang gestartet. Anschließend werden über den Piezokristall des Sensors acht aufeinanderfolgende 40Khz Schallwellen ausgesandt. Nach diesen 200µs setzt der Sensor den *ECHO* so lange auf high, bis der Ultraschallimpuls empfangen wurde. Wurde keine Schallreflektion empfangen, verbleibt der *Echo* für max. 38 ms auf HIGH. Eine erneute Messung kann frühestens nach 20ms gestartet werden. (vgl. [Plate 2017])

Mit einem Arduino Nano werden die Messungen an beiden Sensoren zyklisch durchgeführt. Die Berechnung der Distanz erfolgt anhand der in Abschnitt 2.1 beschriebenen Formel. Tritt eine Schutz- oder Warnfeldverletzung auf, gibt der Arduino ein Signal auf einen entsprechenden Interrupt-Pin am ESP32 als Hochbahn-Controller. Die verwendeten Interrupt-Pins sind nachfolgend dargestellt.

Sensor	Verletzung	ESP32 Interrupt-Pin
1	Warnfeld	GPIO1
1	Schutzfeld	GPIO2
2	Warnfeld	GPIO3
2	Schutzfeld	GPIO4

#### 5.4.2 Positionserfassung

## 5.5 Schnittstelle

Als Übergang von der Konzeptionierung mechatronischer Komponente zu den informationstechnischen Konzepten soll in diesem Abschnitt die Schnittstelle aller verwendeten Komponenten vorgestellt werden. Dazu ist in Abbildung 5.5 eine Übersicht dargestellt.

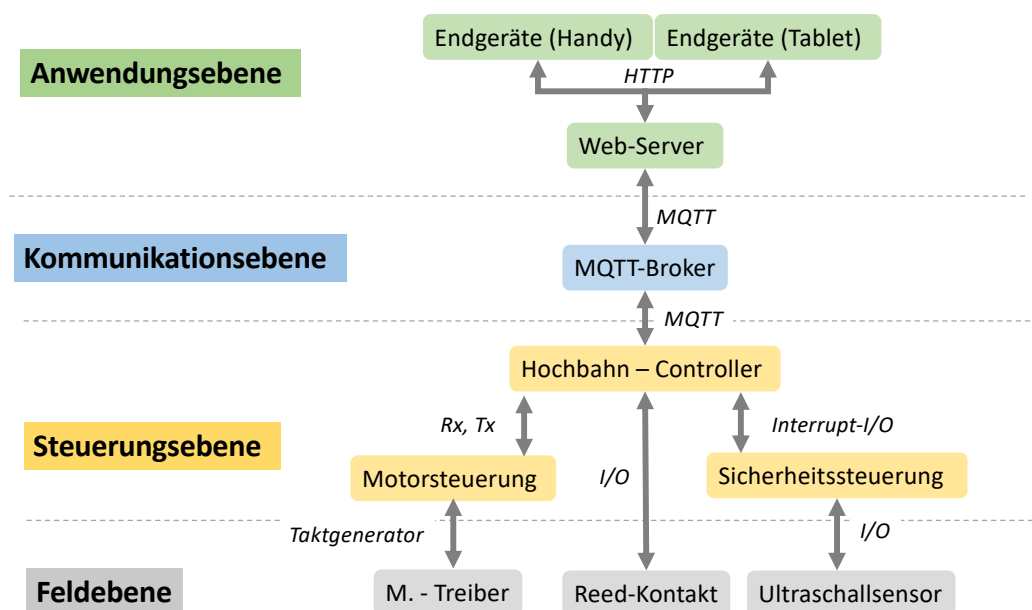


Abbildung 5.5: Schnittstellenübersicht der verwendeten Komponenten

In der Übersicht sind die Komponenten hierarchisch dargestellt. Die Pfeile dazwischen stellen die Schnittstellen dar. Der Webserver kommuniziert mit den Endgeräten der Kunden oder dem Tablet in der Küche über HTTP. Mit POST-Requests werden Steuerbefehle oder Bestellungen zur weiteren Verarbeitung an den Server geschickt. MQTT dient zur Kommunikation zwischen dem Server und Hochbahn. Für die Übermittlung der MQTT-Befehle befindet sich ein MQTT-Broker auf der Kommunikationsebene. Die Hochbahn bekommt Information über die Station, die angefahren werden soll. Während der Fahrt gibt die Bahn Rückmeldung über die aktuelle Position. Außerdem sollen Kollisionswarnungen übertragen werden. Auf der Hochbahn führt ein D1-Mini als Controller die

Kommunikation durch. Dieser steuert außerdem die beiden Steuerungen für den Motor und der Kollisionsvermeidung. Für die beiden ausgelagerten Steuerungen werden jeweils Arduino Nanos verwendet. Die Motorsteuerung empfängt die Befehle zur gewünschten Motordrehzahl. Aus den Befehlen werden die benötigten Takte für den Schrittmotor-treiber generiert. Die Sicherheitssteuerung überprüft kontinuierlich die Distanzwerte der Ultraschallesnsoren. Ist eine Kollision zu erwarten, setzt die Steuerung einen Interrupt des Hochbahn-Controllers. Zwischen D1-Mini und Motor-Arduino wird über die RX und TX - Pins eine serielle Kommunikationsschnittstelle aufgebaut, während der Arduino zur Kollisionsvorbeugung direkt an Interrupt Pins. Dadurch erlangen die Signale höchste Priorität und die Steuerung kann somit schnell reagieren. Die Positionserfassung wird vom Hochbahn-Controller anhand der Schaltvorgänge des Reed-Kontaktes und der aktuellen Motordrehzahl berechnet.

## 5.6 Software

Es gibt in diesem Projekt zwei Hauptsoftwarekomponenten, welche die Anlage steuern: Der Server, welcher Anfragen und Befehle an die Bahn verwaltet und die Bahn selbst, welche für die Steuerung der Hardware zuständig ist. Der Server soll im Heimnetzwerk über die Adresse des Hosting-System erreichbar sein. Befehle an die Hochbahn sollen drahtlos mit MQTT übertragen werden. Auf der Bahn kommuniziert ein Arduino über einen ESP8266 mit dem Server und steuert gleichzeitig die Bahn. In den folgenden Abschnitten wird die Konzeption dieser einzelnen Softwareteilen erläutert.

### 5.6.1 Web-Applikation

Die Web-Applikation bezeichnet die Benutzeroberfläche, welche sowohl in der Küche zum Einsehen von Bestellungen, als auch von Gästen zum Bestellen und Steuern der Bahn verwendet wird. Jeder Gast soll sich ein Konto erstellen und dabei seine Lieblingsfarbe auswählen können. Bestellt dieser etwas kann so die Hochbahn in der individuellen Farbe leuchten. Dies dient zum einen der Freude der Gäste und zum anderen zum Erkennen, für wen die Bestellung ist. Angemeldet soll ein Nutzer über ein Menü unter folgenden Optionen wählen können:

- Allgemeines
- Mein Konto
- Bestellen
- Steuern
- Live-Verfolgung

Unter *Allgemeines* werden generelle Infos zur Hochbahn angezeigt. Kontoeinstellungen wie Änderung der E-Mail Adresse oder Lieblingsfarbe werden unter *Mein Konto* getätigt. Unter *Bestellen* kann gewählt werden, was bestellt werden soll. Ebenfalls ist dabei anzugeben, wohin die Bahn das bestellte fahren soll. Unter *Steuern* kann die Bahn ohne eine Bestellung zu gewünschten Positionen gefahren werden. Die aktuelle Position und ggf. Bestellung kann unter *Live-Verfolgung* eingesehen werden.



**5.6.2 Server**

**5.6.3 Client**

**5.6.4 Steuerung und Positionserkennung**

# Kapitel 6

## Umsetzung

### 6.1 Konstruktion

#### 6.1.1 Getriebe

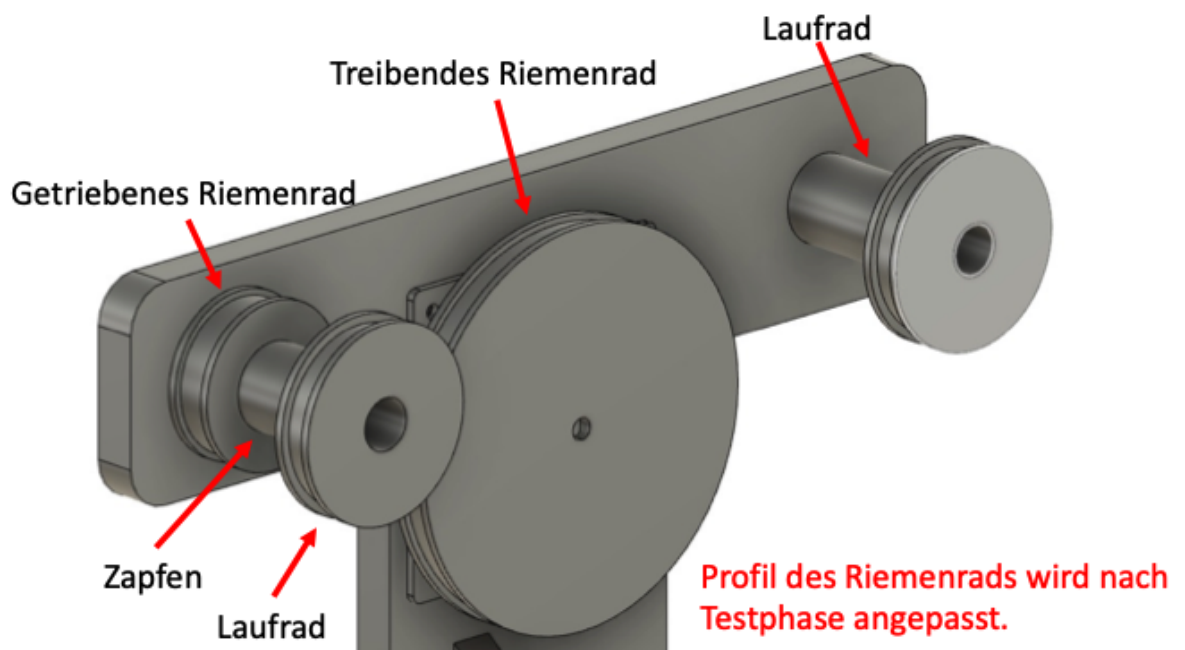


Abbildung 6.1: Detaillierte Ansicht der Getriebekonstruktion

Entsprechend des Konzepts zum Getriebe in Unterabschnitt 5.2.2 erfolgt in diesem

Abschnitt die Konstruktion der Bauteile. Die folgende Beschreibung der Abmaße des Riemenrades und des Laufrades sind das Ergebnis der gefertigten Prototypen.

#### Das Laufrad

Beim Laufrad beträgt der Durchmesser der Laufläche  $d = 34mm$  und eine Breite  $b = 5mm$ . Für die Führung auf der Schiene besitzen die beiden äußeren Ränder eine Breite  $b_R = 2mm$  sowie einen Durchmesser  $d = 40mm$ . Die Laufräder werden mit einem Rillenkugellager 6000 Welle gelagert. Das Lager wird mit Übermaßpassung verbaut. Die Konstruktion des Laufrads ist in Abbildung 6.2 dargestellt.

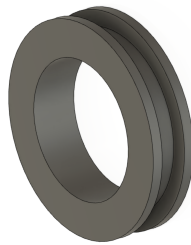


Abbildung 6.2: Konstruktion des Laufrades

#### Riemenräder

Das Riemengetriebe besteht aus dem treibenden und getriebenen Riemenrad. Zunächst soll das Zahnprofil der beiden Riemenräder ausgelegt werden. Als Zugmittel soll ein Zahnflachriemen mit einem äußeren Umfang von  $U = 206mm$  und einer Riemenbreite von  $b = 9,5mm$  verwendet werden. Die Zähnezahl  $z = 75$ . Folglich ist das Modul  $m \approx 5$ . Für das Zahnrad gilt:  $d_Z = \frac{m \cdot z}{\pi}$ . Die Zähnezahl wird auf  $z = 22$  festgelegt. Dadurch ergibt sich  $d_Z = 35,01mm$ . Entsprechend der Abmessungen des Riemens wurde der Durchmesser der Zahnflanken auf 2mm festgelegt. Für die seitliche Führung des Riemens wird ein Rand mit der Breite  $b = 3mm$  und dem Durchmesser  $d = 40mm$  eingefügt.

Das treibende Riemenrad (Ritzel) ist in Abbildung 6.3 dargestellt. Es wird auf die Nabe des Motors gesteckt. Das getriebene Riemenrad zeigt Abbildung 6.4. Wie in 5.2.2 konzeptioniert, befindet sich auf der anderen gegenüberliegenden Seite eine Laufläche. Das Bauteil wird beidseitig gelagert. Dafür wird ebenfalls das Kugellager 6000 mit Übermaßpassung verbaut.

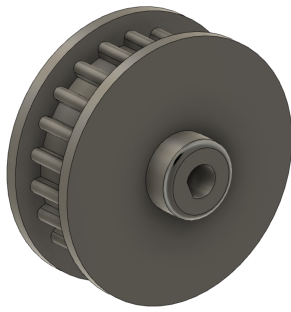


Abbildung 6.3: Konstruktion des treibenden Riemenrades (Ritzel)

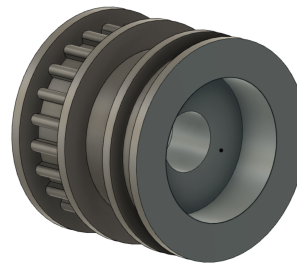


Abbildung 6.4: Konstruktion des getriebenen Riemenrades mit LaufRad

### Implementierung des Getriebes

Der äußere Umfang des Riemens beträgt  $U = 206mm$ . Für die Berechnung des erforderlichen Abstandes  $\Delta$  der beiden Wellen zueinander gilt mit dem Riemenraddurchmesser  $r$  folgende Formel:

$$U = 2(r + \Delta) \quad (6.1)$$

$$\Delta = \frac{U - 2r}{2} = \frac{206mm - 35,01}{2} \approx 85mm \quad (6.2)$$

Um den Wellenabstand zu erreichen, wird die Motoraufhängung nach unten entsprechend versetzt. Zusätzlich soll sich die Aufhängung nach der Montage in Y-Richtung justieren lassen. Dadurch kann der Riemen nach dem Einbau auf Spannung gebracht werden. Die Motoraufhängung ist in Abbildung 6.5 dargestellt.

# Platzhalter

Abbildung 6.5: Detailansicht der verschiebbaren Motoraufhängung

Die Welle wird durch das Getriebe mit axial beansprucht. Damit die Befestigung der Welle die axialen Kräfte aufnehmen kann, wird zusätzlich ein Rundmaterial an die Seitenteile montiert. Abbildung 6.6 zeigt das Bauteil.

# Platzhalter

Abbildung 6.6: Detailansicht der verschiebbaren Motoraufhängung

## 6.1.2 Fertigung

# Kapitel 7

## Diskussion und Ausblick

### 7.1 Anfang vom Ende

Hier kommt der Anfang vom Ende der Arbeit. Fast haben wir es geschafft! Nur noch ein Lorem ipsum!

### 7.2 Lorem ipsum

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus

luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque,

erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.



# Abkürzungsverzeichnis

**GUI** Graphical User Interface. 11

**Haltemoment** Maximales Drehmoment, mit dem ein stromloser Schrittmotor ohne Verdrehung belastet werden kann. 6

**HTTP** Hyper Text Transfer Protocoll. 23

**Koinzidenzstellung** Stellung mit magnetischer Vorzugsrichtung. 6

**MQTT** Message Queuing Telemetry Transport. i, 9, 23, 25

**MQTT-Broker** to be defined. 23

**PWM** Pulsweitenmodulation. 10

**Reluktanz** Magnetischer Widerstand. 6

**Synchronmaschine** Elektrischer Motor, bei dem der Rotor synchron mit dem Drehfeld des Stators läuft.. 4