



University of Applied Sciences

**HOCHSCHULE  
EMDEN·LEER**

Fachbereich Technik  
Abteilung Elektrotechnik und Informatik

---

**ENTWICKLUNG UND IMPLEMENTIERUNG  
EINES FAHRZEUGES FÜR DEN HYPERLOOP  
(STEUERUNG UND VERDRAHTUNG)**

**PROJEKTARBEIT**  
Studiengang Elektrotechnik

Vorgelegt von  
Oliver, Schmidt  
Studiengang Elektrotechnik  
Matr. Nr. 7023462

Emden, 30. August 2024

Betreut von  
Prof. Dr.-Ing. Kane

# Rechtliche Erklärung

## Erklärung

- [ja|nein] Die vorliegende Arbeit enthält vertrauliche / kommerziell nutzbare Informationen, deren Rechte außerhalb der Hochschule Emden/Leer liegen. Sie darf nur den am Prüfungsverfahren beteiligten Personen zugänglich gemacht werden, die hiermit auf ihre Pflicht zur Vertraulichkeit hingewiesen werden (Sperrvermerk).
- [ ja|nein-] Soweit meine Rechte berührt sind, erkläre ich mich einverstanden, dass die vorliegende Arbeit Angehörigen der Hochschule Emden/Leer für Studium / Lehre / Forschung uneingeschränkt zugänglich gemacht werden kann.

## Eidesstattliche Versicherung

Ich, der Unterzeichnende, erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Alle Quellenangaben und Zitate sind richtig und vollständig wiedergegeben und in den jeweiligen Kapiteln und im Literaturverzeichnis wiedergegeben. Die vorliegende Arbeit wurde nicht in dieser oder einer ähnlichen Form ganz oder in Teilen zur Erlangung eines akademischen Abschlussgrades oder einer anderen Prüfungsleistung eingereicht.

Mir ist bekannt, dass falsche Angaben im Zusammenhang mit dieser Erklärung strafrechtlich verfolgt werden können.

Emden, 30. August 2024 *Oliver Schmidt*

# Inhaltsverzeichnis

Rechtliche Erklärung . . . . .	I
Abbildungsverzeichnis . . . . .	III
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.1.1 Institute of Hyperloop Technology . . . . .	1
1.2 Aufgabenstellung . . . . .	2
<b>2 Stand der Technik</b>	<b>3</b>
2.1 Konzept . . . . .	3
2.2 Antrieb – Golden Motor . . . . .	3
2.2.1 BLDC Motor . . . . .	3
2.2.2 Vector Controller . . . . .	4
2.3 Steuerung – Speedgoat . . . . .	4
2.3.1 Verbaute Module . . . . .	6
2.3.2 Pin Mapping der Module . . . . .	8
2.4 Abstandsmessung . . . . .	9
2.5 Speicher . . . . .	9
<b>3 Implementierung</b>	<b>13</b>
3.1 Bauteile . . . . .	13
3.2 Schaltplan . . . . .	13
3.2.1 Bauteil erstellung . . . . .	13
3.3 Distanzmessung . . . . .	13
3.3.1 Verbindung . . . . .	13
3.4 Steuerung . . . . .	15
<b>4 Konklusion</b>	<b>16</b>
<b>5 Anhang</b>	<b>17</b>

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Hyperloop der Hochschule Emden Leer . . . . .	2
2.1	Golden Motor – 10 KW BLDC Motor Liquid Cooled . . . . .	4
2.2	Golden Motor – Zeichnung: BLDC Motor . . . . .	5
2.3	Golden Motor – VECTOR 500 Motor Controller . . . . .	5
2.4	Golden Motor – Zeichnung: Vector Controller . . . . .	6
2.5	Speedgoat – Baseline Real-Time Target Machine . . . . .	7
2.6	Speedgoat – I/O Module 397 [4] . . . . .	7
2.7	Speedgoat – I/O Module 691 [5] . . . . .	8
2.8	Speedgoat – Ansicht der Modulanschlüsse . . . . .	9
2.9	Pepperl+Fuchs – Distanzsensor . . . . .	12
2.10	DeepCPower – Lithium Batterie 50Ah   51,2V   2560Wh . . .	12
3.1	PARKSIDE – Distanzsensor – Innenaufbau . . . . .	14

# Kapitel 1

## Einleitung

### 1.1 Motivation

Der Hyperloop ist ein Konzept für ein Hochgeschwindigkeitstransportsystem, das von Elon Musk [1] populär gemacht wurde. Es besteht im Wesentlichen aus einer oder mehreren Kapseln, die sich durch fast luftleere Röhren bewegen. Die Idee ist, Reibung und Luftwiderstand, die zwei größten Hindernisse für hohe Geschwindigkeiten, zu minimieren.

Durch die Reduzierung von Luft- und Rollwiderstand können Hyperloop-Kapseln Geschwindigkeiten von über 600 km/h erreichen. Dies ermöglicht extrem schnelle Reisen zwischen Städten, die weit voneinander entfernt sind.

Angesichts der globalen Bemühungen zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen und zur Bekämpfung des Klimawandels könnte Hyperloop eine umweltfreundlichere Alternative zu Autos und Flugzeugen bieten.

#### 1.1.1 Institute of Hyperloop Technology

Die Hochschule Emden/Leer hat im Jahr 2021 das Institut für Hyperloop-Technologie (IHT) gegründet, um aktiv an der Forschung zu dieser zukunftsweisenden Technologie teilzunehmen.

Im Rahmen dieser Forschung wurde an der Hochschule Emden eine Teststrecke mit einer Länge von 26 Metern errichtet (siehe Abbildung 1.1). Auf dieser Strecke soll das Fahrzeug (POD) unter realistischen Bedingungen getestet und weiterentwickelt werden.

---

Darüber hinaus engagiert sich das IHT in verschiedenen Projekten, darunter das »European Hyperloop Technology Center – EuHyTeC«, das europäische Hyperloop-Initiativen vernetzt und gemeinsam die nächste Generation des Transports entwickelt.

---



Abbildung 1.1: Hyperloop der Hochschule Emden Leer

## 1.2 Aufgabenstellung

Die Motivation für dieses Projekt liegt in der Entwicklung eines Hyperloop-Fahrzeugs, das mit einer Batterie und einem Motor betrieben wird. Die Steuerung des Fahrzeugs soll über ein Speedgoat-System erfolgen.

Im Rahmen des Projekts wird ein Pod für den Hyperloop mit einer Bordspannung von 48 V konzipiert. Ziel ist es, die Machbarkeit dieser Spannung zu überprüfen und umzusetzen. Dazu gehören die Planung und Realisierung der Verdrahtung, die Integration der erforderlichen Sensorik sowie die Beschaffung der notwendigen Bauteile. Die Logik- und Signalverarbeitung wird mithilfe von Simulink auf dem Speedgoat-System durchgeführt. Die Steuerung erfolgt über Simulink, ein Modul von MATLAB, und umfasst die Erfassung von Position und Beschleunigung des Pods. Der Motor wird über ein zusätzliches Steuergerät angesteuert. Die Steuerung soll als Automatensteuerung umgesetzt werden. Die Verdrahtung des Pods wird entsprechend der Bordspannung von 48 V ausgelegt. Hierfür wird mit der Software QElectroTech ein Schaltplan erstellt. Alle erforderlichen Bauteile für die Umsetzung der Bordspannung, die Verdrahtung und die Sensorik müssen beschafft werden.

Entwurf und in Betriebnahme.

## Kapitel 2

# Stand der Technik

### 2.1 Konzept

Der Pod wird von einem BLDC-Motor angetrieben, wobei die elektrische Energie in einem Lithium-Ionen-Akku gespeichert wird. Der Motor wird durch einen Sinuswellen-Generator gesteuert. Mit dem Speedgoat-System werden die Eingangssignale des Sinuswellen-Generators sowie andere Akto- ren gesteuert.

### 2.2 Antrieb – Golden Motor

Golden Motor ist ein Anbieter von Elektromotoren und elektrischen An- triebssystemen. Das Unternehmen bietet eine breite Palette von Produkten an, darunter: Motoren und Komplettsysteme für Elektrofahrräder, Industri- elle BLDC-Motoren, Elektrische Antriebe für Boote.

#### 2.2.1 BLDC Motor

Ein BLDC-Motor (Brushless DC Motor) unterscheidet sich grundlegend von einem herkömmlichen Gleichstrommotor. Während bei einem traditionel- len DC-Motor die Polumschaltung (Kommutierung) mechanisch über Kohle- bürsten erfolgt, übernimmt beim BLDC-Motor eine elektronische Steuerung diese Aufgabe. Dadurch entfällt die Notwendigkeit von Kohlebürsten, was den Motor effizienter und langlebiger macht[2].

Die Anschlüsse des BLDC-Motors sind in Abbildung 2.2 dargestellt. Der Motor verfügt über zwei Ausgänge, die jeweils mit drei Hall-Sensoren ausge- stattet sind, sowie über einen Temperatursensor. Zusätzlich werden über das Kabel ein GND und eine +5V-Versorgung benötigt. Die Spulen des Motors werden über drei Phasen angeschlossen: U, V und W.

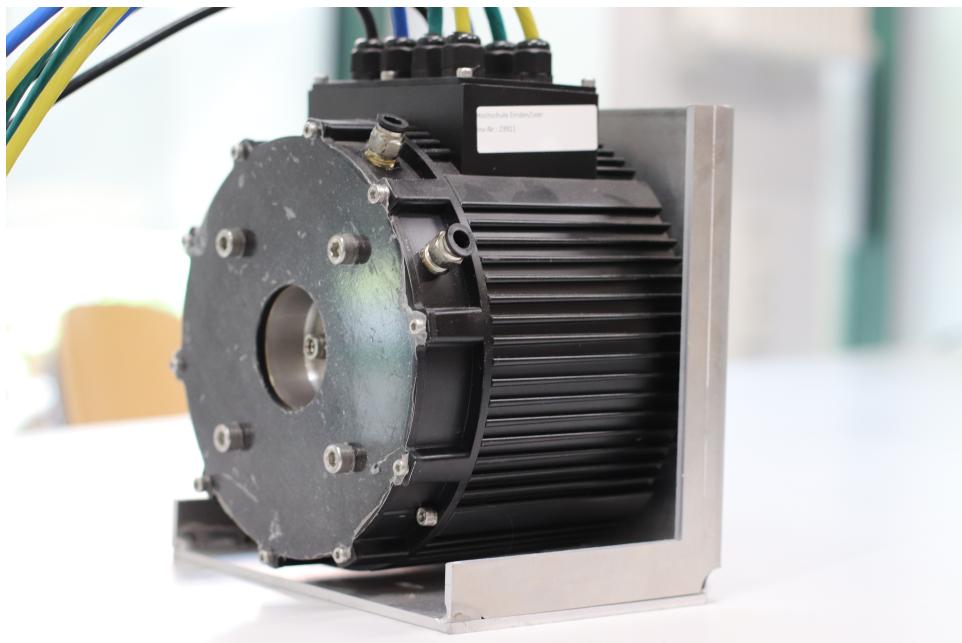


Abbildung 2.1: Golden Motor – 10 KW BLDC Motor Liquid Cooled

### 2.2.2 Vector Controller

Der Vector Controller verwendet die Motorsteuerungstechnologie feldorientierte Regelung (Field-Oriented Control - FOC), dass bedeutet das der Controller mittels den Hallsensoren, einem Rückgekoppelten Regelkreis bildet und somit die Lage des Polrades ermittelt.

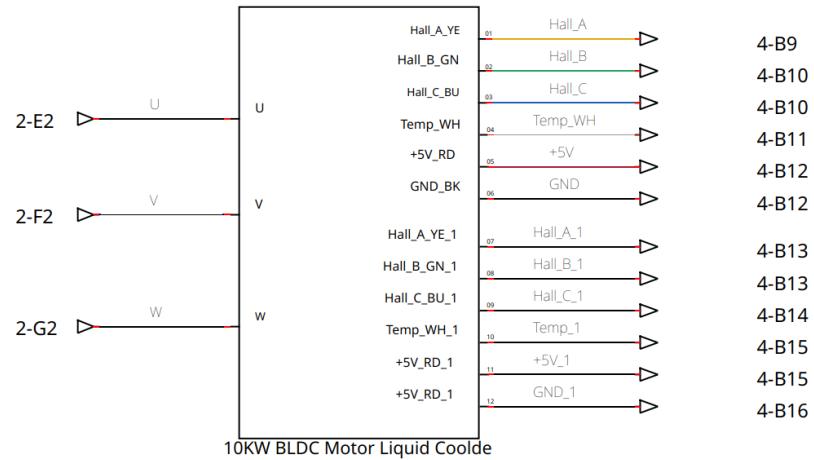
[3]

Sie bietet eine effiziente Steuerung von BLDC-Motoren in Anwendungen mit variabler Drehzahl und schnell wechselnden Lasten und verbessert die Energieeffizienz von Asynchronmotoren, vor allem bei niedrigen Drehzahlen.

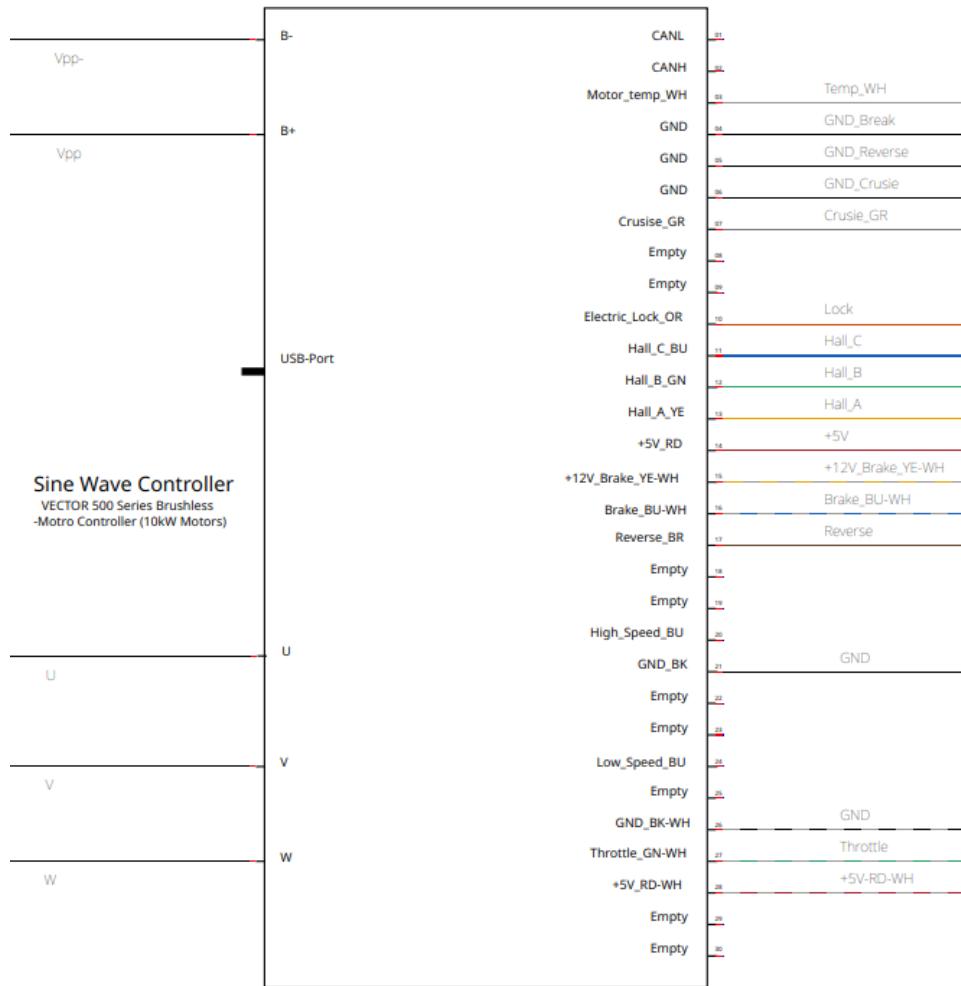
## 2.3 Steuerung – Speedgoat

Speedgoat ist ein Unternehmen, das sich auf hochmoderne Echtzeitsysteme spezialisiert hat. Diese Systeme werden vor allem in der Entwicklung und dem Testen von komplexen Steuerungs- und Regelungssystemen eingesetzt.

Speedgoat-Systeme arbeiten nahtlos mit Simulink zusammen, einer Software von MathWorks, die häufig für die Modellierung und Simulation von dynamischen Systemen eingesetzt wird. Speedgoat bietet eine breite Palette von I/O-Modulen an, die es ermöglichen, verschiedene Sensoren und Aktuatoren an die Systeme anzuschließen. Dies macht die Systeme sehr flexibel und anpassungsfähig. Echtzeitsysteme von Speedgoat sind Computer, die in

**Abbildung 2.2:** Golden Motor – Zeichnung: BLDC Motor**Abbildung 2.3:** Golden Motor – VECTOR 500 Motor Controller

der Lage sind, Aufgaben innerhalb festgelegter Zeitintervalle auszuführen. Diese Systeme sind entscheidend für Anwendungen, bei denen die zeitliche Genauigkeit von großer Bedeutung ist, wie beispielsweise bei der Steuerung von Motoren, der Regelung von Prozessen oder der Simulation von physika-



**Abbildung 2.4:** Golden Motor – Zeichnung: Vector Controller

lischen Systemen.

### 2.3.1 Verbaute Module

Für das Projekt wird die Baseline Real-Time Target Machine verwendet. Die über die Module IO397 und IO691 verfügt.

Das IO397 I/O-Modul ist ein mPCIe-kompatibles, in Simulink programmierbares FPGA-Modul mit 50k Logikzellen, 4 ADC-Eingangs- und 4 DAC-Ausgangskanälen, sowie 14 ESD-geschützten TTL-I/O-Leitungen. Es unterstützt eine 16-Bit-Auflösung, softwareseitig auswählbare Spannungen und ist ideal für geschlossene Regelkreise und Hardware-in-the-Loop (HIL)-Simulationen



**Abbildung 2.5:** Speedgoat – Baseline Real-Time Target Machine



**Abbildung 2.6:** Speedgoat – I/O Module 397 [4]

mit MATLAB und Simulink [4].

Das IO691 I/O-Modul bietet eine intelligente CAN-Schnittstelle mit zwei Kanälen, die sowohl flexible Datenrate CAN (CAN FD) als auch High-Speed CAN (CAN HS) unterstützen. Es ist kompatibel mit CAN 2.0A/B-Netzwerken und unterstützt SAE J1939 sowie ASAM XCP für Bypassing. Alle Signale sind über 9-polige D-Sub-Front-CAN-Anschlüsse zugänglich. Das Modul ist ideal für geschlossene Regelkreise, Hardware-in-the-Loop-Simulationen und Restbussimulationen mit MATLAB und Simulink [5].



**Abbildung 2.7:** Speedgoat – I/O Module 691 [5]

### 2.3.2 Pin Mapping der Module

Das Modul IO397-50k kann über ein Sensor-Aktor-Kabel von Phoenix Contact extern angeschlossen werden, wie in Abbildung 2.8 dargestellt. Zusätzlich wird das Modul IO691 mittels eines 9-Pin D-Sub-Steckers (männlich) angeschlossen.

#### Pin Mapping – IO397-50k

Terminal Board A ist für die Verarbeitung analoger Signale ausgelegt, sowohl für Eingänge als auch für Ausgänge. Die Tabelle 2.1 zeigt das Pin Mapping von Terminal Board A. Dieses Board enthält Anschlüsse für insgesamt vier analoge Eingänge (Pins 1a bis 8a) und vier analoge Ausgänge (Pins 9a bis 12a). Die analogen Eingänge sind für die Messung von Spannungen zuständig, wobei die positiven und negativen Leitungen (jeweils "+ und -") getrennt geführt werden, um eine differenzielle Signalverarbeitung zu ermöglichen. Die Ausgänge sind digitale-zu-analoge-Wandler (DAC), die analoge Signale für den Antrieb von Geräten bereitstellen. Zusätzlich sind mehrere Ground- und Spannungsanschlüsse vorhanden, um eine stabile Stromversorgung zu gewährleisten.

Terminal Board B hingegen bietet eine flexible Konfiguration für digitale Ein- und Ausgänge. Die Tabelle 2.2 zeigt das Pin Mapping von Terminal Board B. Die Pins 3b bis 16b sind für konfigurierbare I/O-Funktionalitäten ausgelegt und nutzen TTL-Signale (Transistor-Transistor-Logik), was sie besonders für schnelle digitale Schaltvorgänge geeignet macht. Dieses Board ermöglicht es, die Anschlüsse flexibel zu nutzen, je nach den Anforderungen der Applikation. Auch hier gibt es mehrere Spannungs- und Ground-Anschlüsse, sowie eine Abschirmung (Shielding) für das M12-Kabel, um elektromagnetische Störungen zu minimieren.



Abbildung 2.8: Speedgoat – Ansicht der Modulanschlüsse

#### Pin Mapping – IO691

## 2.4 Abstandsmessung

## 2.5 Speicher

**Tabelle 2.1:** IO397-50k Pin – Terminal Board A: analog I/O [4]

Pin	Funktionalität	Type
1a	Analog input 01 (+)	ADC
2a	Analog input 01 (-)	ADC
3a	Analog input 02 (+)	ADC
4a	Analog input 02 (-)	ADC
5a	Analog input 03 (+)	ADC
6a	Analog input 03 (-)	ADC
7a	Analog input 04 (+)	ADC
8a	Analog input 04 (-)	ADC
9a	Analog output 01	DAC
10a	Analog output 02	DAC
11a	Analog output 03	DAC
12a	Analog output 04	DAC
13a	Ground	
14a	Ground	
15a	0V	
16a	5V	
17a	Ground	
SH	Shielding of M12 cable	

**Tabelle 2.2:** IO397-50k Pin Mapping – Terminal Board B: analog I/O [4]

Pin	Funktionalität	Type
1b	0 V	
2b	5 V	
3b	Configurable I/O functionality	TTL
4b	Configurable I/O functionality	TTL
5b	Configurable I/O functionality	TTL
6b	Configurable I/O functionality	TTL
7b	Configurable I/O functionality	TTL
8b	Configurable I/O functionality	TTL
9b	Configurable I/O functionality	TTL
10b	Configurable I/O functionality	TTL
11b	Configurable I/O functionality	TTL
12b	Configurable I/O functionality	TTL
13b	Configurable I/O functionality	TTL
14b	Configurable I/O functionality	TTL
15b	Configurable I/O functionality	TTL
16b	Configurable I/O functionality	TTL
17b	Ground	
SH	Shielding of M12 cable	

**Tabelle 2.3:** IO691 Pin Mapping

Pin	DB9 Connector A/B, Signal
1	-
2	CAN-low
3	GND
4	-
5	-
6	GND
7	CAN-high
8	-
9	-



Abbildung 2.9: Pepperl+Fuchs – Distanzsensor



Abbildung 2.10: DeepC Power – Lithium Batterie 50Ah | 51,2V | 2560Wh

## Kapitel 3

# Implementierung

### 3.1 Bauteile

Für das Projekt wurde der die echtzeitfähige steuerung, Batterie, Motor und dem dazugöhrige Steuerung vorgeben. Alle weiteren Bauteile mussten bestellt werden.

### 3.2 Schaltplan

#### 3.2.1 Bauteil erstellung

Für die erstellung des Schalpalnes, müssen die Bauteile, die nicht der Norm entsprechen, selber erstellt werden. Alle anschlüsse müssen ermittelt werden und die dazugehörige Funktion ebenso.

### 3.3 Distanzmessung

Der Sensor von Pepperl+Fuchs wurde ursprünglich für die Distanzmessung angeschafft. Da dieser Sensor jedoch sehr teuer ist und wir nicht das Risiko eines möglichen Schadens im Vakuum eingehen wollten, wurde nach einer kostengünstigen Alternative gesucht.

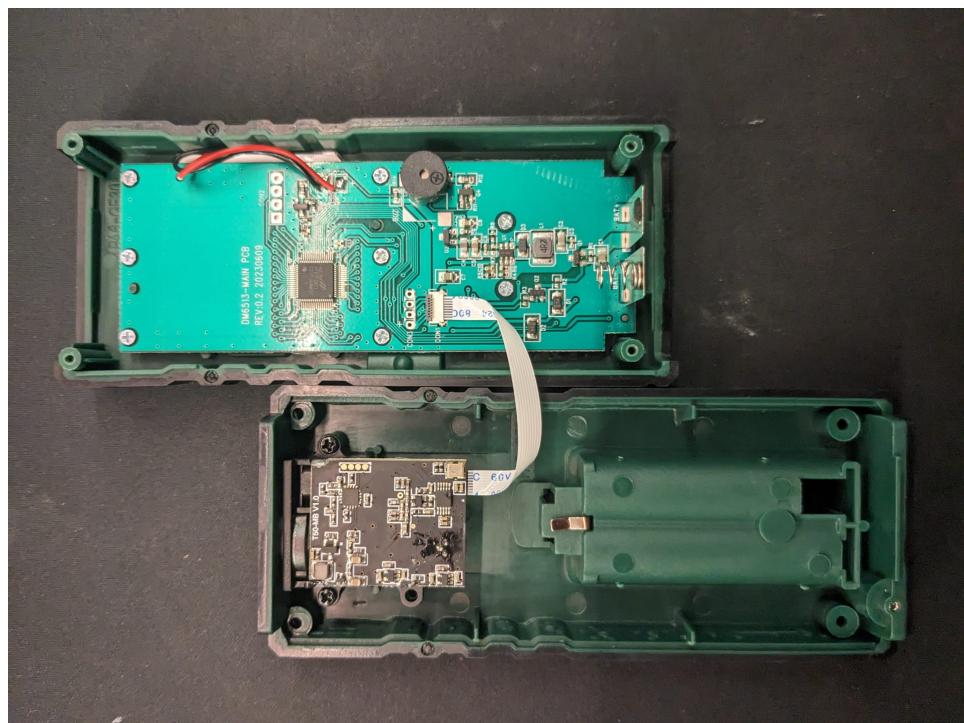
Die Idee bestand darin, ein Entfernungsmessgerät von PARKSIDE zu verwenden und den Sensor aus dem Gerät zu entfernen. Die Messwerte werden anschließend mit einer MCU decodiert.

#### 3.3.1 Verbindung

Der Sensor ist über ein Flachbandkabel mit der Hauptplatine verbunden, wie in Abbildung 3.1 zu sehen ist. Auf der Hauptplatine befinden sich vier

ungenutzte Lötstellen. Mithilfe eines Oszilloskops haben wir diese Lötstellen analysiert und festgestellt, dass Leitung eins eine Spannung von 3,3 V führt und Leitung vier als GND dient. Die Leitungen zwei und drei übertragen digitale Signale und fungieren als Datenleitungen.

Wenn zwei Leitungen für die Datenübertragung vorhanden sind, kann die Kommunikation bei einer zweiadrigten Verbindung entweder synchron oder asynchron erfolgen. Ist die Kommunikation synchron, dient eine der Leitungen als Taktleitung (Clock). Andernfalls, bei einer asynchronen Kommunikation, ist eine Leitung der Sender (TX) und die andere der Empfänger (RX). Dies ermöglicht eine Vollduplex-Übertragung. Der Sensor kommuniziert mit einem Bussystem.



**Abbildung 3.1:** PARKSIDE – Distanzsensor – Innenaufbau

**Tabelle 3.1:** PARKSIDE – Pin Mapping – Distanzsensor

Pin	Farbe	Funktion
1	Rot	3V3
2	Weiß	RX (receiver)
3	Gelb	TX (transmitter)
4	Schwarz	GND

- + Anschlüsse herauszufinden vier anschlüsse gefunden.
- + Was für Aufgaben haben die Anschlüsse?
  - Was für ein Kommunikationsprotokol hat der Sensor?  
Asynchron und seriell mit Baudrate 115200. (Ozilloskop)
- mit einem ESP32 die Sensordaten lesen.
- Nachrichten Dekodierung (Controller MCU)
  - 0x24 Start (Nachricht start)
  - 0x26 Stopp (Nachricht ende)
  - 24 30 30 30 33 32 36 30 30 32 39 26 (Stopp signal)
  - 24 30 30 30 33 32 36 30 31 33 30 26 (Laser an)
  - 24 30 30 30 32 32 31 32 33 26 (Messen)

### 3.4 Steuerung

## Kapitel 4

## Konklusion

## Kapitel 5

## Anhang

# Literatur

- [1] Elon Musk. *Hyperloop Alpha*. 2013. URL: [https://www.tesla.com/sites/default/files/blog\\_images/hyperloop-alpha.pdf](https://www.tesla.com/sites/default/files/blog_images/hyperloop-alpha.pdf).
- [2] mathworks. *Introduction to Brushless DC Motor Control*. Abschnitt: Types of DC Motors; abgerufen am 11-08-2024. 2024. URL: <https://de.mathworks.com/campaigns/offers/next/introduction-to-brushless-dc-motor-control.html>.
- [3] Dierk Schröder. 2. Aufl. Heidelberg: Springer, 2000.
- [4] speedgoat. *FPGA I/O Module - IO397*. [Online; Zugriff 12-August-2024]. URL: <https://www.speedgoat.com/products/simulink-programmable-fpgas-fpga-i-o-modules-io397>.
- [5] speedgoat. *CAN and CAN FD I/O Module - IO691*. [Online; Zugriff 12-August-2024]. URL: <https://www.speedgoat.com/products/communication-protocols-can-fd-io691>.