



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorthesis

Ruben Hemmer

Entwicklung, Aufbau und Test eines
2D-Laserscanners für die Hinderniserkennung
in der Robotik

Ruben Hemmer
Entwicklung, Aufbau und Test eines
2D-Laserscanners für die Hinderniserkennung
in der Robotik

Bachelorthesis eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang Mechatronik
an der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer: Prof. Dr. rer. nat. Stephan Schulz
Zweitgutachter: Prof. Dr. -Ing. Jörg Dahlkemper

Abgegeben am 24. November 2016

Ruben Hemmer

Thema der Bachelorthesis

Entwicklung, Aufbau und Test eines 2D-Laserscanners für die Hinderniserkennung in der Robotik

Stichworte

BLDC, BEMF, TOF Distanzsensor, Magnetencoder, Hall-Effekt Sensor, Arduino Uno, ATmega328P, XBee, Lidar Lite, NSE-5310, SLAM, ICP

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit befasst sich mit der Entwicklung und Aufbau eines 2D-Laserscanners. Mit den Sensordaten des erstellten Laserscanners kann eine 2D-Karte unbekannter Umgebung erstellt werden. Das Ziel eines solchen Sensorsystems ist die Hinderniserkennung für die Kollisionsvermeidung in der Robotik.

Ruben Hemmer

Title of the thesis

Development, construction and test of a 2D laser scanner for the detection of obstacles in the robotics

Keywords

BLDC, BEMF, TOF distance sensor, magnetic encoder, Hall-effect sensor, Arduino Uno, ATmega328P, XBee, Lidar Lite, NSE-5310, SLAM, ICP

Abstract

This thesis deals with the development and construction of a 2D laser scanner. With the sensor data of the laser scanner a 2D map unknown environment can be created. The aim of such a sensor system is the detection of obstacles for collision avoidance in robotics.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die mich im Rahmen dieser Bachelorarbeit begleitet und motiviert haben.

Besonderen Dank gilt Herrn Prof. Dr. rer. nat. Stephan Schulz, der meine Arbeit und somit auch mich betreut hat. Für seine hilfreichen Anregungen, die Motivation sowie die konstruktive Kritik bei der Erstellung dieser Arbeit möchte ich mich ganz herzlich bedanken.

Ein weiterer Dank geht an die beiden Masterstudenten René Büscher und Hagen Hasberg, die mir mit ihrer Hilfsbereitschaft bei Fragen oder Problemen lösungsorientierte Ratschläge gegeben haben.

Darüber hinaus möchte ich meinen Eltern danken, für die Unterstützung und den Rückhalt während der gesamten Dauer meines Studiums.

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	7
Abbildungsverzeichnis	8
Abkürzungsverzeichnis	10
1. Einleitung	11
1.1. Gliederung	11
2. Grundlagen	12
2.1. Bürstenloser Gleichstrommotor	13
2.1.1. Aufbau und Funktionsprinzip des BLDC Motors	13
2.1.2. Ansteuerung	15
2.1.2.1. Sensorgesteuerte Kommutierung	17
2.1.2.2. Sensorlose Kommutierung	18
2.2. Magnetencoder	22
2.2.1. Funktionsprinzip	22
2.2.2. Programmierung	24
2.3. Distanzsensor	26
2.3.1. Funktionsprinzip	26
2.4. Mikrocontroller	30
3. Systemumsetzung	31
3.1. Konstruktion	35
3.2. Programmierung	38
4. Auswertung	40
4.1. Systemkomponenten	40
4.1.1. Distanzsensor	40
4.1.2. Magnetencoder	45
4.2. Kartesische Darstellung der Messwerte	46
4.3. Simultaneous Localization and Mapping	48
4.3.1. Iterative Closet Point	48

4.3.2. Vergleich mit dem Hokuyo UTM-30LX	50
5. Zusammenfassung	56
5.1. Ausblick	56
Literaturverzeichnis	58
A. Anhang	60
A.1. Inhalt der CD	60
A.2. Schaltplan	60
A.3. Zusätzliche Informationen	62

Tabellenverzeichnis

2.1. Spannungszustände mit Stromfluss	16
3.1. Kostenübersicht 2D-Laserscanner	38
4.1. Protokoll der Datenübertragung	48
4.2. Datenvergleich zwischen den erstellten 2D-Laserscanner und dem Hokuyo UTM-30LX	51
A.1. OTP-Register NSE-5310 [4]	63

Abbildungsverzeichnis

2.1.	Übersicht des 2D-Laserscanners	12
2.2.	Verwendeter BLDC Motor Typ 6008	13
2.3.	Magnetfelder BLDC	14
2.4.	Ansteuerung eines BLDC-Motor	15
2.5.	Idealer Spannungsverlauf eines BLDC Motor	15
2.6.	Reeller Spannungsverlauf ($q = \text{quadrat}$)	16
2.7.	Stromfluss Phase V \rightarrow Phase U	17
2.8.	BLDC Treiberplatine von LXRobotics	18
2.9.	BEMF-Schaltung integriert in der Treiberplatine von LXRobotics[3]	18
2.10.	Blockdiagramm Analog Komparator ATmega328P [6]	19
2.11.	Spannungsverlauf einer Spule mit BEMF- und Mittelpunktspannung ($q = \text{quadrat}$)	20
2.12.	Spannungsverlauf beim Anlauf des BLDC Motors ($q = \text{quadrat}$)	21
2.13.	AMS NSE-5310 Magnetencoder mit Magnetring	22
2.14.	Aufbau Hall Sensor Array [5]	23
2.15.	Hall-Effekt Sensor Hamlin 55100	24
2.16.	Programmierabfolge NSE-5310 Sync Mode [4]	25
2.17.	Lidar Lite V2	26
2.18.	Messprinzip und FOV vom Lidar Lite	27
2.19.	Einzelner Sendeimpuls vom Lidar V2 gemessen mit einer APD	28
2.20.	Maximale Messfrequenz und Pulse train	28
2.21.	Bosch GLM 50 Professional	29
2.22.	Entwicklungsboard mit XBee-Modul	30
2.23.	Blockdiagramm	30
3.1.	Vereinfachter Signalverlauf bei Verwendung eines Strahlteiler	31
3.2.	Versuchsaufbau für die Zusammenführung des Sende- und Empfangspuls	32
3.3.	Spiegeladapter für die Zusammenführung des Sende- und Empfangssignals	32
3.4.	Darstellung des Strahlenverlaufs	33
3.5.	Explosionszeichnung	35
3.6.	Finaler Aufbau des 2D-Laserscanner	36
3.7.	2D-Laserscanner mit Acrylglasabdeckung	37
3.8.	Programmabfolge der <i>loop()</i> Methode	39

4.1.	Entfernungsmessung in 2 Meter Intervallen	41
4.2.	Messpunkte bei 20 Meter Entfernung	42
4.3.	Mittelwert und Messfrequenz bei unterschiedlichen Oberflächen des anvisierten Objektes	43
4.4.	Standardabweichung und Messfehler bei unterschiedlichen Oberflächen des anvisierten Objektes	43
4.5.	Messwertdrift bei einer 5 Meter Testmessung (Messdauer $t = 32$ min)	44
4.6.	(a-c) Histogramm bei unterschiedlichen Motordrehzahlen und (d) Standardabweichung über den gesamten Drehzahlbereich	45
4.7.	Testumgebung Labor Raum 101 Berliner Tor 11 der HAW	46
4.8.	Darstellung kartesischer Koordinaten Labor Raum 101 bei unterschiedlicher Motordrehzahlen	47
4.9.	Hokuyo UTM-30LX mit schematischen Aufbau	50
4.10.	Eingangsbereich Department Maschinenbau und Produktion der HAW	52
4.11.	SLAM Plot Eingangsbereich Department Maschinenbau und Produktion	52
4.12.	2. Obergeschoss Department Maschinenbau und Produktion der HAW	53
4.13.	SLAM Plot 2. Obergeschoss Department Maschinenbau und Produktion	53
4.14.	Kartesische Koordinaten Labor Raum 101 bei einer Drehfrequenz von 1.5 Hz	54
4.15.	Kartesische Koordinaten Labor Raum 101 bei einer Drehfrequenz von 3.5 Hz	55
A.1.	Darstellung der einzelnen Plattformen	62
A.2.	Zusätzliche Platine mit Pullup- Pulldown Widerständen, Kondensatoren und den bidirektionalen Logic Level Convertern	62

Abkürzungsverzeichnis

ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
APD	Avalanche-Photodiode
BEMF	Back Electromotive Force
BLDC	Brushless Direct Current
CAD	Computer-Aided Design
CO₂	Kohlendioxid
FOV	Field of View
GPIO	General Purpose Input Output
HAW	Hochschule für angewandte Wissenschaften
IC	Integrated Circuit
ICP	Iterative Closest Point
ISR	Interrupt Service Routine
I²C	Inter-Integrated Circuit
KFZ	Kraftfahrzeug
LIDAR	Light Detection and Ranging
MOSFET	Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor
MRPT	Mobile Robot Programming Toolkit
OTP	One Time Programmable
PWM	Pulsweitenmodulation
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
TOF	Time of Flight
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
USB	Universal Serial Bus
WLAN	Wireless Local Area Network

1. Einleitung

Ein aktives Forschungsgebiet in der Robotik ist die Hinderniserkennung. Für die Erkennung von Hindernissen können unterschiedlichste Sensoren verwendet werden. In modernen Kraftfahrzeugen (KFZ) werden neben Ultraschallsensoren, Radarsensoren auch Stereo Kamerasysteme verbaut. Diese Sensorsysteme werden unter anderem zur Hinderniserkennung eingesetzt, mit dem Ziel der autonomen Fortbewegung. In Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde ein 2D-Laserscanner entwickelt, aufgebaut und ausführlich getestet. Mit dem in dieser Arbeit entwickelten Sensorsystem und geeigneten Algorithmen lassen sich 2D Karten unbekannter Umgebung erstellen. Ist ein 2D-Laserscanner auf einem mobilen Roboter montiert so können mit dem Sensorsystem Hindernisse erkannt und diesen autonom ausgewichen werden. Ein weiteres Einsatzgebiet eines 2D-Laserscanner sind UAVs (Unmanned aerial vehicles). Hierzu zählen zum Beispiel Multikopter-Drohnen-Systeme, deren Einsatzgebiete immer umfangreicher werden. UAVs werden für die Erkundung und Kartierung unbekannter Umgebung, zu Luftbildaufnahmen im privaten Bereich als auch für Search and Rescue Einsätze genutzt. Ein 2D-Laserscanner wird somit in vielen Bereichen zur Hinderniserkennung und als Antikollisionssystem eingesetzt.

1.1. Gliederung

In dem Kapitel 2 dieser Arbeit werden alle für den 2D-Laserscanner verwendeten Systemkomponenten vorgestellt. Weiterhin werden in diesem Kapitel die theoretischen Grundlagen zu den einzelnen Komponenten behandelt.

Das Kapitel 3 zeigt die Systemumsetzung des 2D-Laserscanners. Hier wird der zunächst einfache Versuchsaufbau bis zur fertigen 3D-Konstruktion vorgestellt. Außerdem wird in diesem Kapitel die Programmabfolge des Sensorsystems dargestellt.

Der erstellte 2D-Laserscanner wird im Kapitel 4 ausführlich getestet. Außerdem wird in diesem Kapitel ein Algorithmus vorgestellt, mit dem eine 2D-Karte einer unbekanntem Umgebung erstellt werden kann.

Im letzten Kapitel 5 wird neben der Zusammenfassung der Arbeit ein Ausblick über mögliche Optimierungen und Erweiterungen des entwickelten Sensorsystems gegeben.

2. Grundlagen

Im diesem Kapitel werden die einzelnen Systemkomponenten des erstellten 2D-Laserscanners vorgestellt. Hierzu werden die wichtigsten theoretischen Grundlagen der einzelnen Komponenten erklärt. Die Grundidee bei diesem Projekt war, einen Distanzsensor stationär im Sensorsystem zu verbauen. Der Strahlenverlauf des Distanzsensors wird durch eine Hohlwelle eines Brushless Direct Current (BLDC) Motors von einem darauf montierten Spiegel auf eine 2D Ebene abgelenkt. Für eine Bestimmung der Winkelposition des Spiegels bzw. des Rotors wurde ein Magnetencoder mit Magnetring verbaut. Die folgende Abbildung 2.1 soll eine Übersicht über den schematischen Aufbau des 2D-Laserscanners darstellen.

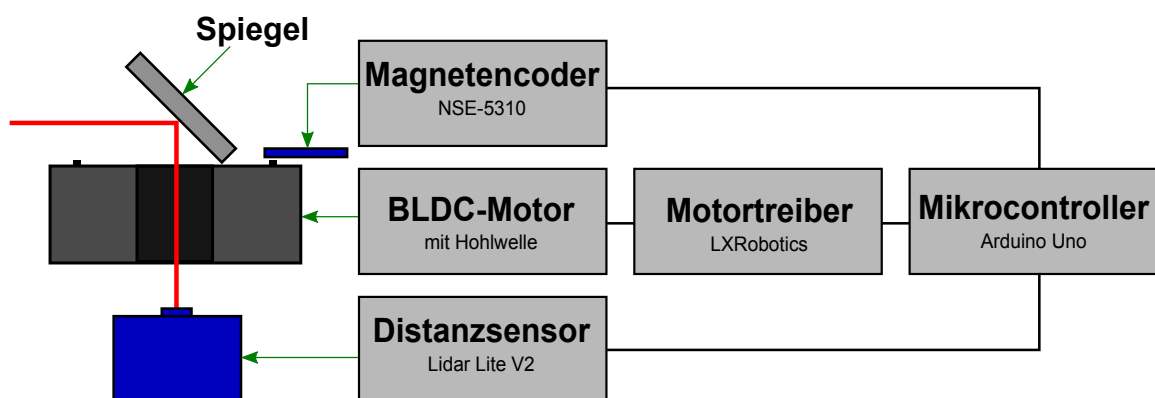


Abbildung 2.1.: Übersicht des 2D-Laserscanners

Ein Mikrocontroller steuert den BLDC Motor über einen Motortreiber an. Außerdem wird der Mikrocontroller für die Erfassung der Sensordaten verwendet.

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Grundlagen der Systemkomponenten beschrieben.

2.1. Bürstenloser Gleichstrommotor

Im Sensormodell wird ein BLDC (**B**rush**L**ess **D**irect **C**urrent , deutsch: bürstenlose Gleichstrommotor) Motor verbaut.

2.1.1. Aufbau und Funktionsprinzip des BLDC Motors

Für das Sensorsystem wird ein BLDC mit einer möglichst großen Hohlwelle benötigt. Durch diese Hohlwelle soll der Strahlenverlauf des Distanzsensors durchgeführt werden. Es wurde ein Motor mit einer 22 mm Hohlwelle verwendet.

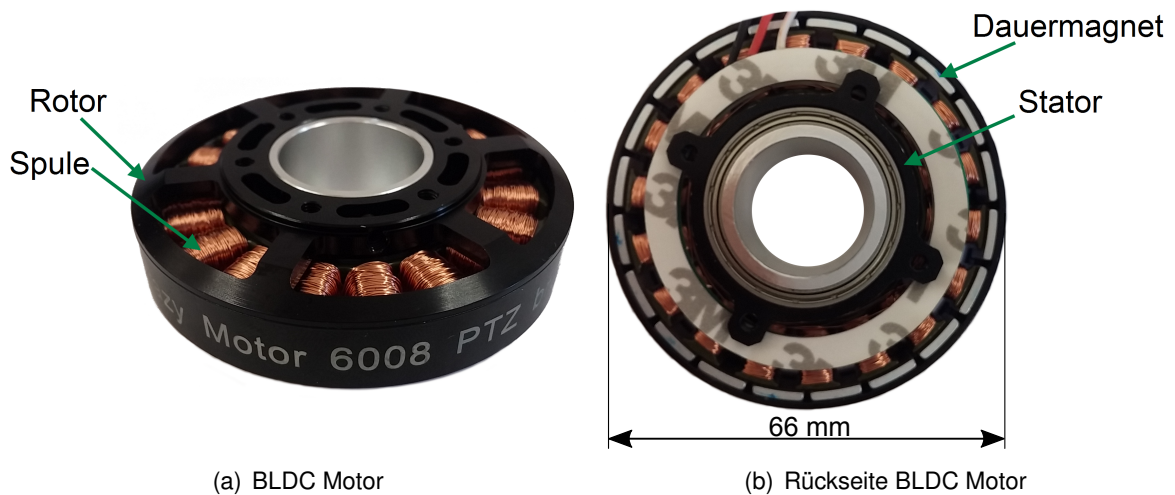


Abbildung 2.2.: Verwendeter BLDC Motor Typ 6008

Der Rotor umfasst 20 Dauermagnete und der feststehende Stator besteht aus 18 Spulen. Eine Besonderheit dieses Motors ist, dass ein dünnerer Kupferdraht, als bei einem klassischen BLDC Motor für die Wicklung der Spulen verwendet wird. Somit wird der Spulenwiderstand erhöht und der Motor hat ein anderes Drehzahl- und Drehmomentverhalten. Ein klassischer BLDC Motor zeichnet sich durch eine hohe Drehzahl mit einem geringen Drehmoment aus. Der hier verwendete Motor hingegen eignet sich für Anwendungen die eine geringe Drehzahl mit hohem Drehmoment erfordern.

Ein BLDC Motor hat üblicherweise eine dreiphasige Drehstromwicklung, welche ein drehendes magnetisches Feld erzeugen kann. Durch dieses magnetische Feld und dem permanenten Rotor entsteht eine Rotationsbewegung. Wie in Abbildung 2.3 dargestellt, sind die Dauermagnete im Rotor immer mit wechselnder Polung angeordnet (blau: *Südpol*, rot: *Nordpol*). Sind die Magnetfelder im Rotor und Stator gleich gerichtet, so ziehen sie sich an. Entgegengesetzte Magnetfelder stoßen sich ab.

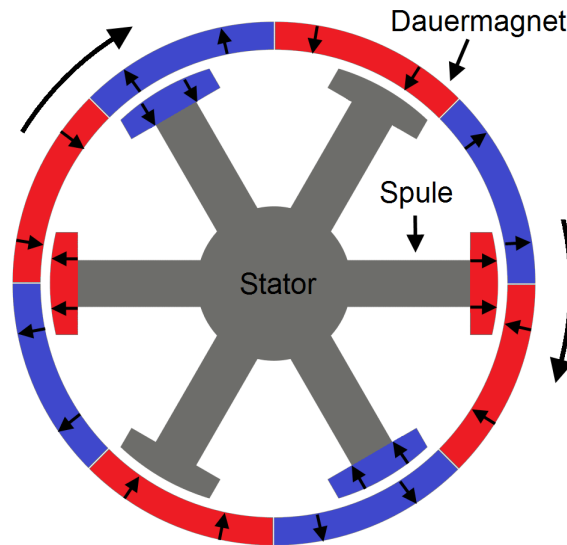


Abbildung 2.3.: Magnetfelder BLDC

Die Pfeile stellen die austretenden Feldlinien dar, welche immer radial zum Stator hin bzw. weg zeigen.

2.1.2. Ansteuerung

Bei einem BLDC Motor werden die drei Phasen nacheinander bestromt. Die drei Phasen (L_U, L_V, L_W) des Stators sind sternförmig miteinander verbunden. Für die Ansteuerung des Motors werden die MOSFET Transistoren $T1$ bis $T6$ verwendet.

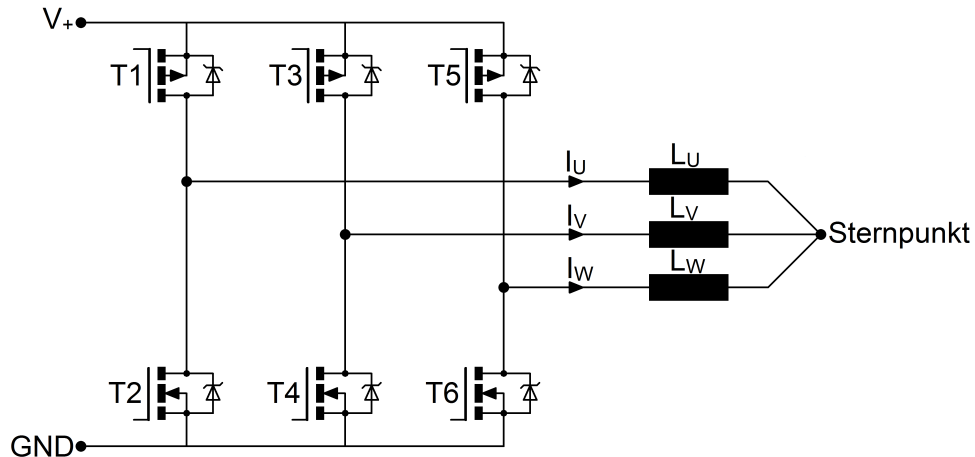


Abbildung 2.4.: Ansteuerung eines BLDC-Motor

Die Phasenspannungen sind um 120° phasenverschobene Trapezspannungen. Für jede Phase gibt es die Zustände Low, High und Floating.

Low steht für GND (0V), High für die Versorgungsspannung V_+ und Floating hat keinen definierten Spannungspegel. Die Versorgungsspannung wird mit einer Frequenz von 7,8 kHz pulsweitenmoduliert (PWM). Mit dieser PWM-Spannung kann die Drehzahl des BLDC Motors verändert werden. Wird beispielsweise das Tastverhältnis der PWM-Spannung erhöht, so steigt auch die Motordrehzahl. Bei einem Tastverhältnis von 100 % wird der Motor mit seiner maximalen Drehzahl bei der eingestellten Versorgungsspannung betrieben.

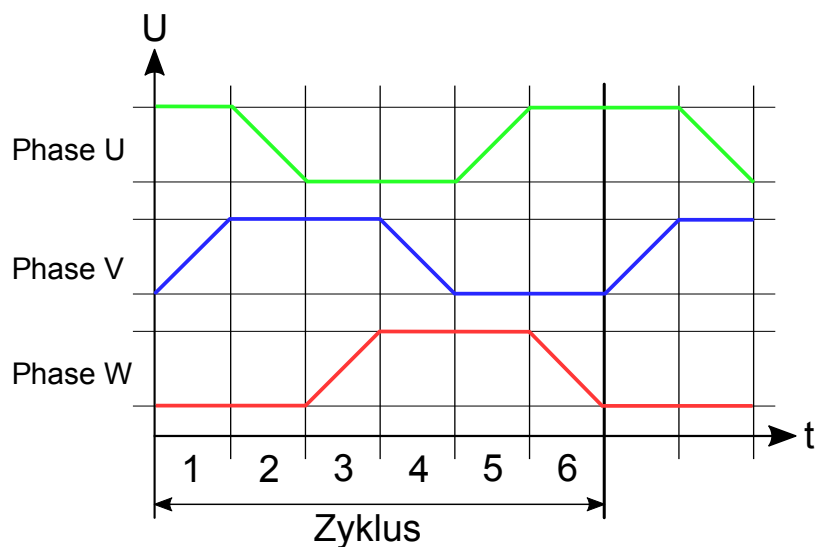


Abbildung 2.5.: Idealer Spannungsverlauf eines BLDC Motor

Die Abbildung 2.5 zeigt, dass ein Zyklus immer aus 6 Zuständen besteht.

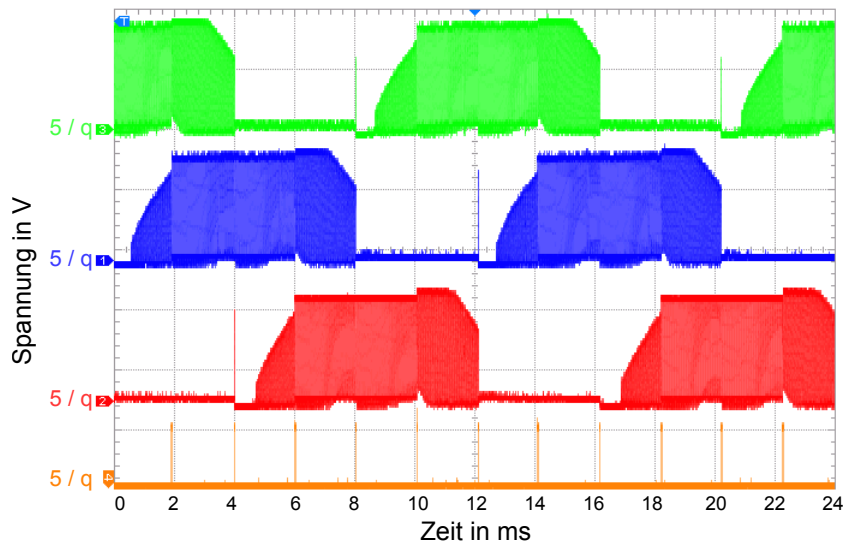


Abbildung 2.6.: Reeller Spannungsverlauf ($q = \text{quadrat}$)

In Abbildung 2.6 sind die mit einem Oszilloskop gemessenen Spannungsverläufe der drei Spulen dargestellt. In der stromlosen Spule wird eine Spannung induziert, so dass ein trapezförmiger Spannungsverlauf entsteht. Diese induzierte Spannung ist für die Ansteuerung des verwendeten BLDC Motors wichtig und wird im Kapitel 2.1.2.2 *Sensorlose Kommutierung* näher beschrieben.

Die folgende Tabelle zeigt die einzelnen Zustände mit dem Stromfluss in den Spulen. Außerdem werden die jeweils zu schaltenden Transistoren (siehe Abbildung 2.4) dargestellt.

Zustand	Phase U	Phase V	Phase W	Stromfluss	geschaltete Transistoren
1	PWM	Floating	GND	$U \rightarrow W$	T1 & T6
2	Floating	PWM	GND	$V \rightarrow W$	T3 & T6
3	GND	PWM	Floating	$V \rightarrow U$	T3 & T2
4	GND	Floating	PWM	$W \rightarrow U$	T5 & T2
5	Floating	GND	PWM	$W \rightarrow V$	T5 & T4
6	PWM	GND	Floating	$U \rightarrow V$	T1 & T4

Tabelle 2.1.: Spannungszustände mit Stromfluss

Diese Zustände werden immer wiederholt. Wird das PWM-Tastverhältnis oder die Höhe der Versorgungsspannung angehoben, so werden die einzelnen Zustände schneller durchgeschaltet. Dies führt zu einer Erhöhung der Motordrehzahl. Innerhalb eines Zyklus dreht sich der Rotor um einen Winkel von $\Delta\alpha = 36^\circ$ [1].

$$\Delta\alpha = \frac{60^\circ}{\text{Magnetpolpaare}} \cdot 6 = 36^\circ \quad (2.1)$$

Die Nummerierung der Zustände stellt die Abfolge der Kombinationen bei positiver Drehrichtung dar. Für eine negative Drehbewegung müssen die Zustände in umgekehrter Reihenfolge geschaltet werden.

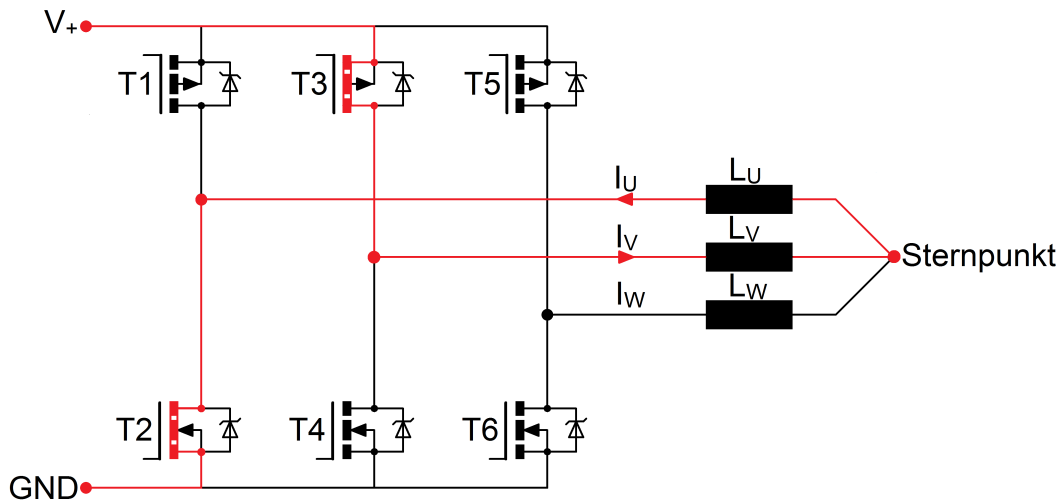


Abbildung 2.7.: Stromfluss Phase V \rightarrow Phase U

Die Abbildung 2.7 verdeutlicht den Stromfluss im dritten Zustand (Phase V \rightarrow Phase U). Über die in Abbildung 2.4 und 2.7 dargestellten Freilaufdioden, läuft nach dem Ausschalten des Motors der Strom frei, ohne dass Induktionsspannungen entstehen.

Das Weiterschalten der Phasenzustände wird Kommutierung genannt. Für die Kommutierung muss die Rotorposition erfasst werden. Hierfür gibt es allgemein zwei unterschiedliche Verfahren.

2.1.2.1. Sensorgesteuerte Kommutierung

Bei dieser Kommutierung werden Sensoren wie beispielsweise Hall Sensoren oder optische Sensoren zur Bestimmung der Rotorposition eingesetzt. Mit den Messdaten wird der genaue Zeitpunkt der Kommutierung bestimmt. Ein Vorteil der sensorgesteuerten Kommutierung ist, dass auch bei sehr geringen Drehzahlen die Rotorposition genau erfasst wird.

2.1.2.2. Sensorlose Kommutierung

Der verwendete BLDC Motor hat keine Sensorik zum Erkennen der Rotorposition verbaut. Somit muss eine sensorlose Kommutierung angewendet werden. Bei der sensorlosen Kommutierung wird durch das drehende Magnetfeld in der stromlosen Spule eine Gegenspannung induziert, die sogenannte Back Electromotive Force (BEMF). Neben dieser Gegenspannung wird für diese Kommutierung die Sternmittelpunktspannung der drei Phasen benötigt. Dazu werden $4,7\text{ k}\Omega$ Widerstände verwendet, die einen virtuellen Sternpunkt bilden. Mit diesen Informationen wird die Rotorposition bestimmt.

Für die Ansteuerung des BLDC Motors wird die Treiberplatine der Firma LXRobotics eingesetzt.

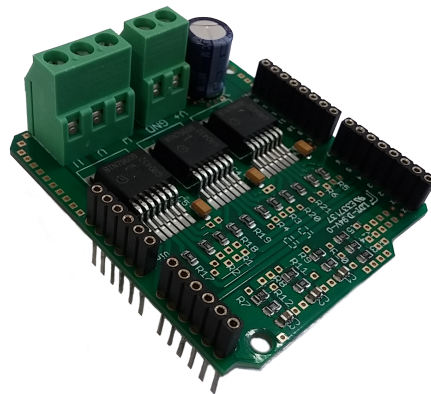


Abbildung 2.8.: BLDC Treiberplatine von LXRobotics

Diese Treiberplatine hat die benötigte Leistungselektronik verbaut und wird auf einen Arduino Uno gesteckt. Als Motortreiber werden IC-Bausteine der Firma Infineon verwendet (BTN7960B). Diese drei Bausteine haben unter anderem die in der Abbildung 2.4 dargestellten MOSFET Transistoren integriert.

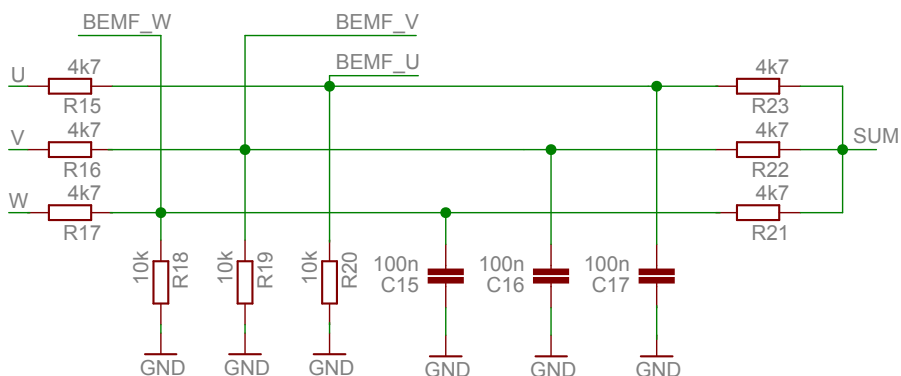


Abbildung 2.9.: BEMF-Schaltung integriert in der Treiberplatine von LXRobotics[3]

In diesem Schaltplan ist zu sehen, wie die Widerstände R21, R22 und R23 den virtuellen Sternpunkt bilden. Diese Mittelpunktspannung (SUM) wird mit einem Komparatoreingang vom Mikrocontroller verbunden. Um den Kommutierungszeitpunkt bestimmen zu können wird die Mittelpunktspannung mit jeweils einer der BEMF-Spannungen verglichen. Der bei dem Sensorsystem verwendete Mikrocontroller hat lediglich einen Analogkomparator.

Für die Kommutierung müssen jedoch alle drei BEMF-Spannungen nacheinander mit der Mittelpunktspannung verglichen werden. Hierfür muss ein Analog-Multiplexer verwendet werden.

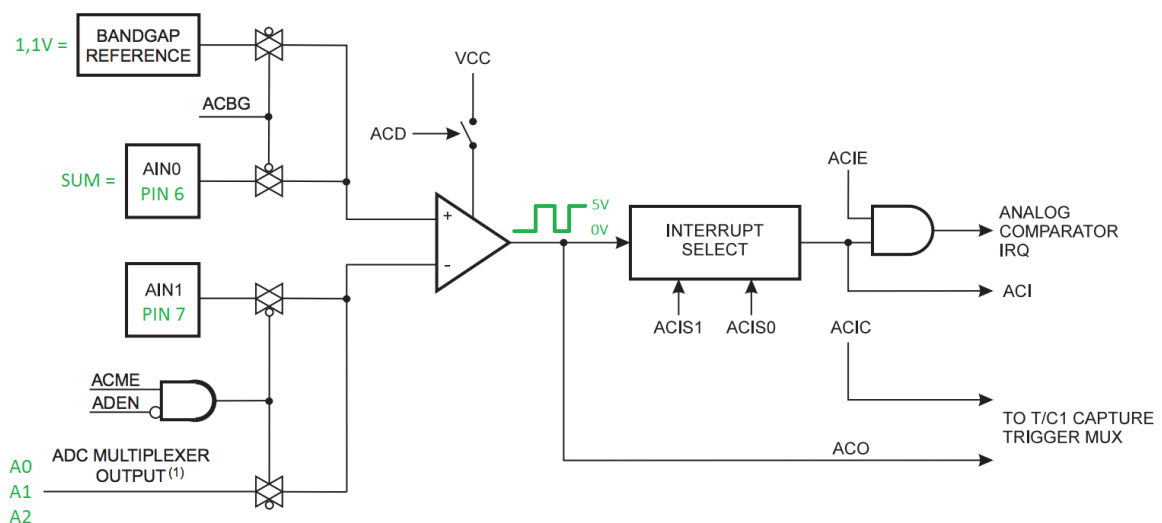


Abbildung 2.10.: Blockdiagramm Analog Komparator ATmega328P [6]

Abbildung 2.10 zeigt das Blockdiagramm des Analog Komparators eines Arduino Uno (Atmel 328P). Der Komparatoreingang AIN0 ist mit der Mittelpunktspannung verbunden. Der zweite Komparatoreingang ist mit dem Analog-Multiplexer des Mikrocontrollers verbunden. An den Analog-Eingängen A0, A1 und A2 liegen die BEMF-Spannungen an.

Sobald die induzierte BEMF-Spannung größer als die Mittelpunktspannung ist, liegt am Komparator-Ausgang 5 V an. Wenn hingegen die BEMF-Spannung kleiner als die Mittelpunktspannung ist, liegt am Komparator-Ausgang keine Spannung an (0 V).

Mit den Bits „ACIS1“ und „ACIS0“ wird entschieden, ob der sogenannte Analog Komparator-Interrupt bei einer steigenden oder fallenden Flanke des Komparators auslöst. Wenn dieser Interrupt auslöst, wird ein Zustand entsprechend der Tabelle 2.1.2, weiter geschaltet.

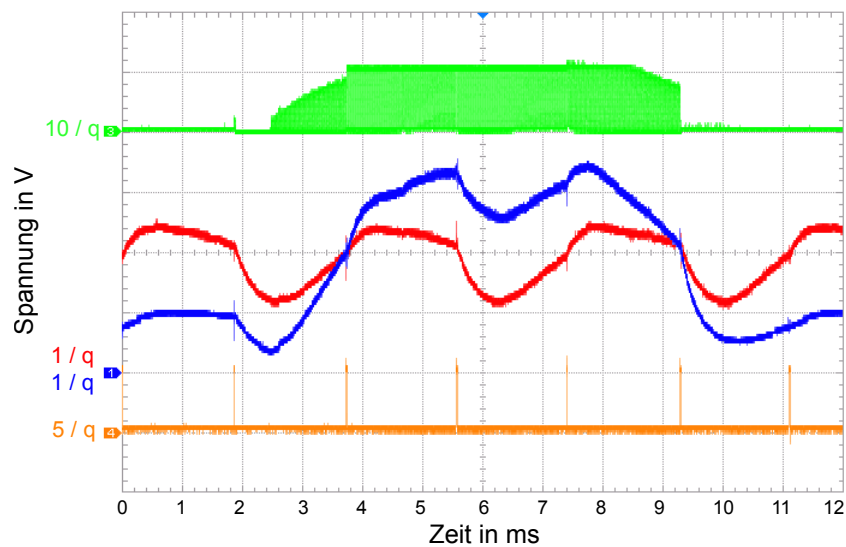


Abbildung 2.11.: Spannungsverlauf einer Spule mit BEMF- und Mittelpunktspannung ($q = \text{quadrat}$)

In der Abbildung 2.11 ist der Spannungsverlauf der Spule U (grün), die Mittelpunktspannung (rot), die BEMF Spannung (blau) und der Analog Komparator Interrupt (orange) dargestellt. Es ist erkennbar, dass sobald die BEMF-Spannung die Mittelpunktspannung über- bzw. unterschreitet, der Analog Komparator Interrupt auslöst wird. Die anderen Interrupts ($t = [1,8 \text{ ms}; 5,6 \text{ ms}; 7,4 \text{ ms}; 11,1 \text{ ms}]$) gehören zu den nicht dargestellten Phasen V und W.

Damit ein BLDC Motor in diesem geregelten Betrieb verwendet werden kann, muss der Rotor zunächst eine definierte Startposition einnehmen. Sobald der Rotor stillsteht, wird keine Spannung in der stromlosen Spule induziert und dadurch lässt sich die Position des Rotors nicht bestimmen. Damit der Rotor eine definierte Startposition einnimmt, werden die Spulen so bestromt, dass durch zwei Spulen ein positiver und durch eine Spule ein negativer Gleichstrom fließt. Somit wird ein definiertes Magnetfeld erzeugt und der Rotor nimmt eine definierte Startposition ein. Danach kann der Motor, entsprechend der Zustandstabelle 2.1.2, geregelt geschaltet werden.

Der Spannungsverlauf der einzelnen Spulen beim Anlauf des BLDC Motors ist in folgender Abbildung dargestellt.

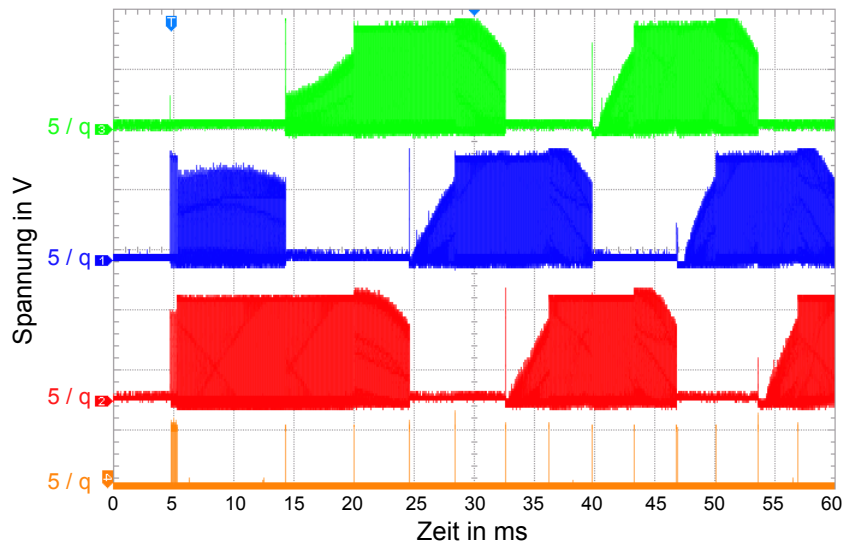


Abbildung 2.12.: Spannungsverlauf beim Anlauf des BLDC Motors (q = Quadrat)

2.2. Magnetencoder

Damit der Drehwinkel des BLDC Motors genau bestimmt werden kann, wird zusätzlich ein Encoder verwendet. Für das Sensormodell wurde der Magnetencoder *NSE-5310* der Firma *austriamicrosystems* (AMS) (Abb. 2.13(a)) verwendet. Der genutzte Magnetring (Abb. 2.13(b)) ist lediglich von einer Seite magnetisiert und besteht aus 128 Magneten mit einer Polweite von jeweils 1mm. Die Messwerte werden über den I²C-Bus¹ ausgelesen.

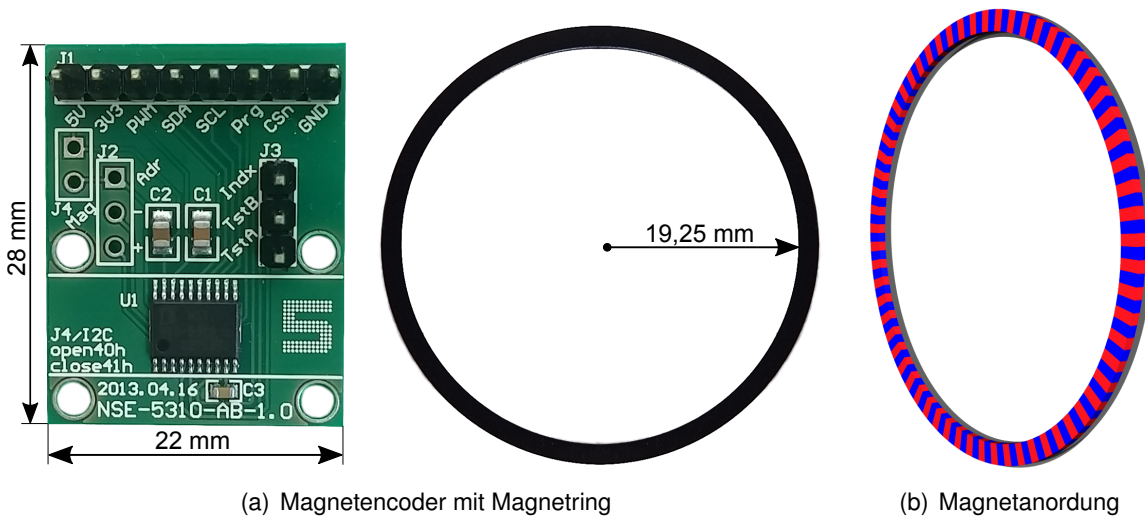


Abbildung 2.13.: AMS NSE-5310 Magnetencoder mit Magnetring

2.2.1. Funktionsprinzip

Der verwendete Magnetencoder nutzt den sogenannten Hall-Effekt. Befindet sich ein stromdurchflossener Leiter oder Halbleiter innerhalb eines senkrecht wirkenden Magnetfeldes, so wird eine Spannung aufgebaut. Diese Hallspannung ist proportional zur Flussdichte des senkrecht wirkenden Magnetfeldes.

¹I²C: Inter-Integrated Circuit - Ein von Philips Semiconductors entwickelter Datenbus

Der NSE-5310 hat acht Hall-Elemente integriert (siehe Abb. 2.14). Die Länge dieser Hall-Elemente definieren dabei die Größe der einsetzbaren Polweite des Magneten. Mit dem NSE-5310 können ausschließlich Magnetringe oder Magnetbänder mit einer Polweite von 1mm verwendet werden.

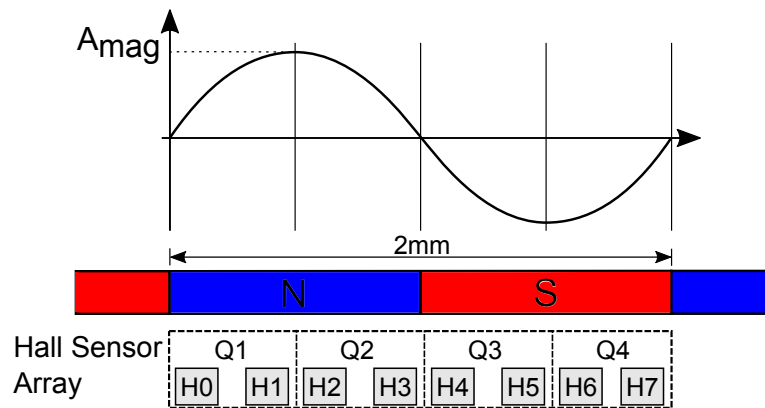


Abbildung 2.14.: Aufbau Hall Sensor Array [5]

Die Hall-Elemente werden in vier Quadranten eingeteilt. Rotiert ein Ringmagnet über dieses Hall Array, so erhält man ein um 90° phasenverschobenes sinusförmiges Signal. Aus dieser Information wird der Drehwinkel des Ringmagneten bestimmt.

Der Sensor hat pro Magnetpaar eine Auflösung von 12 Bit. Dies bedeutet, dass der Sensor pro Magnetpaar 4096 Messwertänderungen erkennt. Der verwendete Magnetring besteht aus 64 Magnetpaaren und somit ergibt sich pro Umdrehung eine Winkelauflösung $\Delta\alpha$ von 0.00137° pro Schritt.

$$\Delta\alpha = \frac{360^\circ}{n \cdot 2^{bit}} = \frac{360^\circ}{64 \cdot 2^{12}} = 0,001373^\circ \quad (2.2)$$

Die Auflösung eines Sensors darf nicht mit der Genauigkeit verwechselt werden. Die Genauigkeit bei einem Encoder, gibt die Abweichung des gemessenen Winkelwertes vom tatsächlichen Winkel an. Messungenauigkeiten können beispielsweise durch:

- vertikale Abstandsschwankungen zwischen IC und Magneten
- nichtlinearität des Analog Digital Wandler
- ungenaue Magnetpollängen
- Temperaturschwankungen

hervorgerufen werden. Externe magnetische Störfelder, wie zum Beispiel von dem BLDC-Motor erzeugte Magnetfelder, werden überwiegend automatisch vom Sensor unterdrückt.

Die Umlaufgeschwindigkeit des Magnetrings darf laut Hersteller bei maximal 0,65 m/s liegen. Die Grenzdrehfrequenz ist somit abhängig vom Radius des Magnetrings und liegt bei $n_{\max} = 5,109$ Hz.

$$v = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot n \quad (2.3)$$

(mit r = mittlerer Magnetringsradius)

$$n_{\max} = \frac{v_{\max}}{2 \cdot \pi \cdot r} = \frac{0,65 \frac{m}{s}}{2 \cdot \pi \cdot 20,25 mm} = 5,109 \frac{1}{s} \quad (2.4)$$

Wird ein Magnetring wie in Abbildung 2.13(b) dargestellt verwendet, lässt sich nur eine relative Winkelposition bestimmen. Für eine absolute Winkelbestimmung wurde ein weiterer Hall-Effekt Sensor (siehe Abbildung 2.15) verbaut. Dieser Sensor wird verwendet um die 0-Punkt Position zu ermitteln.



Abbildung 2.15.: Hall-Effekt Sensor Hamlin 55100

Ein Neodym Magnet (10,0 x 5,0 x 3,0 mm) wurde so an dem BLDC-Motor befestigt, so dass der Hamlin 55100 möglichst in der Mitte eines Magnetpaares des Magnetrings auslöst. Ein ausführlicher Test diesbezüglich wird im Kapitel 4.1.2 beschrieben.

Damit der Magnetencoder über einen Winkelbereich von 360° sinnvoll verwendet werden kann, wird noch eine Information über das aktuell gemessene Magnetpaar benötigt.

Hierzu muss der Sensor zunächst programmiert und in dem sogenannten *Sync-Mode* betrieben werden.

2.2.2. Programmierung

Der Magnetencoder hat einen wichtigen Anschluss mit der Bezeichnung *Index*. Dieser Anschluss hat ohne eine Programmierung des Sensors keine Funktionalität.

Der Magnetencoder besitzt ein One Time Programmable Register (OTP). Wie die Bezeichnung des Registers zeigt, besteht die Möglichkeit das Register nur einmal zu beschreiben. Dies bedeutet, dass nach dem einmaligen programmieren des Sensors die Einstellungen im Register nicht mehr geändert werden können. Da der Sensor gegebenenfalls für spätere Projekte verwendet werden soll, wurde von dieser Funktion abgesehen. Der Magnetencoder kann jedoch auch bei jedem Startvorgang des Mikrocontrollers programmiert und eingestellt werden.

Für die Programmierung des OPT-Registers müssen die Pins CSn (chip select), PDIO (programming digital input output) und CLK (clock) angesteuert werden.

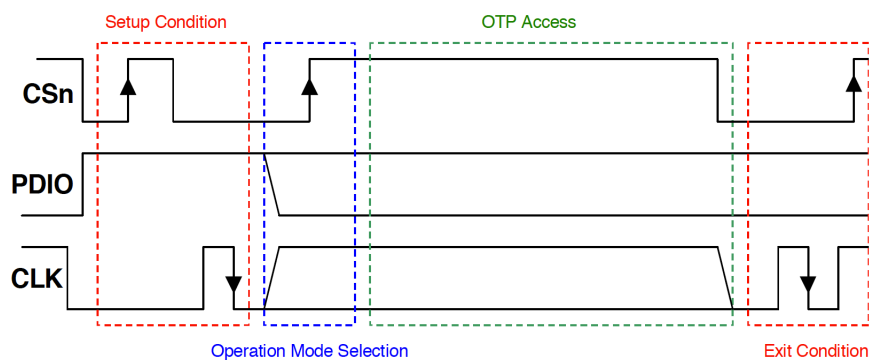


Abbildung 2.16.: Programmierabfolge NSE-5310 Sync Mode [4]

In der Abbildung 2.16 ist die Programmierabfolge des Magnetencoders zu sehen. Mit der Abschnitt *Operation Mode Selection* kann ausgewählt werden ob beispielsweise der Sensor beschrieben oder ausgelesen werden soll. Die *Setup-* und *Exit Condition* sind bei jedem Zugriff auf das OPT-Register identisch. Damit der Magnetencoder im *Sync-Mode* betrieben wird, sind die Bits „Md0“ und „Md1“ im Abschnitt *OTP Access* zu setzen. Eine Übersicht über das OTP-Register befindet sich im Anhang dieser Arbeit. Sobald diese beiden Bits gesetzt wurden, gibt der Magnetencoder bei jedem Übergang in ein neues Magnetpaar eine positive Flanke auf dem *Index* Pin aus. Dieses Signal wird von einem Mikrocontroller über eine Interrupt Service Routine (ISR) erfasst und anschließend wird eine Index-Variable hochgezählt. Somit lässt sich der Winkel über einen Bereich von 360° bestimmen. Der Winkel α wird mit folgender Formel berechnet:

$$\alpha = \left(\frac{\text{Messwert}}{2^{\text{bit}}} + \text{Index} \right) \cdot \frac{360^\circ}{\text{Magnetpaare}} \quad (2.5)$$

$$\alpha = \left(\frac{\text{Messwert}}{4096} + \text{Index} \right) \cdot 5,625^\circ \quad (2.6)$$

2.3. Distanzsensor

Für die Distanzmessung wurde der Lidar Lite V2 der Firma *PulsedLight* verwendet. Lidar steht im Allgemeinen für *Light detection and ranging*. Der Sensor wird ebenfalls wie der Magnetencoder über die I²C Schnittstelle angesprochen. Laut Herstellerangaben ist der Sensor für Distanzmessungen bis zu 40 m geeignet und lässt sich bis zu einer Messfrequenz von 500 Hz einsetzen. Der Sensor soll dabei eine Messgenauigkeit von $\pm 2,5$ cm haben.

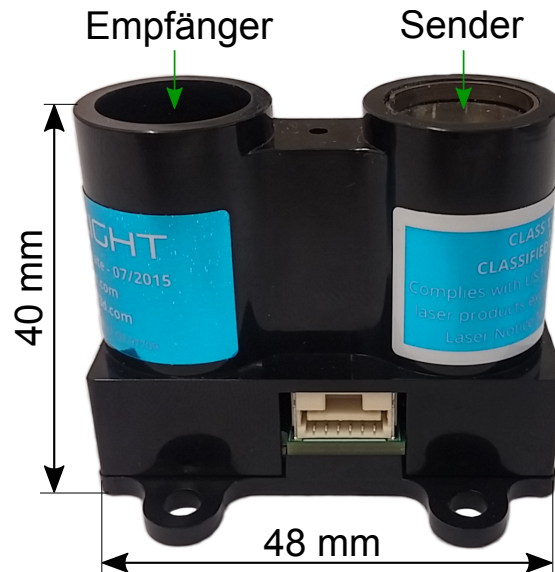


Abbildung 2.17.: Lidar Lite V2

2.3.1. Funktionsprinzip

Der Lidar Lite V2 verwendet das Time of Flight (TOF) Messverfahren. Hierbei sendet der Emitter eine kurze Infrarot Pulsfolge, mit einer Wellenlänge von 905 nm, aus. Das Licht wird an der Oberfläche des anvisierten Objektes reflektiert und ein Teil wird wieder in Sensorrichtung zurückgesendet. Dort trifft der Infrarot Lichtimpuls auf den Detektor, welcher den Zeitpunkt des Eintreffens registriert. Die Abbildung 2.18 soll dies verdeutlichen.

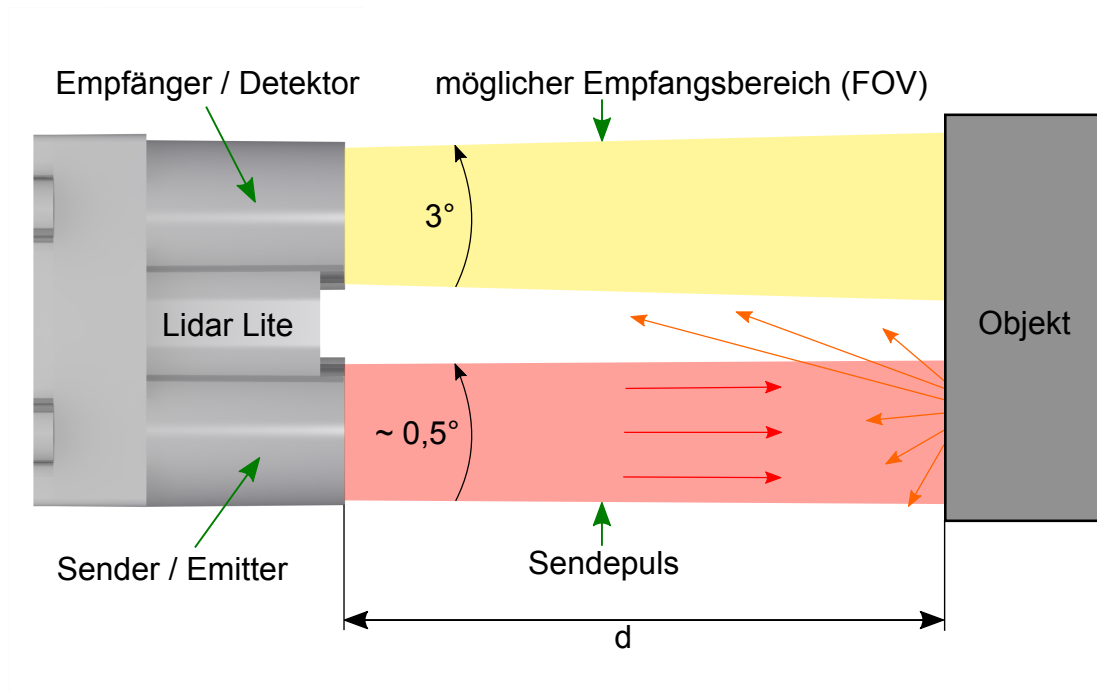


Abbildung 2.18.: Messprinzip und FOV vom Lidar Lite

Durch den Zeitversatz Δt zwischen Aussendung und Detektion des Lichtimpulses wird die Entfernung d zum Objekt über folgende Formel berechnet:

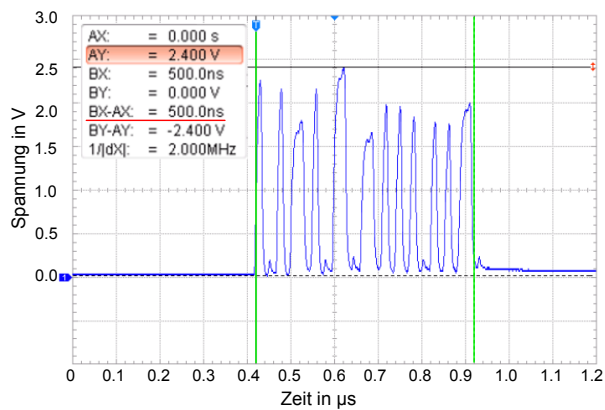
$$d = \frac{c \cdot \Delta t}{2 \cdot n} \quad (2.7)$$

Hierbei entspricht c der Lichtgeschwindigkeit für elektromagnetischer Wellen im Vakuum ($c = 299.792.458 \frac{m}{s}$). Der Brechungsindex n für elektromagnetische Wellen in dem Medium Luft liegt bei etwa 1,000269[9]. Aufgrund der hohen Lichtgeschwindigkeit wird eine sehr präzise Zeitmessung benötigt. Bei einer Entfernung von beispielsweise 1 m zwischen dem Distanzsensors und dem anvisierten Objekt benötigt der Lichtimpuls vom Aussenden bis zur Ankunft am Detektor lediglich 6,67 ns.

$$\Delta t = \frac{d \cdot 2 \cdot n}{c} = \frac{1m \cdot 2 \cdot 1,000269}{299.792.458 \frac{m}{s}} = 6,673 \times 10^{-9}s \quad (2.8)$$

Wie in der Abbildung 2.18 zu sehen hat der Empfänger des Distanzsensors ein Sichtfeld (englisch: field of view, FOV) von 3° . Der Sendepuls breitet sich in einem Winkel von $\sim 0,5^\circ$ aus.

Um einen ausgesendeten Infrarot Lichtimpuls anschaulich darstellen zu können, wurde der *Si Baised Detektor DET10A/M* des Firma Thorlabs verwendet (siehe Abbildung 2.19 (b)). Dieser Detektor hat eine hochempfindliche Avalanche-Photodiode (APD) verbaut, mit der Lichtimpulse mit einer Wellenlänge von 200 bis 1100 nm im Nanosekundenbereich erfasst werden können. Angeschlossen wurde der Detektor mit einem 50Ω Abschlusswiderstand an ein Oszilloskop.



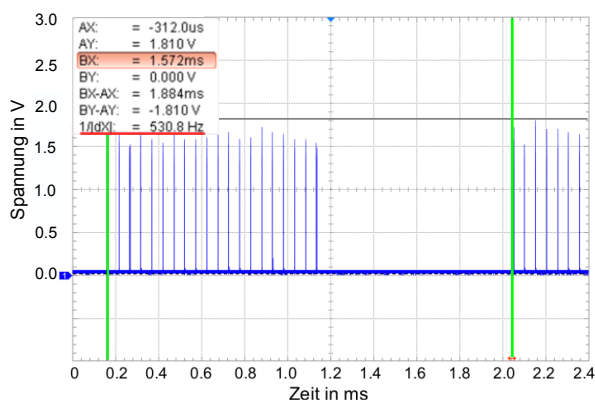
(a) Einzelpuls



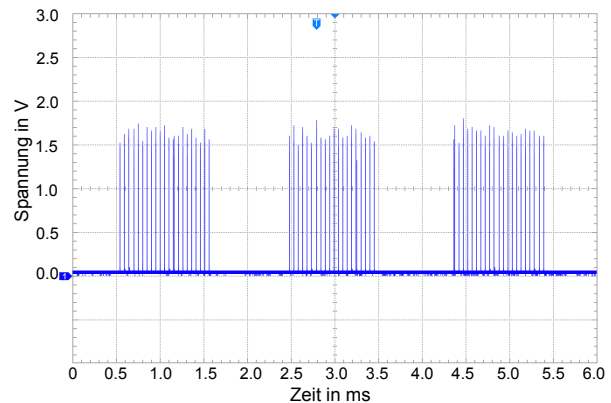
(b) APD mit Abschlusswiderstand

Abbildung 2.19.: Einzelner Sendeimpuls vom Lidar V2 gemessen mit einer APD

In der Abbildung 2.19 (a) ist ein einzelner Lichtpuls dargestellt. Mit dem Oszilloskop wurde eine Pulsweite von 500 ns gemessen, welche auch so im Datenblatt angegeben ist. Ein Lichtimpuls wird in einem sogenannten Pulse train ausgesendet, in dem mehrere Einzelpulse hintereinander ausgesendet werden (siehe Abbildung 2.20 (b)).



(a) Maximale Frequenz



(b) Pulse train

Abbildung 2.20.: Maximale Messfrequenz und Pulse train

Ein Pulse train besteht aus maximal 256 Pulsen. Die Anzahl an Pulsen wird vermutlich von der Entfernung zwischen Distanzsensor und dem anvisierten Objekt abhängig sein. Die Messungen wurden bei einer Entfernung von etwa 40 cm durchgeführt. Bei dieser geringen Entfernung besteht ein Pulse train aus lediglich zwanzig Pulsen. Weiterhin wurde überprüft, mit welcher maximalen Frequenz der Lidar Lite V2 abgefragt werden kann. Laut Datenblatt liegt diese Frequenz bei maximal 500 Hz. Die Messung hat jedoch gezeigt, dass die maximale Abtastrate bei 531 Hz liegt (siehe Abbildung 2.20 (a)). Die Auswirkungen von der Entfernung zwischen Sensor und anvisiertem Objekt auf die Abtastrate wird in Kapitel 4.1.1 weiter behandelt. In dem Kapitel 4.1.1 wird der Distanzsensor auch auf seine Genauigkeit überprüft. Hierfür wurden Referenzmessungen eines genaueren Laser-Entfernungsmessers benötigt. Für diese Referenzmessungen wurde der *Bosch GLM 50 Professional* verwendet.



Abbildung 2.21.: Bosch GLM 50 Professional

Dieser Laser-Entfernungsmesser nutzt ein anderes Funktionsprinzip. Bei diesem Sensor wird eine Phasendifferenzmessung durchgeführt. Hierbei werden modulierte elektromagnetische Wellen über einen Strahlteiler aufgeteilt, wobei das am Strahlteiler reflektierte Signal direkt vom Detektor erfasst wird. Das transmittierte Signal wird vom anvisierten Objekt reflektiert und anschließend vom Detektor erfasst. Der Strahlverlauf bei Verwendung eines Strahlteiler ist in Abbildung 3.1 (b) dargestellt. Aus der Phasenverschiebung $\Delta\varphi$ der beiden Signale wird der zurückgelegte Weg d des Signales errechnet.

$$d = \frac{\Delta\varphi \cdot \lambda}{4\pi} \quad (2.9)$$

Dabei ist λ die Wellenlänge des modulierten Signals [12] (635 nm). Aufgrund dieses Funktionsprinzip, hat der Bosch Sensor eine Genauigkeit von $\pm 1,5$ mm mit einem Messbereich von 0,05 m bis 50 m.

2.4. Mikrocontroller

Für die Ansteuerung des BLDC Motors und zur Datenerfassung der Sensoren wurde ein Arduino Uno verwendet. Dieses Entwicklungsboard hat den 16 MHz Mikrocontroller *ATmega328P* verbaut.

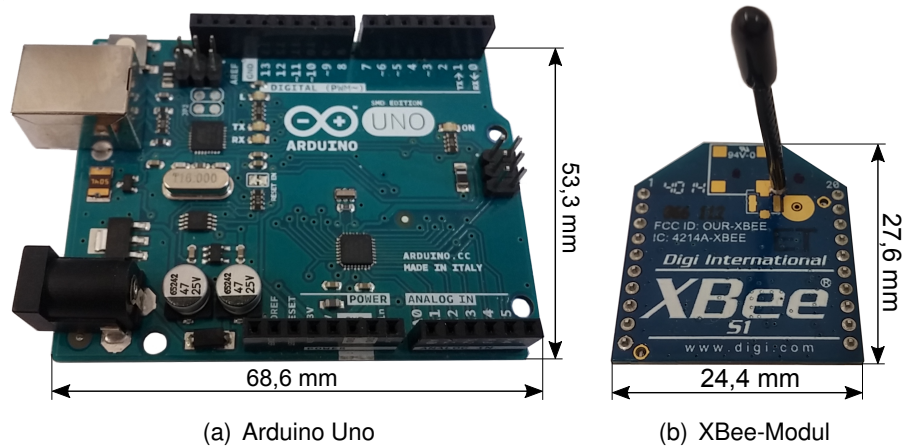


Abbildung 2.22.: Entwicklungsboard mit XBee-Modul

In der Abbildung 2.22 (b) ist ein XBee-Modul zu sehen, welches für eine Funk-Datenübertragung verbaut wurde. Zur Übersicht aller verbauten Bauteile wurde folgendes Blockdiagramm angefertigt:

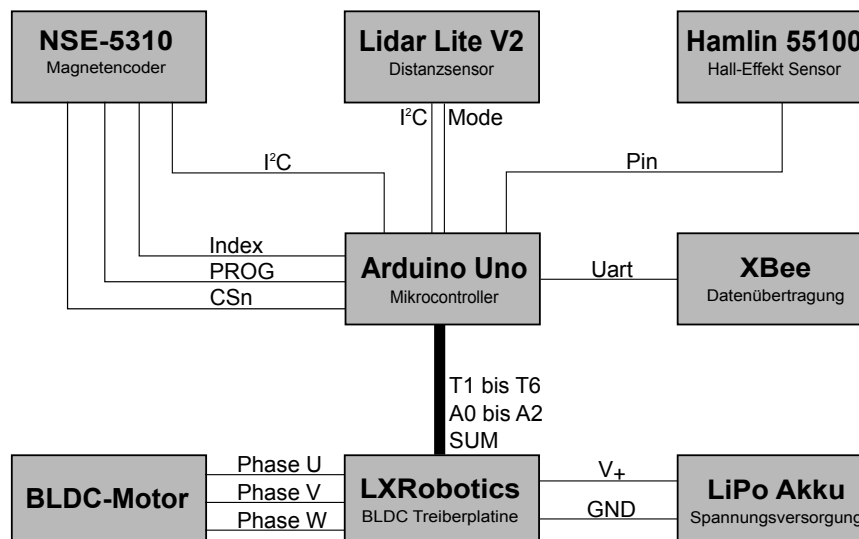


Abbildung 2.23.: Blockdiagramm

3. Systemumsetzung

In diesem Kapitel wird die Systemumsetzung des 2D-Laserscanner beschrieben. Zunächst wurde überprüft, ob der Distanzsensor durch die Hohlwelle des BLDC Motors Messungen durchführen kann. Dies ist ohne Eingriff in den Strahlenverlauf des Distanzsensor jedoch nicht möglich, da der Abstand zwischen Sende- und Empfangseinheit des Distanzsensor zu groß ist. Der Sensor gibt aufgrund von Reflexionen am Motor ausschließlich Fehlmessungen aus. Damit eine Messung durch die Hohlwelle des BLDC Motors möglich ist, müssen die Sende- und Empfangssignale näher zusammengeführt werden. Dazu wurde wie in Abbildung 3.1 (a) vereinfacht dargestellt zunächst versucht den Sendepuls mit einem Spiegel und einem Strahlteiler zu überlagern. Mit einem Strahlteiler wird ein einfallender Lichtstrahl in zwei Strahlen geteilt. (siehe Abb. 3.1 (b))

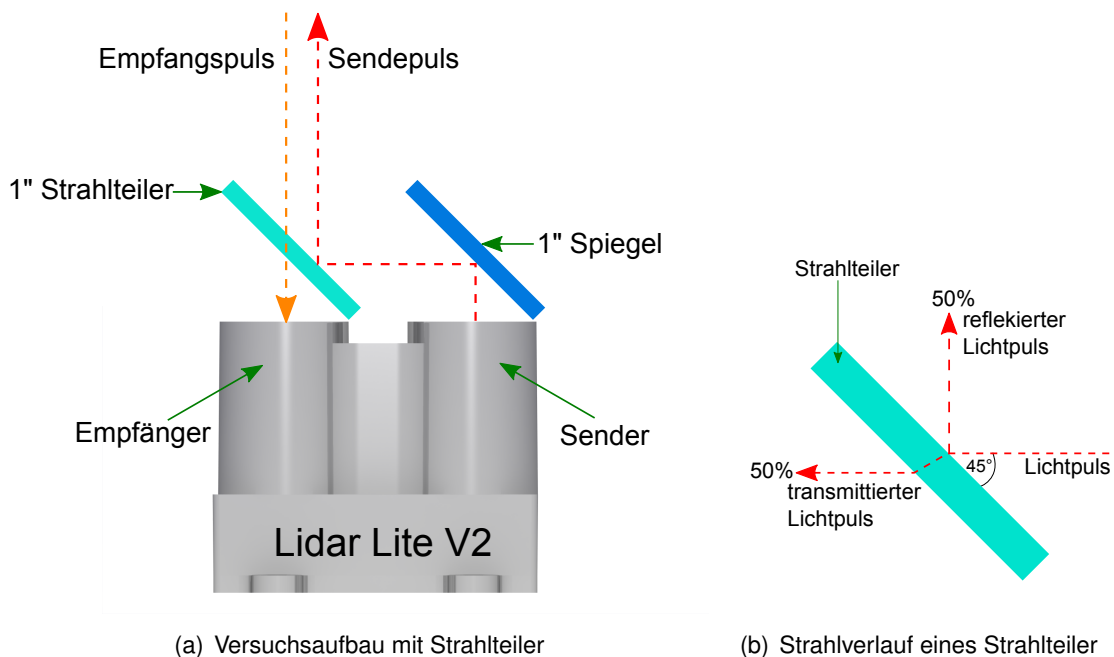


Abbildung 3.1.: Vereinfachter Signalverlauf bei Verwendung eines Strahlteiler

Dieser Aufbau funktioniert jedoch nicht, da vermutlich durch eine Rückreflektion des ersten transmittierten Impulses eine Fehlmessung ausgelöst wird. Ein großer Nachteil bei der Ver-

wendung eines Strahlteiler ist jedoch, dass maximal 25% der Lichtintensität bei dem Empfänger ankommen, da ein Impuls zweimal auf den Strahlteiler trifft.

Um das Problem zu umgehen, wurden weitere Versuche mit Spiegeln durchgeführt. Die Abbildung 3.2 zeigt einen funktionierenden Versuchsaufbau, um den Sende- und Empfangspuls näher zusammenzuführen.

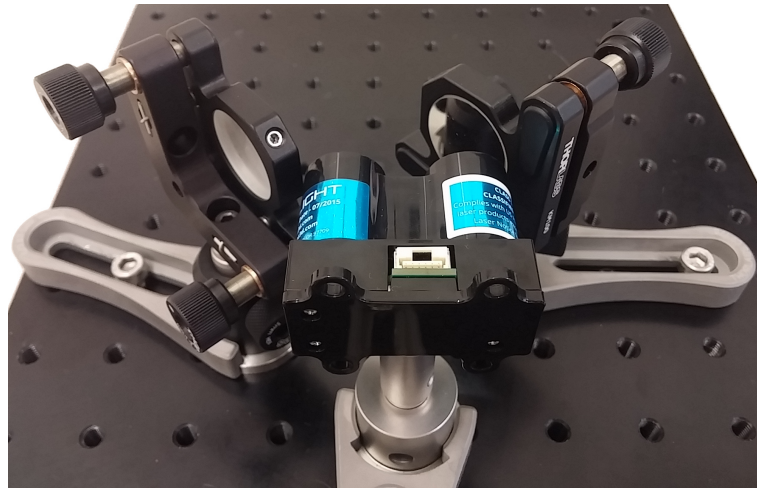


Abbildung 3.2.: Versuchsaufbau für die Zusammenführung des Sende- und Empfangspuls

Bei dem erstellten Spiegeladapter, welcher in Abbildung 3.3 dargestellt ist, konnte unter Verwendung von kleineren quadratischen 0,5" Spiegel eine noch kompaktere Bauweise gewählt werden.

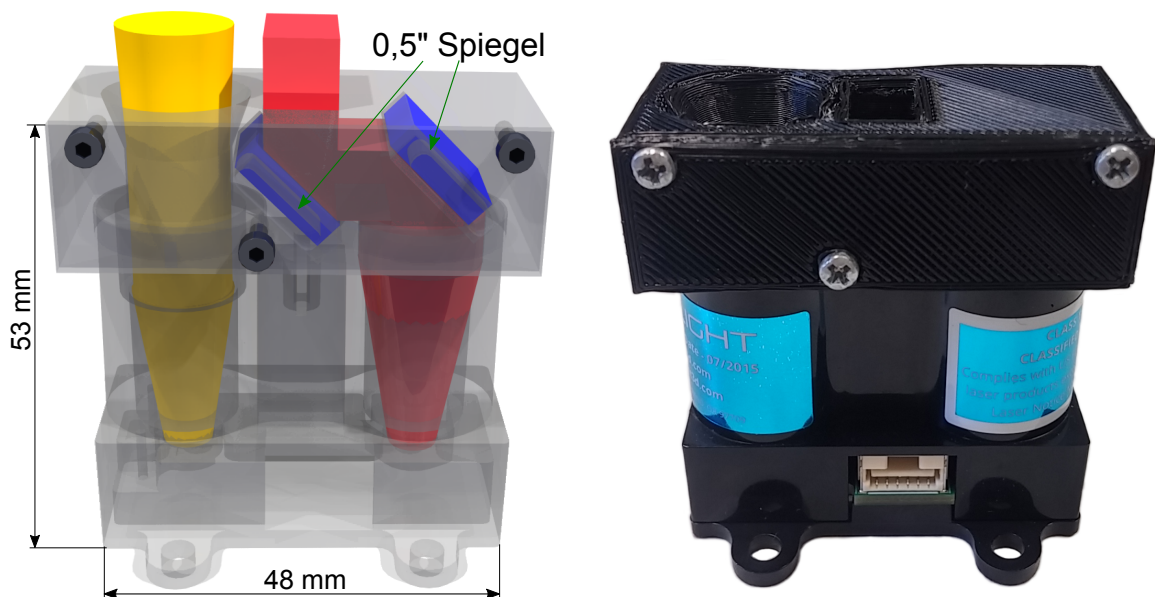


Abbildung 3.3.: Spiegeladapter für die Zusammenführung des Sende- und Empfangssignals

Der Spiegeladapter wurde so konstruiert, dass dieser auf den Distanzsensor steckbar ist. In der Abbildung 3.3 ist der Sendepuls in rot dargestellt. Der mögliche Empfangsbereich des reflektierten Pulses ist in gelb dargestellt.

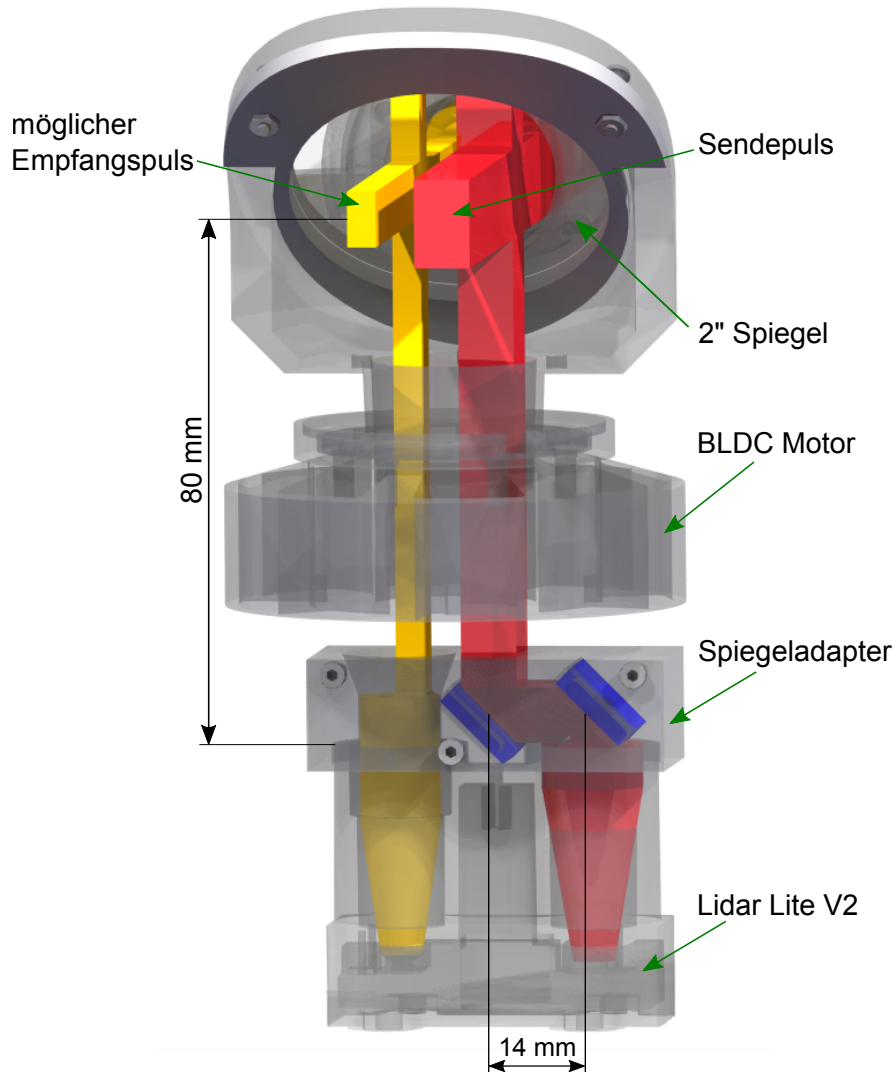


Abbildung 3.4.: Darstellung des Strahlenverlaufs

Die Abbildung 3.4 soll den gesamten Strahlenverlauf darstellen. Hierbei ist wieder der Sendepuls rot dargestellt. Der in gelb abgebildete mögliche Empfangspuls wurde nur vereinfacht dargestellt. An den Rotor des BLDC Motors ist in einem 45° Winkel zum Strahlenverlauf ein 2" Spiegel angebracht. Die Messdatenbasis ist bei dem Lidar Lite standardmäßig die Unterseite des Sensors. Um die Basis der Distanzmessung auf die Höhe des 2" Spiegels zu verschieben, muss ein Offsetwert eingestellt werden. In der vertikalen liegt der Offset des

Strahlenverlaufs bei 2 x 80 mm, in der horizontalen bei 14 mm. Es ergibt sich somit ein gesamter Offset von 174 mm. Dieser Offsetwert wird gerundet auf 17 cm in einem Register des Lidar Lite V2 gespeichert und bei jeder Distanzmessung vom Messwert abgezogen.

Weiterhin wurde der laufzeitbedingte Winkeloffset der I²C Datenübertragung berücksichtigt. Der Mikrocontroller wurde so programmiert, dass sobald eine Distanzmessung gemacht wurde, der aktuelle Winkel abgespeichert wird. In der Zeit zwischen diesen beiden Datenübertragungen dreht sich jedoch der BLDC Motor kontinuierlich weiter. Mit Hilfe eines Oszilloskops wurde eine durchschnittliche Differenzzeit $\Delta t = 300\mu s$ zwischen der Datenübertragung des Distanzsensor und dem Magnetencoder gemessen. Wird eine Spannungsversorgung an den 2D Laserscanner angeschlossen dreht der BLDC Motor zunächst auf seine eingestellte Drehzahl hoch. Diese Drehzahl ist vorerst nicht bekannt (siehe Kapitel 2.1.2). Unter Verwendung des Magnetencoder und dem einfachen Hall-Effekt Sensor wird die Motordrehzahl n erfasst. Anschließend wird mit folgender Formel der laufzeitbedingte Winkeloffset $\Delta\alpha$ der I²C Datenübertragung berechnet:

$$\Delta\alpha = n \cdot 360^\circ \cdot \Delta t \quad (3.1)$$

Dieser Offsetwert wird in einer Variablen gespeichert und bei jeder Winkelmessung des BLDC Motors berücksichtigt.

3.1. Konstruktion

In der Abbildung 3.5 ist die Explosionszeichnung des finalen 2D Laserscanners zu sehen.

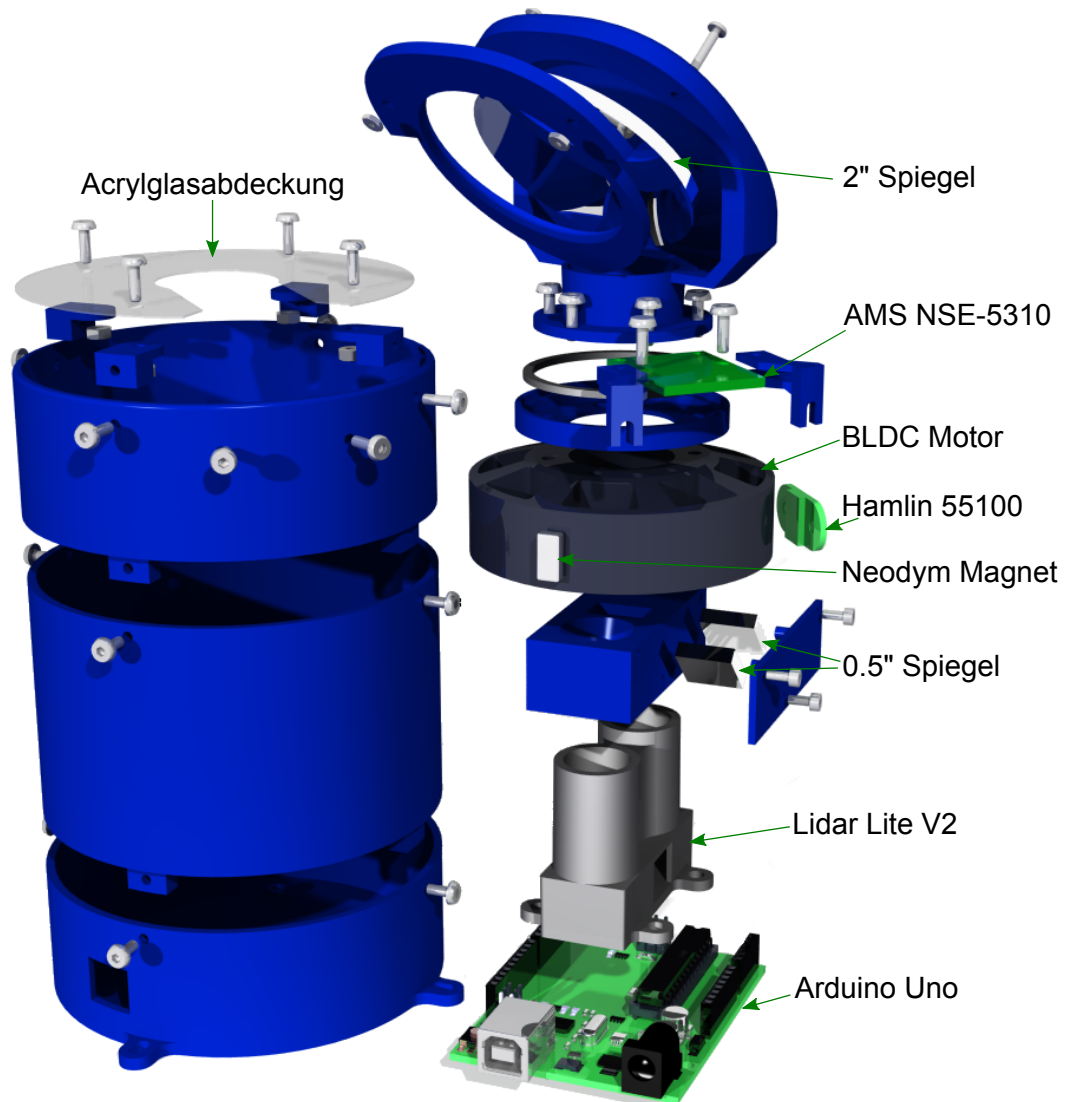


Abbildung 3.5.: Explosionszeichnung

Alle blau eingefärbten Bauteile wurden mit einem 3D-Drucker, dem Makerbot Raplikator 2X, erstellt. Mit diesem 3D-Drucker lassen sich unterschiedliche Materialien drucken. Bei den Bauteilen für den 2D-Laserscanner wurde Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) verwendet. Dieser Kunststoff ist sehr stabil und lässt sich gut bearbeiten. Damit das Gehäuse möglichst geschlossen ist, wurde eine Acrylglasabdeckung erstellt. Diese Abdeckung wurde mit einem

CO₂ Lasercutter des Unternehmens *Universal Laser Systems* aus 1 mm dicken Acrylglas geschnitten.



Abbildung 3.6.: Finaler Aufbau des 2D-Laserscanner

Die Abbildung 3.6 zeigt den finalen 2D-Laserscanner. Hierbei ist in (a) ein CAD-Rendering und in (b) der zusammengebaute Laserscanner zu sehen. Für die Spannungsversorgung des 2D Laserscanners kann entweder ein Netzteil oder ein Akkumulator bis zu einer maximalen Spannung von 14,8 V verwendet werden.

Zu Beginn der Konstruktionsphase war angedacht, ein komplett geschlossenes System zu erstellen, in dem alle beweglichen Bauteile nicht berührt werden können.



Abbildung 3.7.: 2D-Laserscanner mit Acrylglasabdeckung

In der Abbildung 3.7 ist in (a) ein CAD-Rendering und in (b) der 2D-Laserscanner mit einer Acrylglasabdeckung zu sehen. Dieser Aufbau funktioniert jedoch nicht, da an dem Acrylglasrohr Reflexionen Fehlmessungen auslösen. Versuche haben ergeben, dass durch eine konisch zulaufende Acrylglasabdeckung Distanzmessungen möglich wären. Der Grund hierfür ist vermutlich, dass die erste Reflexion so weit abgelenkt wird, dass sie vom Empfänger des Distanzsensor nicht mehr erkannt wird. Da eine solche Abdeckung weder hergestellt oder gekauft werden konnte, wurde lediglich eine einfache Abdeckung, wie in Abbildung 3.6 zu sehen, erstellt.

Die Tabelle 3.1 soll einen Überblick über die ungefähren Kosten des 2D-Laserscanners inklusive Mehrwertsteuer geben.

Komponente	Preis in €
BLDC	65,00
Treiberplatine	40,00
Magnetencoder von AMS	14,00
Magnetring	2,00
Hall Sensor für absolut Position	9,00
Distanzsensor LIDAR-Lite V2	120,00
Arduino Uno	24,00
Spiegel: 1x2" rund	37,00
2x0.5" quadratisch	29,00
Sonstiges (Druckmaterial, Pegelwandler, Schrauben, elektrische Bauteile)	20,00
Gesamtkosten	360,00

Tabelle 3.1.: Kostenübersicht 2D-Laserscanner

3.2. Programmierung

In diesem Abschnitt wird die Programmstruktur des 2D-Laserscanners beschrieben. Die grundlegende Programmstruktur setzt sich bei der Programmierung eines Arduinos aus zwei Methodenblöcken zusammen. Die erste Methode *setup()* wird bei dem Programmstart genau einmal ausgeführt. Hier werden die Grundeinstellungen vorgenommen. Anschließend an die *setup()* Methode wird die *loop()* Methode ausgeführt. Diese Methode beinhaltet den eigentlichen Programmablauf, welcher ständig wiederholt wird.

Die *setup()* Methode ist bei dem 2D-Laserscanner wie folgt strukturiert:

- Zunächst werden alle benötigten GPIO (general purpose Input/Outputs) definiert.
- Anschließend wird der Magnetencoder programmiert, so dass der *Sync-Mode* aktiv ist.
- Hiernach folgt die Konfiguration des Distanzsensors. Dabei werden zwei wichtige Einstellungen vorgenommen.
 - Zum einen wird der Messwertoffset von 17 cm des Laserscanners abgespeichert.

- Außerdem wird der Distanzsensors so konfiguriert, dass wenn eine neue Distanzmessung ausgeführt wurde, eine positive Flanke am *Mode-Pin* ausgegeben wird. Diese Flanke wird mit einem Interrupt-Pin erfasst.
- Im Anschluss daran wird der BLDC Motor angesteuert. Ist die variable eingestellte Drehfrequenz des Motors erreicht, wird mit Hilfe des Magnetencoders die Motordrehzahl bestimmt. Hiermit wird der laufzeitbasierte Winkeloffset der I²C Datenübertragung berechnet.

Die *loop()* Methode ist wie folgt aufgebaut:

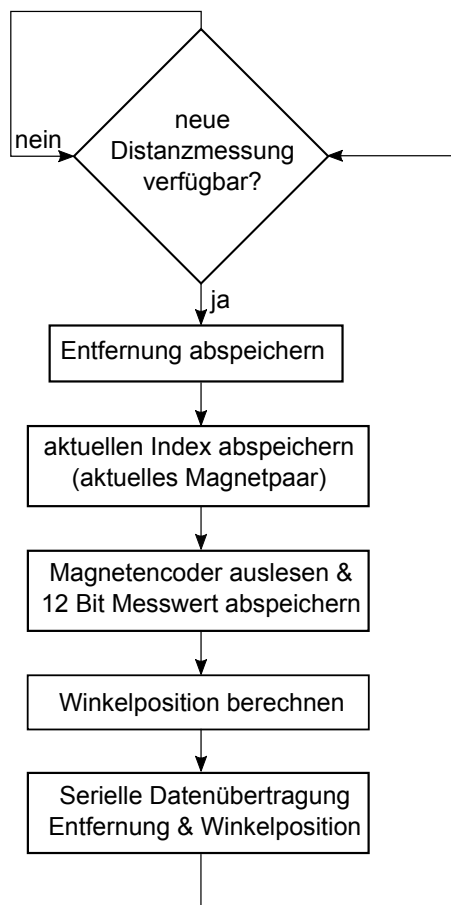


Abbildung 3.8.: Programmabfolge der *loop()* Methode

In der *loop()* Methode wird auf die Flanke für einen neuen Messwert des Distanzsensors gewartet. Sobald ein neue Distanzmessung verfügbar ist, wird dieser in einer Variable abgespeichert. Anschließend wird die Winkelposition bestimmt. Diese Informationen werden über eine Serielle Schnittstelle (wahlweise USB oder Funk) übertragen. Dieser Vorgang wiederholt sich wieder, sobald eine neue Distanzmessung verfügbar ist .

4. Auswertung

In diesem Kapitel werden zunächst die verbauten Sensoren auf ihre Zuverlässigkeit und Genauigkeit geprüft. Außerdem werden die Messdaten des 2D-Laserscanners aufgenommen in einer Testumgebung in einem kartesischen Diagramm dargestellt. Anschließend wird ein SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) Algorithmus vorgestellt. Hierbei wird eine Karte in einer unbekanntem Umgebung erstellt, wobei zu jeder Zeit die Position des Sensors innerhalb dieser Karte bestimmbar ist. Diese Methode ist vor allem bei der Hinderniserkennung nützlich. Zunächst werden in Kapitel [4.3](#) die theoretischen Grundlagen dieser Methode beschrieben. Anschließend werden SLAM-Testmessungen mit dem erstellten Sensorsystem und einem 2D-Laserscanner der Firma Hokuyo verglichen.

4.1. Systemkomponenten

Zuerst wurden unterschiedliche Tests mit dem Distanzsensor und dem Magnetencoder durchgeführt, um ihre Zuverlässigkeit und Genauigkeit zu überprüfen.

4.1.1. Distanzsensor

Für die erste Entfernungstestmessung wurde der 2D-Laserscanner auf einem Stativ befestigt. Der Laserscanner wurde senkrecht zu einer Betonmauer mit Hilfe des Bosch GLM 50 Professional (siehe [Abb. 2.21](#)) ausgerichtet. In einem Entfernungsbereich von 1 m - 25 m wurden in jeweils 1 Meter Abständen 100.000 Messpunkte aufgenommen.

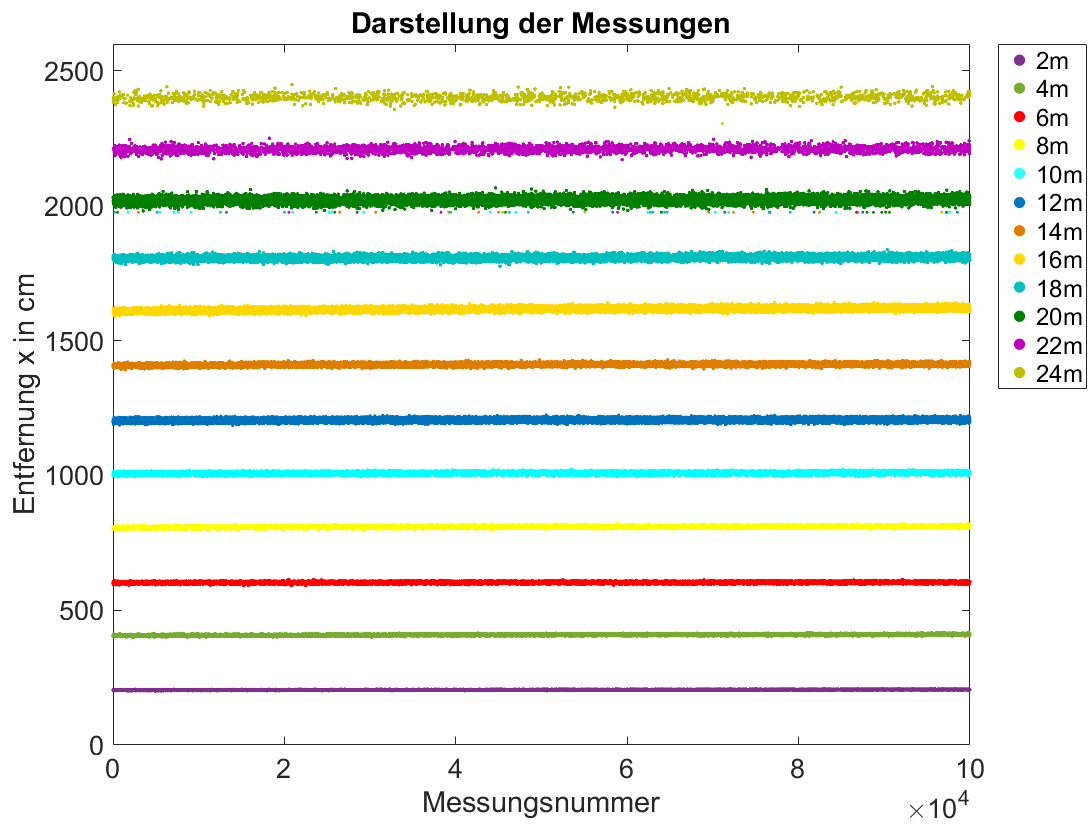


Abbildung 4.1.: Entfernungsmessung in 2 Meter Intervallen

Zur Übersichtlichkeit wurden in dem Diagramm die Messpunkte nur in 2 Meter Intervallen dargestellt. In dem Diagramm ist mit zunehmender Entfernung ein deutliches Rauschen des Distanzsensors zu erkennen.

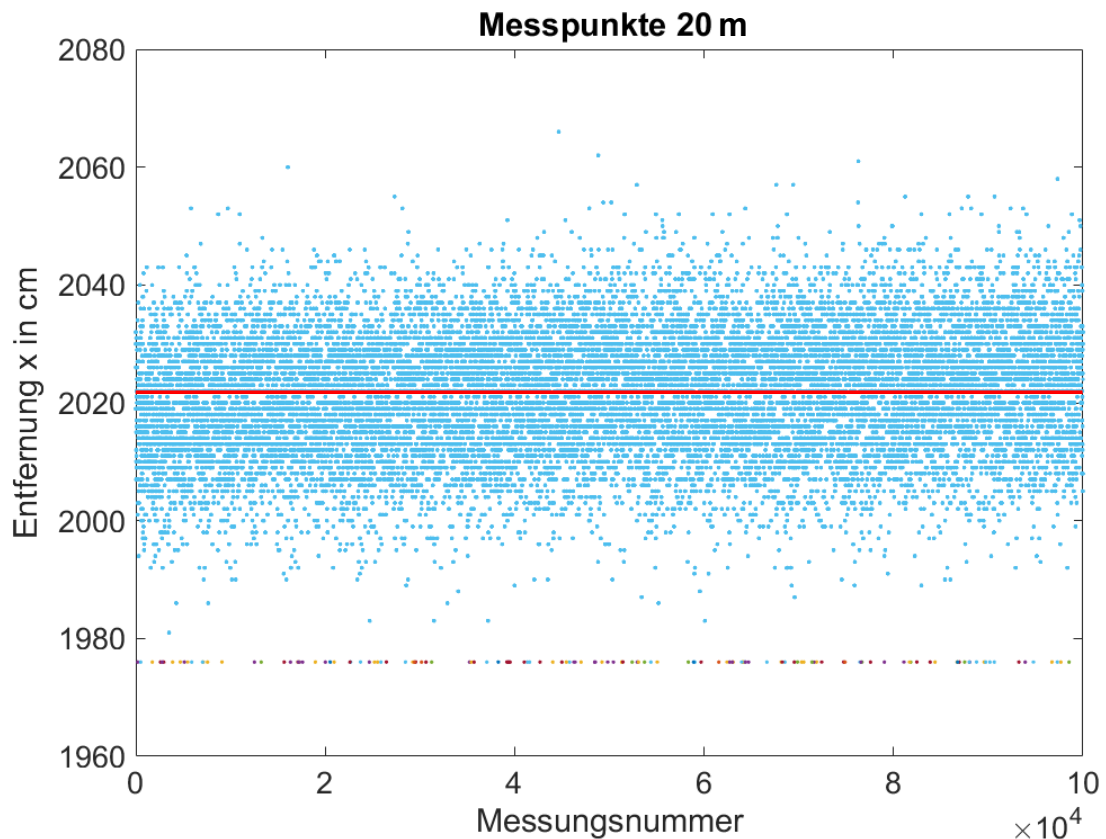
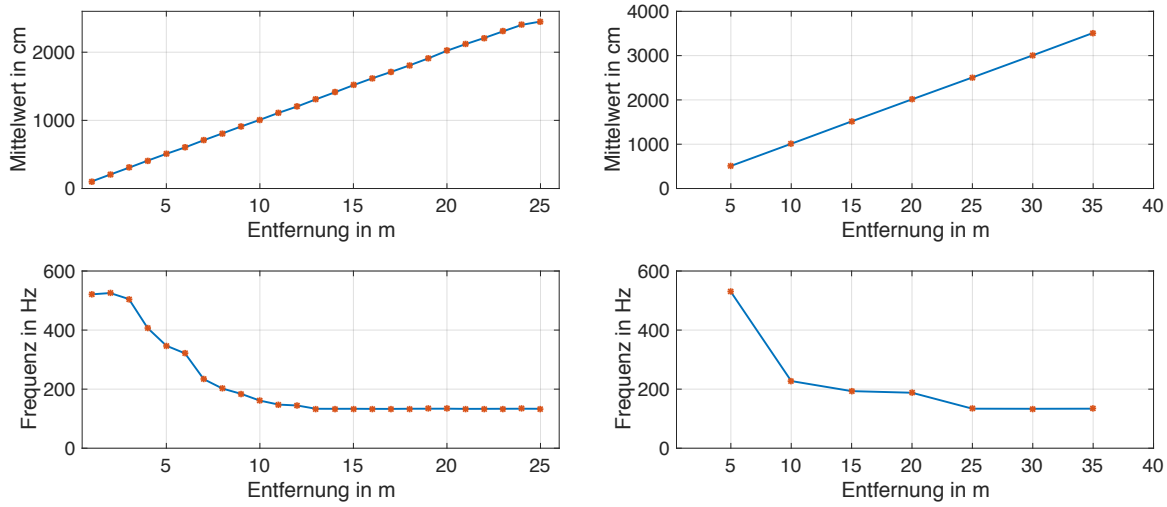


Abbildung 4.2.: Messpunkte bei 20 Meter Entfernung

In Abbildung 4.2 werden die Messpunkte bei einer Entfernung von 20 Metern dargestellt. Die Messwerte weichen im Mittel 22 cm von der effektiven Entfernung ab. Auffällig in dem Diagramm sind die Messpunkte bei einer Entfernung von 1976 cm. Diese Messpunkte stammen unter anderem auch aus den verschiedenen Messreihen und stellen Fehlmessungen dar. Insgesamt wurden 2,5 Millionen Messpunkte über alle Entfernungen aufgenommen, wobei jedoch nur 133 mal diese spezielle Fehlmessung auftreten ist. Diese Fehlmessungen treten nur auf, sobald der Spiegeladapter (siehe Abb. 3.3) verwendet wird. Außerdem gibt es noch weitere Fehlmessung, welche häufig bei größeren Distanzen auftreten. Hierbei gibt der Lidar Lite entweder einen Wert unter 70 cm oder einen Wert weit über der Maximalreichweite aus. Die nicht zulässigen Werte wurden bei der Systemumsetzung herausgefiltert.

Für eine Überprüfung, ob unterschiedliche Oberflächen des anvisierten Objektes, Auswirkungen auf die Genauigkeit oder Zuverlässigkeit des Sensor haben, wurde eine weitere Entfernungsmessungen durchgeführt. Hierbei wurde der Laserscanner senkrecht zu einer lackierten Tür ausgerichtet. In einem Entfernungsbereich von 5 m - 35 m wurden in jeweils 5 Meter Abständen wieder 100.000 Messpunkte aufgenommen.

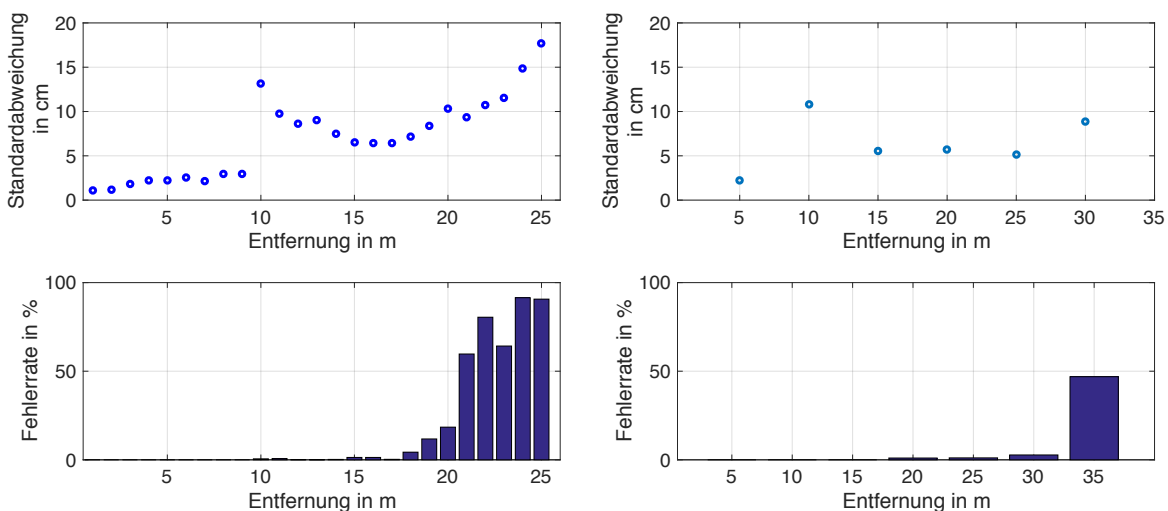


(a) raue Betonmauer

(b) lackierte Tür

Abbildung 4.3.: Mittelwert und Messfrequenz bei unterschiedlichen Oberflächen des anvisierten Objektes

In der Abbildung 4.3 sind jeweils die Mittelwerte und die Messfrequenz für die einzelnen Entfernungsmessungen dargestellt. Auffällig hierbei ist, dass die Messfrequenz des Distanzensors nicht konstant ist. Die Messfrequenz ist abhängig von der Entfernung zum Objekt, sowie von der Oberfläche des anvisierten Objektes. Maximal erreicht der Distanzsensor eine Frequenz von 530 Hz und die minimale Abtastrate liegt bei 133 Hz.



(a) raue Betonmauer

(b) lackierte Tür

Abbildung 4.4.: Standardabweichung und Messfehler bei unterschiedlichen Oberflächen des anvisierten Objektes

Die Abbildung 4.4 zeigt die Standardabweichung der Messwerte und den Messfehler bei den beiden anvisierten Objekten. Bei der Distanzmessung, in der das anvisierte Objekt die lackierte Tür war, ist ein Messbereich von 0-30 m möglich. Der maximale Fehler liegt in diesem Bereich immer unter 2 %. Bei einer Messdistanz von 35 m lag der Messfehler bereits bei 49 %. In der Messreihe, in der das anvisierte Objekt die Betonmauer war, ist eine sinnvolle Messung lediglich in einem Bereich von 0-20 m möglich. Der Grund für die geringere Reichweite wird an der größeren Streuung des Lichtimpulses an der rauen Betonmauer liegen.

Auswirkungen von Sonnenlicht oder anderen Lichtquellen, wie zum Beispiel einer Taschenlampe, auf den Messwert konnten nicht festgestellt werden. Durchsichtige Objekte, wie zum Beispiel Glas oder Acrylglas werden solange sie sauber und plan sind, nicht erkannt.

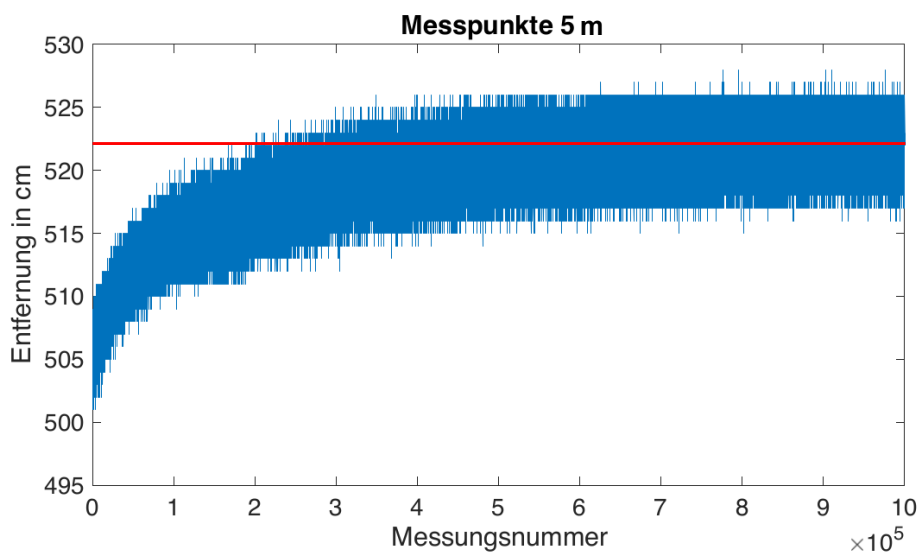


Abbildung 4.5.: Messwertdrift bei einer 5 Meter Testmessung (Messdauer $t = 32$ min)

Bei einer Entfernung von 5 m wurden eine Million Messpunkte aufgenommen, wobei die gesamte Messung rund 32 Minuten dauerte. In der Abbildung ist deutlich ein Messwertdrift zu erkennen. Nach etwa 22 Minuten (Messungnr. 700.000) ist kein weiterer Drift des Messwertes erkennbar. Der stationäre Mittelwert liegt bei 522 cm. Dieser Messwertdrift ist temperaturabhängig. Wird der Distanzsensord über einen längeren Zeitraum verwendet, erwärmt sich das Gehäuse des Distanzsensors deutlich.

4.1.2. Magnetencoder

Die Genauigkeit des Magnetencoders ist aufgrund der hohen Auflösung des Sensors schwierig zu überprüfen. Zunächst wurde überprüft, ob der Magnetencoder über einen Winkelbereich von 360° alle 64 Magnetpaare erkennt. Dazu wurde anstatt des Distanzsensor ein Punktlaser verbaut. Mit Hilfe des an die Wand projektieren Punktlasers wurde eine Markierung erstellt, die den Startpunkt darstellt. Der BLDC-Motor wurde anschließend so angesteuert, dass nachdem 64 Magnetpaare erkannt wurden, der Motor wieder stoppt. Selbst nach mehreren Stunden Testlauf stoppte der BLDC Motor immer an der gleichen Winkelposition, wobei der Punktlaser deckungsgleich mit der vorher erstellten Startpunkt Markierung war. Dieser Test wurde bei einer Motordrehzahl von 1,5 Hz und der Maximaldrehzahl von 4,3 Hz durchgeführt.

Außerdem wurde überprüft ob der Hall-Effekt Sensor (Hamlin 55100, Abb. 2.15) immer innerhalb eines Magnetpaares des Magnetringes auslöst. Diese Messung ist wichtig um sicherzustellen, dass immer innerhalb des gleichen Magnetpaares die Index-Variable zurückgesetzt wird, um somit eine eindeutige 0-Punkt Position zu erhalten. Dazu wurde der BLDC-Motor jeweils mit unterschiedlichen Drehzahlen angesteuert. Sobald der Hamlin 55100 den Neodym-Magnet erkannt hat, wird ein Interrupt aufgerufen, in dem der Magnetencoder (AMS NSE5310) ausgelesen wird.

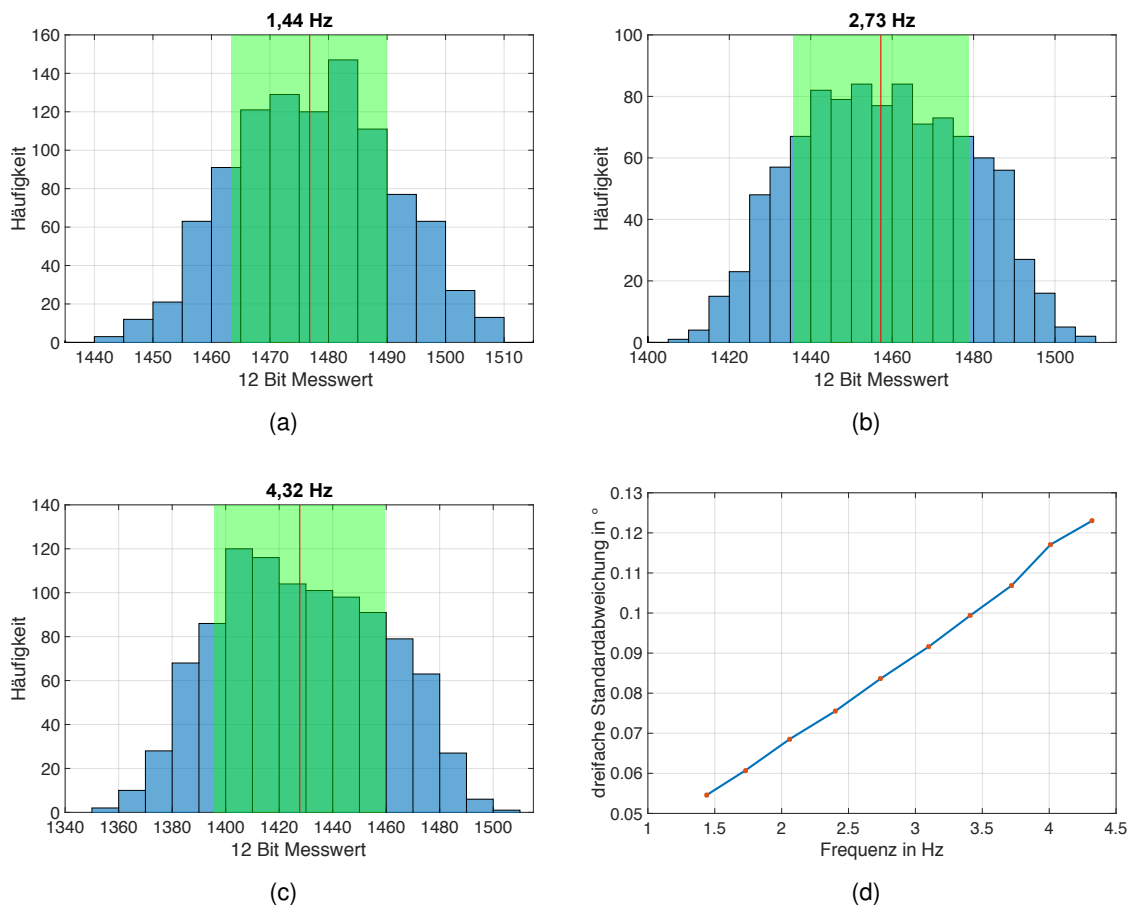


Abbildung 4.6.: (a-c) Histogramm bei unterschiedlichen Motordrehzahlen und (d) Standardabweichung über den gesamten Drehzahlbereich

In der Abbildung 4.6 (a-c) sind Histogramme zu dieser Testmessung dargestellt. Dabei wird auf die X-Achse der 12 Bit Messwert des Magnetencoders abgebildet, die Y-Achse zeigt die Häufigkeit des einzelnen Messwertes. Bei jeder Messung wurden 1000 Messpunkte aufgenommen. Das grüne Intervall zeigt die einfache Standardabweichung. Die Standardabweichung beschreibt die Streubreite aller Messwerte rund um dessen Mittelwert (rote vertikale Linie). Bei der einfachen Standardabweichung (σ) befinden sich 68,3 % der Messpunkte in diesem Intervall.

Außerdem zeigt die Abbildung 4.6 (d) die dreifache Standardabweichung (3σ) in Grad über das gesamte Drehzahlband. Bei der dreifachen Standardabweichung befinden sich 99,73 % der Messpunkte in diesem Intervall. Ein Magnetpaar des Magnetrings deckt einen Winkelbereich von $5,625^\circ$ ab ($360^\circ / 64$ Magnetpaare). Die höchste dreifache Standardabweichung liegt bei lediglich $\pm 0,123^\circ$ bei der Maximaldrehfrequenz des Motors. Somit wird immer eindeutig innerhalb eines Magnetpaares die Index-Variable zurückgesetzt. Dieses Magnetpaar definiert den 0-Punkt.

4.2. Kartesische Darstellung der Messwerte

Neben der Testmessungen der einzelnen Systemkomponenten wurden die Messwerte des 2D-Laserscanners anschaulich in einem kartesischen Diagramm dargestellt. Als Testumgebung wurde der Labor Raum 101 Berliner Tor 11 der Hochschule für angewandte Wissenschaften in Hamburg verwendet.



Abbildung 4.7.: Testumgebung Labor Raum 101 Berliner Tor 11 der HAW

Für diese Auswertung wurde ein Matlab-Script erstellt, in dem zunächst die Entfernungsinformationen mit den dazugehörigen Winkelpositionen über die serielle USB-Schnittstelle eingelesen werden. Da diese Informationen in Polarkoordinaten vorliegen, wurden alle Daten in kartesische Koordinaten umgerechnet.

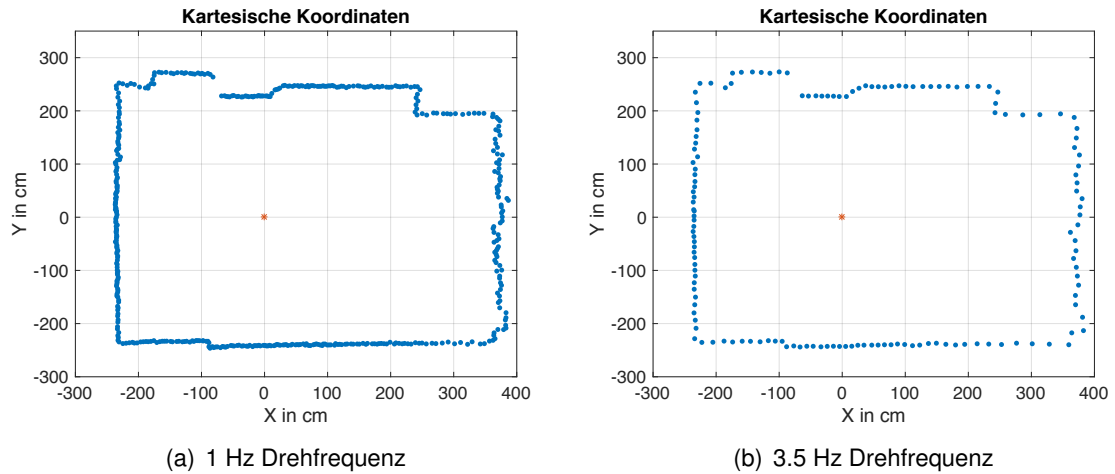


Abbildung 4.8.: Darstellung kartesischer Koordinaten Labor Raum 101 bei unterschiedlicher Motordrehzahlen

Die Abbildung 4.8 zeigt die kartesischen Koordinaten des Labor Raumes 101 bei unterschiedlichen Motordrehzahlen. Der rote Punkt stellt die Position des 2D-Laserscanners im Laborraum dar. Es ist deutlich erkennbar, dass mit zunehmender Motordrehzahl weniger Messpunkte pro Umdrehung dargestellt werden.

4.3. Simultaneous Localization and Mapping

Ein großes Forschungsgebiet innerhalb der Robotik ist das automatische Erstellen von unbekanntem Umgebungskarten. Für diese Kartierung können verschiedene Simultaneous Localization and Mapping (SLAM, deutsch: Simultane Lokalisierung und Kartenerstellung) Algorithmen verwendet werden. Neben der Kartierung einer unbekanntem Umgebung ist es möglich die Position des Sensorsystems innerhalb der erstellten Karte zu bestimmen. Es gibt viele verschiedene SLAM Algorithmen, welche unterschiedlichste Sensordaten benötigen. Je nach Einsatzgebiet werden beispielsweise Stereo-Kamerasysteme, Laserscanner oder Ultraschallsensoren verwendet. In dieser Arbeit wurde der Iterative Closest Point (ICP) Algorithmus verwendet. Dieser Algorithmus benötigt lediglich Entfernungsinformationen einer 2D-Ebene. Die Berechnung für Kartierung und Lokalisierung, kann nicht vom Arduino Uno übernommen werden, da diese Aufgaben einen deutlich höheren Rechenaufwand benötigen. Der Mikrocontroller wird ausschließlich für die Ansteuerung des BLDC Motors und zur Datenerfassung der Sensoren verwendet. Die Sensordaten werden über das folgende Protokoll an einen leistungsstärkeren Computer gesendet.

Byte	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Name	Magic Number				Version	State	Winkel			Entfernung				
ASCII	U	A	V	L										
HEX	4C	56	41	55	01									
Datentyp	uint32				uint8	uint8	float			float				
Besch.							Winkel in Grad AMS NSE 5310			Entfernung in Zentimeter Lidar Lite V2				

Tabelle 4.1.: Protokoll der Datenübertragung

Das sechste Byte mit dem Namen *State* stellt die 0-Punkt Position des 2D Laserscanners dar. Diese Position wird wie schon beschrieben über den Hall-Effekt Sensor (Hamlin 55100) erfasst. Wird der am BLDC befestigte Magnet vom Sensor erkannt, wird in dem Byte *State* eine eins übertragen, ansonsten eine null. Für die Verwendung des ICP Algorithmus wird das C++ MRPT (Mobile Robot Programming Toolkit) benutzt.

4.3.1. Iterative Closet Point

Das MRPT umfasst einige C++ Bibliotheken, welche für unterschiedliche SLAM Verfahren eingesetzt werden können. Bei dieser Arbeit wurde ausschließlich der ICP Algorithmus verwendet. Diese Methode wird verwendet um die Transformationsparameter, welche durch die

Verschiebung zweier korrespondierender Punktwolken P und P^* entstehen, bestimmen zu können. Hierfür wird für jeden Messpunkt p_i aus der Punktwolke P der Abstand zu dem Messpunkt p_i^* der Punktwolke P^* berechnet. Die Transformationsparameter, welche aus einer Rotation R und einer Translation t bestehen, werden so angepasst, so dass die Summe der Fehlerfunktion minimiert wird.

$$E(R, t) = \sum_{i=1}^N \| p_i - (Rp^* + t) \|^2 \quad (4.1)$$

Diese Fehlerfunktion wird solange ausgeführt, bis E einen definierten Grenzwert unterschritten hat oder eine vorher festgelegte maximale Anzahl an Iterationen durchgeführt wurde. Bei dem MRPT kann für die Berechnung der Transformationen unterschiedliche Verfahren, wie zum Beispiel das Levenberg-Marquardt-Verfahren, verwendet werden. Auf die genaue mathematische Herleitung dieser Verfahren wird in dieser Arbeit aber verzichtet.

Bei dem hier verwendeten ICP Algorithmus werden die vom Magnetencodier erfassten Winkelpositionen leider nicht berücksichtigt. Alle Distanzmessungen pro Umdrehung werden lediglich auf einen Winkelbereich von 360° gleichverteilt. Diese Gleichverteilung hat negative Auswirkung auf die Kartierung, welche in den nachfolgenden Testmessung deutlich ersichtlich sind.

4.3.2. Vergleich mit dem Hokuyo UTM-30LX

Damit eine Aussage über die Qualität der Messungen gemacht werden kann, wird das erstellte Sensorsystem mit dem 2D-Laserscanner des Herstellers Hokuyo verglichen. Die Abbildung 4.9 zeigt den eingesetzten Hokuyo UTM-30LX mit seinem schematischen Aufbau. Auffällig ist, dass der Sender und Empfänger des Distanzsensors getrennt verbaut wurden. Der Laserscanner hat einen Erfassungswinkel von 270° . Ein weiterer Unterschied zum erstellten Laserscanner ist, dass als Motorencoder ein optischer Inkrementalgeber verbaut ist.

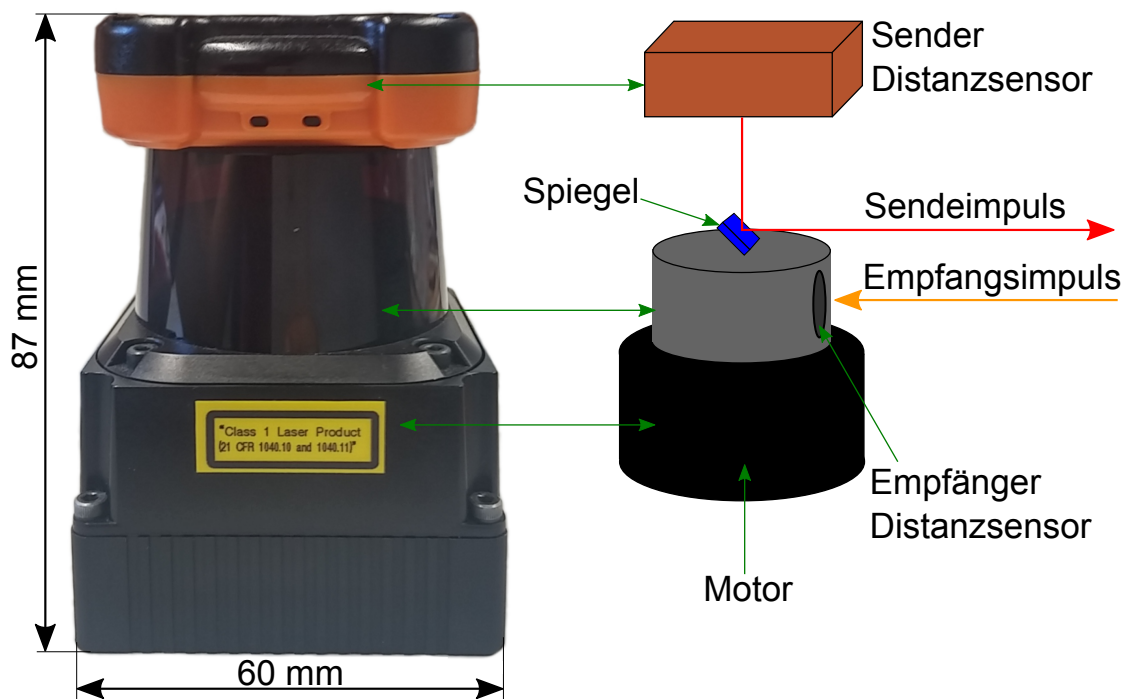


Abbildung 4.9.: Hokuyo UTM-30LX mit schematischem Aufbau

Ein wesentlicher Vorteil des Hokuyo UTM-30LX ist die konstant hohe Abtastrate des Distanzsensors. In der Tabelle 4.2 werden die wesentlichen technischen Daten der beiden Laserscanner dargestellt.

	Hokuyo UTM-30LX	erstellter 2D-Laserscanner
Erfassungsbereich	0,1 bis zu 30m	0,7 bis zu 30m ¹
Frequenz der Entfernungsmessungen	konst. 43.240 Hz	min 133 Hz max 530 Hz
Drehfrequenz des Motors	40 Hz	1 Hz bis 4,3 Hz
Erfassungswinkel	270°	360°
Winkelauslösung	0,25° (360°/1.440 steps)	0,001373° ²
Versorgungsspannung	12V ±10%	6V bis 14,8V
Energieverbrauch	8,4 W (700mA bei 12V)	3 W (250mA bei 12V)
Gewicht	370 g	470 g
Kosten	4825 \$ 4432 € ³	392 \$ 360 € ⁴

Tabelle 4.2.: Datenvergleich zwischen den erstellten 2D-Laserscanner und dem Hokuyo UTM-30LX

¹abhängig von der Oberfläche des anvisierten Objektes (siehe Kapitel 4.1.1)

²siehe Berechnung der Winkelauslösung Formel 2.2 Seite 23

³Preis am 21.10.2016 beim Anbieter RobotShop

(<http://www.robotshop.com/en/hokuyo-utm-03lx-laser-scanning-rangefinder.html>)

⁴siehe Kostenübersicht Tabelle 3.1 Seite 38

Testumgebung 1

Als erste Testumgebung wurde der Eingangsbereich des Department Maschinenbau und Produktion Berliner Tor 21 der HAW Hamburg ausgewählt.



Abbildung 4.10.: Eingangsbereich Department Maschinenbau und Produktion der HAW

Die Abbildung 4.11 zeigt die beiden erstellten Karten der zwei Laserscanner, wobei die zurückgelegte Trajektorie der Laserscanner in grün dargestellt ist. Es ist deutlich erkennbar, dass die erstellte Karte des Hokuyo UTM-30LX detaillierter ist. Hindernisse wie zum Beispiel die vier Säulen sind in beiden Karten jedoch gut erkennbar.

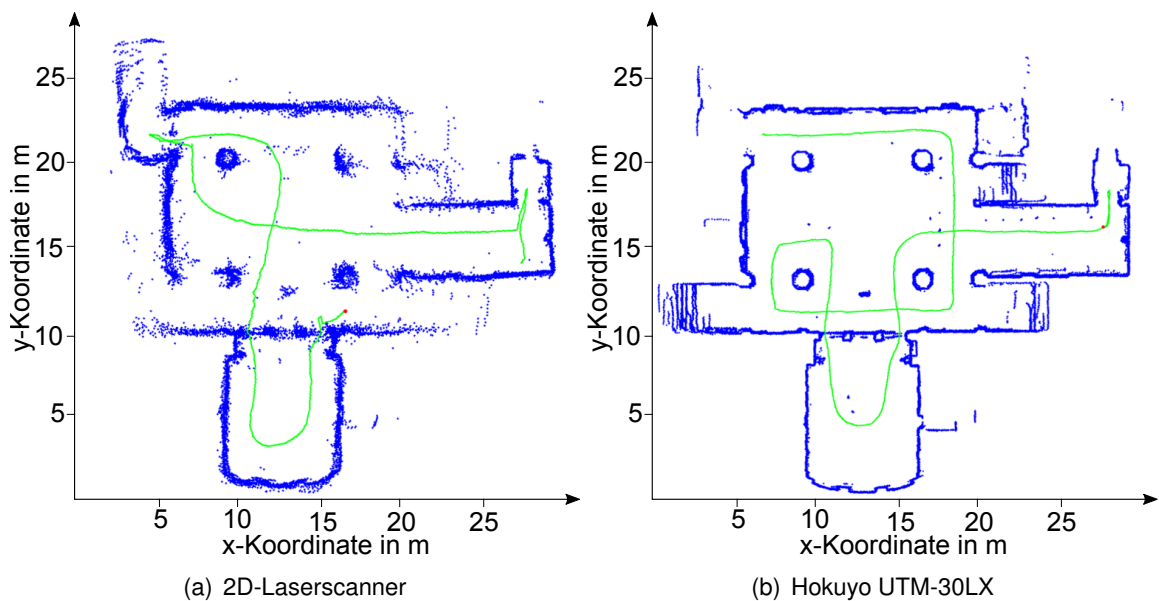


Abbildung 4.11.: SLAM Plot Eingangsbereich Department Maschinenbau und Produktion

Testumgebung 2

Für die zweite Testumgebung wurde das zweite Obergeschoss Department Maschinenbau und Produktion Berliner Tor 21 der HAW Hamburg verwendet.



Abbildung 4.12.: 2. Obergeschoss Department Maschinenbau und Produktion der HAW

In der Abbildung 4.13 sind die erstellten Karten der zweiten Testumgebung dargestellt, wobei auch hier erkennbar ist, dass mit dem Hokuyo UTM-30LX eine genauere Karte erstellt wird.

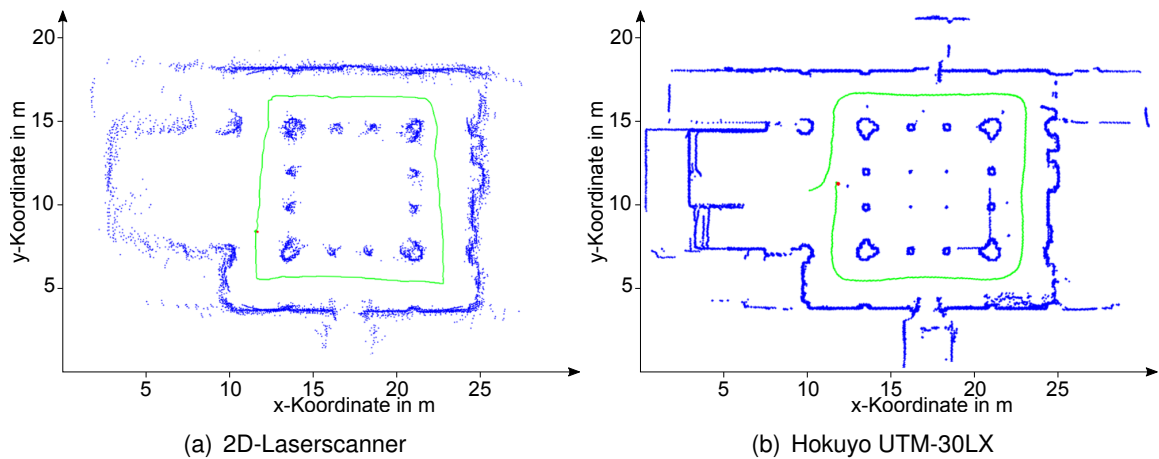


Abbildung 4.13.: SLAM Plot 2. Obergeschoss Department Maschinenbau und Produktion

Sowohl bei der ersten und zweiten Testumgebung wurde der eigene 2D-Laserscanner mit einer Motordrehfrequenz von 1.5 Hz betrieben. Mit dieser Drehfrequenz wurden die besten

Ergebnisse erzielt. Wie in Kapitel 4.3 beschrieben, wird bei dem MRPT eine Gleichverteilung der Messpunkte vorgenommen. Hierfür wird mit dem Hall-Effekt Sensor (Hamlin 55100) ein 0-Punkt definiert. Anschließend werden die gemessenen Entfernungsinformationen pro Motorumdrehung auf 360° gleichverteilt. Da der Distanzsensoren mit keiner konstanten Frequenz abgefragt werden kann (siehe Abb. 4.3), werden pro Motorumdrehung eine unterschiedliche Anzahl an Entfernungsinformationen an den ICP Algorithmus übergeben, welches negative Auswirkungen auf die Kartierung hat. Um dieses Problem zu umgehen, könnte der absolute Winkel des Magnetencoders verwendet werden. Hierzu müssten die Bibliotheken umfassend angepasst werden. Dieser Test hat deutlich gezeigt, dass für den ICP Algorithmus des MRPT eine konstante Anzahl an Distanzmessungen pro Umdrehung wichtig sind.

Auswirkung der Gleichverteilung

Um die Auswirkung der Gleichverteilung der Messwerte anschaulich darstellen zu können wurden erneut die kartesischen Koordinaten des Labor Raumes 101 (siehe Abb. 4.7) aufgenommen. Dazu wurden über zehn Motorumdrehungen Messdaten aufgenommen. In der Abbildung 4.14 (a) sind die Entfernungsinformationen mit ihren zugehörigen Winkelposition, welche mit dem Magnetencoder gemessen wurden, in kartesischen Koordinaten dargestellt. Die Abbildung 4.14 (b) zeigt die kartesischen Koordinaten mit einer einfachen Gleichverteilung der Entfernungsmessungen. Die beiden Messungen wurden bei einer Motordrehfrequenz von 1.5 Hz aufgenommen.

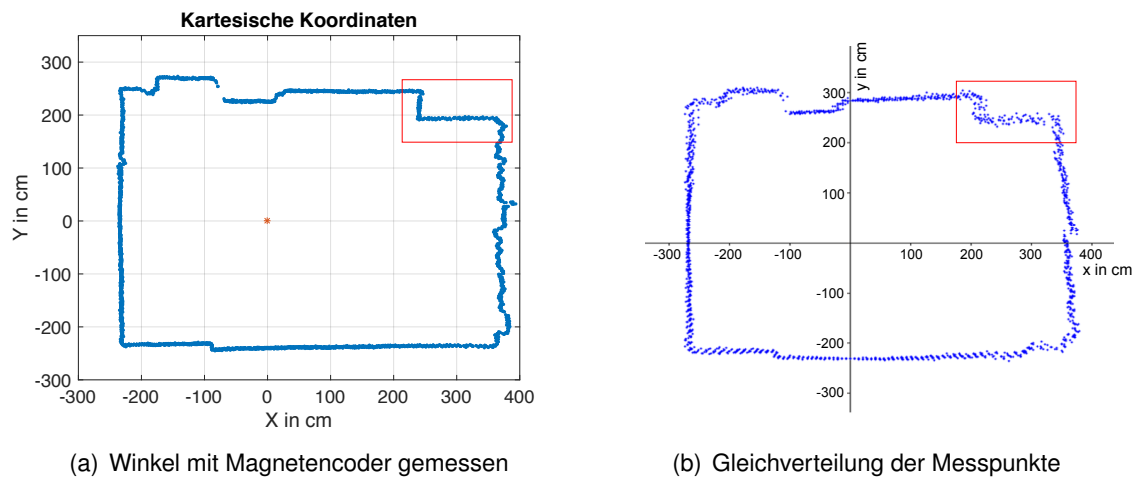


Abbildung 4.14.: Kartesische Koordinaten Labor Raum 101 bei einer Drehfrequenz von 1.5 Hz

Werden die beiden Karten verglichen, zeigt sich deutlich, dass die Abbildung 4.14 (a) detaillierter ist. Besonders Objekte wie zum Beispiel der Schrank (rot markiert), werden genauer dargestellt.

Wird die Motordrehfrequenz erhöht, sind die negativen Auswirkungen der Gleichverteilung der Entfernungsinformationen noch deutlicher zu erkennen.

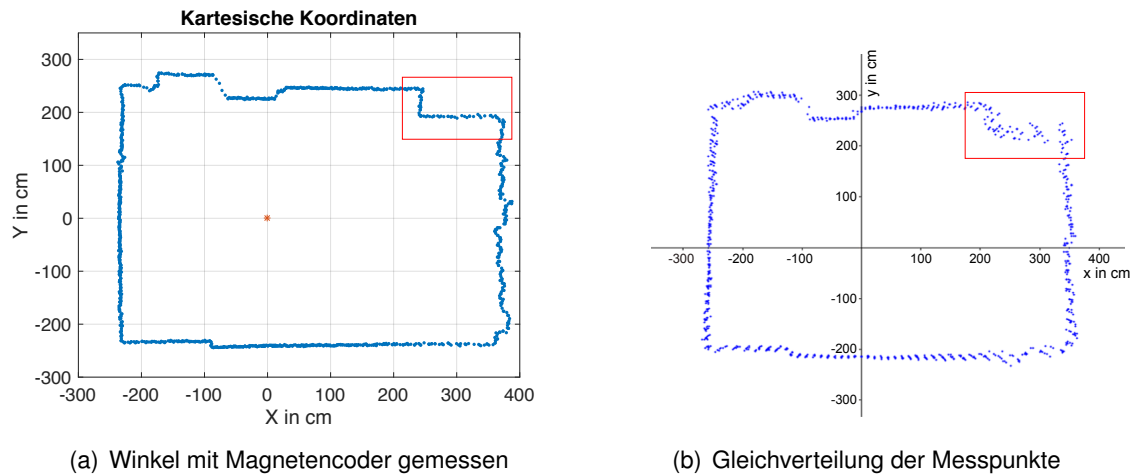


Abbildung 4.15.: Kartesische Koordinaten Labor Raum 101 bei einer Drehfrequenz von 3.5 Hz

Eine hohe Motordrehfrequenz hat bei den SLAM Messung der Testumgebung 1 und 2 gezeigt, dass eine ungenauere Karte erstellt wird. Der Grund hierfür ist vermutlich die Gleichverteilung der Distanzmessungen sein.

5. Zusammenfassung

Das Ziel dieser Bachelorarbeit war die Entwicklung und der Aufbau eines kostengünstigen 2D-Laserscanners, welcher für eine Hinderniserkennung verwendet werden kann. Hierzu wurde ein BLDC Motor mit einer Hohlwelle verbaut, durch die mit Hilfe eines TOF Distanzsensor Entfernungsmessungen möglich sind. Am Rotor des Motors wurde in einem Winkel von 45° ein 2" Spiegel montiert, so dass der Laserscanner ein FOV von 360° in einer 2D-Ebene abdeckt. Für die Bestimmung der Winkelposition des BLDC Motors wurde ein hochauflösender Magnetencoder verbaut. Es wurden verschiedene Testreihen mit den Sensoren durchgeführt, um diese auf ihre Zuverlässigkeit und Genauigkeit zu überprüfen. Weiterhin wurde der erstellte Laserscanner mit einem deutlich kostenintensiveren 2D-Laserscanner der Firma Hokuyo verglichen. Hierfür wurde der ICP SLAM Algorithmus, mit dem eine Karte unbekannter Umgebung erstellt wird, verwendet. Bei diesem Test stellte sich heraus, dass der erstellte 2D-Laserscanner noch verbessert werden kann. Für eine einfache Hinderniserkennung ist der entwickelte 2D-Laserscanner jedoch problemlos verwendbar.

5.1. Ausblick

Das Sensorsystem kann software- und hardwaretechnisch weiter verbessert werden. Das größte Optimierungspotential wird bei dem ICP Algorithmus des MRPT liegen. Wird anstatt einer Gleichverteilung der Distanzmessungen über einen Winkelbereich von 360° die vorhandene Winkelposition des Magnetencoder verwendet, so sollte die Erstellung einer Karte unbekannter Umgebung deutlich detaillierter sein. Hindernisse sollten mit dieser Anpassung noch besser erkannt werden. Weiterhin könnte die Konstruktion des 2D-Laserscanners miniaturisiert werden. Zum Beispiel könnte ein kleinerer Spiegel am BLDC Motor angebracht werden, da für die komplette Abdeckung der Hohlwelle lediglich ein Spiegel mit einem Durchmesser von etwa 32 mm für den Bereich nötig wäre ($D_{\min} = 22\text{mm}/\sin(45^\circ) = 31,11\text{mm}$). Es besteht außerdem die Möglichkeit den Distanzsensor liegend, das heißt um 90° gekippt (siehe Abbildung 3.5), zu befestigen. Somit könnte die Höhe der zweiten Plattform erheblich verringert werden. Ein Nachteil dieses Aufbaues ist jedoch, dass mindestens drei Spiegel für die Strahlensammenführung und der Umlenkung des Empfangsbereich um 90° benötigt werden. Weiterhin ist es denkbar, den Mikrocontroller mit dem BLDC Motortreiber aus dem 2D-Laserscanner auszulagern.

Zudem könnte die Funk-Datenübertragung optimiert werden. Die Übertragung der Messdaten über das Xbee-Modul funktioniert, jedoch kommt es häufig zu einem Verlust von Datenpaketen. Um eine stabilere Datenübertragung zu ermöglichen, könnte eine Auslagerung der XBee Antenne (siehe Abbildung 2.22 (b)) aus dem Gehäuse des Laserscanners eine Verbesserung der Verbindung ermöglichen. Alternativ kann eine andere Funk-Datenübertragung, wie zum Beispiel eine Wireless Local Area Network (WLAN) Verbindung eine stabile Datenübertragung ermöglichen.

Neben diesen software- und hardwaretechnischen Möglichkeiten zur Optimierung des 2D-Laserscanners, kann das Sensorsystem noch erweitert werden.

Wird der 2D-Laserscanner beispielsweise auf ein Multikopter montiert, ist es sinnvoll einen zusätzlichen Gyrosensor zu verbauen. Mit diesem Sensor kann die Rotation eines Multikopter, welche durch die Fortbewegung bedingt vorhanden ist, erfasst und kompensiert werden. Diese Rotationsinformation ist vor allem bei dem SLAM Algorithmus für eine genauere Kartierung nützlich.

Weiterhin könnte die Konstruktion erweitert werden, so dass der 2D-Laserscanner um seine eigene Achse gedreht wird. Somit wäre mit dem 2D-Laserscanner eine 3D-Kartenerstellung denkbar.

Literaturverzeichnis

- [1] *maxon Bürstenlose DC Motoren.* – URL http://www.maxonmotor.de/medias/sys_master/8797783982110/maxonECmotor-Notizen.pdf?attachment=true. – Eingesehen am 21.11.2016
- [2] *Mobile Robot Programming Toolkit ICP.* – URL http://www.mrpt.org/Iterative_Closest_Point_%28ICP%29_and_other_matching_algorithms. – Eingesehen am 10.11.2016
- [3] *Schaltplan LXRobotics Brushless Motorshield.* – URL <https://github.com/lxrobotics/BrushlessMotorshield>. – Eingesehen am 07.11.2016
- [4] AMS AG: *NSE-5310 - OTP - Programming Application Note.* Revision: 1.01. , 2013
- [5] AMS AG: *NSE-5310 Miniature Position Encoder with Zero Reference and I²C Output.* Revision: 1.5. , 2013
- [6] Atmel Corporation: *ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P DATASHEET.* , 2015
- [7] BABIEL, Gerhard: *Elektrische Antriebe in der Fahrzeugtechnik.* Springer Vieweg, 2014. – ISBN 978-3-658-03333-0
- [8] BASLER, Stefan: *Encoder und Motor-Feedback-Systeme.* Springer Vieweg, 2015. – ISBN 978-3-658-12843-2
- [9] ENGELBRECHT, Rainer: *Nichtlineare Faseroptik.* Springer Vieweg, 2014. – ISBN 978-3-642-40968-4
- [10] FISCHER, Rolf: *Elektrotechnik für Maschinenbauer.* Springer Vieweg, 2016. – ISBN 978-3-658-12514-1
- [11] HERING, Ekbert: *Sensoren in Wissenschaft und Technik.* Vieweg + Teubner, 2012. – ISBN 978-3-8348-0169-2
- [12] HERTZBERG, Joachim ; LINGEMANN, Kai ; NÜCHTER, Andreas: *Mobile Roboter.* Springer Vieweg, 2011. – ISBN 978-3-642-01725-4
- [13] HOKUYO AUTOMATIC CO.: *Scanning Laser Range Finder UTM-30LX/LN Specification.* , 2012

-
- [14] LEBLEBICI, Robin: *Laserscanner basierte Hinderniserkennung für einen autonomen Quadrocopter*. Bachelorarbeit Julius-Maximilians-Universität Würzburg. , 2015
 - [15] NÜCHTER, Andreas: *Semantische dreidimensionale Karten für autonome mobile Roboter*, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Dissertation, 2006
 - [16] PulsedLight Inc.: *LIDAR-Lite Operating Manuel*. , 2014
 - [17] SCHNEIDER, Peter: *Implementierung von 6D SLAM auf Basis eines schnellen ICP-Algorithmus*. Studienarbeit Universität Koblenz Landau. , 2006
 - [18] WOLFF, Marcus: *Sensor Technologien*. de Gruyter Oldenbourg, 2016. – ISBN 978-3-11-046092-6
 - [19] ZACHER, Michael: *Integration eines optischen 3D-Sensors in ein Koordinatenmessgerät für die Digitalisierung komplexer Oberflächen*, Rheinische-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Dissertation, 2003

A. Anhang

A.1. Inhalt der CD

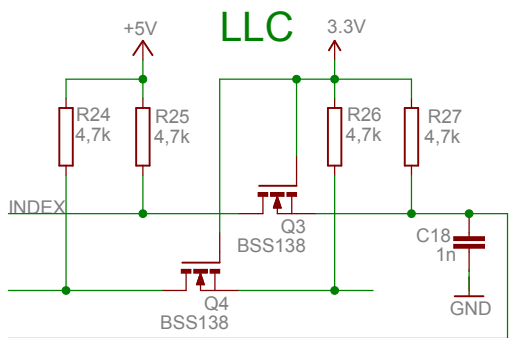
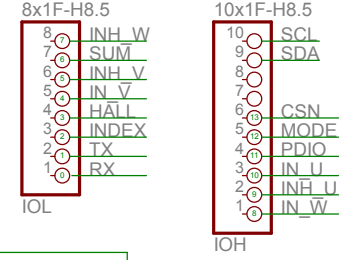
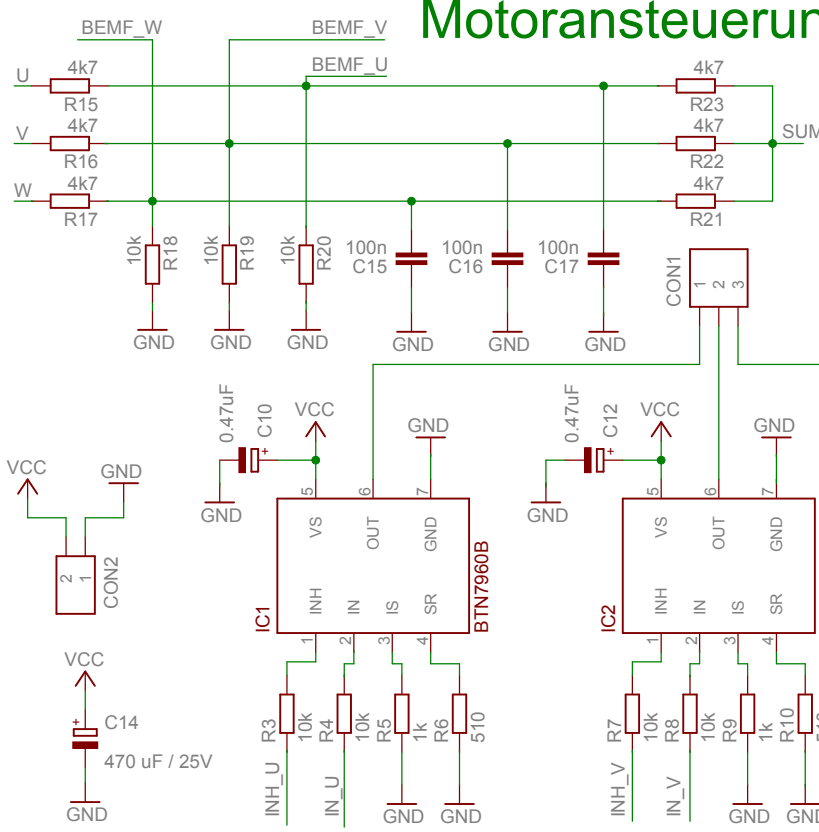
- Bachelorarbeit „Entwicklung, Aufbau und Test eines 2D-Laserscanners für die Hinderniserkennung in der Robotik“ (PDF)
- CAD Konstruktion (.CATPart Format [Catia V5] & .stl, .thing, .x3g Format [3D-Druckerformate])
- Arduino Programmcode mit allen angepassten Bibliotheken
- Schaltplan (.sch Format [Eagle] & PDF)
- Testmessungen des 2D Laserscanners
- Datenauswertung in MATLAB
- SLAM-Application
- Alle in dieser Bachelorarbeit verwendeten Grafikdateien in Originalqualität
- Diverse Dokumente (Manuals, Application Notes, ...) zum behandelten Themengebiet

A.2. Schaltplan

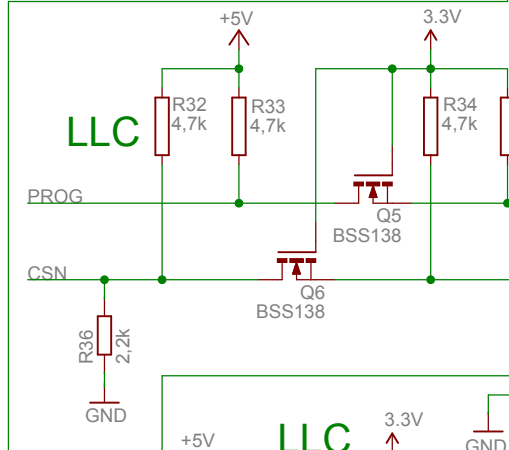
Auf der folgenden Seite befindet sich der Schaltplan des 2D-Laserscanners ohne den Arduino Uno.

Motoransteuerung

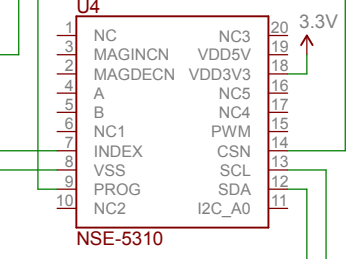
Arduino Pinout



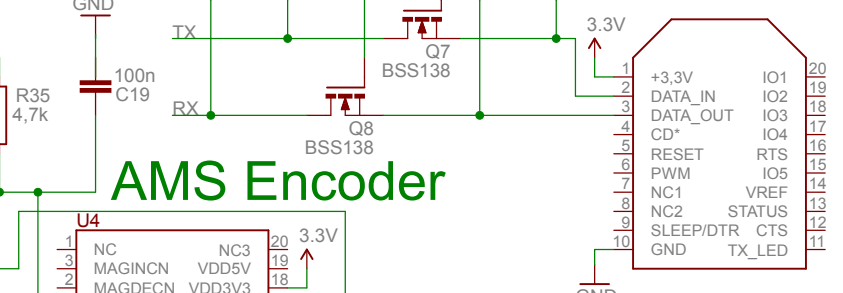
HALL



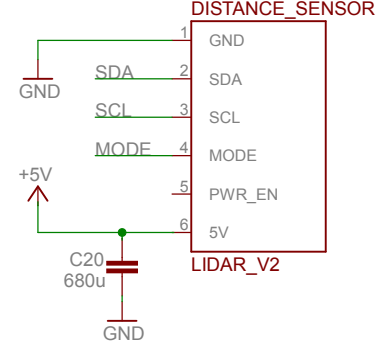
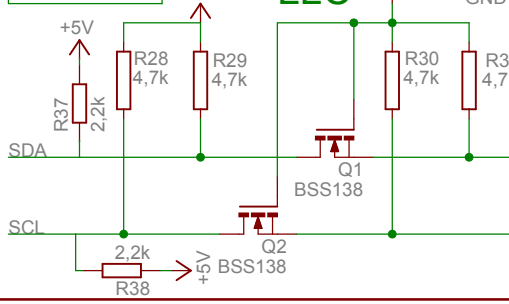
AMS Encoder



XBEE



LIDAR



A.3. Zusätzliche Informationen

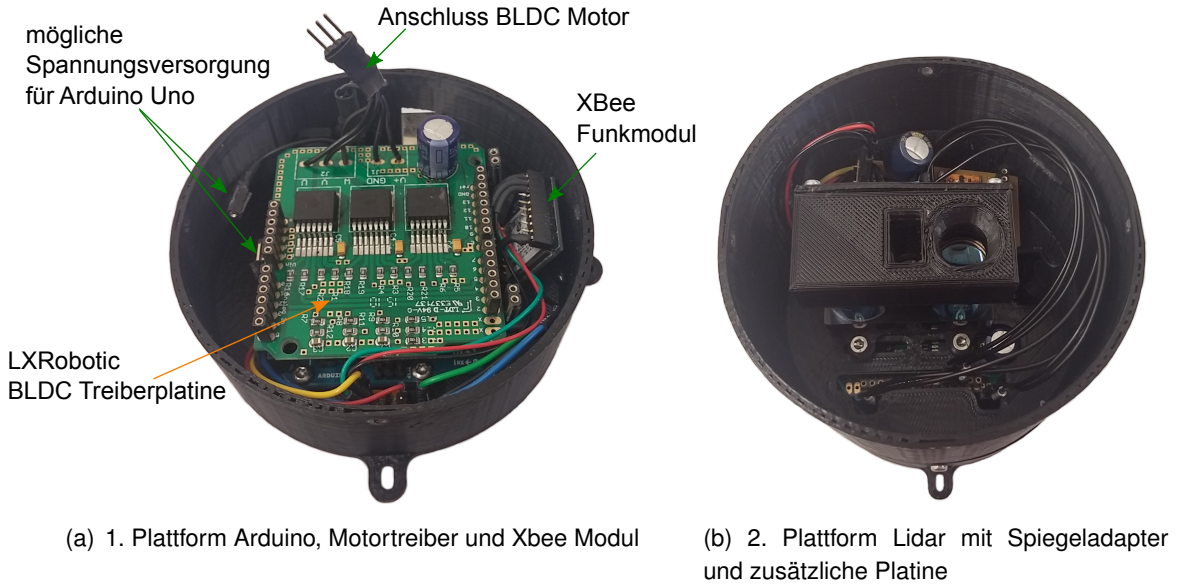


Abbildung A.1.: Darstellung der einzelnen Plattformen

Die Abbildung A.1 zeigt die erste und zweite Plattform des 2D-Laserscanners. Hierbei ist in Abbildung A.1 (a) die Spannungsversorgung des Arduinos zu beachten. Wird die Steckverbindung verbunden, so wird der Mikrocontroller ebenfalls wie der BLDC Motor über eine externe Spannungsversorgung, wie beispielsweise über einen Akkumulator, versorgt. Ist diese Steckverbindung wie in der Abbildung zu sehen nicht verbunden, dient die USB-Schnittstelle als Spannungsquelle für den Mikrocontroller.

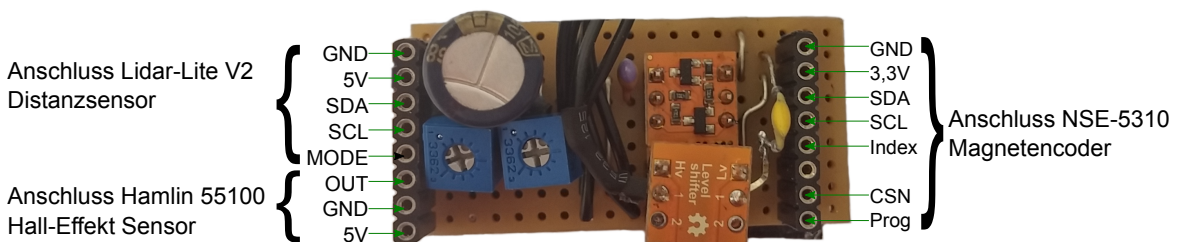


Abbildung A.2.: Zusätzliche Platine mit Pullup- Pulldown Widerständen, Kondensatoren und den bidirektionalen Logic Level Convertern

Bit	Symbol	Function
52	Mbit1	Factory Bit 1
51	PWMhalfEN_IndexWidth	$V_{PDIO} = 100 \text{ mV}$
49	pwmDIS	Disable PWM
48	Output Md0	
47	Output Md1	
46:35	Z<0:11>	Zero position
34	CCW	change increasing/decreasing code with encoder movement
33:29	I ² C_A <1:5>	I ² C Address
28:0	Factory Section	
	Mbit2	Factory Bit 0

Tabelle A.1.: OTP-Register NSE-5310 [4]

Versicherung über die Selbstständigkeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit im Sinne der Prüfungsordnung nach §16(5) APSO-TI-BM ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen habe ich unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Hamburg, 24. November 2016

Ort, Datum

Unterschrift