

# Studienarbeit

zum Thema

*„Ansteuerung eines Motormodells mit H – Brücke“*

vorgelegt an der

Dualen Hochschule Gera-Eisenach

**von:** *Andreas Rexroth*

*Winter Robin*

*Gewerbepark am Wald 5a 98693 Ilmenau*

**Matrikelnummer:** G200102AT

G200249AT

**Studienrichtung:** Elektrotechnik

Automatisierungstechnik

**Praxispartner:** BN – Automation AG

**Gutachter der DHGE:** Prof. Dr. Daniel Günther

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	I
Abbildungsverzeichnis .....	III
Tabellenverzeichnis .....	V
Abkürzungsverzeichnis .....	VI
1      Einleitung .....	1
2      Allgemeine technische Lösung .....	2
3      Elektromagnetische Elemente .....	3
3.1    Technische Lösung Antriebsystem .....	3
3.2    Magnetsystem des Motors.....	4
3.3    Spulensystem des Motors.....	4
3.4    Motorspulen.....	5
3.5    Neodym Magnete .....	6
4      Konstruktion.....	7
4.1    Technische Lösung Konstruktion.....	7
4.2    3D gedruckte Bestandteile.....	8
4.2.1    Grundplatte.....	8
4.2.2    Platinenbox.....	9
4.2.3    Rotor.....	10
4.2.4    Stator und Halter .....	11
4.2.5    Kugellagerschalen mit Abdeckungen.....	13
4.2.6    Sensorkonstruktion.....	14
4.3    Weitere Modellkomponenten .....	15
5      Elektronik .....	17
5.1    Technische Lösung Elektronik .....	17
5.1.1    Konzept Microcontroller .....	17
5.1.2    Konzept H – Brücke .....	18

## II

5.1.3	Konzept Stromversorgung.....	19
5.2	Schaltplan .....	20
5.2.1	Microcontroller.....	20
5.2.2	Peripherie.....	22
5.2.3	H – Brücke.....	23
5.2.4	Stromversorgung und Stromverteilung .....	24
5.3	PCB – Design .....	26
5.4	Auswahl einzelner Komponenten .....	27
6	Programm .....	30
6.1	Setup.....	30
6.2	Main – Funktion .....	31
6.3	Positionsfunktion.....	31
6.4	Drehmodus .....	32
6.5	Schrittmodus.....	33
6.6	Interrupt – Funktionen.....	35
6.7	LCD .....	36
7	Evaluierung .....	38
	Literaturverzeichnis .....	VIII
	Formelverzeichnis .....	X
	Anhangsverzeichnis.....	XI

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Modell komplett .....	VII
Abb. 2: allgemeine technische Lösung.....	2
Abb. 3: Antriebssystem Motor .....	3
Abb. 4: Magnetsystem.....	4
Abb. 5: Schritte Motor.....	4
Abb. 6: Motormodell schematischer Aufbau .....	7
Abb. 7: Grundplatte 3D .....	8
Abb. 8: Grundplatte Bemaßung.....	9
Abb. 9: Platinenbox mit Platine 3D.....	9
Abb. 10: Platinenbox Bemaßung.....	10
Abb. 11: Rotor Bemaßung.....	10
Abb. 12: Rotor Schnitt.....	11
Abb. 13: Stator Bemaßung .....	12
Abb. 14: Statorhalter 3D Konstruktion .....	12
Abb. 15: Lagerschale Bemaßung.....	13
Abb. 16: Lagerschale mit Abdeckungen 3D .....	13
Abb. 17 Sensorkonstruktion 3D .....	14
Abb. 18: Adapter und Sensorwelle.....	15
Abb. 19: Sensorkonstruktion Bemaßung.....	15
Abb. 20: Steuerungs Diagramm .....	17
Abb. 21: H – Brücke.....	18
Abb. 22: Stromversorgung Diagramm .....	19
Abb. 23: Microcontroller Schaltplan.....	20
Abb. 24: Peripherie Schaltplan.....	22
Abb. 25: H – Brücke Schaltplan.....	23
Abb. 26: Einspeisung Schaltplan.....	24
Abb. 27: Tiefsetzsteller Schaltplan.....	25
Abb. 28: Verteiler Schaltplan .....	25
Abb. 29: PCB 3D Model .....	26
Abb. 30: Kennlinie N – Kanal Mosfet.....	28
Abb. 31: Legende Ablaufplan .....	30
Abb. 32: Microcontroller Programm Setup.....	30

Abb. 33: Programm Main – Funktion .....	31
Abb. 34: Positionsfunktion.....	32
Abb. 35: Programm Turn .....	32
Abb. 36: Programm Step .....	33
Abb. 37: Winkelbeziehung Hall – Sensor .....	35
Abb. 38: Encoder Signal.....	36
Abb. 39: Struktur LCD .....	37
Abb. 40: Modell aufgebaut.....	41

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Eingangsinformationen Microcontroller .....	18
Tabelle 2: Signale und Pintypen.....	21
Tabelle 3: Peripheriebeschaltung Microcontroller .....	21
Tabelle 4: H – Brückensignale Microcontroller .....	21
Tabelle 5: PCB – Konfiguration.....	26
Tabelle 6: Leiterbahnbreiten PCB .....	27
Tabelle 7: Kennwerte Mosfet .....	27
Tabelle 8: Informationen LCD .....	37

## Abkürzungsverzeichnis

A	Ampere
ccw	counter clockwise
cw	clockwise
DHGE	Duale Hochschule Gera-Eisenach
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
FDM	Fused Deposition Modeling
FR[x]	Flame Retardant
GND	Ground
I2C	Inter – Integrated Circuit
LCD	Liquid Cristal Display
M[x]	Metrisches Gewinde [Nenngröße]
PCB	Printed Circuit Board
PLA	Polylactid
RPM	Rounds Per Minute
TVS	Transient Voltage Suppressor
V	Volt
VAC	Volt Alternating Current
VCC	Voltage at the Common Collector
VDC	Volt Alternating Current

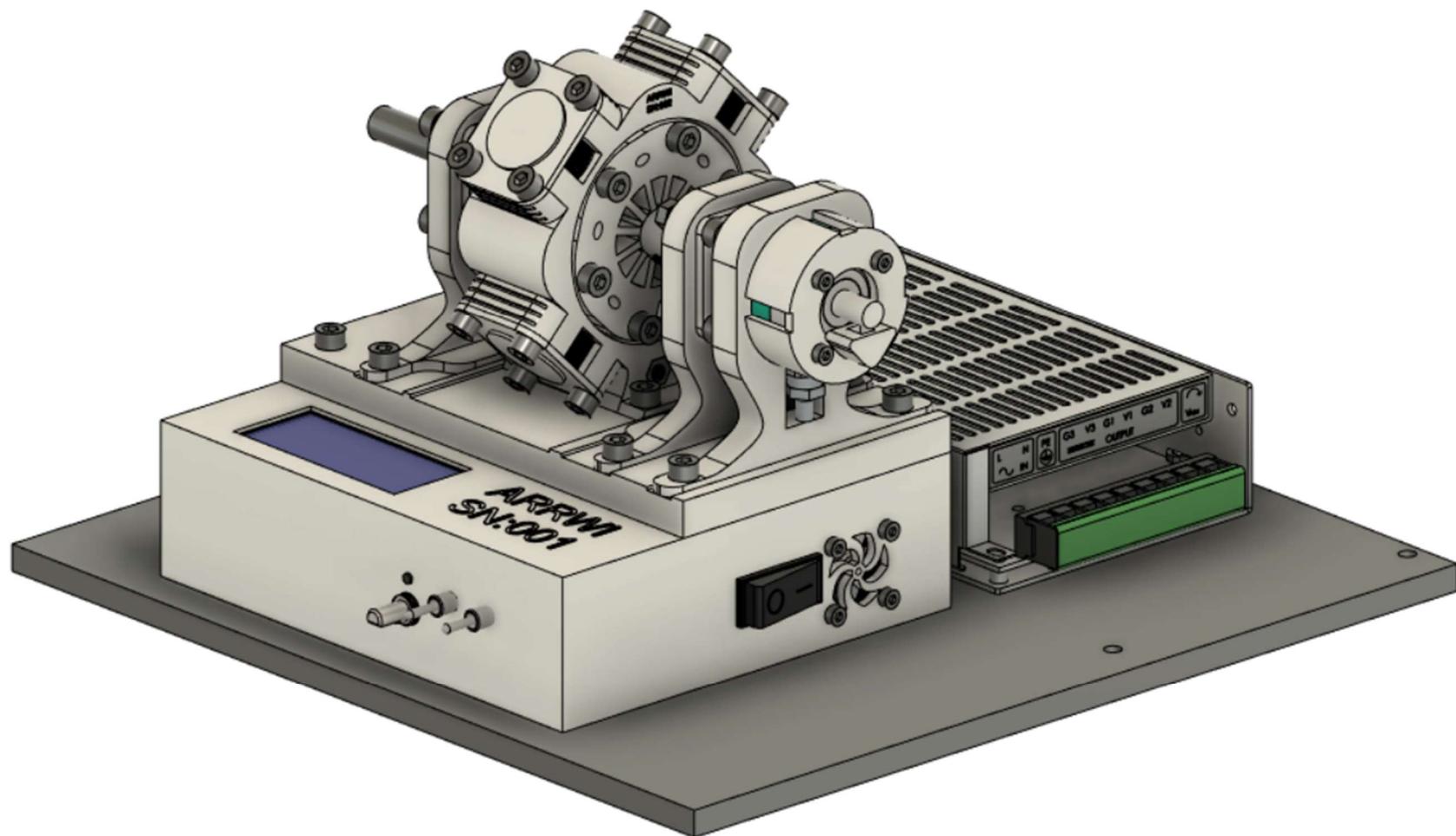


Abb. 1: Modell komplett

## 1 Einleitung

In dieser wissenschaftlichen Arbeit, mit dem Thema: „Ansteuerung eines Motormodells mit H – Brücke“, soll ein Motormodell als Lehrmodell erarbeitet werden. Die Anforderungen an dieses Motormodells sind auf Basis der „DHGE – Themenbeschreibung“ entstanden. Die Aufgaben aus der Themenbeschreibung dienten hierbei als Inspirative Vorlage, welche frei abgeändert werden durfte. (vgl. Anhang 7: DHGE – Themenbeschreibung).

Daraus entwickelt haben sich folgende Anforderungen an dieses Modell:

Eine Anforderung des Motormodells ist; ein dauerhafter Betrieb, in welchem ein Schrittmodus und ein Drehmodus möglich sind. Erweiternd ist eine Positionserkennung und eine Drehzahlerfassung, mit entsprechender Sensorik, in dem Lehrmodell zu implementieren. Weiterhin soll ein Rechts-/ Linkslauf des Motors möglich sein.

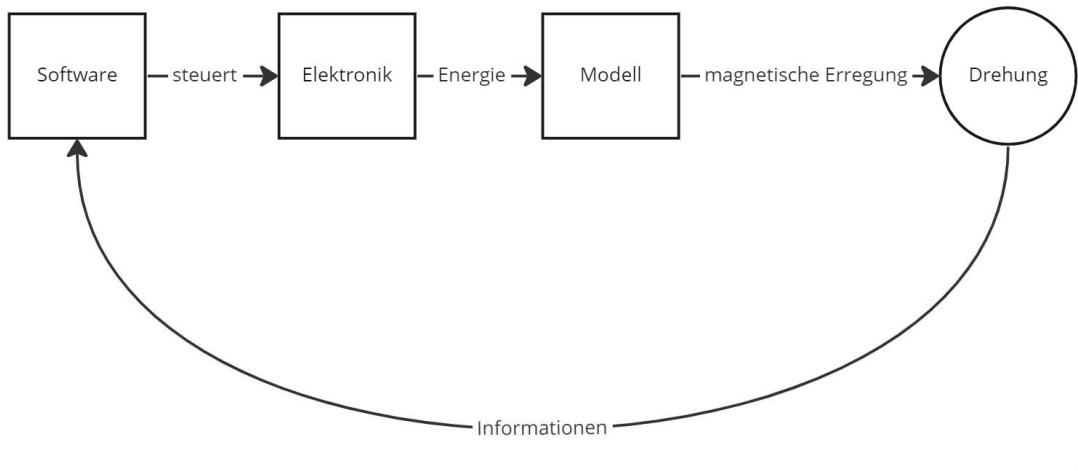
Das Motorspulensystem muss acht Schritte im Schrittbetrieb ermöglichen. Die dafür benötigten Spulen sollen via H – Brücken angesteuert werden. Um die Vorgabe der Betriebsart, der Position und der Drehzahl bedienerfreundlich zu arrangieren, müssen Schalter vorgesehen werden. Ein Display stellt dabei die für den Nutzer wichtigen Informationen dar. Der zur Steuerung benötigte Programmcode muss komplett selbst geschrieben sein. Hierbei ist es dennoch freigestellt auf externe Bibliotheken zurückzugreifen.

Vom Gutachter zusätzlich vorgegeben wurde: Das mechanische Modelldesign wird mithilfe der 3D – Konstruktionssoftware „Fusion 360“ ausgearbeitet und anschließend, mittels eines 3D – Druckers, gedruckt. Die Elektronik wird ebenso in dieser Software entworfen (Schaltplan und Platine) und dann praktisch umgesetzt. Die Art der Platinen – Umsetzung steht hierbei offen. Das Motormodell soll auf eine Spannung von 12V begrenzt werden. Weiterhin muss das Modell über die Netzspannung betrieben werden können.

Das Telos dieser Arbeit ist die Umsetzung eines Motormodells, genauer gesagt eines Lehrmodells, sodass individuelle Bildungszwecke und Demonstrationen für (zukünftige) Studierende anschaulich gemacht werden können. Daher wurden auch keine Definitionen über die Leistung des Modells getroffen. Die maximale Drehzahl wird zur Sicherheit auf 3000 Umdrehungen pro Minute begrenzt. Die nachfolgenden Kapitel beschreiben die Planung und Entwicklung der genannten Anforderungen. Abänderungen, welche bei der „praktischen“ Umsetzungen entstehen, werden lediglich in der Evaluierung betrachtet.

## 2 Allgemeine technische Lösung

### Technische Lösung



miro

Abb. 2: allgemeine technische Lösung

Die Hauptanforderung ist die Umsetzung eines Motormodelles mit Schritt- und Drehfunktion. Diese umfassende Hauptaufgabe wird in drei Teilbereiche untergliedert.

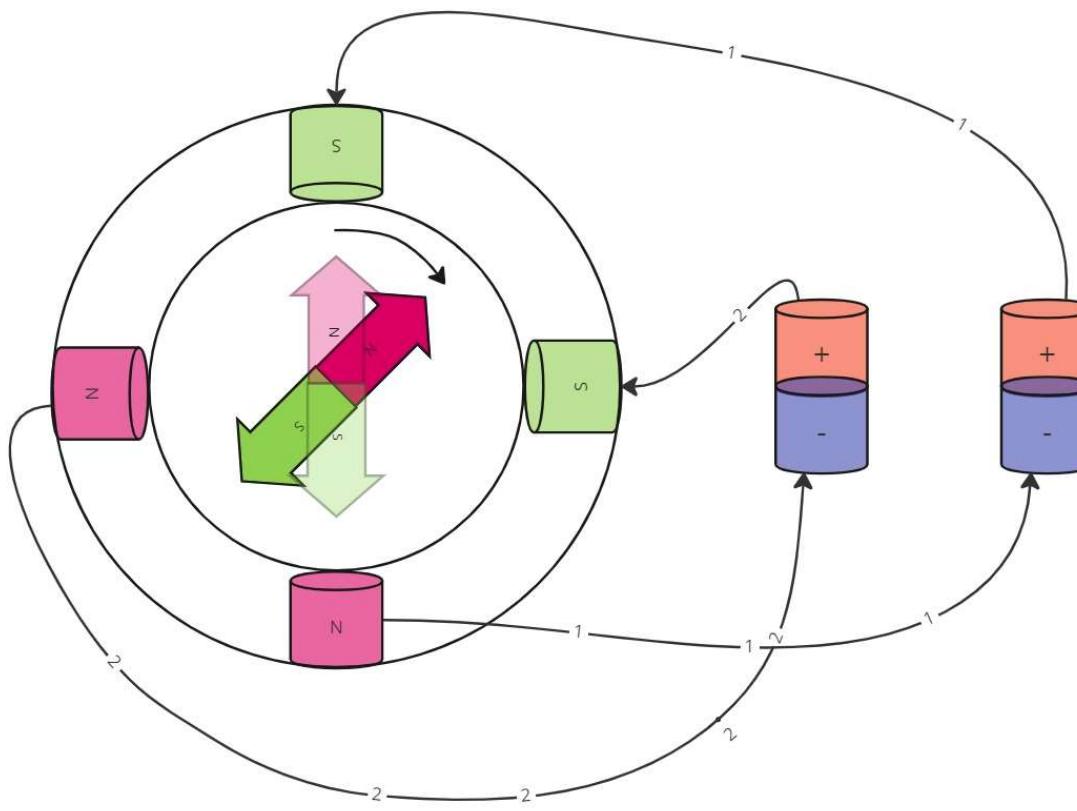
Der erste Teilbereich beschreibt die Konstruktion. Der Motor benötigt einen mechanischen Aufbau, der die drehenden Komponenten trägt. Der Fokus liegt an der Konstruktion der für die Drehbewegung benötigten Teile.

Der zweite Teilbereich, die Elektronik, ist die Schnittstelle zwischen Mechanik und Software. Sie versorgt die Antriebselemente mit der benötigten elektrischen Leistung und gibt dem Informationssystem (LCD, Sensorik) die erforderliche Spannung. Der Teilbereich der Elektronik beschäftigt sich neben den Entwurf von Schaltungen ebenfalls mit dem definieren von Signaltypen.

Im dritten Teilbereich, Programm, wird die Verarbeitung der Signale umgesetzt. Das Programm dient hierbei als logische Schnittstelle zwischen Anwender und Modell. Es nimmt die Einstellungen des Anwenders auf, steuert das Modell und gibt den Anwender das notwendige Feedback.

### 3 Elektromagnetische Elemente

#### 3.1 Technische Lösung Antriebsystem



miro

Abb. 3: Antriebssystem Motor

Das Antriebssystem des Motormodells erfolgt elektromagnetisch. In der Abb. 3: „Antriebssystem Motor“ ist die prinzipielle Funktionsweise dargestellt. Mittig liegt ein diametral (radial nach außen) magnetisierter Rotoraufbau. Das treibende magnetische Feld wird durch Spulen bzw. einzeln ansteuerbare Spulenpaare erzeugt. Mittels elektronischer Steuerung kann deren Stromrichtung ( $\pm$ ) gewechselt und damit die Feldmagnetisierung (N / S) getauscht werden. (vgl. KQE13).

Der auf einer Welle gelagerte Rotormagnet folgt diesem verändernden / drehenden Feld des Stators. So wird ein einfacher Schrittbetrieb realisiert. In diesem befinden sich die Schritte genau auf den Spulen oder mittig zwischen den Spulen. (vgl. Abb. 3 „Antriebssystem Motor“) Vollständige Drehungen können mit der aufeinanderfolgenden Ansteuerung der einzelnen Spulen realisiert werden. Die Drehzahl ist hierbei über eine Pause zwischen den Schritten steuerbar. (vgl. 6.4 „Drehmodus“)

### 3.2 Magnetsystem des Motors

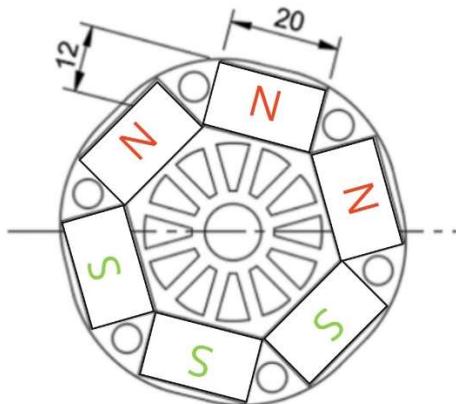


Abb. 4: Magnetsystem

Wie in der Abb. 3“Antriebssystem Motor“ dargestellt wird der treibende Magnet diametral aufgebaut. Um diesen Magneten zu bilden, sind sechs einzelne Neodym Magnete orthogonal zur Motorwelle als Hexagon angeordnet. Das Hexagon besitzt neben den im Kapitel 4.2.3 „Rotor“ genannten mechanischen Vorteilen, ebenfalls den Vorteil, dass kein Magnet in der doppelpoligen Feldmitte liegt. Drei Magnete bilden den Nordpol und drei weitere Magnete den Südpol (vgl. Abb. 4: „Magnetsystem“). Die einzelnen Neodym Magnete sind in Kapitel 3.5 „Neodym Magnete“ detailliert beschrieben.

### 3.3 Spulensystem des Motors

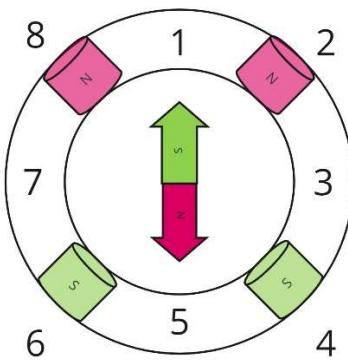


Abb. 5: Schritte Motor

Eine Anforderung dieses Motormodells ist es, acht Einzelschritte im Schrittmodus zu realisieren. Diese Anforderung wird erreicht in dem jeweils zwei Spulenpaare ein vierpoliges Elektromagnetsystem bilden.

Es werden beide Spulenpaare gleichzeitig durch jeweils eine H – Brücke angesteuert (vgl. 5.1.2 „Konzept H – Brücke“). Bei zwei gleichzeitig angesteuerten Spulen können insgesamt vier Zwischenpolpositionen (Positionen 1,3,5,7) erreicht werden. Werden die Spulenpaare einzeln für sich angesteuert, können weitere vier Polpositionen (Positionen 2,4,6,8) realisiert werden (vgl. 3.1 „Technische Lösung Antriebsystem“).

Die beiden Spulenpaare sind in einem  $90^\circ$  Winkel zueinander in dem Stator des Motors angeordnet, so kann der Schrittbetrieb ideal realisiert werden. Die jeweiligen Einzelspulen sind eigens gefertigt. Im Nachfolgenden Kapitel sind die Einzelspulen detaillierter beschrieben.

### 3.4 Motorspulen

Die Motorspulen sind die Koppelemente zwischen elektrischer Ansteuerung und magnetischer Erregung. Die Motorspulen müssen so dimensioniert sein, dass diese ein starkes Magnetfeld bei möglichst geringer Wärmeentwicklung erzeugen.

Die Dimensionierung der Spulen über den magnetischen Kreis (vgl. KQE13) entfällt, da die 3D gedruckten Bauteile aus Kunststoff bestehen. Weiterhin erschweren metallische Elemente wie Schrauben, Muttern und die Motorwelle die Abschätzung des Feldes. Aus diesem Grund wird im Folgenden lediglich die Induktivität eines Spulenpaars berechnet. Diese Kenngröße dient hierbei zum Abschätzen der Feldstärke. Die Induktivität einer Spule wird wie folgt berechnet.<sup>1</sup>:

$$L = N^2 \cdot \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \frac{A}{l}$$

Formel 1: Induktivität einer Spule

Die für die Berechnung benötigten Kennwerte entstammen aus den Datenblättern, wurden mit den Messschieber nachgemessen oder wurden beim Wickelvorgang gezählt.

---

<sup>1</sup> [Vöm03] S. 29

Bekannt ist	Zahlenwert
Spulenfläche A	706,858mm <sup>2</sup>
Spulenlänge l	10mm
Spulendurchmesser d	30mm
Permeabilität $\mu_r$	2300H/m (25°C)
Windungen N	100

Tabelle 1: Daten Motorspule

Mit den eingesetzten Zahlenwerten beträgt die Induktivität einer Einzelspule: 2,04H. Da die Spulen (im Spulenpaar) logisch in Reihe geschaltet werden, sind die Induktivitäten zu addieren. Hierbei ist zu beachten das beide Spulen gleichsinnig gewickelt sind. Die Induktivität eines Spulenpaares beträgt also demnach 4,08H.

Die Spulen werden in einem Paar so verbunden, dass sich die im Modell nach innen schauenden Flächen anziehen.

### 3.5 Neodym Magnete

Um ein möglichst starkes Magnetfeld eines einzelnen Magneten zu erhalten, müssen die Polflächen der Magnete möglichst groß sein. Hier fiel die Wahl auf Neodym Zylindermagnete mit der Magnetisierungsgüte N42. Diese Magnete sind axial magnetisiert und besitzen einen Durchmesser von 20mm und eine Höhe von 12mm (vgl. Abb. 4: „Magnetsystem“). Laut dem Hersteller erreichen diese Magnete eine Haltekraft von 12kg.

Der für den Hallsensor erforderliche Sensormagnet befindet sich nahe dem Encoder und ist auf der Sensorwelle montiert (vgl. Kapitel 4.2.6 „Sensorkonstruktion“).

Hierfür reicht ein kleinerer Neodym Magnet. Der Sensormagnet mit der Magnetisierungsgüte N52 ist ebenso axial magnetisiert. Seine Haltekraft beträgt circa 0,68kg. Die minimale Remanenz – Feldstärke (magnetischer Leerlauf) von 1,42T genügt für die von dem Hall – Sensor erforderten 18mT.

## 4 Konstruktion

Eine Darstellung des vollständigen Modellaufbaus liegt unter: Anhang 1 „Modell komplett“.

### 4.1 Technische Lösung Konstruktion

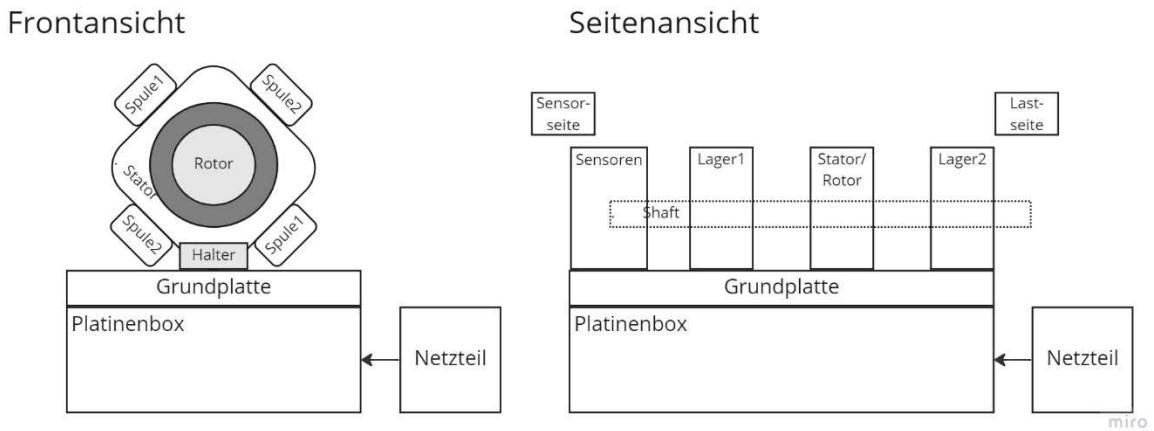


Abb. 6: Motormodell schematischer Aufbau

Wie in der Abbildung „Motormodell schematischer Aufbau“ dargestellt, dient eine Grundplatte als Basis der Motorkomponenten. Die Frontansicht stellt den Stator (mit Halter), den Rotor, die Grundplatte, sowie die Platinenbox und das Netzteil dar. Hier wird besonders der Aufbau des Rotor – Stator – Systems betont. Der physikalische Hintergrund wird in Kapitel 3 „Elektromagnetische Elemente“ im Detail erläutert.

Die dazugehörige Seitenansicht stellt die weiterhin benötigten Bauteile dar. Zu betonen sind die Sensor- und Lastseite des Modells. Auf der Sensorseite finden Messungen (Drehzahl, Schritte, Positionen...) statt. Auf der Lastseite kann die erwirkte Motorleistung abgegriffen werden.

Die Seitenansicht zeigt, neben dem Stator/Rotor auch die Anordnung der benötigten Sensoren (vgl. 5.1.1 „Konzept Microcontroller“), der beiden Lauflager und der Motorwelle. Die drei mechanischen Elemente dienen der Kraftübertragung des Motors. Wobei die Motorwelle die Kraft vom Motor zur Last überträgt und die Lauflager die Welle lagern.

Unterhalb der Grundplatte ist die Platinenbox dargestellt. Sie dient als Aufnahme für die Platine, die Schalter, das LCD, den Microcontroller und den Lüfter. Weiterhin dient die Platinenbox als Basisschutz der Elektronikkomponenten.

## 4.2 3D gedruckte Bestandteile

Wie in der Einleitung beschrieben soll der Prototyp aus 3D – Druck gefertigten Bauteilen bestehen. Folgende Elemente sollen mittels FDM – Verfahren (vgl. Kom14 S.31) hergestellt werden. Die angeführten Komponenten bestehen aus dem Filament: „Amazon Basics 3D-Drucker-Filament“. Der Kunststoff PLA wurde aufgrund seiner anfängerfreundlichen Druckeigenschaften und formtreue gewählt. Weitere Informationen zu diesem PLA sind hier aufgeführt: vgl. Ama22.

### 4.2.1 Grundplatte

Wie in der technischen Lösung angemerkt, befinden sich auf der Grundplatte essenzielle Motorkomponenten. Im Detail sind auf der Grundplatte der Stator, die Lagerschalen und die Sensorkonstruktion angebracht. Auf der Unterseite kann zusätzlich die Platinenbox befestigt werden, sodass ein Gesamtmodell entsteht.

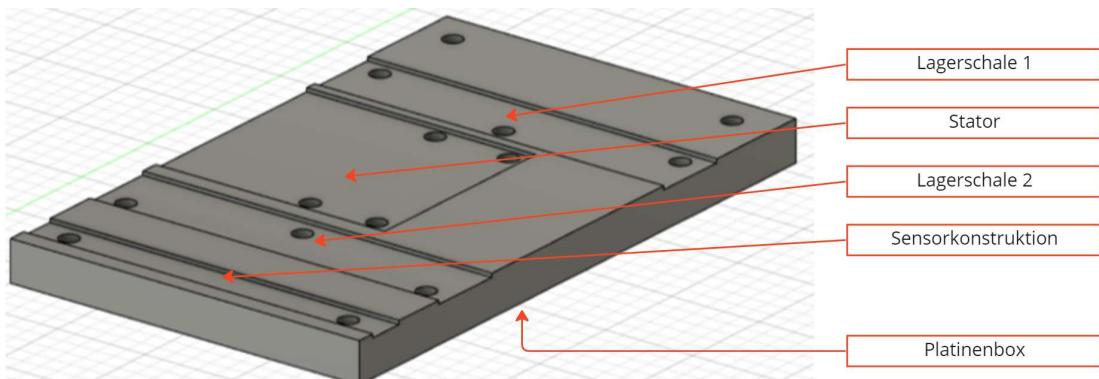


Abb. 7: Grundplatte 3D

Die ausgesparten Flächen (vgl. Abb. 7: „Grundplatte 3D“), dienen als Montagehilfe der Komponenten. Dadurch liegen die zu montierenden Bauteile zueinander in Flucht. Diese Flucht ist besonders für einen gleichmäßig runden und ruhigen Motorlauf essenziell.

Auf der Unterseite der Grundplatte sind Hexagonzylinder eingelassen (vgl. Abb. 8: „Grundplatte Bemaßung“), dadurch ragen die eingesetzten M5 Muttern der Schraubverbindungen nicht über die Bodenfläche heraus und die Grundplatte kann separiert aufgestellt werden. Insgesamt ist die Grundplatte 165mm lang, 100mm breit und 11mm hoch (vgl. Abb. 8: „Grundplatte Bemaßung“).

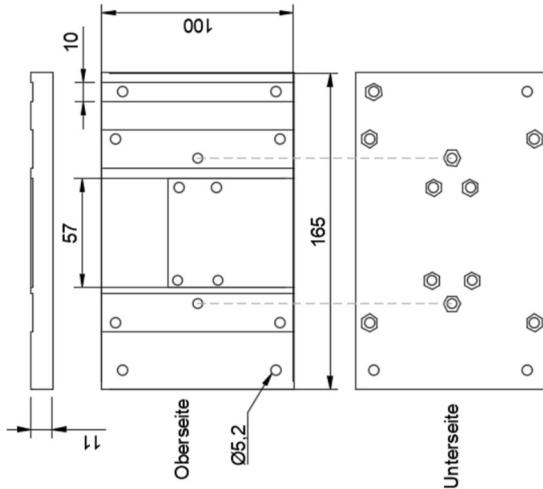


Abb. 8: Grundplatte Bemaßung

#### 4.2.2 Platinenbox

Die Platinenbox beinhaltet die Platine, den Mikrocontroller, die Bedienelemente (Taster, Schalter, Drehgeber), das LCD und den Lüfter (vgl. Abb. 9: „Platinenbox mit Platine 3D“). Sie kann separat aufgestellt, oder auch direkt unter die Grundplatte befestigt werden (vgl. Kapitel 4.2.1 „Grundplatte“). Die Bedienelemente und das LCD befinden sich leicht zugänglich an den Außenwänden der Box. Der Mikrocontroller, der Lüfter und die Platine sind direkt in der Platinenbox angebracht, sodass der Benutzer keine Schäden wie Verbrennungen erleiden kann.

Um die Platinenbox thermisch stabil zu halten, bläst der Lüfter auf der Sensorseite kalte Luft in die Box hinein. Auf der Lastseite wird die unerwünschte warme Luft durch ein wabenförmiges Lüftungsgitter herausgeblasen.

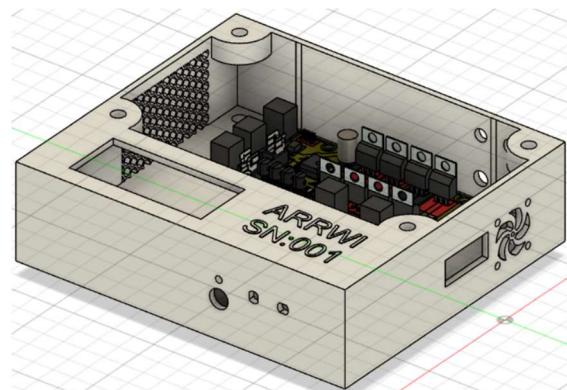


Abb. 9: Platinenbox mit Platine 3D

Sie ist insgesamt 165mm lang, 145mm breit und 46mm hoch (vgl. Abb. 10: „Platinenbox Bemaßung“). Eine Plexiglasplatte dient als Grundplatte, auf welcher die Platinenbox befestigt

ist. Somit befindet sich das gesamte Modell auf dieser Plexiglasplatte (vgl. Abb. 40: „Modell aufgebaut“).

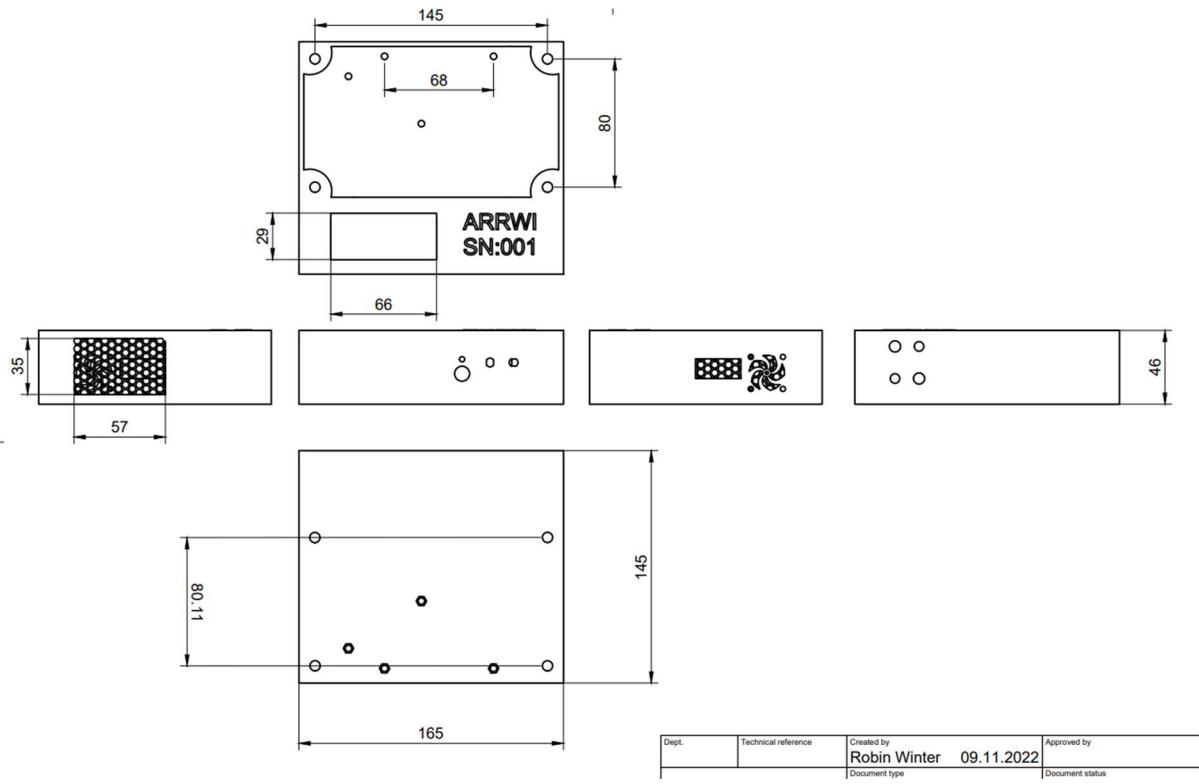


Abb. 10: Platinenbox Bemaßung

#### 4.2.3 Rotor

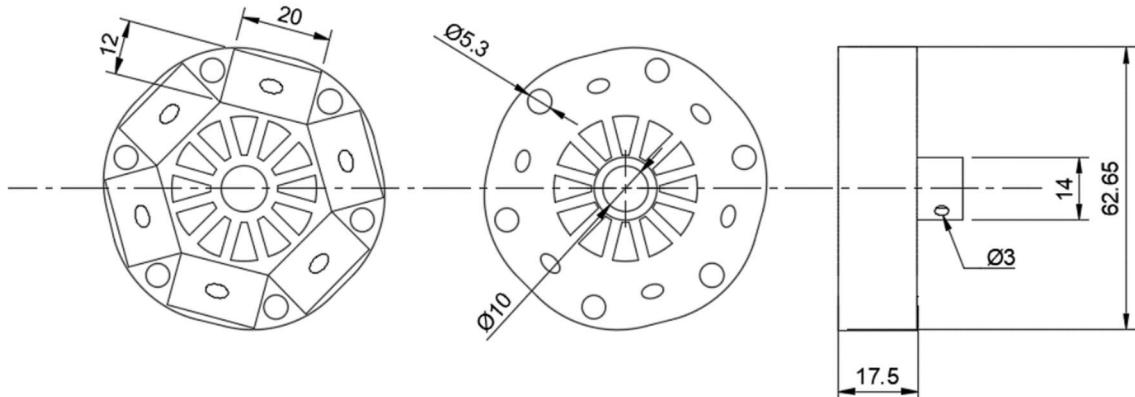


Abb. 11: Rotor Bemaßung

Wie in der technischen Lösung beschrieben trägt der Rotor die sechs verwendeten Neodym Magnete. Diese müssen zum einen in einem möglichst geringen Abstand angebracht (vgl. Kapitel 2 „Allgemeine technische Lösung“) und zum anderen rotatorisch stabil gelagert werden.

Durch die Anordnung als sechseckiges Prisma können die Neodym Magnete rotationssymmetrisch in einem minimalen Abstand zur Motorwelle gelagert werden. Für eine bessere Aerodynamik des Rotors, sind die Kanten des tragenden Prismas abgerundet. (vgl. Abb. 11: Abb. 11: Rotor „Rotor Bemaßung“).

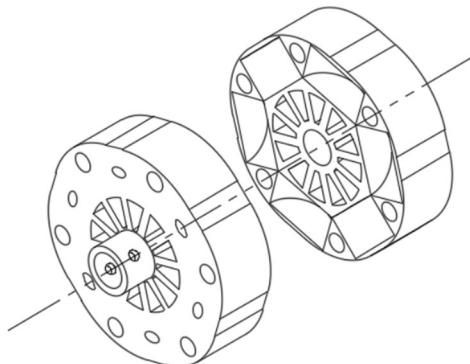


Abb. 12: Rotor Schnitt

Um die Magnete bei den auftretenden Fliehkräften sicher in ihrer Position zu halten, besteht der Rotor aus zwei symmetrischen Hälften (vgl. Abb. 12: „Rotor Schnitt“). Diese beiden Hälften sind miteinander fest verschraubt.

Eine weitere Verschraubung befindet sich an der Wellenbefestigung (Rotorfront mittig). Die vorhandene Wellenpressung wird hier zusätzlich mit einer durchgehenden M3 Schraube unterstützt. Dies sichert die mechanische Verbindung insbesondere bei erhöhter Belastung.

Der Maximaldurchmesser des Rotors beträgt 62,65mm bei einer Tiefe von 35mm (vgl. Abb. 12: „Rotor Schnitt“). Da dieses Modell zur Lehre dienen soll, sind sogenannte Schaulöcher an den Magnetpositionen in den Rotor eingelassen (vgl. Abb. 12: „Rotor Schnitt“). Somit ist es möglich die Neodym Magnete zu sehen und die Wirkungsweise dieses Motors besser zu verstehen.

#### 4.2.4 Stator und Halter

Der Stator dient als Träger der Spulen. Ebenso läuft in ihm die Motorwelle und der Rotor. Er besitzt einen Innendurchmesser von 65mm, eine Höhe von 95,66mm und eine Tiefe von 45mm (vgl. Abb. 13: „Stator Bemaßung“).

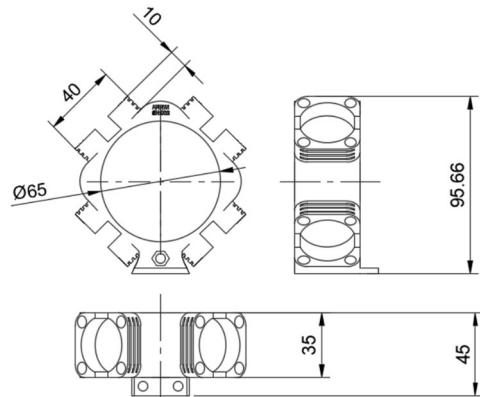


Abb. 13: Stator Bemaßung

Montiert ist er auf der Grundplatte in seiner dafür vorgesehenen Aussparung. Dafür besitzt der Stator jeweils zwei Halterkonstruktionen.

Einer dieser Halter ist direkt an den Stator gedrückt. Demgegenüber ist der andere Halter separat erstellt. (vgl Abb. 14: „Statorhalter 3D Konstruktion“). Dadurch ist es möglich den Stator ganzflächig auf das Druckbett zu legen. Mit der Folge, dass die Komplexität des Drucks maßgeblich gesenkt wird. Dieser modulare Halter wird mittels Schraubverbindung an dem Stator befestigt. Der Stator kann damit zweiseitig auf die Grundplatte verschraubt werden.

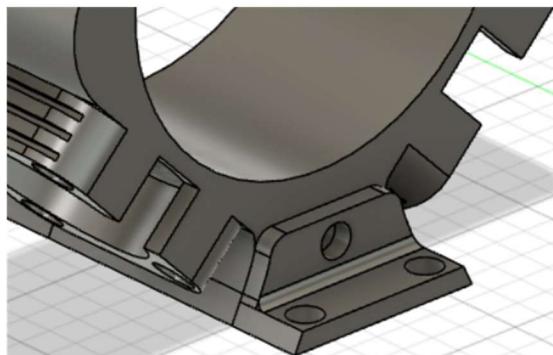


Abb. 14: Statorhalter 3D Konstruktion

Die außen liegenden Spulenschalen (vgl. Abb. 14: „Statorhalter 3D Konstruktion“) dienen dem sicheren Sitz der Spulen. Um die Spulen in ihrer Position zu sichern, besitzen die Schalen spannbare Abdeckungen. Diese sind auf einer Seite erhöht, um bei Bedarf die Ferritkerne in die Schalen zu pressen. Mit Schrauben können die Abdeckungen je nach Bedarf nur befestigt oder verspannt werden.

Um der Anforderung eines Lehrmodells weiter gerecht zu werden, besitzen die Spulenschalen angedeutete Kühlrippen (Spulenschale Rillen). Dadurch wird daran erinnert, dass die thermische Stabilität der Spulen in einem Elektromotor keinesfalls zu vernachlässigen ist.

#### 4.2.5 Kugellagerschalen mit Abdeckungen

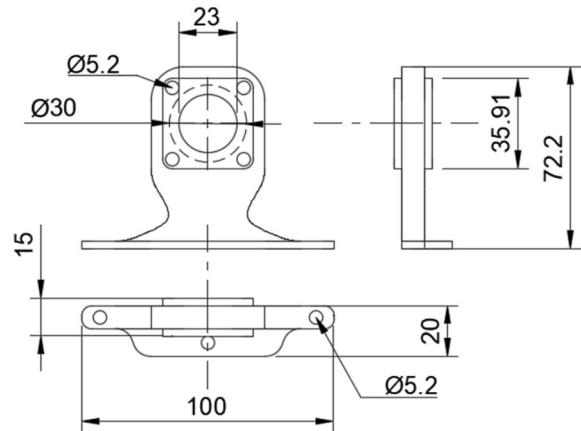


Abb. 15: Lagerschale Bemaßung

Ebenso wie der Stator, sind auch die Lagerschalen in ihren vorgesehenen Aussparungen auf der Grundplatte verschraubt. Die Lagerschalen besitzen den gleichen Durchmesser, von 30mm (vgl. Abb. 15: „Schritte Motor“), wie die Kugellager. Die Kugellager sind dementsprechend in den Lagerschalen verpresst (vgl. Eri22). Damit die Kugellager keine axialen Bewegungen ausführen können sind beiderseits Abdeckungen verschraubt (vgl. Abb. 16: „Lagerschale mit Abdeckungen 3D“). Sie sichern das Kugellager mittig in der Schale.

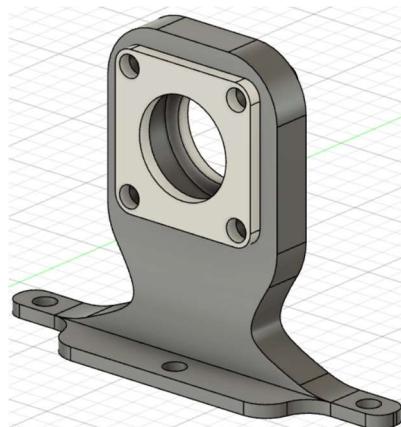


Abb. 16: Lagerschale mit Abdeckungen 3D

#### 4.2.6 Sensorkonstruktion

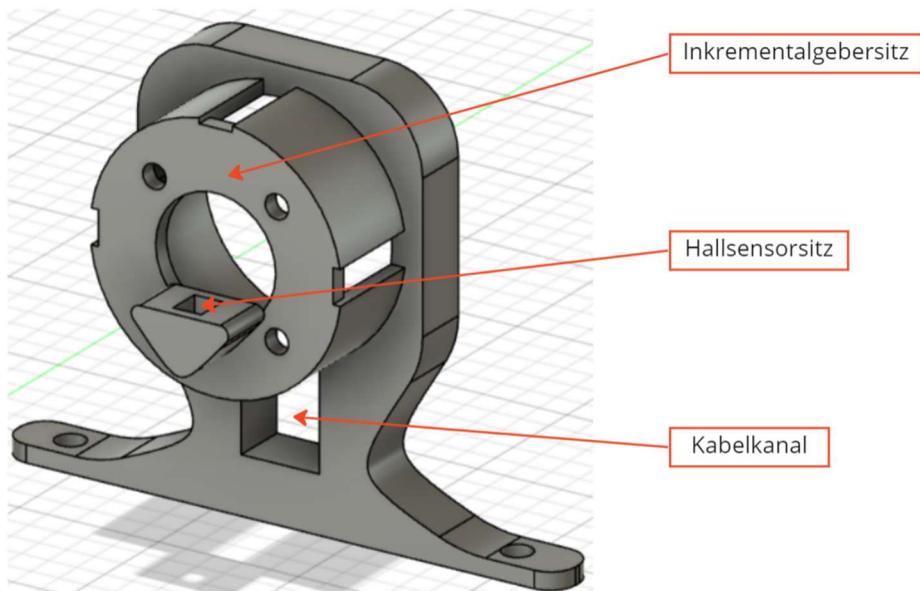


Abb. 17 Sensorkonstruktion 3D

Damit der Encoder und der Hallsensor ihre Aufgaben effektiv umsetzen können benötigen sie eine geeignete Aufnahme. In diesem Kapitel die Konstruktion der Sensorhalterung beschrieben. Die Grundidee dieses Halters ist nach der Studienarbeit „Praktikum zur Steuerung eines Förderbandes“ (Autor: Dennis Hofmann), gleichzeitig aber auch von den, in Kapitel 4.2.5 „Kugellagerschalen mit Abdeckungen“, beschriebenen Lagerschalen entstanden. Die runde Form des Encodersitzes ist passgenau für den ebenso runden Encoder konstruiert. Er wird mit vier M3 Schrauben in Position gehalten. Der Hallsensor ist in den Hallsensorsitz eingeklebt. Die Kabelführung der Sensoren geschieht durch den Kabelkanal (vgl. Abb. 17: „Sensorkonstruktion“) nach unten hin zur Grundplatte

Der Encoder besitzt eine Wellenaufnahme von 15mm, aufgrund dessen gibt es einen Adapter von 10mm (Motorwelle) zu 15mm (Encoder). Mit diesem Adapter sind Motorwelle und Encoder verbunden. Des Weiteren ist eine 8mm Welle (in Abb. 18: Adapter und Sensorwelle grün dargestellt) in dem Encoder platziert und ragt über den Hallsensorsitz hinaus. Diese Welle beinhaltet den N52 Neodym Magnet (vgl. Kapitel 3.5 „Neodym Magnete“) und ist als Sensorwelle gekennzeichnet. Dreht sich der Motor dreht sich auch der Encoder und damit die an ihm befestigte Sensorwelle. Hallsensor und Encoder bekommen somit die benötigte Koppelung zum System.

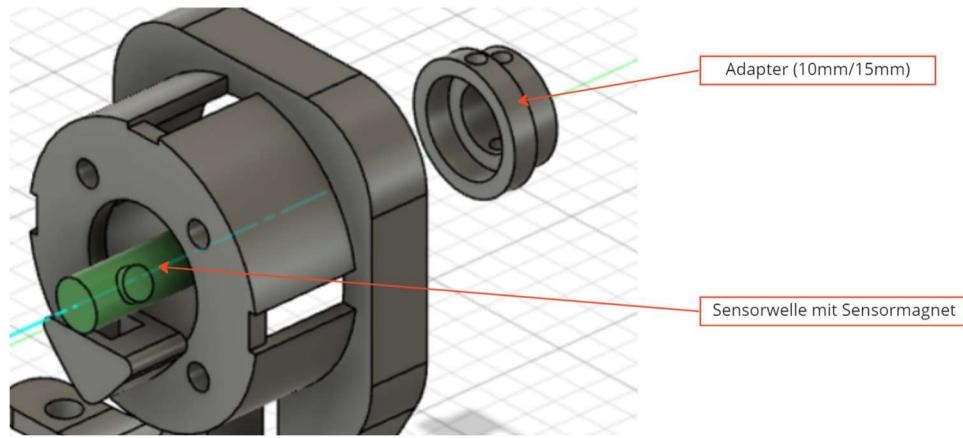


Abb. 18: Adapter und Sensorwelle

Die Sensorkonstruktion ist insgesamt 75,2mm hoch, 100mm breit und 38mm tief. Sie befindet sich, gegenüberliegend zur Last, auf der Sensorseite (vgl. Abb. 6: „Motormodell schematischer Aufbau“). Auch die Sensorkonstruktion ist in ihrer vorgesehenen Aussparung auf der Grundplatte verschraubt.

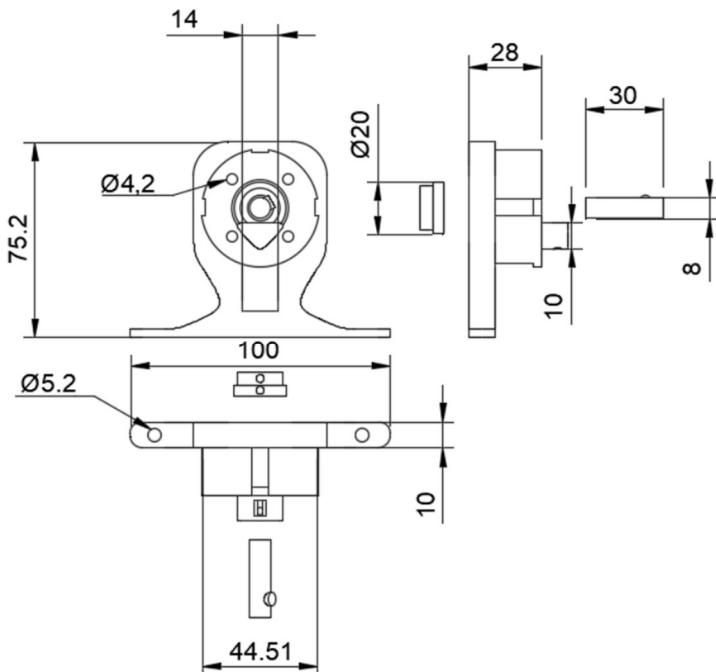


Abb. 19: Sensorkonstruktion Bemaßung

#### 4.3 Weitere Modellkomponenten

Die Motorwelle bildet eine 160mm lange Silberstahlwelle mit einem Durchmesser von 10mm. Auf dieser Welle ist der Rotor befestigt und die Welle selbst ist waagerecht zweifach gelagert (vgl. Abb. 6: „Motormodell schematischer Aufbau“).

Damit ein möglichst genauer und verschleißarmer Rundlauf der Motorwelle gegeben ist, wurde die Welle, jeweils vor und hinter dem Rotor, mit einem Radialkugellager gelagert. (vgl. Kapitel 4.2.5 „Kugellagerschalen mit Abdeckungen“) Diese Kugellager besitzen einen Außendurchmesser von 30mm und einen Innendurchmesser von 10mm. Montiert sind beide Kugellager jeweils auf der Motorwelle und in ihren 3D gedruckten Lagerschalen (vgl. Eri22).

Um alle 3D gedruckten Bauteile und andere Komponenten in ihrer vorgesehenen Anordnung zusammen zu fügen, sind überwiegend M5 und M3 Schrauben, mit dazu passenden Muttern und Gewindeinserts, in diesem Modell eingesetzt.

## 5 Elektronik

### 5.1 Technische Lösung Elektronik

#### Steuerungs Diagramm

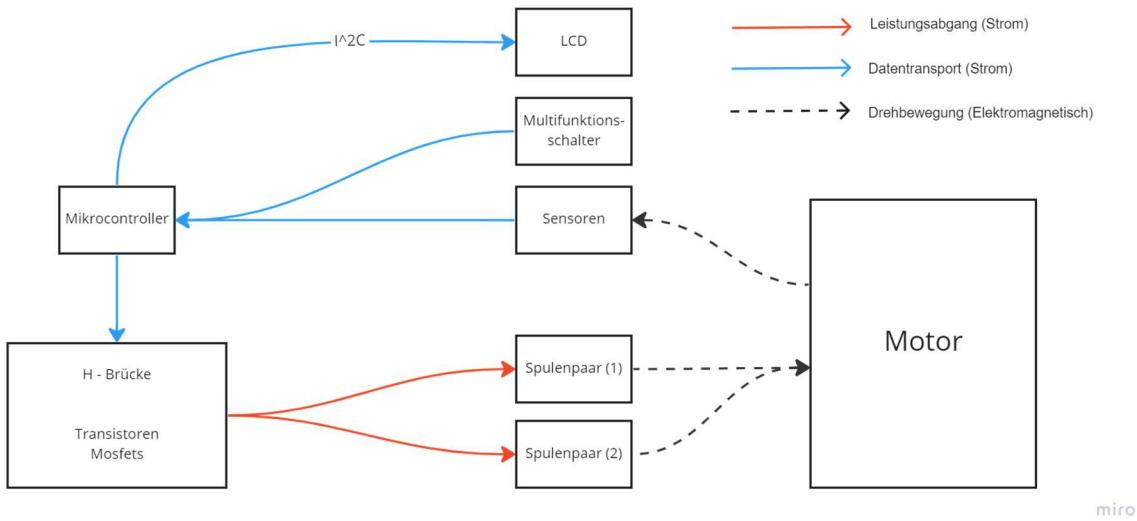


Abb. 20: Steuerungs Diagramm

In der beigefügten Abbildung (Abb. 20: „Steuerungs Diagramm“) ist die Struktur der Steuerung dargestellt. Der Kern der Elektronik besteht aus dem Microcontroller und der H - Brücke (links). Diese nutzen die Aktoren und Sensoren (mittig) um Einfluss auf das System „Motormodell“ (rechts) zu nehmen oder um Informationen aus diesem zu gewinnen.

Der mechanische Aufbau wurde im vorrangingen Kapitel 4 „Konstruktion“ detailliert beschrieben.

#### 5.1.1 Konzept Microcontroller

Der Microcontroller dient als Steuereinheit der elektrischen Komponenten. Dieser erhält folgende Informationen aus den Sensorelementen.:

Peripherie	Art	Information
Encoder	Impuls	-Positionsveränderung
Multifunktion – Switch	Impuls	-Veränderung der gewünschten Drehzahl -Veränderung der gewünschten Position
Direction – Switch	High/Low	-Drehrichtung cw [GND] -Drehrichtung ccw [5V]
Mode – Switch	High/Low	-Modus Drehen [5V] -Modus Schritt [GND]
Hallsensor	Impuls	-Volle Umdrehung

Tabelle 1: Eingangsinformationen Microcontroller

Der Microcontroller verarbeitet diese Daten und bildet daraus zum einen die Anzeigeeinformationen für das LCD und zum anderen die Steuerimpulse für die H - Brücke. Die Logik ist detailliert im Kapitel 6 „Programm“ beschrieben.

### 5.1.2 Konzept H – Brücke

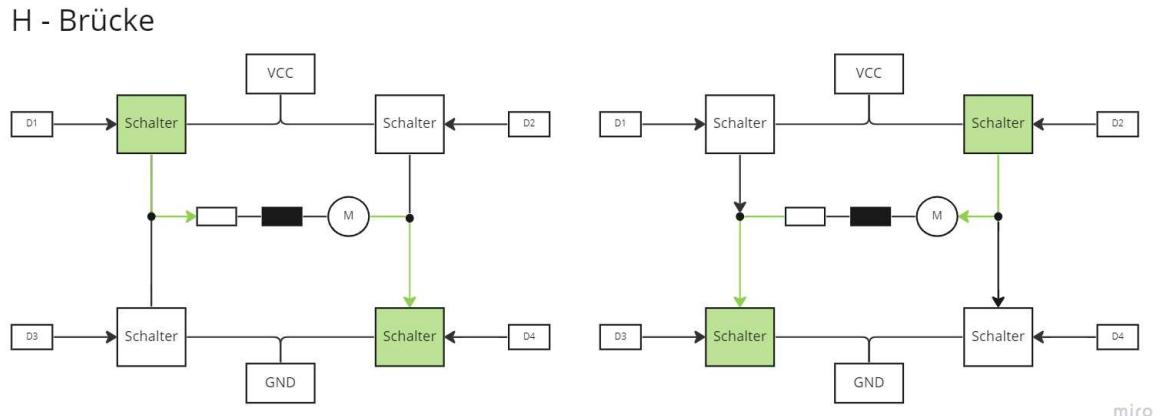


Abb. 21: H – Brücke

Im Motormodell werden zwei H – Brücken für die zwei Motorspulenpaare verwendet. Eine Brücke steuert dabei ein Motorspulenpaar. Hierbei wechseln vier Schalter zwischen zwei Schaltstufen (vgl. Abb. 21: H – Brücke links und rechts) um den Strom (grün) in beiden Richtungen durch das Motorspulenpaar zu leiten.

Die H – Brücke basiert auf einen Vier – Quadranten – Steller (vgl. Lip22: S.15), wobei diese lediglich in den Verbraucher – Quadranten betrieben wird.

Der detaillierte Aufbau, der verwendeten Brückenschaltung ist im Kapitel 5.2.2 „H – Brücke“ beschrieben.

### 5.1.3 Konzept Stromversorgung

#### Versorgungsdiagramm

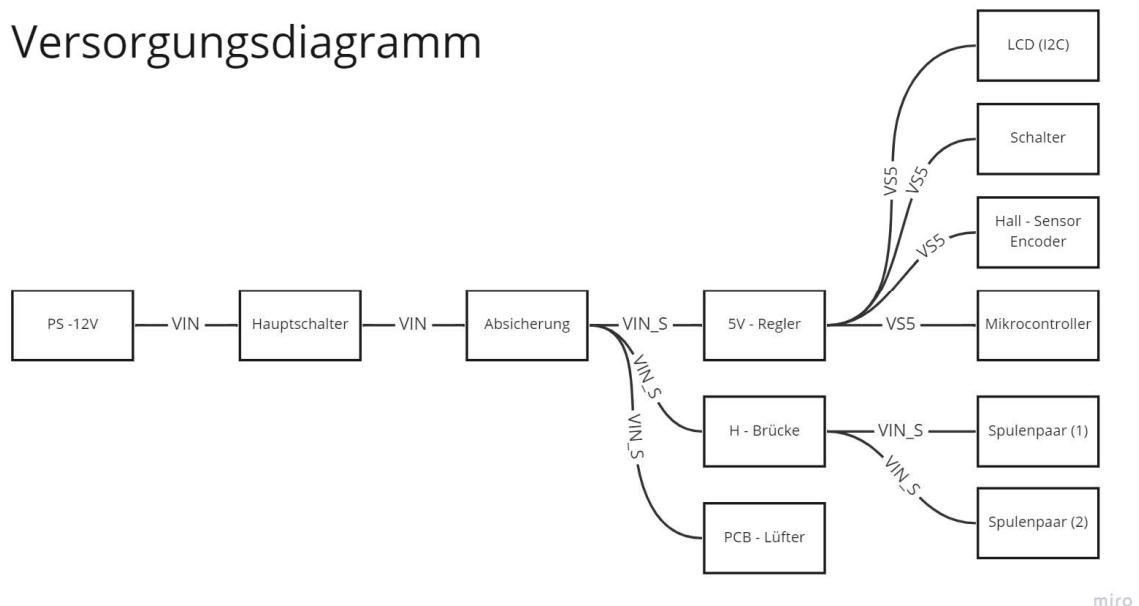


Abb. 22: Stromversorgung Diagramm

Für die Versorgung der elektrischen Bauelemente wurde folgendes Konzept nach Abb. 22: Stromversorgung Diagramm ausgearbeitet.

Das Netzteil wird an ein einphasiges 230VAC Netz angeschlossen. Diese Spannung wird im Netzteil auf 12VDC heruntergesetzt (vgl. Lip22: S.200). Der Hauptschalter erlaubt es den Stromfluss der Versorgungsspannung (VIN) zu trennen. Die Platine ist dennoch mit dem Netzteil verbunden. Eine folgende Schutzschaltung sichert VIN\_S gegen Überstrom und Überspannung ab. Von dort an teilt sich die Versorgungsstrecke in zwei Teile auf.

Auf der unteren Seite ist die 12VDC Strecke abgebildet. Hier wird neben einem PCB – Lüfter die H – Brücke gespeist. Die H – Brücken versorgen wie in Kapitel 5.1.2 beschrieben die beiden Spulenpaare.

Der Microcontroller, die Sensoren, und das LCD werden mit einer Versorgungsspannung von 5VDC betrieben. Dafür wird die 12VDC Spannung mittels Linearspannungsregler (vgl. Spe20: S.439) auf 5VDC heruntergeregt.

Der detaillierte Aufbau der Stromversorgung wird in Kapitel 5.2.4 „Stromversorgung und Stromverteilung“ erklärt.

## 5.2 Schaltplan

Im folgenden Kapitel werden die detaillierten Lösungen zu der in Kapitel 5.1 „Technische Lösung“ angeführten Konzepte erklärt. Der vollständige Schaltplan ist im Anhang unter Anhang 2 „Schaltplan 1/2“ und Anhang 3 „Schaltplan 2/2“ vorzufinden.

### 5.2.1 Microcontroller

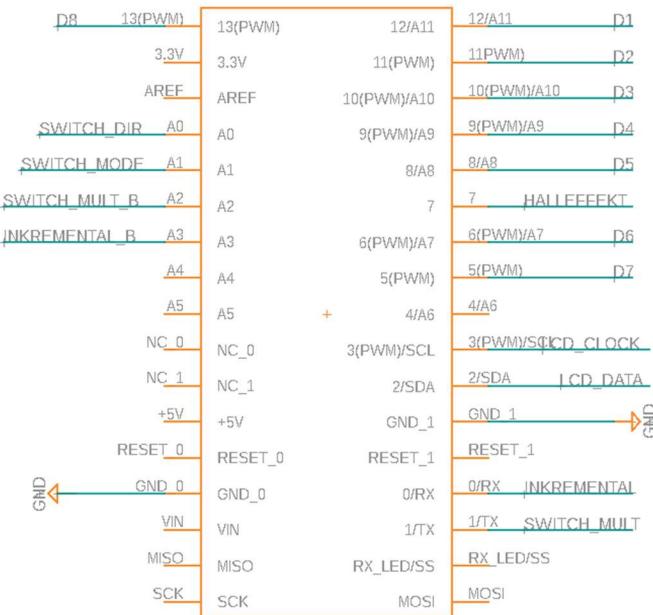


Abb. 23: Microcontroller Schaltplan

Als Microcontroller wird ein „Arduino Micro“ aus der „Arduino Classic Familie“ verwendet. Die in Tabelle 1 „Eingangsinformationen Microcontroller“ aufgeführten Peripherieelemente müssen je nach Signalart an einen folgenden Pintypen verbunden werden.

Signal	Pintyp
High/Low	General Purpose I/O Pin
Impuls	Interrupt Pin und General Purpose I/O Pin (außer Halleffektsensor [nur Interrupt])
I2C Bus	Zwei vorgegebene Pins [Clock] und [Data]

Tabelle 2: Signale und Pintypen

Unter der Berücksichtigung des Pinouts des Arduino Micros (vgl. Anhang 4 „Pinout Arduino“) und der angeführten Pintypen ist die Peripherie des Micro wie folgt beschalten.:

Peripherie	Pintyp	Typ	Pin
Encoder	INKREMENTAL	Impuls	0
	INKREMENTAL_B	High/Low	A3
Multifunktion – Switch	SWITCH_MULT	Impuls	1
	SWITCH_MULT_B	High/Low	A2
Direction – Switch	SWTICH_DIR	High/Low	A0
Mode – Switch	SWITCH_MODE	High/Low	A1
Hallsensor	HALLEFFEKT	Impuls (sonder)	7
LCD	LCD_CLOCK	I2C Bus	3
	LCD_DATA		2

Tabelle 3: Peripheriebeschaltung Microcontroller

Für die Steuerung der H – Brücken sind 8 General Purpose I/O Pins vergeben. Um gegebenenfalls die Spulenspannung im Haltemodus senken zu können besitzen alle Pins der N-Kanal Mosfet PWM – Funktionalität (vgl. Spe20: S316).

Signal	Mosfet	Pin	PWM möglich
D1	P – Kanal	Q1	nein
D2	P – Kanal	Q2	ja
D3	N – Kanal	Q3	ja
D4	N – Kanal	Q4	ja
D5	P – Kanal	Q7	nein
D6	P – Kanal	Q8	ja
D7	N – Kanal	Q9	ja
D8	N – Kanal	Q10	ja

Tabelle 4: H – Brückensignale Microcontroller

### 5.2.2 Peripherie

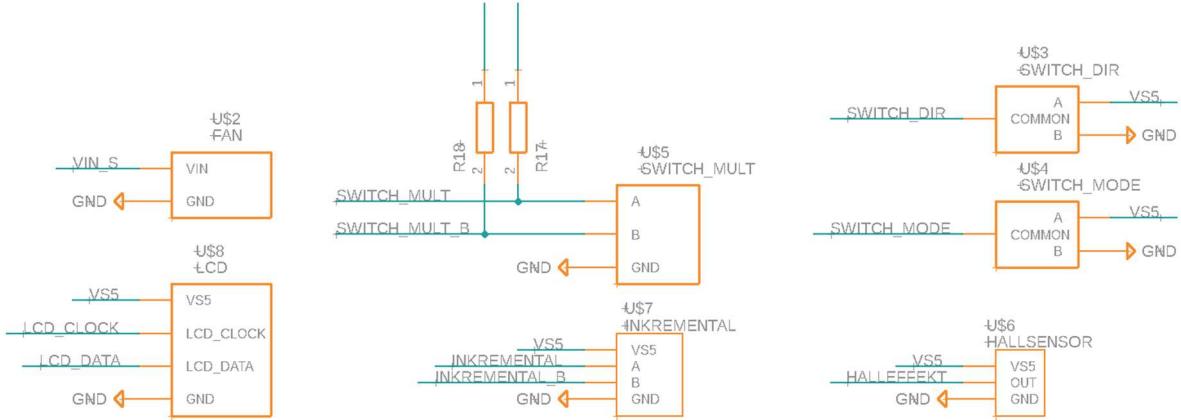


Abb. 24: Peripherie Schaltplan

In der Tabelle 3 „Peripheriebeschaltung“ ist die Art der Signale beschrieben. Die obige Abbildung stellt in diesem Zusammenhang die Bildung der Signale dar.

Die Schalter „MODE“ und „DIR“ wechseln am Eingang zwischen HIGH [5VDC] und LOW [GND]. Auf dieselbe Art arbeiten die Encoder. SWITCH\_MULT und INKREMENTAL besitzen interne Schalter, die das Signal entweder auf LOW oder HIGH ziehen. Dadurch entsteht das Typische Ausgangssignal. (vgl. Hof21.: S.7 und vgl. Abb. 38: Encoder Signal). SWITCH\_MULT benötigt hierbei noch externe PullUP – Widerstände. Ansonsten würde ein Kurzschluss entstehen.

Das LCD, der Hallsensor und die Encoder werden, wie die Verarbeitung der Signale, im Kapitel 6 „Programm“ erläutert.

### 5.2.3 H – Brücke

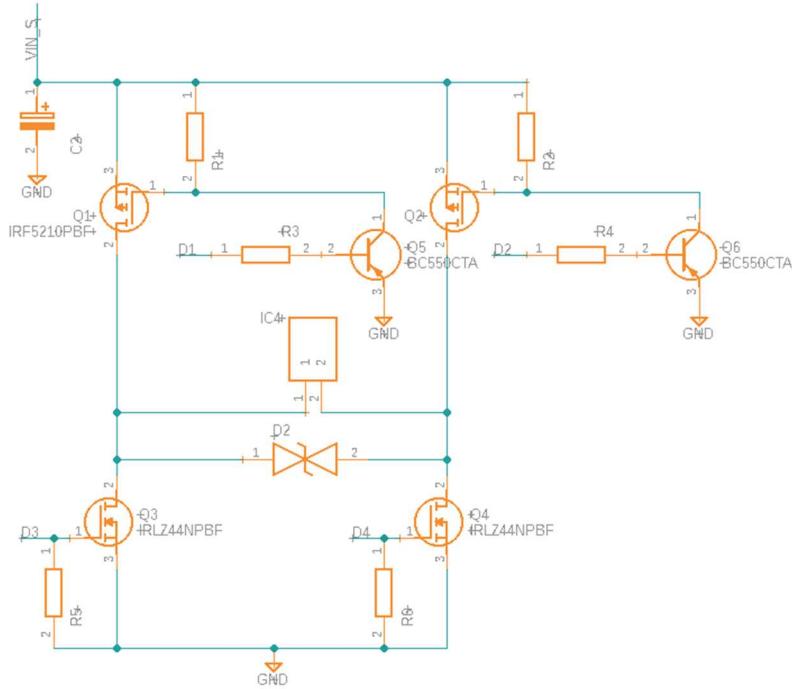


Abb. 25: H – Brücke Schaltplan

In der Abbildung „H – Brücke“ ist eine der beiden H – Brücken abgebildet. Vor beiden Brücken ist der Elektrolytkondensator (860020474014) C2 geschalten. Dieser glättet die restliche Welligkeit der VIN\_S und sichert die Versorgungsspannung der Brücken während der Schaltvorgänge.

Die Widerstände R1/2/5/8 dienen als PullUp / PullDown – Widerstände für die Eingangssignale. Die Widerstände R3 und R4 (CRMA1206AF10K0DKEF) senken den Transistorbasisstrom nach Ohm'schen Gesetz (vgl. Par07) auf 430 $\mu$ A.

$$U = R \cdot I \Rightarrow I = (U - U_{PN}) \cdot \frac{1}{R} = 4,3V \cdot 1 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\Omega} = 430\mu A$$

Formel 2: Berechnung Basisstrom Transistor

Als Schalter werden Mosfet verwendet. Beide Mosfet sind so dimensioniert, dass wenig Verlustleistung bei den verfügbaren Schaltspannung entsteht (vgl. 5.4 „Auswahl einzelner Komponenten“). Die N – Kanal Mosfet (IRLZ44NPBF) werden direkt vom Microcontroller angesteuert. Die 5VDC Signale reichen hierbei zum Schalten der erwarteten Ströme.

Um die P – Kanal Mosfet (IRF5210PBF) durchzuschalten, wird je ein NPN – Transistor

(BC550CTA) als Schaltstufe verwendet (vgl. Spe20: S.84). Die resultierende GateToSource – Spannung von 12VDC genügt ebenfalls, um die erwarteten Ströme zu schalten. (vgl. 5.4)

Die TVS – Diode (10BJ15CA) sichert die N – Kanal Mosfet gegen eine Spannungsüberhöhung durch Selbstinduktion der Spule (vgl. Spe20: S.83/84).

Das Spulenpaar ist über die Schraubverbindungen des Terminals verbunden.

#### 5.2.4 Stromversorgung und Stromverteilung

Wie die H – Brücke ist die Stromversorgung und Stromverteilung auf der selbstentwickelten Platine realisiert. Das aus Kapitel 5.1.3 „Konzept Stromversorgung“ wird wie folgt umgesetzt:

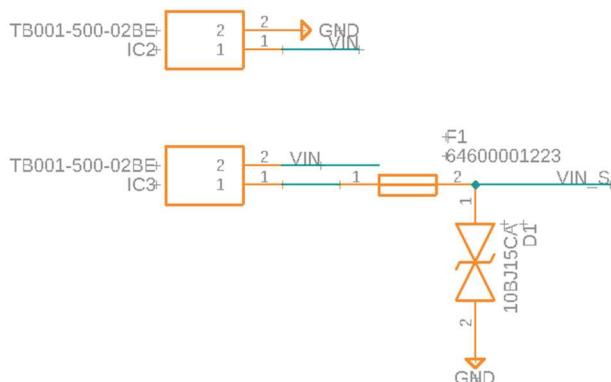


Abb. 26: Einspeisung Schaltplan

#### *Einspeisung und Absicherung*

Das Gleichspannungsnetzteil (POS-200-12-C) wird über einen Netzstecker mit den 230VAC Netz verbunden. Auf der Lastseite des Netzteiles stehen dann die erforderlichen 12VDC / 17A zur Verfügung. Über den Terminalblock (TB001-500-02BE) IC2 ist die Verbindung mit der Platine gesichert. Ab diesem Punkt sind GND und VCC dauerhaft mit der Platine verbunden. VCC läuft darauf über das Terminal IC3 zum Hauptschalter (C1500ATAAA). Der Hauptschalter ermöglicht dann das Trennen des Stromkreises und somit das Ausschalten des Geräts. Dennoch ist noch einmal zu betonen, dass VCC weiterhin an der Platine liegt.

Eine Glassicherung schützt den Stromkreis vor Strömen größer als 15A. Die Anliegende TVS – Diode (10BJ15CA) sichert gegen eine Spannung von größer als 16V. Im Falle das eine Überspannung eintritt, schließt die Diode Kurz und der Überstrom löst die Sicherung aus. Ein Verpolungsschutz ist nicht vorgesehen, da das Netzteil dauerhaft mit dem Modell verbunden ist. Der abgesicherte 12VDC Pfad ist mit VIN\_S gekennzeichnet.



Abb. 27: Tiefsetzsteller Schaltplan

### 5V Tiefsetzung

Für die für den Microcontroller und die Peripheriekomponenten benötigte Spannung regelt der Linearspannungsregler (MC7805ACD2TR4G) IC1 VIN\_S auf die 5VDC Spannung VS5 herunter. Der Regler kann einen Maximalstrom von 1A liefern.



Abb. 28: Verteiler Schaltplan

### Weitere Verteiler

Um den Peripheriekomponenten die benötigte Spannung zu liefern, besitzt der Platine zwei weitere Bauelemente. Das Terminal IC6 dient dazu den Lüfter mit der VIN\_S Spannung zu verbinden. Der Steckverbinder J2 verbindet die 5VDC Elemente mit der entsprechenden Versorgungsspannung.

### 5.3 PCB – Design

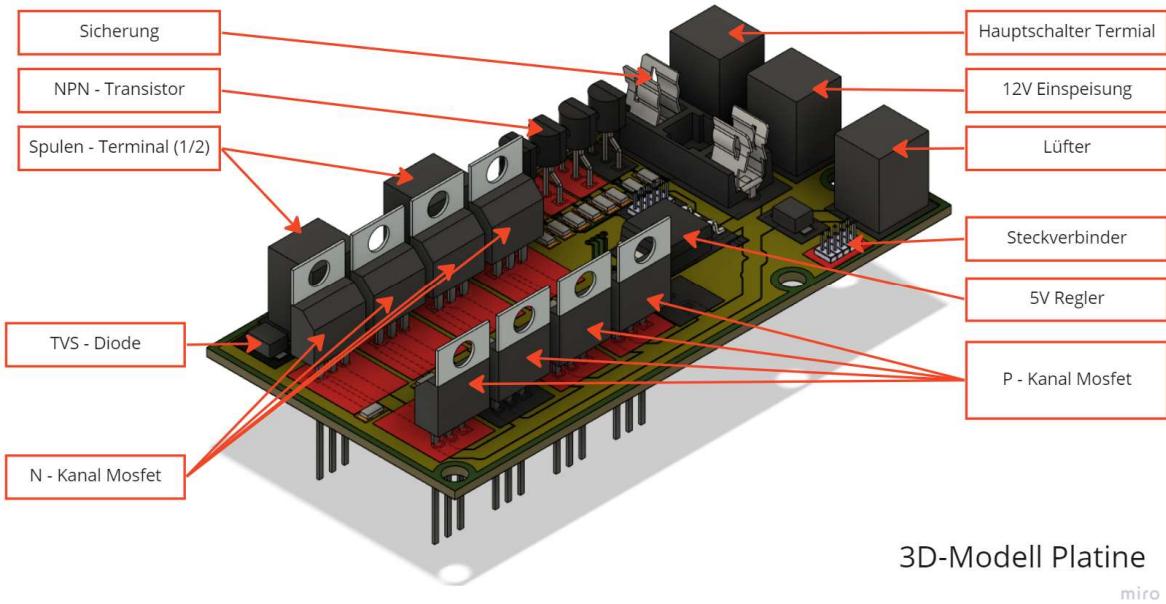


Abb. 29: PCB 3D Model

In der beigefügten Abbildung „Abb. 29: PCB 3D Model“ ist das Layout des PCB dargestellt. Das PCB basiert auf den Schaltplan und ist wie folgt konfiguriert.:

Eigenschaft	Konfiguration
Maß (L/B)	125mm * 50mm
Material	FR4
Layer	2 außen (TOP und BOTTOM)
Kupferdicke	70um

Tabelle 5: PCB – Konfiguration

Die Leiterbahnen sind nach zwei Klassen aufgebaut. (vgl. Tabelle 6 „Leiterbahnbreiten PCB“)  
 Die Hauptbahnen VIN(\_S) und die Spulenbahnen sind nach der Klasse Leistung dimensioniert.  
 Die Spulenbahnen sind mindestens 100mil breit und können einen Strom von 12,4 A führen.  
 Die Hauptbahnen sind doppelt in 100mil ausgeführt (TOP und BOTTOM) und können 20,5A führen.

Für die 5VDC Netze ist eine Leiterbahnbreite von 6mil dimensioniert. Diese reicht für den Maximalstrom des Tiefsetzstellers von 1A ebenfalls mit großem Puffer aus.

Name	minimale Leiterbahnbreite [mil]	Maximalstrom [A]   ΔT = 30K, 70um nach IPC2221
Default	Undefiniert	/
Leistung	100 / 200	12,4 / 20,5
Steuerung	6	1,61

Tabelle 6: Leiterbahnbreiten PCB

Das GND – Signal wird über eine Platine umfassende Kupferfläche geführt. Dadurch werden Störungen von fremden Geräten unterdrückt und eigene Gleichtaktstörungen vermieden (vgl. Spe20: S.392).

Geeignete Rechner erlauben hierbei das Berechnen der in Tabelle 6 „Leiterbahnbreiten PCB“ eingetragenen Werte. Die Berechnung des Maximalstromes der Leiterbahnen erfolgt nach IPC2221 über folgende Formel.:

$$I = K \cdot dT^{0,44} \cdot (W \cdot H)^{0,725}$$

Formel 3: Berechnung Leiterbahnen

I = Maximalstrom [A]

dT = Temperaturanstieg über Umgebung [K]

W = Leiterbahnbreite [mil]

H = Leiterbahndicke in [mil]

K = Anpassungsfaktor (0,024 für interne Bahnen, 0,048 für externe Leiterbahnen)

## 5.4 Auswahl einzelner Komponenten

### Mosfet

Wie in Kapitel 5.2.3 „H – Brücke“ beschrieben dienen Mosfet als Schalter der Spulenpaare.

Kennwert	IRLZ44NPbf	IRF5210Pbf	Anforderung
Maximalstrom	47A	-40A	±12A
Gate – threshold Voltage	2V	-4V	<5V >-10V
Drain to Source Voltage	55V	-100V	±16V

Tabelle 7: Kennwerte Mosfet

Wie in der Tabelle zu sehen, sind beide Mosfet grundlegend für den Nutzungszweck geeignet. Jedoch ist sind diese Zahlen allein ungenügend. Das Ablesen der Kennlinie gibt nähere Details.

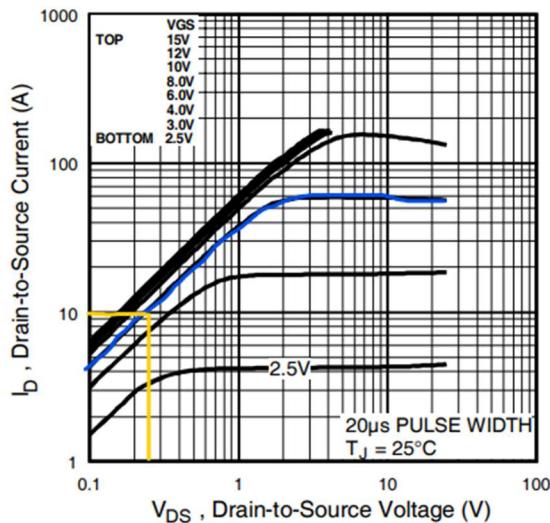


Abb. 30: Kennlinie N – Kanal Mosfet

Anhand der Kennlinie des IRLZ44NPbf ist die Verlustleistung zu bestimmen. Die Verlustleistung ist ausschlaggebend, ob der Mosfet für die Anwendung geeignet ist. Hier gekennzeichnet ist die Kennlinie für 4VDC (<5VDC Signal) Gate – Spannung. Wie markiert, fällt über den Mosfet, bei einem Strom von 10A (>8A Anforderung), eine Spannung von ungefähr 0,25 V ab. Dies entspricht einer elektrischen Leistung von 2,5 Watt:

$$P = U \cdot I = 10A \cdot 0,25V = 2,5W$$

Formel 4: Berechnung Verlustleistung Mosfet

Diese Leistung ist trotz „erschwerter Bedingung“ sehr gering. Der Mosfet ist somit geeignet. Ein Äquivalent ist beim IRF5210Pbf vorzufinden.

#### *Kühlkörper Mosfet*

Es ist stets empfehlenswert einen geeigneten Kühlkörper anzubringen. Im Folgenden ist die Dimensionierung des Kühlkörpers anhand des IRLZ44NPbf durchgeführt.: [R<sub>CS</sub> = 0,5 K/W, R<sub>JC</sub> = 1,4 K/W]

$$R_{thK} = \frac{T_M - T_a}{P} - \sum (R_{th})$$

Formel 5: Berechnung Kühlkörper (ohne Werte)

Bei einer angenommenen Umgebungstemperatur von 40°C (in der Platinenbox), einer maximal erlaubten Mosfet – Temperatur von 120°C und der eben errechneten Leistung ergibt sich im Worstcase:

$$R_{thK} = \frac{120^\circ C - 40^\circ C}{2,5W} - \frac{1,9K}{W} = \frac{30,1K}{W} = R_{thKmax}$$

Formel 6: Berechnung Kühlkörper (eingesetzt)

Der ausgewählte Kühlkörper (FK 242 SA 220 O) hat einen thermischen Widerstand von nur 26K/W. Da weitere thermische Widerstände (beispielsweise Wärmeleitpaste) in der Berechnung vernachlässigt wurden.

### *Transistor*

Die Dimensionierung des Transistors erfolgt kongruent der Mosfet. Zunächst muss wieder ein Transistor gefunden werden, welcher die Maximalspannung von 16V (abgesichert) aushält und den Mosfet schalten kann. Dazu muss dieser 1,2 mA schalten können.:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{\text{Nennspannung}}{R_{PullUp}} = \frac{12V}{10^4 ohm} = 1,2mA$$

Formel 7: Berechnung Strom PullUp / PullDown

Der BC550CTA von Fairchild besitzt einen Verstärkungsfaktor  $h_f$  von min 110. Bei einem Basisvorwiderstand von 10kΩ und Basisstrom von 430μA (vgl. Kapitel 5.2.3) schaltet dieser circa mit dem Faktor 40 durch. Die dabei entstehenden thermischen Verluste sind dadurch vernachlässigbar.<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> [Ves10 S.161]

## 6 Programm

Im folgenden Kapitel Programm ist die Art und Weise erklärt, wie der Microcontroller die einzelnen Informationen verarbeitet und zusammenführt. Hierbei wird hauptsächlich auf den dazugehörigen Ablaufplan (vgl. Anhang 5 „Programm vollständig“) eingegangen.

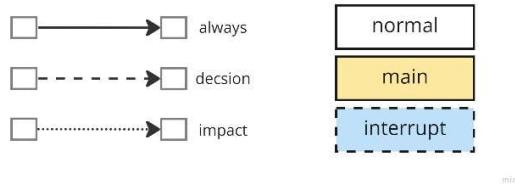


Abb. 31: Legende Ablaufplan

### 6.1 Setup

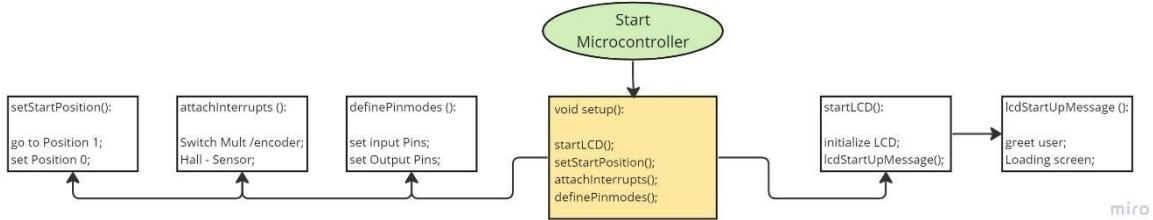


Abb. 32: Microcontroller Programm Setup

Das Setup des Microcontrollers wird einmalig beim Start (Stromzufuhr) ausgeführt. Die Funktionen des Setups dienen dazu den Microcontroller auf den zyklischen Programmablauf vorzubereiten.

Nach dem automatischen Initialisieren der globalen Variablen mit 0 wird mit der Funktion „startLCD()“ das LCD vorbereitet. Hier wird die Beleuchtung des LCD aktiviert, und eine Funktion aufgerufen, welche den Benutzer begrüßt und einen Ladebildschirm simuliert.

Die darauffolgende Funktion „setStartPosition()“ setzt den Rotor auf die Startposition. Hierfür wird zunächst die Position 1 (vgl. 4.2.3 „Rotor“) angesteuert und danach die Position 0 aktiviert. Position 0 ist der Ausdruck dafür, dass keine Mosfet eingeschalten sind. Der Motor befindet sich demnach im „Leerlauf“ ohne Erregerkraft.

Damit die Impulsfunktionen eingelesen werden können müssen einzelnen Pins mit Interrupts (vgl. PA09 S.183) versehen werden (vgl. Tabelle 2 „Signale und Pintypen“). Mit der Funktion „attachInterrupt“ werden die einzelnen Pins verwiesen.

Am Schluss wird die Funktion „definePinModes()“ aufgerufen. In dieser wird definiert welche

Pins INPUT (vgl. Tabelle 3 „Peripheriebeschaltung Microcontroller“) und welche Pins OUTPUT (vgl. Tabelle 4 „H – Brückensignale Microcontroller“) sein sollen.

## 6.2 Main – Funktion

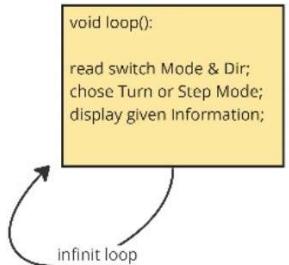


Abb. 33: Programm Main – Funktion

Die Main – Funktion hier „void loop()“ ist die zentrale Funktion des Programms. Sie wird nach dem Setup (vgl. 6.1 „Setup“) aufgerufen und in einer unendlichen Schleife wiederholt. Zu Beginn jedes Zyklus werden die Ist – Stände der Binären Eingänge „Mode“ und „Direction“ ausgelesen. Anhand der Stellung von Mode wird dann entschieden, ob der Drehmodus oder der Schrittmodus ausgewählt wurden. Zu beiden Funktionen wird dann die entsprechende Funktion „Turn()“ oder „Step()“ aufgerufen. Sind deren Abläufe beendet, werden die erforderlichen Informationen (vgl. Tabelle 8: Informationen LCD) an das LCD übergeben.

## 6.3 Positionsfunktion

Laut Anforderung soll das Motormodell einzelne Schritte und normales drehen beherrschen. Diese beiden Funktionen kann man vereinen, indem eine Gesamtfunktion der Schritte, die immer den gewünschten Schritt als Übergabe – Parameter bekommt, gebildet wird. Mittels Array of Functions (vgl. Ree13: S.76) lassen sich alle Funktionen in einem Array speichern.

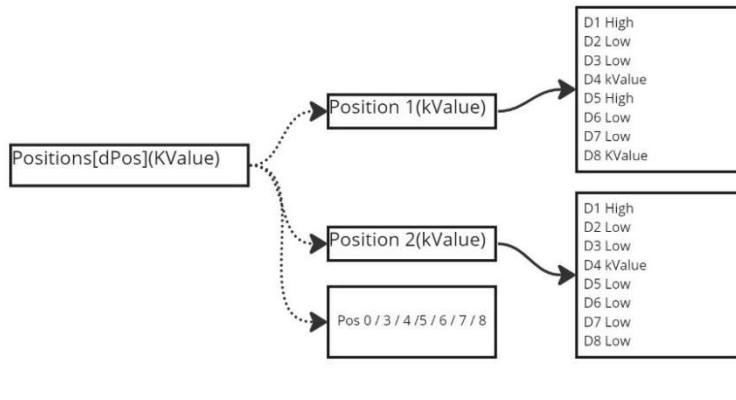


Abb. 34: Positionsfunktion

Zum Drehen kann die Positionsfunktion nun von 1 bis 8 (oder Rückwärts) durch iteriert werden.

Zum Beispiel mittels „for – Schleife“. Die einzelnen Schritte können direkt per Aufruf der Funktion angesteuert werden. Hier ist ebenfalls nur der Parameter dPOS zu füllen.

Die mit PWM angesteuerten N – Kanal Mosfet (vgl. Tabelle 4: H – Brückensignale Microcontroller) erhalten zusätzlich einen Verstärkungsfaktor (kValue). Der kValue bestimmt den Wert des PWM – Signals. Bestimmt wird dieser in der Funktion „getKValue()“ . Diese nutzt eine „Map()“ Funktion (vgl. Ard22) um mithilfe der gemessenen Drehzahl (mRPM) einen Wert zwischen dem Minimum (kVMin) und dem Maximum (256) aufzutragen.

#### 6.4 Drehmodus

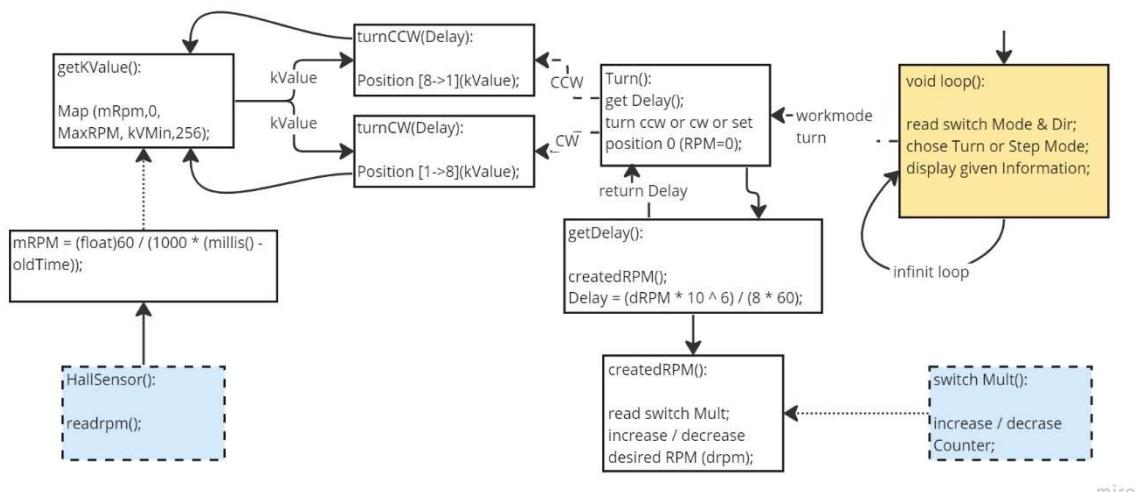


Abb. 35: Programm Turn

Um den Motor zu drehen, muss zunächst bestimmt werden, wie schnell der Motor gedreht werden soll. Die Drehzahl wird hierbei in eine Verzögerung zwischen den einzelnen Schritten umgewandelt.

Um die Verzögerung zu erhalten, ruft „Turn()“ die Funktion „getDelay()“ auf. Diese ruft wiederum kaskadiert die Funktion „createdRPM()“ auf.

„createdRPM“ vergrößert oder verringert die gewünschte Drehzahl (dRPM). Sie vergleicht dazu, ob sich der Zähler des Multifunktionsschalters verändert hat und passt die dRPM entsprechend an. In „getDelay()“ wird die dRPM in die Verzögerung mit folgender Formel umgerechnet.:

$$\text{Verzögerung [ms]} = \frac{dRPM}{8 \text{ Schritte} \cdot 60s} \cdot 10^3 (\text{Convertierung in Millisekunden})$$

Formel 8: Berechnung Verzögerung

Hierbei ist zu beachten, dass die Verzögerung in Microsekunden übergeben wird. Sie ist daher mit dem Faktor  $10^6$  angepasst.

Nach diesem Ablauf ruft „Turn()“ nun Rechtslauf (cw) oder Linkslauf (ccw) auf. In den Funktionen werden die Positionen 1 bis 8 entweder aufwärts (cw) oder abwärts (ccw) abgefahren.

## 6.5 Schrittmodus

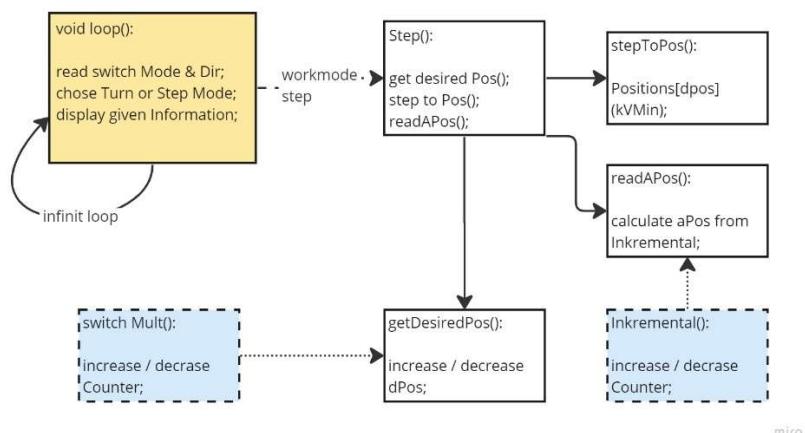


Abb. 36: Programm Step

Der Schrittmodus ist in der Art ein vereinfachter Drehmodus. In diesem Modus ist die Drehrichtung und die Drehgeschwindigkeit irrelevant. Die Hauptfunktion „Step()“ ruft drei einfache Funktionen auf. Die erste „getDesiredPos()“ vergleicht wie „createdRpM()“ (vgl. Drehmodus) den Zähler hinter den Multifunktionsschalter und passt bei Änderung die gewünschte Position (dPOS) an. In der „Step()“ wird darauf hin die Funktion „stepToPos()“ aufgerufen, welche dann die gewünschte Position aufruft, oder den aktuellen Schritt mit kVFaktor (<1) \* kVMin hält. kVFaktor sorgt hierbei für die Reduzierung der Wärmentwicklung. Am Ende des Funktionszyklus wird noch die aktuelle Position (aPos) ausgelesen. Hier wird der Counter des Encoders nach dem nachfolgenden Schema verglichen.:

$$\text{Schritt } X = X \cdot \frac{1028 \text{ Stufen}}{8 \text{ Schritte}} \pm \text{Tolleranz} \pm \text{Offset}$$

Formel 9: Berechnung Schrittwert

Wenn kein Schritt erreicht ist, wird Position 0 angegeben.

Da kein dauerhaftes Drehen stattfindet werden hierbei immer mit den minimalen PWM Wert kVMin angesprochen.

## 6.6 Interrupt – Funktionen

Wie im Kapitel „Setup“ beschrieben, werden die Impulssignale per Interrupt ausgelesen. Ein Interrupt ist hierbei das Auslösen einer Funktion bei Änderung eines Eingangssignales. (vgl. PA09 S.183)

Da diese Interrupt Funktionen entsprechend häufig ausgelöst werden, (Bsp. Encoder) müssen diese zeitlich kurzgehalten werden. So kann ein Ausbleiben des restlichen Programmes vermieden werden.

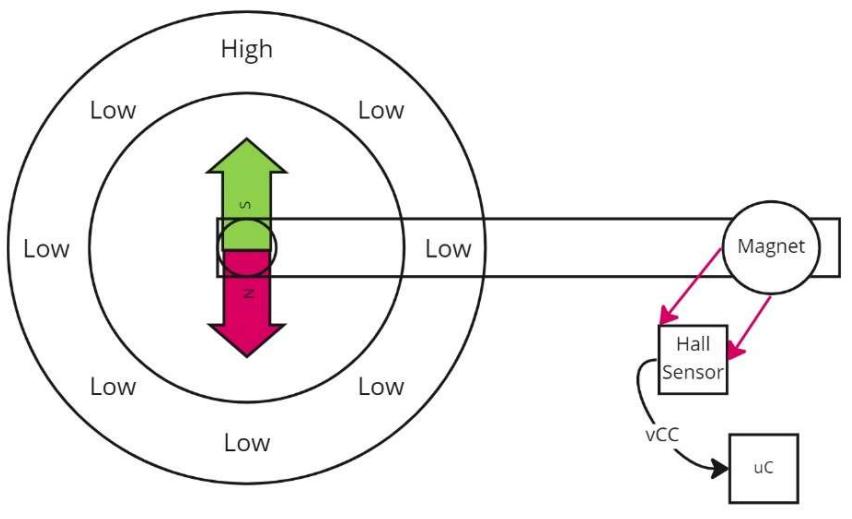


Abb. 37: Winkelbeziehung Hall – Sensor

### Hall – Sensor

Die Funktion „HallSensor()“ wird immer aufgerufen, wenn eine volle Umdrehung des Rotors und damit des Sensormagneten (vgl. 4.2.6 „Sensorkonstruktion“) stattfindet. Er erkennt hierbei das sich ändernde Magnetfeld des sich nähernenden Sensormagneten und löst ab einen bestimmten Schwellwert aus (vgl. Abb. 37 „Winkelbeziehung Hall – Sensor“). In der Interrupt Funktion wird zum einen der Zähler des Encoders gelöscht. Dementsprechend setzt er die Position 1 (bei Zähler gleich 0). Zum anderen wird, wie in der Anforderung beschrieben, über den Hallsensor ebenfalls die Drehzahl bestimmt. Hierzu ruft er die Funktion „readRPM()“ auf. Diese berechnet die gemessene Drehzahl mRPM wie folgt.:

$$mRPM = \frac{60 \text{ (Konvertierung in Umdrehung pro minute)}}{10^3 \text{ (konv. Sekunden)} \cdot (\text{aktualzeit}[ms] - \text{ZeitLetzerUmlauf}[ms])}$$

Formel 10: Berechnung Drehzahl

### *Encoder und Multifunktionsschalter*

Die beiden Peripherieelemente Encoder und Multifunktionsschalter besitzen das gleiche Arbeitsprinzip.

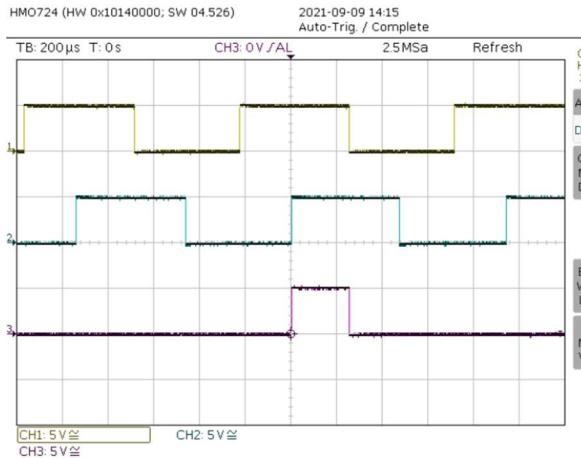


Abb. 38: Encoder Signal<sup>3</sup>

Beide besitzen die Ausgänge A und B. Zu beachten ist, dass in der Umdrehung  $90^\circ$  Phasenverschoben ist. Wird nun die Änderung von A überprüft, ist festzustellen, dass bei der Drehung gegen den Uhrzeigersinn (ccw) A immer gleich B ist. Demgegenüber ist bei der Drehung mit dem Uhrzeigersinn (cw) A immer ungleich B, wenn sich die Flanke von A ändert. Dadurch ist es möglich beide Drehrichtungen auszuwerten.

Die Auswertung der Elemente erfolgt über einen hinterlegten Zähler. Wird der Interrupt ausgelöst, überprüft das Programm, ob A gleich oder ungleich B ist und erhöht oder senkt den hinterlegten Zähler um 1.

Damit die Zähler nicht in das unendliche Laufen, werden beide umlaufend auf Ihre Maximalwerte (stufen des Schalters) gestaltet. So wird beispielsweise der Encoder – Zähler nach 1024 auf 1 und unter 1 wieder auf 1024 gesetzt. Beide Zähler laufen zwischen 1 und ihrem Maximum (24 oder 1024).

## 6.7 LCD

Wie im Kapitel 5.1.1 „Konzept Microcontroller“ vorhergenommen dient das LCD – Display als Anzeige der Motor Informationen. Damit dieses einfach per I2C Bus angesprochen werden kann, muss die eine Funktionsbibliothek wie „LiquidCrystal\_I2C.h“ eingefügt werden.

---

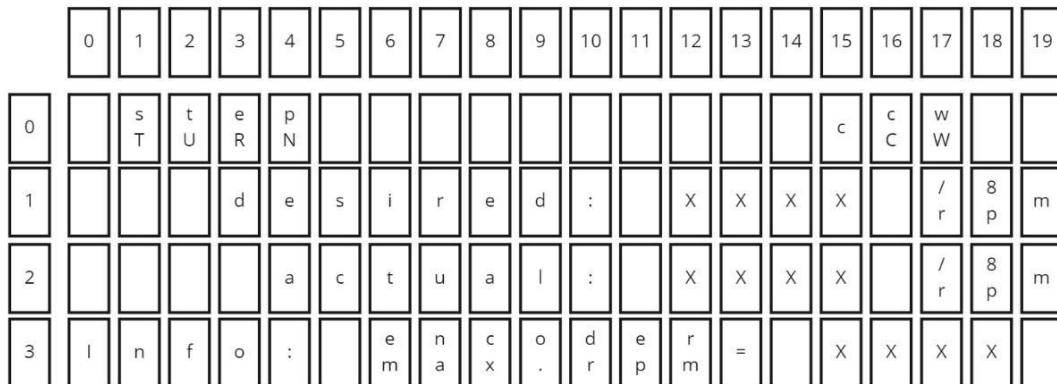
<sup>3</sup> [Hof21]

Zum Ansprechen des LCDs, über diese Bibliothek, werden noch I2C Adresse und das Displayformat benötigt. In den Datenblatt des „EA DOGM204B-A“ ist die Adresse 0x78 und das Format 4x20 vermerkt. Im Folgenden wird aufgezeigt, wie welche Informationen dargestellt werden. In der Darstellung „Struktur LCD“ wurden für das bessere Verständnis Groß- und Kleinschreibung abgeändert.

Information	Anzeige in Modus
Modus	Beide Modi
Drehrichtung	Drehmodus
gewünschte Drehzahl + Einheit	Drehmodus
gewünschter Schritt + „/8“	Schrittmodus
gemessene Drehzahl + Einheit	Drehmodus
gemessener Schritt + „/8“	Schrittmodus
maximale Drehzahl	Drehmodus
Encoder Zahl	Schrittmodus

Tabelle 8: Informationen LCD

## Struktur LCD



miro

Abb. 39: Struktur LCD

## 7 Evaluierung

Innerhalb der 3 Monate Bearbeitungszeit wurde iterativ, geplant, umgesetzt und ausgewertet. Das Modell konnte in diesem Zeitraum nicht fertiggestellt werden. Im Folgenden wird der Modellstand einzeln aufgegliedert.

### Zu den Elektromagnetischen Bauelementen

Die Elektromagnetischen Bauelemente (Spulen und Magnete) konnten nicht final aufeinander abgestimmt werden. Unter Berücksichtigung der thermischen Verlustleistung der Spule konnte kein ausreichendes Feld erzeugt werden, welches den Motor zum Drehen erregt. Der genaue Grund konnte nicht gefunden werden. Auf jeden Fall sind die metallischen Störelemente und die Abstimmung der Spulenwindungen mit der großen Kraft (Haftkraft 12Kg) der Magnete entscheidende Faktoren, die angepasst werden müssen.

Die Spulen wurden auf Magnetisierung, Magnetkraft und Thermische Stabilität getestet (vgl. Anhang 6 „Übersicht Tests“). Die Spulen konnten zwar ein Magnetfeld erzeugen sind aber wie vorher beschrieben bei den anderen beiden Tests durchgefallen.

### Zum mechanischen Modell:

Das in Fusion 360 entworfene 3D – Modell wurde vollständig gedruckt zusammengebaut. Es wurden alle Bauteile bis auf das LCD (aufgrund eines Fehlenden LCD – Controllers) und den Hallsensor (nicht getestet und wird verklebt) eingebaut. Vom Gutachter wurde zusätzlich noch gefordert, dass alle Bauteile auf eine Plexiglasplatte gesetzt werden und das das Netzteil mit einer Abdeckung gegen direkte Berührung geschützt wird, dies wurde ebenfalls umgesetzt. Die Mechanik wurde auf mechanische Stabilität getestet (vgl. Anhang 6 „Übersicht Tests“)).

### Zur Elektronik und Verdrahtung

Die ebenfalls in Fusion360 entworfene Platine wurde vollständig umgebaut. Aufgrund eines Schadens an einer Leiterbahn beim Ablöten einer Komponente, konnte diese nicht mehr verwendet werden. Die Platine wurde durch eine Lochrasterplatine ersetzt. Vor dem Umbau wurden alle Mosfet auf Funktion überprüft (vgl. Anhang 6 „Übersicht Tests“). Die H – Brücke wurde nach Schaltplan aufgebaut. Die Weitere Schaltung wurde so weit abgeändert, dass die Steckverbinder (vgl. Stromversorgung und Stromverteilung) entfallen sind und die Versorgungsspannung nicht dauerhaft auf der Platine anliegt. Der Lüfter hat ebenfalls ein eigenes Terminal bekommen. Zum Feststellen der 5VDC Versorgungsspannung wurde noch

eine LED hinzugefügt.

Den Komplextest ohne angeschlossene Spulen (vgl. Anhang 6 „Übersicht Tests“) konnten die notwendigen Spulenspannungen ( $\pm 12\text{VDC}$ ) gemessen werden. Beim Komplextest mit Spulen (vgl. Anhang 6 „Übersicht Tests“) konnten ebenfalls mehrere erfolgreiche Testdurchläufe durchgeführt werden. Allerdings sind bei weiteren Testdurchläufen zwei Mosfet (1P + 1 N – Kanal) kaputt gegangen. Bestätigt wurde der Defekt über gemessenem Durchgang zwischen Gate, Source und Drain. Zusammenfassend wird deklariert: die Lochplatine und die entsprechende Schaltung werden aufgrund einer Vielzahl ( $>8$ ) an erfolgreichen Testdurchläufen dennoch als funktionierend deklariert, sofern die Mosfet ausgetauscht werden (vgl. Anhang 6 „Übersicht Tests“). Das Modell wurde bis auf Hallsensor, Encoder und LCD vollständig verdrahtet.

### Zum Programm

Das Programm wurde nach Ablaufplan umgesetzt. Nachdem die Funktionalität des Multifunktionsschalters und der Schalter für Modus und Position gesichert war, wurde der Dreh- und Schrittmodus erfolgreich auf die Controllerausgaben getestet (vgl. Anhang 6 „Übersicht Tests“). Damit sind die Kernfunktionalitäten des Microcontrollers gesichert. Die Messfunktionen Drehzahl- und Positionsmeßung konnten aufgrund zeitlichen Mangels nicht getestet werden. Das LCD konnte ebenfalls nicht getestet werden., da in den Bearbeitungszeitraum nicht der enthaltene LCD – Controller ausgegeben wurde (nur LCD in geöffneter Verpackung vorhanden). Ein benötigter Ersatzcontroller desselben Typs konnte nach auffinden des Mangels nicht mehr aufgetrieben werden.

Die Konstanten zur Anpassung der Positionsmeßung (Toleranz und Offset) konnten diesbezüglich nicht angepasst werden. Diese sind leicht zugänglich (am Anfang) im Quellcode gekennzeichnet.

Trotz Nichtvollendung ist das Modell weit vorangeschritten. Es konnten viele Anforderungen umgesetzt werden. Der aktuelle (und auch erste) Prototyp stellt dar was möglich ist. Neben der vollständigen und 3D gedruckten mechanischen Konstruktion konnte zumindest zeitweise eine funktionierende 12V Motorsteuerung realisiert werden. Andere Anforderungen wie das Programm wurden schon teilweise auf ihre Funktion überprüft. Ebenfalls kann das Modell eigenständig mittels Netzspannung agieren. Außerdem besteht der angeforderte digitale Zwilling im Programm Fusion 360.

### Ausblick und Empfehlung

Die nächsten Schritte für die Umsetzung oder Verbesserung des Modells wären: Austauschen der defekten Mosfet oder die Platine physisch neu aufbauen, Anpassen des Verhältnis Magnet Spule (kleinere Magnete, größere Spulen, mehr Windungen) und damit die Anpassung des mechanischen Aufbaus, Testen des restlichen Codes ggf. Umbauen von delay() auf Alternativen (ohne Interrupt), Austauschen der Verdrahtung durch hochwertige Kabel mit Schirmung und Einbauen eines EMV – Schutzes.

Vor der Vorstellung des Motormodells muss dieses fertiggestellt und geprüft werden.

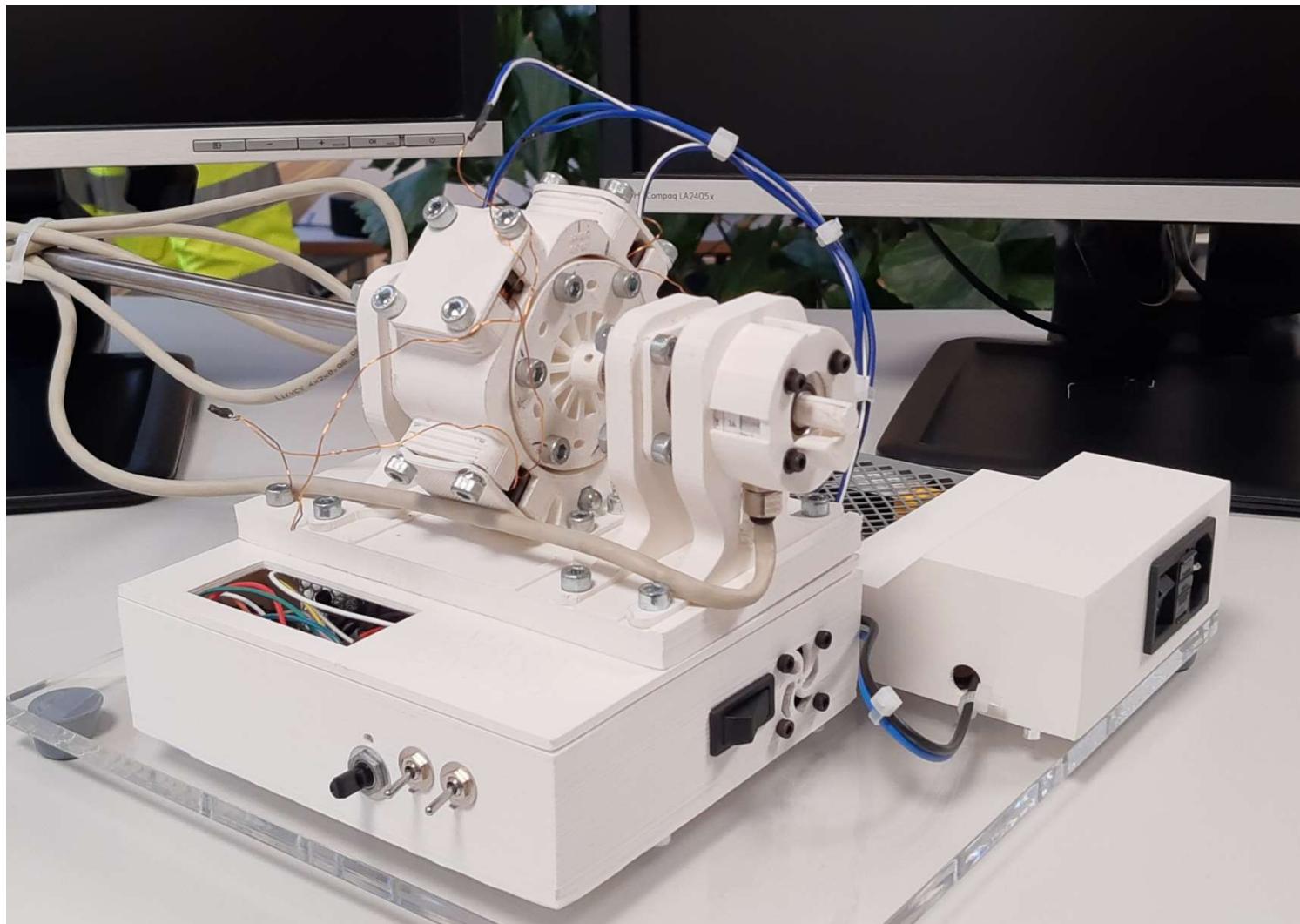


Abb. 40: Modell aufgebaut

Literaturverzeichnis

- Ama22 Amazon: „Amazon Basics 3D-Drucker-Filament“, Abgerufen am 09.11.2022 von:  
[https://www.amazon.de/AmazonBasics-3D-Drucker-Filament-PLA-Kunststoff-Weiß-1-kg-Spule/dp/B07RZTF5QF/ref=sr\\_1\\_9](https://www.amazon.de/AmazonBasics-3D-Drucker-Filament-PLA-Kunststoff-Weiß-1-kg-Spule/dp/B07RZTF5QF/ref=sr_1_9), Gera, 2022
- Ard22 Arduino Reference “map()”
- Eri22 ERIKS Holding Deutschland GmbH: „Montageanleitung für Lager: Verfahren und Werkzeuge“, Abgerufen am 10.11.22 von:  
<https://shop.eriks.de/de/montageanleitung-lager-verfahren-werkzeuge/>, Gera, 2022
- Hof21 Hofmann D.: „Praktikum zur Steuerung eines Förderbandes“, Studienarbeit, Fakultät für Elektrotechnik (Automatisierungstechnik), DHGE, 2021
- KQE13 Kallenbach E., Quendt P., Rüdiger E. „Elektromagnete – Grundlagen Berechnung Konstruktion Anwendung“, Vieweg + Teubner Verlag, 2013
- Kom14 Komorowsky, R.: „Generative Fertigungsverfahren: Untersuchung zur Auswahl eines 3D-Druck-Systems für die Herstellung kunststoffbasierter Prototypen“, Diplomica Verlag, Hamburg, 2014
- Lip22 Lipphardt, G.: „Einstieg in die Leistungselektronik mit PLECS“, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG., 2022
- ML14 Merz, H., Lipphardt, G.: „Elektrische Maschinen und Antriebe“, VDE Verlag GmbH, 3. Auflage, Mannheim, 2014
- PA09 Perez F., Areny R.: “Microcontrollers”, CRC Press, 2009

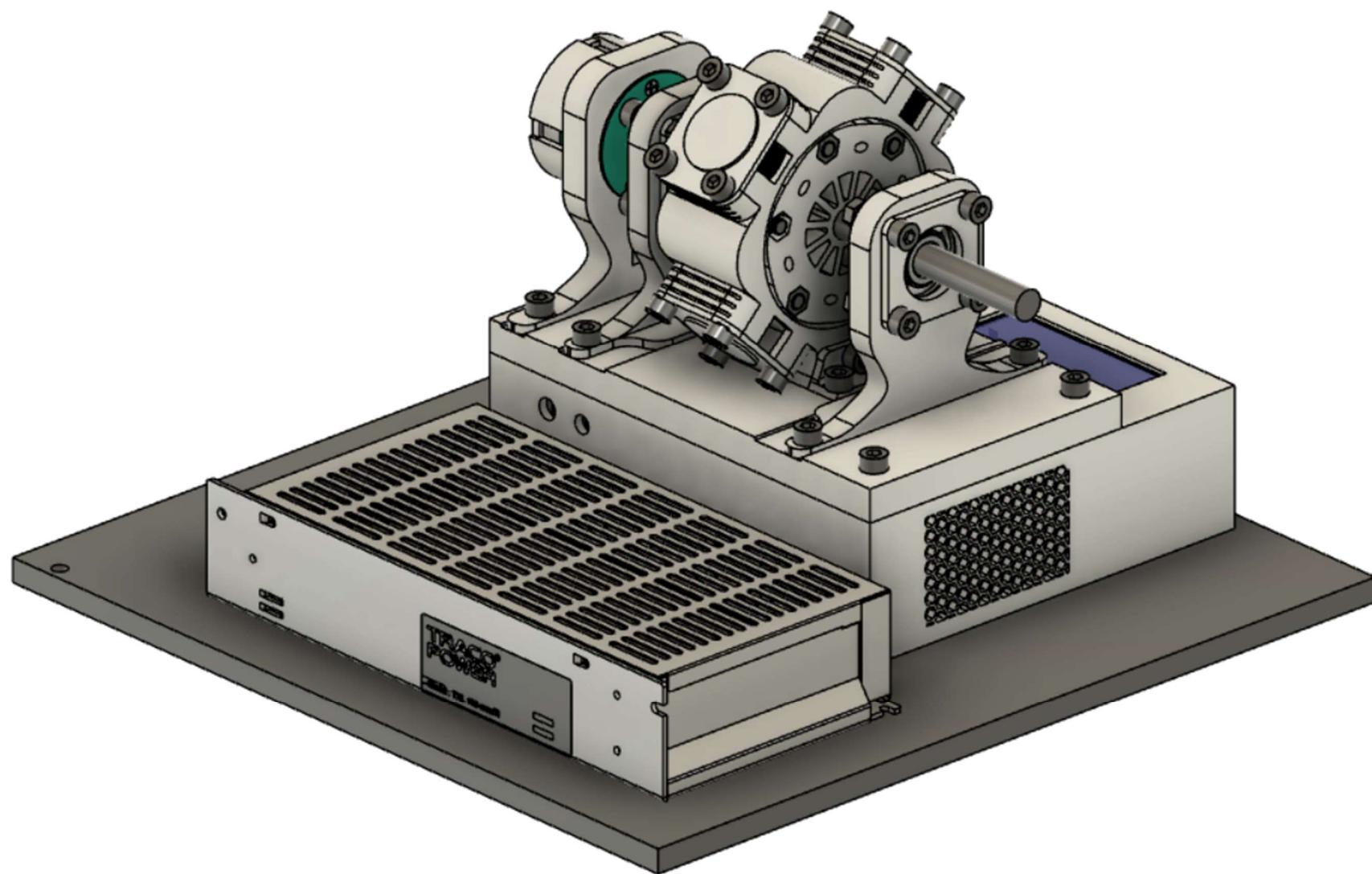
- Par07 Dr. Parks J. E.: „Ohm’s Law III – Resistors in Series and Parallel”, Department of Physics and Astronomy, University of Tennessee, 2007
- Ree13 Rees r.: “Understanding and Using C Pointers”, O’ Reilly Media, 2013
- SK02 Stölting, H., Kallenbach, E.: „Handbuch Elektrische Kleinantriebe”, Carl Hanser Verlag, 2. Auflage, Hannover, Ilmenau, 2002
- Spe20 Specovius J.: „Grundkurs Leistungselektronik“, Springer Vieweg Verlag, 10. Auflage, 2020
- TLE4905L Datenblatt: TLE 4905L, Infineon Technologies, V1.5,2007
- Ves10 Vester J.: „Simulation elektronischer Schaltungen mit MICRO-CAP“, Vieweg + Teubner Verlag, 2010
- Vöm03 Vomel M.: „Spule, Induktivität, Induktivität von Leitungen“, Vieweg + Teubner Verlag, 2003

## Formelverzeichnis

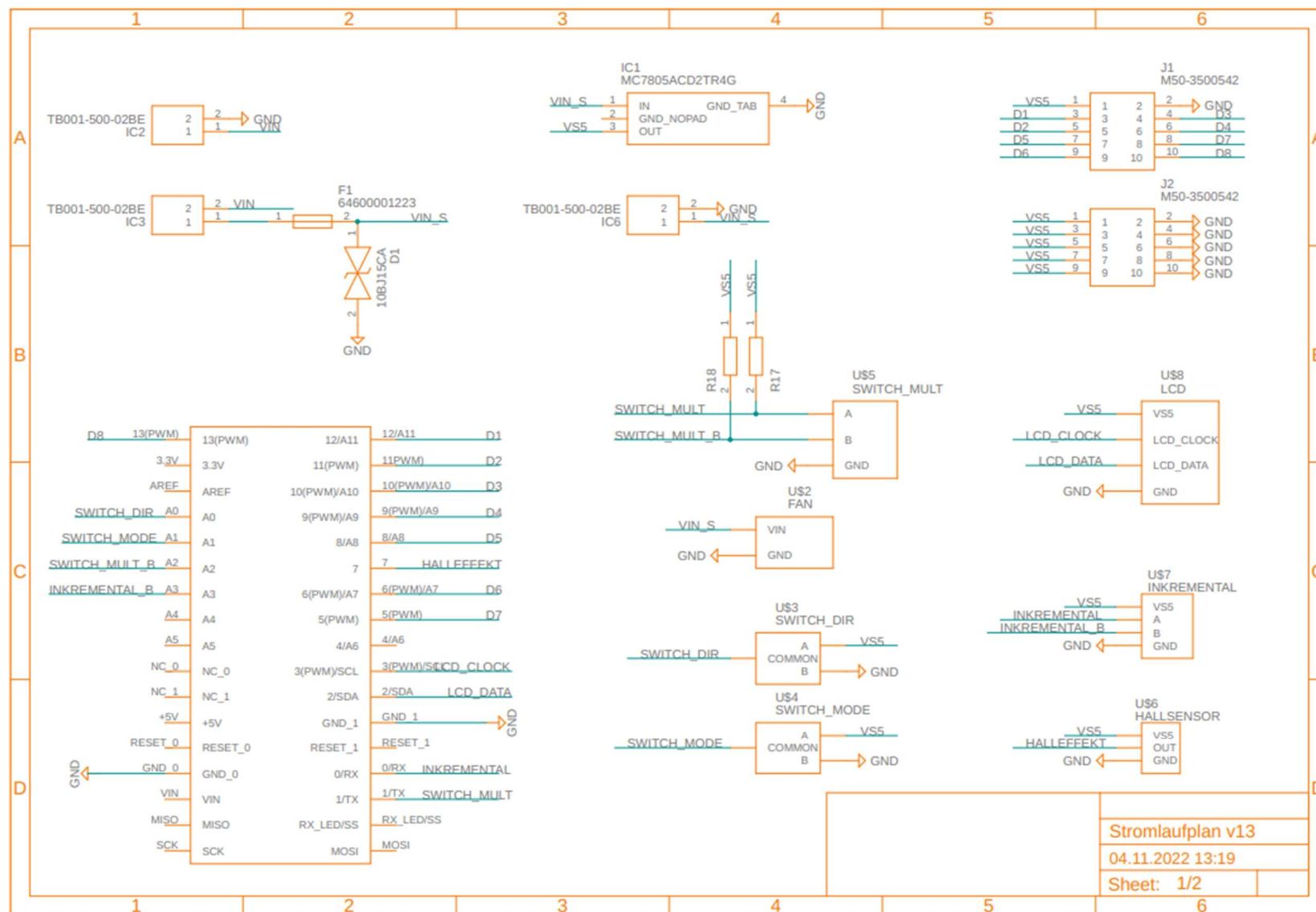
Formel 1: Induktivität einer Spule.....	5
Formel 2: Berechnung Basisstrom Transistor .....	23
Formel 3: Berechnung Leiterbahnen .....	27
Formel 4: Berechnung Verlustleistung Mosfet .....	28
Formel 5: Berechnung Kühlkörper (ohne Werte).....	29
Formel 6: Berechnung Kühlkörper (eingesetzt) .....	29
Formel 7: Berechnung Strom PullUp / PullDown.....	29
Formel 8: Berechnung Verzögerung .....	33
Formel 9: Berechnung Schrittwert .....	34
Formel 10: Berechnung Drehzahl.....	35

Anhangsverzeichnis

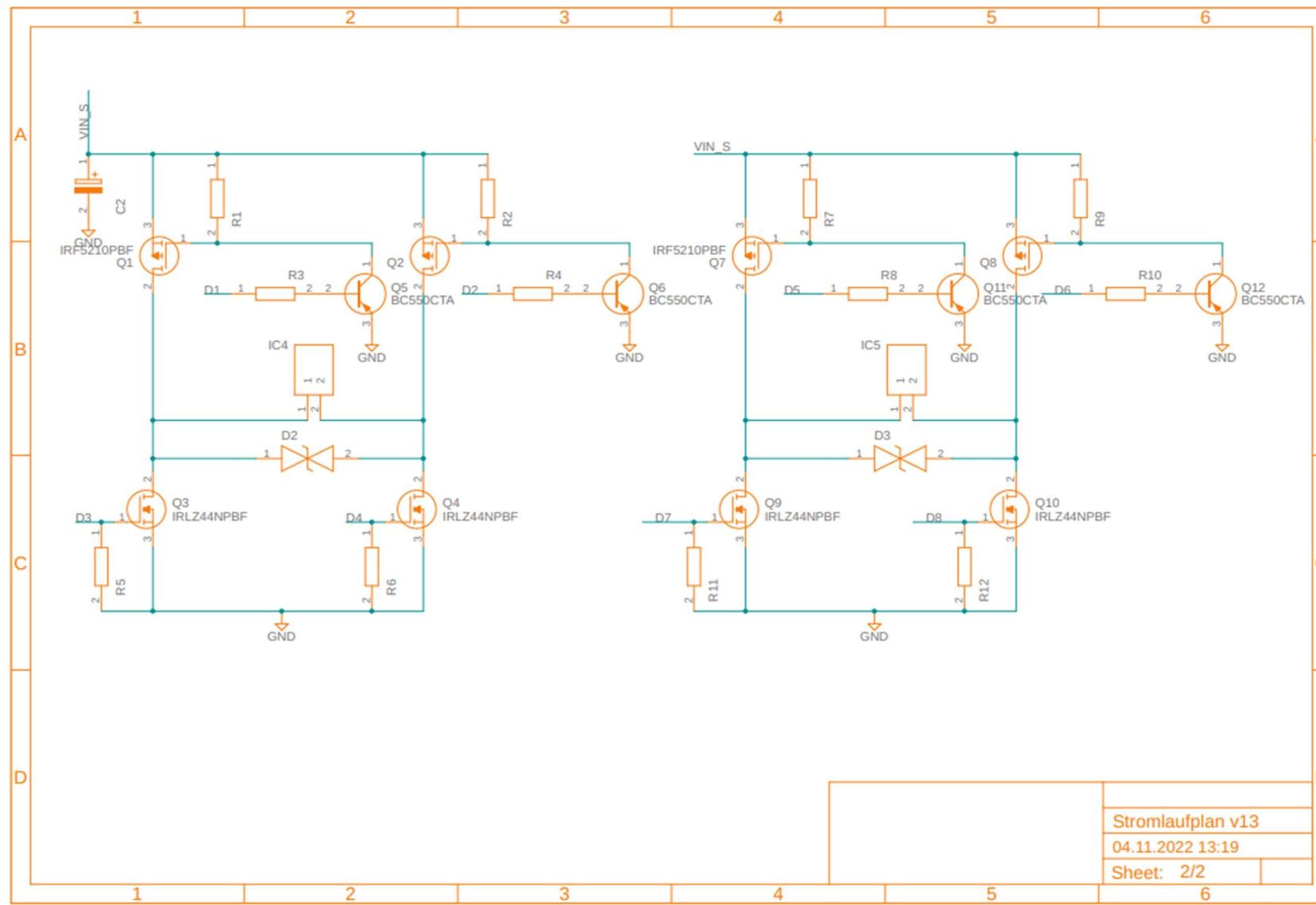
Anhang 1: Modell komplett.....	XII
Anhang 2: Schaltplan 1/2 .....	XIII
Anhang 3: Schaltplan 2/2 .....	XIV
Anhang 4: Pinout Arduino.....	XV
Anhang 5: Programm vollständig.....	XVI
Anhang 6: Übersicht Tests .....	XVII
Anhang 7: DHGE – Themenbeschreibung.....	XVIII



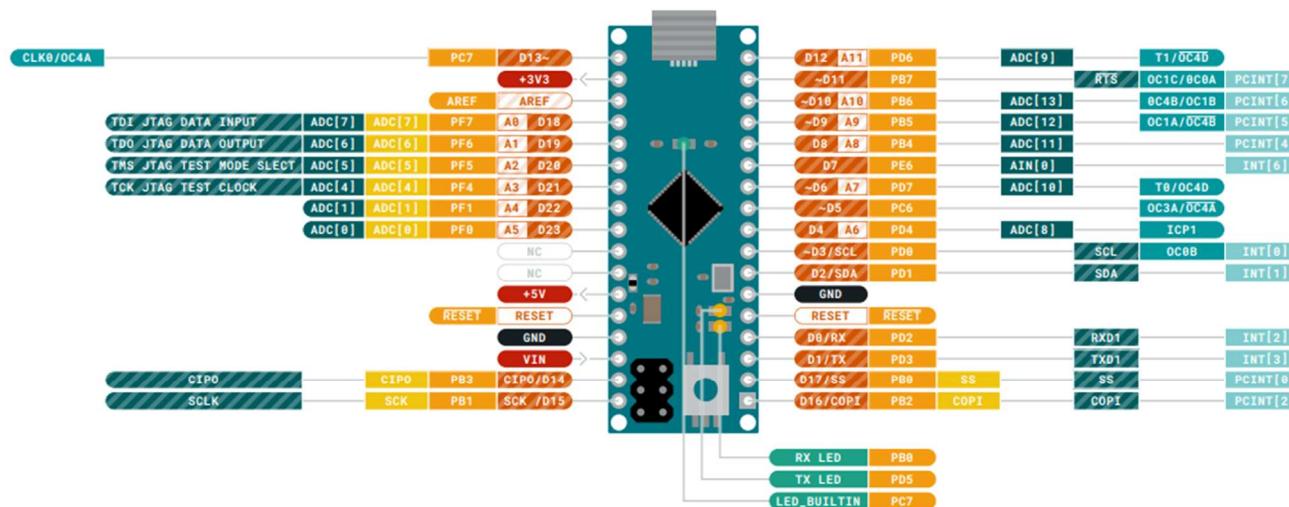
Anhang 1: Modell komplett



Anhang 2: Schaltplan 1/2

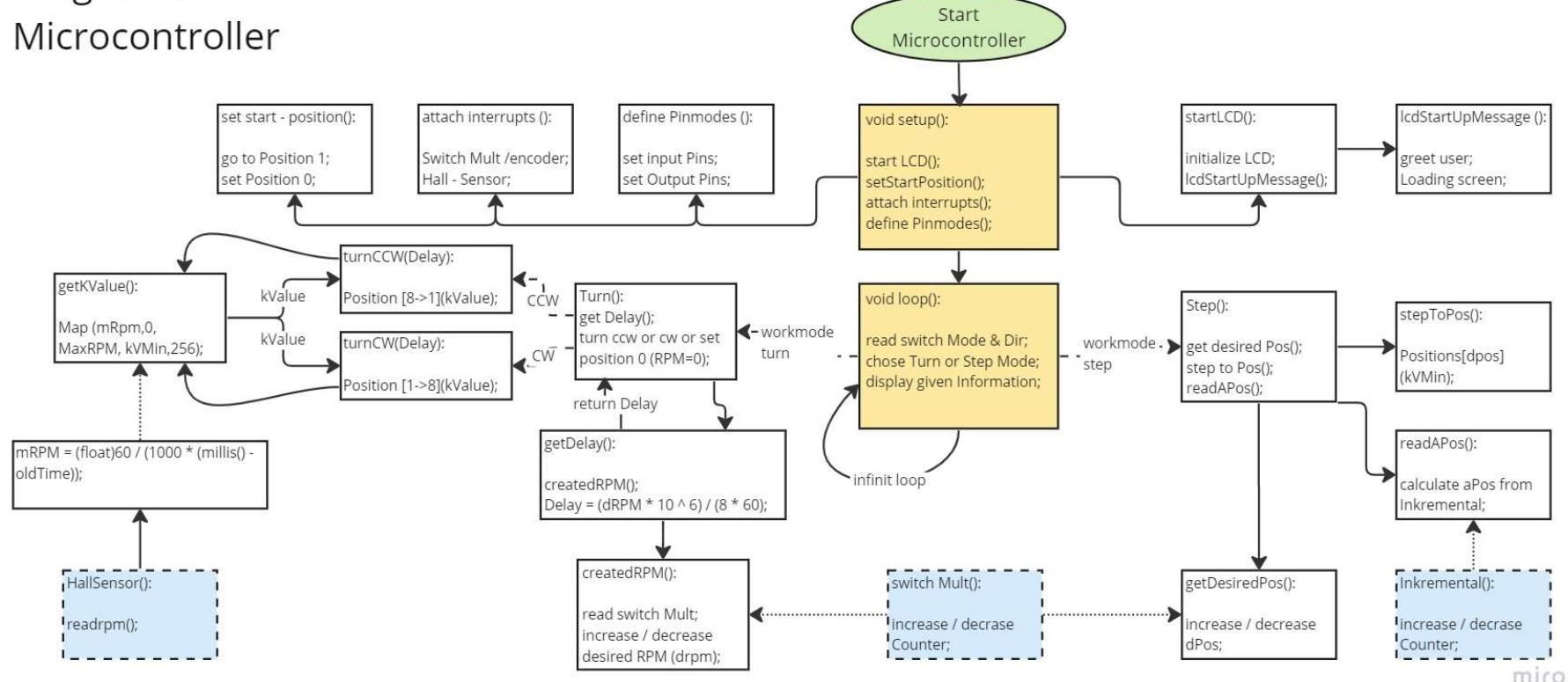


Anhang 3: Schaltplan 2/2



Anhang 4: Pinout Arduino

## Programm Microcontroller



Anhang 5: Programm vollständig

Test	Info	Art [isoliert/ komplex]	Resultat
Programm Schalterstellungen	-Multifunktionsschalter, Modus, Drehrichtung	Isoliert	bestanden
Programm Schrittmodus	-Testen der Ausgangssignale des Microcontrollers bezüglich der Schalterstellungen	Isoliert	bestanden
Programm Drehmodus	-Testen der Ausgangssignale des Microcontrollers bezüglich der Schalterstellungen	Isoliert	bestanden
Ansteuerung H – Brücke ohne Spule	-Testen der Ausgangsspannungen der Platine bezüglich der Eingangssignale -Testen auf 5VDC Signal -Testen auf Kurzschlüsse	Komplex mit Microcontroller	bestanden
Ansteuerung H – Brücke mit Spulen	-Testen der Ausgangsspannungen der Platine bezüglich der Eingangssignale (PWM)	Komplex mit Microcontroller	Teilweise bestanden
Funktionsweise Mosfet nach Entlötzung	-Funktionstest Schaltverhalten der Mosfet nach entlöten von Original – Platine	Isoliert	bestanden
Messung Mosfet nach Fehlverhalten	-Durchgangsmessung Gate, Source, Drain unter Ausschluss anderer Kurzschlüsse	Komplex in Platine	Nicht bestanden
Drehstabilität Mechanik	-Testen der Stabilität der Mechanik, Beschleunigung des Modells mittels Akkuschrauber >1500RPM	Isoliert	bestanden
Thermische Stabilität Spulen	-Einwirkung der Spulentemperatur auf den Stator, Wärmequelle: Spule	Isoliert.	Nicht bestanden
Magnetisierung Spulen	- Feldaufbau der Spulen im Stator	Isoliert	bestanden
Magnetkraft Spulen	-Feldstärke der Spulen: ist Drehbewegung möglich?	Komplex mit vollem mechanischem System	Nicht bestanden

Anhang 6: Übersicht Tests

<b>Kürzel</b>	<b>Beschreibung</b>
IA-01	3D-Motormodelldesign wird erstellt (3D-Zeichnung mit FreeCad), Teile werden erzeugt (Labor-3D-Drucker) – Hilfe zum Design wird -wenn erforderlich- gegeben
IA-02	Bauteilzusammenstellung erfolgt designspezifisch – wird tabellarisch aufgeführt
IA-03	Spulen für Motormodell werden gewickelt und vermessen, das Dimensionieren bzw. die Dimension der Spulen (z.B. Windungsanzahl) sind mit Berechnungen zu begründen bzw. darzustellen
IA-04	Jede Spule wird mit Mosfets angesteuert.
IA-05	Ansteuerungskonzept wird erarbeitet bzw. dargestellt.
IA-06	Hallsensoren prüfen Magnetfeld / -polungen, zur Positionsbestimmung des Stators bzw. Rotors
IA-07	Elektronische Schaltung basiert entweder auf eigens entwickelter Leiterplatte (mit KiCad) oder auf fertig verdrahteten elektronischen Komponenten
IA-08	Aufbau des Motormodells (Mechanik, Elektronik (Sensoren, Mosfets und Verdrahtung))
IA-09	Inbetriebnahme des Schrittmotormodells: Dabei ist die notwendige einzelne / musterbasierte programmgesteuerte Ansteuerung der Spulen zu testen.
IA-10	Die Wahl der Bauelemente ist zu begründen. Ebenso sind jegliche elektrische Schaltungen schematisch darzustellen.
IA-11	Ein Arduino- bzw. Raspberry-PI-Programm steuert das Motormodell. Taster steuern Schritte vor bzw. Schritte zurück sowie Drehung (Rechts-/Linkslauf). Über einen Drehpotentiometer soll die Motordrehzahl verändert werden können.
IA-12	Optional: Steuerung kann zusätzlich durch grafische Benutzeroberfläche (Raspberry-PI, QT-Oberfläche) erweitert werden.

Anhang 7: DHGE – Themenbeschreibung

## Ehrenwörtliche Erklärung

Wir erklären hiermit ehrenwörtlich,

1.

dass wir unsere Studienarbeit mit dem Thema:

Erstellung eines Motormodells mit H - Brücken Ansteuerung  
ohne fremde Hilfe angefertigt haben.

2.

dass wir die Übernahme wörtlicher Zitate aus der Literatur sowie die Verwendung der Gedanken anderer Autoren an den entsprechenden Stellen innerhalb der Arbeit gekennzeichnet haben.

3.

dass wir unsere Studienarbeit bei keiner anderen Prüfung vorgelegt haben. Wir sind uns bewusst, dass eine falsche Erklärung rechtliche Folgen haben wird.

Ort/Datum:

Unterschrift:

---

---

---

---