



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Max Töllner

Konzeption, Implementierung und Inbetriebnahme einer schrittmotorbasierten Antriebseinheit eines Getriebedemonstrators

Max Töllner

**Konzeption, Implementierung und
Inbetriebnahme einer schrittmo-
torbasierten Antriebseinheit eines
Getriebedemonstrators**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Mechatronik

am Department Fahrzeug und Flugzeugbau

der Fakultät Technik und Informatik

der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüfer/in: Prof. Dr. Ing. Anna Kerstin Usbeck

Zweitprüfer/in: Dip. Ing. Niels Eiben

Abgabedatum: 11.02.2025

Kurzreferat

Name des Studierenden

Max Töllner

Thema der Bachelorthesis

Konzeption, Implementierung und Inbetriebnahme einer schrittmotorbasierten Antriebseinheit eines Getriebedemonstrators

Stichworte

Schrittmotor, Software-Engineering, Controllino MAXI, Arduino, C++, Planetengetriebe, Demonstrator, Getriebe, Arbeitsschutz, Elektrotechnik

Kurzzusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit ist eine erfolgreiche Integration eines Schrittmotors in einen bestehenden Getriebedemonstrator, einschließlich einer Programmierung für eine zuverlässige Ansteuerung. Damit verbunden sind die Entwicklung und Realisierung eines Schaltkreises, als auch die Einsatzbereitschaft des Demonstrators sicherzustellen.

Dem voran wurde in zuvor durchgeführten Arbeiten bereits eine Antriebseinheit bestimmt. Eine Integration dessen, war jedoch nur schwer realisierbar, sodass in diesem Zuge ein Schrittmotor für die Umsetzung herangezogen wird. Dieser soll die bestehende Antriebseinheit ersetzen.

Hierzu wird, um ein prinzipielles Verständnis der technischen Grundlage von Schrittmotoren zu erlangen, deren Funktionsweise und Steuerung erläutert. Anschließend wird sich mit den einschlägigen Gesetztestexten beschäftigt und eine Gefährdungsbeurteilung durchgeführt, damit ein offizieller sowie sicherer Betrieb des Demonstrators gewährleistet werden kann. Im Weiteren Verlauf erfolgt eine Analyse der allgemeinen Anforderungen, wobei die in der Gefährdungsbeurteilung ermittelten Risiken berücksichtigt und in die Anforderungsdefinition aufgenommen werden. Resultierend daraus, findet für die einzelnen Teilkomponenten des Demonstrators eine Vorstellung der jeweiligen Konzeptentwürfe statt und ein Sicherheitskonzept wird erarbeitet. Nach kurzen Funktionstests des Schrittmotors und dem Verifizieren der Antriebsleistung, werden die Lösungsansätze aus der Konzeption ausgearbeitet und der Schrittmotor in den Demonstrator integriert. Abschließend wird auf die Herausforderungen eingegangen, welche im Prozess der Zielerreichung entstanden sind und auf Möglichkeiten einer Weiterentwicklung eingegangen.

Name of Student

Max Toellner

Title of the paper

Conception, implementation and commissioning of a stepper motor-based drive unit of a gearbox demonstrator

Keywords

Stepper motor, software engineering, Controllino MAXI, Arduino, C++, planetary gear, demonstrator, gearbox, industrial safety, electrical engineering

Abstract

The aim of this work is to successfully integrate a stepper motor into an existing gearbox demonstrator, including programming for reliable control. This involves the development and realisation of a circuit as well as ensuring that the demonstrator is ready for use.

Prior to this, a drive unit had already been determined in previous work. However, integrating this was difficult to realise, so a stepper motor was used for the implementation. This is to replace the existing drive unit.

In order to gain a basic understanding of the technical basis of stepper motors, their mode of operation and control is explained. The relevant legal texts are then analysed and a risk assessment carried out to ensure the official and safe operation of the demonstrator. The general requirements are then analysed, whereby the risks identified in the risk assessment are taken into account and included in the definition of requirements. As a result, the respective concept designs are presented for the individual sub-components of the demonstrator and a safety concept is developed. After brief functional tests of the stepper motor and verification of the drive performance, the solution approaches from the concept are worked out and the stepper motor is integrated into the demonstrator. Finally, the challenges that arose in the process of achieving the objective are discussed and the possibilities for further development are explored.

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei allen bedanken, die mich bei der Durchführung dieser Arbeit aber auch in den schwierigen Abschnitten meines Studiums motiviert und unterstützt haben.

Ein herzliches Dankeschön gilt an Frau Prof. Dr. Anna Usbeck, welche mich auch im Vorfeld dieser Ausarbeitung unterstützt, und mit wertvollem, konstruktivem Austausch begleitet hat. Sie hat mir durch das Thema dieser Arbeit die Chance gegeben, meine Horizonte zu erweitern und mich persönlich weiterzuentwickeln. Ich danke ihr auch für die Gewährung wissenschaftlicher Freiräume und die Möglichkeit, eigenständig zu arbeiten. Hinsichtlich dessen wurde ich gefördert selbstständig Lösungen zu erarbeiten, Problemstellungen zu erkennen oder gezielt anzugehen.

Ich danke auch herzlich Herrn Dipl.-Ing. Niels Eiben für die Übernahme des Zweitgutachtens. Ich weiß seine Zeit, sein fachliches Engagement und seine wertvolle Einschätzung meiner Arbeit sehr zu schätzen.

Ebenfalls möchte ich mich besonders bei meinen engsten Freunden Martin Röper und Eira Probst bedanken, die mir mit viel Geduld, Interesse und Hilfsbereitschaft zur Seite standen. Durch die aufbauenden Gespräche, die motivierenden Worte und die wertvolle Ablenkung, haben sie mir geholfen, auch in den schwierigen Phasen meines Studiums die Herausforderungen zu meistern und meinen Blick nach vorne zu richten.

Ein besonderer Dank gilt auch meinen Eltern, welche mich im Laufe des Studiums in jeglicher Hinsicht unterstützt haben und mir in Stresssituationen beiseite standen und stets ein offenes Ohr für mich hatten.

Aufgabenstellung für eine Bachelorarbeit

Für: Max Töllner (Matrikel-Nr.: XXXXXXXXXX)

Studiengang: Mechatronik

Thema: Konzeption, Implementierung und Inbetriebnahme einer schrittmotorbasierten Antriebseinheit eines Getriebedemonstrators

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit soll eine Antriebseinheit mit einem Schrittmotor für einen Getriebedemonstrator konzipiert und in Betrieb genommen werden. Ziel ist es, eine zuverlässige, flexible Steuerung zu entwickeln und die Einsatzbereitschaft des Demonstrators sicherzustellen.

Die Arbeit umfasst folgende Aufgabenbereiche:

- **Auswahl des Schrittmotors und Kupplung:** Zunächst soll der für den Antrieb des Getriebedemonstrators am besten geeignete Schrittmotor sowie eine passende Kupplung identifiziert und ausgesucht werden.
- **Test und Inbetriebnahme der Antriebseinheit:** Die grundlegende Funktion des Motors ist vorab zu testen, um dessen Tauglichkeit sicherzustellen. Nach der mechanischen Integration von Motor und Kupplung und somit dem Abschließen der Arbeit erfolgt die Inbetriebnahme des Prüfstandes unter Anwendung der Steuerung.
- **Steuerung des Motors mittels Arduino:** Die Steuerung des Motors soll über eine Arduino-Plattform realisiert werden. Hierfür soll die elektrische Verschaltung sowie eine geeignete Programmierung entwickelt werden. Ziel ist es, eine Steuerung zu implementieren, die eine Anpassung der Drehzahl sowie das Stoppen des Motors ermöglicht. Das Drehzahlband ist angemessen zu wählen, um eine gute Veranschaulichung in der Vorlesung zu gewährleisten.
- **Entwicklung eines User Interface:** Zur einfachen Bedienung des Demonstrators soll ein benutzerfreundliches Interface entwickelt werden. Der Fokus liegt dabei auf der schnellen Einsatzbereitschaft des Prüfstandes unter Minimierung der benötigten Peripheriegeräte.
- **Erarbeitung eines Sicherheitskonzeptes:** Ein Sicherheitskonzept soll entwickelt werden, um eine sichere Bedienung und Präsentation des Demonstrators zu gewährleisten. **Optional:** Bei ausreichend Zeit, ist eine Umsetzung des Konzeptes in Betracht zu ziehen.

Diese Aufgabenbereiche sollen als Gesamtkonzept zur effektiven Ansteuerung und Betriebssicherheit des Getriebedemonstrators beitragen und dessen Bedienbarkeit verbessern.

Inhaltsverzeichnis

Kurzreferat	I
Inhaltsverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	VIII
Abkürzungsverzeichnis	X
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Problemstellung	1
1.2 Ziel der Arbeit	2
1.3 Aufbau der Arbeit	3
2 Ausgangssituation und Grundlagen	5
2.1 Ausgangssituation	5
2.2 Vorstellung und Funktionsweise von Schrittmotoren	6
2.3 Ansteuerung von Schrittmotoren	15
2.4 Anforderungen an die Sicherheit	17
2.4.1 Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV)	17
2.4.2 Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG)	19
2.4.3 DGUV Vorschrift 3 "Elektrische Anlagen und Betriebsmittel"	19
2.4.4 Maschinenrichtlinie	21
2.4.5 Resümee	22
3 Analyse der Anforderungen	23
4 Konzeption	26
4.1 Übersicht des Gesamtsystems	26
4.1.1 Energieversorgung	27
4.1.2 Antriebseinheit	29
4.1.3 Mechanische Verbindung	29
4.1.4 Software	30
4.1.5 UI-Benutzerschnittstelle	34
4.2 Sicherheitskonzept	35
4.2.1 Vorstellung von Sicherheitskonzepten	35
4.2.2 Auswahl und Gestaltung des Sicherheitskonzepts	40
5 Entwicklung	44

5.1	Verifizierung des Schrittmotors	44
5.2	Betrachtung der Teilkomponenten.....	44
5.2.1	Energieversorgung	45
5.2.2	Antriebseinheit	45
5.2.3	Mechanische Verbindung	46
5.2.4	Software.....	49
5.2.5	UI-Benutzerschnittstelle.....	52
5.2.6	Sicherheitskonzept	53
5.3	Verifizierung des Schrittmotors im Demonstrator	54
5.4	CAD-Modelle.....	54
5.5	Präsentation des finalen Demonstrators.....	57
6	Herausforderungen bei der Integration.....	62
7	Zusammenfassung und Ausblick	70
	Literaturverzeichnis	74
	Anhang A – Kapitel 2	79
	Anhang B – Kapitel 4	83
	Anhang C – Kapitel 5	85

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Grafische Abstraktion der Aufgabenstellung.....	2
Abbildung 2: Übersichtsbilder des Getriebedemonstrators.....	5
Abbildung 3: Wichtige Bestandteile eines Schrittmotors [3].....	7
Abbildung 4: Vereinfachte Darstellung der Funktion eines HY Schrittmotors [2].....	9
Abbildung 5: Bewegungsablauf eines dreisträngigen VR Schrittmotors [2].....	10
Abbildung 6: Permanentmagneterregter zweisträngiger Schrittmotor [2]	11
Abbildung 7: Darstellung eines 2 Phasen Schrittmotors [9].....	12
Abbildung 8: Drehmomentenwelligkeit im Vergleich [9].....	13
Abbildung 9: Vereinfachte Dachstellung von Unipolar und Bipolaren Schrittmotoren [11].....	14
Abbildung 10: Blockdefinition Diagramm des Getriebedemonstrators	27
Abbildung 11: Flussdiagramm der Systemarchitektur des Getriebedemonstrators.....	33
Abbildung 12: Skizze Bedieneinheit	35
Abbildung 13: Kein Gesundheitsrisiko durch Nussknacker	36
Abbildung 14: Skizzierter Lösungsansatz mittels Ultraschallsensoren	37
Abbildung 15: Prinzipdarstellung eines Sicherheitslichtvorhang [27].....	38
Abbildung 16: Skizzierte Lösungsansätze mittels Sicherheitslichtvorhang	39
Abbildung 17: Skizzierter Lösungsansatz mittels Acrylglashaube	39
Abbildung 18: Bestandteile der elektromagnetischen Bremse	47
Abbildung 19: Motorhalter (A) vor und (B) nach der Modifizierung.....	48
Abbildung 20: (A) Acrylglashaube mit (B) Aufnehmer für Mikroschalter	53
Abbildung 21: CAD-Modell der Antriebseinheit und der Komponenten der mechanischen Verbindung	54
Abbildung 22: CAD-Modell des Bedienpults	55
Abbildung 23: CAD-Modell Halters für den induktiven Näherungssensor (hier montiert).....	56
Abbildung 24: CAD-Modell vom Schaltschrank	56
Abbildung 25: CAD-Modell des Demonstrators	57
Abbildung 26: Fertiger Demonstrator in der Komplettansicht	58
Abbildung 27: (A) v.l. Acrylhaubenaufnehmer und Halterung für induktiven Drehzahlsensor; (B) Zugentlastung der Signalleitung- und Stromleitung des Drehzahlsensors	59
Abbildung 28: Draufsicht Bedienpult zum Steuern des Demonstrators	59
Abbildung 29: Verwendung des Nussknackers mit Aussparung	60
Abbildung 30: elektrotechnischer Aufbau im Schaltschrankgehäuse	61
Abbildung 31: Skizzierter Schaltungsaufbau induktiver Näherungssensor	64
Abbildung 32: Pulsfrequenz des Schrittmotors bei einer Periodendauer T von 200 μ s	65
Abbildung 33: Pulsfrequenz des Schrittmotors bei einer Periodendauer T von 1400 μ s	66
Abbildung 34: Programmcode Motoransteuerung Modus 1	67
Abbildung 35: Integration eines Interrupts für Mikroschalter.....	71

Abbildung A 1: Verschiedene Stromverläufe bei unterschiedlicher Ansteuerung [2].....	79
Abbildung A 2: Verlauf des Haltemoments [39]	80
Abbildung B 1: internal Block Diagramm.....	83
Abbildung B 2: Gefahr durch Nussknacker-Scheibe.....	84
Abbildung C 1: Screenshot vom Kundenservice mit Daten der elektromagnetische Bremse der Firma KEB	87
Abbildung C 2: Screenshot vom Kundenservice mit Daten vom Planetengetriebe der Firma B&R	87
Abbildung C 3: Datenblatt Schrittmotor JAT [40]	90
Abbildung C 4: Datenblatt Controllino MAXI [36]	92
Abbildung C 5: Pinout- Tabelle [41]	93
Abbildung C 6: Datenblatt Netzteil [42]	95
Abbildung C 7: Stromlaufplan.....	98
Abbildung C 8: Programmcode für Controllino MAXI	109
Abbildung C 9: Programmcode für Arduino Nano zur Drehzahlmessung	111
Abbildung C 10: Nummerierung der Durchgansklemmen im Schaltschrank.....	111
Abbildung C 11: (Oben) Testen des Induktiven Drehzahlsensors/ (Unten v.l.) Klauenkupplung mit Adapter und Versuchsaufbau auf Steckplatine	113
Abbildung C 12: Modifizierung und Nachbearbeitung der Motorhalterung	113
Abbildung C 13: (Oben) Verifikation Schrittmotor/ (Unten) Überführung in Schaltschrank und Zusammenbau	114
Abbildung C 14: Startbildschirm und Programme 1 bis 3	114
Abbildung C 15: Fehlercodes 01 und 02.....	115
Abbildung C 16: Darstellung der Adapterstücke in Bedieneinheit	115
Abbildung C 17: Technische Zeichnung Klauenkupplung	116
Abbildung C 18: Technische Zeichnung Motorhalterung (DIN A3)	117
Abbildung C 19: Technische Zeichnung Wellenadapter	118
Abbildung C 20: Technische Zeichnung Sensorhalter 1.1	119
Abbildung C 21: Technische Zeichnung Sensorhalter 1.2.....	120
Abbildung C 22: Technische Zeichnung Acrylglashalter unten links mit Schalteraufnahme (DIN A3)	121
Abbildung C 23: Technische Zeichnung Acrylglashalter Mitte hinten	122
Abbildung C 24: Technische Zeichnung Acrylglashalter oben links	123
Abbildung C 25: Technische Zeichnung Acrylglashalter unten rechts.....	124

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Spannungsbereiche [23]	21
Tabelle 2: Anforderungsliste.....	23
Tabelle 3: Vor- & Nachteile für den Betrieb mit 230V AC gegenüber eines Akkus	28
Tabelle 4: Gegenüberstellung der Lösungsansätze.....	41

Tabelle A 1: Risikobewertung.....	81
Tabelle A 2: Bewertung der Schwere des Schadens (S) [18].....	81
Tabelle A 3: Ermittlung der Kombination aus Exposition (F) und Eintrittswahrscheinlichkeit (O) [18]	82
Tabelle A 4: Bewertung der Vermeidbarkeit des Schadens (A) [18].....	82
Tabelle C 1: Stückliste.....	85
Tabelle C 2: Drehzahltablelle	96
Tabelle C 3: Belegungsplan der Durchgangsklemmen.....	112

Abkürzungsverzeichnis

ArbSchG	Arbeitsschutzgesetz
ArbStättV	Arbeitsstättenverordnung
DGUV	Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung
n	Drehzahl
DIP	Dual in-line package
ff.	folgend
μs	Mikrosekunden
NEMA	National Electrical Manufacturer's Association
NO	Normally Open
T	Periodendauer
PWM	Pulsweitenmodulation
RPZ	Risikoprioritätszahl
z	Fest eingeprägte Schrittzahl eines Schrittmotors
f_z	Schrittfrequenz
β_m	Schrittwinkel
SGB	Sozialgesetzbuch
ToF	Time of Flight
i	Übersetzungsverhältnis
VDE	Verband Deutscher Elektrotechniker
Z	Zähnezahl

1 Einleitung

1.1 Motivation und Problemstellung

Mechatronik, als eine wegweisende Technologie des 21. Jahrhunderts, hat in den Ingenieurwissenschaften zu einer engen Verknüpfung etablierter Fachrichtungen geführt. Um die Leistungsfähigkeit herkömmlicher Systeme zu steigern und neue Funktionalitäten umzusetzen, werden Elemente aus dem Maschinenbau, der Elektrotechnik und der Informatik miteinander kombiniert. Die Methoden und Arbeitsweisen des Maschinenbaus werden dabei zunehmend von der Elektro- und Informationstechnik beeinflusst.

Auch steht das 21. Jahrhundert für die stark voranschreitende Digitalisierung. Diese lässt Prozesse vereinfachen und stellt in vielen Bereichen eine enorme Bereicherung dar. Es ermöglicht Menschen, an Veranstaltungen teilzunehmen oder sich Wissen anzueignen, ohne zwangsläufig vor Ort sein zu müssen – oft reicht dazu bereits eine stabile Internetverbindung und ein internetfähiges Gerät. So findet auch dies immer mehr Anwendung im Vorlesungsalltag von Studierenden. Digitale Hilfsmittel wie Simulationen und Software bringen auch im Feld der Mechatronik zahlreiche Vorteile mit sich, um Systeme zu verstehen und zu analysieren.

Beim Beobachten des Lernverhaltens von Studierenden lassen sich unterschiedliche Lerntechniken feststellen. So werden von einer bestimmten Anzahl an Studierenden Sachverhalte gut aufgenommen, in dem sie diese ein paar Mal hören. Andere wiederum lernen durch praktisches Ausprobieren und wieder andere können sich Inhalte gut einprägen, wenn sie sich die Thematik bildlich vorstellen oder gar sehen und anfassen können. Im Bereich des multisensorischen Lernens spielt die Anschaulichkeit und praxisnahe Anwendung von Modellen eine wesentliche Rolle. Auch die Vorführung dieser Modelle durch einen Demonstrator ist ein wichtiger Bestandteil interaktiver Lernmethoden.

Der bereits für Unterrichtszwecke verwendete und bestehende Getriebedemonstrator unterstützt im Bereich des multisensorischen Lernens und dient so den Studierenden als Anschauungsexemplar. Hieran können gut die in Konstruktion gelehrt Inhalte besprochen und unmissverständlich präsentiert werden. Um den Eingriff der Zahnräder in Aktion und der Sichtbarkeit der verschiedenen Getriebedrehzahlen darzustellen wurde in einer vorangegangenen Arbeit [1] eine Antriebseinheit bestimmt. Diese soll den Demonstrator in Bewegung setzen, um verschiedene Komponenten in Aktion präsentieren zu können.

Bei dem ausgewählten Motor handelt es sich um einen Drehstrommotor, der mit einem Schneckengetriebe ausgestattet ist. Allerdings wurde bei der Evaluierung der Antriebseinheit kein entsprechendes Konzept zur elektrischen Integration ausgearbeitet, sodass eine Ansteuerung und damit die Inbetriebnahme der Anlage nicht vorgenommen werden kann. Des Weiteren ist für eine stufenlose Drehzahlregulierung bei einem Motor dieser Art ein Frequenzumrichter erforderlich. Diese sind in der Anschaffung jedoch teuer und die alternativen Möglichkeiten sind weniger effektiv.

Aufgrund der genannten Aspekte wurde die Entscheidung getroffen, ein vollständig anderes Antriebskonzept zu verfolgen. Hierbei ist die Ansteuerung unter Anwendung weniger Peripheriegeräte mittels eines Schrittmotors zu realisieren.

1.2 Ziel der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist das Konzipieren und in Betrieb nehmen einer Antriebseinheit in Form eines Schrittmotors für den bereits erwähnten Getriebedemonstrator. Im Weiteren wird eine Zuverlässige und übersichtliche Steuerung entworfen. Ebenfalls ist ein Sicherheitskonzept zu präsentieren und bei ausreichend Zeit wird eine Umsetzung dessen in Erwägung gezogen. Eine Abstraktion der Aufgabenstellung ist in der folgenden Abbildung 1 als Blockdiagramm dargestellt. Die einzelnen Elemente, die zur Zielerreichung dieser Arbeit beitragen, sowie ihre wechselseitigen Abhängigkeiten sind in vereinfachter Form dargestellt und grün hinterlegt.

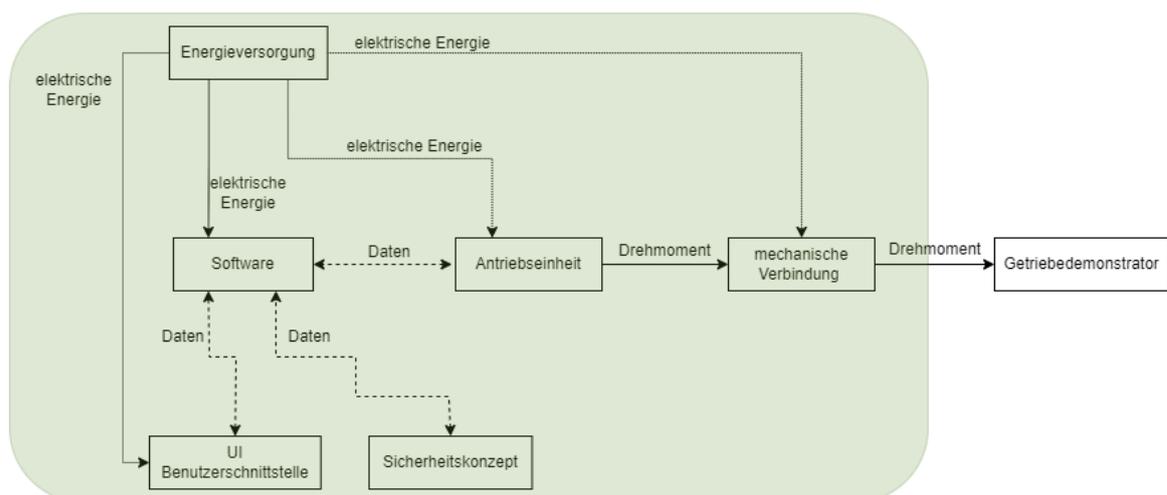


Abbildung 1: Grafische Abstraktion der Aufgabenstellung

Zu Beginn der Bachelorarbeit wird von Frau Usbeck ein Schrittmotor in Verbindung mit einer elektromagnetischen Bremse und einem Planetengetriebe vorgeschlagen. Diese Kombination soll auf eine geeignete Anwendung im Demonstrator hin untersucht und bewertet werden.

Um das beschriebene Ziel zu erreichen, wird der für den Antrieb des Getriebedemonstrators präferierte Schrittmotor auf seine Leistung geprüft und eine geeignete Kupplung identifiziert.

Bevor der ausgewählte Schrittmotor in die Anlage integriert wird, wird die Grundlegende Funktion dessen vorab getestet, um die Tauglichkeit sicherzustellen. Erst nach dem erfolgreichen Testlauf wird der Motor zusammen mit der Bremse, dem Getriebe und der ausgewählten Kupplung in den Demonstrator integriert. Mittels einer entsprechenden Steuerung wird der Demonstrator erfolgreich in Betrieb genommen.

Die Software zur Steuerung des Motors wird mittels eines „Controllino MAXI“, welcher von Frau Usbeck zur Verfügung gestellt wird, in der „Arduino IDE“ unter Verwendung der Programmiersprache C++ implementiert. Für eine erfolgreiche Ansteuerung wird eine geeignete elektrische Verschaltung erstellt. Die Steuerung soll über ein einfach zu bedienendes und benutzerfreundliches Interface möglich sein. Der Fokus wird dabei auf eine schnelle Einsatzbereitschaft des Demonstrators gerichtet. Die Verwendung externer Peripheriegeräte wird auf ein Minimum reduziert.

Durch die entwickelte Steuerung soll eine Anpassung der Drehzahl sowie das Stoppen des Motors ermöglicht werden. Hierbei ist das Drehzahlband mit Blick auf eine gute Veranschaulichung für den Vorlesungszweck sinnvoll zu wählen.

Für eine sichere Präsentation und Bedienung des Getriebedemonstrator soll auf ein gewisses Maß an Sicherheit geachtet werden. Es stehen mehrere Zahnräder im Eingriff und stellen ein Gefahrenpotential dar, besonders im Hinblick auf den Einsatz im Vorlesungskontext. Um Personenschäden zu vermeiden, ist das Entwickeln eines Sicherheitskonzeptes Teil dieser Arbeit. Bei ausreichendem Zeitrahmen soll dieses optional umgesetzt werden.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die Thesis gliedert sich in sieben Abschnitte und beginnt mit dem Kapitel der Einleitung. Dieses bietet eine kurze Einführung in die Beweggründe und Motivation der Arbeit sowie eine klare Darstellung der Zielsetzung. In dieser wird ebenfalls das Vorgehen erläutert, welches zur erfolgreichen Erreichung der zu Beginn gesteckten Zielsetzung verfolgt wird. Die technischen Aspekte eines Schrittmotors, die für das Verständnis und die Umsetzung des Projekts wichtig sind, werden im zweiten Kapitel ausführlich vorgestellt. Ebenfalls wird die bestehende Anlage

präsentiert und kurz auf die Ausgangssituation eingegangen. Im weiteren Verlauf werden mittels einer Gesetzestextrecherche Anforderungen und Bedingungen festgelegt, die für den offiziellen Betrieb eines Demonstrators in der Vorlesung relevant sind. Hierzu werden die einschlägigen Vorschriften und Richtlinien gesichtet und auf relevante Inhalte untersucht. Ferner wird hierzu in diesem Zusammenhang von dem Demonstrator vor dem Umbau eine Gefährdungsbeurteilung durchgeführt, um mögliche Gefahrenquellen zu identifizieren.

Im dritten Kapitel erfolgen eine Analyse sowie die Darstellung der Anforderungen an den Demonstrator. Hierbei werden die Anforderungen, die sich aus der Betrachtung der Sicherheitsaspekte ergeben, sowie neu identifizierte Anforderungen berücksichtigt, um sicherzustellen, dass eine vollständige Zusammenstellung der an den Demonstrator gestellten Anforderungen erfolgt.

Das vierte Kapitel stellt die Konzeption in den Mittelpunkt, die einen wesentlichen Beitrag zur Zielerreichung leistet. Dabei werden im Rahmen des Top-Down-Prinzips die in Abbildung 1 dargestellten Teilkomponenten betrachtet und schrittweise detailliert als eigenständige Einheiten beschrieben oder ausgearbeitet. Zudem wird in diesem Zusammenhang das Sicherheitskonzept erarbeitet, in welchem die in Kapitel 2 genannten Sicherheitsaspekte berücksichtigt werden.

Im fünften Kapitel wird detaillierter auf den Entwicklungsprozess des Demonstrators eingegangen. Dieser beinhaltet eine generelle Verifikation des Schrittmotors unter Anwendung einfacherer Programmcodes. Im Weiteren werden die Teilkomponenten präziser beschrieben und die Konzepte aus dem zuvor erarbeiteten Kapitel umgesetzt und dokumentiert. Gegen Ende des fünften Kapitels erfolgt eine Erläuterung der Testphase des Schrittmotors in dem Demonstrator sowie die Vorstellung und Inbetriebnahme dessen. In Kapitel sechs werden aufkommende Herausforderungen und Probleme erläutert und es wird beschrieben, wie mit diesen umgegangen wird. Das siebte Kapitel widmet sich der Zusammenfassung, ergänzt um einen Ausblick hinsichtlich einer Weiterentwicklung.

2 Ausgangssituation und Grundlagen

Dieses Kapitel vermittelt eine grundlegende Einführung in den Aufbau des Demonstrators sowie in die technischen und sicherheitsrelevanten Aspekte, die für das Verständnis und die Umsetzung des Projekts von Bedeutung sind.

Im Folgenden wird der Demonstrator in seiner Ausgangssituation kurz vorgestellt und auf den Ist-Zustand eingegangen, um die gegebenen Rahmenbedingungen und den Kontext zu verdeutlichen. Im weiteren Verlauf werden die allgemeinen Funktionsweisen und die Einsatzgebiete von Schrittmotoren sowie deren Ansteuerung beleuchtet. Auch wird auf sicherheitsrelevante Aspekte hingewiesen, welche zum Betreiben eines Demonstrators in der Vorlesung und damit im Beisein von Studierenden, von Bedeutung sind.

2.1 Ausgangssituation

Der in den Räumen der HAW befindliche Getriebedemonstrator (Abbildung 2) wurde im Jahr 2015 konstruiert und durch vorangegangene Arbeiten stetig weiterentwickelt [1]. Primär dient er zur Präsentation des Mechanismus und der Funktion des Zahnrad- und Zugmittelgetriebes sowie der Funktion der verschiedenen beteiligten Komponenten und deren Eigenschaften [1]. Darüber hinaus wird er als anschauliches Lehrmittel von theoretischen und praktischen Kenntnissen verwendet und soll den Studierenden grundlegende Kenntnisse des Maschinenbaus sowie der Konstruktionslehre vermitteln.

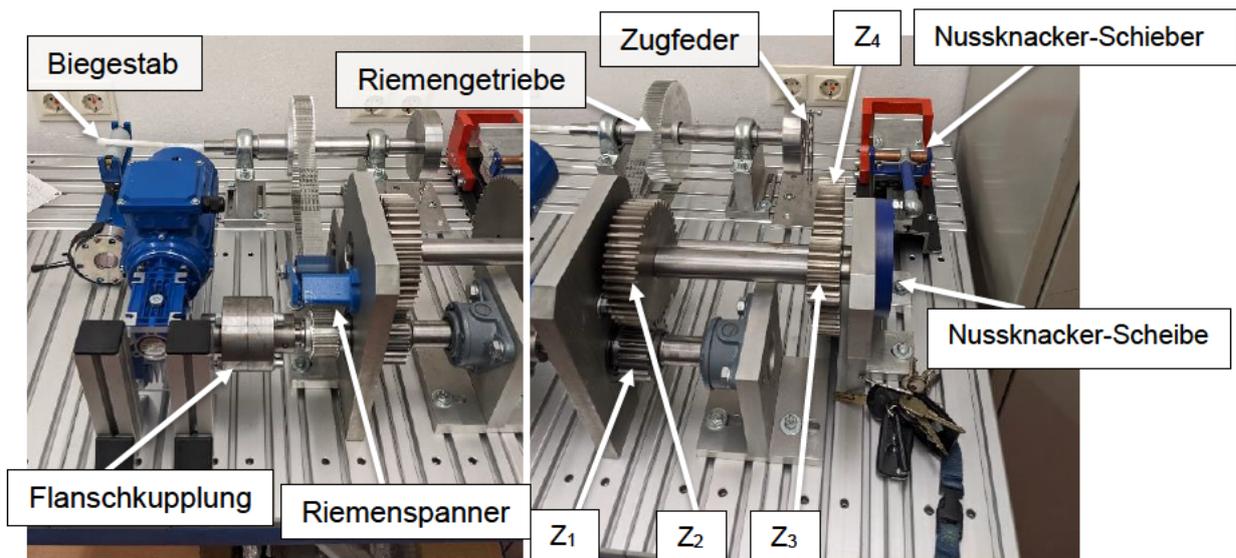


Abbildung 2: Übersichtsbilder des Getriebedemonstrators

Der Demonstrator besteht aus drei Wellen, vier gerade verzahnten Stirnzahnrädern und dem Befestigungsgehäuse als Zahnradgetriebe. Darüber hinaus besitzt er ein Zahnriemengetriebe mit zwei entsprechenden Riemenscheiben und einem Riemenspanner. Am linken Ende der Welle, die vom Riemengetriebe angetrieben wird, ist eine Zugfeder montiert. Das rechte Ende der Welle wird mit einem Biegestab abgeschlossen. Dieser ist an seinem äußersten Ende durch eine Vorrichtung gestützt, um so schwellende Lasten zu veranschaulichen. Die Wellen des Demonstrators werden durch verschiedenste Kugellager geführt. Zur Veranschaulichung beweglicher Massen ist der Demonstrator mit einer Vorrichtung zum Knacken von Nüssen ausgestattet. Mittels dieser Vorrichtung werden Torsions- und Biegemomente erzeugt, welche die Ermittlung der erforderlichen Zahnräder und Wellen bei der Gestaltung des Zahnradgetriebes ermöglichen. Der Demonstrator wird über eine Flanschkupplung durch einen Schneckengetriebemotor angetrieben.

Aufgebaut ist der Demonstrator auf Aluminium-Profilen, welche auf einem zweistöckigen Tischwagen angebracht sind. So ist eine gute Mobilität und ein sicherer Transport zu den Vorlesungsräumen möglich. Der Tischwagen hat eine Vorrichtung zur Radarretierung, die einen sicheren Stand gewährleistet.

2.2 Vorstellung und Funktionsweise von Schrittmotoren

Schrittmotoren sind eine spezielle Kategorie von Elektromotoren, die sich durch ihre präzise, schrittweise Bewegung auszeichnen. Dank ihrer hohen Wiederholgenauigkeit und exakten Steuerung kommen sie in zahlreichen Anwendungsbereichen zum Einsatz. Hauptsächlich werden sie in der Automatisierungstechnik und Robotik genutzt, finden aber auch Verwendung in der Luft- und Raumfahrt sowie in der Medizintechnik. Wiederum sind sie für Anwendungen bei hohen Drehzahlen oder hohen Drehmomenten nicht geeignet.

Damit Schrittmotoren in ihren Baugrößen unterschieden werden können, werden diese in Nema-Klassen unterteilt. Die Klassifizierung reicht von Nema 6 bis Nema 42. Hierbei steht "Nema" für „National Electrical Manufacturer's Association". Diese Institution ist für die Normierung der Motorbaugröße für den globalen Markt zuständig, in dem das Maßsystem "Zoll" zum Einsatz kommt [25].

Ein Schrittmotor setzt sich aus einem Stator und einem Rotor zusammen und gilt als eine Sonderbauform der Synchronmaschinen [2]. Der Rotor besteht aus einer Welle, zwei Rotorsegmenten und einem Permanentmagneten. Im Gehäuse, dem Stator, sind die Wicklungspaare und Kugellager lokalisiert. Der Aufbau ist in der nachfolgenden Abbildung 3 grafisch veranschaulicht.

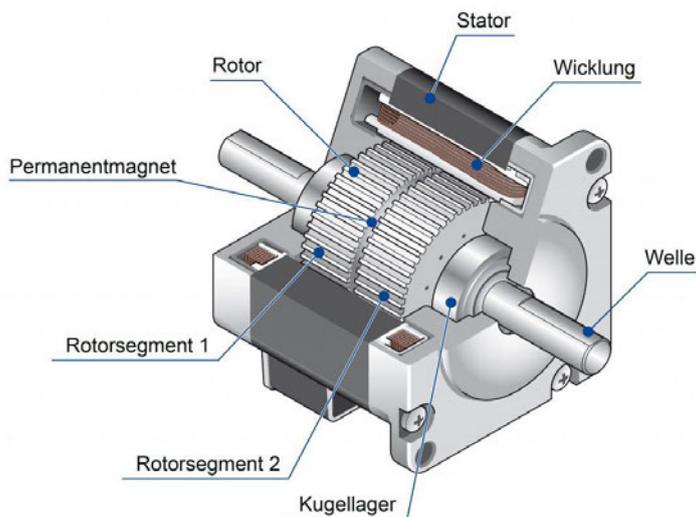


Abbildung 3: Wichtige Bestandteile eines Schrittmotors [3]

Bei einem Schrittmotor sind im Gegensatz zu anderen Motoren nur Spulen im Stator vorhanden [4]. Ein prägendes Merkmal dieser Motorenart, ist das sich schrittweise Drehen der Motorwelle um den, für jeden Motor charakteristischen, Schrittwinkel α . Hierfür ist ein sprungförmig weitergeschaltetes Statormagnetfeld verantwortlich. Durch die Erregung der Spulen entstehen ein Nord- und ein Südpol, die den magnetisierten Rotor mit seinen Segmenten ziehen bzw. drücken und ihn so in eine Drehbewegung versetzen.

Ein Schrittmotor ermöglicht es, präzise Positionen anzufahren, ohne dass eine komplexe Wegstreckenerkennung erforderlich ist. Dies macht es möglich, Schrittmotoren ohne externe Sensoren zur Positionsrückmeldung zu betreiben, da sie den, durch Motortreiber angelegten Signalen exakt folgen können. Die Elektronik kennt je nach Steuerungssystem die genaue Position des Rotors, da alle Schritte im Links- und Rechtslauf gezählt werden [5]. Bei der Betrachtung von verschiedenen Steuerungssystemen wird zwischen Schrittmotoren mit offenem und geschlossenem Regelkreis unterschieden. Sie werden häufig auch aus dem Englischen, als Open- oder Closed- Loop- Motoren bezeichnet.

Schrittmotor mit offenem Regelkreis (Open- Loop)

Schrittmotoren mit offenem Regelkreis verfügen, wie der Name bereits sagt, über keine Rückmeldeleitung, die die Eingangssignale zur Überprüfung an den Beginn des Regelkreises zurücksenden. Der Schrittmotortreiber erhält somit keine Informationen darüber, ob die von ihm gesendete Anzahl an Schritten auch tatsächlich ausgeführt wurde bzw. ob Schritte verloren gegangen sind. Er kann dementsprechend keine Fehler erkennen oder sie durch geeignete Maßnahmen ausgleichen, wie etwa das kurzzeitige Liefern eines Überlaststroms, um das Drehmoment zu erhöhen. Somit haben diese Motoren eine geringe Regelgenauigkeit und es

macht sie zusätzlich empfindlich gegenüber Änderungen der Systemparameter [6]. Open-Loop- Motoren finden somit in Bereichen Anwendung, in denen keine Positionsrückmeldung erforderlich ist und die Belastung des Motors vorhersehbar bzw. konstant bleibt. Dazu gehören beispielsweise 3D Drucker oder in der Automatisierung Pick-and- Place- Systeme.

Schrittmotor mit geschlossenem Regelkreis (Closed Loop)

Schrittmotoren mit einem geschlossenen Regelkreis hingegen bieten eine Positionsrückmeldung. Über die Signale eines Encoders wird die Rotorlage erfasst woraufhin durch den Motortreiber in den Motorwicklungen sinusförmige Phasenströme entsprechend erzeugt werden. Die Vektorregelung des Magnetfelds gewährleistet, dass das Stator magnetfeld stets senkrecht zum Rotormagnetfeld steht und die Feldstärke genau dem gewünschten Drehmoment entspricht. Der auf diese Weise in den Wicklungen gesteuerte Strom bewirkt eine gleichmäßige Motorkraft und ein besonders ruhiges Laufverhalten des Motors, der sich durch die Überwachung präzise regeln lässt [7]. Dies macht sie für Anwendungen brauchbar, in denen beim Stillstand Lasten in Position gehalten werden müssen oder eine hohe Präzision, wie der Halbleiterbestückung verlangt wird.

Ein Schrittmotorantrieb setzt sich aus zwei Hauptkomponenten zusammen. Dem Schrittmotor selbst und dem Schrittmotortreiber. Letzterer ist wiederum aufgeteilt in eine Logik und eine Leistungselektronik. Er erhält über eine Schnittstelle Signale vom Mikrocontroller, die die Impulsfolge und Drehrichtung vorgeben. Im Motortreiber erzeugt die integrierte Logik, Impulse zur Steuerung der Leistungselektronik, welche die einzelnen Statorwicklungsstränge mit Energie versorgt [2]. Die meisten Schrittmotortreiber nutzen ein genormtes Protokoll, um den Motor zu steuern und weisen 3 Pin-Eingänge auf. Diese sind folgende:

- Enable (ENA):
 - o Aktivierung des Treibers durch setzen des Pegels auf HIGH/ LOW (treiberspezifisch)
- Direction (DIR):
 - o Drehrichtung des Schrittmotors durch Setzen des Pegels auf HIGH/ LOW (treiberspezifisch)
- Pulse (PUL):
 - o Schrittsignal vom Mikrocontroller. Es wird ein Schritt ausgeführt, wenn der Pegel von LOW auf HIGH wechselt.

Bei jedem Steuerimpuls erfolgt ein Weiterschalten des Statorfeldes um den konstanten Winkel α , dem der Rotor des Schrittmotors mit nur geringer Verzögerung folgt. Nach einem kurzen Einschwingvorgang bleibt der Rotor in der neuen Position, die sich um den mechanischen Schrittwinkel α von der vorherigen Position unterscheidet, bis ein neuer Steuerimpuls eintrifft.

Die Schrittfortschaltung im Vollschrittbetrieb wird in Abbildung 4 anhand einer vereinfachten Motoraufbaudarstellung dargestellt. Wird das Magnetfeld des Stators um 90° im Sinne des elektrischen Schritt winkels weitergeschaltet, so bewegt sich der Rotor mit dem mechanischen Schritt winkel $\alpha = 30^\circ$.

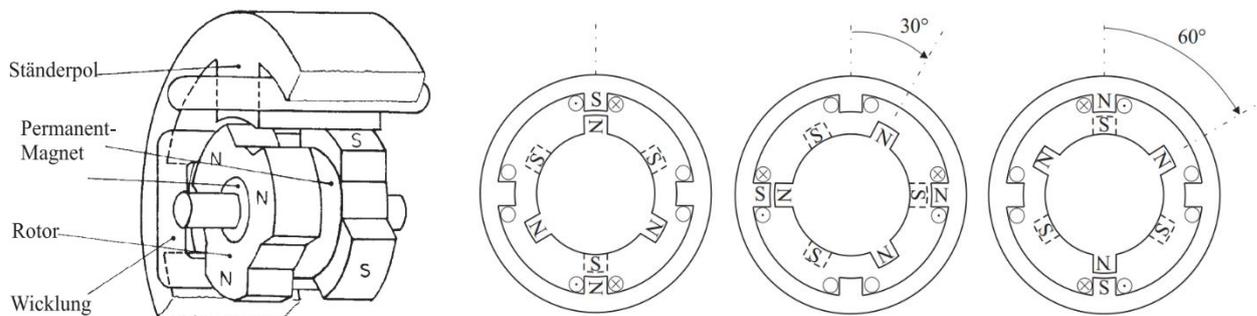


Abbildung 4: Vereinfachte Darstellung der Funktion eines HY Schrittmotors [2]

Ein Schrittmotor weist zahlreiche mechanische, elektrische und dynamische Eigenschaften auf. Sie stellen die Kenngrößen eines Motors dar und bilden die Basis für die Beurteilung, ob der Motor für bestimmte Anwendungen geeignet ist.

So gibt das Haltemoment an, welches maximale Drehmoment der Motor im Stillstand halten kann, ohne dass dieses eine Drehung am Rotor hervorruft. Das Drehmoment eines Motors gibt an, welches maximale Moment der Motor in Abhängigkeit zur Drehzahl abgibt. Diese Angabe ist in den Datenblättern meist als Kennlinie angegeben und nimmt mit steigender Drehzahl ab.

Die Leistung von Schrittmotoren wird maßgeblich durch den Strom, welcher das Drehmoment bestimmt, und die angelegte Spannung, welche die Geschwindigkeit beeinflusst, bestimmt.

Das Magnetfeld, das den Rotor bewegt, wird durch den Phasenstrom erzeugt, der durch die Wicklungen eines Schrittmotors fließt. Eine Erhöhung des Phasenstroms führt zu einer Erhöhung des Drehmoments. Der Nennstrom gibt dabei den maximalen Strom an, den der Motor bei kontinuierlichem Betrieb verträgt, ohne thermisch überlastet zu werden. Um eine thermische Belastung im Stillstand zu vermeiden, wird in der Regel eine Stromabsenkung vom Motortreiber vorgenommen [2] [4].

Die angelegte Spannung hat Einfluss darauf, wie schnell der Strom in der Wicklung ansteigen kann. Dies hat bei hohen Drehzahlen besondere Relevanz. Folglich führen höhere Spannungen zu einem raschen Anstieg des Stroms in der Statorwicklung. Dies führt zu einer Steigerung der Reaktionsgeschwindigkeit und zu einer Erhöhung der Drehzahlen des Motors. Folglich kann ein Schrittmotor bei nicht ausreichend angelegter Spannung bei hohen Drehzahlen an

Leistung verlieren. Die Nennspannung eines Schrittmotors zeigt demnach an, welche Spannung an den Motor im stationären Modus zur Erreichung des Phasenstromnennwerts angelegt werden muss [2] [4].

Schrittmotoren existieren in zahlreichen Bauformen, die sich im Wesentlichen auf drei Grundtypen zurückführen lassen.

Reluktanz-Schrittmotoren

Reluktanz-Schrittmotoren, die auch als VR-Schrittmotor (Variable Reluctance Motor) bekannt sind, besitzen ein weichmagnetisches Material mit einer Zahnteilung, die im Vergleich zur Polteilung des Stators ungleich ist. Eine schematische Darstellung eines dreisträngigen Motors ist in Abbildung 5 dargestellt. Wird der Strang A erregt, nimmt der Rotor die dargestellte Position ein, da in dieser Position der magnetische Widerstand, die Reluktanz, für den erregten magnetischen Kreis minimal ist. Um die Drehrichtung wechseln zu können, benötigt der Stator mindestens zwei Strangwicklungen. Der Name VR-Schrittmotor lässt sich auf die variablen magnetischen Widerstände zurückführen. Der Motor besitzt im stromlosen Zustand kein Selbsthaltungsmoment und hat ein geringes Drehmoment, bietet aber kleine Schrittwinkel [2].

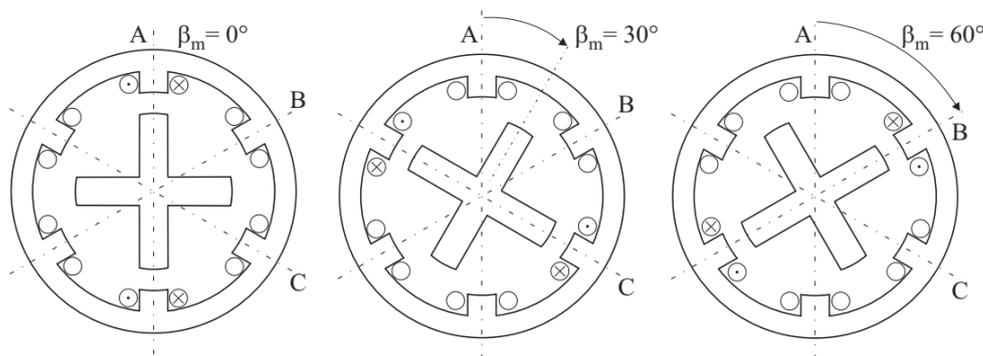


Abbildung 5: Bewegungsablauf eines dreisträngigen VR Schrittmotors [2]

Permanentmagneterregte- Schrittmotoren

Bei permanentmagneterregten Schrittmotoren, auch PM-Schrittmotor genannt, besteht der Rotor im Gegensatz zu den anderen Bauformen aus einem zylindrischen Permanentmagneten. Dieser weist eine radiale Magnetisierung auf und besitzt eine gerade Anzahl an permanentmagnetischen Polen mit abwechselnder Nord- und Südpolarität. Vereinfacht wird ein solcher Aufbau in Abbildung 6 dargestellt. Dieser Motor funktioniert nach dem Prinzip, dass sich ungleiche Pole anziehen und gleiche Pole abstoßen. Bei der Erregung der Statorwicklungen mit Spannung entsteht ein magnetischer Fluss, der die Nord- und Südpole bestimmt. Der Rotor setzt sich in Bewegung, da zwischen den Statorpolen und den magnetischen Rotorpolen Anziehungs- und Abstoßungskräfte wirken. Dieser Typ besitzt ein großes Drehmoment und

Selbsthaltemoment. Auch ist er vergleichsweise günstig. Nachteilig sind jedoch seine großen Schrittwinkel [2] [8].

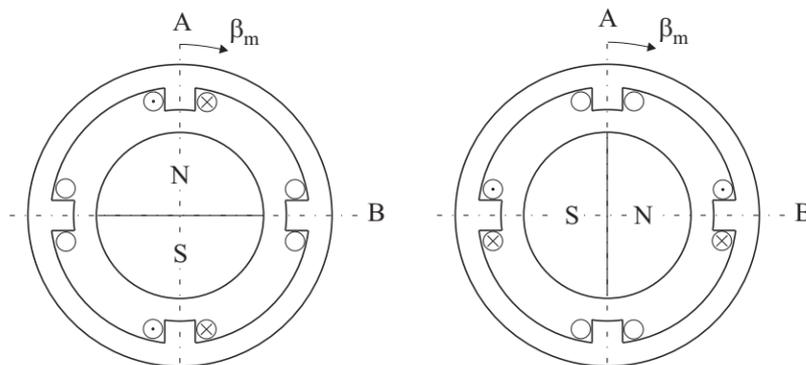


Abbildung 6: Permanentmagneterregter zweisträngiger Schrittmotor [2]

Hybrid-Schrittmotor

Ein Hybrid-Schrittmotor (HY-Schrittmotor) vereint die Vorteile der zuvor genannten Grundtypen. Er kombiniert die kleinen Schrittwinkel des VR-Schrittmotors mit dem hohen Drehmoment und dem starken Selbsthaltemoment des PM-Schrittmotors. Der Rotor beinhaltet einen in axialer Richtung angeordneten Permanentmagneten, der sich zwischen zwei weichmagnetischen Zahnscheiben befindet (Abbildung 3). Die Zahnscheiben sind um eine halbe Zahnteilung gegeneinander versetzt. Die Anordnung des Permanentmagneten im Rotor sorgt dafür, dass eine Zahnscheibe den Nordpol und die andere den Südpol des Rotors bildet. Der Rotor richtet seine Zähne entsprechend den jeweiligen Statorzähne aus, abhängig davon, welcher Statorstrang mit Strom versorgt wird. Veranschaulicht wird dieser Vorgang in Abbildung 4. Ein solcher Hybrid-Schrittmotor findet in dieser Arbeit Anwendung.

Die physikalische Schrittauflösung eines Motors ist abhängig von der Anzahl der einzeln steuerbaren Wicklungen (Phasen) sowie von der Anzahl der Polpaare. Ein typischer Schrittmotor besteht aus zwei gleichstromversorgten Phasen, während auch Ausführungen mit drei oder fünf Phasen möglich sind. Bei einem 2-Phasen-Schrittmotor, wie er in dieser Arbeit verwendet wird, setzt sich der Stator, wie in Abbildung 7 dargestellt, aus acht Magnetpolen mit kleinen Zähnen zusammen.

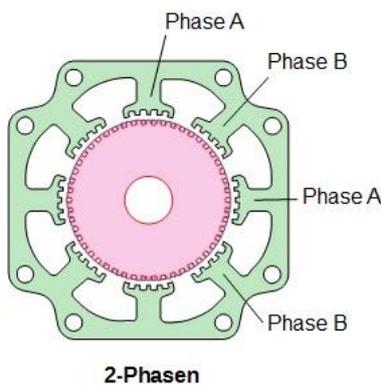


Abbildung 7: Darstellung eines 2 Phasen Schrittmotors [9]

Ein 5-Phasen-Schrittmotor unterscheidet sich strukturell nur geringfügig von einem 2-Phasen-Schrittmotor, da beide Modelle in der Regel einen Rotor mit 50 Zähnen aufweisen. Jedoch liegt der wesentliche Unterschied in der Anzahl der Wicklungen und der daraus resultierenden Schaltsequenzen. Somit besitzt ein 5-Phasen-Motor zehn Pole (zwei pro Phase), wodurch sich der Rotor lediglich um ein Zehntel einer Stator-Zahnteilung drehen muss, um mit der nächsten Phase in Einklang zu stehen. Im Gegensatz dazu hat der 2-Phasen-Motor acht Pole (vier pro Phase), was bedeutet, dass sich der Rotor um ein Viertel einer Stator-Zahnteilung bewegen muss, um die nächste Phase zu erreichen. Daraus resultiert, dass ein 2-Phasen-Schrittmotor für eine 360° Umdrehung 200 Schritte $[z]$ benötigt. Sein Schrittwinkel $[\beta_m]$ beträgt somit $1,8^\circ$ pro Schritt. Ein 5-Phasen-Schrittmotor benötigt hingegen 500 Schritte, um eine komplette Drehung zu vollführen. Sein Schrittwinkel beträgt somit $0,72^\circ$ pro Schritt. Konstruktionsbedingt hat der 5-Phasen-Motor somit eine höhere Auflösung. Unter Anwendung vom Mikroschrittbetrieb kann der 5-Phasen-Motor Schritte von bis zu $0,00288^\circ$ ausführen, wobei die Positions- und Wiederholgenauigkeit jedoch weiterhin von der mechanischen Genauigkeit des Motors abhängt. Für beide Motoren liegt sie bei $\pm 0,05^\circ$ [3]. Durch einen kleineren Schrittwinkel wird auch die Drehmomentwelligkeit des Antriebes geglättet, wodurch ein 5-Phasen-Motor im Vollschrittbetrieb mehr „nutzbares“ Drehmoment aufweist.

In einem 5-Phasen-Motor ist die Drehmomentwelligkeit deutlich geringer als in einem 2-Phasen-Motor, da mehr Phasen zum Gesamtdrehmoment des Motors beitragen. Spitze und Tal unterscheiden sich bei einem 2-Phasen-Motor um bis zu 29 Prozent wohingegen bei einem 5-Phasen-Motor dieser Unterschied nur etwa 5 Prozent beträgt. Er läuft demnach ruhiger als der 2-Phasen-Motor, da die Drehmomentwelligkeit, die zur Vibration beiträgt, geringer ist. Veranschaulicht wird dies in der nachstehenden Abbildung 8.

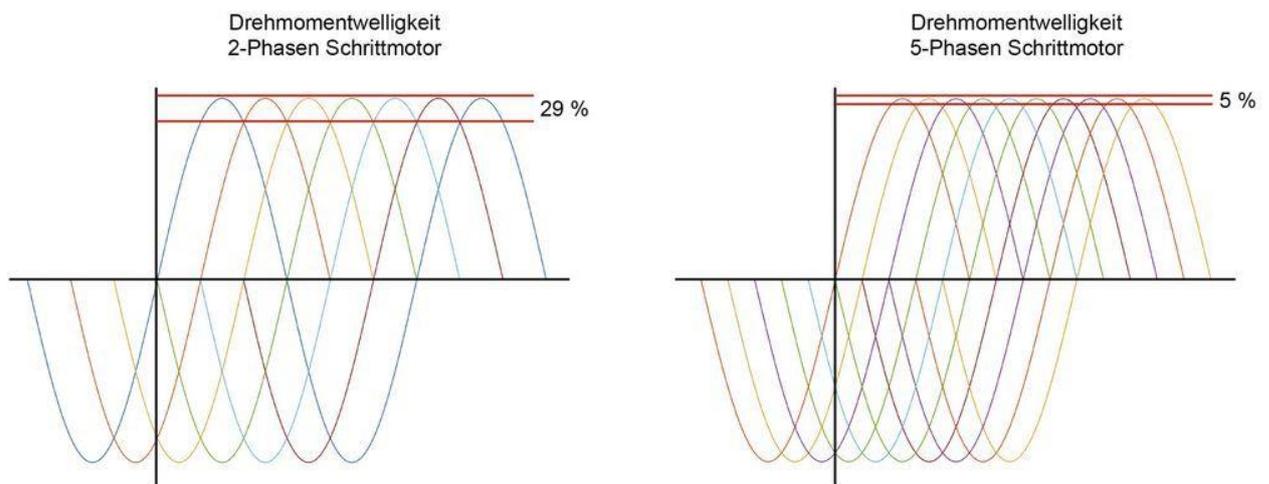


Abbildung 8: Drehmomentenwelligkeit im Vergleich [9]

Motortreiber bieten die Möglichkeit, Motoren im Voll- und Halbschritt oder im sogenannten Mikroschrittbetrieb zu betreiben. Bei letzterem erfolgt die Unterteilung jedes Vollschriffs eines Motors in eine Vielzahl kleiner Schritte. Hierbei werden die Phasenströme der beiden Motorphasen A und B nicht einfach ein- und ausgeschaltet, wie im Vollschriffbetrieb, sondern mithilfe von Pulsweitenmodulation (PWM) sinusförmig moduliert. Dadurch entsteht ein sich veränderndes Magnetfeld, das den Rotor in eine Zwischenpositionen bewegt. Eine Darstellung mit den verschiedenen Stromverläufen in den Betriebsarten ist dem Anhang unter Abbildung A 1 beigefügt. Ein Mikroschrittbetrieb erhöht die Auflösung und sorgt für einen gleichmäßigeren Drehmomentverlauf. Auch wird der Motor durch die vielen kleinen Schritte weniger in Schwingungen versetzt. Dies ist besonders vorteilhaft für Anwendungen, die von starken Resonanzen beeinträchtigt werden könnten. Jedoch fällt das Drehmoment pro Schritt mit der steigenden Anzahl an Mikroschritten drastisch ab, da der Motor sich nicht mehr vollständig auf das Rastmoment wie im Vollschriffbetrieb verlassen kann. Eine Grafik, welche die Entwicklung des Haltemoments für ein Schrittmotor darstellt, ist im Anhang unter Abbildung A 2 einsehbar. Auch nimmt die Genauigkeit im Mikroschrittbetrieb mit einer zunehmenden Anzahl an Microschritten ab [2] [10]. Dies ist zurückzuführen auf extern einwirkende Kräfte auf den Rotor, Abweichungen vom idealen Sinusstrom, die nicht Linearität der Stromsteuerung oder mechanische Ungenauigkeiten des Motors [2].

Die im Mikroschrittbetrieb genannten Schwierigkeiten wie der Drehmomentverlust und die verringerte Genauigkeit sind eng mit der Beschaffenheit der Ansteuerung sowie mit dem Design des Schrittmotors verknüpft. Von wesentlicher Bedeutung ist dabei die Differenzierung zwischen bipolar und unipolar angesteuerten Schrittmotoren. Diese unterscheiden sich grundlegend in der Art der Wicklungen, der Stromführung und der daraus resultierenden Effizienz

sowie dem Drehmomentverhalten. Der in dieser Arbeit verwendete Motor ist ein bipolarer Schrittmotor [11].

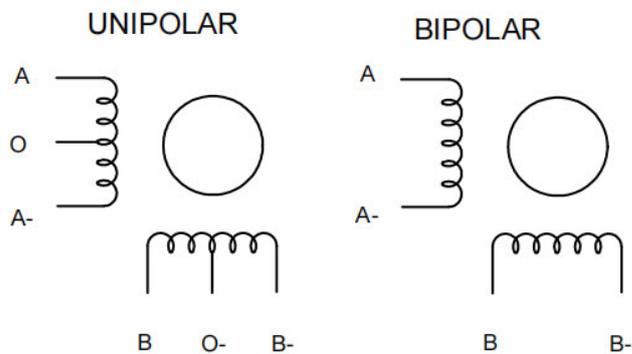


Abbildung 9: Vereinfachte Dachstellung von Unipolar und Bipolaren Schrittmotoren [11]

Abbildung 9 stellt das Anschlussprinzip der beiden Statorwicklungen von bipolar und unipolar geschalteten Schrittmotoren dar. Beim Unipolarbetrieb fließt der Strom in jeder Wicklung ausschließlich in eine Richtung. Jeder Wicklungsstrang setzt sich aus zwei parallel gewickelten Drähten zusammen, die in Reihe geschaltet und mit einer Mittelanzapfung versehen sind. Somit verfügen sie meist über sechs oder acht Anschlussdrähte. Mit dieser kann der Motor mit jeweils nur einer Hälfte der Wicklung betrieben werden, was die Steuerschaltung vereinfacht [12]. Bei einem Richtungswechsel wird der Stromfluss über die Mittelanzapfung durch den Motortreiber in den anderen Teil der Spule geschaltet. Das Magnetfeld und damit auch der Rotor, ändern so ihre Richtung [8]. Unipolare Schrittmotoren besitzen in der Regel aufgrund des zusätzlichen Mittelabgriffs mehr Anschlüsse als bipolare Motoren. Trotzdem vereinfacht diese Konfiguration die Steuerung, ist kostengünstig und besonders für einfachere Anwendungen geeignet [12].

Ein Nachteil dieser Bauweise ist jedoch, dass immer nur eine Hälfte der Wicklung für die Drehmomentgenerierung genutzt wird. Dies führt schlussendlich auch zu einem geringeren Drehmoment pro Schritt und macht unipolare Motoren im Vergleich zu bipolaren Motoren weniger effizient [12].

Bei bipolaren Schrittmotoren hingegen fließt der Strom durch die komplette Wicklung, wodurch sie ein höheres Drehmoment erreichen können als unipolare Schrittmotoren. Dies führt, verglichen mit unipolaren Motoren dazu, dass nur vier Steuerleitungen benötigt werden. Bei einer Richtungsumkehr muss der Strom der Statorwicklungen durch den Motortreiber umgekehrt werden. Dazu ist, aufgrund einer H-Brücke eine komplexere interne Verschaltung des Motortreibers erforderlich [12]. Obwohl bipolare Schrittmotoren und ihre Treiber in der Regel teurer sind als unipolaren Varianten, bieten sie zahlreiche Vorteile, die sie zu einer attraktiveren Wahl

machen. Dazu gehören ein hohes Drehmoment, eine hohe Geschwindigkeit und eine hohe Präzision.

2.3 Ansteuerung von Schrittmotoren

Die Ansteuerung eines Schrittmotors ist deutlich komplexer als die eines Gleichstrommotors. Zur Veranschaulichung des Ansteuerungsprinzips wird das Verhalten beider Motortypen unter Last miteinander verglichen.

Ein Gleichstrommotor besteht ebenfalls aus einem Stator und einem Rotor. Ein wesentlicher Unterschied zum Schrittmotor ist hierbei, dass der Rotor über Spulenwicklungen verfügt. Der Stator hingegen enthält Permanentmagneten, kann aber auch elektromagnetische Wicklungen beinhalten.

Wird ein Gleichstrom an den Motor angelegt, entsteht am Stator ein Magnetfeld, welches den Rotor durch die magnetischen Kräfte abstößt bzw. anzieht. Damit der Rotor sich nicht in Folge der magnetischen Felder arretiert und ausrichtet, sondern in Bewegung bleibt, verfügt dieser über einen Kommutator. Folglich sorgt dieser dafür, dass sich der Stromfluss in dem Rotor umkehrt. Aus diesem Grund ändert sich das Magnetfeld im Rotor und er bleibt durch kontinuierliches Anziehen bzw. Abstoßen in Bewegung [13]. Im Motor selbst sorgt also eine Stromumkehr durch den Kommutator für eine kontinuierliche Bewegung. Die Höhe des Stromflusses in den Rotorwicklungen steht hierbei im Verhältnis zum Drehmoment, mit welchem sich der Rotor abstößt. Über die angelegte konstante Spannung wird die Drehzahl bestimmt und kann mittels PWM reguliert werden. Bei einem Drehmomentanstieg, durch eine Last verringert sich die Drehzahl wodurch die Gegenspannung sinkt. Resultierend daraus steigt der Stromfluss in den Wicklungen des Motors an, was eine Drehmomentsteigerung mit sich bringt [14].

Wie bereits erwähnt, wird die Bewegung eines Schrittmotors jedoch von außen durch ein entsprechendes Motorsteuergerät geregelt. Der Treiber steuert die entsprechenden Spulenpaare (A und B) gezielt elektrisch an, basierend auf einer bestimmten Sequenz (Voll-, Halb- oder Mikroschritt). Der Stromfluss in den Wicklungen ist auch hier für das spezifische Drehmoment verantwortlich, wird aber vom Motortreiber gesteuert. Die angelegte Spannung bleibt, wie beim Gleichstrommotor, ebenfalls konstant ist allerdings im Gegensatz dazu nicht primär für die Drehzahl entscheidend. Beim Schrittmotor resultiert die Drehzahl aus der Ansteuerungs- bzw. Puzlsfrequenz der Spulenpaare. Hier ist die Höhe der Spannung ausschlaggebend für einen schnellen Stromanstieg, um der Pulsfrequenz des Treibers folgen zu können. Wird an einen Schrittmotor nun eine Last angelegt, versucht der Motortreiber, die Drehzahl aufrechtzuerhalten indem er den im Treiber festgelegten maximalen Strom nutzt [14]. Ein Verlust des Drehmoments, insbesondere bei hohen Drehzahlen, tritt bei zu niedriger

Spannung auf. Infolgedessen kann es dazu kommen, dass der Treiber den gewünschten Strom nicht mit der erforderlichen Geschwindigkeit aufbauen kann. Dies ist auf die Induktivität der Spulen zurückzuführen, die den Stromanstieg begrenzen, und tritt durch einen Schrittwahlverlust des Motors in Erscheinung.

Die Reaktion auf eine Last resultiert demnach nicht, wie es beim Gleichstrommotor der Fall ist, aufgrund elektrotechnischer Gesetze, sondern wird durch die Motortreibersteuerung von außen beeinflusst.

Die Pulsfrequenz (f) bezeichnet, die Anzahl an Impulsen pro Sekunde, welche der Treiber an den Motor sendet. Hierbei repräsentiert jeder Puls einen Schritt bzw. einen Mikroschritt des Motors. Die Schrittfrequenz (f_z) eines Schrittmotors bezieht sich darauf, wie viele vollständige Schritte der Motor pro Sekunde ausführt. Sie entspricht der Pulsfrequenz jedoch nur dann, wenn der Motor im Vollschrittmodus betrieben wird, sprich 1 Schritt pro Impuls. Wird der Schrittmotor im Mikroschrittbetrieb angesteuert, unterscheidet sich die Schrittfrequenz von der Pulsfrequenz. Nachstehender Ausdruck beschreibt, unter Anwendung eines Zahlenbeispiels, die Ermittlung der Schrittfrequenz:

Pulsfrequenz (f) = 5000 Hz; Mikroschritte = 8 pro Vollschritt

$$\text{Schrittfrequenz } (f_z) = \frac{f}{\text{Mikroschritte}} = \frac{5000 \text{ Hz}}{8} = 625 \frac{\text{Schritte}}{\text{Sekunde}} \quad (2.1)$$

In Ansteuerungscodes wird die Dauer eines Impulses oft in Mikrosekunden angegeben. Diese Angabe ermöglicht so die präzise Definition von Timing-Intervallen für die Pulsfrequenz.

Die Steuerung der Pulsfrequenz erfolgt durch die Angabe der Dauer einer HIGH- und LOW-Phase eines Impulses. Dies wird im nachstehenden Codebeispiel verdeutlicht:

```
digitalWrite(PUL, HIGH);  
delayMicroseconds(100);  
digitalWrite(PUL, LOW);  
delayMicroseconds(100);
```

Die Motordrehzahl kann durch nachfolgenden Ausdruck beschrieben werden:

$$T = 200\mu\text{s} \rightarrow f = \frac{1}{T[\text{s}]} = \frac{1}{0,0002 \text{ s}} = 5000\text{Hz} \quad (2.2)$$

$$\text{Motordrehzahl in } \frac{U}{\text{min}} = \frac{f * 60 \text{ s}}{\text{Schritte pro Umdrehung}} = \frac{0,0002 \text{ Hz} * 60 \text{ s}}{200} = 1500 \frac{U}{\text{min}} \quad (2.3)$$

Die Schritte pro Umdrehung entsprechen hier der Anzahl an fest eingepprägten Schritten, die für eine 360° Umdrehung des Motors notwendig sind. Die Periodendauer, welche die Dauer eines Impulszyklus darstellt wird durch T repräsentiert.

2.4 Anforderungen an die Sicherheit

Geht es an Hochschulen um den Schutz von Studierenden besonders in Bezug auf die Unterhaltung eines Demonstrators, so hat die Hochschule die Verkehrssicherungspflicht einzuhalten [15]. Sie hat sicherzustellen, dass Studierende vor vermeidbaren Gefahren auf dem Gelände und ferner auch in den Räumlichkeiten geschützt werden. Die Verkehrssicherungspflicht stellt keine Garantie für absolute Sicherheit dar. Sie verpflichtet die Hochschule vielmehr dazu, alle angemessenen Maßnahmen zu ergreifen, um die Risiken zu minimieren. Kommt die Hochschule dieser Pflicht nicht nach, kann sie bei Unfällen haftbar gemacht werden [15].

Somit gelten für die Studierenden keine spezifischen Arbeitsschutzvorschriften, denn sie sind bei Tätigkeiten, die im inhaltlichen und organisatorischen Verantwortungsbereich der Hochschule stattfinden, durch das Sozialgesetzbuch VII (SGB VII) gesetzlich versichert [16].

2.4.1 Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV)

In Deutschland legt die Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV) fest, welche Anforderungen an Arbeitsstätten gestellt werden müssen, um Sicherheit, Gesundheitsschutz und eine menschengerechte Gestaltung der Arbeitsbedingungen zu garantieren. In erster Linie richtet sich die ArbStättV an die Beschäftigten einer Arbeitsstätte, ferner demnach einer Hochschule.

So gilt diese Verordnung für Professoren, wissenschaftliches Personal, Verwaltungspersonal und technische Mitarbeiter [17]. Für Studierende gelten keine spezifischen Arbeitsschutzvorschriften, wie zu Beginn des Kapitels 0 erwähnt.

„Der Arbeitgeber hat dafür zu sorgen, dass Arbeitsstätten so eingerichtet und betrieben werden, dass Gefährdungen für die Sicherheit und die Gesundheit der Beschäftigten möglichst vermieden und verbleibende Gefährdungen möglichst gering gehalten werden. Beim Einrichten und Betreiben der Arbeitsstätten hat der Arbeitgeber die Maßnahmen nach § 3 Absatz 1 durchzuführen und dabei den Stand der Technik, (...) Regeln und Erkenntnisse zu berücksichtigen.“ ArbStättV § 3a Absatz 1 [17].

Als Schlussfolgerung dieses Zitas lässt sich sagen, dass die Verwendung eines Demonstrators unter die ArbStättV fällt, da dieser als Teil der Einrichtung einer Arbeitsstätte angesehen werden kann. Somit ist eine Vermeidung von Gefährdungen und für die sichere Anwendung der aktuelle Stand der Technik zu berücksichtigen. Als Gefährdung gelten demnach scharfe Kanten, drehende Teile und infolgedessen Quetschgefahr oder elektrische Risiken in Form von Stromschlägen. Unsichere oder defekte elektrische Bauteile deuten dagegen darauf hin, dass die Regeln des Stands der Technik nicht eingehalten werden.

Die Hochschule als Arbeitgeber ist gemäß § 3 der Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV) verpflichtet, zu prüfen, ob Beschäftigte gemäß § 5 des Arbeitsschutzgesetzes Gefährdungen ausgesetzt sind oder ausgesetzt sein könnten, wenn Arbeitsstätten eingerichtet oder betrieben werden. Dazu schreibt die ArbStättV die Durchführung einer Gefährdungsbeurteilung vor. Ziel dieser Beurteilung ist es, die Sicherheit und Gesundheit der Beschäftigten zu gewährleisten, indem geeignete Maßnahmen zum Schutz vor potenziellen Gefahren ergriffen und der sichere Betrieb der Arbeitsstätten sowie eines Demonstrators sichergestellt werden.

Entsprechend dem Ergebnis der Gefährdungsbeurteilung hat der Arbeitgeber Maßnahmen zum Schutz der Beschäftigten gemäß den Vorschriften dieser Verordnung einschließlich ihres Anhangs nach dem Stand der Technik festzulegen.

Im weiteren Sinne steht der Beschäftigte, welcher den Demonstrator bedienen wird, unter der Pflicht, dafür zu sorgen, dass durch den Demonstrator gemäß der ArbStättV keine Gefahren hervorgehen und die Verkehrssicherungspflicht der Hochschule nicht verletzt wird.

Um potentielle Risiken auch im Hinblick auf das zu erstellende Sicherheitskonzept beim Betrieb des Demonstrators zu identifizieren und zu minimieren, wird in Anlehnung an § 3 der ArbStättV eine solche Gefährdungsbeurteilung vor dem Beginn der in dieser Arbeit folgenden Arbeiten durchgeführt. Die ausgearbeitete Tabelle ist dem Anhang unter Tabelle A 1 beigelegt. Die hier verwendete Vorlage (ebenfalls im Anhang von Tabelle A 2 bis Tabelle A 4) hat ihren Ursprung in der Berufsgenossenschaft der Rohstoffe und chemischen Industrie, sie dient jedoch dem Erstellen von Risikobeurteilungen für Maschinen. Die Herangehensweise, wie zur Beurteilung eines Risikos, ist jedoch auch auf dem Bereich der Technik anwendbar.

Bei der Risikobeurteilung ist die Risikoprioritätszahl, kurz RPZ, für das Auslösen einer entsprechenden Maßnahme entscheidend. Übersteigt die RPZ den Wert 130, ist das Grenzkrisiko überschritten und es sind risikoreduzierende Maßnahmen erforderlich [18]. Die Risikoprioritätszahl setzt sich aus der Schwere des Schadens (S), einer Kombination aus Exposition (F) und Eintrittswahrscheinlichkeit (O) sowie der Bewertung der Vermeidbarkeit des Schadens (A)

zusammen. Die Exposition stellt hierbei den Aufenthalt im Gefahrenbereich in % der Arbeitszeit/ Schicht dar und wird mit der Eintrittswahrscheinlichkeit multipliziert [18].

Ausgehend von der Risikobeurteilung geht hervor, dass aus den rotierenden Teilen des Demonstrators erhebliche Risikopotenziale hervorgehen. Hier beträgt die RPZ 240, was bedeutet, dass hier risikoreduzierende Maßnahmen erforderlich sind.

2.4.2 Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG)

Das Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG) enthält allgemeine Bestimmungen, die dem Schutz und der Gesundheit von Beschäftigten am Arbeitsplatz gelten. Gemäß den vorliegenden Richtlinien ist der Arbeitgeber dazu verpflichtet, potentielle Risiken zu identifizieren und entsprechende Maßnahmen zu ergreifen, um Arbeitsunfälle und Gesundheitsgefahren zu minimieren. Dies umfasst die Implementierung von Sicherheitsvorkehrungen, die regelmäßige Unterweisung der Beschäftigten sowie die Bereitstellung von Schutzmaßnahmen und Ausrüstungen. Das übergeordnete Ziel besteht in der Gewährleistung einer sicheren und gesunden Arbeitsumgebung [19].

Ergänzend zu der eingangs getätigten Aussage zum Versicherungsschutz von Studierenden sieht das ArbSchG eine weitere Definition dieser vor.

So gelten gemäß § 2 Abs. 2 des ArbSchG diese nicht direkt als Beschäftigte, können aber unter Personen definiert werden, welche in der Hochschule Tätigkeiten ausüben „...die zu ihrer Berufsbildung ...“ [20] beitragen. In diesem Kontext wären Studierende im Laborunterricht bei der Nutzung von Maschinen als Beschäftigte anzusehen und entsprechend zu behandeln. Im Kontext dieser Arbeit werden Studierende voraussichtlich jedoch nicht an Maschinen, ferner dem Demonstrator, stehen und diesen bedienen. Somit gelten die im ArbSchG geltenden Richtlinien, in Bezug auf den Demonstrator, nur für die Arbeitnehmenden der Hochschule.

Hinsichtlich einer sicheren Anwendung des Demonstrators lässt sich auf die in Kapitel 2.4.1 erstellte Risikobeurteilung und die daraus resultierenden Anforderungen verweisen.

2.4.3 DGUV Vorschrift 3 "Elektrische Anlagen und Betriebsmittel"

Die DGUV Vorschrift 3 „Elektrische Anlagen und Betriebsmittel“ ist eine Regelung der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV V3), die sich mit dem sicheren Betrieb und der Prüfung elektrischer Anlagen und Betriebsmittel befasst, um Unfälle und Gefahren durch Elektrizität zu vermeiden. In ihr werden stationäre sowie mobile elektrische Anlagen und Geräte erfasst [21], [22].

„Elektrische Betriebsmittel im Sinne dieser Unfallverhütungsvorschrift sind alle Gegenstände, die als Ganzes oder in einzelnen Teilen dem Anwenden elektrischer Energie (z.B. Gegenstände zum Erzeugen, Fortleiten, Verteilen, Speichern, Messen, Umsetzen und Verbrauchen) oder dem Übertragen, Verteilen und Verarbeiten von Informationen (z.B. Gegenstände der Fernmelde- und Informationstechnik) dienen.“ § 2 (1) der DGUV V3.

Gemäß dieser Aussage ist der Demonstrator, da er durch Anwendung elektrischer Energie einen Elektromotor verwendet sowie im Zuge seiner Ansteuerung Informationen verarbeitet und verteilt, unter die DGUV V3-Richtlinie als elektrische Anlage bzw. ortsveränderliche Betriebsmittel einzuordnen.

Laut § 5 (1) der DGUV V3 hat der Unternehmer, in diesem Fall die Hochschule, dafür zu sorgen, dass eine elektrische Anlage und Betriebsmittel vor ihrer ersten Inbetriebnahme durch eine Elektrofachkraft auf ihren ordnungsgemäßen Zustand in Hinblick auf eine fachgerechte Isolation oder Abschirmung hin geprüft wird [22]. Dies umfasst insbesondere die Spannungsbereiche des Demonstrators, welche über eine 230V AC-Leitung verbunden werden. Um verschiedene Spannungsbereiche klar voneinander zu unterscheiden, bezieht sich die DGUV V3 auf die Einhaltung geltender technischer Regeln und somit auf verschiedene Bestimmungen der VDE (Verband Deutscher Elektrotechniker).

In dem Abschnitt 414.1 der DIN VDE 0100-410 (Tabelle 1) wird eine Wechselspannung (AC) bis 50 V Berührungsspannung als Kleinspannung definiert. Gemäß der DIN VDE 0100-410 ist bei gesunden Erwachsenen ein zeitlich unbegrenzter Kontakt mit einer Wechselspannung bis 50 V möglich, ohne dass es zu gesundheitsschädigenden Auswirkungen kommt [23] [24]. Bei Gleichspannungen beträgt der Wert der Berührungsspannung 120V. Es ist allerdings zu beachten, dass beide Werte nicht überschritten werden sollten, da sonst eine lebensbedrohliche Situation eintreten kann. Dennoch sind auch Kleinspannungen laut DGUV V3 § 3 (1) durch eine Elektrofachkraft vor Inbetriebnahme zu prüfen, da sich in dieser Richtlinie auf alle elektrischen Anlagen und Betriebsmittel unabhängig ihrer Betriebsspannung bezogen wird.

Im Rahmen der Prüfung wird in der Regel sichergestellt, dass von Kurzschlüssen oder defekten Komponenten keine Gefährdung zu erwarten ist [22].

Tabelle 1: Spannungsbereiche [23]

Spannungsbereiche		AC	DC
Hochspannung (HV)		> 1 000 V	> 1 500 V
Niederspannung (LV)		≤ 1 000 V	≤ 1 500 V
	Kleinspannung (ELV)	≤ 50 V	≤ 120 V

Eine Überprüfung gemäß VDE 0701 und VDE 0702 für ortsveränderliche elektrische Betriebsmittel und damit das Anbringen einer Plakette durch eine Elektrofachkraft ist somit für ein erfolgreiches Inbetriebnehmen des Demonstrators zwingend notwendig. Auch schreibt die DGUV V3 eine wiederkehrende Prüfung alle 4 Jahre bei regelmäßig genutzten Anlagen vor. Diese sieht unter anderem die Messung des Isolationswiderstands, des Schutzleiterwiderstands, des Ableitstroms sowie des Berührungstroms vor. Nur so kann nach DGUV V3 eine Betriebssicherheit garantiert werden [25].

Da die DGUV V3 die Einhaltung der anerkannten Regeln, wie der VDE 0113-1 (DIN EN 60204-1), sicherstellt, muss der Demonstrator mit einem Not-Aus-Schalter versehen werden, der bei einer elektrischen Gefährdung schnell und zuverlässig die Stromversorgung unterbricht. Die Norm regelt die elektrische Ausrüstung von Maschinen und schreibt Not-Aus-Schalter vor, wenn bewegliche Teile vorhanden sind, die eine Gefahr für die bedienende Person oder Personen in der Nähe darstellen können. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Not-Aus-Schalter als ergänzende Schutzmaßnahmen zu betrachten sind. Diese stellen keine Maßnahmen zur Reduzierung von Gefahren an einer Maschine dar und dürfen daher nicht als vollständigen Ersatz für solche Maßnahmen angesehen werden.

2.4.4 Maschinenrichtlinie

Die Maschinenrichtlinie (Richtlinie 2006/42/EG) ist eine EU-Verordnung, die grundlegende Sicherheits- und Gesundheitsanforderungen für Maschinen festlegt. Sie sorgt dafür, dass Maschinen im Europäischen Wirtschaftsraum (EWR) sicher betrieben werden können und keine Gefahr für Menschen, Tiere oder Güter darstellen [26].

Gemäß des 1. Artikel Abs. 2 h der Maschinenrichtlinie kann der Demonstrator unter Maschinen eingeordnet werden, die speziell für Forschungszwecke entworfen und hergestellt wurden und für den vorübergehenden Einsatz in Laboratorien vorgesehen sind [26]. Weiter ist der Demonstrator ausschließlich für die Lehre bestimmt und nicht für den Verkauf oder den allgemeinen Gebrauch vorgesehen. Per Definition ist der Demonstrator somit aus dem

Anwendungsbereich dieser Richtlinie ausgenommen. Jedoch muss er die bereits erwähnten und relevanten Sicherheitsanforderungen der DGUV Vorschrift 3 und der VDE-Normen erfüllen.

2.4.5 Resümee

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass bei der Erfüllung der Aufgabenstellung in Bezug auf die Sicherheitsanforderungen des Demonstrators gemäß der geltenden Gesetzeslage folgende Aspekte zu berücksichtigen sind:

- a. Minimierung der Risiken ausgehend von der Risikobeurteilung aus Kapitel 2.4.1 durch rotierende Teile. Die zu schützenden Bereiche sind somit:
 - die Getriebeeinheit speziell im Bereich der im Eingriff stehenden Zahnräder,
 - das Riemengetriebe speziell im Bereich der Riemenscheiben,
 - die Nussknacker-Scheibe,
 - alle sich drehenden Wellen
- b. Minimierung der Risiken im Betriebszustand durch das Prüfen einer Elektrofachkraft gemäß VDE 0701 und VDE 0702 vor erstmaliger Inbetriebnahme sowie das Ausführen wiederkehrender Prüfungen, insbesondere bei Spannungen, welche laut Gesetz nicht als Kleinspannung geführt werden.
- c. Um eine elektrisch sichere Verwendung des Demonstrators zu gewährleisten sind folgende Aspekte bei der Zielerreichung zu beachten:
 - fachgerechte Isolierung gegen Stromschläge und Kurzschlüsse der Spannungsversorgung, insbesondere bei einer 230V AC-Anschlussleitung (hier Freigabe durch in b ausgeführte Prüfung)
 - ordnungsgemäße Klemmen und Verbindungen von Kabeln und Leitungen
 - Vorhandensein eines Stromlaufplans
 - Anbringung eines Not-Aus-Schalters zur Stilllegung der Anlage im Notfall

3 Analyse der Anforderungen

In diesem Kapitel wird eine Darstellung der Anforderungen für die Inbetriebnahme des Demonstrators aufgestellt. Hierbei werden die Anforderungen aus Kapitel 2.4 berücksichtigt, die sich aus der Betrachtung der Sicherheitsaspekte ergeben haben. Darüber hinaus werden neu identifizierte Anforderungen ausgehend von der Aufgabenstellung gebildet oder abgeleitet.

Die Anforderungen werden in der Tabelle in Forderungen (F) und Wünsche (W) aufgeteilt. Hierbei müssen Forderungen demnach zwingend umgesetzt werden, während Wünsche optional und nach Möglichkeit zu berücksichtigen sind.

Tabelle 2: Anforderungsliste

Nr.	F/W	Anforderung	Bemerkung
1		Anforderungen an die Bedienbarkeit	
1.1	F	schnelle Einsatzbereitschaft	
1.2	F	minimierung der Peripheriegeräte	
1.3	F	einfache Bedienbarkeit	Übersichtlicher Aufbau - intuitive bedienung
1.4	F	Anpassung der Drehzahl	
1.4.1	W	Stufenlose anpassung der Drehzahl	
1.5	W	Anzeigen der Drehzahl	
1.6	F	Demonstrator stoppen	
1.7	W	Anzeigen von Fehlermeldungen	
1.8	W	Demonstrator von Hand drehen können	
2		Anforderungen an das elektrische System	
2.1	F	Standardnetzanschluss	
2.2	F	ordnungsgemäße verkabelung	Für erfolgreiches erlangen der Betriebssicherheit durch das Prüfen einer Elektrofachkraft gemäß VDE 0701 und VDE 0702
2.3	W	System gesondert auf Benutzerwunsch An- oder Ausschalten	Steigert Bedienkomfort
3		Anforderungen an die Sicherheit	
3.1	F	Schutz vor sich rotierenden Bauteilen	Dazu zählen: - Zahnräder - Wellen - Riemengetriebe - Nussknacker-Scheibe
3.2	F	Integration eines Not-Aus-Schalters	
3.3	F	erfolgreiche Prüfung gemäß VDE 0701 und VDE 0702	Anforderung wird durch Anforderung 2.2 ergänzt

Diese Arbeit befasst sich mit der Konzeption einer Ansteuerung sowie der Inbetriebnahme des bereits bestehenden Getriebedemonstrators. Ziel ist es, eine zuverlässige, flexible Steuerung zu entwickeln und die Einsatzbereitschaft des Demonstrators sicherzustellen.

Die Bearbeitung dieser Aufgabenstellung ist mit verschiedenen Anforderungen (dargestellt in Tabelle 2) verbunden, welche für die erfolgreiche Zielerreichung von entscheidender Bedeutung sind. Sie ergeben sich aus klaren Forderungen, die für einen erfolgreichen Projektabschluss unbedingt zu erfüllen sind. Zusätzlich bilden sich Wünsche, die entweder als Erweiterungen bestehender Forderungen (siehe Anforderung 1.4.1, Tabelle 2) oder als eigenständige Ergänzungen zu geforderten Anforderungen an das Gesamtsystem zu betrachten sind.

So stehen die schnelle Einsatzbereitschaft in der Vorlesung und die damit verbundene Reduzierung der Peripheriegeräte im Vordergrund. Das etwaige Anschließen eines externen PCs oder Laptops und das Starten von Software sollen vermieden werden. Dies würde ebenfalls einer intuitiven Bedienung entgegenstehen und die Bedienbarkeit des Demonstrators unnötig komplex gestalten. Der Fokus liegt daher auf einer vereinfachten Handhabung, damit auch Personen ohne umfangreiche technische Kenntnisse den Demonstrator nutzen können.

Die Hauptaufgabe eines Demonstrators ist es, einen technischen Sachverhalt verständlich und greifbar darzustellen und dessen Funktionalität zu demonstrieren. Damit dies gelingt, ist das Auswählen und Anpassen einer passenden Drehzahl von großer Bedeutung. Somit können Bewegungsabläufe in verlangsamer Geschwindigkeit dargestellt werden, wodurch das Verständnis des Sachverhalts erleichtert wird. Eine stufenlose Regelung der Drehzahl wird in diesem Zusammenhang als optionale Anforderung betrachtet. In diesem Kontext bildet für eine bessere Nachvollziehbarkeit das Visualisieren der aktuell gewählten Drehzahl ebenfalls eine hilfreiche Ergänzung. So lässt sich die Thematik des Übersetzungsverhältnisses speziell bei Getrieben, rechnerisch nachvollziehen und veranschaulichen.

Um in der Lehrveranstaltung schnell reagieren zu können, ist das Stoppen des Bewegungsablaufs des Demonstrators eine weitere zwingende Anforderung. Damit soll für eine kontrollierte und schnelle Bereitschaft der Demonstrator, ohne ein komplettes Stromlos schalten, schnell wieder zur Verfügung stehen. Ergänzend hierzu soll im sicherheitstechnischen Zusammenhang, der Demonstrator beim Auslösen einer Sicherheitsvorrichtung ebenfalls in einen Stopp und somit in einen sicheren Zustand übergehen. Optional soll dem Benutzer eine Fehlermeldung oder Erklärung dargestellt werden, die das vorliegende Problem verdeutlicht und notwendiges Handeln beschreibt.

Wie zu Beginn der Arbeit erwähnt, soll die Verwendung einer elektromagnetischen Bremse in Betracht gezogen werden. Ihr Einsatz würde somit einen wesentlichen Bestandteil der Sicherheitsaspekte darstellen. Technisch bedingt würde sich der Demonstrator im stromlosen Zustand jedoch nicht von Hand bewegen lassen, um ihn in eine gewünschte Position zu bringen. Hieraus lässt sich somit eine optionale Anforderung auf eine mühelose Bewegbarkeit herstellen.

Da der Demonstrator in verschiedenen Lehrräumen zum Einsatz kommen wird, ist eine Standard-Stromversorgung in Betracht zu ziehen. Hierbei soll, wieder im Hinblick auf die Effizienz und die Reduzierung externer Peripheriegeräte, eine schnelle und zuverlässige Spannungsversorgung hergestellt werden können. Ferner ist eine ordnungsgemäße Verkabelung der elektrischen Systeme und das Aktivieren des Demonstrators über einen Netzschalter erforderlich.

Darüber hinaus bietet Kapitel 2.4 die Grundlage für eine gewisse Anzahl an zwingenden Sicherheitsanforderungen an den Demonstrator die im Zuge einer Risikobeurteilung herausgearbeitet wurden. Hierbei ist in erster Linie der Schutz vor, sich drehenden Bauteilen zu gewährleisten, da diese im laufenden Betrieb ernstzunehmende Verletzungen verursachen können. Zu den zu schützenden Demonstratorkomponenten zählen Zahnräder, sich drehende Wellen, das Riemengetriebe und die Nussknacker-Scheibe. Um in einer Gefahrensituation den Demonstrator schnell zu stoppen und diesen in einen stromlosen Zustand zu versetzen, ist die Integration eines Not-Aus-Schalters unabdingbar. Ebenso wurde in dem Kapitel 2.4 deutlich gemacht, dass für ein erfolgreiches Inbetriebnehmen des Demonstrators eine Prüfung gemäß VDE 0701 und VDE 0702 durch eine Elektrofachkraft durchgeführt werden muss. Dies entspricht im weitesten Sinne einer Anforderung, da für das Bestehen der zuvor erwähnten Prüfung, eine ordnungsgemäße Verkabelung der elektrischen Komponenten, wie in Punkt 2.2 der Tabelle 2 erwähnt, umzusetzen ist.

4 Konzeption

In diesem Kapitel wird das für die Zielerreichung zugrunde liegende Konzept vorgestellt. Hierzu wird nach kurzer Betrachtung des Gesamtsystems, dieses nach dem Top-Down-Prinzip in seine Teilkomponenten aufgegliedert. So besteht die Möglichkeit, sich im Detail mit den einzelnen Teilkomponenten auseinanderzusetzen und dabei sowohl die jeweilige Funktion als auch den entsprechenden Konzeptionsentwurf präziser zu analysieren und zu formulieren. Dabei soll die Frage geklärt werden, wie das Ziel erreicht werden soll.

Darüber hinaus wird in diesem Kapitel die Ideenfindung zu einem entsprechenden Sicherheitskonzept und die darauf basierende Umsetzung näher erläutert sowie ausgearbeitet.

4.1 Übersicht des Gesamtsystems

Der Getriebedemonstrator setzt sich aus mehreren Teilkomponenten zusammen, welche alle zur Gesamtheit des Systems beitragen. Die einzelnen Teilkomponenten sind, wie in Abbildung 10 dargestellt, durch eine Aggregation mit dem Getriebedemonstrator verbunden. Die Teilkomponenten sind:

- die Energieversorgung,
- die Software,
- das User Interface (UI) bzw. die Benutzerschnittstelle,
- die Antriebseinheit,
- das Sicherheitskonzept,
- die mechanische Verbindung.

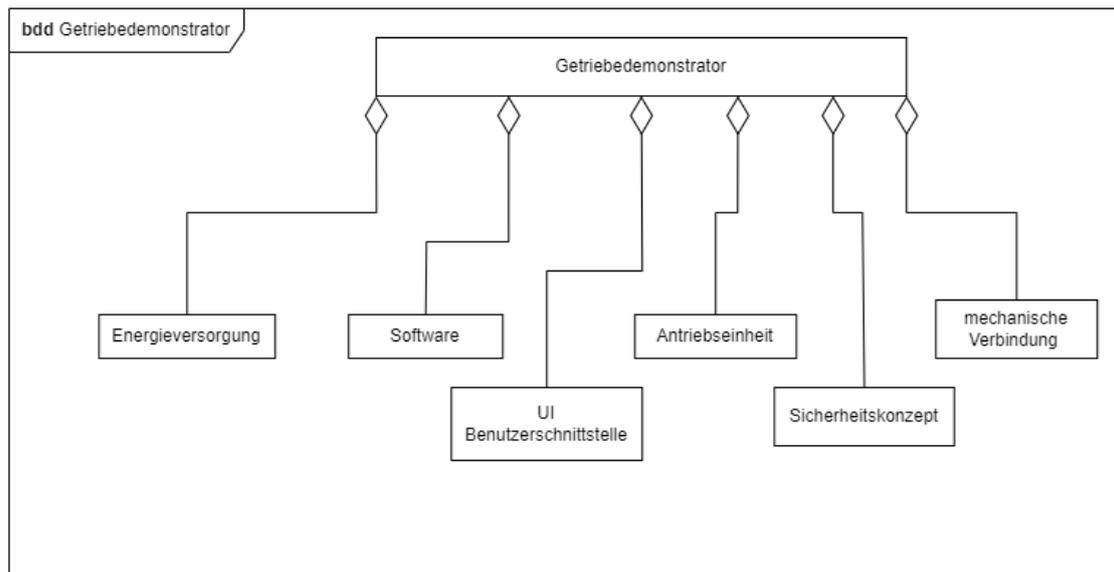


Abbildung 10: Blockdefinition Diagramm des Getriebedemonstrators

Alle diese Komponenten tragen schlussendlich und im weitesten Sinne zur Zielerreichung bei, einen technischen Sachverhalt unter Anwendung des Demonstrators verständlich und greifbar für die Studierenden darzustellen. Um diese Aufgabe zuverlässig auszuführen, stehen die Systeme durch elektrische Energie und den Austausch von Daten miteinander in Verbindung. Eine Darstellung dieser Bezüge zueinander wird in einem internal Block Diagramm im Anhang unter Abbildung B 1 dargestellt.

4.1.1 Energieversorgung

Gemäß den Anforderungen soll die Energieversorgung über einen Standardnetzanschluss erfolgen. So kann eine schnellere Einsatzbereitschaft und eine unkomplizierte Inbetriebnahme des Demonstrators während der Vorlesung gewährleistet werden. Um das Argument für einen Standardnetzanschluss zu verdeutlichen, wird ein Vergleich mit der Nutzung eines Akkus herangezogen.

In den meisten Vorlesungsräumen sind standardisierte Steckdosen mit einer Wechselspannung von 230 V vorhanden, was nahelegt, die erforderliche elektrische Energie für den Demonstrator daraus zu beziehen. Außerdem wird hierdurch das Mitführen einer weiteren Energiequelle, etwa eines Akkus, nicht notwendig. Zudem ist eine elektrische Energieversorgung über die Steckdose zuverlässiger und konstanter. Dadurch werden Leistungsschwankungen oder unvorhergesehene Ausfälle weitgehend verhindert. Dem gegenüber steht jedoch eine geringere flexible Anwendung des Demonstrators, wenn dieser auch Außerhalb von Vorlesungsräumen verwendet werden soll.

Obwohl dieser Betrieb einige Risiken birgt, können, wie in den vorangegangenen Kapiteln herausgearbeitet, unter Einhaltung gewisser Richtlinien und Bestimmungen diese minimiert werden. So lässt sich durch eine fachgerechte Installation und Isolierung sowie dem Integrieren von Schutzmechanismen wie etwa einem Not-Aus-Schalter eine solche Anwendung realisieren. Würde der Demonstrator hingegen mit einem Akku betrieben werden, wäre eine unsachgemäße Lagerung ebenfalls ein Risiko. Ein leerer Akku, der nicht aufgeladen wurde, könnte ebenfalls dazu führen, dass der Demonstrator nicht betrieben werden kann.

In Bezug auf eine vereinfachte Handhabung ist bei der Überwachung und Wartung eines Akkus sowie beim regelmäßigen Laden und Überprüfen der Kapazität ein erhöhter Aufwand und eine zusätzliche Vorbereitungszeit zu berücksichtigen. Die Kapazität des Akkus nimmt mit zunehmender Nutzungshäufigkeit ab. Dies bedeutet, dass nach einer Vielzahl von Anwendungen nicht mehr gewährleistet ist, dass eine erneute Aufladung des Akkus für die vollständige Präsentation ausreicht. Ebenso führt die Verwendung einer Steckdose zu einer kostengünstigeren Variante, da keine Ersatzakkus oder Ladegeräte angeschafft werden müssen.

Zusammenfassend lassen sich wichtige Vor- und Nachteile für den Betrieb von 230V AC in Tabelle 3 gegenüberstellen:

Tabelle 3: Vor- & Nachteile für den Betrieb mit 230V AC gegenüber eines Akkus

Vor- & Nachteile für Betrieb mit 230V AC gegenüber eines Akkus	
+	-
<ul style="list-style-type: none"> - standardisierte Stromquelle und hohe Verfügbarkeit - kein Mitführen von externen Energiequellen - kein Risiko durch unsachgemäße Lagerung der Energiequelle <ul style="list-style-type: none"> - unendlicher Energiefluss - keine bzw. kaum Überwachung und Wartung <ul style="list-style-type: none"> - zuverlässigere, konstante & dauerhafte Energieversorgung - kostengünstiger in Anschaffung 	<ul style="list-style-type: none"> - Risiko für ernstzunehmende Stromschläge, da keine Niederspannung (fachgerechte Installation beachten) - geringe Flexibilität was Standort einschränkt

Für den Demonstrator ist eine reine Anwendung in den Räumen der Hochschule vorgesehen, woraufhin ein Augenmerk auf die Flexibilität vernachlässigt werden kann. In Bezug auf die Sicherheit muss der Demonstrator für eine ordnungsgemäße Anwendung in der Vorlesung durch eine Elektrofachkraft auf Sicherheitsaspekte geprüft werden. Somit wird sich für die Realisierung auf einen Standardnetzanschluss hin festgelegt. Die interne Weiterleitung und das

Verteilen verschiedener Spannungsniveaus, wird durch die Anwendung von Spannungsnetzteilen und Spannungskonvertern vorgenommen.

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, die Spannung von 230 V AC auf eine geeignete Kleinspannung im Bereich der Gleichspannung durch ein Netzteil zu reduzieren. Der Stromkreis sollte durch eine Sicherung geschützt werden, um Überströme und damit eine Beschädigung der Komponenten zu verhindern. Um die Bedienfreundlichkeit zu steigern, könnte, wie bereits in den Anforderung 2.3 erwähnt, ein separater Netzschalter verwendet werden, um das System und damit den Demonstrator ein- oder auszuschalten. Damit soll gewährleistet werden, dass das Netzteil ohne angeschlossene Last hochfahren und eine stabile Ausgangsspannung liefern kann, bevor die Last zugeschaltet wird. Auf diese Weise werden Spannungsspitzen und hohe Einschaltströme vermieden, die beim Einstecken des Netzsteckers oder beim Einschalten der Last die Komponenten belasten oder schädigen könnten.

Zudem ist zu berücksichtigen, dass beim Abschalten einer elektromagnetischen Bremse, wie sie hier verwendet wird, aufgrund ihrer Bauart Spannungsspitzen auftreten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Magnetfeld schlagartig zusammenbricht, wenn die Spule stromlos geschaltet wird. Umliegende Geräte können durch diese Spitzen gestört oder beschädigt werden. Zur Vermeidung dieses Risikos wird eine Freilaufdiode parallel zur Bremse geschaltet. Auf diese Weise lassen sich Spannungsspitzen ableiten und der Strom kann in der Spule langsam abnehmen.

4.1.2 Antriebseinheit

Die Realisierung der Bewegung des Demonstrators erfolgt durch den Einsatz eines Schrittmotors als Antriebseinheit. Dies ist eine festgesetzte Voraussetzung des Projekts und erlaubt somit keine alternative Antriebseinheit. Die Ansteuerung eines Schrittmotors erfolgt über einen Schrittmotortreiber. Die spezifische Auswahl des Treibers wird im folgenden Kapitel 5.2.2 getroffen und begründet.

4.1.3 Mechanische Verbindung

Die Übertragung von Drehmomenten auf die Wellen und Zahnräder des Demonstrators erfolgt über eine mechanische Verbindung. Diese setzt sich zusammen aus einem Planetengetriebe und einer Kupplung. Zusätzlich ist eine elektromagnetische Bremse zwischen Schrittmotor und dem Getriebe verbaut.

Wie eingangs dieser Arbeit in Kapitel 1.2 erwähnt, wird das Planetengetriebe sowie die elektromagnetische Bremse zusammen mit der Antriebseinheit von Frau Usbeck hinsichtlich einer

geeigneten Verwendung vorgeschlagen. Während der Bearbeitung dieser Aufgabenstellung stellte sich die Verwendung einer Bremse sowie die Integration des Planetengetriebes als sinnvoll heraus.

Ein wichtiger Sicherheitsaspekt des Demonstrators kann folglich mithilfe der Bremse sichergestellt werden. So kann durch eine Integrierung in den Antrieb und eine gezielte Ansteuerung der Bremse in kritischen Situationen die Anlage abrupt zum Stillstand gebracht werden, um eine Gefährdung zu minimieren.

Durch Verwendung des Planetengetriebes kann, durch die festeingepögte Untersetzung dessen, das verfügbare Drehmoment gesteigert werden. Dies ist hinsichtlich des in der Anlage integrierten Nussknackers von Vorteil. Resultierend daraus verringert sich die Drehzahl, was die Veranschaulichung der Bewegungsabläufe steigert.

Im Weiteren eröffnet die Kombination und Verwendung beider Elemente eine fachliche Auseinandersetzung sowie eine thematische Einbindung in die Vorlesungseinheit.

Die ursprüngliche Flanschkupplung (dargestellt in Abbildung 2) ist im Zuge dieser Konzeption auszutauschen, da sie auf den zuvor verbauten Drehstrommotor dimensioniert war. Darüber hinaus bietet sie keine Möglichkeit, geringe Versätze zwischen den Wellen auszugleichen, was einer präzisen Ausrichtung bedarf. Für die Anwendung in dem Demonstrator bietet sich somit die Verwendung einer Kupplung an, welche in der Lage ist, einen geringen axialen Versatz auszugleichen und kleinere Stöße, bedingt durch die Verwendung des Nussknackers, zu dämpfen. Zudem sollte sie für Wartungsarbeiten einfach und schnell zu montieren sein.

4.1.4 Software

Die Programmierung, des zur Verfügung gestellten „Controllino MAXI“ erfolgt, wie in Kapitel 1.2 beschrieben über die Programmiersprache C++ in der Umgebung der Arduino IDE. Die Hauptaufgabe der Software besteht darin, das Motorsteuergerät und somit den Motor anzusteuern. Dies ermöglicht es, die Drehzahl anzupassen und den Motor auf Wunsch zu stoppen.

Im Laufe dieser Ausarbeitung hat sich jedoch die Softwarearchitektur durch das Zusammenspiel von unabdingbaren und optionalen Anforderungen schrittweise erweitert. So wird sich im Verlauf der Softwareplanung für eine stufenlose Drehzahleinstellung, beispielsweise durch ein Potentiometer, entschieden, da diese aus programmierertechnischer Sicht leichter zu realisieren ist.

Aus der optionalen Anforderung 1.8 geht hervor, dass der Demonstrator sich im Leerlauf von Hand drehen lassen soll. Dies kann relevant sein, um bei Wartungsarbeiten oder Fehlersuchen mechanische Probleme direkt zu erkennen. Auch können bestimmte Stellungen der

Zahnräder, des Nussknackers oder der Zugfeder gezielt eingestellt werden. Dazu ist ein Programmmodus erforderlich, der die elektromagnetische Bremse löst und den Motor deaktiviert. Dies ist aus der technischen Betrachtung notwendig, da auch im Stillstand Strom durch die Statorwicklungen des Motors fließt, um das Haltemoment und somit die Arretierung des Rotors aufrechtzuerhalten.

Eine ergänzende Implementierung der zuvor beschriebenen Anwendung lässt sich auf eine Wartung unter Ansteuerung des Motors übertragen, bei welcher der Demonstrator gezielt bewegt und bestimmte Positionen oder Betriebszustände überprüft werden können. So ist eine Diagnose von Problemen, wie dem Bestimmen von Laufgeräuschen oder Vibrationen, im Betrieb möglich. Um bei Wartungsarbeiten eine mögliche Zeitersparnis zu erlangen, könnte das Ausführen des Modus ohne Schutzeinrichtung erfolgen. Somit muss dieser bei Wartungsarbeiten nicht ständig entfernt und wieder installiert werden. Inspiriert durch die Kollaborationsprinzipien aus der Robotertechnik, könnte der Demonstrator in diesem Modus mit einer fest definierten und verringerten Geschwindigkeit betrieben werden. Ähnlich wie bei kollaborativen Robotern, bei denen Schutzmechanismen wie Lichtschranken deaktiviert werden, ermöglicht dies einen sicheren Betrieb bei unmittelbarem Kontakt zwischen Mensch und System. Zudem wird sichergestellt, dass der Modus nur bewusst durch den Benutzer ausgewählt wird. Hierdurch ist ein unbeabsichtigtes Aktivieren und damit das unbewusste Eingehen einer Gefahr ausgeschlossen. Dementsprechend ist hier eine Abfrage der Sicherheitseinrichtungen nicht erforderlich.

Basierend auf den vorangegangenen Überlegungen und deren Entwicklung sollte auch die Präsentation des Demonstrators in einen eigenen Betriebsmodus integriert werden. In diesem Modus könnte der Demonstrator in Verbindung mit einer Abfrage der Sicherheitseinrichtungen mit variablen Drehzahlen betrieben werden. Sollte während eines aktiven Motorlaufs eine Schutzeinrichtung aufgehoben oder unterbrochen werden, dann soll der Demonstrator durch Ansteuerung der elektromagnetischen Bremse abrupt stoppen. Wird die Schutzeinheit bereits beim Betreten des Programms entfernt oder ist nicht geschlossen bzw. aktiviert, so könnte der Demonstrator durch Auslösen der Bremse in eine Bewegungssperre übergehen. Erst nach korrekter Installation der Schutzeinrichtung durch den Benutzer werden die Bremsen gelöst und der Demonstrator ist bereit, um in Bewegung versetzt zu werden.

Weiterhin könnte, um die Benutzerfreundlichkeit des Demonstrators zu erhöhen, verhindert werden, dass dieser direkt nach der Auswahl eines motorbetriebenen Programmmodus automatisch anläuft. Demzufolge könnte beim Eintreten in das jeweilige Programm ein Potentiometer, über das die Drehzahl eingestellt wird, auf seine Nullstellung hin überprüft werden.

Im Falle des zuvor beschriebenen Ereignisses und beim Auslösen einer Sicherheitseinrichtung könnte zur besseren Interaktion mit dem Benutzer eine Fehlermeldung angezeigt werden. Dadurch wird der Systemstatus kommuniziert, was die Benutzerfreundlichkeit weiter erhöht.

Dementsprechend ist das Implementieren von drei Programmmodi sinnvoll, in welchen die zuvor beschriebenen Abläufe umgesetzt werden. Die drei Modi könnten zur Auseinanderhaltung folgende Benennungen aufweisen:

- Programm 1: Präsentationsmodus
 - Vorlesungsmodus – Für die Vorlesung vorgesehen
- Programm 2: Wartungsmodus
 - Für Wartungsarbeiten bei langsamer Motorbewegung
- Programm 3: Leerlaufmodus
 - Für Wartungsarbeiten und dem Bewegen des Demonstrators von Hand

Um die in Kapitel 4.1.1 erwähnte Problematik der hohen Einschaltströme und des Schaltens unter Last softwareseitig zu ergänzen, ist die Unterteilung des Systems in Programme ebenfalls sinnvoll. So könnte das Starten des Motors eine bewusste Aktion des Benutzers an der Drehzahleinstellung erfordern. Diese Maßnahme verhindert, dass beim versehentlichen Umliegen des Netzschalters und maximal eingestellter Drehzahl sofort eine Last am Netzteil anliegt, wodurch hohe Einschaltströme oder Spannungsspitzen vermieden werden.

Gemäß der Anforderung 1.5 kann das Messen und Ausgeben der aktuellen Drehzahl ebenfalls softwareseitig realisiert werden. Dadurch erhält der Benutzer eine Rückmeldung über die eingestellte Drehzahl. Zudem kann diese im Lehrbetrieb rechnerisch genutzt werden, beispielsweise in Kombination mit dem Getriebe und dessen Übersetzungsverhältnis.

Ein Flussdiagramm, welches einen Überblick über die wesentlichen Inhalte und Abläufe vermittelt ist nachfolgend in Abbildung 11 dargestellt.

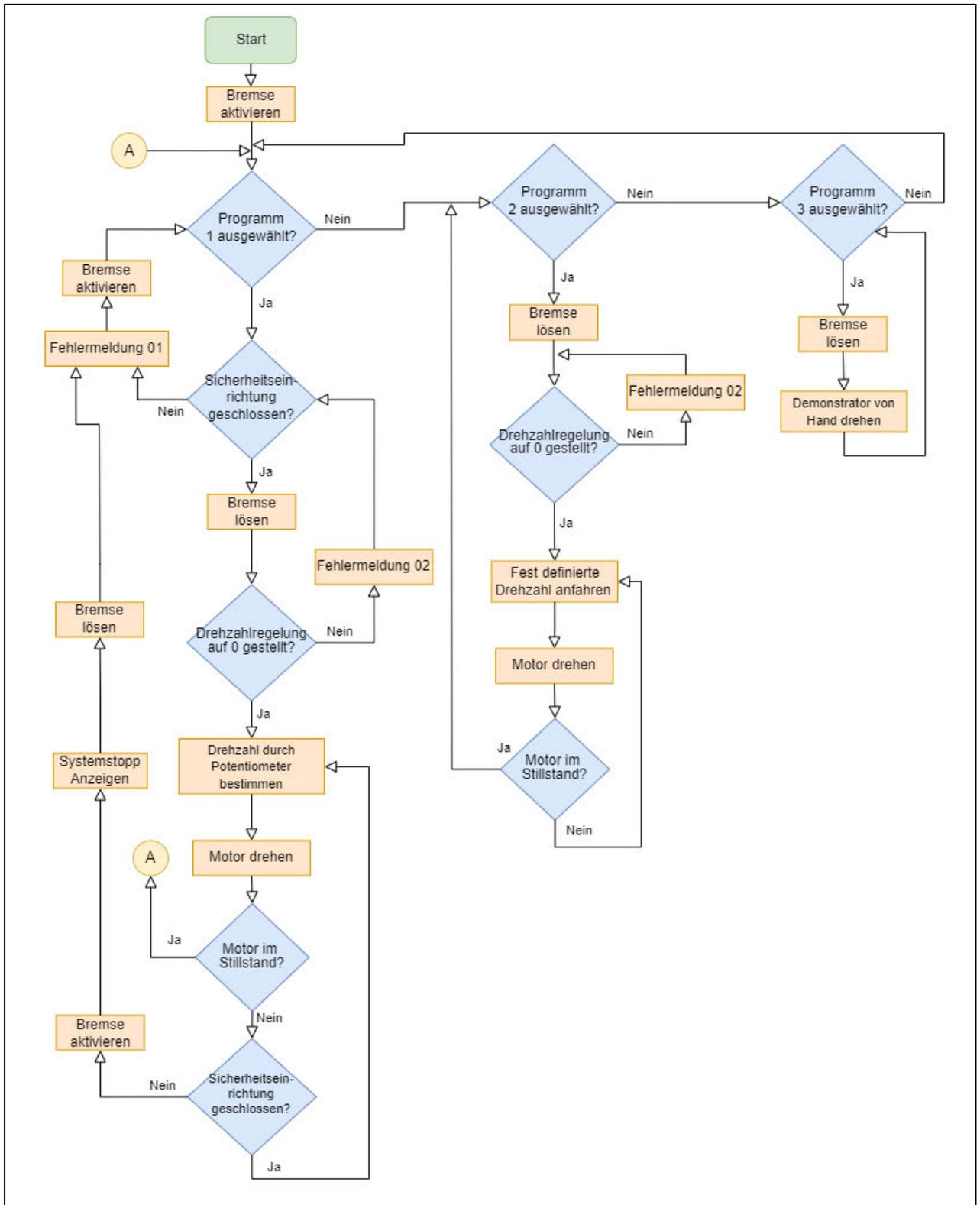


Abbildung 11: Flussdiagramm der Systemarchitektur des Getriebedemonstrators

4.1.5 UI-Benutzerschnittstelle

Eine wichtige Komponente des Getriebedemonstrators bildet die Schnittstelle zwischen dem Benutzer und dem Demonstrator selbst. Hierüber empfängt der Demonstrator Benutzereingaben und kann entsprechend gesteuert werden. Um eine schnelle Einsatzbereitschaft, gekoppelt mit einer einfachen Bedienbarkeit und der Minimierung von Peripheriegeräten, zu gewährleisten könnte eine Art Bedienpult für diese Anwendung in Betracht gezogen werden. Dieses muss ausreichend Platz für die notwendigen Komponenten bieten und einen klaren und übersichtlichen Aufbau haben. So könnten auch Personen ohne Einführung in das System den Demonstrator auf Antrieb bedienen.

Für ein Nachvollziehen der ersten Überlegungen zum Aufbau der Bedieneinheit in der Konzeptionsphase, wird eine Skizze (Abbildung 12) angefertigt. Sie enthält neben der skizzierten Bedieneinheit und deren Aufbau, Anforderungen und Ergänzungen, die mit dieser Bedieneinheit in Verbindung stehen.

Für eine direkte visuelle Unterscheidung zwischen Fehlermeldung und Normalbetrieb könnten zwei LEDs in den Farben rot und grün eine sofortige Unterscheidung der Betriebszustände ermöglichen.

Damit eine stufenlose Einstellung der Drehzahl ermöglicht werden kann wird, wie eingangs im Kapitel 4.1.4 kurz bereits erwähnt, die Verwendung eines Drehpotentiometers in Betracht gezogen. Dieser bietet eine gute Möglichkeit, die Drehzahl zu regeln, da diese so ohne vordefinierte Schritte stufenlos eingestellt werden kann. Auch ist ein Potentiometer in seiner Bedienung intuitiv und benötigt wenig Platz.

Ein Stufen-Drehschalter könnte zur Auswahl der verschiedenen Programme verwendet werden. Dieser ist, wie auch der Potentiometer, intuitiv zu bedienen und benötigt wenig Platz. Die Drehschalterstellungen werden durch die vordefinierten Arretierungen vorgegeben, was zu einer sicheren Programmauswahl führt.

Um Fehlerzustände oder den aktuell gewählten Modus visuell dem Bediener anzuzeigen, wird der Einsatz eines Displays in Betracht gezogen. Dieses stellt eine intuitive und effiziente Möglichkeit dar, den Bediener über den Systemstatus zu informieren. Hierüber wäre, wie in der Skizze in Abbildung 12 notiert, auch die Drehzahlausgabe möglich.

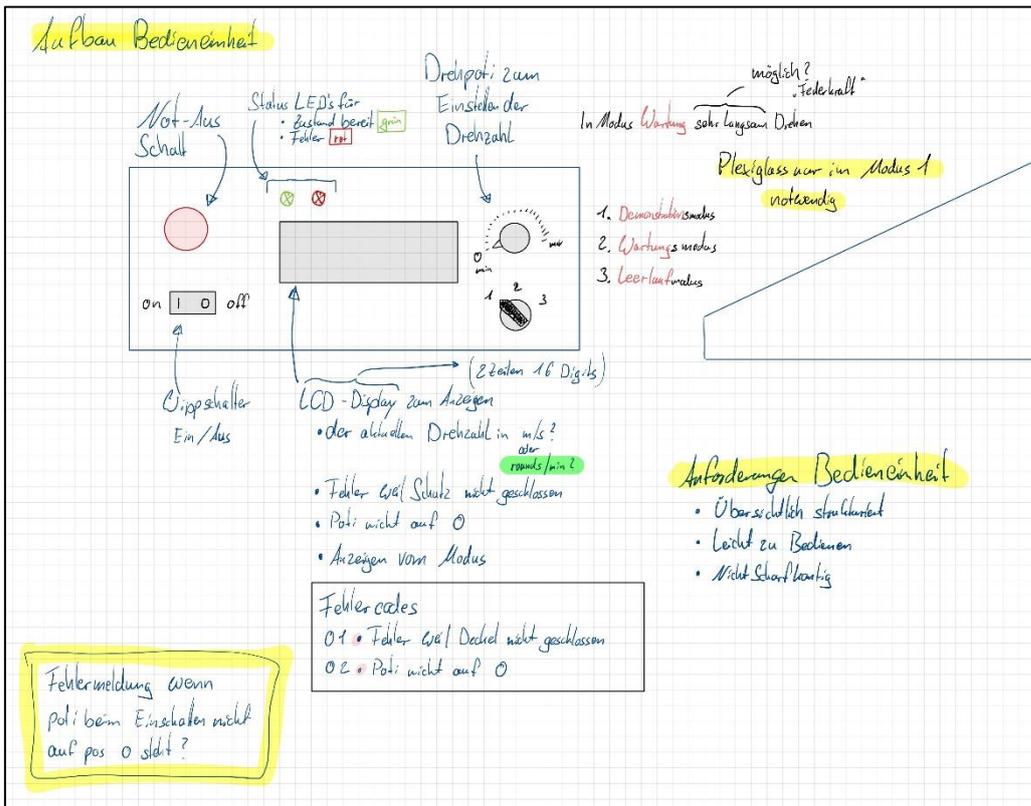


Abbildung 12: Skizze Bedieneinheit

4.2 Sicherheitskonzept

Das Sicherheitskonzept ist sowohl als Teilkomponente des Demonstrators als auch als fest vorgegebene Anforderung aus der Aufgabenstellung heraus zu betrachten. Es wird demnach zunächst in einer thematischen Ausarbeitung behandelt, bevor im weiteren Verlauf der Fokus auf das Sicherheitskonzept als Teilkomponente in der Konzeptphase gerichtet wird. Der Entwicklungsprozess zu verschiedenen Lösungsansätzen im Sicherheitskonzept sowie die thematische Vorstellung des Sicherheitskonzepts als Teilkomponente des Demonstrators sind eng miteinander verbunden und somit Teil des vierten Kapitels. Nachfolgend wird sich demnach mit der Entwicklung und Vorstellung des Sicherheitskonzeptes beschäftigt, ehe diese im folgenden Kapitel genauer spezifiziert wird.

4.2.1 Vorstellung von Sicherheitskonzepten

Um sicherzustellen, dass mechanische Systeme zuverlässig funktionieren und das Risiko von Unfällen oder anderen Gefahren verringert wird, beschäftigt sich das Sicherheitskonzept mit der Entwicklung technischer Maßnahmen und Methoden.

So ist auch der Getriebedemonstrator ein mechanisches System, bei dem sich durch seine Komponenten Risiken und Gefahren für die Gesundheit des Bedieners ergeben können. Ausgehend von der Risikobeurteilung, welche anhand des Ausgangszustandes des Demonstrator zu Beginn in Kapitel 2.4.1 erstellt wurde, lassen sich prägnante Gefahrenpotenziale definieren, die durch den Betrieb des Demonstrators entstehen.

Dementsprechend sind rotierende Komponenten als besonders risikoreich einzustufen, da von ihnen Gegenstände oder Körperteile eingezogen und somit ernstzunehmende Verletzungen verursacht werden können. Zu den rotierenden Komponenten zählen:

- das offen gelegte Zahnradgetriebe,
- die sich rotierenden Wellen und
- der Bereich des Riemengetriebes.

Der Bereich der Nussknacker-Scheibe stellt ebenfalls ein Verletzungsrisiko dar. Zwar ist die Eintrittswahrscheinlichkeit eines gefährdenden Ereignisses im Bereich dieser als gering einzustufen, wodurch das Risiko im Vergleich zu den zuvor genannten Komponenten niedriger erscheint. Dennoch sollte ein Schutz dieser Komponente in Betracht gezogen werden, um auch in seltenen Fällen potentielle Verletzungen zu verhindern. Die Gefährdung wird durch ein im Anhang, unter Abbildung B 2, befindliches Foto veranschaulicht.

Bei der Betrachtung des Nussknackers selbst, geht von diesem kein direktes Gesundheitsrisiko hervor. Mechanisch ist der Nussknacker so konzipiert worden, dass ein Einklemmen der Finger am Endpunkt des Nussknacker-Schiebers nicht möglich ist. Folgende Abbildung 13 dient zur Verdeutlichung.



Abbildung 13: Kein Gesundheitsrisiko durch Nussknacker

Bei der späteren Inbetriebnahme des Demonstrators ist eine weitere potentielle Gefahr zu berücksichtigen, nämlich die der elektrischen Risiken. Diese resultieren aus dem Anschließen des Demonstrators an die Spannungsquelle, welche hier durch eine standardisierte Steckdose mit 230 V Wechselspannung definiert ist. Ausgehend von der Betrachtung aus Kapitel 2.4.3, stellen jedoch nur Wechselspannungen bis 50 V für einen gesunden, erwachsenen Menschen kein lebensgefährdendes Risiko dar. Ein geeigneter Schutz vor der Eingangsspannung von 230 V ist demnach unerlässlich.

Um das Risiko eines elektrischen Schlags durch die Eingangsspannung zu minimieren, könnte das Netzteil in einem, der Industrie entsprechenden standardisierten Schaltschrank untergebracht werden. Dieser Schrank sollte so gesichert sein, dass das Öffnen durch unbefugte Personen verhindert wird und gleichzeitig ein Schutz vor unbeabsichtigtem Berühren der spannungsführenden Leitungen bestehen.

Zum Schutz vor den rotierenden Komponenten kommen drei Lösungsansätze in Betracht. Hierbei handelt es sich um zwei Ansätze, welche durch die Verwendung von Lichtschranken oder der Verwendung von Ultraschallsensoren realisiert werden können. Der dritte Ansatz verfolgt eine Verwendung, welche keiner weiteren Stromquelle oder dem Schreiben eines aufwendigen Programmcodes bedarf.

Der erste Ansatz orientiert sich an dem Time-of-Flight Prinzip, kurz ToF. Hierbei werden Signale in Form von beispielsweise Ultraschall, ausgesendet und bei der Rückkehr analysiert. Dabei wird ermittelt, wie viel Zeit das Signal für die Rückkehr benötigt hat. Somit könnten an allen Ecken des Demonstrators Ultraschallsensoren aufgestellt werden, welche den Bereich über und um den Demonstrator herum überwachen. In der Software könnte eine fest definierte Distanz hinterlegt werden, woraufhin das System bei Unterschreitung dieser sofort stoppt. Eine skizzenhafte Darstellung von diesem Ansatz, wird in Abbildung 14 dargestellt.

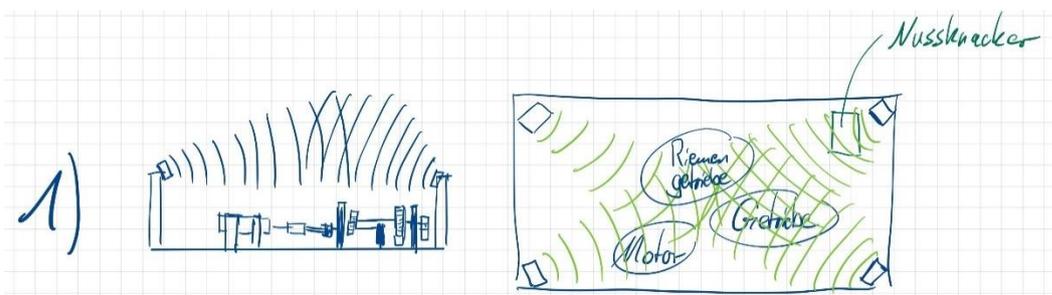


Abbildung 14: Skizzierter Lösungsansatz mittels Ultraschallsensoren

Wie auch der erste Ansatz, beruht der zweite auf dem Time-of-Flight Prinzip. Dieser Ansatz stammt aus der Robotik und basiert im Wesentlichen auf der dortigen Anwendung von Sicherheitslichtvorhängen. Bei Sicherheitslichtvorhängen handelt es sich um eine Vielzahl an übereinander angeordneten Lichtschranken. Der Einsatz dieser Lichtvorhänge erfolgt meist in Bereichen, in denen potentielle Gefahren für Personen durch die Nähe zu beweglichen Maschinen besteht. Das Prinzip eines solchen Vorhangs wird in Abbildung 15 unter Darstellung zwei verschiedener Auflösungen verdeutlicht. Hierbei könnte um den Demonstrator ein solcher Vorhang aus Sendern und Empfängern einer Infrarotlichtschranke aufgebaut werden. Beim Unterbrechen einer solchen Lichtschranke durch Hineingreifen, würde der Demonstrator abrupt zum Stehen kommen, woraufhin eine Fehlermeldung angezeigt werden könnte, welche erst durch den Benutzer wieder quittiert werden muss. Zur Reduzierung der Anzahl an Lichtschranken, könnte mit Spiegeln gearbeitet werden, welche jeweils an den Ecken des Demonstrators platziert werden. Der Empfänger würde so um 90° versetzt zum Sender liegen und die ausgesendeten Lichtstrahlen detektieren. Alternativ kann auch mit jeweils einer Lichtschranke an jeder Ecke dasselbe Wirkprinzip erreicht werden. Um den Bereich über dem Demonstrator zu überwachen, könnte hier ebenfalls ein Sicherheitslichtvorhang horizontal installiert werden. Eine skizzenhafte Darstellung dieser beiden Ansätze ist der Reihenfolge nach in Abbildung 16 unter 2. und 2.1 dargestellt.

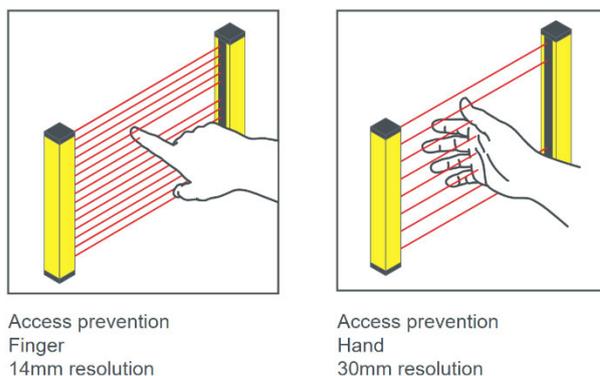


Abbildung 15: Prinzipdarstellung eines Sicherheitslichtvorhang [27]

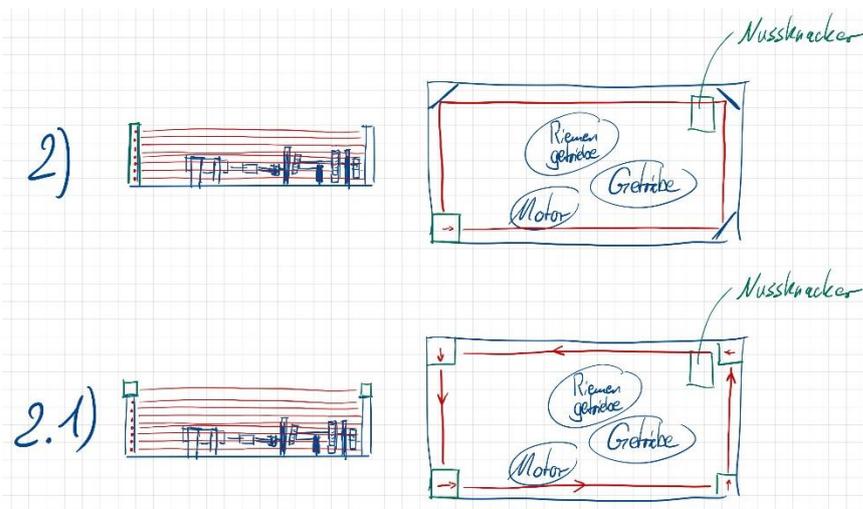


Abbildung 16: Skizzierte Lösungsansätze mittels Sicherheitslichtvorhang

Als dritter Lösungsansatz kommt die Verwendung von transparentem Acrylglas in Betracht. Dieses wird in der Industrie in vielen Bereichen als gängige Abdeckung für Maschinen zum Schutz verwendet. Dementsprechend könnte eine Acrylglashaube über dem Demonstrator und damit über den Komponenten, welche als besonders risikobehaftet bewertet werden installiert werden. Dazu könnte an den entsprechenden Stellen Ausschnitte im Acrylglas für ein Anpassen an die Architektur der Komponenten sorgen. Des Weiteren könnte ein Ausschnitt beim Nussknacker für die Verwendung dessen in Betracht gezogen werden. Um zu gewährleisten, dass der Demonstrator auf ein plötzliches Entfernen der Sicherheitsvorrichtung im Betrieb reagieren kann, wird durch einen Mikroschalter das Vorhandensein der Acrylglashaube detektiert. Infolgedessen würde die Anlage abrupt zum Stillstand kommen, um potentielle Gefährdungen, die ausgehend durch die Rotation der entsprechenden Komponenten entstehen, zu beseitigen. Der Mikroschalter könnte in einem Aufnehmer integriert werden, welcher die Haube auf dem Tischwagen in seiner Position fixiert. Eine skizzenhafte Darstellung vom Lösungsansatzes ist in Abbildung 17 dargestellt.

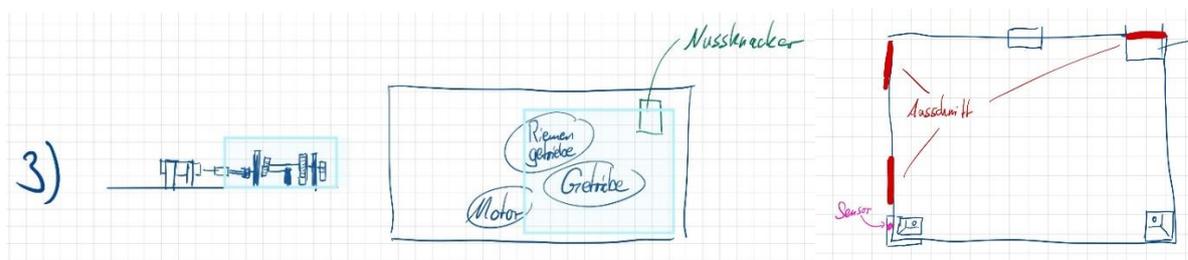


Abbildung 17: Skizzierter Lösungsansatz mittels Acrylglashaube

4.2.2 Auswahl und Gestaltung des Sicherheitskonzepts

Bei der Betrachtung des Gefährdungspotentials durch einen elektrischen Schlag stellt die Verwendung eines Schaltschranks einen sinnvollen Ansatz der Risikovermeidung dar. Dadurch kann das Risiko eines Berührens der spannungsführenden Komponenten durch Umhausung des 230 V Netzteils beseitigt werden. Um ein unbefugtes Öffnen im unter Spannung stehenden Zustand, zu verhindern, ist der Schaltschrank mit einem Dreikantschloss ausgestattet, welches nur mit dem passenden Schlüssel geöffnet werden kann.

Zur besseren und unmissverständlichen visuellen Wahrnehmung, dass sich beim Öffnen des Schaltschranks Komponenten unter elektrischer Spannung befinden können, wird ein Warnhinweis (Symbol W012 der DIN EN ISO 7010) an der Schaltschranktür angebracht.

Wie bereits im Kapitel 2.4.3 herausgearbeitet, ist ein Not-Aus-Schalter an dem Demonstrator zu verbauen. Obwohl dieser nicht unmittelbar zur Ausarbeitung des Sicherheitskonzepts gehört, wird er der Vollständigkeit halber in diesem Kapitel als relevantes Bauteil erwähnt, das zu einem sicheren Umgang mit dem Demonstrator beiträgt. Der Not-Aus-Schalter wird für eine schnelle Zugänglichkeit an der Schaltschranktür montiert. Von einer ursprünglich geplanten Montage in der Bedieneinheit, wie in der Abbildung 12 im Kapitel 4.1.5 angedacht, wird aufgrund der Gefahr von der 230V Leitung, abgesehen.

Die Gefahrenpotentiale, die von den rotierenden Komponenten ausgehen, sollen minimiert oder idealerweise vollständig beseitigt werden. Hierfür werden die drei zuvor erarbeiteten Lösungsansätze in Tabelle 4 dargestellt und es wird auf deren Stärken und Schwächen hingewiesen. Abschließend wird ein Lösungsansatz ausgewählt, der bei der Realisierung der Aufgabenstellung umgesetzt wird.

Tabelle 4: Gegenüberstellung der Lösungsansätze

1. Ansatz durch Ultraschallsensoren	
+	-
<ul style="list-style-type: none"> - berührungslose Überwachung - einstellbarer Überwachungsbereich - schnelle Reaktion 	<ul style="list-style-type: none"> - empfindlich gegenüber Störungen - Erfassungsprobleme bei gewissen Materialien - keine physische Barriere - Totzonen
2. Ansatz durch Sicherheitslichtvorhang	
+	-
<ul style="list-style-type: none"> - schnelle Reaktion - flexible Überwachungsbereiche - sensible Erkennung 	<ul style="list-style-type: none"> - hohe Kosten - präzise Ausrichtung - anfällig gegenüber Schmutz - keine physische Barriere
3. Ansatz durch Acrylglasshaube	
+	-
<ul style="list-style-type: none"> - physischer Schutz - vereinfachte und zuverlässige Funktionsweise - kostengünstig - Sichtbarkeit bei garantiertem Schutz - langlebig 	<ul style="list-style-type: none"> - empfindliche gegenüber Kratzern - manuelle Handhabung - erhöhter Platzbedarf - begrenzte Schlagfestigkeit

Die Verwendung des Lösungsansatzes durch Ultraschallsensoren ermöglicht eine berührungslose Überwachung, wodurch der Betrieb des Demonstrators nicht durch Integration von Sensorik beeinträchtigt wird. Weiterhin bietet diese Möglichkeit durch Einstellung der Schwellendistanz einen flexibel einstellbaren Überwachungsbereich und eine schnelle Reaktion durch softwareseitige Integration in die Motorsteuerung. Jedoch fällt auf, dass es technisch bedingt in unmittelbarer Nähe zu sogenannten „Totzonen“ kommt. Hier ist keine Erfassung möglich. Dies ist schematisch durch die grünen Schallwellen in der Skizze in Abbildung 14 dargestellt. Auch würde es beim Betreiben von mehreren Sensoren zu Störungen kommen. Die ausgesendeten Signale würden auf gegenüberliegende Sensoren treffen, was zu einer Verzerrung der Signalauswertung führt. Des Weiteren kann es durch schallabsorbierende oder unregelmäßige Oberflächen und Materialien zu einer Beeinträchtigung der Messgenauigkeit kommen. Ein weiterer, nicht zu vernachlässigender Aspekt ist das Fehlen eines physischen Schutzes. Sollte es zu Fehlfunktionen oder Störungen im System kommen, ist ein Auslösen des Maschinenstopps nicht mehr garantiert.

Der erste Ansatz ist demnach im Hinblick auf die zuverlässige Erkennung und Vermeidung von Sicherheitsrisiken nicht konsistent, da zu viele variable Faktoren die Systemzuverlässigkeit beeinträchtigen. Dementsprechend wird dieser Ansatz nicht weiterverfolgt.

Der Einsatz eines Sicherheitslichtvorhangs bietet, ähnlich wie der zuvor erwähnte Ansatz, eine schnelle Reaktionsmöglichkeit. Hierbei lässt sich der zu überwachende Bereich flexibel ohne Änderung des Programmcodes, durch Anpassung der Lichtschranken erweitern oder verkleinern. Im Allgemeinen ist es bei Sicherheitslichtvorhängen möglich, deren Auflösung (Abbildung 15) von Beginn an zu bestimmen. So kann der zu detektierende Bereich sehr sensibel eingestellt werden, sodass bereits kleine Gegenstände die Lichtschranken unterbrechen. Dem gegenüber stehen hohe Anschaffungskosten und der Aufwand für die präzise Ausrichtung dieser Lichtvorhänge. Demzufolge müssen Sender und Empfänger exakt zu einander positioniert werden und dürfen sich während des Betriebs oder des Transports des Demonstrators nicht in Ihrer Ausrichtung verändern. Gleiches gilt bei Verwendung von 45° ausgerichteten Spiegeln an den jeweiligen Eckpunkten. Darüber hinaus können kleine Partikel, welche sich auf den Spiegeln oder dem Empfänger absetzen, das Detektieren beeinträchtigen. Auch in diesem Ansatz ist das Fehlen eines physischen Schutzes nicht zu vernachlässigen. Demnach ist bei einer Fehlfunktion oder Störung im System ein Auslösen des Maschinenstopps nicht mehr garantiert. Es könnte somit ebenfalls nicht verhindert werden, dass Personen absichtlich oder unabsichtlich in den Gefahrenbereich gelangen.

Es ist festzustellen, dass bei diesem Ansatz eine zuverlässige Gewährleistung des Schutzes von Studierenden und dem Betreiber des Demonstrators nicht gewährleistet werden kann. Die präzise geforderte Ausrichtung der Spiegel oder Empfänger beeinträchtigen bei einer Fehlstellung, das Inbetriebnehmen des Demonstrators in der Vorlesung. Ebenfalls erweist sich dieser Ansatz durch die hohen Anschaffungskosten als unwirtschaftlich und wird daher nicht weiter verfolgt.

Der dritte Ansatz beschäftigt sich mit der Anwendung einer transparenten Acrylglashaube. Diese stellt aufgrund ihrer physischen Sicherheitsbarriere einen zuverlässigen Schutz dar. Es kann somit garantiert werden, dass weder Personen noch Gegenstände mit dem Demonstrator in Kontakt kommen. Ebenso ist Acryl robust sowie langlebig und im Vergleich zu dem Sicherheitslichtvorhang kostengünstiger. Da keine aufwendige elektrische Schaltung benötigt wird, führt dies zu einer zuverlässigen Funktionsweise. Dementsprechend kann der Demonstrator während des Betriebs aus nächster Nähe betrachtet werden, da die transparente Acrylglashaube eine uneingeschränkte Sicht auf die Bewegungsabläufe ermöglicht, ohne die Sicherheit der Studierenden oder des Benutzers zu gefährden. Im Gegensatz dazu weist die Acrylglashaube bei Nichtverwendung aufgrund ihrer Abmaße einen erhöhten Platzbedarf auf und ist unhandlich in der Handhabung. Auch ist die Oberfläche empfindlich gegenüber Kratzern, was im Laufe der Zeit zu einer geringeren Ästhetik führen kann und in Abhängigkeit der Kratzer die Sicht auf die Abläufe beeinträchtigt. Acrylglas überzeugt durch seine Robustheit,

kann jedoch bei intensiver mechanischer Beanspruchung Risse bekommen oder zerbrechen, was zu zusätzlichen Sicherheitsrisiken oder Kosten führen könnte.

In Anbetracht der Argumente für eine Acrylglashaube, die einen zuverlässigen Schutz bei uneingeschränkter Sicht auf die Bewegungsabläufe gewährleistet, ist der Einsatz dieser eine sinnvolle Lösung. Sie bietet eine kostengünstige und zugleich sichere Möglichkeit, Studierende und den Bediener des Demonstrators vor Gefahren zu schützen. Demensprechend wird die Umsetzung dieses Lösungsansatzes in dem folgenden Kapitel weiterverfolgt.

5 Entwicklung

Dieser Abschnitt beschreibt den Entwicklungsprozess des Demonstrators. Infolgedessen geht eine erste Verifikation in Form allgemeiner Funktionstests des Schrittmotors voraus, um dessen Funktionalität zu überprüfen. Im Anschluss wird präzise auf die spezifischen Teilkomponenten und die Lösungsansätze zur Zielerreichung eingegangen und deren Auswahl näher erläutert. Eine genaue Auflistung der Bauteile, in Form einer Stückliste, sowie die entsprechenden Datenblätter dieser, sind dem Anhang unter Tabelle C 1 sowie Abbildung C 2 bis Abbildung C 6 angefügt. Unter Anwendung der spezifizierten Teilkomponenten, wird zur besseren Visualisierung ein CAD-Modell erstellt. Abschließend wird nach Ausarbeitung der Lösungsansätze ein weiterer Test in Form einer ersten Integration in den Demonstrator vorgenommen und im Anschluss mit dem Zusammenbau des Demonstrators begonnen.

5.1 Verifizierung des Schrittmotors

Um eine generelle Funktion des Schrittmotors zu gewährleisten, wird sich vorab mit dessen Ansteuerungsprinzip, entsprechend der Theorie aus Kapitel 2.3 beschäftigt. Zum besseren Verständnis und der Übersicht wird sich eine Tabelle der Motordrehzahlen erstellt. In dieser sind, unter Berücksichtigung der Leistungskurve des Motors, die Beziehungen von Schritten pro Sekunde und der Umdrehung pro Minute zueinander dargestellt. Somit kann ein besseres Verständnis zu den eingestellten Drehzahlen und der Programmierung hergestellt werden. Die Tabelle ist im Anhang unter Tabelle C 2 einsehbar.

Die ersten Programme, die eine bestimmte Anzahl von Schritten sowie Programme, die nach einer bestimmten Anzahl von Schritten eine Richtungsumkehr ausführen, werden zum ersten Verständnis erstellt und zu Hause ausgeführt. Diese dienen ebenfalls zur Überprüfung der allgemeinen Funktionsfähigkeit des Motors. Hierbei wird unter anderem die weit verbreitete Bibliothek (AccelStepper.h) verwendet, welche zur präzisen Ansteuerung von Schrittmotoren im Roboter- oder CNC-Maschinenbau dient. Mit ihr kann eine schnelle und einfache Steuerung von Geschwindigkeiten und Beschleunigungen ohne manuelle Berechnung realisiert werden.

5.2 Betrachtung der Teilkomponenten

Nachfolgend werden zwecks der Ausarbeitung von individuellen Lösungsansätzen, die einzelnen Teilkomponenten detailliert betrachtet. So kann eine systematische und strukturierte Herangehensweise gewährleistet werden.

5.2.1 Energieversorgung

In einer Übersichtsrechnung der Stromverbräuche der elektrischen Komponenten wird unter Annahme der Maximalströme ein Gesamtstrombedarf von ungefähr 3 A errechnet. Hierbei wird der maximale Strom von 2,5 A, welchen der Schrittmotor im Bereich seiner Leistungsgrenze bezieht, berücksichtigt. In vorausgegangenen Testläufen kann jedoch eine Stromaufnahme des Motors bis maximal 1 A gemessen werden. Infolgedessen wird sich für ein 150 W Schaltnetzteil von der Firma „Mean Well“ entschieden. Dieses liefert bei einer Spannung von 48 V einen Ausgangsstrom von 3,3 A und ist damit vollkommen ausreichend für das Betreiben des Demonstrators. Damit bei einem Überstromfall die Komponenten geschützt sind, wird eine Flachsicherung von 2 A zwischen dem Netzteilanschluss und dem Ein-/Ausschalter installiert.

Um die 48 V-Spannungen an andere Komponenten anzupassen, werden ein Spannungswandler von 48 V auf 12 V und ein weiterer von 12 V auf 9 V verwendet. So werden der Controllino MAXI, die elektromechanische Bremse und ein induktiver Drehzahlsensor über 12 V betrieben. Die Energieversorgung eines Arduino Nano erfolgt mittels der Spannung von 9 V. Die Verwendung des induktiven Drehzahlsensors und des Arduino Nano ergeben sich aus einer Entscheidung, die im Kapitel 6 näher behandelt wird. Der Controllino MAXI stellt durch seinen, oberhalb des Gerätes befindlichen, PIN-Header 5 V für die I/O (Input/Output) Komponenten zur Verfügung.

Um eine übersichtliche Darstellung der Verkabelung und damit die elektrischen Zusammenhänge der Komponenten untereinander darzustellen, wird ein Stromlaufplan erstellt. Die Entwicklung des Stromlaufplans erfolgt unter Verwendung der Software Fritzing [28]. Der ausgearbeitete Stromlaufplan ist im Anhang unter Abbildung C 7 einzusehen.

5.2.2 Antriebseinheit

Bei der Antriebseinheit handelt es sich um einen Nema 23 Schrittmotor der Firma JAT (Jenaer Antriebstechnik). Die Modellbezeichnung des Motors lautet 23S31-0250. Dieser hat einen Vollschrittwinkel von $1,8^\circ$ und benötigt somit für eine komplette Umdrehung 200 Schritte. Der Motor hat einen Nennstrom von $I_{stall} = 2,5 A$ und eine Nennspannung von $U_{drv} = 60V$. Die kontinuierliche mechanische Dauerleistung, ohne thermisch zu überlasten, liegt bei $P_{cont} = 60W$. Weitere technische Angaben sind dem Datenblatt im Anhang unter Abbildung C 3 zu entnehmen.

Um zu prüfen, ob der ausgewählte Schrittmotor den Demonstrator bewegen und das Nussknacken erfolgreich ausführen kann, muss die Abtriebsleistung (P_{ab}) bestimmt werden.

Gemäß den Berechnungen einer vorangegangenen Abschlussarbeit von Ramie Wahbi (2024) wurde eine Leistung am Nussknacker, unter Angabe einer Drehzahl der Nussknacker-Scheibe von $n = 0,25 \frac{1}{\text{sek}}$, mit einer Leistung von circa $P_{ab} = 47,2 \text{ W}$ ermittelt [1]. Dies ist das Produkt aus dem Torsionsmoment der Abtriebswelle beim Nussknacker ($T_{Nuss} = 30 \text{ Nm}$) und der Drehzahl (n) an der Nussknacker-Scheibe. Die Leistung (P_{ab}) wird, unter Verwendung der Kreiszahl (π) durch den nachstehenden Ausdruck beschrieben:

$$P_{ab} = 2 * \pi * n * T_{Nuss} = 2 * \pi * 0,25 \frac{1}{\text{sek}} * 30 \text{ Nm} = 47,2 \text{ W} \quad (5.1)$$

Der nachstehende Vergleich der mechanischen Dauerleistung des Schrittmotors mit der Abtriebsleistung des Demonstrators an der Nussknacker-Scheibe zeigt, dass der Motor durch seine Leistung in der Lage ist, den Demonstrator mit dem Nussknacker zuverlässig zu bewegen.

$$P_{cont} > P_{ab} \rightarrow 60 \text{ W} > 47,2 \text{ W} \quad (5.2)$$

Die mechanische Leistung des Motors ist dabei etwas höher als die ermittelte Abtriebsleistung des Demonstrators. Dies ist vorteilhaft in Bezug auf Verluste, die durch Lagerreibungen, Dichtungen oder Schmierungen innerhalb des Getriebes entstehen.

Bei der Auswahl, eines für den Schrittmotor geeigneten Motortreibers fiel die Entscheidung auf den Schrittmotortreiber DMT542T V4.0 der Firma Stepperonline. Dieser Treiber hat den Vorteil, dass er 200 Pulse pro Umdrehung liefern kann. Somit ist ein Betreiben des Schrittmotors im Vollschrittbetrieb möglich, um nahezu die volle Leistung für eine präzise Ansteuerung abzurufen. Der Schrittmotortreiber lässt jedoch nur eine maximale Eingangsspannung von 50 V zu, was bei Berücksichtigung der Reserve dennoch als ausreichend angenommen werden kann. Des Weiteren lässt sich per DIP-Schalter, welche sich seitlich am Treiber befinden, auf einen Phasenstrom von 2,36 A begrenzen. Hierbei ermöglichen diese das schnelle Konfigurieren von elektronischen Geräten, ohne das Software-Einstellungen nötig sind.

5.2.3 Mechanische Verbindung

Für die mechanische Verbindung wird ein zur Verfügung gestelltes Planetengetriebe mit einem festgestelltem Hohlrad verwendet. Es ist von der Firma B&R Automation und trägt die Typbezeichnung 8GP30 -040-. Das Getriebe besitzt ein Übersetzungsverhältnis von $i = 5$. Somit ist es mit einer Untersetzung ausgestattet, welche bei einer Reduzierung der Drehzahl zu einer Steigerung des Drehmoments führt. Demensprechend wird das maximale Haltemoment des Schrittmotors von circa 1,75 Nm um den Faktor 5 gesteigert. Dies spiegelt sich vorteilhaft für

die Auswahl des Schrittmotortreibers in Bezug auf die 10 V Spannungsdifferenz wider. Das Getriebe ist eine Sonderanfertigung und wird nicht im Serienkatalog vom Hersteller geführt. Folglich kann auf kein offizielles Datenblatt verwiesen werden. Durch eine Anfrage im Kundenservice können dennoch einige Informationen zusammengetragen werden, welche im Anhang unter Abbildung C 2 eingesehen werden können.

Im Rahmen der Sicherheitsvorkehrungen wird sich dazu entschieden, zwischen dem Schrittmotor und dem Planetengetriebe eine elektromechanische Federkraftbremse zu installieren. Dementsprechend wird eine gesicherte und kontrollierte Stilllegung auch im stromlosen Zustand des Demonstrators ermöglicht. Die elektromagnetische Bremse hat eine maximale Leistung von 14 W bei einer Nennspannung von 24 V und ist eine sogenannte „fail-safe-Bremse“.

Hierbei klemmt eine Feder einen Bremsbelag zwischen dem Schrittmotor und der, sich in der Bremse befindlichen, Reibfläche ein. Die Motorwelle ist mit dem eingeschlossenen Reibbelag, der eine Innenverzahnung besitzt, durch eine, auf der Motorwelle angebrachten, Außenverzahnung verbunden. Durch Anlegen einer elektrischen Spannung wird von einem Elektromagnet ein Magnetfeld aufgebaut, was die Federkraft überwindet und den Bremsbelag löst. Der Aufbau dieser Bremse wird in Abbildung 18 dargestellt.

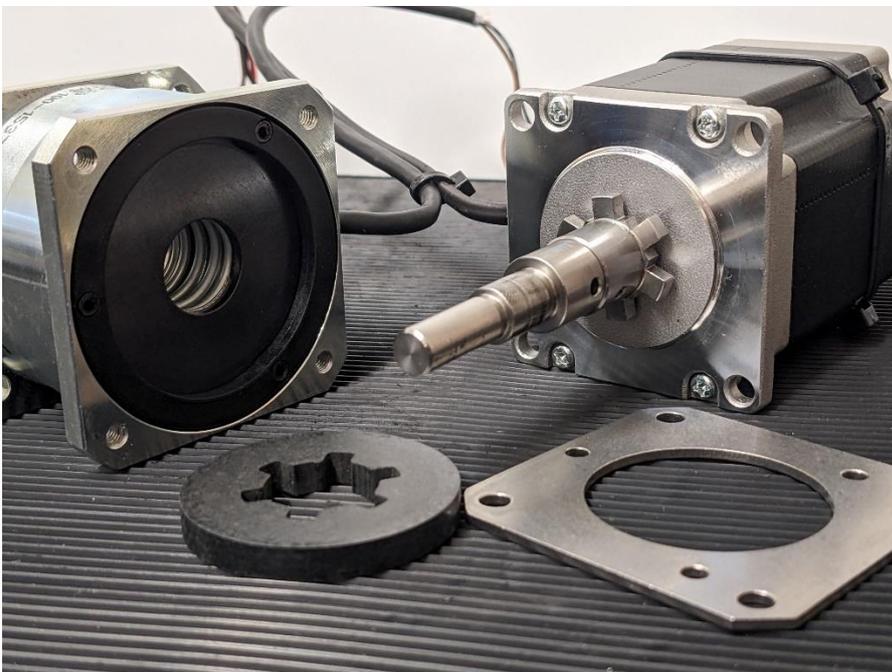


Abbildung 18: Bestandteile der elektromagnetischen Bremse

Während der Entwicklungsphase wird festgestellt, dass das Anlegen einer 12 V Spannung an der Bremse bei einem Stromfluss von circa 0,3 A eine ausreichende Haltekraft erzeugt. Daher resultiert die Entscheidung, diese mit einer Versorgungsspannung von 12 V zu versorgen.

Die Bremse ist von der Firma KEB und wird zu Beginn der Aufgabenstellung von Frau Usbeck zur Verfügung gestellt. Ebenfalls handelt es sich bei dieser Bremse, wie durch den Kundenservice des Herstellers in Erfahrung gebracht wird, um kein Serienprodukt. Folglich kann auch hier kein offizielles Datenblatt zu der Bremse vorgelegt werden. Es wird vom Kundenservice auf den Motorenhersteller „JAT“ verwiesen, welcher nur vereinzelte Informationen zu der Bremse bereitstellen kann. Diese Informationen sind im Anhang unter Abbildung C 1 einzusehen.

Das Planetengetriebe wird, zusammen mit der Bremse und dem Schrittmotor von einem modifizierten Schrittmotorhalter aus Stahl gehalten. Dieser ist zwischen Bremse und Getriebe verbaut und sorgt in Vaterbindung mit eine Acrylglas-Platte und zwei Aluprofilen für eine feste Verbindung der Antriebseinheit zum Tischwagen. Die Modifizierung des Halters umfasst eine Erweiterung der Auflagefläche für die Bremse. Die ursprüngliche Konzeption des Herstellers sieht eine Montage des Halters direkt an einen Schrittmotor vor. Dies kann jedoch nicht umgesetzt werden, da die elektromagnetische Bremse direkt an den Schrittmotor montiert werden muss. Bedingt durch die Breite des Gehäuses der Bremse, ist es erforderlich die Stützstreben zu trennen und nach außen zu verlegen. Die Schweißarbeiten werden hierbei von Herrn Hilbrecht, einem Mitarbeiter des Instituts für Werkstoffkunde und Schweißtechnik der HAW Hamburg, durchgeführt. Die Veränderung des Halterprofils vor und nach der Modifizierung ist in Abbildung 19 dargestellt. Eine vollständige Montage des Halters wird in den nachfolgenden Kapiteln 5.4 und 5.5 als CAD-Model sowie durch Bilder veranschaulicht.

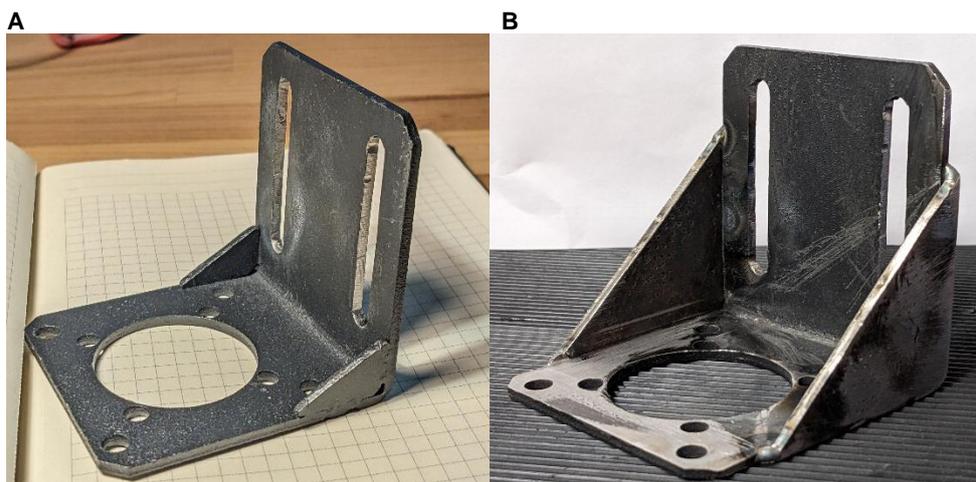


Abbildung 19: Motorhalter (A) vor und (B) nach der Modifizierung

Um die Antriebseinheit mit dem Getriebedemonstrator zu verbinden, wird sich für eine Klauenkupplung entschieden. Durch ihr elastisches Zwischenelemente bietet sie die Möglichkeit, kleinere Winkel- oder Axialversätze zwischen den Wellen auszugleichen. Ebenfalls können bei

einer zuverlässigen Drehmomentübertragung Vibrationen und kleinere Stöße absorbiert werden. Die einfache Bauweise gewährleistet zudem eine unkomplizierte Montage.

Die Kupplung hat beidseitig einen Bohrungsdurchmesser von 25 mm und passt folglich direkt auf die Getriebeeingangswelle des Demonstrators, welche ebenfalls einen Außendurchmesser von 25 mm aufweist. Die Antriebswelle des Planetengetriebes hat jedoch einen Außendurchmesser von 10 mm, wodurch die Verwendung eines Adapterstückes herangezogen wird. Hierbei erfolgt eine Modellierung eines entsprechenden Adapterstücks durch die Software Fusion 360. Im Anschluss wird das Bauteil 3D-gedruckt. Eine technische Zeichnung dessen ist im Anhang unter Abbildung C 19 einzusehen. Durch Anwendung einer entsprechenden Passfeder für die Welle des Planetengetriebes, wird das Adapterstück in die Klauenkupplung getrieben und durch Madenschrauben in der dieser fixiert.

5.2.4 Software

Die Ansteuerungssoftware wird mit einem Controllino MAXI realisiert. Dieser ist ein programmierbarer Logik-Controller (PLC) und ist auf der Arduino-Plattform aufgebaut. Seine Verwendung erfolgt in der Automatisierungstechnik, Gebäudeautomation und industriellen Steuerung. Er basiert, ähnlich wie der Arduino Mega, auf einem ATmega 2560 -Mikrocontroller und besitzt mehrere digitale Ein- und Ausgänge. Darüber hinaus verfügt er über analoge Eingänge sowie Relaisausgänge. Diese können bei Anlegen einer Betriebsspannung von 12 V oder 24 V zum Schalten von Lasten verwendet werden. Weiterhin kann der Controllino MAXI über den USB-A-Port, welcher auf der Oberseite des Gehäuses positioniert ist, ebenfalls für 5 V Anwendungen betrieben und programmiert werden. Darüber hinaus verfügt er über eine I²C Schnittstelle und kann direkt durch die Arduino IDE programmiert werden. Eine Hutschienenmontage für Schaltschrankinstallationen ist ebenfalls möglich. Ein Datenblatt ist dem Anhang unter Abbildung C 4 beigelegt.

Während der Entwicklungsphase wird festgestellt, dass eine Drehzahlmessung nicht über den Controllino parallel zur Motoransteuerung realisiert werden kann. Die Gründe hierfür werden im Anschluss im 6. Kapitel erläutert. Um den Anforderungen an die Drehzahldarstellung gerecht zu werden, wird deshalb ein weiterer Mikrocontroller sowie ein weiteres Display beschafft. Zur Messung der Drehzahl zählt ein induktiver Näherungssensor die Umdrehungen des Eingangszahnrads (Z_1), das über eine Kupplung mit dem Planetenradtrieb verbunden ist. Die gezählten Impulse werden anschließend durch die Anzahl der Zähne des Zahnrads geteilt. Der daraus entstehende Quotient wird für eine Darstellung der Umdrehungen pro Minute, mit 60 multipliziert und in einer Variable abgespeichert. Für eine formatierte Ausgabe wird unter

der Verwendung der Funktion „sprintf“ die Drehzahl in ein „Char Array“ geschrieben und einer Funktion zum Darstellen auf dem Display übergeben. Der vollständige kommentierte Code ist dieser Arbeit im Anhang unter Abbildung C 9 beigefügt.

Die Ausgänge sowie das Relais des Controllino werden durch das Einbinden der „Controllino.h“ Bibliothek angesteuert. Ebenso wird in beiden Mikrocontrollern die „LiquidCrystal_I2C.h“ und die „wire.h“ Bibliothek verwendet, um die Kommunikation mit den Displays mithilfe des I²C Datenbusses zu ermöglichen. Damit sich der Motor im dritten Programm von Hand drehen lässt, wird unter Verwendung der „AccelStepper.h“ Bibliothek das Motorsteuergerät deaktiviert. Dies geschieht durch den Aufruf von „stepper.enableOutputs();“. Hierbei wird an den Enable Pin (ENA) des Motortreibers ein 5 V Signal angelegt und es fließen keine Ströme mehr durch die Wicklungen. Ebenso wird dieser Befehl verwendet, um eine Erwärmung des Motors in der Ruhephase zu reduzieren. Ein Aufruf von „stepper.disableOutputs();“ führt wieder zu einer Aktivierung des Motortreibers.

Die Software des Controllino MAXI umfasst neben der setup- und loop-Funktion im Wesentlichen drei eigenständige Funktionen, in denen die Programme 1-3 implementiert sind. Zusätzlich wird jeweils eine Funktion zur Auswahl des Drehschalters, eine zur Darstellung von Fließtexten [29] auf dem Display und eine zum Stoppen der Anlage implementiert. Die generelle Logik der drei Programmfunktionen entspricht der, des in Abbildung 11 dargestellten, Flussdiagramms aus Kapitel 4.1.4. Der vollständige kommentierte Code ist dieser Arbeit im Anhang unter Abbildung C 8 beigefügt.

Die programmierten Betriebsmodi, welche vom Benutzer ausgewählt werden können, sind somit durch die Softwarearchitektur wie folgt definiert:

1. Programm: Präsentationsmodus

- Hauptbetriebsmodus oder auch Vorlesungsmodus: Dieser Modus ist für den Vorlesungsbetrieb vorgesehen. In ihm können unter Anwendung der Sicherheitsmechanismen verschiedene Drehzahlen (37 bis 105 U/min) angesteuert werden. Ebenso ist das Knacken von Walnüssen möglich. Durch die montierte Acrylglashaube können Bewegungsabläufe aus nächster Nähe und ohne Risiken nachvollzogen und bewertet werden. Das Programm wird durch folgende Anweisung begleitet:

„Demonstrator im Präsentationsmodus!“

„Bitte über Poti die Drehzahl vom Motor bestimmen.“

2. Programm: Prüfmodus

- Der Prüfmodus dient dem Prüfen bestimmter Bewegungsabläufe bei langsamer und unveränderlicher Motorbewegung. Er ist ohne Schutzabdeckung ausführbar und ermöglicht beispielsweise das Schmieren von Komponenten unter Bewegungsabläufen. Auch können so aufkommende Vibrationen oder Laufgeräusche im Betrieb bestimmt werden. Dieser Modus wird in Anlehnung an kollaborativen Robotern mit einer fest definierten Drehzahl (37 U/min) ausgeführt und muss bewusst vom Benutzer ausgewählt werden. Das Programm wird durch folgende Anweisung begleitet:

„Demonstrator im Prüfmodus!“

„niedrige Drehzahl“

3. Programm: Wartungsmodus

- Hinsichtlich der Tatsache, dass Arbeiten an dem Demonstrator durchgeführt werden müssen, welche das Bewegen der Wellen von Hand erfordern, ist der Wartungsmodus vom Bediener auszuwählen. Da hier ein direkter Eingriff der Hände in die Zahnräder des Getriebes vorgenommen wird, ist in diesem Modus der Motortreiber deaktiviert. Der Demonstrator reagiert somit auf keine Eingaben über den Drehpotentiometer. Auch sind infolgedessen die Spulen stromlos und die Bremse wird gelöst. Das Programm wird durch folgende Anweisung begleitet:

„Demonstrator im Wartungsmodus!“

„Er kann nun von Hand bewegt werden...“

Die Fehlermeldungen, welche auf dem Display wiedergegeben werden, sind zur schnellen Identifizierung mit Fehlercodes beschrieben und lassen sich wie folgt definieren:

1. Fehler: Fehlercode 01

- Dieser Fehler wird gesetzt, wenn die Acrylglashaube nicht auf dem Demonstrator in den dafür vorgesehenen Haltern sitzt. Der Fehler wird durch folgende Anweisung begleitet:

„Fehlercode 01“

„Bitte die Schutzhaube installieren!“

2. Fehler: Fehlercode 02

- Dieser Fehler wird gesetzt, wenn der Potentiometer zum Einstellen der Drehzahl bei Programmeintritt nicht auf der Nullstellung steht. Folgende Anweisung erscheint auf dem Display:

„Fehlercode 02“

„Drehzahlpoti bitte zurück auf 0 stellen.“

Die verwendeten LCD-Displays ermöglichen 16 Zeichen auf 2 Zeilen darzustellen. Dies ist jedoch für die Anwendung zu wenig. Damit der Text vollständig auf den LCD-Displays angezeigt werden kann, wird eine Text Scroll-Logik angewendet. Die hier verwendete Bibliothek für die LCD-Displays „LiquidCrystal.h“ bietet dazu die zwei Funktionen „scrollDisplayLeft()“ und „scrollDisplayRight()“ an. Hierbei wird der komplette Inhalt des Displays in die entsprechende Richtung gescrollt. Damit, beispielsweise beim Anzeigen von Fehlerzuständen, die erste Zeile statisch bleibt und nur die zweite Zeile ein- und ausscrollt, werden zwei Funktionen aus dem Internet angewendet, welche diese Logik ermöglichen [29].

5.2.5 UI-Benutzerschnittstelle

Die Benutzereingaben für den Demonstrator erfolgen über ein Bedienpult, welches auf dem Tischwagen neben dem Demonstrator montiert wird. Das Bedienpult enthält zwei LCD-Displays (Abbildung 22 [3]), welche übereinander angeordnet sind. Damit diese bündig mit der Deckplatte abschließen, werden Adapterstücke konstruiert und zwischen die Platinen der Displays und der Deckplatte montiert (Anhang Abbildung C 16). Auf dem oberen Display, welches mit dem Controllino MAXI verbunden ist, werden die Programmauswahl sowie Fehlermeldungen angezeigt. Ein Stufen-Drehschalter (Abbildung 22 [4]) neben diesem Display dient dem Durchschalten der einzelnen Programme. Auf dem darunterliegenden Display, welches mit dem Arduino Nano verbunden ist, wird nur die Drehzahl ausgegeben. Diese kann mit einem Drehpotentiometer (Abbildung 22 [5]) neben dem Display, stufenlos bestimmt werden. Darüber

hinaus wird durch zwei LEDs (Abbildung 22 [2]) visuell der Zustand der Anlage dargestellt, sodass bei einem Fehler die rote LED leuchtet und bei einem fehlerfreien Zustand die grüne. Die Betätigung des Ein-/Ausschalters (Abbildung 22 [1]), welcher sich oberhalb auf der rechten Seite des Bedienpults befindet, ermöglicht ein unkompliziertes An- und Ausschalten.

5.2.6 Sicherheitskonzept

Ausgehend von der Entwicklung eines Sicherheitskonzeptes in Kapitel 4.2 wird eine Acrylglashaube [30] (Abbildung 20 A) verwendet. Diese wird, unter Angabe der ermittelten Maße, über einen Anbieter bezogen, welcher sich auf dessen Herstellung spezialisiert hat. Mittels geeigneter Laser kann das Acrylglas so entsprechend den Maßen präzise zugeschnitten werden, ohne dass ein Grad entsteht. Die nötigen Aussparungen werden nachträglich mittels einer Tischkreissäge und eines Topfbohrers eigenständig ergänzt. Die Acrylglashaube wird mittels 3D gedruckter Halterungen auf dem Tischwagen positioniert. In einem der Aufnehmer wird ein Mikroschalter integriert, damit das Vorhandensein der Acrylglashaube erkannt und in das Softwareprogramm integriert werden kann. Wie in Abbildung 20 B dargestellt, wird der Mikroschalter über zwei Metallstifte in der Acrylglashalterung fixiert und kann bei Bedarf mit einer Zange ausgetauscht oder ersetzt werden. Eine technische Zeichnung der vier Acrylglashalterungen sind in dem Anhang unter Abbildung C 22 einsehbar.

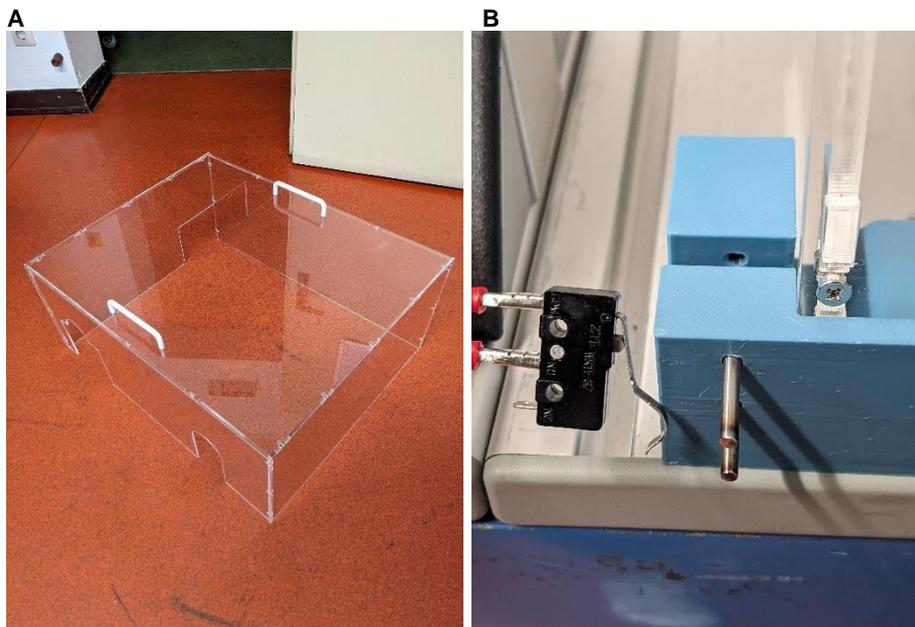


Abbildung 20: (A) Acrylglashaube mit (B) Aufnehmer für Mikroschalter

Zur Gewährleistung einer schnellen Erreichbarkeit wird ein Not-Aus-Schalter oberhalb der Schaltschranktür montiert. Dieser kann zuverlässig bei einem Strom von 10 A und einer Spannung von 600 V schalten und so den Demonstrator stromlos schalten.

5.3 Verifizierung des Schrittmotors im Demonstrator

Damit ein Testlauf der Antriebseinheit mit Getriebe und Kupplung in dem Demonstrator durchgeführt werden kann, wird eine Motorhalterung modifiziert und eine Montageplatte aus Acrylglas angefertigt. Im weiteren Verlauf wird ein Adapterstück mit Hilfe einer CAD-Software modelliert und gedruckt, welches die Ausgangswelle des Planetengetriebes unter Anwendung einer Passfeder mit der Klauenkupplung verbindet. Der Demonstrator kann so mit den zuvor beschriebenen rudimentären Programmbeispielen erfolgreich in Bewegung versetzt werden.

Angesichts der positiv verlaufenden Tests wird sich unter Beachtung der Anforderungen, mit der Entwicklung der Programmlogik beschäftigt. Hierzu wird, unter Verwendung einer Steckplatine, der elektrotechnische Aufbau provisorisch aufgebaut und das Programm implementiert. Unterstützend wird die Spannungsversorgung der einzelnen Komponenten über Labornetzteile realisiert. In Folge der erfolgreichen Implementierung wird der elektrotechnische Aufbau in das Schaltschrankgehäuse übertragen und mit dem Zusammenbau der Bedieneinheit begonnen. Bilder, welchen diesen Prozess begleiten, sind im Anhang dieser Arbeit unter Abbildung C 11 ff. einzusehen.

5.4 CAD-Modelle

In der folgenden Abbildung 21 wird die Antriebseinheit des Demonstrators in Verbindung mit der Kupplung sowie der mechanischen Verbindung dargestellt. Die technischen Zeichnungen des Adapters, des Sensorhalters sowie der Klauenkupplung befinden sich im Anhang unter Abbildung C 17 ff.

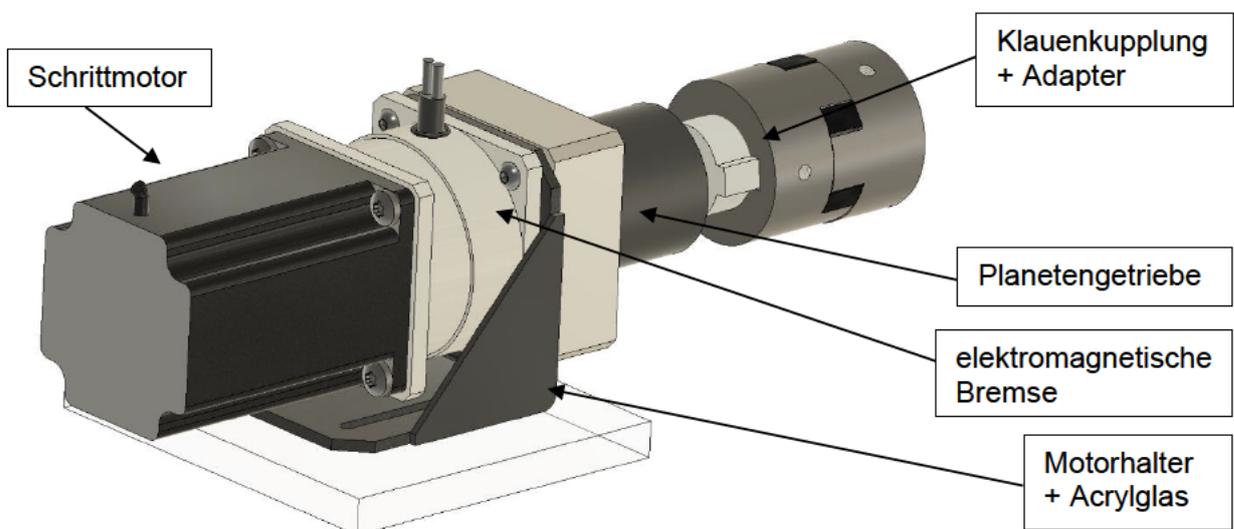


Abbildung 21: CAD-Modell der Antriebseinheit und der Komponenten der mechanischen Verbindung

Abbildung 22 zeigt das Bedienpult mit seinen einzelnen Komponenten in der Drauf- und Schrägansicht. Es werden so der An-/Ausschalter (1), die Status LEDs (2), die LCD-Displays (3), der Stufen-Drehschalter (4) und das Potentiometer (5) dargestellt. Das Bedienpult ist mit zwei M6 Zylinderschrauben auf den Aluprofilen des Tischwagens montiert.

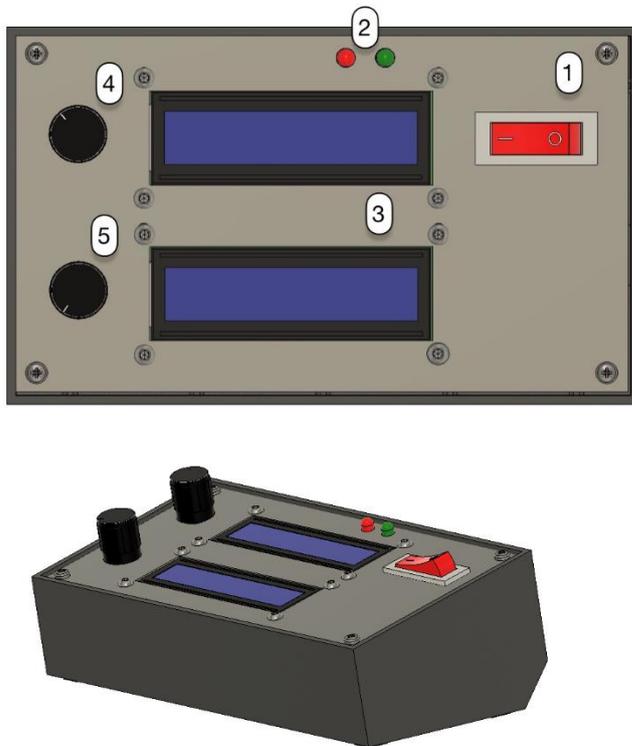


Abbildung 22: CAD-Modell des Bedienpults

In Abbildung 23 wird der Halter für den induktiven Näherungssensor dargestellt. Dieser ist in seiner Position einstellbar, um eine nötige Justage des Sensors zu ermöglichen. Fixiert wird dieser Halter auf den Aluprofilen des Tischwagens mit einer M8 Zylinderschraube und dem entsprechenden Nutenstein.

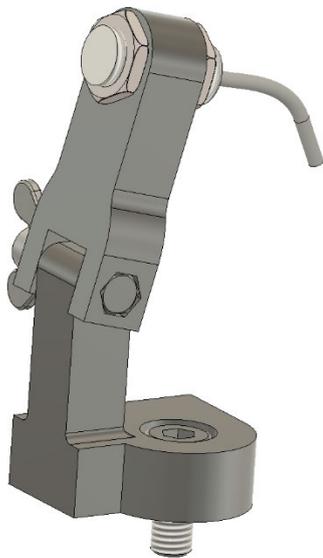


Abbildung 23: CAD-Modell Halters für den induktiven Näherungssensor (hier montiert)

Abbildung 24 zeigt das CAD-Modell des Schaltschrank und dessen vereinfachter Innenaufbau.

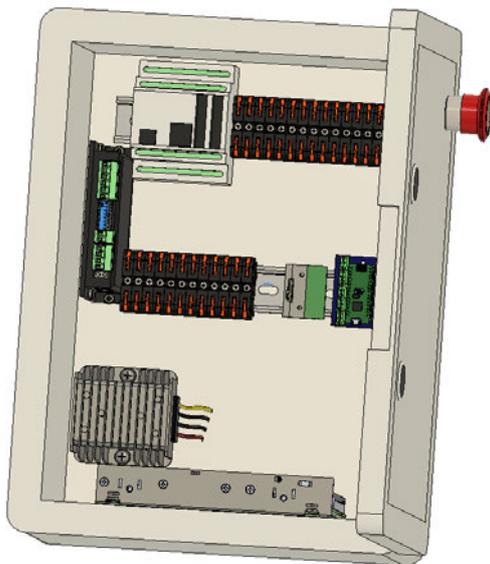


Abbildung 24: CAD-Modell vom Schaltschrank

Der gesamte Demonstrator wird als CAD-Modell zwecks einer allgemeinen Übersicht in Abbildung 25, unter Verwendung der CAD-Daten von Wahbi (2024), dargestellt.

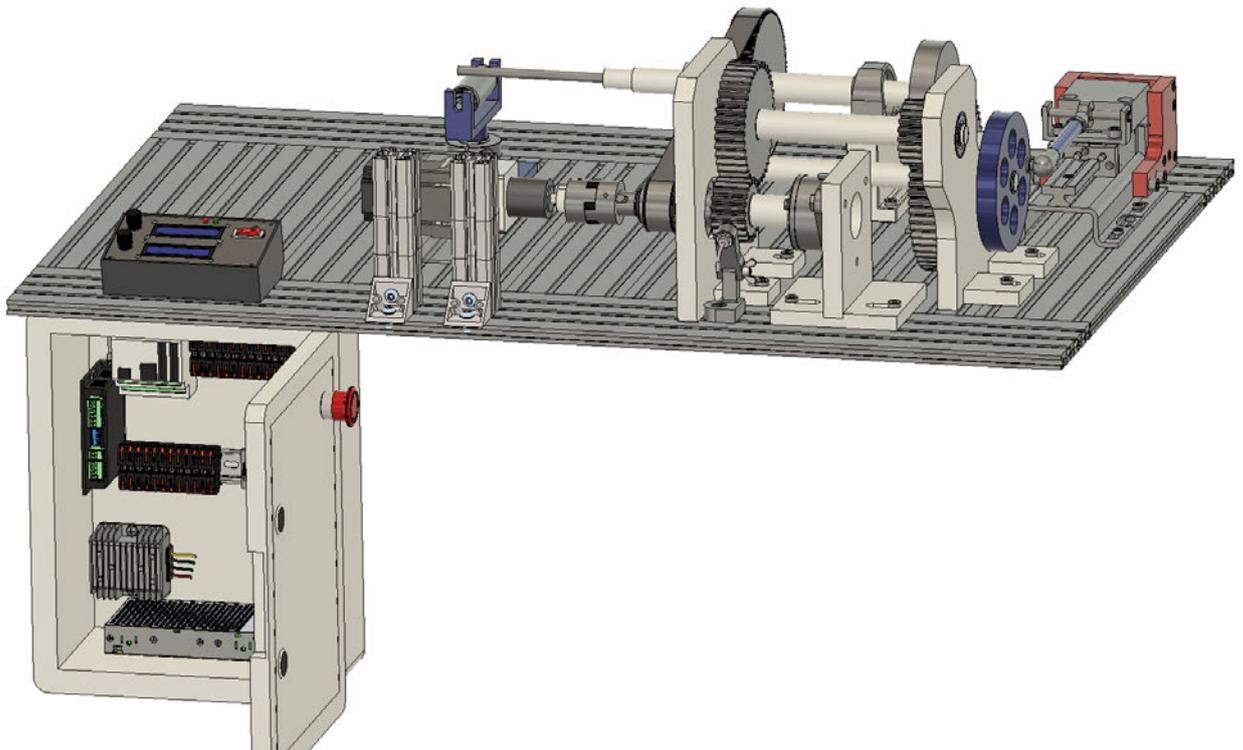


Abbildung 25: CAD-Modell des Demonstrators

5.5 Präsentation des finalen Demonstrators

Um dem Leser einen besseren Einblick in den Aufbau und die Funktionsweise des fertigen Demonstrators zu ermöglichen, werden im Folgenden verschiedene Ansichten und Detailaufnahmen des Demonstrators präsentiert. Diese sollen dem Leser eine deutliche Vorstellung vom endgültigen Aussehen und den funktionalen Aspekten des fertigen Demonstrators vermitteln.

Auf folgender Abbildung 26 ist der Demonstrator in der Frontalansicht sowie in der Draufsicht dargestellt. Das Bedienpult wird auf den Aluprofilen montiert. Für ein strukturiertes Erscheinungsbild, verlaufen die Strom- und Signalleitungen durch den Anlagentisch direkt in den Schaltschrank. Gleiches wird für die Steuerleitungen des Motors, der Bremse und des Mikroschalters durchgeführt.

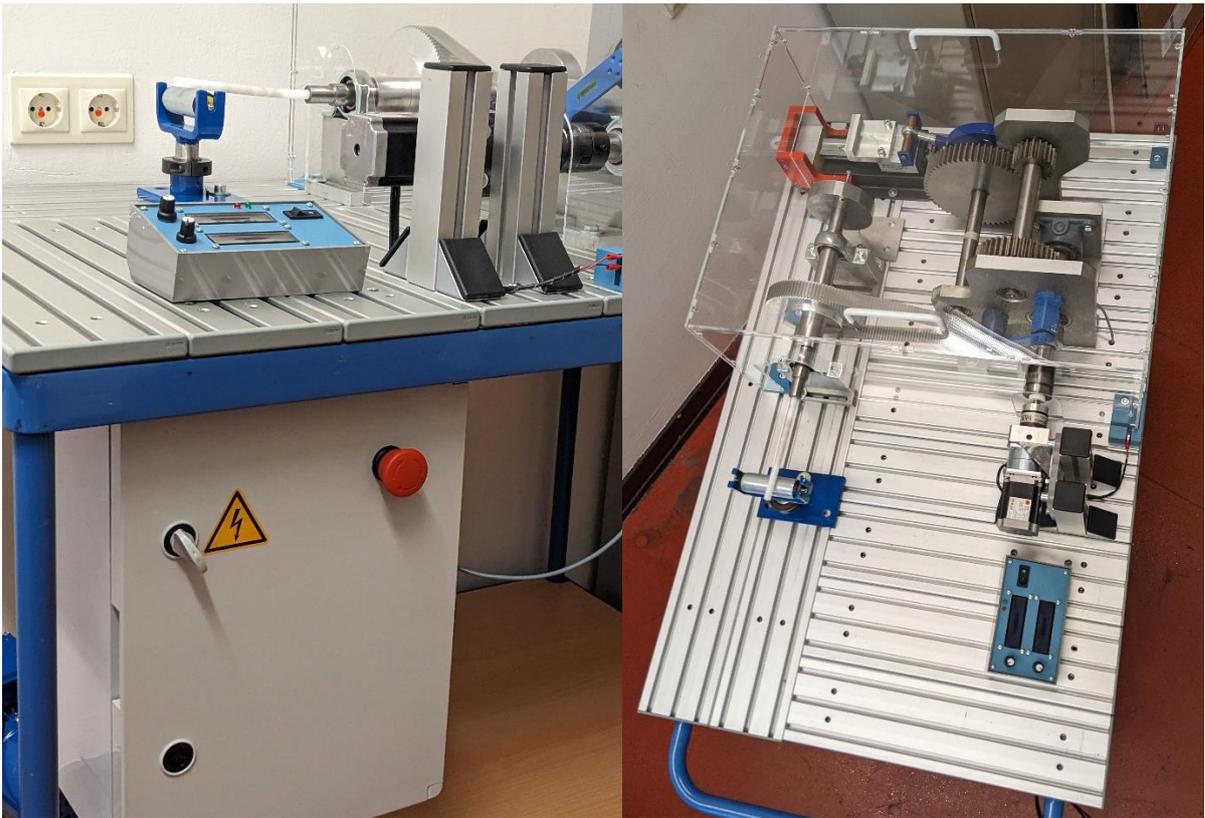


Abbildung 26: Fertiger Demonstrator in der Komplettansicht

In Abbildung 27 (A) wird in der linken Bildhälfte ein Acrylglasaufnehmer mit Mikroschalter für die Überwachung der Acrylglashaube dargestellt. In der rechten Bildhälfte hingegen wird die Sensorhalterung für den induktiven Drehzahlsensor abgebildet. Damit das Einstellen der Distanz zum Zahnrad und somit das Einstellen des Sensors ermöglicht werden kann, wird ein Halter konstruiert und gedruckt. Dieser wird aus zwei Teilen modelliert und kann über eine Flügelmutter am oberen Teil des Sensorhalters in der gewünschten Distanz fixiert werden. Der Halter wird zur Gewährleistung der Flexibilität mit einem Nutenstein auf dem Aluprofil montiert. Das Kabel des Drehzahlsensors verläuft ebenfalls in unmittelbarer Nähe durch das Aluprofil zum Schaltschrank. Hier ist es von innen mit einem Kabelbinder (Abbildung 27 (B)), welcher als Zugentlastung dienen soll, gegen ein vollständiges Herausziehen gesichert.

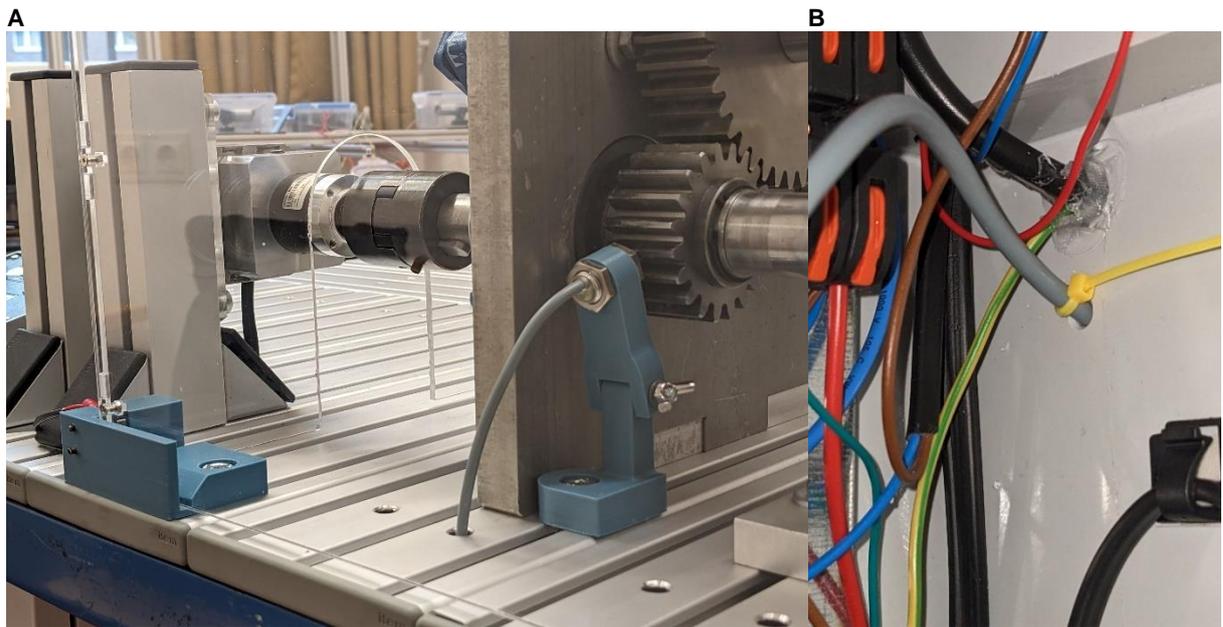


Abbildung 27: (A) v.l. Acrylhaubenaufnehmer und Halterung für induktiven Drehzahlsensor; (B) Zugentlastung der Signalleitung- und Stromleitung des Drehzahlsensors

Abbildung 28 zeigt das Bedienpult. Hierbei wird die Deckplatte mit den entsprechenden Aussparungen in einer CAD-Software modelliert und anschließend gedruckt. Somit kann ein sauberes Erscheinungsbild des Bedienpultes gewährleistet werden.

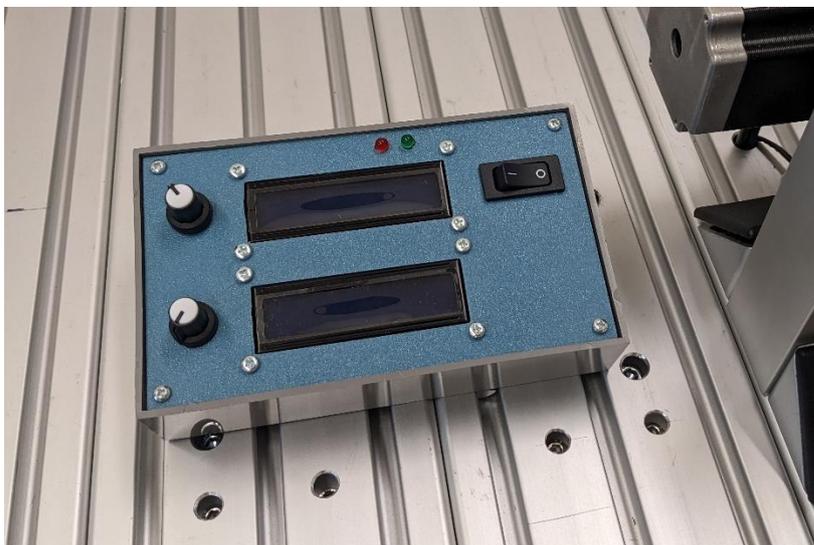


Abbildung 28: Draufsicht Bedienpult zum Steuern des Demonstrators

Damit Walnüsse während des Ausführens des Präsentationsmodus in den Nussknacker gelegt und geknackte Nüsse wieder entnommen werden können, wird in diesem Bereich eine Aussparung vorgenommen. Dargestellt ist dies in Abbildung 29. Somit kann eine Walnuss ohne gesundheitliche Risiken eingelegt und im Anschluss durch die Schublade nach dem Hervorziehen der Metallplatte, entnommen werden.



Abbildung 29: Verwendung des Nussknackers mit Aussparung

In Abbildung 30 ist der elektrotechnische Aufbau innerhalb des Schaltschranks dargestellt. Hierbei werden die Mikrocontroller (Controllino MAXI, Arduino Nano), die Durchgangsklemmen sowie kleinere Platinen mittels einer 35 mm Hutschiene an der Metallrückwand des Schaltschranks verbaut. Die Metallrückwand ist über eine Schraubverbindung mit dem Schutzleiter und somit mit dem Netzteil verbunden. Damit der Arduino Nano sowie zwei weitere Platinen (Stepdown Converter von 12 V auf 9 V und Schaltungsaufbau vom Drehzahlsensor gemäß Abbildung 31) an der Hutschiene befestigt werden können, werden 3D gedruckte Bauteile verwendet. Diese CAD-Modelle [31], [32], welche speziell für 35 mm Hutschienen konstruiert wurden, werden dazu von der Internetplattform „Thingiverse.com“ heruntergeladen und ausgedruckt.

Eine Übersicht der Aus- und Eingänge der Durchgangsklemmen, ist im Anhang unter Abbildung C 10 bzw. Tabelle C 3 einsehbar. Ebenso ist dem Anhang unter Abbildung C 5 eine Pinout- Tabelle beigefügt. Auf dieser kann die Nummerierung der Ein- und Ausgänge des Controllino MAXI eingesehen und die Pinbelegung daraufhin nachvollzogen werden.

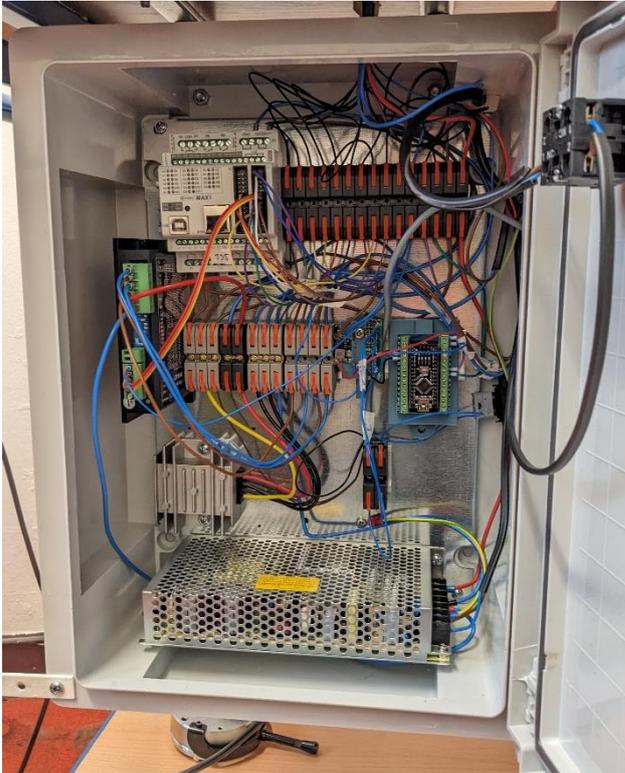


Abbildung 30: elektrotechnischer Aufbau im Schaltschrankgehäuse

6 Herausforderungen bei der Integration

Nach Abschluss der Arbeiten werden in diesem Kapitel Herausforderungen, Lösungsansätze und während des Prozesses durchgeführte Änderungen erläutert. Hierbei soll veranschaulicht werden, wobei der Ausarbeitung der Aufgabenstellung Schwierigkeiten und Hindernisse aufgekommen sind und wie mit diesen umgegangen wird.

Somit kann im Rahmen der Programmierung festgestellt werden, dass eine Ansteuerung des Schrittmotors über den Poti, durch Verwendung der AccelStepper.h-Bibliothek nicht möglich ist. Diese Problematik äußerte sich durch Zucken des Schrittmotors beim Aufdrehen des Potentiometers. Es ist hierbei zu erwähnen, dass die vorliegende Bibliothek in erster Linie der Eingabe von Zielpositionen und Geschwindigkeiten dient. So wird durch diese im Hintergrund, basierend auf den gesetzten Zielparametern (z. B. Zielposition, Maximalgeschwindigkeit, Beschleunigung) die Abstände zwischen den Impulsen berechnet. Eine kontinuierliche Bewegung ist somit nicht vorgesehen und die Anwendung entsprechender Methoden der Bibliothek werden nicht weiterverfolgt. Die Verwendung einer klassischen Implementierung, wie in Kapitel 2.3 beschrieben, mit dem das Einstellen des Delay zwischen den HIGH- und LOW-Phasen stellte sich in Verbindung mit einem Potentiometer als geeigneteren Lösungsansatz heraus.

Zusätzlich wird beobachtet, dass es im Zuge von Problemanalyse-Zwecken bei einer Ausgabe auf dem seriellen Monitor der IDE, zu einer Reduzierung der Drehzahl kommt. Hierbei sollte innerhalb der Motoransteuerung der aktuelle Potentiometerwert ausgegeben werden, um dessen Wert und damit die Drehzahl des Schrittmotors nachzuvollziehen. So tritt dieses Verhalten immer auf, wenn ein „Serial“-Befehl innerhalb der Schweife zur Motoransteuerung aufgerufen wird. Erklären lässt sich diese Beobachtung damit, dass bei einem Aufruf eines solchen Befehls das Programm kurzzeitig blockiert. Grund hierfür ist, dass bei der Methode „Serial.println()“ der Controllino wartet, bis die Daten vollständig an den Computer übertragen wurden. Erst dann wird der Programmablauf fortgesetzt [33]. Wie bereits zu Beginn der Arbeit erwähnt, ist für den Schrittmotor jedoch ein kurzes Ansteuerungsintervall erforderlich, welches durch den Serial-Befehl drastisch verlängert wird. Eine mögliche Maßnahme zur Behebung dieses Problems besteht in der Erhöhung der Baudrate, welche die Anzahl der Zeichen pro Sekunde definiert, die gesendet werden. Wiederum limitiert hier die Taktung des Mikrocontrollers die Höhe der Baudrate, sodass während der Motorsteuerung auf Serial-Befehle verzichtet wird.

Mit Hinblick auf die Ausgabe der Drehzahl auf dem Display, wird ein ähnliches Phänomen wie beim Serial-Befehl beobachtet. Somit kommt es bei einer I²C -Kommunikationsanweisung innerhalb der Motoransteuerung zu einer Verringerung der Drehzahl. Ähnlich wie beim Aufrufen der Serial-Methode, wird auch durch die Kommunikation über den I²C -Bus der Programmablauf blockiert. Infolgedessen entspricht die Ausgabe einer aktuellen Drehzahl, welche durch die Pulsfrequenz mathematisch hergeleitet wird, nicht der tatsächlichen ausgeführten Drehzahl. Um dies zu vermeiden, kann ein Kommunikationsaufruf so gestaltet werden, dass er nur nach Ablauf eines zuvor definierten Zeitintervalls erfolgt und nicht bei jedem Durchlauf ausgeführt wird. Dies garantiert jedoch nicht, dass das blockierende Verhalten des Programmablaufs den Schrittmotor dennoch nicht beeinträchtigt. Daher wird die Geschwindigkeit mithilfe eines induktiven Näherungssensors, der am Eingangszahnrad des Getriebes (Z_1) angebracht ist, über einen zusätzlichen Mikrocontroller ausgelesen und auf einem zweiten LCD Display dargestellt. Der induktive Näherungssensor wird als PNP-schaltend klassifiziert. Die Last ist dabei mit dem Minuspol verbunden, und beim Schalten des Sensors wird die positive Versorgungsspannung durch diese Last geleitet. In einem stromlosen Zustand bleibt der Schalter geöffnet, weshalb der Sensor als NO (normally open) bezeichnet wird. Die folgende Abbildung 31 zeigt in einer Skizze das Prinzip sowie den schaltungstechnischen Aufbau. Hierbei wird ein unbelasteter Spannungsteiler verwendet, da am Eingangspin des Arduino Nano maximal Spannungen bis 5V anliegen dürfen. Der Spannungsteiler ist dementsprechend so eingestellt, dass am Pin-D2 des Arduino Nano eine Spannung von etwa 4 V anliegt. Der Spannungsteiler lässt sich durch folgenden Ausdruck beschreiben:

$$U_{Nano} = \frac{R_2 \text{ Nano}}{R_1 + R_2 \text{ Nano}} * U_{ges} = \frac{5100 \Omega}{15100 \Omega} * 12 V = 4,052 V \quad (6.1)$$

Hierbei sind U_{Nano} die gewünschte Spannung am Arduino Nano, R_1 sowie R_2 die zu verwendeten Widerstände und U_{ges} die Versorgungsspannung des Sensors.

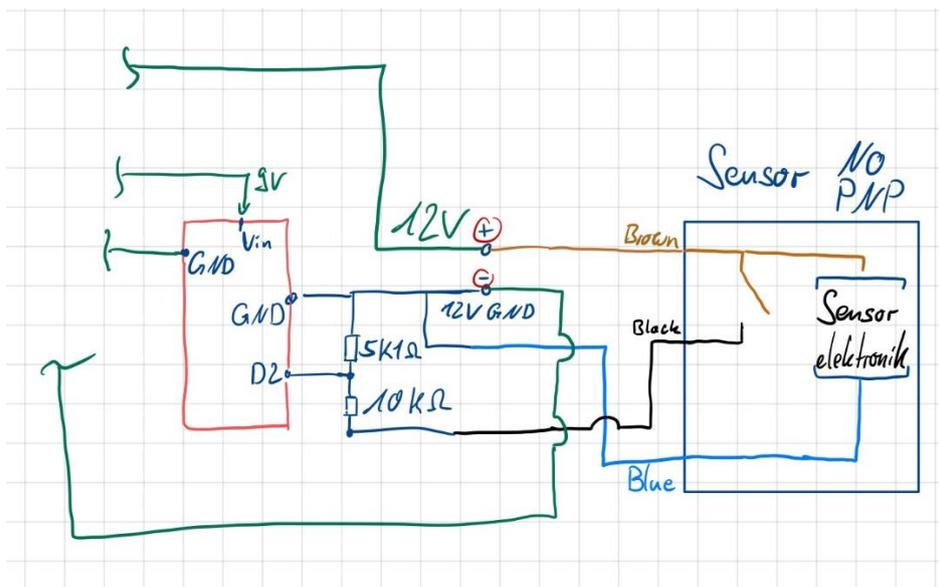


Abbildung 31: Skizzierter Schaltungsaufbau induktiver Näherungssensor

Beim Transfer des elektrotechnischen Aufbaus in den Schaltschrank kommt es zu einem unvorhersehbaren Verhalten der Software und somit des Demonstrators. Dieses Verhalten äußert sich durch das zufällige Aufrufen verschiedener Methoden. Außerdem wird auf dem Display in unregelmäßigen Abständen anstelle von Buchstaben verschiedene Zeichenfolgen, teils unbekannter Symbole, angezeigt. Durch eine Internetrecherche wird der Verdacht auf das Vorliegen einer Masseschleife bzw. Erdschleife weiter konkretisiert. Technisch lässt sich eine Erdschleife beschreiben, wenn mehrere Geräte mit unterschiedlichen Massepunkten verbunden, deren Massepotentiale jedoch nicht identisch sind. Über die Masseleitungen zwischen den Geräten können dabei Ausgleichsströme fließen, die durch die Potentialunterschiede der Massepunkte verursacht werden [34]. Diese Störströme können zur Beeinflussung von Signalleitungen empfindlicher Geräte führen. Somit haben vermutlich diese Störungen den Controllino beeinflusst. Dieses Verhalten wird durch das Verwenden eines einheitlichen Massepunktes behoben. Dementsprechend werden alle Masseleitungen sternförmig zusammen und so nah wie möglich an das Netzteil geführt, um große Leitungslängen zu vermeiden. Die Masseverbindung des Motortreibers wird direkt mit dem Netzteil verbunden, da hier das höchste Massepotential zu erwarten ist.

Bei der Inbetriebnahme des Demonstrators mit dem Erfassen der Drehzahl wird beobachtet, dass es im ersten und zweiten Modus zu einer Abweichung, der programmierten Soll Drehzahl kommt. Wird im zweiten Modus der Potentiometer über den Schwellenwert bewegt, so wird im Programmcode ein Delay von 700 Mikrosekunden zwischen den HIGH und LOW-Phasen angewendet. Der Motor wird im Vollschrittbetrieb angesteuert und die Pulsfrequenz beträgt gemäß der Formel 2.2 bzw. der Drehzahltable im Anhang unter Tabelle C 2 ungefähr 714 Hz.

Daraus ergibt sich, im Hinblick auf die Getriebeübersetzung von $i = 5$ eine rechnerische Drehzahl von circa 42 U/min. Gemessen werden vom Arduino Nano jedoch nur eine Drehzahl von 37 U/min. Stärker tritt dieser Effekt auf, als im Zuge des ermitteln einer geeigneten Drehzahl für den ersten Programmmodus, das Potentiometer auf eine Maximalgeschwindigkeit und damit auf eine Pulsfrequenz von 5000 Hz eingestellt wird. Hierbei sollte sich eine rechnerisch ermittelte Getriebedrehzahl von 300 U/min ergeben. Gemessen wird jedoch eine Drehzahl von 149 U/min. Infolgedessen wird ein Oszilloskop an das PUL-Signal des Motortreibers angeschlossen, um dieses sichtbar zu machen. Dadurch wird erwartet, Rückschlüsse auf das Verhalten der Motordrehzahl schließen zu können. In der folgenden Abbildung 32 ist das PUL-Signal des Motortreibers mit einer vom Programmcode festgelegten Periodendauer von 200 μs dargestellt.

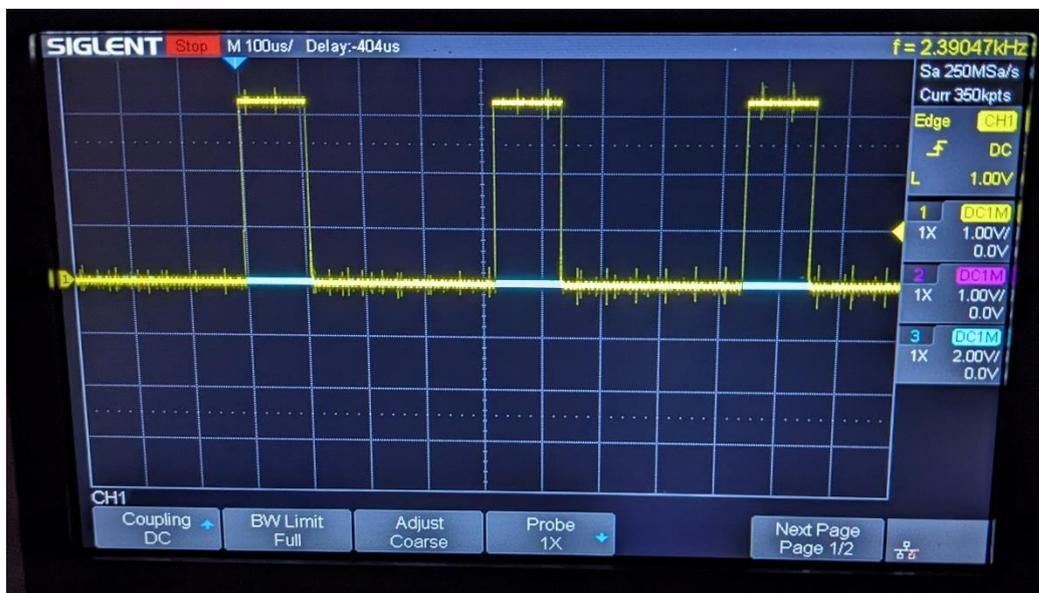


Abbildung 32: Pulsfrequenz des Schrittmotors bei einer Periodendauer T von 200 μs

Hierbei ist zu erkennen, dass die gesendete Frequenz des Controllinos anders als erwartet ungefähr 2,4 kHz beträgt und somit um 2,6 kHz abweicht. Dementsprechend ist die Pulsfrequenz, welche vom Mikrocontroller gesendet wird zu gering, um die im Programmcode geforderte Drehzahl einzuhalten. Auch ist der Abbildung 32 zu entnehmen, dass ein asymmetrisches Tastverhältnis (Duty-Cycle) besteht und die Periodendauer T bei ungefähr 418 μs liegt. Hierbei wird die programmierte 100 μs High- Phase recht zuverlässig gesendet, jedoch ist die Low-Phase mit ungefähr 300 μs zu lang. Infolgedessen ergibt sich daraufhin ein Duty-Cycle von ungefähr 24% High und 76% Low. Dieser lässt sich durch folgende Beziehung darstellen:

$$g\% = \left(\frac{t_H}{t_H + t_L} \right) * 100 = \frac{100\mu\text{s}}{100\mu\text{s} + 319\mu\text{s}} = 0,2386 * 100 = 23,86 \sim 24\% \quad (6.2)$$

Hierbei ist g das Tastverhältnis in % und t_H sowie t_L die Pulsbreite bei High und Low Ansteuerung.

Wird der Motor im zweiten Modus bei einer Periodendauern von $T = 1400 \mu\text{s}$ angesteuert, was einer Pulsfrequenz von ungefähr 714,3 Hz beträgt, kann ebenfalls eine Abweichung festgestellt werden. Hierbei wird eine rechnerisch ermittelte Drehzahl von ungefähr 42 U/min erwartet. Tatsächlich vom Sensor ermittelt, werden jedoch nur 37 U/min. Es ist zu beobachten, dass ebenfalls die Frequenz, von der im Programmcode vorgesehenen, abweicht. So beträgt die gemessene Pulsfrequenz ungefähr 618 Hz, und weicht somit 96,3 Hz von der zu erwarteten Frequenz, von 714,3 Hz, ab. Auch hier ergibt sich, gemäß der Gleichung 6.2, ein asymmetrisches Tastverhältnis von circa 43,34 % High und circa 56,65 % Low – Ansteuerung. Das entsprechende PUL-Signal ist in der nachfolgenden Abbildung 33 dargestellt. Hierbei fällt auf, dass der Duty-Cycle bei langsameren Drehzahlen das notwendige Verhältnis von 50% anstrebt.

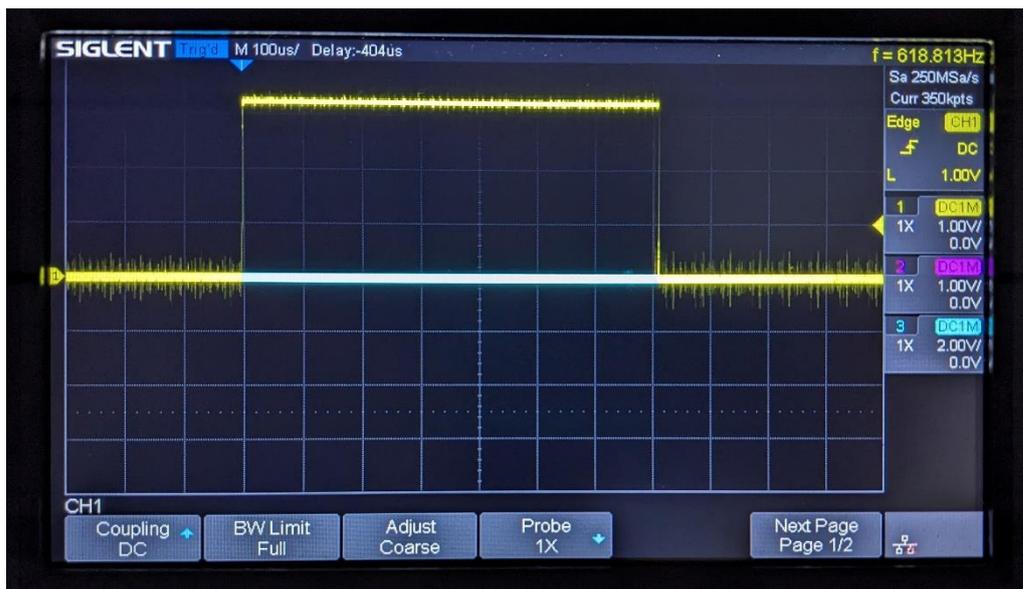


Abbildung 33: Pulsfrequenz des Schrittmotors bei einer Periodendauer T von $1400 \mu\text{s}$

Folglich kann der Motortreiber als Fehlerquelle ausgeschlossen werden. Somit kann die programmierseitige Ansteuerung zu ungenau sein und der Controllino hat Schwierigkeiten dieser Frequenz zu folgen. Bei genauerer Betrachtung des Programmcodes (Abbildung 34) können mögliche Ursachen, die zu diesem Verhalten führen, ausgemacht werden.

```
// in While bleiben solange Flag4Run & PlexiFlag true sind und Poti unter delayMicrosMin - 80 ist
while(FlagForRun && PlexiFlag && PotiDelay < (delayMicrosMin - 80)){
  if(DisplayClearFlag){          // geht beim erstmaligen aufruf 1x hier rein, um diplay zu löschen
    lcd.clear();
    DisplayClearFlag = false;    // setzt flag wieder auf false damit nicht ständig display gelöscht wird
  }
  // zur überwachung ob Plexiglashaube noch installiert ist
  PlexiFlag = digitalRead(PlexiTaster);
  stepper.disableOutputs();     // Motor aktiviert
  long rawPoti = analogRead(Poti);
  //prüfen welchen Wert Poti hat um while dann evtl zu verlassen
  PotiDelay = map(rawPoti, 0, 1023, delayMicrosMax, delayMicrosMin);

  // Motorbewegung realisieren
  digitalWrite(PUL,HIGH);
  delayMicroseconds(PotiDelay);
  digitalWrite(PUL,LOW);
  delayMicroseconds(PotiDelay);
}
```

Abbildung 34: Programmcode Motoransteuerung Modus 1

Zunächst ist eine mögliche Ursache hierfür die Verwendung der „delayMicroseconds()“ Funktion. Diese wird auch als blockierende Funktion bezeichnet, denn hierbei unterbricht der Mikrocontroller den gesamten Programmablauf und wartet, bis die vorgegebene Zeit abgelaufen ist. Erst dann setzt er den Programmablauf fort. Es ist somit nicht möglich Prozesse parallel im Hintergrund laufen zu lassen. Durch eine Internetrecherche wird in auf eine Forums-Diskussion gestoßen, in welcher bemerkt wurde, dass die echte Verzögerung bei „delayMicroseconds(6)“ nicht die ursprünglichen 6, sondern mehr als 30 Mikrosekunden betrug [35]. Dies deutet auf eine Ungenauigkeit bei kurzen Verzögerungen hin und könnte je nach Auslastung des Controllers bei größeren „delayMicroseconds()“ steigen. Auch kann als weitere Ursache, die Verwendung der Funktion „analogRead(Poti)“ in Betracht gezogen werden. Diese liest den Wert des Potentiometers aus, um daraus die Verzögerungszeit zwischen den High und Low-Pegeln zu generieren. Speziell bei ATmega-basierten Mikrocontrollern, wie er auch im Controllino MAXI zum Einsatz kommt [36], beträgt die benötigte Zeit zum Lesen eines analogen Eingangs 100 µs. In Bezug auf das Pulssignal, aus Abbildung 32, werden somit von der 319 µs Low Pulsbreite pro Schleifendurchlauf bereits 100 µs zum Auslesen verwendet. Angesichts dessen bleiben 100 µs übrig, welche aufgrund von bremsenden Prozessen in der Schleife für eine Verzögerung sorgen. Im Hinblick auf Zeitkritische Aufgaben, wie dem Ansteuern eines Schrittmotor, ist das Verwenden einer „delay“-Funktion dementsprechend nicht von Vorteil. Hier wäre eine Umsetzung mit der „Accelstepper.h“ Bibliothek im Nachhinein effizienter gewesen, da diese mit nicht blockierenden Funktionen wie „millis()“ oder „micros()“ arbeitet. Dementsprechend läuft die Motoransteuerung im Hintergrund weiter, während der Potentiometer ausgelesen wird. Eine andere Möglichkeit könnte die Funktion „tone(pin, frequency)“ darstellen [37]. Diese wird benutzt, um Töne zu erzeugen und generiert ein Rechtecksignal mit einem fest eingestellten Tastverhältnis von 50% an einem Ausgangspin. Da der Schrittmotor

ebenfalls im hochfrequenten Bereich mit Rechtecksignalen arbeitet, bietet sich eine Verwendung hier an. Dementsprechend sind die Parameter „pin“ mit dem gewünschten Ausgangspin des Controllino zu besetzen. Für den Parameter „frequency“ wird die gewünschte Frequenz eingetragen, mit welcher der Motor angesteuert werden soll. Ähnlich wie die Bibliothek „Accelstepper.h“ nicht blockierende Funktionen verwendet, besitzt auch die Funktion „tone()“ nicht blockierende Eigenschaften. Hierbei wird der Prozessablauf des Arduino nicht unterbrochen und weitere Prozesse können währenddessen ausgeführt werden.

Des Weiteren wird bei dem Anzeigen der Drehzahlen beobachtet, dass diese vereinzelt zwischen zwei Werten pendeln. Um eine eindeutigere Darstellung zu gewährleisten, wird die Messzeit von einer Sekunde auf zwei Sekunden erhöht. So können Messunsicherheiten vermieden werden, was sich durch eine stabilere Darstellung der Drehzahlen äußert.

Darüber hinaus wird beobachtet, dass nach dem Anzeigen von Fehlermeldungen, sporadisch die zweite Zeile des Displays ausfällt. Dieses Problem lässt sich durch einen Neustart des Systems beheben. Hierbei könnte als Ursache die Funktion „task_text()“, welche zusammen mit „charAt()“ aus einem Forum [29] stammt, in Verbindung mit dem „lcd.clear()“ Befehl stehen. Letzterer ist für das Löschen des Inhalts vom Display zuständig, um diesen für neue eingaben vorzubereiten. Hierbei könnten sporadisch, entscheidende Werte zufällig gelöscht werden, sodass der Funktion „task_text()“ dieser Werte fehlen. Aufgrund begrenzter Zeit kann jedoch keine genaue Prüfung dieser Problematik erfolgen, sodass ein näherer Lösungsansatz nicht erläutert werden kann.

Bei einer abschließenden Betrachtung bezüglich der Namensgebung der Betriebsprogramme wird die Namensgebung für den Modus zwei und drei, im Kapitel der Entwicklung beschrieben, angepasst. Hierbei wird durch ein Telefonat zwischen Herrn Bienert von der Firma Ridder Automatisierungs GmbH und einem Freund, welcher den Kontakt hergestellt hat, die Verwendung des Begriffs „Wartungsmodus“ präziser definiert. Ausgehend von der Konzeption im Kapitel 4.1.4 sollte sich der Demonstrator beim Befinden im Wartungsmodus, mit einer fest definierten Drehzahl ohne Schutzeinrichtung ansteuern lassen. Im Hinblick auf das Telefonat hat eine Maschine, die sich in einem „Wartungsmodus“ befindet, stillzustehen und sollte sich nicht unerwartet durch eine unbeteiligte Person in Bewegung setzen lassen [38]. Diese Maßnahme soll der Beseitigung potentiell lebensgefährlicher Risiken dienen. Aus diesem Grund wird der Modus zwei in „Prüfmodus“ umbenannt. Diese Bezeichnung führt zu keinem sicherheitsrelevanten Konflikt mit dem Begriff „Wartungsmodus“ aus dem Maschinenbau. Infolgedessen wird der Begriff „Leerlaufmodus“ im dritten Betriebsprogramm durch „Wartungsmodus“ ersetzt. In

diesem Programm lässt sich die Anlage durch Drehen des Potentiometers nicht in Bewegung setzen, sodass kein potentiell lebensgefährliches Risiko besteht.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es, eine Antriebseinheit in einen bestehenden Demonstrator zu integrieren. Zusätzlich sollte eine zuverlässige und übersichtliche Steuerung entwickelt werden, um eine schnelle Einsatzbereitschaft zu gewährleisten. Ebenso war, für eine sichere Bedienung und Präsentation in der Vorlesung, die Entwicklung eines Sicherheitskonzeptes gefordert. Um diese Aufgabenstellung zu erfüllen, wurde eine Gliederung angewendet, die sich aus sechs Kapiteln zusammensetzt und diesen Prozess dokumentarisch begleitet.

Zunächst erfolgte die Präsentation des Demonstrators, gefolgt von der Beschreibung dessen Ausgangssituation. Dabei wurde erläutert, weshalb ein vorangegangenes Konzept für die Ansteuerung des Demonstrators keine weitere Anwendung fand. Zur Optimierung der Übersichtlichkeit der Einzeldisziplinen wurde die Aufgabenstellung abstrahiert, wodurch eine Unterteilung in Einzelkomponenten entstand. Anschließend stand die generelle Funktionsweise von Schrittmotoren im Fokus und es wurde deren Ansteuerungsprinzip erläutert. Hierbei konnten technische Aspekte, welche für die Umsetzung des Projektes wichtig sind, ausführlich beschrieben werden. Im Hinblick auf eine sichere Anwendung in der Vorlesung, sind Richtlinien und Gesetzestexte auf Hinweise untersucht worden, welche relevant sind um einen Demonstrator, im Umfeld einer Hochschule in Betrieb zu nehmen. Die aus diesem Kapitel resultierenden Anforderungen wurden gesammelt und mit den allgemeinen Anforderungen, welche im anschließenden Kapitel analysiert wurden, zusammengetragen. Durch eine genauere Betrachtung der Einzelkomponenten des Demonstrators und der zuvor aufgestellten Anforderungen konnten die spezifischen Lösungsansätze und Konzepte vorgestellt sowie beschrieben werden. Im weiteren Verlauf wurden verschiedene Sicherheitskonzepte ausgearbeitet, hinsichtlich ihrer Eignung für die zuvor genannten Anforderungen verglichen und das am besten geeignete Konzept ausgewählt.

Um eine erfolgreiche Integration des Schrittmotors zu ermöglichen, wurde dieser zu Beginn des Entwicklungsprozesses auf seine generelle Funktionalität hin geprüft. Im Anschluss erfolgte, angesichts der vorangegangenen Konzeption, eine Umsetzung der zuvor vorgestellten Ausarbeitungen. Auch hier wurde sich wieder an dem Schema der Unterkomponenten orientiert, um so ein strukturiertes und systematisches Vorgehen beizubehalten. Die Lösungsansätze konnten folglich detailliert beschrieben und die einzelnen Beweggründe zum besseren Verständnis erläutert werden. In Vorbereitung auf den Zusammenbau der Teilkomponenten fand ein weiterer Testlauf des Motors in dem Demonstrator statt. Im Weiteren konnte mit dem Zusammenbau der Teilkomponenten sowie mit dem Programmieren der Software begonnen

werden. Ebenfalls erfolgte unter Einhaltung eines Stromlaufplans das Verbinden der elektrischen Komponenten miteinander. Abschließend erfolgte eine Präsentation des fertigen Demonstrators durch verschiedene Ansichten und Detailaufnahmen des Demonstrators. Zum Abschluss der Arbeit wurden die Herausforderungen, Lösungsansätze und vorgenommenen Änderungen während des Prozesses dargestellt.

Ausblick

Im Verlauf der Ausarbeitung wurden Schwachstellen aufgedeckt sowie Möglichkeiten entdeckt, den Demonstrator weiterzuentwickeln. Jedoch führte eine Zeitknappheit dazu, dass diesen nicht nachgegangen werden konnten.

Dementsprechend kann, um die Effizienz des Programmcodes vom Controllino in Bezug auf das Timing zu optimieren, ein Interrupt verwendet werden. Mit diesem könnte die Überwachung der Acrylglashaube im Präsentationsmodus zeitsparend umgesetzt werden. Ein Interrupt ist hierbei ein Signal, das den Mikrocontroller dazu bringt, seine aktuelle Aufgabe zu unterbrechen. Dementsprechend muss der Prozessor nicht jedes Mal prüfen, ob ein Ereignis stattgefunden hat oder sich in diesem Zusammenhang Zustände geändert haben. Dies ist in dem Zusammenhang mit dem Prüfen der Acrylglashaube, während des Motorlaufs, hilfreich. Nicht jeder Pin ist Interrupt-fähig, sodass der Signal-Pin des Mikroschalters mit einem entsprechenden Pin des PIN-Headers (Pin 2 - D0, Pin 3 - D1, Pin 20 - SDA oder Pin 21 - SCL) verbunden werden muss. Der programmseitige Aufbau ist in der nachfolgenden Abbildung 35 dargestellt.

```
const byte interruptPin = D1;
```

```
void setup() {  
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(interruptPin), SuddenlyNoPlexi(), FALLING);  
}
```

Abbildung 35: Integration eines Interrupts für Mikroschalter

Hierbei wird zu Beginn des Programmcodes der entsprechende Pin definiert, welcher bezüglich eines Interrupts überwacht werden soll. In dem „Setup-Bereich“ wird unter Nennung der dann auszuführenden Funktion („SuddenlyNoPlexi()“) der Interrupt aktiviert. Mit dem letzten Argument „FALLING“ wird bestimmt, dass hier auf eine fallende Flanke ausgelöst werden soll. Dies ist sinnvoll, da beim Anheben der Acrylglashaube der Mikroschalter öffnet und die Signalspannung am Pin dementsprechend abfällt. Der Programmablauf wird daraufhin unterbrochen und es wird die gewünschte Funktion ausgeführt. Hierbei ist zu beachten, dass der Programmablauf nach Ausführung der Funktion an der entsprechenden Stelle fortsetzt, wo er

unterbrochen wurde. Hierzu müsste die Funktion „SuddenlyNoPlexi()“ angepasst werden um eine logische Weiterführung des Programms zu ermöglichen.

Des Weiteren könnte, bezogen auf die Drehzahlmessung, um die Bedienbarkeit und den Komfort zu steigern, eine weitere Messung der Drehzahlen an den Zahnrädern Z_2 sowie Z_4 erfolgen. So könnte ein Programm in Kombination mit einem Taster geschrieben werden, mit dem zwischen den einzelnen Zahnrädern hin- und her geschaltet werden kann.

Alternativ, um den Einsatz mehrerer induktiver Sensoren zu vermeiden, kann die Anzahl der Zähne in dem aktuellen Programmablauf durch Tastendruck auf das zu messende Zahnrad angepasst werden. Nach einer erfolgreichen Montage der Sensoreinheit kann dann mit der korrekt ermittelten Drehzahl fortgefahren werden. Um eine zügige Montage im Vorlesungsbetrieb zu gewährleisten, empfiehlt es sich, bereits an den entsprechenden Positionen Nutensteine im Aluprofil zu positionieren. Im Hinblick auf eine Umsetzung, wurde das Sensorkabel nicht gekürzt, sondern in seiner ursprünglichen Länge belassen und seitlich am Schaltkasten aufgehängt. Um eine Ummontage ganz zu vermeiden, wäre es ebenfalls möglich, durch einen Tastendruck die entsprechenden Drehzahlen der Zahnräder basierend auf der an Z_1 gemessenen Drehzahl ausgeben zu lassen. Für die Realisierung könnte ein Programm geschrieben werden, welche die entsprechende Drehzahl mittels des folgenden Ausdrucks errechnet.

$$n_x = n_1 \left[\frac{U}{min} \right] * \frac{Z_1}{Z_x} \quad (7.1)$$

Hierbei ist n_x die gewünschte Drehzahl und Z_x die dazugehörige Zähneanzahl des Zahnrades. Die Beziehung setzt sich aus dem Übersetzungsverhältnis $i = \frac{Z_2}{Z_1}$ und der Drehzahl, welche durch $n_2 = \frac{n_1}{i}$ ausgedrückt wird, zusammen. Zu beachten ist jedoch die Beziehung $n_2 = n_3$, da sich die Zahnräder auf einer gemeinsamen Welle befinden.

Damit ein zuverlässiges Lösen der Bremse sicher gestaltet werden kann, könnte mittels eines Spannungsmessers die Spannung am Relaisausgang gemessen und damit das Relais überwacht werden. Das System könnte in einen Fehlerzustand gehen, wenn nach der Ansteuerung des Relais kein Anstieg der Spannung in der Ansteuerungsleitung registriert wird. Angesichts dessen soll so ein Motorlauf gegen die im Fehlerfall angezogene Bremse, vermieden werden. Die Funktion des Relais wird derzeit durch das akustische Signal beim Lösen und Anziehen der Bremse überwacht, welches, infolge der Ansteuerung zu hören ist. Dabei ist die Bremse viermal zu hören, ehe der Programmablauf fortgesetzt wird.

Um Weiteren könnte, um den Mehrwert für die Vorlesung zu steigern, könnte zusätzlich ein Drucksensor am Nussknacker angebracht werden. Die dort herrschende Kraft beim Knacken

von Nüssen kann so präzise ermittelt und auf einem Display angezeigt werden. Geeignete Drucksensoren, welche mit einem Arduino kompatibel sind, gibt es beispielsweise bei „reichelt.de“. Das Funktionsprinzip dieser Sensoren beruht auf der analogen Erfassung eines Widerstandes. Eine äußere Krafteinwirkung auf den Sensor führt zu einer Widerstandsänderung und damit zu einer Spannungsänderung des Analogsignals.

Darüber hinaus ist aufgefallen, dass überwiegend nur größere Walnüsse mit dem Nussknacker geknackt werden können. Für kleinere Walnüsse oder andere Arten von Nüssen wie Haselnüsse ist der Nussknacker ungeeignet. Um dies zu umgehen, könnte der Bereich des Nussknackers mit verschiedenen starken Aluminiumplatten reduziert werden, sodass auch kleinere Nüsse vom Nussknacker-Schieber erfasst und gebrochen werden. So kann durch eine Auswahl an verschiedenen Adapterblechen der Bereich des Nussknackers an die Nuss entsprechen angepasst werden.

Literaturverzeichnis

- [1] R. Wahbi, „Konstruktion, Entwicklung und Visualisierung eines Getriebe-Demonstrators für Unterrichtszwecke“, Thesis, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 2024. Zugriffen: 4. Januar 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://reposit.haw-hamburg.de/handle/20.500.12738/15028>
- [2] D. Schröder und R. Kennel, „Kleinantriebe“, in *Elektrische Antriebe – Grundlagen: Mit durchgerechneten Übungs- und Prüfungsaufgaben*, D. Schröder und R. Kennel, Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer, 2021, S. 432–470. doi: 10.1007/978-3-662-63101-0_10.
- [3] „Detaillierte Betrachtung empfohlen - SPS-MAGAZIN“. Zugriffen: 8. Januar 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sps-magazin.de/antriebstechnik/detaillierte-betrachtung-empfohlen/>
- [4] „schrittmotor_kurz_erklaert_d.pdf“. Zugriffen: 13. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://wiki.bu.ost.ch/infoportal/_media/hardware/syp/bauteile/schrittmotor_kurz_erklaert_d.pdf
- [5] „Schrittmotor – HSHL Mechatronik“. Zugriffen: 10. Januar 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://wiki.hshl.de/wiki/index.php/Schrittmotor>
- [6] „Was ist der Unterschied zwischen einem Schrittmotor mit offenem Regelkreis und einem Schrittmotor mit geschlossenem Regelkreis?“ Zugriffen: 10. Januar 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.omc-stepperonline.com/de/support/was-ist-der-unterschied-zwischen-einem-schrittmotor-mit-offenem-regelkreis-und-einem-schrittmotor-mit-geschlossenem-regelkreis?srsId=AfmBOoon-fwKA0G2E0rXaEP7nDXSBvtc9m8xj7zpt8stQv1mIIWW9jzfo>
- [7] „Closed-Loop-Technologie“. Zugriffen: 10. Januar 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.nanotec.com/eu/de/knowledge-base-artikel/closed-loop-technologie>
- [8] Edi, „Schrittmotoren verstehen und anwenden! – Edis Techlab“. Zugriffen: 9. Januar 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://edistechlab.com/schrittmotoren-verstehen-und-anwenden-2/>
- [9] Orientalmotor, „2-Phasen vs. 5-Phasen Schrittmotoren: Unterschiede und Leistungsvergleich“, konstruktionspraxis. Zugriffen: 9. Januar 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/-schrittmotoren-2-phasen-vs-5-phasen-vergleich-adda5833918f12418df68592f1db47707/>

- [10] „Acht Fakten und Mythen zum Mikroschrittbetrieb“, Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co. KG. Zugegriffen: 9. Januar 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.faulhaber.com/de/know-how/tutorials/schrittmotoren-tutorial-acht-fakten-und-mythen-zum-mikroschrittbetrieb/>
- [11] „Schrittmotoren - StepperOnline“. Zugegriffen: 9. Januar 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.omc-stepperonline.com/de/schrittmotoren>
- [12] „Die Unterschiede zwischen bipolaren und unipolaren Schrittmotoren | Reibungsloser Motor“. Zugegriffen: 9. Januar 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.smoothmotor.com/de/a-news-the-differences-between-bipolar-and-unipolar-stepper-motors>
- [13] U. Probst, „Antriebsarten in der Automatisierung“, in *Servoantriebe in der Automatisierungstechnik: Komponenten, Aufbau und Regelverfahren*, U. Probst, Hrsg., Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2022, S. 73–117. doi: 10.1007/978-3-658-37423-5_3.
- [14] J. Kempkes, „Elektrische Maschinen“, in *Elektrotechnik und Elektronik in Maschinenbau und Mechatronik: Für Studierende und für die Praxis*, E. Hering, R. Martin, J. Kempkes, und J. Gutekunst, Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer, 2024, S. 317–396. doi: 10.1007/978-3-662-67538-0_4.
- [15] „Verkehrssicherungspflicht - Definition“, BfGA Beratungsgesellschaft für Arbeits- und Gesundheitsschutz mbH. Zugegriffen: 13. Januar 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bfga.de/arbeitsschutz-lexikon-von-a-bis-z/fachbegriffe-v-z/verkehrssicherungspflicht-fachbegriff/>
- [16] D. G. U. e.V, „DGUV: Studenten“. Zugegriffen: 13. Januar 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dguv.de/de/versicherung/versicherte_personen/kinder/studierende/index.jsp
- [17] „ArbStättV - Verordnung über Arbeitsstätten“. Zugegriffen: 13. Januar 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/arbst_ttv_2004/BJNR217910004.html
- [18] „Risikobeurteilungen_für_Maschinen.pdf“. Zugegriffen: 14. Januar 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bgrci.de/fileadmin/BGRCI/Downloads/DL_Praevention/Fachwissen/Maschinensicherheit/2020-11-27_Risikobeurteilungen_f%C3%BCr_Maschinen_01.pdf
- [19] „§ 1 ArbSchG - Einzelnorm“. Zugegriffen: 14. Januar 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/arbschg/_1.html

- [20] „§ 2 ArbSchG - Einzelnorm“. Zugegriffen: 14. Januar 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/arbschg/__2.html
- [21] „DGUV Vorschrift 3 - Elektrische Anlagen und Betriebsmittel .pdf“. Zugegriffen: 14. Januar 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://publikationen.dguv.de/widgets/pdf/download/article/1052>
- [22] „DGUV-Vorschrift-3.pdf“. Zugegriffen: 15. Januar 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bghm.de/fileadmin/user_upload/Arbeitsschuetzer/Gesetze_Vorschriften/Vorschriften/DGUV-Vorschrift-3.pdf
- [23] „VDE - NormenBibliothek DIN VDE 0100-410“. Zugegriffen: 15. Januar 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.normenbibliothek.de/vde-xaveropp/normenbibliothek/start.xav#__normenbibliothek__%2F%2F*%5B%40attr_id%3D%270100481_o1612554513548-sec_414%27%5D__1736950762636
- [24] „EMF-Portal | Grenzwerte“. Zugegriffen: 21. Januar 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.emf-portal.org/de/cms/page/home/more/electrical-injuries/limit-values>
- [25] M. Langguth, „Welche Messungen sind bei der DGUV V3 Pflicht? - DGUV Vorschrift 3“. Zugegriffen: 15. Januar 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.e-service-check.de/welche-messungen-sind-bei-der-dguv-v3-pflicht/>
- [26] „Maschinenrichtlinie 2006/42/EG.pdf“. Zugegriffen: 13. Januar 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:157:0024:0086:de:PDF>
- [27] „Sicherheitslichtvorhänge und -lichtgitter - Überblick“. Zugegriffen: 21. Januar 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ifm.com/de/de/shared/technologien/lichtvorhaenge/technologie>
- [28] „Fritzing Homepage“. Zugegriffen: 28. Januar 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://fritzing.org/>
- [29] jurs, „Laufschrift auf SainSmart LCD Keypad Shield - International / Deutsch“, Arduino Forum. Zugegriffen: 4. Februar 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://forum.arduino.cc/t/laufschrift-auf-sainsmart-lcd-keypad-shield/172617/5>

- [30] „Acrylglashaube ohne Boden auf Maß, verspiegelte Rückwand“, Acrylglashaube ohne Boden auf Maß, verspiegelte Rückwand. Zugegriffen: 24. Januar 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://acrylhaus.com/Haube-aus-Acrylglas-ohne-Boden-im-Sondermass-Rueckwand-verspiegelt>
- [31] Thingiverse.com, „NANO screw terminal bracket for din rail by NotLikeALeafOn-TheWind“, Thingiverse. Zugegriffen: 30. Januar 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.thingiverse.com/thing:5499878>
- [32] Thingiverse.com, „DIN Rail mount and end cap and so on by AlwaysBlue“, Thingiverse. Zugegriffen: 30. Januar 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.thingiverse.com/thing:6250328>
- [33] W. Ewald, „Serial und SoftwareSerial • Wolles ElektronikKiste“, Wolles ElektronikKiste. Zugegriffen: 28. Januar 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://wolles-elektronikkiste.de/serial-und-softwareserial>
- [34] A. Schwab und W. Kürner, *Elektromagnetische Verträglichkeit*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. doi: 10.1007/978-3-642-16610-5.
- [35] „Mikrosekunden - Genauigkeit - International / Deutsch“, Arduino Forum. Zugegriffen: 5. Februar 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://forum.arduino.cc/t/mikrosekunden-genauigkeit/273086?utm_source=chatgpt.com
- [36] „CONTROLLINO_MAXI_Datasheet.pdf“. Zugegriffen: 5. Februar 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.controllino.com/wp-content/uploads/2023/05/CONTROLLINO_MAXI_Datasheet.pdf
- [37] „tone() | Arduino Documentation“. Zugegriffen: 5. Februar 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://docs.arduino.cc/language-reference/en/functions/advanced-io/tone/>
- [38] B. Binert, „Definition des Wartungsmodus im Maschinenbau“, 23. Januar 2025.
- [39] „faulhaber-tutorial-stepper-motor-microstepping-de-grafik-002.jpg (1907×1394)“. Zugegriffen: 3. Februar 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://cdn.faulhaber.com/media/DAM/Images/Logos%20-%20Drawing/Tutorial/faulhaber-tutorial-stepper-motor-microstepping-de-grafik-002.jpg>
- [40] „JAT Informationsportal“, JAT Informationsportal. Zugegriffen: 3. Februar 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://jat-gmbh.info/deliverypublic/#/link?id=233&lang=de-DE>

- [41] „CONTROLLINO_MAXI_AUTOMATION_Pinout_Table.pdf“. Zugegriffen: 10. Februar 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.controllino.com/wp-content/uploads/2023/05/CONTROLLINO_MAXI_AUTOMATION_Pinout_Table.pdf?srsId=Afm-BOopxR0pXEgYncmKo47VVVFTVHZWuh3_FRGqEYpF7TT-QE74Gqa1v
- [42] „RS-150_DS-EN.pdf“. Zugegriffen: 5. Februar 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/D500/RS-150_DS-EN.PDF

Anhang A – Kapitel 2

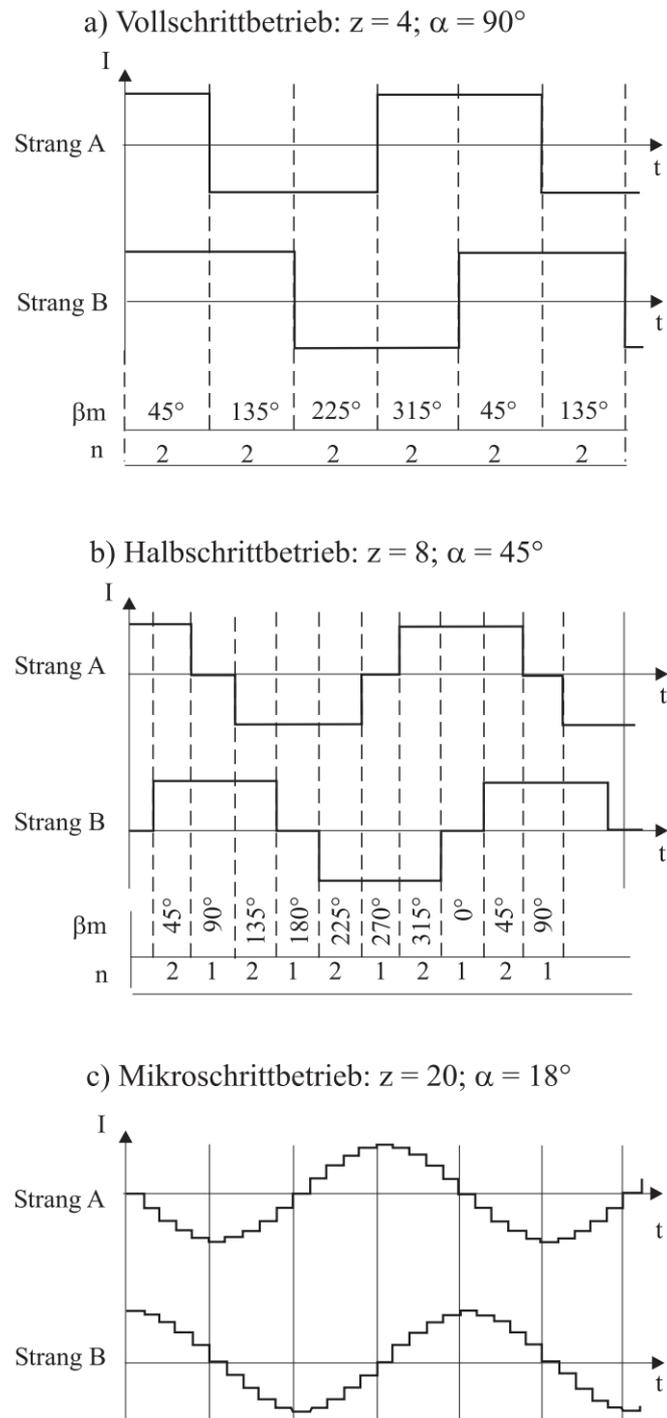


Abbildung A 1: Verschiedene Stromverläufe bei unterschiedlicher Ansteuerung [2]

A 2 Darstellung des Haltemoments

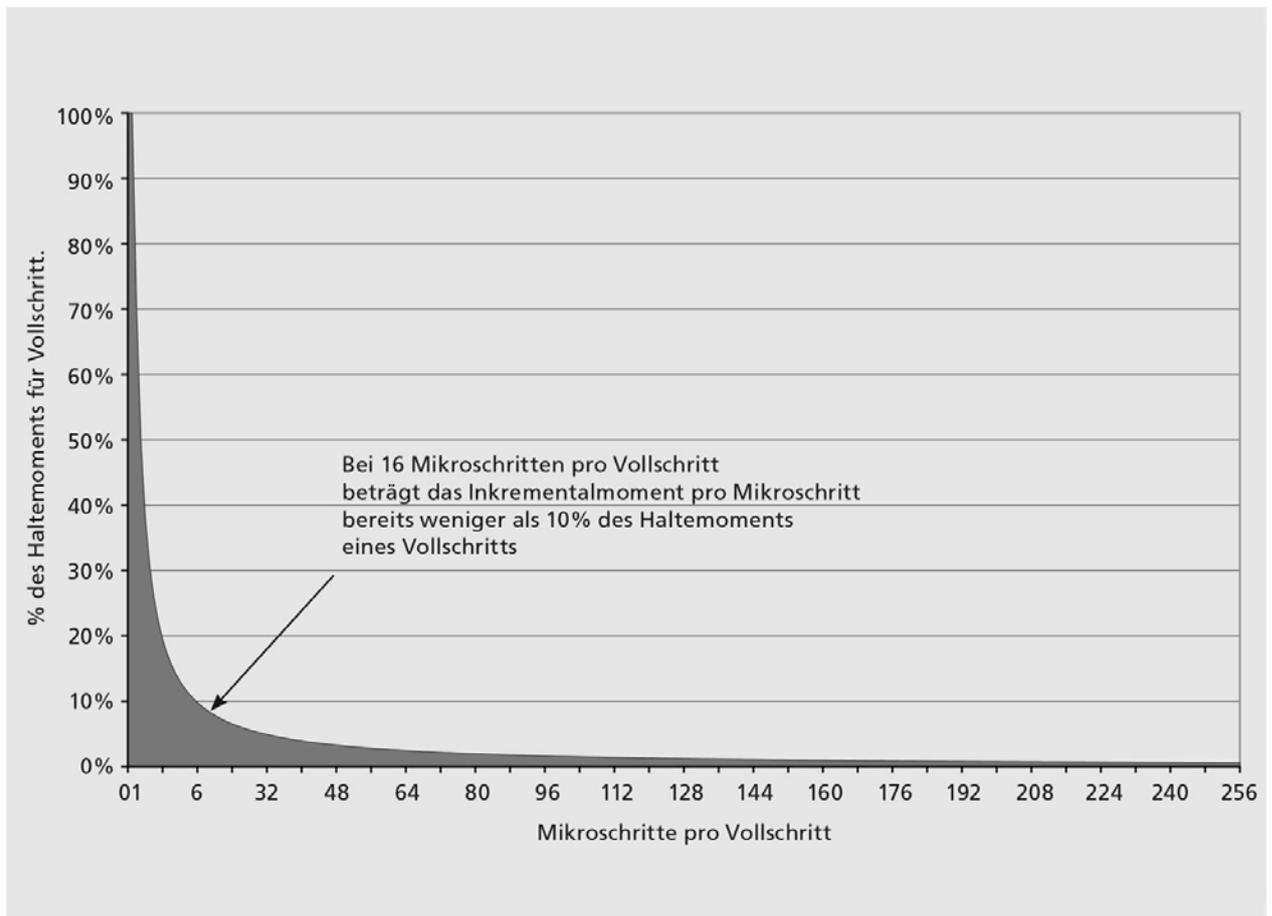


Abbildung A 2: Verlauf des Haltemoments [39]

Tabelle A 1: Risikobewertung

Nr.	Gefahrenstelle	Tätigkeit / Aufgabe / Situationsbeschreibung	Gefährdung		Ohne Maßnahme				Maßnahmen		Mit Maßnahme			
			Ursprung/ Faktor	Gefahrbringende Bedingung / Folgen	S	F x O	A	RPZ	Konstruktiv/ ggf. Normen	Schutzmaßnahmen	S	F x O	A	RPZ
1 Mechanische Gefährdungen														
1.1	In dem Zahnradgetriebe	Im Betriebszustand: Zeigen auf Zahnradverbindungen/ Beugen über Anlage	rotierende Teile	Einziehen der Fingers, Fangen von Bändern an Klamotten, Fangen von Haaren	8	5	6	240		Verwendung einer Acrylglasshaube	1	2	2	4
1.2	Entlag der Wellen	Im Betriebszustand: Fangen von Bändern an Klamotten-, Fangen von Haaren an Wellen	rotierende Teile	Einziehen von Körperteilen	8	5	6	240		Verwendung einer Acrylglasshaube	1	2	2	4
1.3	Im Bereich des Nussknackers	Im Betriebszustand: Beim Nuss einlegen, Herausnehmen	rotierende Teile	Klemmen der Finger	5	4	2	40		Verwendung einer Acrylglasshaube	1	2	2	4
1.4	Im Bereich des Riemengetriebe s	Im Betriebszustand: Beim Beugen über die Anlage	rotierende Teile	Einziehen von Haaren, Einklemmen von Finger zwischen Riemen und Riemenscheibe	8	5	6	240		Verwendung einer Acrylglasshaube	1	2	2	4
1.5	Im Bereich der Nussknacker- Scheibe	Im Betriebszustand: Beim zeigen auf Nussknacker-Scheibe	rotierende Teile	Klemmen oder Quetschen von Fingern in Löchern der Nussknacker-Scheibe	8	3	4	96		Verwendung einer Acrylglasshaube	1	2	2	4
2 Betrieb														
2.1	Um den Demonstrator	Beim Anlehnen an Demonstrator	Standsicherheit	Demonstrator rollt weg, daraufhin Stolpern bzw. in Anlage fallen	2	5	4	40	Tischwagen besitzt Feststellbre msen		2	5	4	40
2.2	Demonstrator Allgemein	Durch Stolpern oder Unachtsamer bewegung	Hervorstehende und Spitzwinklige Kanten	Durch Stolpern/ Stürzen auf Kanten Fallen	2	4	4	32		Verwendung einer Acrylglasshaube	2	4	4	32

Tabelle A 2: Bewertung der Schwere des Schadens (S) [18]

Bewertung der Schwere des Schadens (S)

Bewertung	Schwere	Auswirkungen, Schadensausmaß
10	sehr schwer	Schwerste Verletzungen mit bleibendem Schaden bzw. möglicherweise tödliche Verletzung. (z. B. Verlust von Hand, Arm, Bein, Augenlicht, Rückenverletzung, Schädel/Hirntrauma usw.)
8	schwer	Schwere Verletzung mit umfangreicher medizinischer Behandlung. Eventuell mit lang anhaltenden oder gar bleibendem Schaden in geringen Umfang. (z. B. Knochenbruch Bein/Arm/Hand, tiefe Schnitt-/Stichverletzungen, Verlust von Fingerkuppe/Zeh usw.).
5	mäßig	Verletzung, welche medizinischen Behandlung erfordert und zu temporären Einschränkungen führen kann, jedoch keine bleibenden Schäden zu erwarten. (z. B. gebrochener Finger, oberflächliche Schnitt-/Schürfwunde)
2	gering	Reversibel: Erste Hilfe mit anschließender kurzzeitiger Einschränkung (oberflächliche Schnitt- oder Schürfwunden)
1	keine	Keine Verletzung zu erwarten

Tabelle A 3: Ermittlung der Kombination aus Exposition (F) und Eintrittswahrscheinlichkeit (O) [18]

Ermittlung der Kombination aus Exposition (F) und Eintrittswahrscheinlichkeit (O)

Exposition und Eintrittswahrscheinlichkeit (F x O)					
Eintrittswahrscheinlichkeit (O) des gefährdenden Ereignisses in Bezug auf die Lebensphase	Gefährdungsexposition (F): Aufenthalt im Gefahrenbereich in % der Arbeitszeit/Schicht				
	100%	50%	25%	10%	5%
Sehr wahrscheinlich	10	10	9	9	8
Wahrscheinlich	10	9	8	7	6
Wenig wahrscheinlich	7	6	5	4	3
Unwahrscheinlich	5	4	3	2	1
Vernachlässigbar	3	2	2	1	1

Die Wahrscheinlichkeit des Eintretens des gefährdenden Ereignisses kann z. B. abgeschätzt werden auf der Basis von Unfallstatistiken, Beinahe-Unfällen, Bauteil-Ausfällen, Materialversagen, Überlastung, unerwartetem Anlaufen.

Tabelle A 4: Bewertung der Vermeidbarkeit des Schadens (A) [18]

Bewertung der Vermeidbarkeit des Schadens (A)

Vermeidbarkeit des Schadens (A)	Risikowahrnehmung und die Möglichkeit, der Gefahr auszuweichen		
	gut	mittel	schlecht
Geschwindigkeit des Auftretens			
L (langsam)	2	4	6
R (rasch)	4	6	8
P (plötzlich)	6	8	10

Bei wahrnehmbarem Risiko besteht die Möglichkeit, dem Schaden ganz oder teilweise auszuweichen. Wird das Risiko nicht wahrgenommen, besteht auch keine Möglichkeit, dem Risiko auszuweichen. Hierbei wird die Wahrnehmung durch die Sinne (z. B. hören, riechen, sehen, etc.) oder den räumliche Platz eingestuft. Dementsprechend wird für die Möglichkeit, dem Schaden auszuweichen, „gut“, „mittel“ oder „schlecht“ gewählt.

Anhang B – Kapitel 4

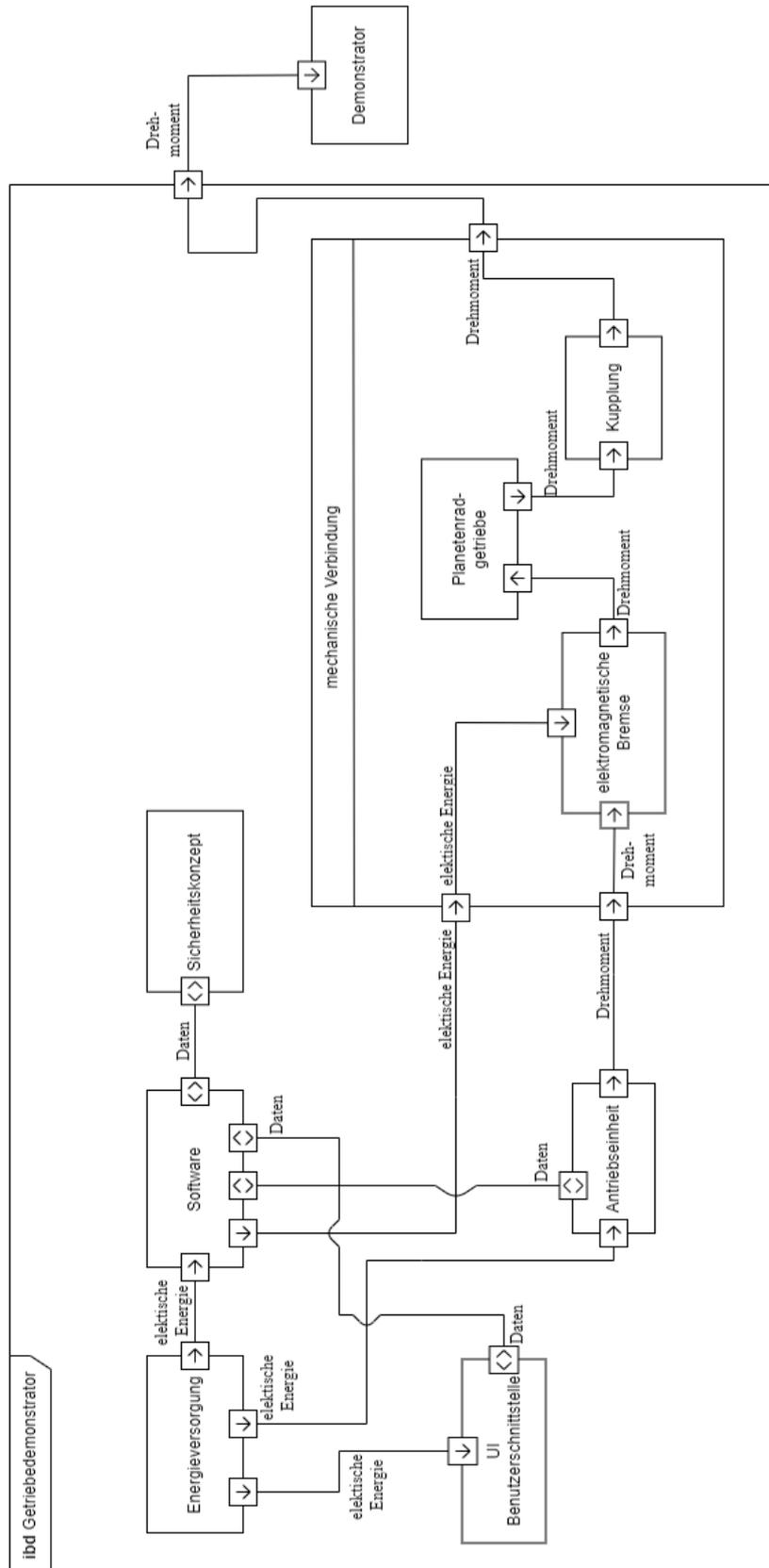


Abbildung B 1: internal Block Diagramm

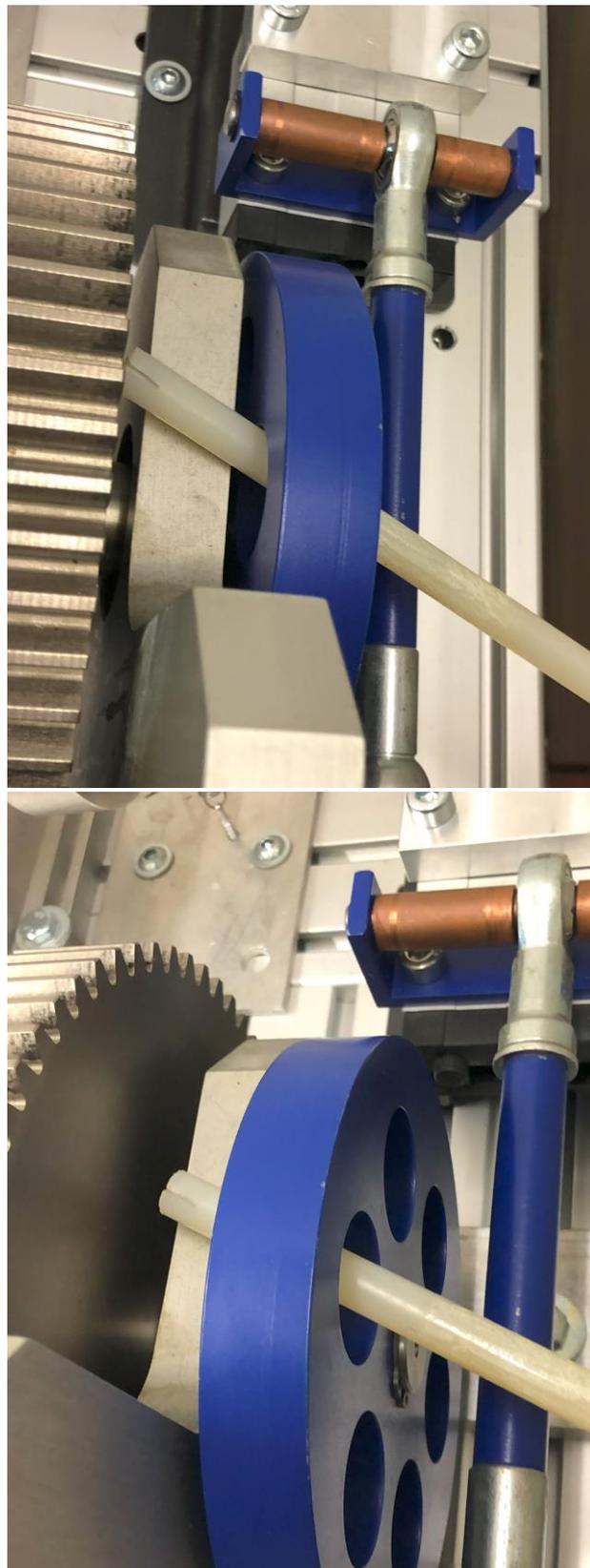


Abbildung B 2: Gefahr durch Nussknacker-Scheibe

Anhang C – Kapitel 5

Tabelle C 1: Stückliste

Pos.	Menge	Einheit	Benennung	Bemerkung	Preis
Elektrotechnik					
1	1	stck	Schaltnetzteil	150 W, 48 V, 3,3 A	26,95 €
2	1	stck	Controllino SPS	Controllino Maxi	Gestellt
3	1	stck	Motortreiber	DM542T	25,19 €
4	1	stck	Spannungswandler	Stepdown Konverter DC/DC 48V auf 12V 5A	15,46 €
5	1	stck	Spannungswandler	Step Down Konverter DC/DC 12V auf 9V 1,8A	1,95 €
6	1	stck	Schrittmotor	23S31 - 0250 - 0B000 - AA der Firma JAT(Jenaer Antriebstechnik)	Gestellt
7	1	stck	el. Mag. Bremse	39.16 00.08.100-1537 24V DC P = 14W	Gestellt
8	1	stck	Not-Aus-Druckschalter	22mm Roter Pilz 10A 660V	9,99 €
9	1	stck	Micro Endlagenschalter	Dreipoliger Einfachumschalter Langhebelrund 5A 250V	0,88
10	1	stck	LED	rot - d = 5mm	VORHANDEN
11	1	stck	LED	grün - d = 5mm	VORHANDEN
12	1	stck	Stufen-Drehschalter	3 Pole, 3 x 4 Stellungen Schaltstrom bei 250V - 0,15A	2,30 €
13	1	stck	Drehpotentiometer	Mono, 10 kOhm, 4mm, linear	2,30 €
14	1	stck	Wippschalter	EIN - AUS, BIS 16 (4) A 250 V AC	2,10 €
15	1	stck	Netzkabel mit Schutzkontaktstecker	3 m, schw, offenes Ende	4,80 €
16	1	stck	Flachsicherung	2A	0,38 €
17	1	stck	Sicherungshalter Flachsicherung	miniOTO, 30 A, 58 V, low Profile, IP55	2,60 €
18	2	stck	LCD Display	Display, 16 x 2 Zeichen, blau	5,80 €
19	5	m	0,75 mm ² Kabel		VORHANDEN
20	5	m	0,25 mm ² Kabel		VORHANDEN
21	2	m	1,00 mm ² Kabel		VORHANDEN
22	1	stck	induktiver Näherungssensor	3-Draht, M12, Mont.bündig, PNP, NO	22,10 €
23	1	stck	Arduino Nano	ATmega328, Mini-USB	11,99 €
24			Protoshield mit Schraubklemmen	für Arduino Nano	3,30 €
25	1	stck	Lochrasterplatine	doppelseitig, 80 x 20 mm	1,15 €
26	27	stck	Durchgangsklemmen für Hitschiene	(20 stck pro set), 0,08-4 mm ²	13,99 €
27	div.	stck	Aderendhülsen	Verschiedenste Größen	VORHANDEN
28	8	stck	Widerstände	220 Ohm - 2x 5K1 Ohm - 1x 10K Ohm - 5x	VORHANDEN
29	1	stck	Freilaufdiode	1N4007	VORHANDEN
30	3	stck	Flachstecker	Verschiedenste Größen	VORHANDEN

Pos.	Menge	Einheit	Benennung	Bemerkung	Bemerkung
Mechanik					
31	1	stck	Planetenradgetriebe	8GP30-040- -005S2PF i= 005, Firma: B&R-Automation	Gestellt
32	1	stck	Klauenkupplung	Bohrungsdurchmesser: 25 mm auf 25 mm aus C45 Stahl (DIN EN 10083- 2)	25,49 €
33	1	stck	Motorhalter für Nema 23	(Modifiziert) Stahl, lackiert	7,30 €
34	1	stck	Pultgehäuse	161 x 97 x 60 mm	7,30 €
35	14	stck	Schraube	Linsenblechschraube 4,8x13mm	VORHANDEN
36	4	stck	Schraube	M6x30 Zylinderkopfschraube	VORHANDEN
37	8	stck	Mutter	M6	VORHANDEN
38	10	stck	Schraube	M6x15 Zylinderkopf Innensechskant	VORHANDEN
39	1	stck	Flügelmutter	M6	VORHANDEN
40	1	stck	Schraube	M6x30 Sechskantschraube	VORHANDEN
41	5	stck	Schraube	M8x15	VORHANDEN
42	4	stck	Schraube	M4x10mm Innensechskant, Linsenkopf (Verbindung zw. Stepper & Bremse)	VORHANDEN
43	4	stck	Schraube	M4x16mm Innensechskant, Linsenkopf (Verbindung zw. Bremse & Getriebe)	VORHANDEN
44	8	stck	Schraube	M3x12mm Innensechskant, Linsenkopf (Fixierung LCD-Displays)	VORHANDEN
45	8	stck	Mutter	M3 (Fixierung LCD-Displays)	VORHANDEN
46	8	stck	Federring	4mm	VORHANDEN
47	9	stck	item Nutensteine	Nut 8 M8	VORHANDEN
48	4	stck	Nutenstein	M6 glatt I-Typ Nut 8	1,56 €
49	1	stck	Schaltschrank	Leergehäuse Größe: 300x400x170 (30x40x17)	22,19 €
50	40	cm	Hutschiene	DIN-Trageschiene Metall, 210 x 35 x 7,5 mm	3,35 €
51	1	stck	Acrylglasshaube	Acrylglasshaube Größe: 620 x 510 x 260 mm	144,19 €
52			3D Druck-Komponenten	- Sensorhalterung - Bedienpultplatte mit Auschnitten - 4 Acrylhaubenfüße	VORHANDEN
53	1	stck	Rohclip Doppelt	(Modifiziert) Fängt Schaltschrank gegen Schwingungen ab	VORHANDEN
54	1	stck	Winkel, weiß	(Modifiziert) Verlängerung für Rohrclip	VORHANDEN
55	2	stck	Schubladengriff	Zur besseren Handhabung der Acrylglasshaube	VORHANDEN
56	4	stck	Schraube	M4x10mm	VORHANDEN
57	4	stck	Unterlegscheibe	4mm	VORHANDEN
58	1	stck	Passfeder	Größe: 3x3x18 mm	VORHANDEN
Gesamtkosten					364,61 €

Merkmalbezeichnung	Wert
Alternative WEB-Material...	8GP30-040hh005klmm
Bauserie	8GP30 STD KOAXIAL IMB14 MONT
Baugröße	Baugröße 040
Übersetzung	5
Übersetzung exakt	5,000
Nennabtriebsdrehmoment	13,0 Nm
max. Abtriebsdrehmome...	21,0 Nm
Verdrehspiel	15 arcmin
Verdrehsteifigkeit	1,0 Nm/arc
L6 Abstand v. Wellenend..	2,5 mm

Ø Antriebsdrehzahl 100% T2nenn	5.000 min-1
Mittlere Antriebsdrehzahl 50%	5.000 min-1

maximale Antriebsdrehzahl	18.000 min-1
---------------------------	--------------

Das entspricht den Daten der (ähnlichen) Serienmodelle: [8GP40-040hh005klmm](#) | B&R Industrial Automation.

Abbildung C 2: Screenshot vom Kundenservice mit Daten vom Planetengetriebe der Firma B&R

Ein paar Daten zur Bremse kann ich Ihnen jedoch nennen:

Leistung : 14W

Spannung : 24VDC

Nabenbohrung : Ø10H7 ohne Nut

CSA Ausführung

- Kugellageraußenring mit Sicherungsring DIN 472-26x1,2 gesichert
ohne Reibscheibe, ohne Beistellung

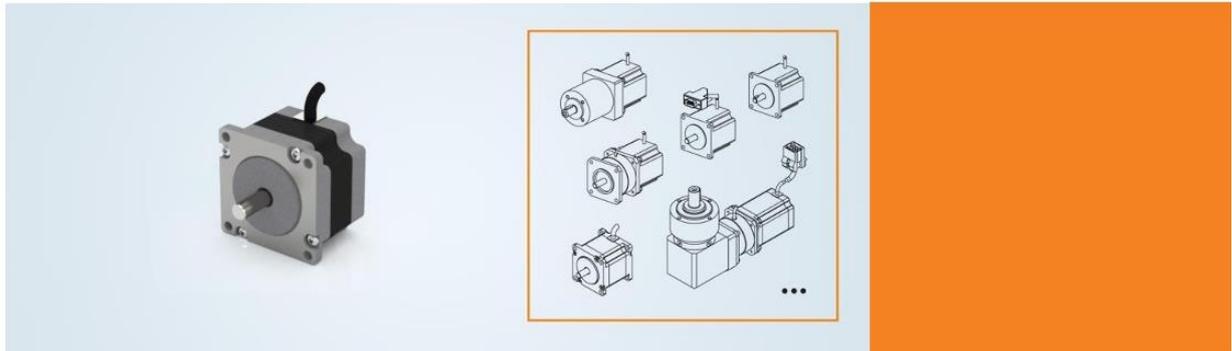
mit: Concab Kabel L=2200mm: Meinhardt 2 x 034 QMM 22AWG E17203

KEB S type 2464 AWM I A/B II A/B F1 300V/80°C CW (Datum)

Aderfarben: braun und grauschwarz

Abbildung C 1: Screenshot vom Kundenservice mit Daten der elektromagnetische Bremse der Firma KEB

2-Phasen-Schrittmotoren Baureihe 23S



Microstep-Ansteuerung

Hohe Positioniergenauigkeit und sanfter Motorlauf



Vielfältige mechanische Optionen

Optimale Anpassung an Ihre Applikation, schon ab Stückzahl 1



Zuverlässig und kosteneffizient

Flanschmaß:

56 mm (NEMA 23)

Zwischenkreisspannung:

24 ... 60 V_{DC}

Auswahl mechanischer Optionen:

Haltebremse
Getriebe
Passfeder
Wellenabgang B-seitig
Schutzart IP65
Verschiedene Steckerkonfigurationen
Kundenspezifische Kabellängen

Passende Ansteuerungen:

ECOMODUL
ECOMiniDual
ECOVARIO® 114(D)

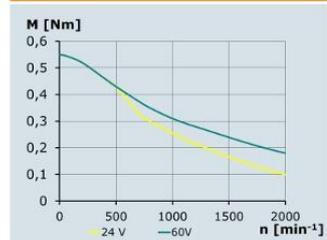


2-Phasen-Schrittmotoren Baureihe 23S

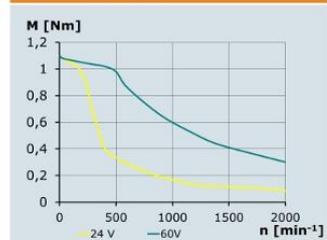
→ Technische Daten

		23S16-0250-00000-AA	23S21-0250-00000-AA	23S31-0250-00000-AA	23S31-0420-00000-AA	23S31-0650-80000-AA
Bemessungswerte						
Maximales Haltemoment	Nm	0,55	1,1	1,75	1,75	1,88
Stillstandsstrom (pro Phase)*	A_{eff}	2,5	2,5	2,5	4,2	6,5
bei Zwischenkreisspannung	V_{DC}	60				
*) Montageflansch 55 x 55 x 20 mm.						
Technische Daten Motor						
Vollschrittwinkel	°	1,8				
Wicklungswiderstand (bei 25 °C)	Ω	0,75	1,2	1,6	0,55	0,36
Wicklungsinduktivität (bei 25 °C, 1 kHz)	mH	1,75	4	6	1,9	1,1
Motorträgheitsmoment	$kgm^2 \cdot 10^{-3}$	0,01	0,026	0,046	0,046	0,046
Restdrehmoment	Nm	0,02	0,04	0,07	0,07	0,07
Isolationswiderstand**	M Ω	min. 100				
Isolationsklasse		B, 130 °C				
Max. Zwischenkreisspannung	V_{DC}	60				
Masse	kg	0,5	0,7	1	1	1,1
Motorlänge (L)	mm	41	54	76	76	80
Umgebungstemperatur	°C	-20 ... +40				
Max. Motortemperatur	°C	+80				
Schutzart (ohne A-Seite)	IP	30				
Max. Axialbelastung	N	80				
Max. Radialbelastung	N	100				
Max. Axialbelastung Montage	N	80				
**) Isolationswiderstand bei 500 V_{DC} und 20 °C						

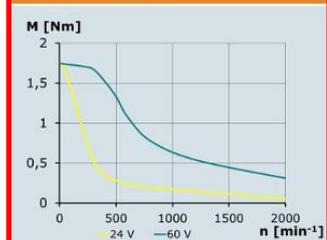
Kennlinie 23S16-0250



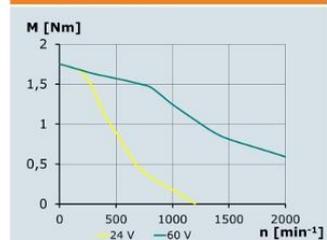
Kennlinie 23S21-0250



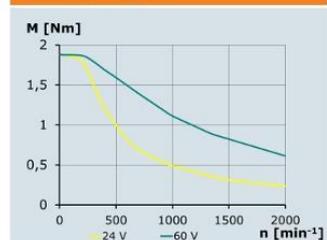
Kennlinie 23S31-0250



Kennlinie 23S31-0420



Kennlinie 23S31-0650

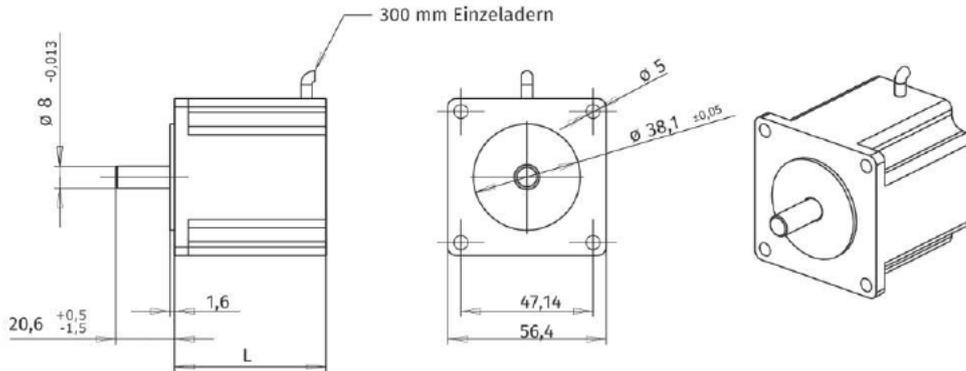


Alle Kennlinien mit Servoverstärker ECOVARIO® 114D.

2-Phasen-Schrittmotoren Baureihe 23S

→ Abmessungen

23S16-0250, 23S21-0250, 23S31-0250, 23S31-0420:



23S31-0650:

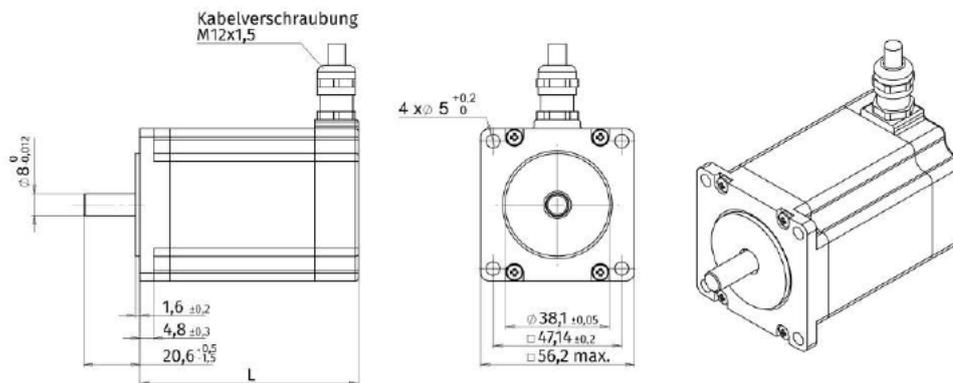


Abbildung C 3: Datenblatt Schrittmotor JAT [40]



Controllino MAXI | 100-100-00

GENERAL

Standard	EN61010-1 EN61010-2-201 EN61131-2
Dimensions (W × H × D)	72x90x62mm
Weight	250g
Mounting	Top hat rail EN50022, 35mm

ENVIRONMENTAL CONDITIONS

Operating ambient temperature	0°C – 55°C
Relative humidity – non-condensing	80 % for temp. up to 31 °C, decreasing linearly to 50 % relative humidity at 55 °C
Pollution Degree	PD2
Altitude	up to 2000m AMSL
Vibration (5 ≤ f ≤ 9 Hz)	1,75 mm amplitude sinus 3,5 mm amplitude random
Vibration (9 ≤ f ≤ 150 Hz)	0,5 g acceleration sinus 1,0 g acceleration random
Transport and Storage	-20°C – +70°C 10 to 90% no condensation Altitude 3000m AMSL
Shock response	15g, 11ms half sinus all 3 axes

I/O

Supply voltage	12V or 24V
USB (Power for programming only)	USB-B, 2.0
Ethernet	RJ45, 10/100Mbps
RS485 (no termination inside)	250kb
Inputs, no galvanic insulation	12
Common analog/digital	10
Fixed digital, ext. Interrupt usable	2
Digital Outputs, no galvanic insulation	12
Relay Outputs, galvanic insulation	10
PIN Header, no galvanic insulation	
Logic level I/Os	42, partially parallel to terminal I/Os
Analog 0-5V Inputs	14
Communication	SPI, 2xUART, I2C, Reset
Internal Power	+3,3V, +5V, ARef, GND

TERMINAL CAPACITIES

Relay Output, Power Input	2,5mm ² (24-12AWG)
Strip length	6-7mm
Max. tightening torque	0,5Nm
Digital, Analog Input Output	1,5mm ² (30-16AWG)
Strip length	5-6mm
Max. tightening torque	0,2Nm
Pin header connector	2x 26 Pin, Dual row, 2.54 pitch

PROTECTION

ESD HBM Class 0	Contact discharge: ±4kV Air discharge: ±8kV
Supply input over current protection	Internal Fuse 20A
Relay Output	External Fuse required
Digital Output	Overload, short circuit, ESD
Signal Input	Overvoltage, ESD
Pin header connector	ESD

Current +5V, +3,3V

total 200mA, resettable fuse

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

	Condition	Value
Supply voltage	12V range	10,2V – 15,0V
	24V range	20,4V – 30,0V
Signal input low level	12V range	0V – 3,6V
	24V range	0V – 7,2V
Signal input high level	12V range	9V – 13,2V
	24V range	18V – 26,4V
Analog signal input	12V range	0 – 13,2V
	24V range	0 – 26,4V
Signal input current	max. current	< 3mA
Logic "0" level	@ pin header	0V – 1,5V
Logic "1" level	@ pin header	3V – 5,5V
Signal output low level	12V range	0V – 2,4V
	24V range	0V – 4,8V
Signal output high level		Vin – 10%
Signal output – PWM functionality	Duty cycle	5% - 95%
Relay output, Contact rating	Resistive	6A 250V AC /
	Load	30V DC
Common Relay terminal	max. current	6A
Galvanic insulation	coil to contact	3000VAC 1min
Relay ON in case of PWM functionality	Duty cycle	> 30%

LED SIGNALIZATION

Power LEDs coding only USB powered	input voltage out of range	12V green, 24V green
	input voltage 10.2V – 15,0V	12V orange, 24V orange
	input voltage 20.4V – 30,0V	12V green, 24V orange
	input voltage < 7V	12V orange, 24V green
	input voltage < 7V	both LEDs off
Device in reset state	Reset LED yellow	
Device in run state	Reset LED off	
Signal input at high (logic 1) level	Corresponding LED green	
Signal input at low (logic 0) level	Corresponding LED off	
Signal input in use as analog input	Corresponding LED green on when input level reach high (logic 1) state	
Signal/Relay output set to active	Corresponding LED green	
Signal/Relay output set to inactive	Corresponding LED off	

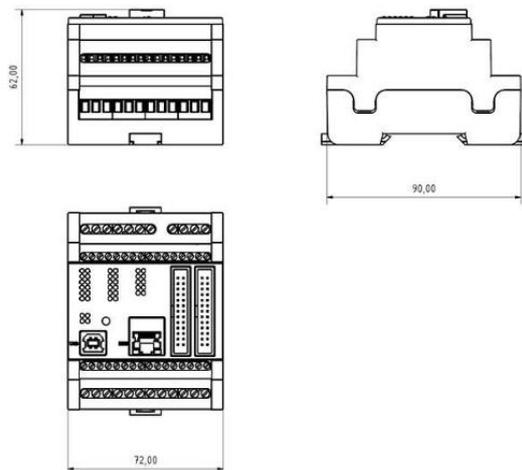
PHYSICAL DIMENSIONS

Abbildung C 4: Datenblatt Controllino MAXI [36]



150W Single Output Switching Power Supply

RS-150 series



■ Features :

- Protections: Short circuit / Overload / Over voltage
- Cooling by free air convection
- LED indicator for power on
- 100% full load burn-in test
- All using 105°C long life electrolytic capacitors
- Withstand 300VAC surge input for 5 second
- High operating temperature up to 70°C
- Withstand 5G vibration test
- High efficiency, long life and high reliability
- 3 years warranty



SPECIFICATION

MODEL	RS-150-3.3	RS-150-5	RS-150-12	RS-150-15	RS-150-24	RS-150-48	
OUTPUT	DC VOLTAGE	3.3V	5V	12V	15V	24V	48V
	RATED CURRENT	30A	26A	12.5A	10A	6.5A	3.3A
	CURRENT RANGE	0 ~ 30A	0 ~ 26A	0 ~ 12.5A	0 ~ 10A	0 ~ 6.5A	0 ~ 3.3A
	RATED POWER	99W	130W	150W	150W	156W	158.4W
	RIPPLE & NOISE (max.) Note.2	80mVp-p	80mVp-p	120mVp-p	120mVp-p	120mVp-p	200mVp-p
	VOLTAGE ADJ. RANGE	3.2V ~ 3.5V	4.75 ~ 5.5V	11.4 ~ 13.2V	14.25 ~ 16.5V	22.8 ~ 26.4V	45.6 ~ 52.8V
	VOLTAGE TOLERANCE Note.3	±3.0%	±2.0%	±1.0%	±1.0%	±1.0%	±1.0%
	LINE REGULATION Note.4	±0.5%	±0.5%	±0.5%	±0.5%	±0.5%	±0.5%
	LOAD REGULATION Note.5	±2.0%	±1.0%	±0.5%	±0.5%	±0.5%	±0.5%
	SETUP, RISE TIME	800ms, 20ms/230VAC 1200ms, 30ms/115VAC at full load					
HOLD UP TIME (Typ.)	28ms/230VAC 20ms/115VAC at full load						
INPUT	VOLTAGE RANGE	88 ~ 132VAC / 176 ~ 264VAC selected by switch		248 ~ 373VDC(Withstand 300VAC surge for 5sec. Without damage)			
	FREQUENCY RANGE	47 ~ 63Hz					
	EFFICIENCY(Typ.)	74%	78%	83%	84%	86%	86%
	AC CURRENT (Typ.)	3A/115VAC 2A/230VAC					
	INRUSH CURRENT (Typ.)	COLD START 40A/230VAC					
	LEAKAGE CURRENT	<2mA / 240VAC					
PROTECTION	OVERLOAD Note.8	110 ~ 150% rated output power Protection type : Hiccup mode, recovers automatically after fault condition is removed					
	OVER VOLTAGE	3.8 ~ 4.45V	5.75 ~ 6.75V	13.8 ~ 16.2V	17.25 ~ 20.25V	27.6 ~ 32.4V	55.2 ~ 64.8V
ENVIRONMENT	WORKING TEMP.	-25 ~ +70°C (Refer to "Derating Curve")					
	WORKING HUMIDITY	20 ~ 90% RH non-condensing					
	STORAGE TEMP., HUMIDITY	-40 ~ +85°C, 10 ~ 95% RH					
	TEMP. COEFFICIENT	±0.03%/°C (0 ~ 50°C)					
	VIBRATION	10 ~ 500Hz, 5G 10min./1cycle, period for 60min. each along X, Y, Z axes					
SAFETY & EMC (Note 6)	SAFETY STANDARDS	UL62368-1, TUV EN62368-1, EAC TP TC 004 approved					
	WITHSTAND VOLTAGE	I/P-O/P:3KVAC I/P-FG:2KVAC O/P-FG:0.5KVAC					
	ISOLATION RESISTANCE	I/P-O/P, I/P-FG, O/P-FG:100M Ohms / 500VDC / 25°C / 70% RH					
	EMC EMISSION	Compliance to EN55032 (CISPR32) Class B, EN61000-3-2,-3, EAC TP TC 020					
OTHERS	EMC IMMUNITY	Compliance to EN61000-4-2,3,4,5,6,8,11, EN61000-6-2 (EN50082-2), heavy industry level, criteria A, EAC TP TC 020					
	MTBF	244KHrs min. MIL-HDBK-217F (25°C)					
	DIMENSION	199*98*38mm (L*W*H)					
NOTE	PACKING	0.7Kg; 20pcs/14Kg/0.8CUFT					
		1. All parameters NOT specially mentioned are measured at 230VAC input, rated load and 25°C of ambient temperature. 2. Ripple & noise are measured at 20MHz of bandwidth by using a 12" twisted pair-wire terminated with a 0.1uf & 47uf parallel capacitor. 3. Tolerance : includes set up tolerance, line regulation and load regulation. 4. Line regulation is measured from low line to high line at rated load. 5. Load regulation is measured from 0% to 100% rated load. 6. The power supply is considered a component which will be installed into a final equipment. All the EMC tests are been executed by mounting the unit on a 360mm*360mm metal plate with 1mm of thickness. The final equipment must be re-confirmed that it still meets EMC directives. For guidance on how to perform these EMC tests, please refer to "EMI testing of component power supplies." (as available on http://www.meanwell.com) 7. Length of set up time is measured at cold first start. Turning ON/OFF the power supply very quickly may lead to increase of the set up time. 8. Extra consideration should be taken when selecting output wiring for 3.3V and 5V models. This is to prevent the protection modes for overload and short circuit from becoming constant power. 9. The ambient temperature derating of 3.5°C/1000m with fanless models and of 5°C/1000m with fan models for operating altitude higher than 2000m(6500ft).					

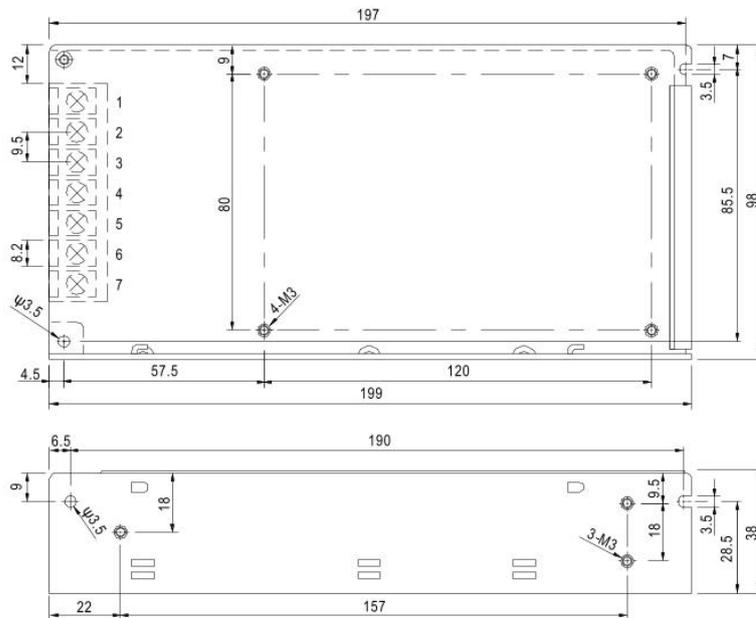


150W Single Output Switching Power Supply

RS-150 series

■ Mechanical Specification

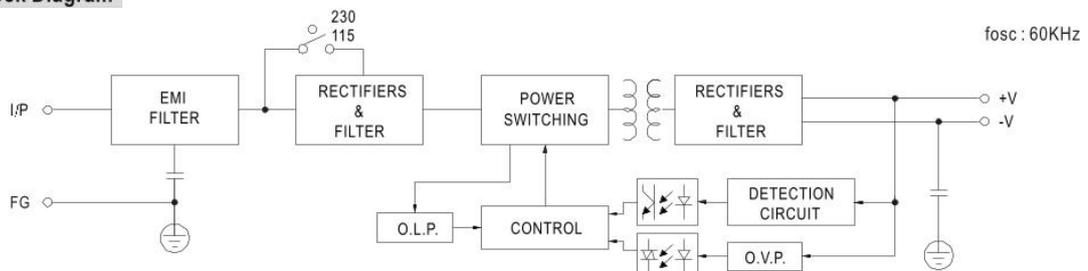
Case No. 902A Unit:mm



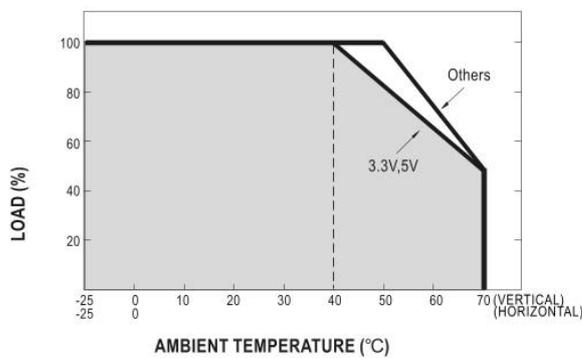
Terminal Pin No. Assignment

Pin No.	Assignment	Pin No.	Assignment
1	AC/L	4,5	DC OUTPUT -V
2	AC/N	6,7	DC OUTPUT +V
3	FG \pm		

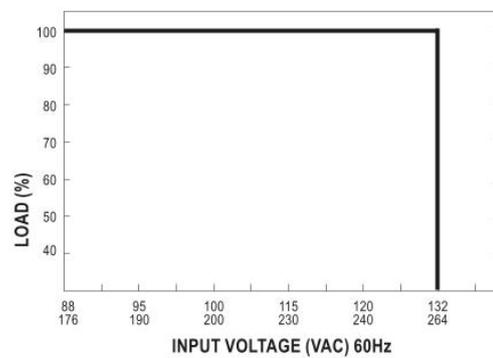
■ Block Diagram



■ Derating Curve



■ Static Characteristics

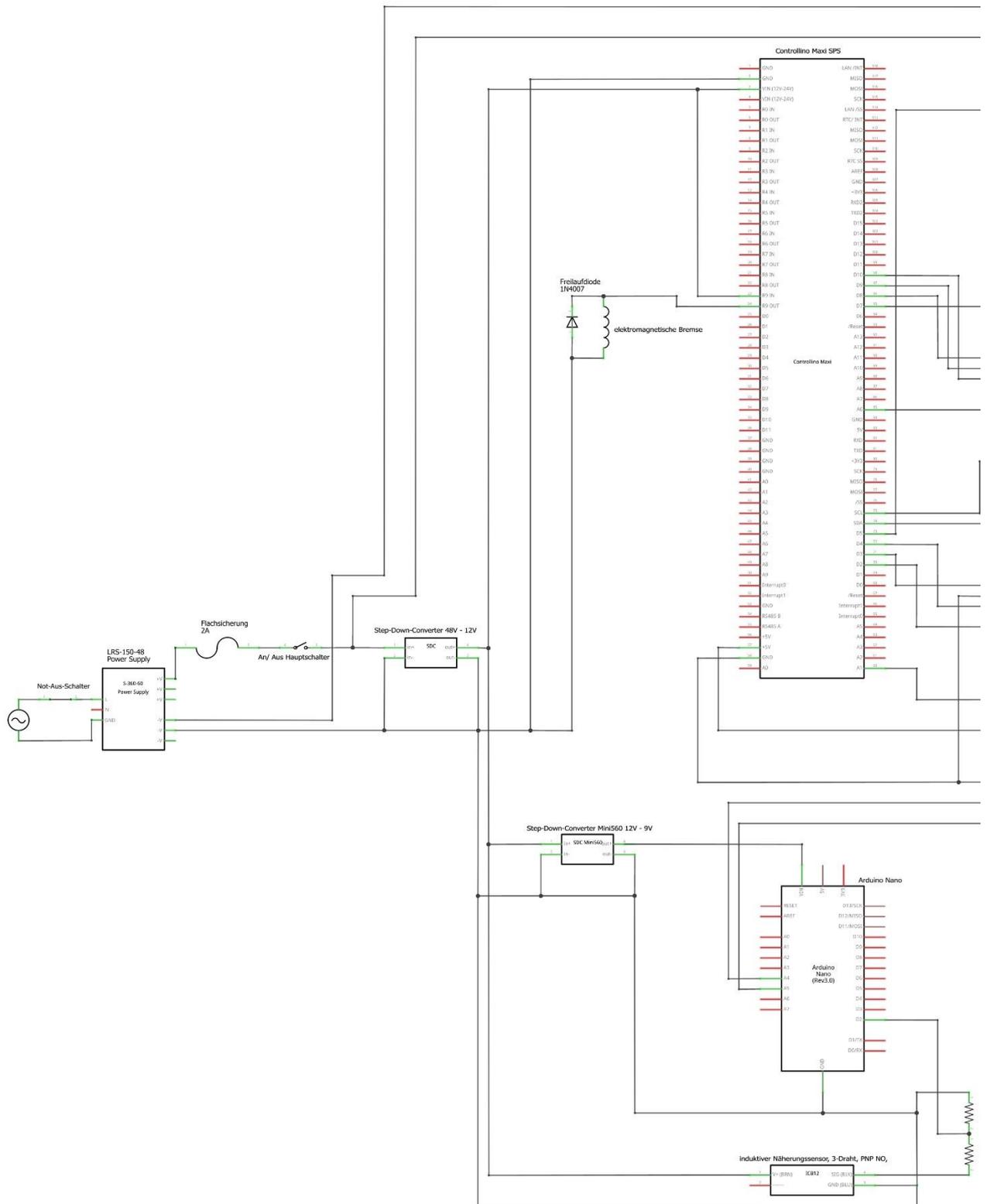


File Name:RS-150-SPEC 2019-07-11

Abbildung C 6: Datenblatt Netzteil [42]

Tabelle C 2: Drehzahltable

Schrittfrequenz Schritte/sek	n in [U/sek]	n in [U/min]	Pulsfrequenz f [Hz]	Periodendauer T in [sek]	Periodendauer T in [us]	Ausgangsdrehzahl Getriebe in U/min	Ausgangsdrehzahl Getriebe in U/sek
10	0,05	3	10	0,100000	100000,000	0,6	0,01
20	0,1	6	20	0,050000	50000,000	1,2	0,02
40	0,2	12	40	0,025000	25000,000	2,4	0,04
60	0,3	18	60	0,016667	16666,667	3,6	0,06
80	0,4	24	80	0,012500	12500,000	4,8	0,08
100	0,5	30	100	0,010000	10000,000	6	0,1
120	0,6	36	120	0,008333	8333,333	7,2	0,12
150	0,75	45	150	0,006667	6666,667	9	0,15
200	1	60	200	0,005000	5000,000	12	0,2
400	2	120	400	0,002500	2500,000	24	0,4
500	2,5	150	500	0,002000	2000,000	30	0,5
600	3	180	600	0,001667	1666,667	36	0,6
650	3,25	195	650	0,001538	1538,462	39	0,65
714,29	3,5715	214,287	714,2857143	0,001400	1400,000	42,8574	0,71429
800	4	240	800	0,001250	1250,000	48	0,8
1000	5	300	1000	0,001000	1000,000	60	1
1200	6	360	1200	0,000833	833,333	72	1,2
1400	7	420	1400	0,000714	714,286	84	1,4
1600	8	480	1600	0,000625	625,000	96	1,6
1800	9	540	1800	0,000556	555,556	108	1,8
2000	10	600	2000	0,000500	500,000	120	2
2200	11	660	2200	0,000455	454,545	132	2,2
2400	12	720	2400	0,000417	416,667	144	2,4
2500	12,5	750	2500	0,000400	400,000	150	2,5
2600	13	780	2600	0,000385	384,615	156	2,6
2800	14	840	2800	0,000357	357,143	168	2,8
3000	15	900	3000	0,000333	333,333	180	3
3200	16	960	3200	0,000313	312,500	192	3,2
3400	17	1020	3400	0,000294	294,118	204	3,4
3600	18	1080	3600	0,000278	277,778	216	3,6
3800	19	1140	3800	0,000263	263,158	228	3,8
4000	20	1200	4000	0,000250	250,000	240	4
4200	21	1260	4200	0,000238	238,095	252	4,2
4400	22	1320	4400	0,000227	227,273	264	4,4
4600	23	1380	4600	0,000217	217,391	276	4,6
4800	24	1440	4800	0,000208	208,333	288	4,8
5000	25	1500	5000	0,000200	200,000	300	5
5200	26	1560	5200	0,000192	192,308	312	5,2
5400	27	1620	5400	0,000185	185,185	324	5,4
5600	28	1680	5600	0,000179	178,571	336	5,6
5800	29	1740	5800	0,000172	172,414	348	5,8
6000	30	1800	6000	0,000167	166,667	360	6
6200	31	1860	6200	0,000161	161,290	372	6,2
6400	32	1920	6400	0,000156	156,250	384	6,4
6600	33	1980	6600	0,000152	151,515	396	6,6



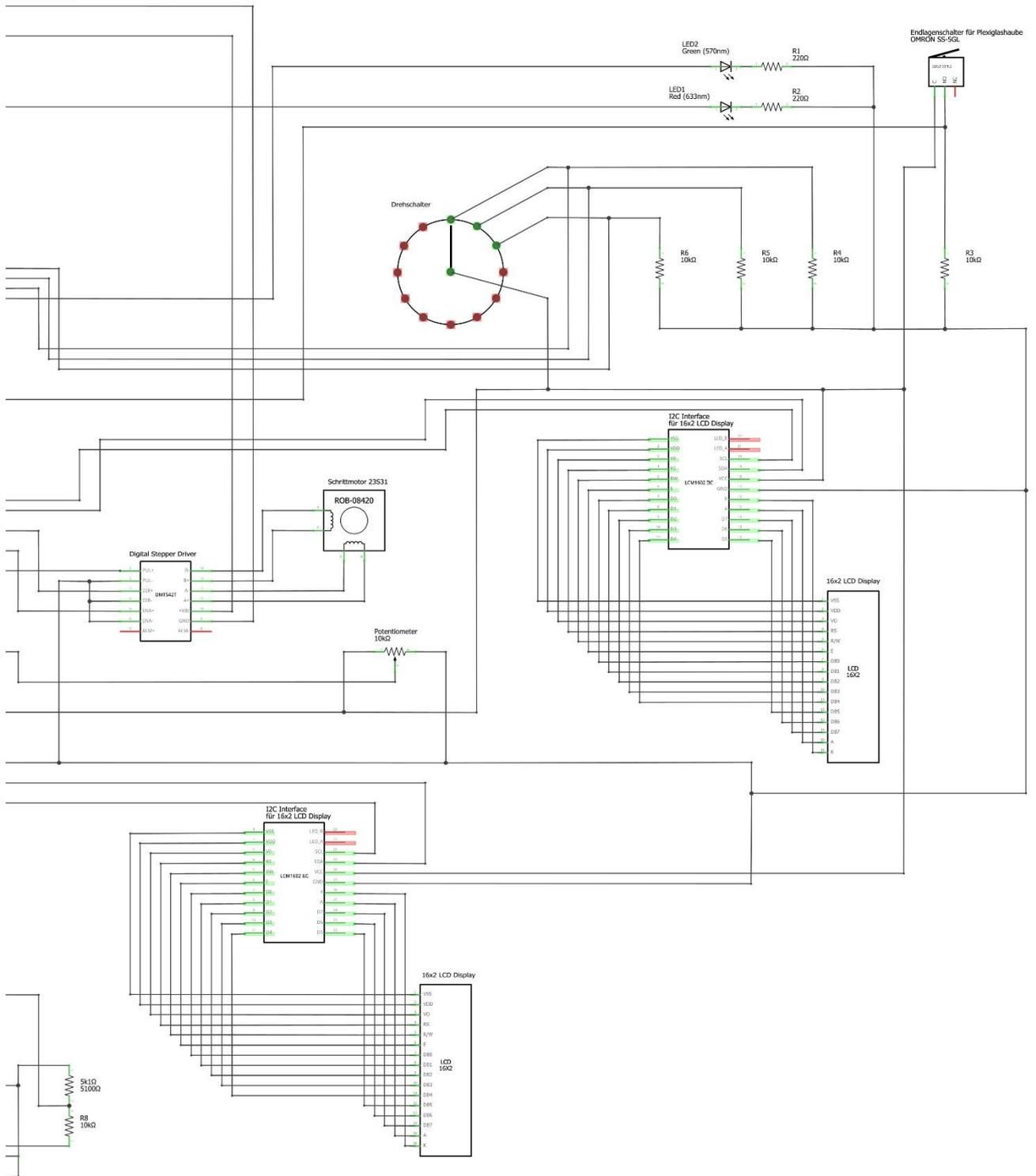


Abbildung C 7: Stromlaufplan

```

/*
  Name: Max Töllner
  Fakultät: Technik und Informatik
  Department: Fahrzeug und Flugzeugbau
  Der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
  Bachelorarbeit: Konzeption, Implementierung und Inbetriebnahme
                  einer Schrittmotorbasierten Antriebseinheit eines Getriebede-
monstrators
*/
//----- Hauptprogramm für Controllino -----

// Einbinden von Bibliotheken
#include <AccelStepper.h>
// #include <elapsedMillis.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
// #include <SPI.h>
#include <Controllino.h>
#include <stdio.h>

// ----- DEFINIEREN VON PRÄPROZESSORVARIABLEN -----
// ----- LCD Display -----
#define LEDLINE 16
// ----- Motortreiber -----
// Definiere den Motortreiber-Typ
#define DRIVER 1

// ----- DEFINIEREN VON KONSTANTEN VARIABLEN -----
// ----- LCD Display -----
const int ledScrollSpeed[2]={225,225};           // je höher die
Zahl, desto langsamer
const boolean ledScrollDir[2]={true,true};       // true = rechts-
>links; false = links->rechts
bool DisplayClearFlag = false;                   // Markeirt den
beschriebenen Zustand vom Display

// ----- Motortreiber -----
// Pins für den DM542T
const int PUL = CONTROLLINO_PIN_HEADER_DIGITAL_OUT_01; // STEP Signal
(PUL+) Pinout Table Blau (Arduino) 3
const int DIR = CONTROLLINO_PIN_HEADER_DIGITAL_OUT_02; // DIRECTION
(DIR+) Pinout Table Blau (Arduino) 4
const int ENA = CONTROLLINO_PIN_HEADER_DIGITAL_OUT_00; // Enable Pin
(ENA+) Pinout Table Blau (Arduino) 2
// ----- Potentiometer -----
// Pins für Poti
const int Poti = A1; // Einlesen des Spannungswertes am Potentiometer auf
PIN A1
int potiWert = 0; // Poti-Wert initial auf 0 setzen
float potiwertAnzeige = 0; // variable für seriellen Monitor definieren

```

```

// ----- Drehschalter -----
const int schalterstellung[] = {8,9,10};           // hier werden
Schalterstellungen mit jeweiligen pins verbunden
int drehschalterstellung = 0;           // Variable für aktuelle Schalterstellung
int drehschalterstellungAlt = 15;       // Variable zum
speichern einer alten Schalterstellung 15 willkürlich gewählt
unsigned long schaltzeitpunkt = 0;
int aktuellesProgramm = 4;
bool programmFlag[3] = {false, false, false};

// ----- Microschalter Plexiglashaube-----
const int PlexiTaster = CONTROLLINO_PIN_HEADER_DIGITAL_OUT_04; //Pinout
Table Blau (Arduino) PIN 6;

// ----- Relais Controllino Maxi ----- !! Relaisansteuerung geht nur mit 12V
oder 24V !!
const int relayPin = CONTROLLINO_RELAY_00;       // Relais 0 (R0)
auf Block A Pinout Table Blau (Arduino) 22

// ----- LED's -----
int LEDrot = CONTROLLINO_PIN_HEADER_DIGITAL_OUT_03; // Pinout Table
Blau (Arduino) PIN 5
int LEDgruen = CONTROLLINO_PIN_HEADER_DIGITAL_OUT_05; // Pinout Table
Blau (Arduino) PIN 7

// Initialisieren des Schrittmotors
AccelStepper stepper(DRIVER, PUL, DIR);

// Initialisieren des LCD Displays
LiquidCrystal_I2C lcd = LiquidCrystal_I2C(0x27, 16, 2);
// ----- INITIALISIERUNG VON FUNKTIONEN -----
// ----- Funktionen für Drehschalter -----
void Drehschalterauswahl(){
    // in while drin bleiben, so lange alte Schalterstellung ungleich aktuelle
Schalterstellung und Schaltzeitpunkt zwischen Stellungen > 1sek.
    // (zum entprellen und verhindert zu schnelles erkennen von Schalterstellun-
gen)
    while((drehschalterstellungAlt != drehschalterstellung) && (millis() -
schaltzeitpunkt >= 1000)){
        for(int i = 0; i < 3; i++){ // Schalterstellungen mit for hochzählen
und in 'if' prüfen ob PIN[i] == High
            if ((digitalRead(schalterstellung[i]) == HIGH) && (aktuellesProgramm !=
i))){ // schalterstellung[] auf low oder high prüfen...
                drehschalterstellung = i; // aktguelle Schalterstellung setzen
                drehschalterstellungAlt = drehschalterstellung; // alte Schalters-
tellung mit neuer überschreiben
                programmFlag[i] = true; // entsprechende Flag für void loop auf
true setzen
            }
        }
    }
}

```

```
// ----- Funktion für Microschalter -----
void SuddenlyNoPlexi(){          // Geht hier immer rein Wenn Plexihaube
abgenommen wird. Um Anlage ganz sicher zum Stillstand zu bringen
    stepper.enableOutputs();    // Motor deaktiviert (Freilauf)
    lcd.clear();
    digitalWrite(LEDrot, HIGH);
    digitalWrite(LEDgruen, LOW);
    digitalWrite(relayPin, LOW);          //Bremse Stromlos schalten
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Anlage Stoppt!");
    delay(2000);          // Delay um anlage zu stoppen damit anlage steht sobald
plexi abgehoben wurde.
    DisplayClearFlag = true;
    lcd.clear();
}

// ----- Funktionen für LCD Display -----
// QUELLE für charAt() & task_text(): https://forum.arduino.cc/t/laufschrift-auf-sainsmart-lcd-keypad-shield/172617/5
// Scroll logik hier
char charAt(char *text, int pos){
    // Wenn die Position kleiner als die Display-Breite ist, wird ein
    Leerzeichen hinzugefügt (scrollt den Text herein)
    if (pos < LEDLINE)
        return (' ');          // scroll in
    // Wenn die Position innerhalb des Textbereichs (inklusive LEDLINE) liegt,
    geben wir das entsprechende Zeichen des Textes zurück.
    else if (pos>=LEDLINE && pos<LEDLINE+strlen(text))
        return (text[pos-LEDLINE]); // scrollt den Text sichtbar über die LEDs
    // Wenn die Position größer ist als der sichtbare Textbereich, fügen wir
    wieder Leerzeichen ein (scrollt den Text hinaus)
    else return (' ');
}
```

```
// text laufen lassen auf LCD Display
void task_text(char *text, byte line){
    // Temporärer Speicher für den aktuellen Text, der auf der Anzeige angezeigt
    // werden soll
    char currenttext[LEDLINE+1];
    // Statische Variablen zur Speicherung der nächsten Scroll-Zeit und des
    // Positionszählers für jede Zeile
    static unsigned long nextscroll[2];
    static int positionCounter[2];
    int i; // Zählerindex für schleife

    if (millis()>nextscroll[line]){
        nextscroll[line]=millis()+ledScrollSpeed[line]; // Nächste Scroll-Zeit
        berechnen

        for (i=0;i<LEDLINE;i++) // Den aktuellen Text für die Anzeige
        vorbereiten
            currenttext[i]=charAt(text,positionCounter[line]+i);
        currenttext[LEDLINE]=0; // String beenden

        lcd.setCursor(0,line); // Cursor auf die Anfangsposition der
        Zeile setzen
        lcd.print(currenttext); // Den aktuellen Text auf das LCD
        schreiben
        if (ledScrollDir[line]){ // Abfragen auf Scrollrichtung
            positionCounter[line]++; // Vorwärts scrollen: Position erhöhen
            if (positionCounter[line]==strlen(text)+LEDLINE)
                positionCounter[line]=0; // Wenn das Ende des Textes erreicht ist,
            von vorne beginnen
        }else{
            positionCounter[line]--; // Rückwärts scrollen: Position verringern
            if (positionCounter[line]<0) positionCounter[line]=strlen(text)+LEDLINE-
            1; // Wenn der Anfang überschritten wird, ans Ende springen
        }
    }
}
```

```

// ----- Funktionen für StepperMotor/ Programme 1-3 -----
// Präsentationsmodus bzw. Vorlesungsmodus - Stepper treibt
Getriebedemonstrator in verschiedenen geschwindigkeiten an
void programm0(){
    bool FlagForRun = false;
    bool PlexiFlag = false;
    bool keepRunning = false;
    float delayMicrosMax = 180;           // delay in mikrosekunden. Je
kleiner der Wert desto schneller der Motor
    float delayMicrosMin = 800;          // delay in mikrosekunden. Je
größer der Wert, desto langsamer der Motor
    float PotiDelay = 0;

    schaltzeitpunkt = millis();
    lcd.clear();
    delay(40);
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Programm 1");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Pr\341sentations M.");
    delay(3000);
    lcd.clear();

    // ausgabe von Motordrehzahl? Parallel mit stepper nicht wirklich möglich...
da timing von stepper zu schnell gefordert
    while(digitalRead(schalterstellung[0]) == HIGH){           //einlesen ob
drehschalter noch auf position 1 ist und plexiglashaube montiert ist, solange
in while bleiben){
        // DisplayClearFlag = true;                               //Flag setzten
das diplay bespielt wurde
        if((digitalRead(PlexiTaster)) == HIGH){                 // Prüfen ob die
Plexiglashaube geschlossen wurde, sonst - Fehler 01
            digitalWrite(relayPin, HIGH);                       // Bremse gelöst
bzw. elmag. Bremse bestromt
            PotiDelay = map(analogRead(Poti), 0, 1023, delayMicrosMax,
delayMicrosMin);

            if(PotiDelay > 700 || FlagForRun){                   // Prüfen ob
Wert vom Poti größer als 700 oder FlagForRun == 1 "Starterlaubnis"
                digitalWrite(LEDrot, LOW);
                digitalWrite(LEDgruen, HIGH);
                FlagForRun = true;                               // damit
sicherstellen, dass beim ersten aufruf des Programms poti auf Null ist.
"Starterlaubnis" erteilt
                task_text("Demonstrator im
Pr\341sentationsmodus!",0);                                   // \341 = ä
                task_text("Bitte \365ber Poti die Drehzahl vom Motor
bestimmen.",1);      // \365 = ü
                DisplayClearFlag = true;                       // Flag setzten das diplay bespielt wurde

                PotiDelay = map(analogRead(Poti), 0, 1023, delayMicrosMax,
delayMicrosMin);

```

```

PlexiFlag = digitalRead(PlexiTaster);
    while(FlagForRun && PlexiFlag && PotiDelay < (delayMicrosMin -
80)){ // in While bleiben solange Flag4Run & PlexiFlag true sind und Poti
unter delayMicrosMin - 80 ist
        if(DisplayClearFlag){ // geht beim
erstmaligen aufruf 1x hier rein, um diplay zu löschen
            lcd.clear();
            DisplayClearFlag = false; // setzt flag
wieder auf false damit nicht ständig display gelöscht wird
        }

        PlexiFlag = digitalRead(PlexiTaster); // zur
überwachung ob Plexiglashaube noch installiert ist

        stepper.disableOutputs(); // Motor aktiviert
        long rawPoti = analogRead(Poti);
        PotiDelay = map(rawPoti, 0, 1023, delayMicrosMax,
delayMicrosMin); //prüfen welchen Wert Poti hat um while dann evtl zu
verlassen
        // Motorbewegung realisieren
        digitalWrite(PUL,HIGH);
        delayMicroseconds(PotiDelay);
        digitalWrite(PUL,LOW);
        delayMicroseconds(PotiDelay);
    }
    if (!PlexiFlag && FlagForRun){
        SuddenlyNoPlexi(); // Notfallfunktion falls eigentlich
die Run-erlaublis erteilt aber Plexiglas im laufenden Betrieb abgenommen wird.
    }
    stepper.enableOutputs(); // Motor deaktiviert (Freilauf)
} else if(FlagForRun == false){
    digitalWrite(LEDrot, HIGH);
    digitalWrite(LEDgruen, LOW);
    stepper.enableOutputs(); // Motor deaktiviert (Freilauf)
    if(DisplayClearFlag){ // geht beim erstmaligen aufruf 1x
hier rein, um diplay zu löschen
        lcd.clear();
        delay(40); // kleine Pause damit display befehl verarbeiten kann
        DisplayClearFlag = false; // setzt flag wieder auf false damit
nicht ständig display gelöscht wird
    }
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Fehlercode 02");
    task_text("Drehzahlpoti bitte zur\365ck auf 0 stellen.",1); // \365 =ü
}

```

```

    FlagForRun = false;
  }else{
    digitalWrite(LEDrot, HIGH);
    digitalWrite(LEDgruen, LOW);
    if(DisplayClearFlag){ // geht beim erstmaligen aufruf 1x
hier rein, um diplay zu löschen
      lcd.clear();
      delay(40); // kleine Pause damit display befehl
verarbeiten kann
      DisplayClearFlag = false; // setzt flag wieder auf false,
damit nicht ständig display gelöscht wird
    }
    digitalWrite(relayPin, LOW); // Bremse aktiv bzw Stromlos
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Fehlercode 01");
    task_text("Bitte die Schutzhaube installieren!",1);
  }
}
drehschalterstellungAlt = 15;
aktuellesProgramm = 0;
programmFlag[0] = false;
lcd.clear();
delay(40); // kleine Pause damit display befehl
verarbeiten kann
}

// Prüfmodus - Getriebedemonstrator dreht mit festgelegter reduzierter
geschwindigkeit. - Plexiglasschutz wurde entfernt
void programm1(){
  schaltzeitpunkt = millis();
  lcd.clear();
  delay(40); // kleine Pause damit display befehl
verarbeiten kann
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Programm 2");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("Pr\365fmodus");
  delay(3000);
  lcd.clear();

  bool FlagForRun = false;
  float delayMicrosMax = 100; // delay in mikrosekunden. Je kleiner der
Wert desto schneller der Motor
  float delayMicrosMin = 700; // delay in mikrosekunden. Je größer der
Wert, desto langsamer der Motor
  float PotiDelay = 0;
  float PotiSpeed = 0;
  int fixedDelay = 700;

```

```

while(digitalRead(schalterstellung[1]) == HIGH){           //einlesen ob
drehschalter noch auf position 1 ist, wenn ja - solange in while bleiben
    digitalWrite(relayPin, HIGH);                          // Bremse gelöst

    PotiDelay = map(analogRead(Poti), 0, 1023, delayMicrosMax,
delayMicrosMin);

    if(PotiDelay > 640 || FlagForRun){                      // Prüfen ob Wert
vom Poti größer als 640 oder FlagForRun == 1 "Starterlaubnis"
        digitalWrite(LEDrot, LOW);
        digitalWrite(LEDgruen, HIGH);
        FlagForRun = true;                                 // "Starterlaubnis"
erteilt - poti war beim erstmaligen Programmaufruf über schwellenwert von 640
        task_text("Demonstrator im Pr\365fmodus!",0);      // \365 = ü
        task_text("niedrige Drehzahl",1);
        DisplayClearFlag = true;                          //Flag setzten, das
diplay bespielt wurde

        PotiDelay = map(analogRead(Poti), 0, 1023, delayMicrosMax,
delayMicrosMin);

        while((FlagForRun == true) && PotiDelay < (delayMicrosMin - 40)){ //
solange Flag4Run und Poti kleiner als delayMicrosMin in while bleiben.
            if(DisplayClearFlag){                          // geht beim
erstmaligen aufruf 1x hier rein, um diplay zu löschen
                lcd.clear();
                DisplayClearFlag = false;                  // setzt flag wieder
auf false, damit nicht ständig display gelöscht wird
            }
            stepper.disableOutputs();                       // Motor aktiviert
            long rawPoti = analogRead(Poti);
            PotiDelay = map(rawPoti, 0, 1023, delayMicrosMax,
delayMicrosMin);    //prüfen welchen Wert Poti hat um while dann evtl zu
verlassen

            // Motorbewegung realisieren
            digitalWrite(PUL,HIGH);
            delayMicroseconds(fixedDelay);
            digitalWrite(PUL,LOW);
            delayMicroseconds(fixedDelay);
        }
        stepper.enableOutputs();                            // Motor deaktiviert (Freilauf)
    }
}

```

```

    else if((FlagForRun == false)){
        stepper.enableOutputs();
        digitalWrite(LEDrot, HIGH);
        digitalWrite(LEDgruen, LOW);
        if(DisplayClearFlag){ // geht beim erstmaligen aufruf 1x hier
rein, um diplay zu löschen
            lcd.clear();
            delay(40); // kleine Pause damit display befehl
verarbeiten kann
            DisplayClearFlag = false; // setzt flag wieder auf false damit
nicht ständig display gelöscht wird
        }
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print("Fehlercode 02");
        task_text("Drehzahlpoti bitte zur\365ck auf 0 stellen.",1); // \365 = ü
    }
    FlagForRun = false;
}
digitalWrite(relayPin, LOW); // relais öffnen - bremsen stromlos
drehschalterstellungAlt = 15;
aktuellesProgramm = 1;
programmFlag[1] = false;
if(DisplayClearFlag){ // geht beim erstmaligen aufruf 1x hier
rein, um diplay zu löschen
    lcd.clear();
    delay(40); // kleine Pause damit display befehl
verarbeiten kann
    DisplayClearFlag = false; // setzt flag wieder auf false damit nicht
ständig display gelöscht wird
}
}

// Wartungsmodus - Getriebedemonstrator lässt sich von Hand drehen
void programm2(){
    schaltzeitpunkt = millis();
    lcd.clear();
    delay(40); // kleine Pause damit display befehl verarbeiten kann
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Programm 3");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Wartungsmodus");
    delay(3000);
    lcd.clear();
    delay(40); // kleine Pause damit display befehl
verarbeiten kann
    digitalWrite(relayPin, HIGH); // Relais schließen damit motor sich
drehen kann und bremsen gelöst wird.
    stepper.enableOutputs(); //abschalten der Motorspulen um strom zu
sparen und erwärmung vom Motor zu vermeiden
}

```

```
while(digitalRead(schalterstellung[2]) == HIGH){
    task_text("Demonstrator im Wartungsmodus!",0);
    task_text("Er kann nun von Hand bewegt werden... ",1);
    digitalWrite(relayPin, HIGH);    // Bremse gelöst
    DisplayClearFlag = true;
    digitalWrite(LEDrot, LOW);
    digitalWrite(LEDgruen, HIGH);
}

drehschalterstellungAlt = 15;
aktuellesProgramm = 2;
programmFlag[2] = false;
if(DisplayClearFlag){                // geht beim erstmaligen aufruf 1x hier
rein, um diplay zu löschen
    lcd.clear();
    delay(40);                        // kleine Pause damit display befehl
verarbeiten kann
    DisplayClearFlag = false;        // setzt flag wieder auf false, damit
nicht ständig display gelöscht wird
}
}

// ----- setup und loop function -----
void setup() {
    Serial.begin(115200);

    lcd.init();
    lcd.backlight();
    delay(500);
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Willkommen!");

    // RelaisPin definieren und auf Ausgangszustand setzen
    pinMode(relayPin, OUTPUT);
    // kleiner akustischer checkup ob Relais arbeitet -- Hier Ausblick mit
spannungsmessung soll und ist werte checken und erst dann frei geben.
    digitalWrite(relayPin, HIGH);    // LOW = Relais offen (Bremse angezogen/
aktiv) -- HIGH = Relais geschlossen (Bremse gelöst)
    delay(800);
    digitalWrite(relayPin, LOW);
    delay(800);
    digitalWrite(relayPin, HIGH);
    delay(800);
    digitalWrite(relayPin, LOW);
}
```

```
// den Microschalter-PIN als INPUT definieren
pinMode(PlexiTaster, INPUT);

// Drehschalter-PINS als INPUT definieren
for (int i; i <= 2; i++){
    pinMode(schalterstellung[i], INPUT);
}

// initialisierung vom Motortreiber
pinMode(ENA, OUTPUT);
digitalWrite(DIR, HIGH);
stepper.setEnablePin(ENA);

//enable bzw. disable aktiviert bzw deaktiviert durch HIGH signal am ENA Pin
den Stromfluss durch Motorspulen um Wärmebildung zu minimieren
stepper.enableOutputs(); // Motor deaktiviert (Freilauf)
//stepper.disableOutputs(); // Motor aktiviert (Fixiert) notwendig für
Motorlauf

lcd.clear(); // Willkommensgruß vom LCD löschen
}

void loop() {
    Drehschalterauswahl();
    if(programmFlag[0] == true){ // Programmflag prüfen, wenn true in
entsprechendes Programm eintauchen
        programm0();
    }
    if(programmFlag[1] == true){ // Programmflag prüfen, wenn true in
entsprechendes Programm eintauchen
        programm1();
    }
    if(programmFlag[2] == true){ // Programmflag prüfen, wenn true in
entsprechendes Programm eintauchen
        programm2();
    }
}
```

Abbildung C 8: Programmcode für Controllino MAXI

```

/*
Name: Max Töllner
Fakultät: Technik und Informatik
Department: Fahrzeug und Flugzeugbau
Der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Bachelorarbeit: Konzeption, Implementierung und Inbetriebnahme
                einer Schrittmotorbasierten Antriebseinheit eines Getriebede-
monstrators
*/
//----- Programmcode für Nano "Drehzahlmessung" -----
// Einbinden von Bibliotheken
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <stdio.h>

// ----- DEFINIEREN VON KONSTANTEN VARIABLEN -----
const int SensorPin = 2;                // Definieren vom Inter-
rupt Pin 2
const int NrOfTooth = 20;              // Definieren der Zähne-
zahl bzw Impulse, welche zu erwarten sind
volatile int InterruptCounter;        // Globale Variablen zur
generellen Verwendung
unsigned long drehzahl;

// Initialisieren des LCD Displays
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2);

void measure() {
    char buf[17];                       // erstellt einen Puffer aus 18 chractern
    unsigned long drehzahl = 0;
    InterruptCounter = 0;
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(SensorPin), countup, RISING); //
Interrupt aktivieren und bei einem Interrupt an Pin 2 auslösen & countup auf-
rufen
    delay(2000);                        // 1 Sekunde lang Impulse zählen; 1 sekunde macht skallie-
rung einfacher
    detachInterrupt(digitalPinToInterrupt(SensorPin)); // interrupt wird de-
aktiviert
    drehzahl = ((float)InterruptCounter / NrOfTooth) * 30; //
hier Drehzahl errechnen und auf 1 Minute hochgerechnet
    sprintf(buf, "%5lu U/Min      ",drehzahl); //
mithilfe von sprintf drehzahl formatieren und im Puffer speichern
    display_rpm(buf);                   // Puffer übergeben und auf LCD ausgeben
}
void countup() {
    InterruptCounter++;                 // Impulse zählen
}
//Hier Drehzahl auf lcd display ausgeben.
void display_rpm(const char* rpm) {
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print(rpm);
}

```

```
void setup(){  
  lcd.init();  
  lcd.backlight();  
  delay(200);  
  
  lcd.setCursor(0, 0);  
  lcd.print("Drehzahl:");  
  
  pinMode(SensorPin, INPUT);  
}  
  
void loop(){  
  measure();  
}
```

Abbildung C 9: Programmcode für Arduino Nano zur Drehzahlmessung

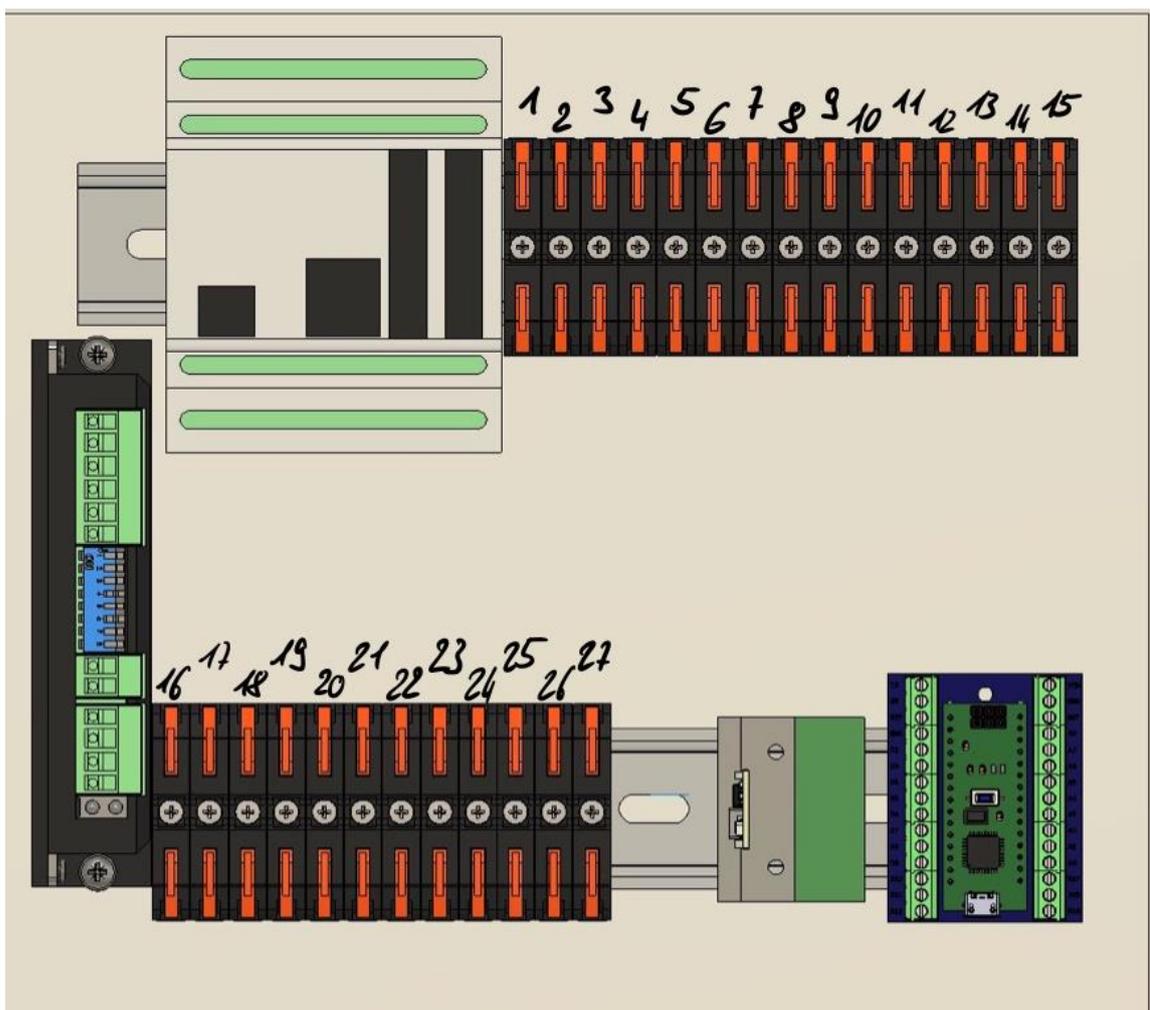


Abbildung C 10: Nummerierung der Durchgansklemmen im Schaltschrank

Tabelle C 3: Belegungsplan der Durchgangsklemmen

Belegungsplan der Durchgangsklemmen				
Nr.	Eingang (von Unten)	Ausgang (von Oben)		PIN-Belegung
1		LED rot		D5
2		LED grün		D7
3		Drehpotentiometer		A1
4		Drehschalter Stellung 1		D8
5		Drehschalter Stellung 2		D9
6		Drehschalter Stellung 3		D10
7		Microschalter Acrylglashaube		D6
8		SCL LCD Display CONTROLLINO		SCL
9		SDA LCD Display CONTROLLINO		SDA
10	5V VCC	5V hoch zum Bedinpult & zum Microschalter		-
11	5V GND von Signalleitungen & GND von Motortreiber Signalen	5V GND vom Bedinpult kommend		-
12		SCL LCD Display NANO		A5
13		SDA LCD Display NANO		A4
14	12 V vom Relais kommend (Bremse)	12 V zur Bremse		-
15	48 V aus Netzteil	48 V zum An-/Ausschalter		-
16	Leer	zum Relais R0 (Bremse)	12 V	-
17	aus SDC*	zum SDC_2**		-
18	zum Drehzahlsensor	zum Controllino		-
19	Leer	kommend von An-/Aus Schalter	48 V	-
20	Eingang 48 V in SDC	zum Motortreiber***		-
21	Masse SDC	Masse Controllino	GND	-
22	Masse SDC	Masse Bremse		-
23	Masse zum Netzteil	Masse SDC_2** & Masse Spannungsteiler Platine Drehzahlsensor		-
24		A+ von Treiber zu Motor		-
25		A- von Treiber zu Motor		-
26		B+ von Treiber zu Motor		-
27		B- von Treiber zu Motor		-
* Stepdown Converter 48 V auf 12 V ** Stepdown Converter 12 V auf 9 V *** Motortreiber Masse geht nicht über Durchgangsklemme sondern direkt an GND vom Netzteil				

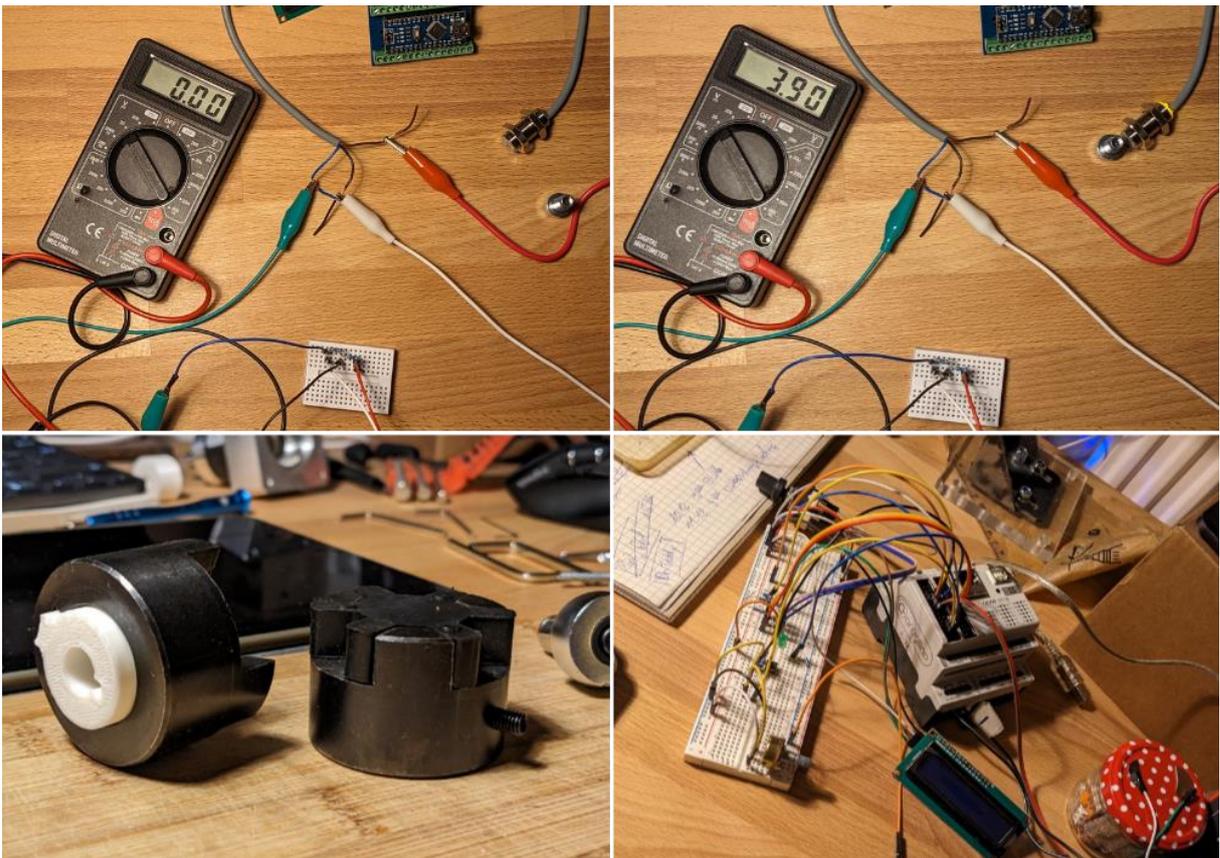


Abbildung C 11: (Oben) Testen des Induktiven Drehzahlsensors/ (Unten v.l.) Klauenkupp-
lung mit Adapter und Versuchsaufbau auf Steckplatine

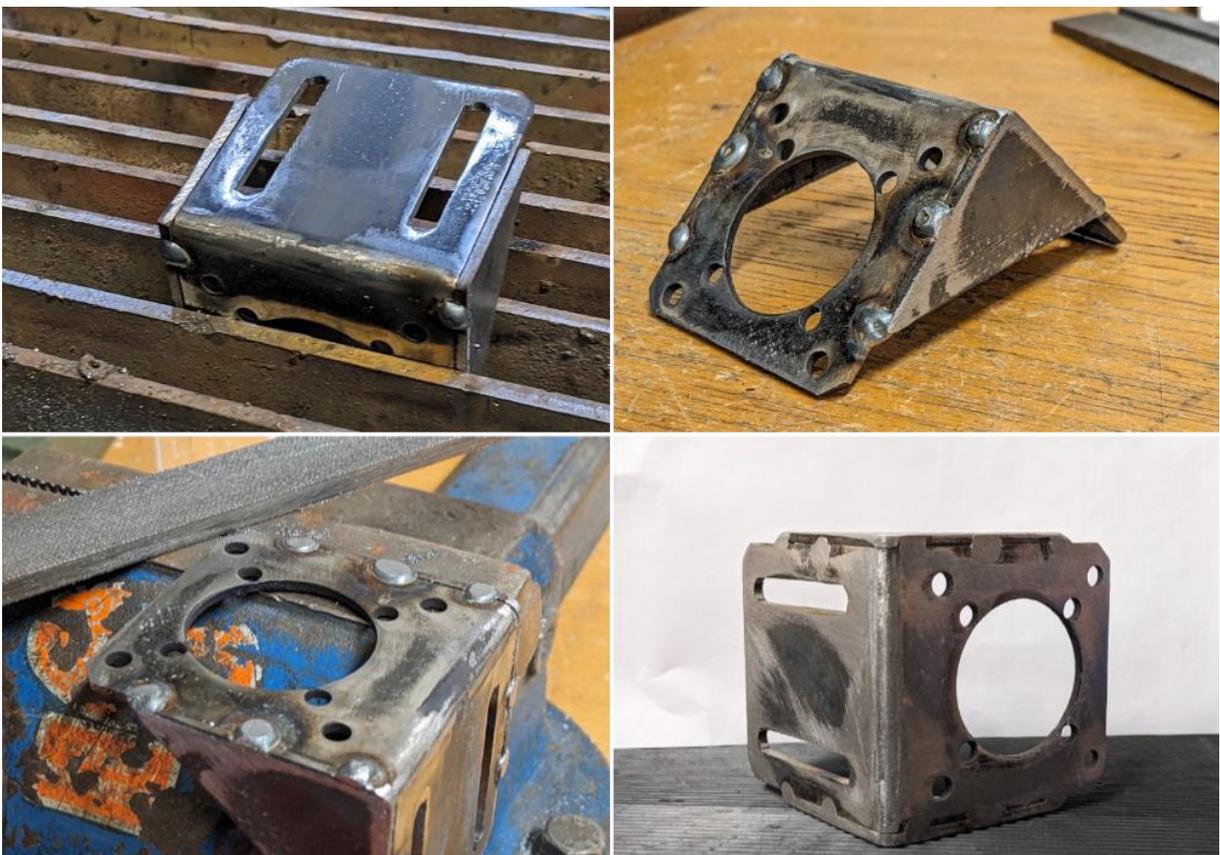


Abbildung C 12: Modifizierung und Nachbearbeitung der Motorhalterung

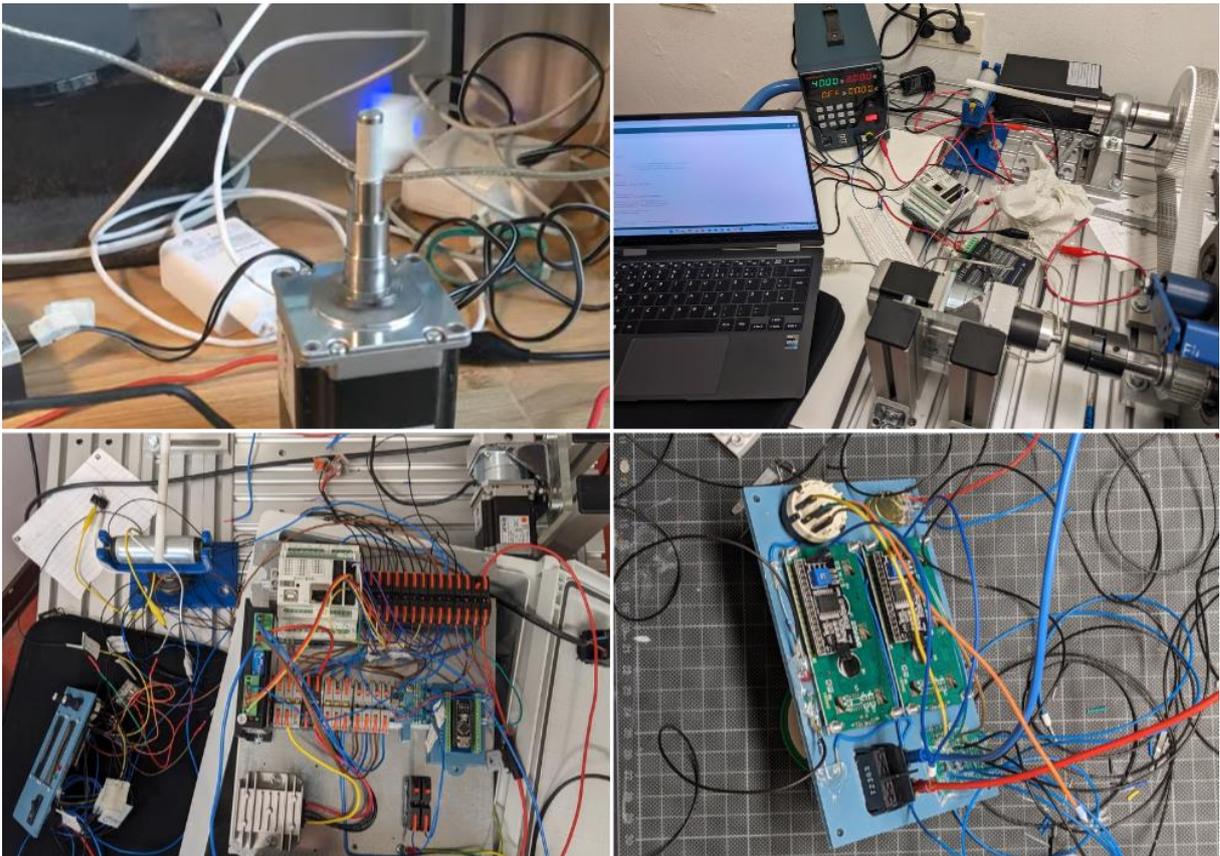


Abbildung C 13: (Oben) Verifikation Schrittmotor/ (Unten) Überführung in Schaltschrank und Zusammenbau



Abbildung C 14: Startbildschirm und Programme 1 bis 3



Abbildung C 15: Fehlercodes 01 und 02

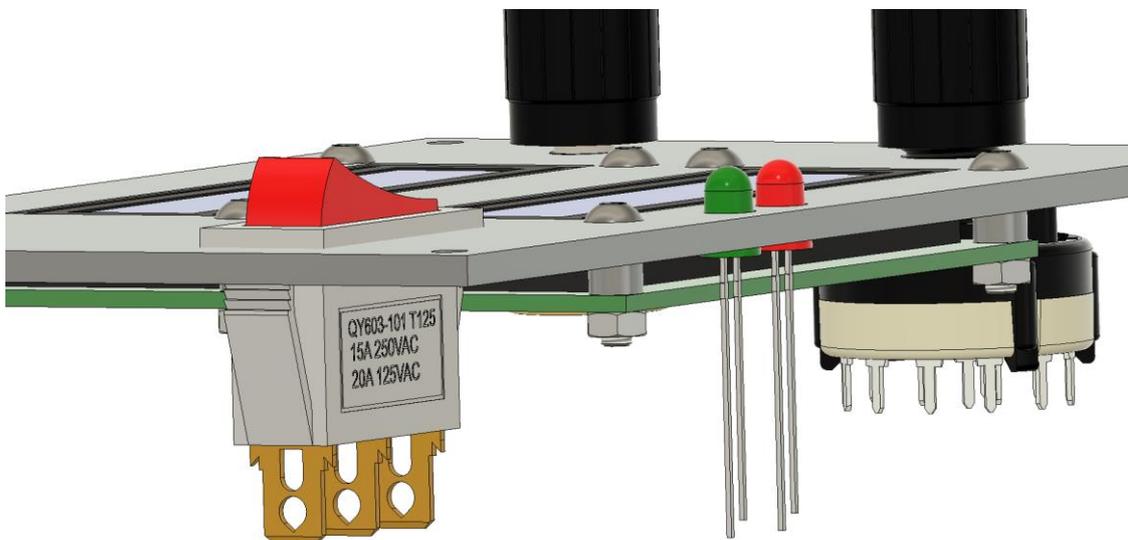


Abbildung C 16: Darstellung der Adapterstücke in Bedieneinheit

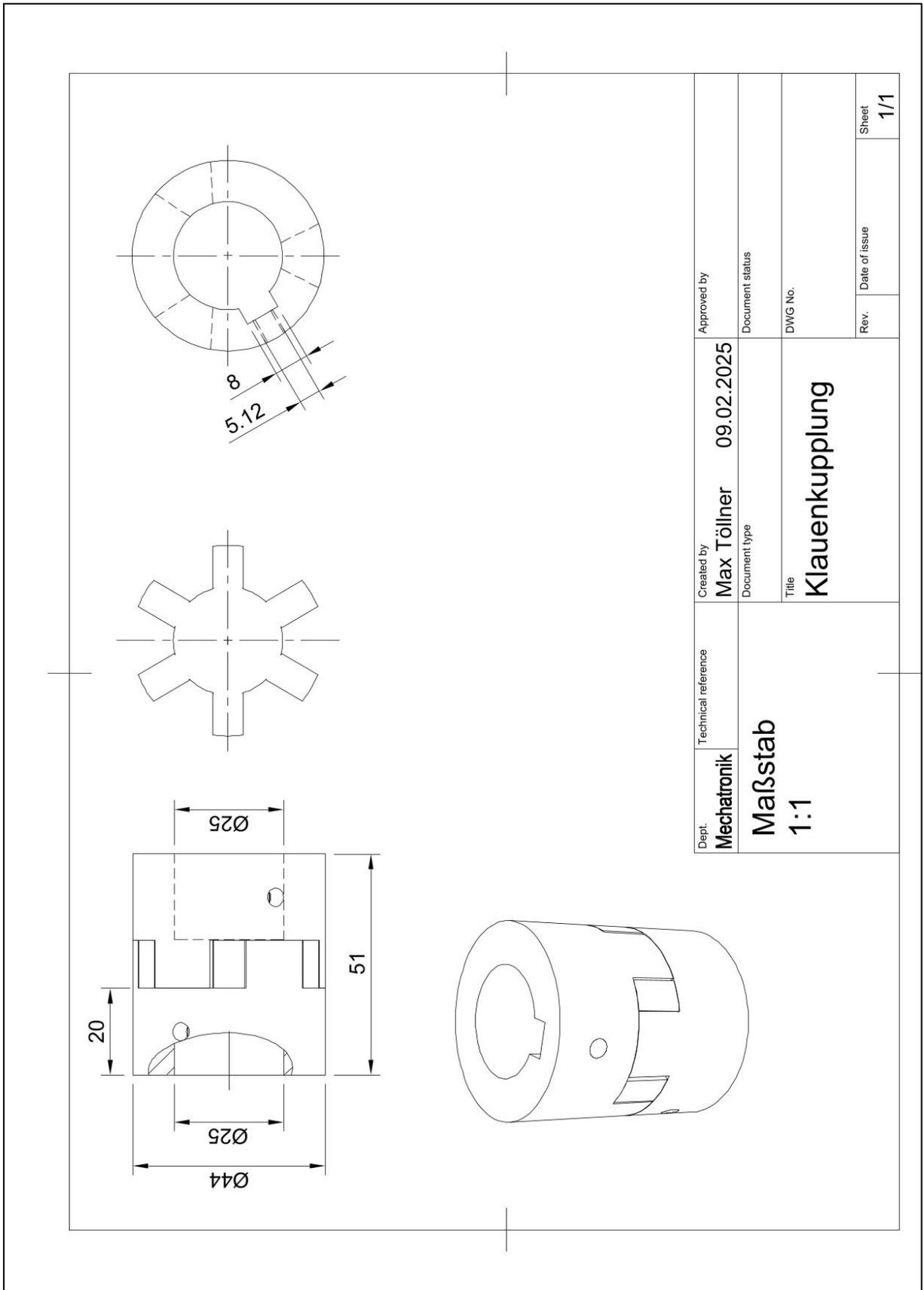


Abbildung C 17: Technische Zeichnung Klauenkupplung

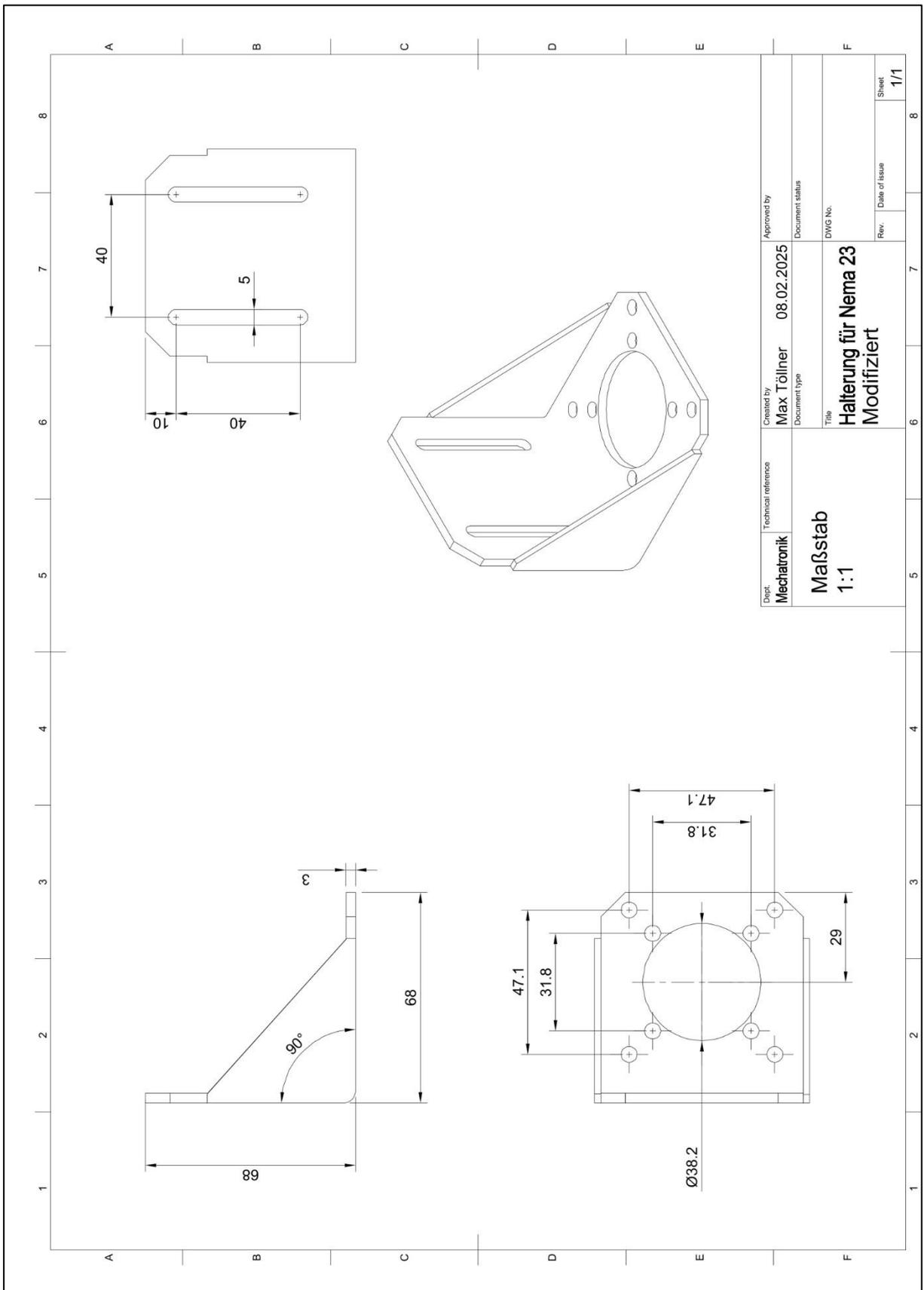


Abbildung C 18: Technische Zeichnung Motorhalterung (DIN A3)

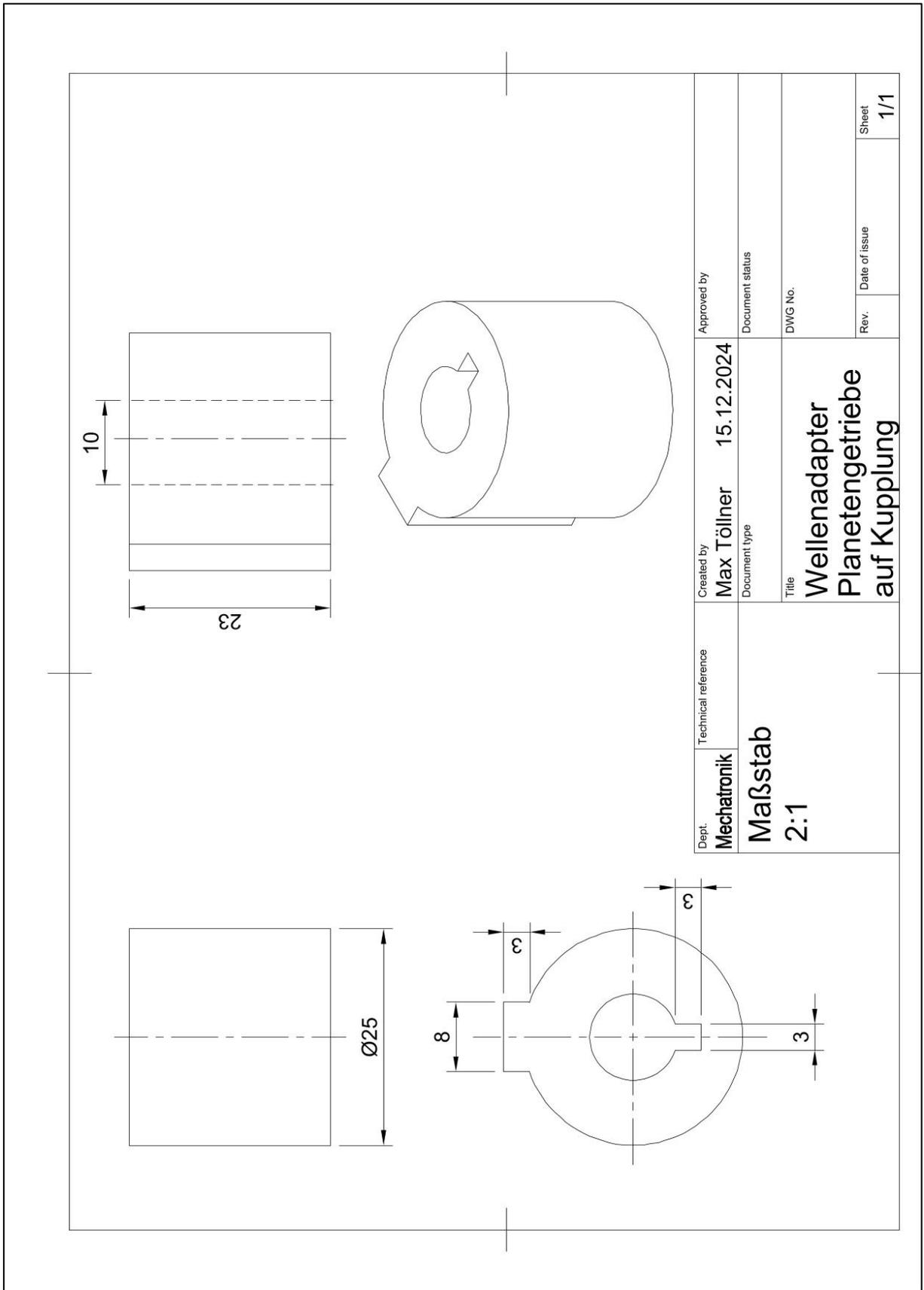


Abbildung C 19: Technische Zeichnung Wellenadapter

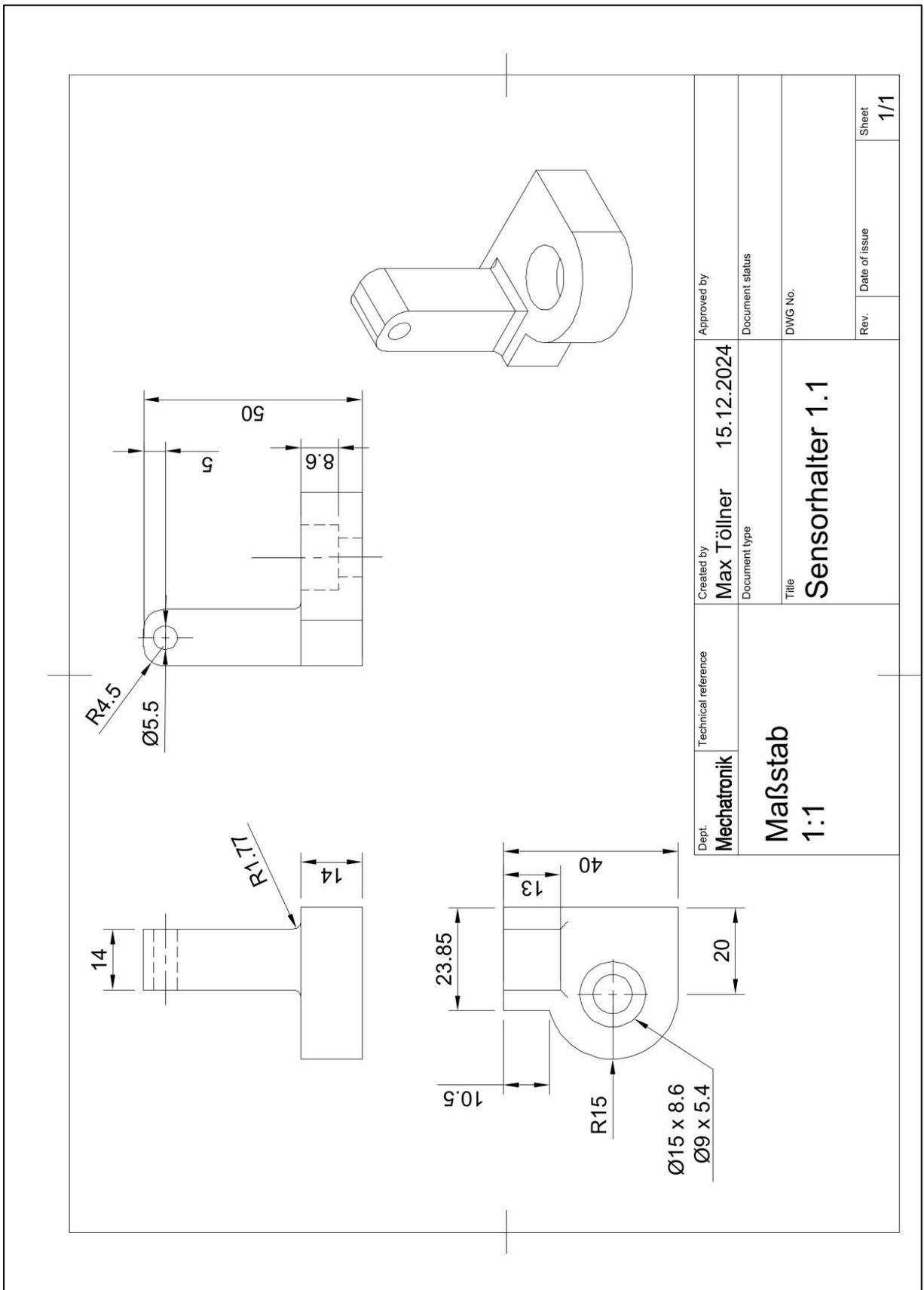


Abbildung C 20: Technische Zeichnung Sensorhalter 1.1

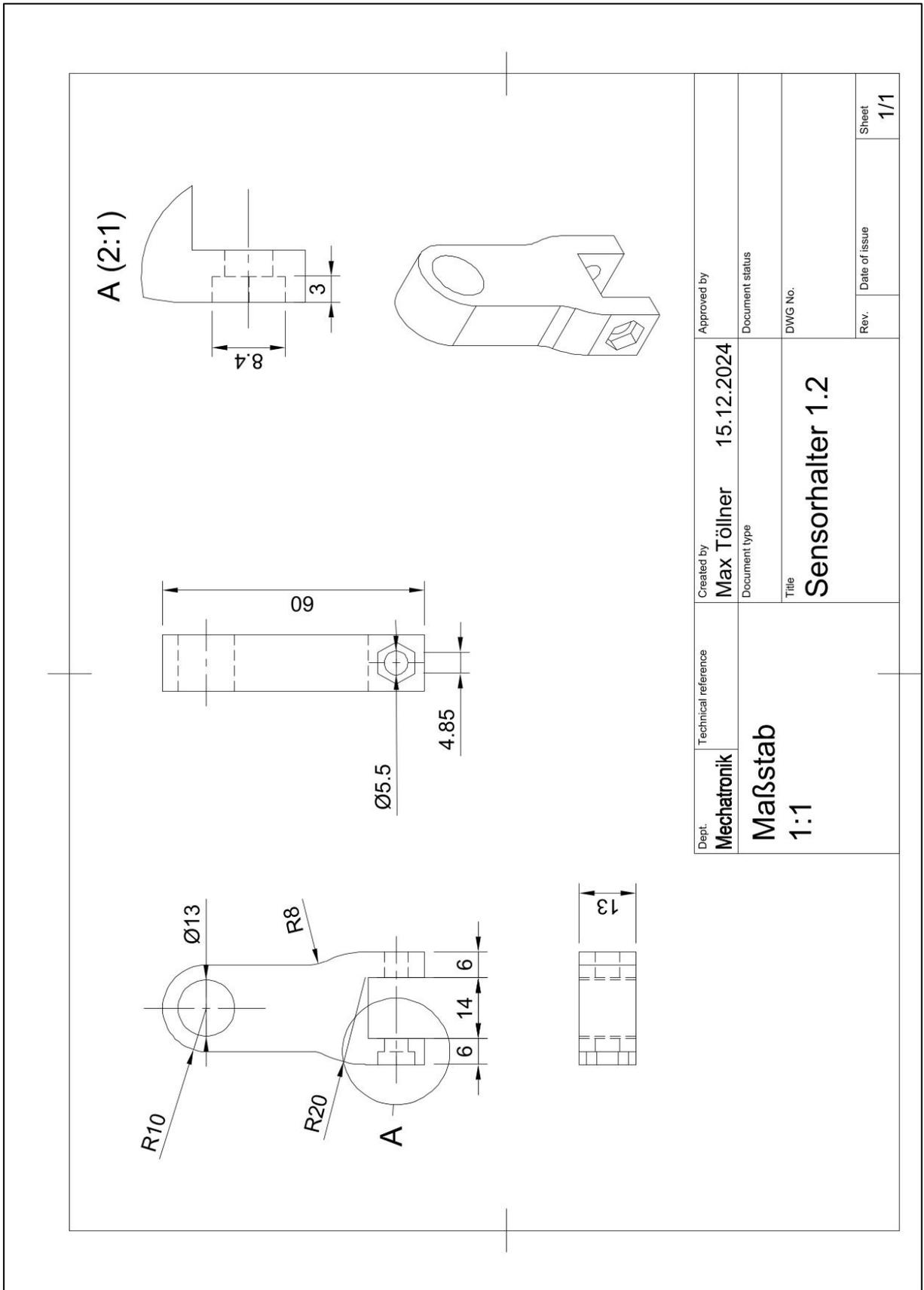


Abbildung C 21: Technische Zeichnung Sensorhalter 1.2

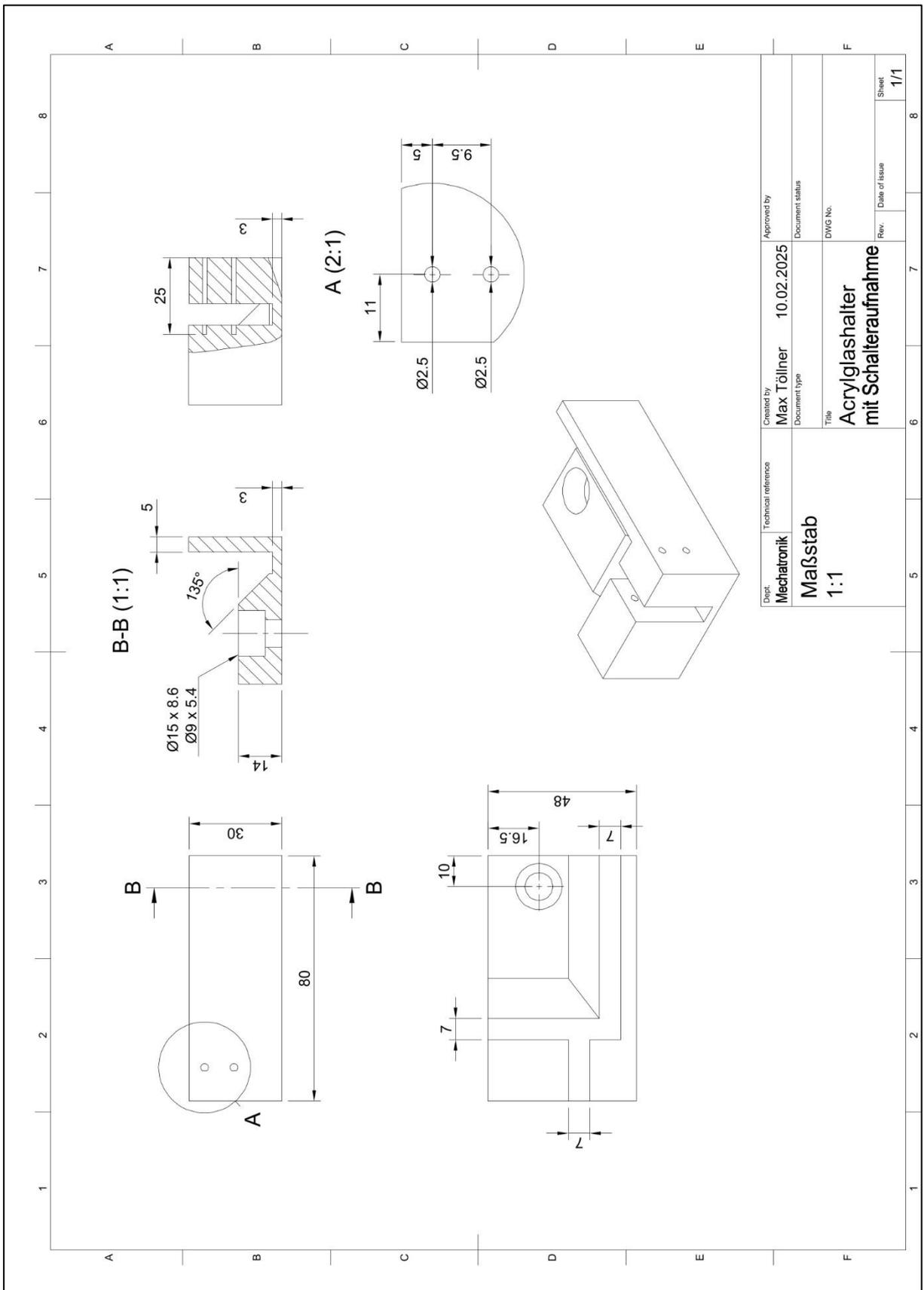


Abbildung C 22: Technische Zeichnung Acrylglasshalter unten links mit Schalteraufnahme (DIN A3)

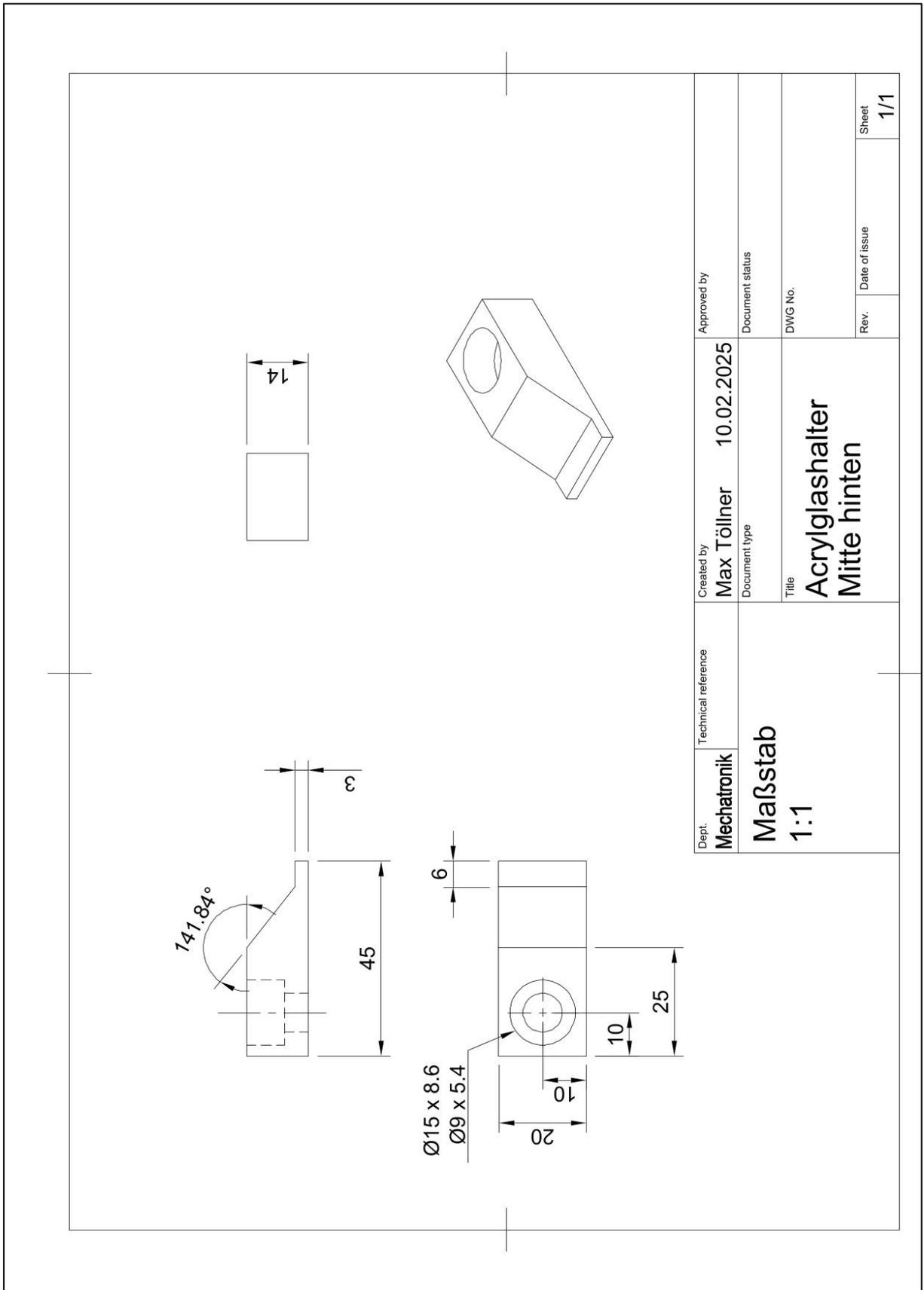


Abbildung C 23: Technische Zeichnung Acrylglasshalter Mitte hinten

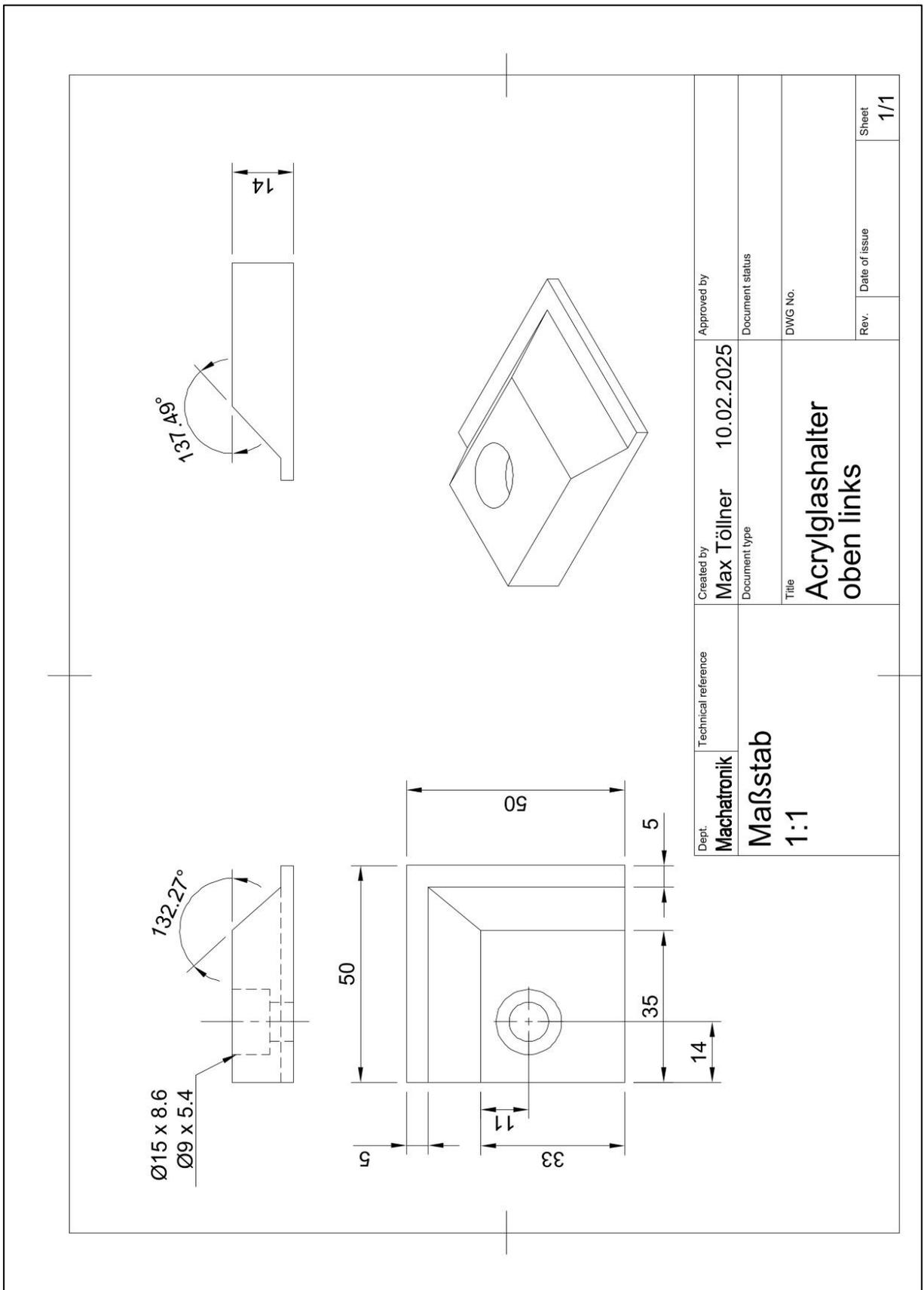


Abbildung C 24: Technische Zeichnung Acrylglasshalter oben links

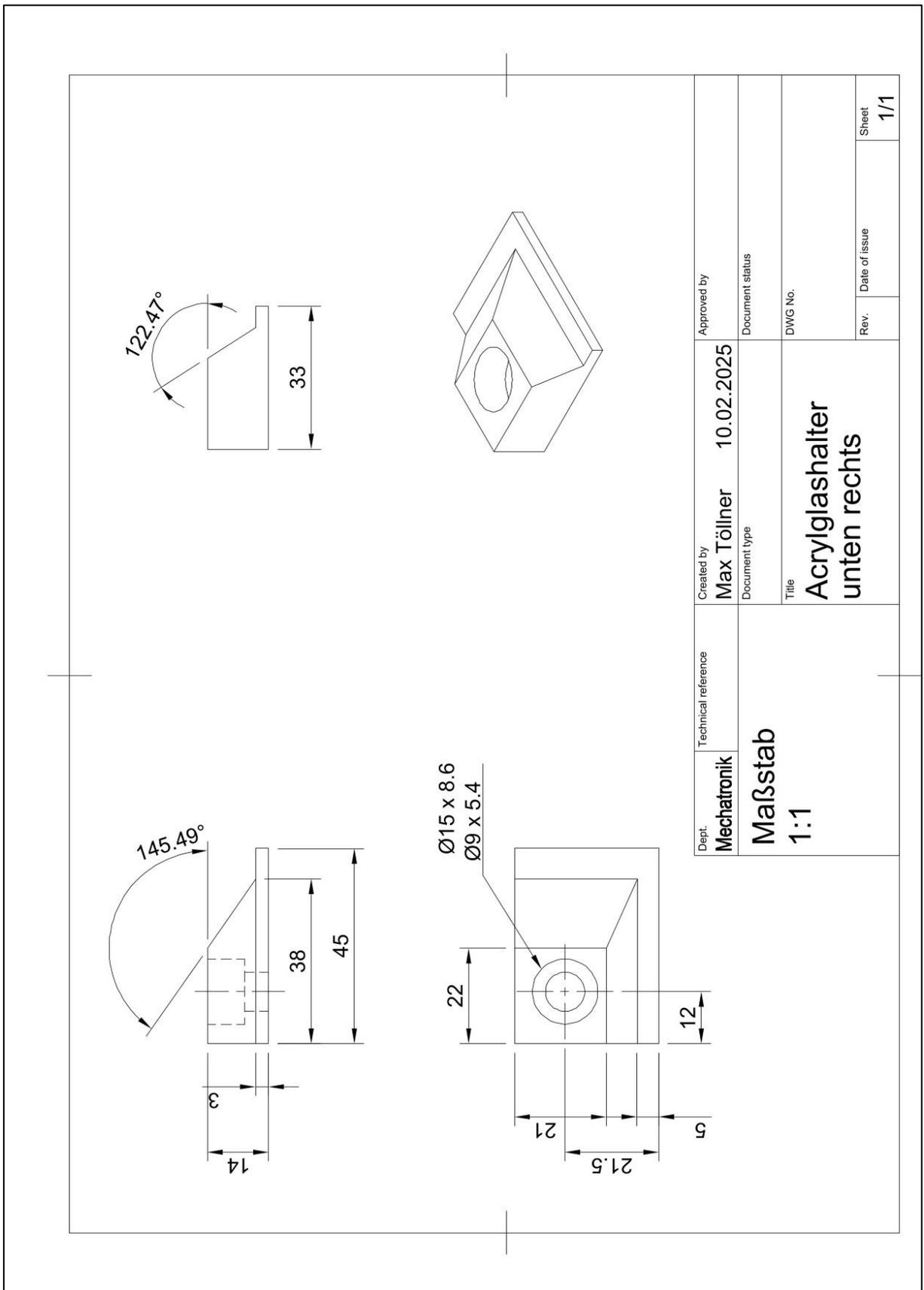


Abbildung C 25: Technische Zeichnung Acrylglasshalter unten rechts



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Töllner

Vorname: Max

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Konzeption, Implementierung und Inbetriebnahme einer schrittmotorbasierten Antriebseinheit eines Getriebedemonstrators

ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:

Ort

Datum

Unterschrift im Original