

---

# **BACHELORARBEIT**

---

Herr  
**Yuanqiang Wang**

**Entwicklung eines Inverter-Modells in  
Portunus zum Betrieb eines BLDC-Motors mit  
Hilfe der Simulation**

**2023**

# **BACHELORARBEIT**

---

## **Entwicklung eines Inverter-Modells in Portunus zum Betrieb eines BLDC-Motors mit Hilfe der Simulation**

Autor/in:  
**Herr Yuanqiang Wang**

Studiengang:  
**Elektrotechnik-Automation**

Seminargruppe:  
**EA20wV-B**

Erstprüfer:  
**Prof. Dr.-Ing. Lutz Rauchfuß**

Zweitprüfer:  
**M.Sc. Rolof Jan**

Einreichung:  
Chemnitz, 06.12.2023

# **BACHELOR THESIS**

---

## **Development of an inverter model in Portunus for operating a BLDC motor through simulation**

author:

**Mr. Yuanqiang Wang**

course of studies:

**Electrical Engineering-Automation**

seminar group:

**EA20wV-B**

first examiner:

**Por. Dr.-Ing. Lutz Rauchfuß**

second examiner:

**M.Sc. Rolof Jan**

submission:

**Chemnitz, 06.12.2023**

---

## **Bibliografische Angaben**

Yuanqiang Wang:

Entwicklung eines Inverter-Modells in Portunus zum Betrieb eines BLDC-Motors mit Hilfe der Simulation

Development of an inverter model in Portunus for operating a BLDC motor through simulation

58 Seiten, Hochschule Mittweida, University of Applied Sciences,  
Fakultät Ingenieurwissenschaften , Bachelorarbeit, 2023

---

## **Kurzfassung**

Ziel dieser Arbeit ist die Simulation eines Inverters zur Steuerung eines dreiphasigen bürstenlosen Gleichstrommotors. Durch die Erkundung des Funktionsumfangs des Inverters während des Praktikums sowie des Funktionsprinzips und der elektronischen Kommutierungslogik eines herkömmlichen bürstenlosen Gleichstrommotors wird dies als Grundlage für die Modellierung des Inverters in Portunus verwendet. Abschließend werden eine Kopplung mit dem in Portunus erstellten parametrischen Motormodell und weitere Messaufgaben durchgeführt.

## **Abstract**

The aim of this thesis is to simulate an inverter for controlling a three-phase brushless DC motor. By exploring the functional scope of the inverter during the internship, as well as the operating principle and the electronic commutation logic of a conventional brushless DC motor, this is used as a basis for modelling the inverter in Potunus. Finally, coupling with the parametric motor model built in Potunus and further measurement tasks are performed.

## Bacheloraufgabe für Wang Yuanqiang

Mittweida, 06.03.2023

### **Thema: Entwicklung eines Inverter-Modells in Portunus zum Betrieb eines BLDC-Motors mit Hilfe der Simulation**

Der Funktionsumfang der Inverter wurde im Praktikum bestimmt und soll nun mit einem Simulationsmodell nachgebildet werden. Speziell die Ansteuerung der BLDC-Motoren ist von Bedeutung und soll exakt der Funktion des realen Inverters folgen. Die BLDC-Motoren für den Antrieb (Liu) und das Mähwerk (Guo) wurden von anderen Studenten parametrisiert und sollen nun gemeinsam mit dem Modell des Inverters in Portunus getestet werden.

#### **Arbeitspakete:**

1. Implementierung des Inverter-Modells in Portunus
  - Schaltungsaufbau des Inverters mit 6 Transistoren
  - Entwicklung einer Ansteuerung der Transistoren mit Hilfe der Signale der Hallsensoren
  - Ausschaltung der Transistoren mit Hilfe der Hallsensoren
  - Entwicklung einer PWM, um das U/f-Verhältnis während der Einschaltphase der Transistoren konstant halten zu können
  - Übergabe des Inverter-Modells an Herr Guo und Herr Liu
2. Simulation von Inverter und BLDC-Motor
  - Die Motormodelle parametrisiert von Herr Guo und Herr Liu sollen mit dem Modell des Inverters zusammen in Portunus simuliert werden
  - Kopplung der Signale der Hallsensoren vom BLDC-Motor mit der Ansteuerung des Inverters
  - Elektrischer Anschluss des Motors und mechanische Belastung der Motorwelle mit einer Torque-Source
  - Die Spannungsquelle ist durch eine DC-Quelle die nur unidirektional arbeitet, darzustellen
  - Messung von Strom und Spannung am Eingang des Inverters und Messung von Strom und Spannung (3-phasig) am Ausgang des Inverters
  - Messung der Frequenz der Ströme und der Stromflussdauer in Bezug auf die Drehzahl des Rotors und die Polpaarzahl

Hochschulbetreuer:

Prof. Dr.-Ing. Lutz Rauchfuß

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>I-III</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>IV-IV</b>
<b>Formelverzeichnis</b> .....	<b>VI-XII</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>VIII-IVII</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Einführung des BLDC-Steuerkreis</b> .....	<b>2</b>
2.1 Dreiphasen-Inverter.....	2
2.2 PWM-Generator.....	4
2.3 Hallsensor.....	5
<b>3. Der Bürstenlose Gleichstrommotor</b> .....	<b>9</b>
3.1 Prinzipieller Aufbau.....	11
3.2 Funktionsweise.....	13
3.3 Sensorik der elektronischen Kommutierung.....	14
3.4 Brückenschaltung und Ansteuerung.....	16
3.5 Logik des Kommutierten Motors.....	20
3.6 Bekannte Motorparameter.....	21
<b>4. Modellierung mit Portunus</b> .....	<b>22</b>
4.1 Vorbetrachtung.....	22
4.2 HEX-Brücke.....	23
4.3 PWM Generator.....	24
4.4 Hall-Sensoren.....	25
4.5 Ansteuerung des kommutierten BLDCs.....	27
4.6 Motorsimulation.....	28
4.7 Elektromechanische Kopplung.....	29
<b>5. Anfahrenverhalten</b> .....	<b>30</b>
5.1 Messung von Strom und Spannung am Eingang des Inverters.....	30
5.2 Messung von Strom(3-Phasig) am Ausgang des Inverter.....	32
5.3 Messung der Frequenz der Ströme und der Stromflussdauer.....	34

5.4	Bewertung.....	36
<b>6.</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>37</b>
	Literaturverzeichnis .....	XIVV-XV
	Anlagen .....	XV
	Selbstständigkeitserklärung .....	XIXIII



## Abkürzungsverzeichnis

**BLDC**      **BrushLess Direct Current Motor** (Bürstenloser Gleichstrommotor)

$U_H$       **Hall-Spannung**

**PWM**      **PulsWeitenModulation**

**IGBT**      **Insulated-Gate Bipölar Transistor**(Bipolarer Isolierschicht-Transistor)

**MOSFET**   **Metal-Oxide-Semiconductor-Field-Effect Transistor**

**P**      **Polpaarzahl**

**DC**      **Direct Current**

**AC**      **Alternating Current**(Wechselstrom)

**D**      **Diode**

**CTRL**      **Control Transistor ReiheLeistung**

**AM**      **Ampere-Meter**

**VM**      **Volt-Meter**

**Var**      **Variable**

**E**      **Electric power sourc**(Quelle)

**EXP**      **Exponential Function**

## Formelverzeichnis

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
A	Fläche	$m^2$
R	Widerstand	$\Omega$
L	Länge	m
$\rho$	Spezifischer elektrischer Widerstand	$mm^2 \cdot m^{-1} \cdot \Omega$
n	Drehzahl	$min^{-1}$
U	Spannung	V
T	Zeitkonstante	s
M	Drehmoment	Nm
t	Zeit	s
$\omega$	Winkelgeschwindigkeit	$rad \cdot s^{-1}$
$\mu_0$	magnetische Feldkonstante	$N \cdot A^{-1}$
$\mu_r$	Relative Permeabilität	
i	Stromstärke	A
$R_m$	Magnetischer Widerstand	$A \cdot Wb^{-1}$

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
H	Magnetische Feldstärke	$A \cdot m^{-1}$
d	Lehrsches Dämpfungsmaß	
K	Verstärkungsfaktor	
$L_{d,q}$	Phaseleiteinduktivität	H
$\vartheta$	Rotationswinkel	°, rad
S	Logischer Schaltzustand	
e	Induzierte Gegenspannung	V
F	Kraft	N
$H_a, H_b, H_c$	Logische Hall-Pegel	
J	Massenträgheitsmoment	$kg \cdot m^2$
G(s)	Übertragungsfunktion	
D	Durchmesser	m

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Skizz des BLDC-Steuerkreises.....	12
Abbildung 2: Zwischen den Rändern des stromdurchflossenen Leiters entsteht im Magnetfeld die Hall-Spannung.....	15
Abbildung 3: Querschnitt des bürstenlosen Gleichstrommotor.....	17
Abbildung 4: Vereinfachte Darstellung einer HEX-Brücke durch Schalter.....	22
Abbildung 5: In Praktikum gemessen Schaltfrequenz von PWM.....	22
Abbildung 6: Verhältnis zwischen Phasenstrom und Drehmoment.....	23
Abbildung 7: Positiveslauf der Phasenströme und Hallsignale bei einem dreiphasigen kommutierten BLDC.....	24
Abbildung 8: Portunus-Modell einer HEX-Brücke.....	29
Abbildung 9: Portunus-Modell einer PWM-Generator.....	30
Abbildung 10: Variable zur Hall-Signal-Generierung in Portunus.....	31
Abbildung 11: Variable zur Hall-Signal-Generierung in Potunus.....	31
Abbildung 12: Zustandsdiagramm der kommutierung im Combinatorial Logic in Portunus.....	32
Abbildung 13: Simulation der Chinamotor.....	33
Abbildung 14: Simulation der Mähnmotor.....	33

Abbildung 15: Simulation Motor gekoppelt mit Simulationem Inverter.....	34
Abbildung 16: Messung von Strom und Spannung am Eingang in Praktikum.....	35
Abbildung 17: Messung von Strom und Spannung am Eingang in Portunus.....	36
Abbildung 18: Beziehung zwischen dreiphasigen Strömen und Hallsignalen.....	36
Abbildung 19: Beziehung zwischen dreiphasigen Strömen und Hallsignalen.....	37
Abbildung 20: Messung der resultierenden Stromdauer in einem Periode während der Vorwärtsdrehung.....	38
Abbildung 21: Messung der resultierenden Stromdauer in einem Periode während der Rückwärtsdrehung.....	38

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich von bürstenlosen Gleichstrommotoren und bürstenförmigen Gleichstrommotoren.....	18
Tabelle 2: Beim Laufen nach Rechts wird die Hallsignal und jeweils leitende Transistorpaare des Blockkommutierten BLDCs.....	25
Tabelle 3: Beim Laufen nach Links wird die Hallsignal und jeweils leitende Transistorpaare des Blockkommutierten BLDCs.....	25
Tabelle 4: Motordaten des Chinamotor.....	26
Tabelle 5: Motordaten des Mähnmotor.....	27
Tabelle 6: PWM-Zustandsdiagramm eines Parameter in Portunus-Modell.....	30
Tabelle 7: Parameterwerte zur Rotorlagemessung in Variable.....	31
Tabelle 8: Parameterwerte zur Rotorlagemessung in Variable.....	32
Tabelle 9: Beziehung zwischen Drehzahl und Stromdauer, Stromsfrequenz.....	39

---

# 1 Einleitung

Angesichts des wachsenden Energiebedarfs und des Schwerpunkts auf erneuerbaren Energiequellen werden Inverter als wichtiges Gerät der Leistungselektronik zu einer Schlüsselkomponente in Energieumwandlungs- und -verteilungssystemen. Die Hauptfunktion eines Wechselrichters besteht darin, Gleichstrom (DC) in Wechselstrom (AC) umzuwandeln, so dass Gleichstrom aus erneuerbaren Energiequellen wie Sonnen- und Windenergie an das Stromnetz angeschlossen werden kann oder Wechselstrom in einem autonomen Stromsystem bereitgestellt werden kann. Die Entwicklung von Inverter hat nicht nur die weit verbreitete Nutzung erneuerbarer Energiequellen ermöglicht, sondern auch eine entscheidende Rolle in Bereichen wie Elektrofahrzeuge, Industrieautomatisierung und Unterhaltungselektronik gespielt. Das Funktionsprinzip von Wechselrichtern basiert auf der Schaltsteuerung der Leistungselektronik, bei der der Gleichstromfluss durch Änderung des Schaltzustands gesteuert wird, um den erforderlichen Wechselstromausgang zu erzeugen. Die Entwicklungen im Design und in den Steuerungsstrategien von Inverter haben sie effizient, zuverlässig, steuerbar und an verschiedene Anwendungsszenarien anpassbar gemacht.

In diesem Beitrag sollen die Prinzipien, Simulationen, Anwendungen und Zukunftstrends von Inverter erörtert werden. Zunächst werden die grundlegenden Funktionsprinzipien von Inverter und gängige Topologien wie z. B. Vollbrücken-Wechselrichter vorgestellt. Dann werden wir die Anwendung von Inverter in Block- und Sinusmotoren diskutieren und die Kommutierungslogik von Block- und Sinusmotoren im Detail analysieren. Abschließend wird detailliert beschrieben, wie Inverter mathematisch modelliert werden und wie sie in der Portunus-Software modelliert werden. Mit der zunehmenden Verbreitung erneuerbarer Energiequellen und der Modernisierung der Stromversorgungssysteme werden Inverter mit höheren Leistungsdichten, höheren Wirkungsgraden und größeren Anforderungen an die Intelligenz konfrontiert sein. Neue Materialien, Topologien und Kontrollstrategien werden entstehen, um die Anforderungen an Wechselrichter in zukünftigen Energiesystemen zu erfüllen. Durch die Forschung in diesem Papier werden wir ein besseres Verständnis der Funktionsprinzipien und Anwendungsbereiche von Inverter gewinnen und nützliche Hinweise und Erkenntnisse für die künftige Entwicklung der Invertertechnologie liefern.



## 2 Einführung des BLDC-Steuerkreises

Um besser zu verstehen, wie der Wechselrichter den stabilen Betrieb eines bürstenlosen Gleichstrommotors steuert, und um die Merkmale des Wechselrichters hervorzuheben, müssen wir die verschiedenen Komponenten des gesamten Steuerkreises zeichnen und im Folgenden detailliert beschreiben, welche Rolle der jeweilige Teil des von mir entworfenen Kreises spielt.

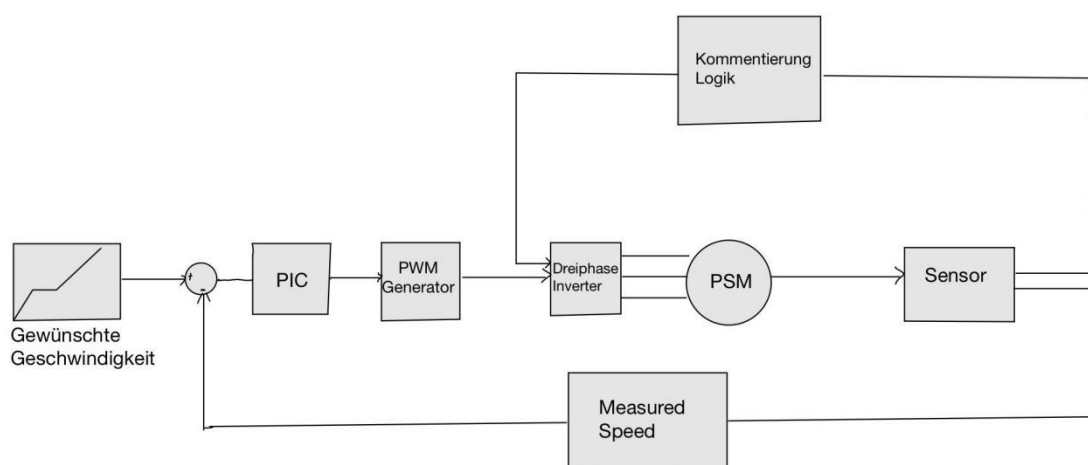


Abbildung 1: Skizz der BLDC - Steuerkreis

### 2.1 Dreiphasen-Inverter

Ein Inverter ist ein elektronische Gerät, das Gleichstrom in Wechselstrom umwandelt. Er besteht in der Regel aus Leistungselektronik (z.B. Thyristoren, MOSFETs, IGBTs usw) und einem Steuerkreis, der Gleichstrom(z.B. aus Batterien, Sonnenkollektoren usw.) in Wechselstrom zur Verwendung in elektrischen Geräten umwandelt. Die Inverter wandelt Gleichstrom in Wechselstrom um und simuliert dann das Wechselstromnetze, indem Parameter wie Frequenz, Spannung und Phase des Wechselstroms steuert. Konkret nimmt der Inverter die eingehende Gleichstromversorgung auf und verarbeitet sie durch eine Reihe elektronischer Komponenten und Steuerkreis, um einen

Hochfrequenzimpuls auszugeben, der mit Hilfe eines Ausgangsfilters in ein Wechselstromsignal umgewandelt wird. Die Inverter kann je nach Bedarf eine Sinuswelle, eine Rechteckwelle oder eine andere Art von Wechselstromsignal ausgeben<sup>1</sup>.

Die Hauptbestandteile des Inverter sind wie folgt:

1. Eingangsschnittstellenteil: zuständig für den Empfang von Gleichstrom und Steuersignalen, wie z.B. die Freigabespannung und die Ausgangsstrom-Steuersignale.
2. Spannungsstartschaltung: verantwortlich für die Ausgabe von Hochspannung, um die Last (z. B. die Hintergrundbeleuchtung) zu beleuchten, wenn der Wechselrichter in Betrieb ist.
3. PWM-Controller: verantwortlich für die Erzeugung von PWM-Signalen zur Steuerung des Schaltvorgangs der Wechselrichterbrücke, mit Funktionen wie Überspannungsschutz, Unterspannungsschutz und Kurzschlusschutz.
4. Wechselrichterbrücke: Sie ist für die Umwandlung von Gleichstrom in Wechselstrom zuständig und besteht in der Regel aus sechs MOS-Röhren.
5. Filterschaltung: Sie filtert unerwünschte Signale wie Hochfrequenzrauschen und Oberschwingungen heraus und sorgt für eine stabile Ausgangsspannung und einen stabilen Ausgangsstrom
6. Ausgangsrückkopplungsschleife: Sie ist für die Abtastung der Ausgangsspannung und des Ausgangsstroms und deren Rückführung in den PWM-Regler zur Regelung zuständig.

Im Allgemein umfasst der Funktionsumfang eines Inverters für einen BLDC-Motor Folgendes:

- Leistungsregelung: Der Inverter kann die Leistung des BLDC-Motor durch Anpassung der Spannung und des Strom regulieren.

---

<sup>1</sup> Vgl. Fang/Hong,2020,S3

- Drehzahlregelung: Der Inverter kann die Drehzahl des BLDC-Motors durch Anpassung der Frequenz des Wechselstroms regulieren.
- Richtungssteuerung: Der Inverter kann die Drehrichtung des BLDC-Motors steuern.
- Überwachung der Motorenparameter: Der Inverter kann die Parameter des BLDC-Motors wie Drehzahl, Strom, Spannung und Temperatur überwachen.
- Schutzfunktionen: Der Inverter verfügt über verschiedene Schutzfunktionen, um den Motor vor Überlastung, Kurzschluss, Überhitzung und anderen Schäden zu schützen.

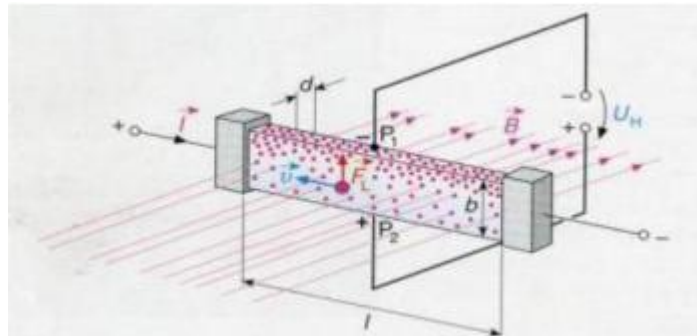
## 2.2 PWM-Generator

Ein PWM-Generator (Pulsweitenmodulation) ist ein elektronisches Gerät, das zur Erzeugung eines Signals mit einstellbarer Pulsbreite verwendet wird. Dieses Signal besteht in der Regel aus einem hohen Pegel (EIN) und einem niedrigen Pegel (AUS). Durch Einstellen des Zeitverhältnisses zwischen diesen beiden Pegeln kann ein pulsbreitenmoduliertes Signal mit unterschiedlichen Tastverhältnissen erzeugt werden. PWM wird in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt, und eine häufige Anwendung ist die Steuerung der Geschwindigkeit von Motoren in elektronischen Geräten. Durch Anpassung des Tastverhältnisses des PWM-Signals kann die durchschnittliche Spannung des Motors gesteuert werden, was eine feine Drehzahlregelung ermöglicht.

Die Freigabe der Transistoren bedeutet aber noch nicht, dass der Transistor bei Hall=1 dauerhaft eingeschaltet und bei Hall=0 dauerhaft ausgeschaltet ist. Die PWM muss auch noch berücksichtigt werden. PWM-Signal sollte direkt zur Steuerung des Schaltvorgangs des MOSFET einzubeziehen, wird in Regel ein PIC verwendet, der das PWM-Modell erzeugt und damit MOSFET entsprechend ein- oder ausschaltet. Aber den PIC haben wir in Portunus-Simulation ersetzt und mit einem Zustandsgraph realisiert.

## 2.3 Hall-Sensor

Der Hallsensor ist ein magnetischer Sensor. Er detektiert Magnetfelder und deren Veränderungen und kann in einer Vielzahl von magnetfeldbezogenen Anwendungen eingesetzt werden. Hallsensoren beruhen auf dem Hall-Effekt und sind integrierte Sensoren, die aus einem Hall-Element und der dazugehörigen Schaltung bestehen. Hallsensoren haben eine breite Palette von Anwendungen in der industriellen Produktion, im Verkehr und im täglichen Leben. Bei der elektronischen Kommutierung muss die Winkelage des Rotors über einen Positionsmesser aufgenommen werden und entsprechend der Lage müssen die einzelnen Phasen richtig bestromt werden. In dieser Arbeit soll ausschließlich die sensorgesteuerte und nicht die sensorlose Kommutierung betrachtet werden. Die Rotorposition kann beispielsweise über Hall-Sensoren gemessen werden.



**Abbildung 2: Zwischen den Rändern des stromdurchflossenen Leiters entsteht im Magnetfeld die Hall-Spannung.**

Die Funktionsweise von Hall-Sensoren beruht auf dem Hall-Effekt. Dieser beschreibt die Wirkung der Lorentzkraft auf einen im Magnetfeld bewegten Leiter. Dabei geht es nicht um die Lorentzkraft, sondern um die Wirkung auf die Träger. Die Krafrichtung des elektrischen Feldes muss senkrecht zur Richtung des elektrischen Stroms stehen. Die Lorentzkraft wirkt auf die Ladungsträger. So entsteht an einen Rand des Leiterbandes ein Elektronenüberschuss und am anderen Rand ein Elektronenmangel. Durch die gegenseitige Abstoßung der Ladungsträger am Rand des Leitbands mit Elektronenüberschuss stellt sich ein Gleichgewicht zwischen Lorentzkraft und elektrischer Feldkraft ein. Somit können die Elektronen keine Ablenkungen mehr erfahren und bewegen sich geradlinig weiter. Durch die Aufladung entsteht die

sogenannte Hall-Spannung, die beim Einstellen des Gleichgewichts zwischen den beiden Kräften ihr Maximum erreicht. Die Hall-Spannung kann abgegriffen werden<sup>2</sup>.

Hall-Sensoren brauchen Strom. Der Spannungsbereich kann von 4 Volt bis 24 Volt reichen. Die benötigten Ströme reichen von 5 bis 15 mA. Beziehen Sie sich bei der Auslegung der Steuerung auf die entsprechenden technischen Spezifikationen des Motors, um die genaue Nennspannung und den Strom des verwendeten Hall-Sensors zu erfahren. Der Hall-Sensor-Ausgang ist normalerweise ein Kollektor-offener Kreislauf. Pull-up-Widerstände können auf der Controllerseite erforderlich sein<sup>3</sup>.

---

<sup>2</sup> Vgl. Hendershot, 1994, S24.

<sup>3</sup> Vgl. Padmaraja, 2003, S5.

### 3 Der bürstenlose Gleichstrommotor

Bürstenlose Gleichstrommotoren (BLDC) sind einer der schnell beliebten Motortypen. BLDC-Motoren werden in der Haushaltsgeräte-, Automobil-, Luft- und Raumfahrt-, Verbraucher-, Medizin-, Industrieautomations- und Instrumentenindustrie eingesetzt.

Wie der Name schon sagt, verwendet der BLDC-Motor keine Bürste für die Kommutierung; Stattdessen werden sie elektronisch kommutiert. BLDC-Motoren haben viele Vorteile gegenüber bürstenbehafteten DC-Motoren und Induktionsmotoren. Einige davon sind:

- Bessere Drehzahl- und Drehmomenteigenschaften
- Hohes dynamisches Ansprechverhalten
- Hoher Wirkungsgrad
- Lange Lebensdauer Geräuschloser Betrieb
- Höherer Drehzahlbereich

Die BLDC-Maschine ist eine Synchronmaschine. Dies bedeutet, dass das vom Stator erzeugte Magnetfeld und das vom Rotor erzeugte Magnetfeld mit der gleichen Frequenz rotieren. BLDC-Motoren haben kein "Schlupf" -Phänomen, das bei Induktionsmotoren üblich ist. Die BLDC Motoren sind in einphasiger, zweiphasiger und dreiphasiger. Der Stator weist entsprechend seinem Typ die gleiche Anzahl von Wicklungen auf. Unter ihnen sind 3-phasenmotoren die beliebtesten und weit verbreiteten. Diese Anwendungsnotiz befasst sich hauptsächlich mit 3-phasenmotoren. Im Vergleich zu anderen Motortypen mit Bürsten-DC-Motoren und Induktionsmotoren weisen BLDC-Motoren viele Vorteile und wenige Nachteile auf. Bürstenlose Motoren erfordern weniger Wartung und haben daher eine längere Lebensdauer als bürstenförmige Gleichstrommotoren. BLDC-Motoren erzeugen mehr Ausgangsleistung pro Frame als bürstenbehaftete DC-Motoren und Induktionsmotoren. Da der Rotor aus einem Permanentmagnetsystem besteht, ist die Trägheit des Rotors im Vergleich zu anderen Motortypen gering. Dies verbessert die Beschleunigungs- und

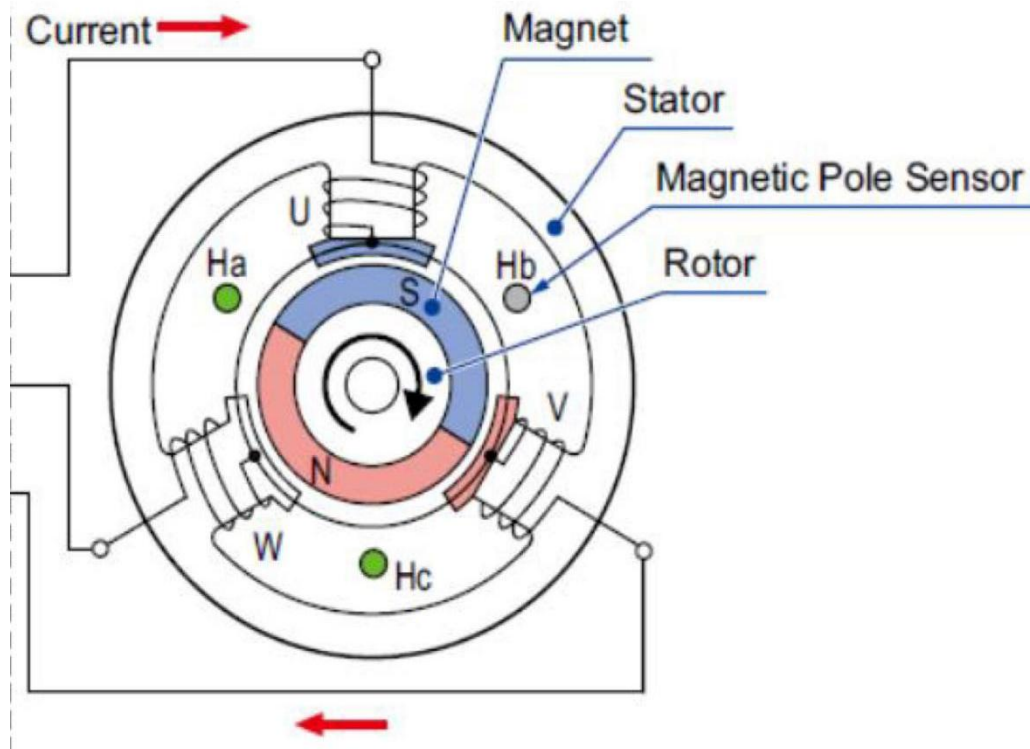
Verzögerungseigenschaften und verkürzt die Betriebszyklen. Ihre lineare Drehzahl/Drehmoment-Charakteristik erzeugt eine vorhersagbare Drehzahlregelung. Der bürstenlose Motor eliminiert die Bürstenkontrolle und ist somit ideal für Anwendungen mit begrenzten Kontaktflächen und Wartungsschwierigkeiten. BLDC-Motoren laufen deutlich leiser als bürstenförmige DC-Motoren und reduzieren elektromagnetische Störungen (EMI). Das Niederspannungsmodell ist ideal für batteriebetriebene, tragbare Geräte oder medizinische Anwendungen. Tabelle 1 fasst den Vergleich zwischen BLDC-Motoren und bürstenbehafteten DC-Motoren zusammen.

Feature	BLDC Motor	Brushed DC Motor
Commutation	Electronic commutation based on Hall position sensors.	Brushed commutation.
Maintenance	Less required due to absence of brushes.	Periodic maintenance is required.
Life	Longer.	Shorter.
Speed/Torque Characteristics	Flat – Enables operation at all speeds with rated load.	Moderately flat – At higher speeds, brush friction increases, thus reducing useful torque.
Efficiency	High – No voltage drop across brushes.	Moderate.
Output Power/ Frame Size	High – Reduced size due to superior thermal characteristics. Because BLDC has the windings on the stator, which is connected to the case, the heat dissipation is better.	Moderate/Low – The heat produced by the armature is dissipated in the air gap, thus increasing the temperature in the air gap and limiting specs on the output power/frame size.
Rotor Inertia	Low, because it has permanent magnets on the rotor. This improves the dynamic response.	Higher rotor inertia which limits the dynamic characteristics.
Speed Range	Higher – No mechanical limitation imposed by brushes/commutator.	Lower – Mechanical limitations by the brushes.
Electric Noise Generation	Low.	Arcs in the brushes will generate noise causing EMI in the equipment nearby.
Cost of Building	Higher – Since it has permanent magnets, building costs are higher.	Low.
Control	Complex and expensive.	Simple and inexpensive.
Control Requirements	A controller is always required to keep the motor running. The same controller can be used for variable speed control.	No controller is required for fixed speed; a controller is required only if variable speed is desired.

**Tabelle 1: Vergleich von bürstenlosen Gleichstrommotoren und bürstenförmigen Gleichstrommotoren<sup>4</sup>**

<sup>4</sup> Vgl. Padmaraja,2003,S5

### 3.1 Prinzipieller Aufbau



**Abbildung 3: Querschnitt des bürstenlosen Gleichstrommotor**

Abbildung 3 zeigt einen Querschnitt eines BLDC-Motors mit einem Rotor mit abwechselnden N- und S-Permanentmagneten. Der Hall-Sensor ist im festen Teil des Motors eingebettet. Das Einbetten von Hall-Sensoren in den Stator ist ein komplexer Prozess, da jede Fehlausrichtung dieser Hall-Sensoren relativ zu den Rotormagneten zu Fehlern bei der Bestimmung der Rotorposition führt. Um die Installation des Hall-Sensors am Stator zu vereinfachen, können einige Motoren zusätzlich zu dem Hauptrotormagneten einen Hall-Sensormagneten am Rotor montieren. Dies sind verkleinerte Kopien des Rotors. Daher erzeugt der Hall-Sensormagnet bei jeder Rotation des Rotors die gleiche Wirkung wie der Hauptmagnet. Der Hall-Sensor wird üblicherweise auf einer Leiterplatte montiert und am Gehäusedeckel des nicht angetriebenen Endes befestigt. Dies ermöglicht es dem Anwender, die gesamte Komponente des Hall-Sensors so anzupassen, dass sie mit dem Rotormagneten ausgerichtet ist, um eine optimale Leistung zu erzielen. Abhängig von der physikalischen Position des Hall-Sensors gibt es Ausgabeversionen. Die Phasenverschiebung zwischen den Hall-Sensoren kann  $120^\circ$  betragen. Auf dieser Grundlage legt der Motorhersteller die Kommutierungsreihenfolge fest, die befolgt



werden sollte<sup>5</sup>. Eine Phase lässt sich durch ihren elektrischen Widerstand und ihre Induktivität beschreiben. Es wird angenommen, dass die Spulen aus Kupfer sind. Der Kupferwiderstand einer Phase kann durch

$$R_A = \frac{l_{Cu} \times \rho_{Cu}}{A_{Cu}} \quad (1.1)$$

mit dem spezifischen Widerstand  $\rho_{Cu}$  von Kupfer, der Querschnittsfläche  $A_{Cu}$  und der Länge des Leiters  $l_{Cu}$  berechnet werden.

Die Induktivität einer Phase lässt sich aus dem magnetischen Widerstand  $R_m$  und der Windungszahl  $w$  beschreiben

$$L_A = \frac{w^2}{R_m} \quad (1.2)$$

Der magnetische Widerstand berechnet sich ähnlich wie der elektrische Widerstand

$$R_m = \frac{l_m}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot A_m} \quad (1.3)$$

Nun kann die Phase modelliert werden. Sie lässt sich durch eine Reihenschaltung aus elektrischem Widerstand und Induktivität beschreiben. Die Übertragungsfunktion des elektrischen Netzwerks, das eine Phase beschreibt, ergibt sich aus

$$G_{phase}(s) = \frac{1/R_A}{1 + L_A/R_A \cdot s} = \frac{K}{1 + T_A \cdot s} \quad (1.4)$$

Diese Gleichung dient zur grundlegenden Beschreibung der elektromechanischen Wandlung einer Phase im Motor. Auf die genaue Verschaltung der Teilsysteme wird in der Modellierung in Kapitel 4 eingegangen.

---

<sup>5</sup> Vgl. Höger.2002.S18

## 3.2 Funktionsweise

Die Funktion der BLDC-Motoren basiert auf der Umwandlung von elektrischer Energie in magnetische und in mechanische. Die am Rotor angebrachten Dauermagnete erzeugen in guter Näherung ein betragsmäßig konstantes magnetisches Feld  $B$ . Die Spulen werden zeitlich versetzt bestromt und erzeugen ein Feld am Stator. Da sich gleichnamige Pole abstoßen und ungleichnamige anziehen, entsteht eine Kraftwirkung zwischen dem magnetischen Feld der Dauermagnete und dem der Spulen. Das Drehfeld hat ein Drehmoment am Daueranteriorregten Rotor zur Folge. Der Rotor dreht sich so lange, bis sich Nord und Südpol gegenüber stehen, sich anziehen und der Motor zum Stehen kommt. Um eine kontinuierliche Drehung bzw. Ein kontinuierliches Drehmoment zu erzeugen, muss sich das Statormagnetfeld zum richtigen Zeitpunkt ändern. Dies übernimmt die elektronische Kommutierung, die die Bestromung der Erregerwicklung in Abhängigkeit der Rotorposition steuert, sodass ein Drehmoment gebildet wird. Diese Bachloraufgabe der Ansteuerung kann durch einen digitalen Controller übernommen werden. Hierzu muss die Position des Rotors bekannt sein. Diese wird durch Sensoren detektiert. Der Controller liest die Signale der Positionssensoren aus und leitet die passende Ansteuersequenz an die Leistungselektronik weiter.

Der prinzipielle Mechanismus eines Elektromotors basiert auf der Lorentzkraft

$$F_L = B \cdot l \cdot i \quad (1.5)$$

Wobei  $l$  die Länge des Leiters im Magnetfeld ist.

Die durch die Rotordrehung in den Statorkreis induzierte Gegenspannung heißt elektromotorische Kraft mit der Abkürzung EMK

$$e = B \cdot v \cdot l \quad (1.6)$$

Sie wird auch Gegen-EMK oder BMFK (Back ElectroMotive Force) bezeichnet. Allerdings ausschließlich die Bezeichnung der induzierten Gegenspannung mit dem Formelzeichen  $e$ . Da Dauermagnete eingesetzt werden, kann der magnetische Fluß  $B$  als konstant gesehen werden. Gleichung (1.6) muss um die Wicklungsanzahl  $N$

erweitert werden. Aus dem Zusammenhang zwischen Winkelgeschwindigkeit  $\omega$ , Radius  $r$  und translatorischer Geschwindigkeit  $v$

$$\omega = \frac{v}{r} \quad (1.7)$$

ergibt sich für die induzierte Gegenspannung

$$e = N \cdot B \cdot l \cdot r \cdot \omega = k_E \cdot \omega \cdot B \quad (1.8)$$

Die Konstanten  $N$ ,  $l$ ,  $r$  werden zur elektrischen Motorkonstante  $k_E$  zusammengefasst, die das Verhältnis zwischen induzierter Gegenspannung, magnetischer Flussdichte und Winkelgeschwindigkeit darstellt.

In Elektromotoren gibt es zwei Größen zur Definition der Position und der Geschwindigkeit. Die mechanische Position  $\varphi_m$  und elektrische  $\varphi_e$ . Diese sind identisch, wenn sich der Rotor um  $360^\circ$  drehen muss, um die gleiche magnetische Orientierung zu haben. Dies trifft für einen einpoligen Motor zu. Hat der Motor mehrere Pole, so stehen mechanische und elektrische Position in einem Verhältnis, das auf der Anzahl der Pole  $p$  basiert.

$$\varphi_e = \varphi_m \cdot p \quad (1.9)$$

Bei vier Polpaaren entsprechen  $1440^\circ$  elektrischer Rotation genau einer mechanischen Umdrehung.

### 3.3 Sensorik der elektronischen Kommutierung

Das Ziel der elektrischen Kommutierung ist es, den Strom so anzulegen, dass das maximale Drehmoment entsteht. Dies wird durch die senkrechte Orientierung der Magnetfelder von Dauermagneten und Phasen erreicht. Bei der elektrischen Kommutierung muss die Winkellage des Rotors über einen Positionsmesser aufgenommen werden und entsprechend der Lage müssen die einzelnen Phasen richtig bestromt werden. In dieser Arbeit soll ausschließlich die sensorgesteuerte und nicht die sensorlose Kommutierung betrachtet werden. Das Gebersystem zur Erfassung der Rotorlage gegenüber dem Ständer besteht bei dem innerhalb dieser Arbeit eingesetzten Motor aus drei um  $120^\circ$  versetzte Hall-Sensoren. Die Bestromung der Wicklungen in Abhängigkeit der Läuferlage übernimmt ein aus einem Gleichspannungszwischenkreis gespeister Inverter in Brückenschaltung. Dreht sich der Läufer weiter, wird die nächste Phase bestromt. Durch Pulsweitenmodulation (PWM) werden die Ströme in den einzelnen Phasen gesteuert.

Die Rotorposition kann über Hallsensoren, Resolver oder optische Encoder kontaktlos gemessen werden. Die Vorteile von Resolvoren sind die sehr genaue Messwertaufnahme und die Detektierbarkeit der Signale in jeder Position und bei jeder Geschwindigkeit. Resolver werden eingesetzt, wenn mehr Information nötig sind, als die zur Kommutierung, z.B. für Tachometer. Der entscheidende Nachteil eines Resolvers liegt in seinem verhältnismäßig hohen Preis. Optische Encoder kommen zum Einsatz, wenn mehr Information, als die für die Kommutierungspulse erforderlichen, benötigt werden. Optische Messverfahren haben den Nachteil, dass die Lochscheiben verschmutzen und dadurch das Messergebnis verfälscht wird. Die Messaufnahme über Hallsensoren ist eine geeignete Alternative. Hall-Sensoren haben alle Vorteile der beiden anderen Instrumente.

### 3.4 Brückenschaltung und Ansteuerung

Um eine Rotorbewegung durch ein treibendes Motormoment hervorrufen zu können, müssen die Phasen nacheinander angesteuert werden. Das Vorzeichen des Erregerstroms muss mit dem Vorzeichen des Rotorfeldes übereinstimmen. Bei BLDC-Motor verändert sich das Rotorfeld abhängig von der Rotorposition. Daher muss das Statorfeld durch die elektronische Kommutierung entsprechend nachgestellt werden. Diese besteht grundlegend aus einer Brückenschaltung und deren Ansteuerung, auf die im Folgenden näher eingegangen werden soll.

Für den Betrieb von zwei oder drei Phase hat sich die Verwendung einer HEX-Brücke, bestehend aus sechs Leistungsschaltern. Die Brückenschaltung ermöglicht, den Motor anzuschalten und wahweise vorwärts oder rückwärts drehen zu lassen. Als Schalter werden Leistungs-MOSFETs oder IGBTs verwendet. Die Transistoren sollten so unempfindlich wie möglich gegen durch Induktion verursachte Einschaltspannung sein. Die Schaltzeit bei MOSFETs liegt im Nanosekundenbereich, wodurch sehr hohe schaltfrequenzen möglich sind. Für Niederspannungssysteme Können MOSFETs mit sehr kleinen Widerständen im Bereich von 6 mΩ und 60 V ausgelegt werden. Es ist aber auch der Einsatz für mehrere hundert Volt und einige 10 Ampere möglich. Für Hochspannungs- und Hochstromanwendungen finden vielmehr IGBTs ihren Einsatz. Der IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) ist die Kombination eines MOSFETs als Eingangsstufe und eines Bipolar transistors als Ausgangsstufe. Seine Verlustleistung ist linear zum Strom. Insbesondere im Vergleich zur bisher eingesetzten GTO-Thyristor-Technik sind der einfachere Aufbau, eine nahezu leistunglose Ansteuerung der IGBTs sowie die höhere Taktfrequenz ausschlaggebend. Für das Ein- und Ausschalten sind nur kleine Steuerleistungen erforderlich und der Durchlasswiderstand ist sehr gering. Sie sind in Leistungsbereichen bis zu 1700V und über 500A verfügbar<sup>6</sup>. Beide Transistoren besitzen drei elektrische Anschlüsse. Für die Ansteuerung soll festgelegt werden, dass eine positive Spannung, bzw. Logisch 1, das Gate leitend macht. Dies ermöglicht einen Stromfluss zwischen Drain- und Source-Anschluss bei MOSFETs. Für eine logische 0 gelten sie als sperrend. In dieser Arbeit wird die HEX-Brücke aus MOSFETs aufgebaut. Da wir haben die Schaltfrequenz  $f_{PWM} = 16.666\text{kHz}$  und mit Spannung = 50V gearbeitet, wenden wir mit MOSFETs an. Aber geht mit IGBT auch, die erzeugen aber dieser Frequenz sehr hohe Schaltverlust. Der Gate-Eingang wird über einen geeigneten Gate-Treiber gesteuert.

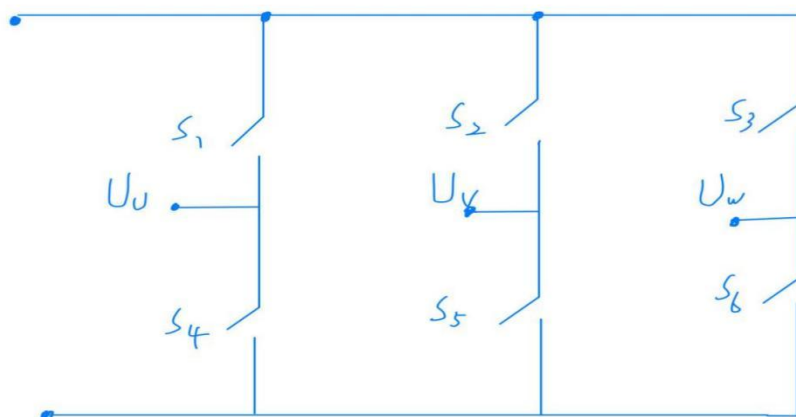
---

<sup>6</sup> Vgl. Rauchfuß, 2011



**Abbildung 4: In Praktikum gemessen Schaltfrequenz von PWM**

Die Kommutierungsart bestimmt, ob zwei oder drei Phasen gleichzeitig bestromt werden. In dieser Arbeit werden Block- und Sinuskommutierung betrachtet. In dieser Arbeit werden Block- und Sinuskommutierung betrachtet. Die Phasenspannungen  $U_u$   $U_v$   $U_w$  können zu einer Sternschaltung verschaltet werden. In beiden Fällen an der Kommutierung ist der Aufbau der Brücke nach Abbildung 7 identisch.



**Abbildung 5: Vereinfachte Darstellung einer HEX-Brücke durch Schalter**

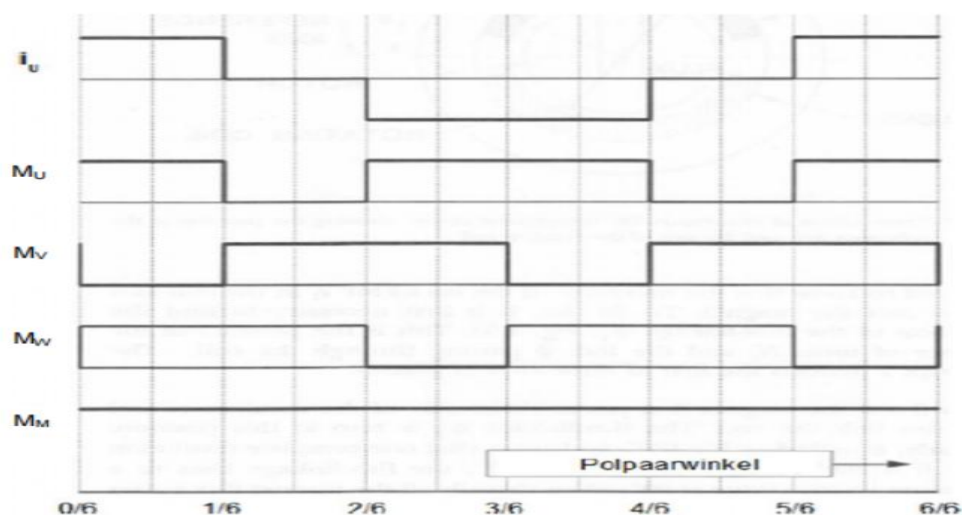
### 3.5 Logik des Blockkommutierten Motors

Die Phasen im BLDC-Motor können auf unterschiedliche Weise bestromt werden. Die Form der Phasenströme wird durch die Schaltsequenz der Brückenschaltung beeinflusst. Das Ziel dabei ist ein konstanter Drehzahl.

$$e_j \times i_j = M_j \times \omega \quad (2.0)$$

Grundsätzlich sind zwei Varianten verbreitet: ein block- oder ein sinusförmiger Stromverlauf. Ersterer erfordert eine Blockkommutierung und Letzterer den sinuskommutierten Motor. In beiden Fällen ist die Leistungselektronik die gleiche, lediglich die Kommutierungslogik und die Reglerstrategie unterscheiden sich voneinander.

Die Blockkommutierung ist aufgrund ihres einfachen Aufbaus die Standardkommutierung. Aufbauend auf ihrem Verständnis kann die Sinuskommutierung hergeleitet werden. Bei einem dreiphasigen BLDC-Motor mit Blockkommutierung werden immer zwei Phasen bestromt, während die dritte aus ist. Welche beiden Phasen bestromt werden müssen, hängt von der Rotorlage ab. Die beiden Phasen erzeugen je ein Einzeldrehmoment  $M_j$ , deren Summe das Gesamtdrehmoment  $M_M$  ergibt.



### Abbildung 6: Verhältnis zwischen Phasenstrom und Drehmoment<sup>7</sup>

Die Transistoren der HEX-Brücke dienen als Schlater, somit können die Phasenströme  $i_U, i_V, i_W$  nur einen rechteckförmigen Verlauf beschreiben. Um nach Gleichung 2 ein konstantes Drehmoment erzeugen zu können, müssen die Vorzeichen der Phasenströme immer mit dem der induzierten Gegenspannung übereinstimmen. Das heißt, sobald ein Polwechsel auftritt, wird die Polarität der Phasenströme umgekehrt. Der Verlauf der Phasenströme und die jeweilige Transistorkombination sind in Abbildung 7 dargestellt.

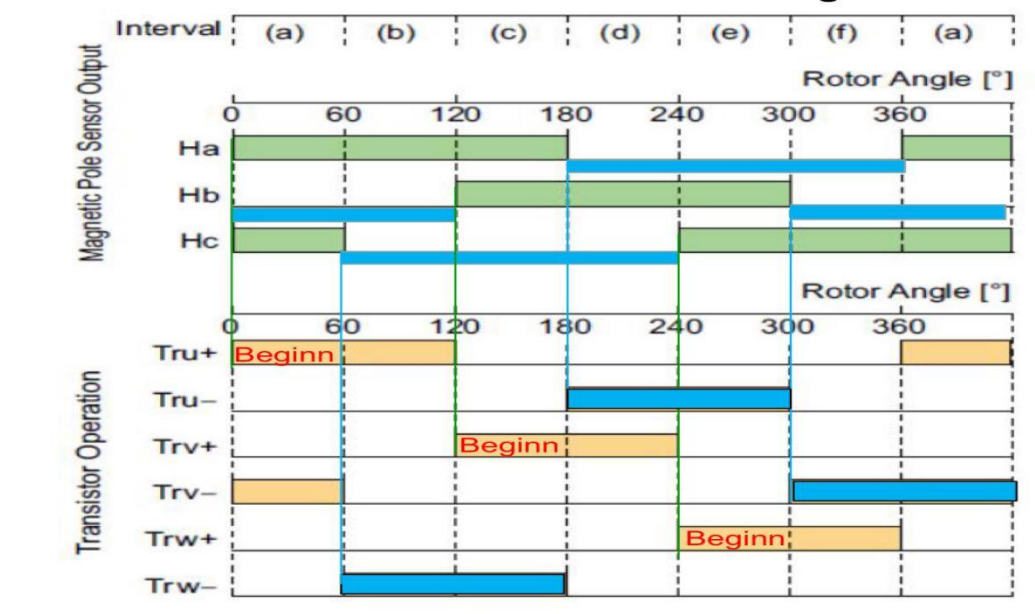


Abbildung 7: Positiveslauf der Phasenströme und Hallsignale bei einem dreiphasigen, blockkommutierten BLDC<sup>8</sup>.

Die Nummerierung der Transistoren bezieht sich auf die Brückenschaltung in Kapitel 5.2. Die Rotorposition bestimmt, welche Phasen angesteuert werden müssen. Der Vorteil der Blockkommutierung liegt in der Einfachheit der Positionsmessung. Hierfür sind keine teuren und hochauflösenden Messeinrichtungen nötig, sondern es genügen bei einem dreiphasigen BLDC drei Hall-Schalter. Beim blockkommutierten Motor wird bei jedem Signalübergang der Hall-Sensoren die Phasenlage geändert. Bei einem dreiphasigen BLDC entspricht ein Kommutierungsintervall einem Sechstel des Polpaarwinkels. Üblicherweise sind zwei Transistoren leitend, wobei jeder für zwei

<sup>7</sup> Vgl. Johannan, 2013

<sup>8</sup> Vgl. Rauchfuß, 2023



Sechstel einer Kommutierungsperiode leitet. In nächstehender Tabelle 1 sind die leitenden Transistorpaare in Abhängigkeit der Hallsignal für eine Rechtslauf (DR=0) dargestellt. Wenn sich der Motor in Linkslauf, ist die Flussrichtung der Phasenströme in jeder Phase entgegengesetzt zur Flussrichtung der Phasenströme in jeder Phase bei Rechtslaufen.

Rechts lauf (DR=0)									
Reihenfolge	Winkel	Hallsignal ein			PWM Aktive		Phasestrom		
		A	B	C			U	V	W
a	0-60	1	0	1	Z1	Z5	DC+	DC-	0
b	60-120	1	0	0	Z1	Z6	DC+	0	DC-
c	120-180	1	1	0	Z2	Z6	0	DC+	DC-
d	180-240	0	1	0	Z2	Z4	DC-	DC+	0
e	240-300	0	1	1	Z3	Z4	DC-	0	DC+
f	300-360	0	0	1	Z3	Z5	0	DC-	DC+

**Tabelle 1: Beim Laufen nach Rechts wird die Hallsignal und jeweils leitende Transistorpaare des Blockkommutierten BLDCs**

Links lauf (DR=1)									
Reihenfolge	Winkel	Hallsignal ein			PWM Aktive		Phasestrom		
		A	B	C			U	V	W
a	360-300	1	0	1	Z2	Z4	DC-	DC+	0
b	300-240	1	0	0	Z3	Z4	DC-	0	DC+
c	240-180	1	1	0	Z3	Z5	0	DC-	DC+
d	180-120	0	1	0	Z1	Z5	DC+	DC-	0
e	120-60	0	1	1	Z1	Z6	DC+	0	DC-
f	60-0	0	0	1	Z2	Z6	0	DC+	DC-

**Tabelle 2: Beim Laufen nach Links wird die Hallsignal und jeweils leitende Transistorpaare des Blockkommutierten BLDCs**

Das Verhalten eines blockkommutierten BLDCs entspricht dem eines gewöhnlichen bürstenbehafteten Gleichstrommotors. Somit sind die Verläufe der physikalischen Größen, wie Flussverkettung, der beiden Motortypen identisch. Normalweise können Blockkommutierte BLDCs mit Dreieck- oder Sternschaltung aufgebaut werden. Mit Beginn eines 1 Hallsignales, wird der zugeordnete Transistor eingeschaltet und mit

Beginn des Nächsten 0 Hallsignales ausgeschaltet. Dadurch ist jeder Transistor nur  $120^\circ$  eingeschaltet. Es führen dadurch immer nur 2 Phasen Strom, was einem zu- und abfließenden Strom, ähnlich der Gleichstrommaschine entspricht. Die Stromwendung erfolgt elektronisch.

Blockkommutierte BLDCs zeichnen sich durch ihre hohe Robustheit und Zuverlässigkeit, ihre geringe elektrische und mechanische Zeitkonstante, ihren hohen Wirkungsgrad und die einfache Steuer- und Regelmöglichkeit aus. Da der BLDC das gleiche mathematische Modell wie der Gleichstrommotor besitzt, lassen sich auch bestehende Regelkonzepte übernehmen. Wir nutzen die Hallsignale der Hallsensoren in den BLDC-Motoren, um die Hallsignale in PWM-Tastverhältnisse umzuwandeln, die wiederum das Ein- und Ausschalten der entsprechenden Schalter steuern. Ein Nachteil der BLDC-Motoren ist, dass die Drehzahl aufgrund des geringen Rückkopplungssignals der Hallsensoren bei etwa 300 U/min liegt. Die bei niedrigeren Drehzahlen auftretende Drehmomentwelligkeit erhöht den Geräuschpegel und verringert die Betriebsleistung<sup>9</sup>.

---

<sup>9</sup> Vgl. Schrittmotor animation, 2012

### 3.6 Bekannte Motorparameter

Um die Parameter des Blockmotors und Mähmotors in die Simulationssoftware Portunus' Analogue Motor eingeben zu können. Zur Modellierung in den folgenden Kapiteln werden die Parameter des Motors verwendet. Eine Übersicht der relevanten Motordaten ist in Tabelle 3 zusammengestellt.

Parameter	Formelzeichen	Wert
Polpaarzahl	$P$	5
Phasenleiterwiderstand	$R_A$	$0.015\Omega$
Phasenleiterinduktivität	$L_{d,q}$	0.8mH
Rotor-Trägheitsmoment	$J_M$	$0.018kgm^2$
Elektrische Zeitkonstante	$T_E$	18ms
Maximale Drehzahl	$n_{max}$	2200 1/min
Nennspannung	$U$	55V

**Tabelle 3: Motordaten des Chinamotors**

Parameter	Formelzeichen	Wert
Polpaarzahl	P	6
Phasenleiterwiderstand	$R_A$	0.005Ω
Phasenleiterinduktivität	$L_{d,q}$	0.2052mH
Rotor-Trägheitsmoment	$J_M$	0.020373kgm <sup>2</sup>
Elektrische Zeitkonstante	$T_E$	18ms
Maximale Drehzahl	$n_{max}$	2200 1/min
Nennspannung	U	55V

**Tabelle 4: Motordaten des Mähnmotors**

## 4. Modellierung mit Portunus

Denn wir haben in unserem Praktikum bereits den Funktionsumfang des Inverters und die verschiedenen Parameter des Inverters und des Chinamotors, des Mähmotors ermittelt. Mit Hilfe von Portunus wird in folgenden Kapitel ein Modell für den Inverter aufgestellt, simuliert und die Ergebnisse diskutiert. Der Inverter wird in seine verschiedenen Komponenten eingeteilt und einzeln aufgebaut, die hier schrittweise erklärt werden. Im Anschluss können die Inverter und PSM zusammengeschaltet werden, wird das dynamische Verhalten des Inverters überprüft. Abschließend werden die Simulationsergebnisse ausgewertet.

### 4.1 Vorbetrachtung

Die Portunus-Toolbox Electrical Machines stellt ein Modell eines Brushless DC-Motor bereit. Dem Modell liegt ein dreiphasiger permanenterregter Synchronmotor zugrunde, dessen induzierte Gegenspannung trapezförmig verläuft. Der Inverter wird zunächst in die folgenden Teilsysteme zerlegt:

- HEX -Brücke aus sechs MOSFETs
- PWM-Generator
- Hall-Sensoren
- Ansteuerung des blockkommutierten BLDCs

## 4.2 HEX-Brücke

Portunus bietet zwei Block, der universell als dreiphasiger Leistungsumwandler verwendet werden kann. Die HEX-Brücke besteht aus sechs Leistungsschaltern als Brücke verschaltet. Wir können zwischen verschiedenen Leistungsschaltern (Diode, Thyristor, IGBT, MOSFET) gewählt werden. Zur Kommutierung des dreiphasigen Motors sind sechs Leistungsschalter nötig. Innerhalb dieser Arbeit wird allerdings die selbst erstellte Brückenschaltung, die aus MOSFETs aufgebaut ist, verwendet. Um die Verzögerungszeit beim Ein- und Ausschalten der MOSFETs zu simulieren, stellt die Steuersignale zur Verfügung. Hier besteht die Hauptaufgabe des MOSFET darin, den Ein- und Ausschaltzustand des Gleichstroms zu steuern; die Diode spielt hauptsächlich die Rolle der Gleichrichtung des Wechselstroms in Gleichstrom.

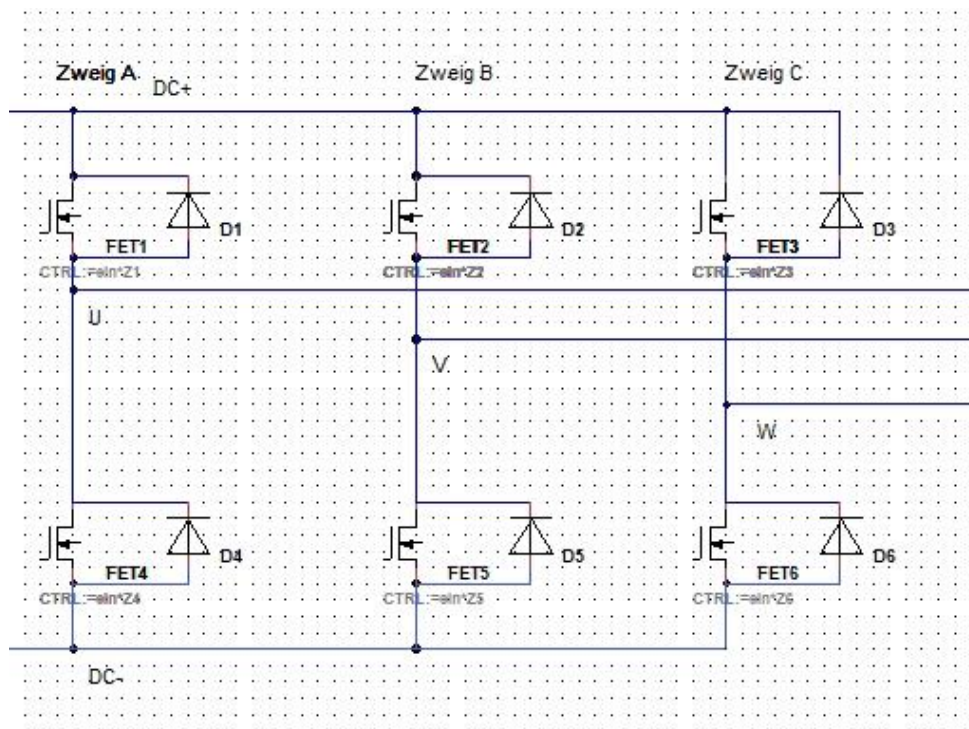


Abbildung 8: Portunus-Modell einer HEX-Brücke.

## 4.3 PWM Generator

Um die MOSFET-Röhren ein- und auszuschalten, steuern wir jeden MOSFET mit PWM-Modulation. Die Hauptgründe dafür sind: 1. die Impulsamplitude und die Schaltmodulationsfrequenz sind fest. 2. durch Anpassung der Impulsbreite können wir die Einschaltzeit und damit die durchschnittliche Spannung zur Steuerung der Motordrehzahl steuern. In der Portunus-Software verwenden wir das State-Modul und das Transition-modul, um ein Zustandsdiagramm für das PWM-Modulationsverfahren zu erstellen. Die grundlegende Logik für einen PWM-gesteuerten Schalter ist, dass bei  $t=t_A$  die PWM den MOSFETs einschaltet; bei  $t-t_A > t_{\text{ein}}$  schaltet die PWM den MOSFETs aus; bei  $t-t_A > T_{\text{PWM}}$  wird die PWM wieder eingeschaltet. Der im Zustandsdiagramm der PWM eingestellte Startzustand ist das Einschalten des Schalters  $\text{ein}=1$ , vor allem, weil unser Hauptzweck der Antrieb des Motors ist. Obwohl der Startzustand  $\text{ein}=0$  ist, kann sich der Motor im Portunus immer noch normal drehen, aber nur weil es keine Reibung gibt.

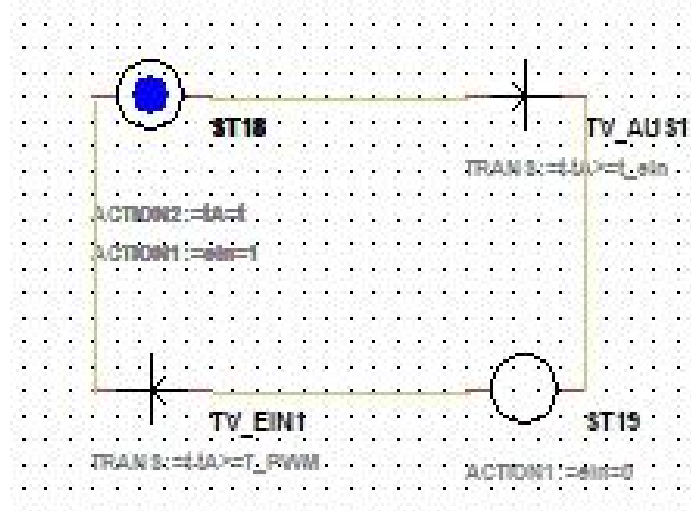


Abbildung 9: Portunus-Modell eines PWM-Generators

Wenn wir das PWM-Zustandsdiagramm fertig geschrieben haben, müssen wir auch die Parameter des Zustandsdiagramms in Variable einstellen.

Parameter	Wert
tA	0
t_ein	$(U\_Poti/5)*T\_PWM$
T_PWM	1/16666
U_Poti	0V-5V

**Tabelle 5: PWM-Zustandsdiagramm eines Parameter in Portunus-Modell**

## 4.4 Hall-Sensoren

Für die Ansteuerung des Motors muss die Winkelposition des Rotors erfasst werden. Da der Rotor mit Dauermagneten ausgestattet ist, kann die Winkellage mit Hilfe von Hall-Sensoren ermittelt werden. Digitale Hall-Sensoren besitzen eine Schaltschwelle, ab der sie einen bestimmten Wert liefern. Innerhalb des Variable eines Portunus-Modell werden die Hall-Signale durch Korrekturwinkel und logische Verknüpfen realisiert. Abhängig vom aktuellen, zurückgesetzten Polpaarwinkel wird der Wert der drei Hall-Sensoren bestimmt.

```

if ( theta_el_var >= 2*PI/6*0+Korr && theta_el_var <= 2*PI/6*3+Korr )
{
    Hall_A=1;
}
else
{
    Hall_A=0;
}
//Hall_B
if (theta_el_var >= 2*PI/6*2+Korr && theta_el_var <= 2*PI/6*5+Korr
{
    Hall_B=1;
}
else
{
    Hall_B=0;
}
//Hall_C
if (theta_el_var >= 2*PI/6*1+Korr && theta_el_var <= 2*PI/6*4+Korr
{
    Hall_C=0;
}
else
{
    Hall_C=1;
}

```

**Abbildung 10: Variable zur Hall-Signal-Generierung in Chinamotor**



Um die Position des Rotors zu bestimmen, müssen wir die entsprechenden Parameterwerte in Variable einstellen.

Omega_var	$\text{Polpaarzahl} * 2 * \text{PSM1.N} / 60$
Korrekturwinkel	$30 * \text{PI} / 180$
Polpaarzahl	5

**Tabelle 5: Parameterwerte zur Rotorlagemessung in Chinamotor**

Hier ist zu beachten, dass die Position des Rotors von Motor zu Motor unterschiedlich ist.

```

if ( theta_el_var >= 2*PI/6*3+Korr && theta_el_var <= 2*PI/6*6+Korr )
{
    Hall_A=1;
}
else
{
    Hall_A=0;
}
//Hall_B
if ( theta_el_var >= 2*PI/6*1+Korr && theta_el_var <= 2*PI/6*4+Korr )
{
    Hall_B=1;
}
else
{
    Hall_B=0;
}
//Hall_C
if ( theta_el_var >= 2*PI/6*2+Korr && theta_el_var <= 2*PI/6*5+Korr )
{
    Hall_C=0;
}
else
    Hall_C=1;

```

**Abbildung 11: Variable zur Hall-Signal-Generierung in Mähnmotor**

Omega_var	$\text{Polpaarzahl} * 2 * \text{PSM1.N} / 60$
Korrekturwinkel	$-30 * \text{PI} / 180$
Polpaarzahl	6

**Tabelle 7: Parameter zur Rotorlagemessung in Mähnmotor**

## 4.5 Ansteuerung des Kommutierten BLDCs

Mit Hilfe der Hall-Signale kann die Kommutierungsschaltlogik des Motors erstellt werden. Dies wurde bereits in Kapitel 3.5 hergeleitet und wird nun für die beiden Motortypen speziell umgesetzt. Für die Kommutierungslogik kann eine Combinatorial Logic verwendet werden. Die Combinatorial Logic bietet sich an, um unübersichtliche UND/ODER-Verknüpfungen zu vermeiden. Der Block liefert eine Wahrheitstabelle, mit der die Schaltzustände in Abhängigkeit von den Hall-Pegeln zugeordnet werden können.

Die Transistorschaltvorgaben für alle drei Phasen lassen sich aus den Hall-Signalen herleiten. In nachfolgender Bildung sind die Transistorpaare aufgelistet, die bei gegebener Hall-Pegel-Kombination leitend sein müssen, um ein konstantes Drehmoment zu erzeugen. Die Bildung aus Kapitel 3.5 kann einfach in den Combinatorial Logic Zustandsdiagramm der Portunus-Umgebung übernommen werden.

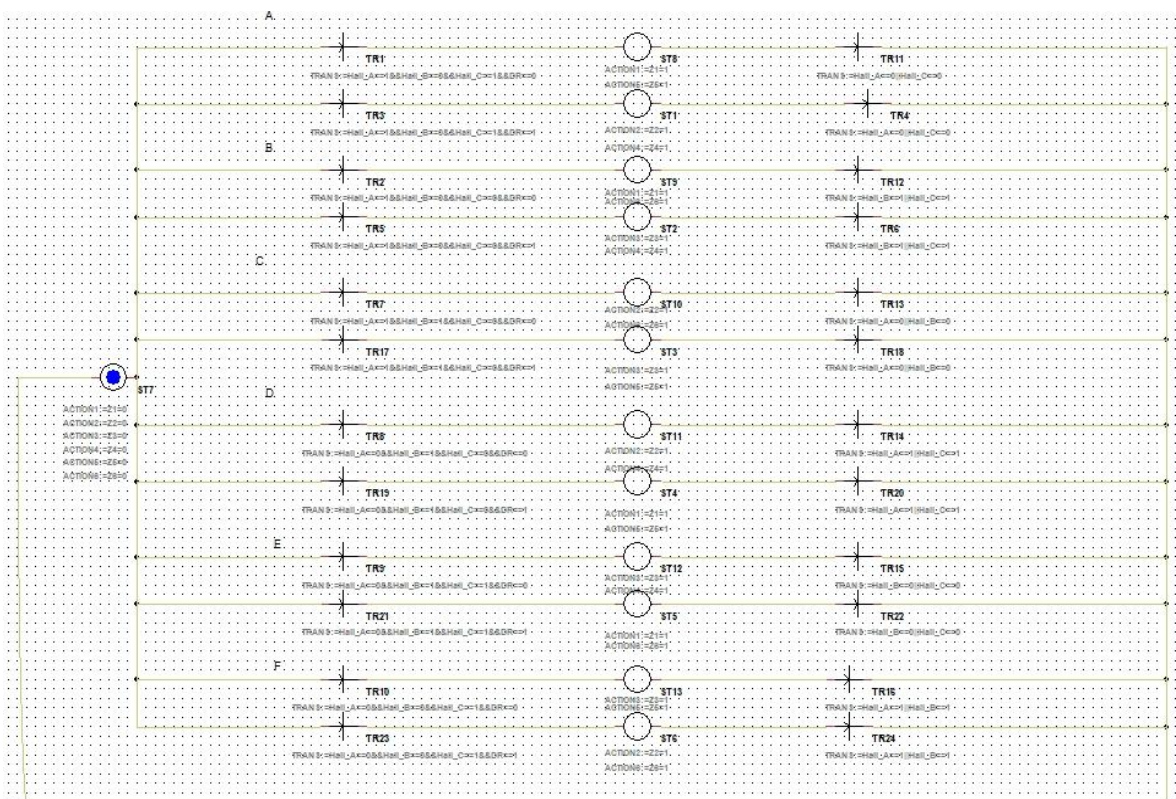


Abbildung 12: Zustandsdiagramm der Kommutierung in Combinatorial Logic in Portunus

## 4.6 Motorsimulation

In diesem Kapitel erfolgt abschließend die Simulation des Gesamtsystems. Dies geschieht mit Hilfe der Parameter des Prototyps. Anhand des Simulationsmodells werden einige Betriebsfälle des BLDCs modelliert. Das Modell muss valide Ergebnisse liefern. In Abbildung 7 wurden bereits die idealen Verläufe von Strom, und Drehmoment dargestellt. Die Simulationsergebnisse können für die Regelauslegung in Kapitel 5 verwendet werden. Folgende Parameter werden für die Simulation verwendet:

Statorwiderstand [Ohm]	0.015
Induktivität d-Achse [H]	0.00018
Induktivität q-Achse [H]	0.00018
Flussverkettung PM [Vs]	0.0247
Polpaarzahl [p]	5
Trägheitsmoment [ $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ]	0.015851

Abbildung 13: Simulation der Chinamotor

Statorwiderstand [Ohm]	0.005
Induktivität d-Achse [H]	0.0002052
Induktivität q-Achse [H]	0.0002052
Flussverkettung PM [Vs]	0.00837
Polpaarzahl [p]	6
Trägheitsmoment [ $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ]	0.020373

Abbildung 14: Simulation der Mähnmotor

## 4.7 Elektromechanische Kopplung

Um den Motoren und den Inverter zu koppeln, sind zwei Größen entscheidend: das Motormoment von der Motor und die Phäsestrom und Spannung von der Inverter.

Wenn der Inverter mit dem Motor gekoppelt ist, müssen wir die Aufmerksamkeit auf zwei Punkte zu zahlen: 1. wir brauchen, um eine Torque-Source auf der Seite des Motors zu verbinden, wenn die Drehmomentquelle für den Motor, um Drehmoment zu liefern, wird es dreiphasigen Wechselstrom (AC) zu erzeugen, und zur gleichen Zeit durch den Diodengleichrichter in DC, und für die Batterie aufzuladen. 2. beim Laden der Batterie(48V), können Sie nicht direkt an die Batterie Minuspol, müssen Sie einen Kondensator parallel mit der Seite der Batterie, die vor allem spielt eine Rolle der Batterie zu verbinden. Spannungsregler.

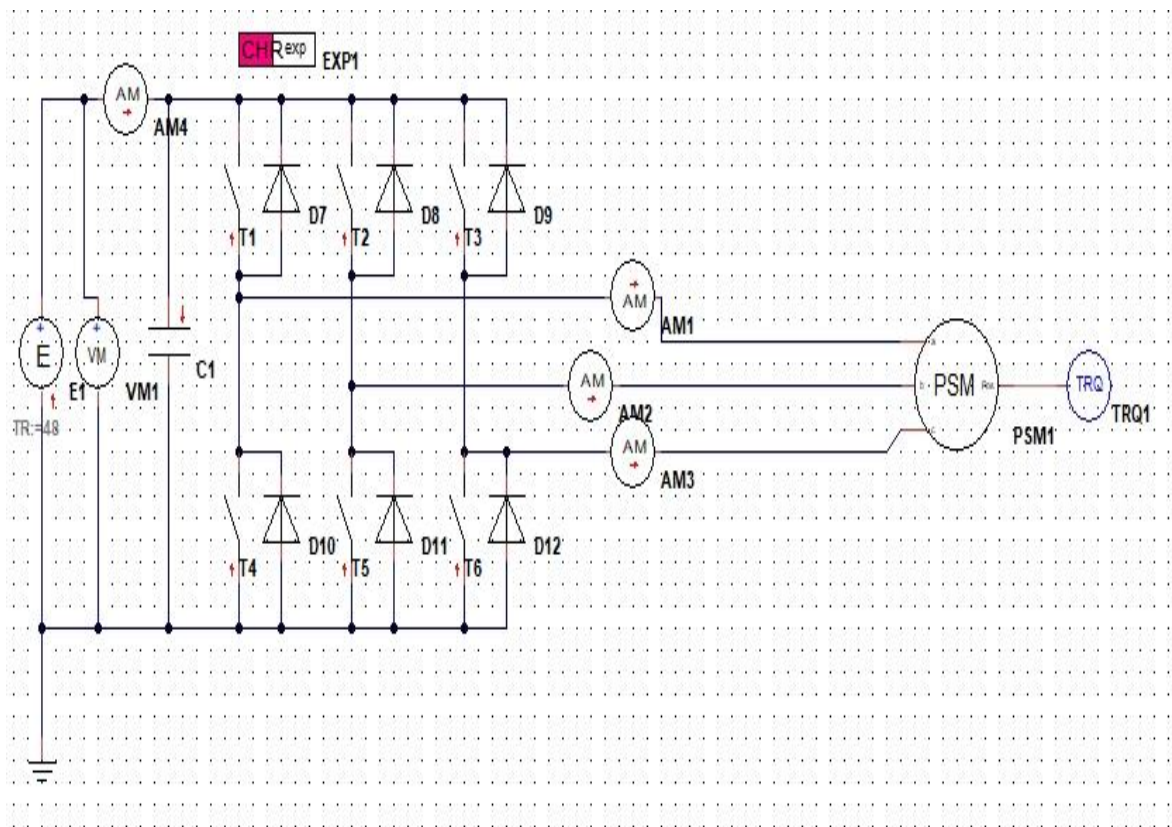


Abbildung 15: Simulation Motor gekoppelt mit Simulation Inverter

## 5. Anfahrverhalten

Als erstes wird eine Simulation des dynamischen Verhaltens durchgeführt. Hierfür wird die Gleichspannungsquelle auf 48V und das Lastmoment auf null gesetzt, um das Anfahren des Motors zu untersuchen. Dann wir müssen den Strom und die Spannung am Eingang des Inverters messen und die dreiphasigen Ströme am Ausgang vergleichen, um festzustellen, ob der Inverter ordnungsgemäß funktioniert. Wir müssen auch die Stromfrequenz und die Stromdauer in Abhängigkeit von der Rotordrehzahl und der Polpaarzahl messen. Gleichzeitig müssen wir die Ergebnisse der analogen Messungen in der Simulation mit den tatsächlichen Messungen in der Praktikum vergleichen, um zu prüfen, ob der analoge Motor und der analoge Inverter korrekt funktionieren.

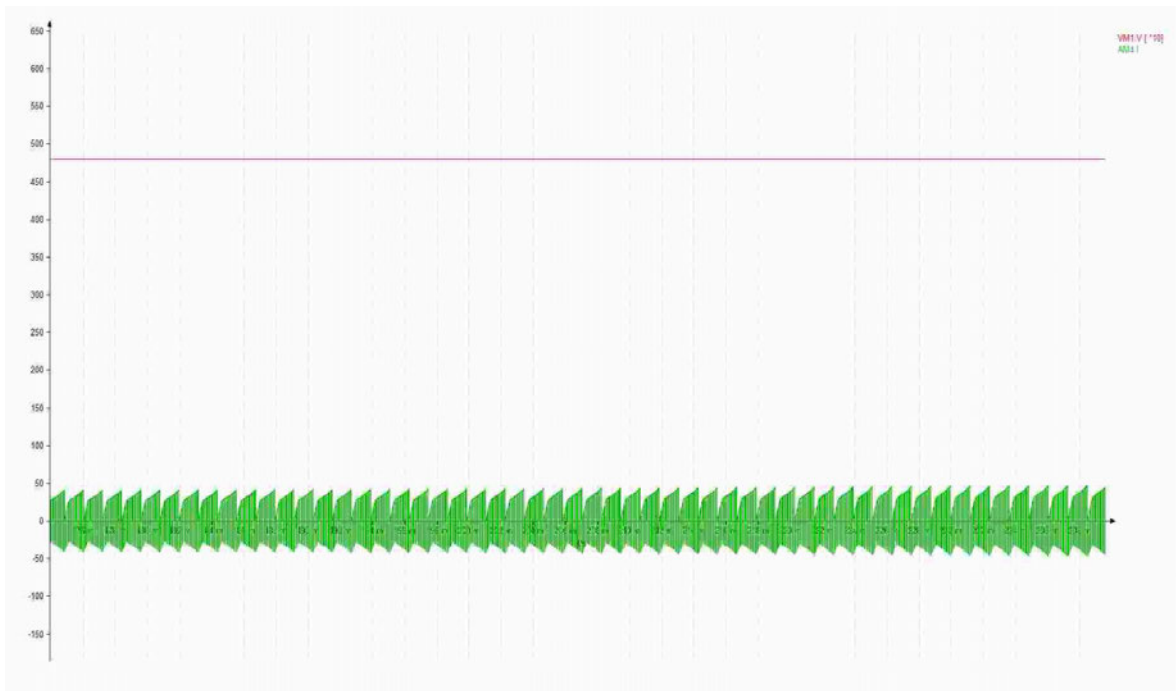
### 5.1 Messung von Strom und Spannung am Eingang des Inverters

Um den Strom am Eingang zu messen, müssen wir ein Amperemeter(AM4.I) in Reihe mit der Gleichstromversorgung anschließen; um die Spannung am Eingang zu messen, müssen wir ein Voltmeter(VM4.V) parallel zur Stromversorgung anschließen.



Abbildung 16: Messung von Strom und Spannung am Eingang in Praktikum





**Abbildung 17: Messung von Strom und Spannung am Eingang in Portunus**

	Praktikum	Portunus
Spannung	48V	48V
Strom	1.90955A	4,5A

Die Messung der Eingangsspannung und des Stroms im Praktikum unterliegt einem gewissen Grad an Störungen durch äußere Faktoren, so dass die in der Simulationssoftware Portunus gemessenen Daten einen gewissen Fehler aufweisen.

## 5.2 Messung von Strom(3-phasig) am Ausgang des Inverters

Um den Strom am Ausgang zu messen, müssen wir ein Amperemeter(AM1.I,AM2.I,AM3.I) in Reihe mit jeder Phase anschließen. Beim Anschluss des Amperemeters muss auf die Einschalttrichtung des Amperemeters geachtet werden; wenn die Einschalttrichtung umgekehrt wird, sind der nachfolgende Strom und das Hallsignal in der falschen Richtung.

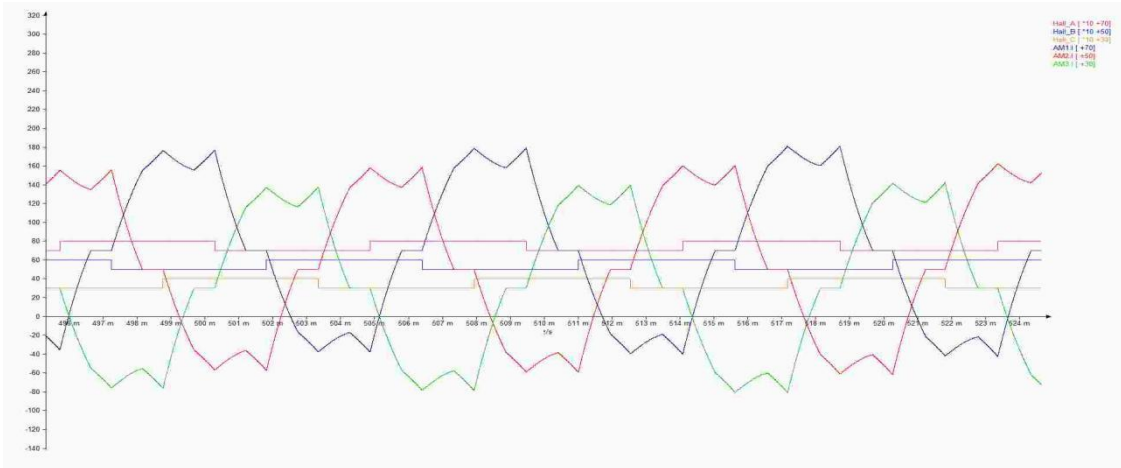


Abbildung 18: Beziehung zwischen dreiphasigen Strömen und Hallsignalen in Praktikum



Abbildung 19:Beziehung zwischen dreiphasig Strömen und Hallsignalen in Portunus

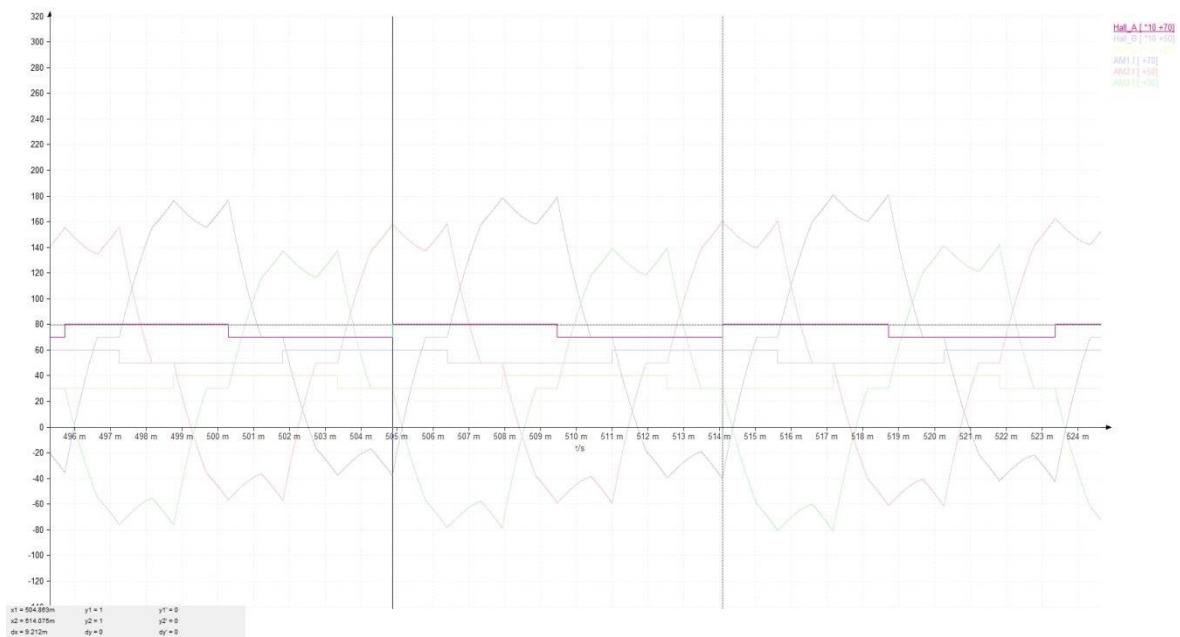
Abbildung 18 und 19 zeigt die Verläufe der Dreiphasenströme des blockkommutierten Motors für einen vollständig durchlaufenden Polpaarwinkel. Die Verläufe kommen der idealen Rechteckform sehr nahe. Auffällig sind die Stromeinfälle bei jedem Kommutierungswechsel. Diese treten genau dann auf, wenn ein Hall-Sensor seinen Regel wechselt und somit ein anderer Transistor schaltet.



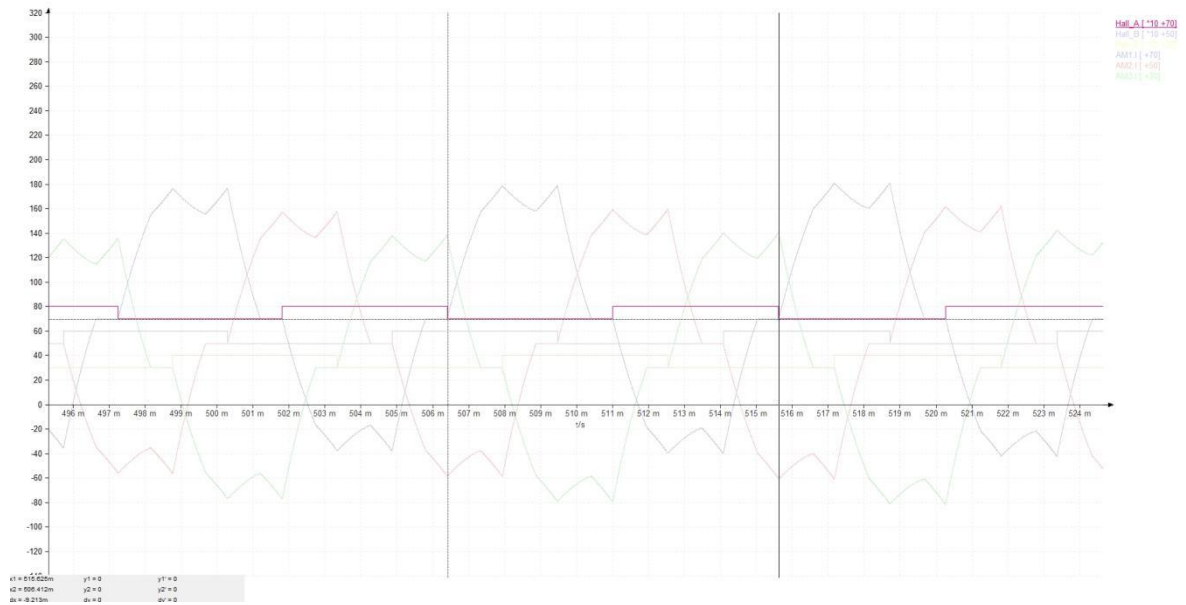
### 5.3 Messung der Frequenz der Ströme und der Stromflussdauer

Um die Frequenz der Ströme zu messen, kann man die Stromwerte mit einem Ampelmeter erfassen und die resultierendem Daten in ein digitales Oszilloskop einspeisen. Dort können die Stromwellenformen visualisiert werden und mithilfe der Cursorfunktion die Frequenz der Ströme bestimmt werden. Oder wir können die Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Stromspitzen messen und diese Zeit durch die Dauer einer vollständigen Rotationsperiode des Rotors teilen. Die Polpaarzahl des Motors kann durch Zählen der Anzahl der Pole auf dem Rotor oder durch Überprüfen der Herstellerdokumentation bestimmt werden.

$$n = \frac{60 \times f}{p} \quad (2.1)$$



**Abbildung 20: Messung der resultierenden Stromdauer in einem Periode während der Vorwärtsdrehung**



**Abbildung 21: Messung der resultierenden Stromdauer in einem Periode während der Rückwärtsdrehung**

Aus dem obigen Abbildung 20 und Abbildung 21 lassen sich folgende Ergebnisse ablesen:

n	U_Poti	$T = X_1 - X_2$	$f = \frac{1}{T}$
1302	4.8V	9.213ms	108.54Hz
-1302	4.8V	9.213ms	108.54Hz
1300	3.8V	9.23ms	108.34Hz
-1300	3.8V	9.23ms	108.34Hz

**Tabelle 8: Beziehung zwischen Drehzahl und Stromdauer, Stromsfrequenz**

## 5.4 Bewertung

Nach den Ergebnissen der Simulation in Portunus und der Vergleich im Praktikum stimmen die Simulationsergebnisse mit den tatsächlichen Messungen überein, was bedeutet, dass der Inverter und das Motors, das wir in Portunus gebaut haben, normal laufen. Gleichzeitig können wir die folgenden Schlussfolgerungen ziehen.

1. Der Inverter wandelt Gleichstrom und Gleichspannung in Wechselstrom und Wechselspannung um und leitet den Wechselstrom und die Wechselspannung an den BLDC-Motor, um ihn anzutreiben.
2. Der Inverter kann die Drehzahl des BLDC-Motors durch Anpassung der Frequenz des Wechselstroms regeln. Wenn die Frequenz des Wechselstroms ansteigt, erhöht sich die Drehzahl des Motors, und umgekehrt sinkt die Frequenz und die Drehzahl nimmt ab.
3. Der Inverter steuert die Drehrichtung des BLDC-Motors und kann durch Hallsignale bestimmt werden. Der Inverter kann die Drehrichtung des Motors durch Änderung der Stromrichtung oder durch Änderung der Spannungsrichtung ändern.
4. Für die Steuerlogik implementiere ich die Steuerlogik auf der Grundlage des Feedbacks und der gewünschten Ausgabe des Hallsensors. Das Positionssignal des Hallsensors wird als ausgabefähiges Schaltsteuersignal geschrieben, das sich ändert, wenn sich der Rotor in verschiedenen Positionen befindet, und wird verwendet, um ein rotierendes magnetisches Wechselfeld zu erzeugen, damit sich der Motor weiter dreht. Für eine präzisere Steuerung wird auch ein geschlossener Regelkreis (kontinuierliche Anpassung auf der Grundlage von Sensorrückmeldungen, um das System stabiler zu machen) verwendet.
5. PWM-Modulation zur Steuerung des Transistors ist, weil die Impulsamplitude, Schalter Modulationsfrequenz festgelegt ist, durch die Anpassung der Pulsbreite, um den Schalter auf Zeit zu steuern und damit die durchschnittliche Spannung, um die Motordrehzahl zu steuern.

## 6 Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war es, eine anschauliche Vermittlung der sensorgestützten Antriebsumrichter für den einen BLDC-Motor mit integrierter Positionssensorik zu entwerfen. Am Ende sollte ein für Simulationsaufbau in Portunus entstehen.

Der erstere Teil der Arbeit wurden kurz die BLDC-Schaltplan vorgestellt. Weitergehend wurde umfassend die Dreiphasig-Inverter und PWM-Generator und Hallsensor untersucht. Ein gründliches Verständnis dieser drei Teile bietet eine theoretische Grundlage für die spätere Simulation dieser drei Teile, die in Portunus entworfen werden soll.

Der zweite Teil der Arbeit wurden umfassend die Kommutierung und die Regelung eines BLDC-Motors untersucht. Für Kommutierung kann blockförmige- oder sinus Phasenströme hervorrufen. In dieser Arbeit beschränkt sich auf die Regelung des blockkommutierten Motors. Weil die Sinuskommutierung bietet eine geringere Momentenwelligkeit bei niedrigen Drehzahlen. Allerdings gestaltet sich die Regelung in Vergleich zum blockkommutierten Motor schwieriger. So muss Sinuskommutierung, beispielsweise durch eine Vektorregelung geregelt werden. Der Prinzipielle Aufbau von bürstenlosen Gleichstrommotoren, Funktionsweise, Kommutierungslogik und relevante Parameter der Motoren werden ebenfalls detailliert beschrieben.

Der Dritte Teil der Arbeit wurde ein Modell für die Simulation des Inverter in Portunus erstellt. Dieses Modul erklärt, wie man einen Inverter in Portunus und PWM-Generator aufbaut und eine Kommutierungslogik auf der Basis von Hallsignalen und Motorsimulation, elektromechanische Kopplung schreibt. Am wichtigsten ist dabei der Abschnitt über die elektromechanische Kopplung. Nach der elektromechanischen Kopplung müssen wir die Brückschaltung des Inverters erneut an die Details anpassen.

Der vierte Teil befasst sich mit dem Modell der Inverter-Motor-Kombination, das in Portunus für die entsprechenden Messungen erstellt wurde. Zu den Messaufgaben gehören: 1. Messung von Strom und Spannung am Eingang des Inverters. 2. Messung von Strom(3-phasig) am Ausgang des Inverters. 3. Messung der Frequenz der Strom und Stromdauer. Die in Portunus durchgeführten Messungen werden mit den

Ergebnissen des Praktikums vergleichen. Aus dem Vergleich der Messungen lässt sich schließen, ob das in Portunus erstellte Wechselrichtermodell korrekt ist oder nicht.

In unserem Praktikum haben wir den Funktionsumfang von Inverter kennengelernt und darauf aufbauend den Simulationsentwurf der Aufbau in Portunus in Verbindung mit parametrischen Motoren durchgeführt. Dabei wurden die gleichen Messaufgaben wie im Praktikum durchgeführt und die erzielten Ergebnisse waren fast identisch mit denen des Praktikums, so dass wir unsere Entwurfsziele erreicht haben.

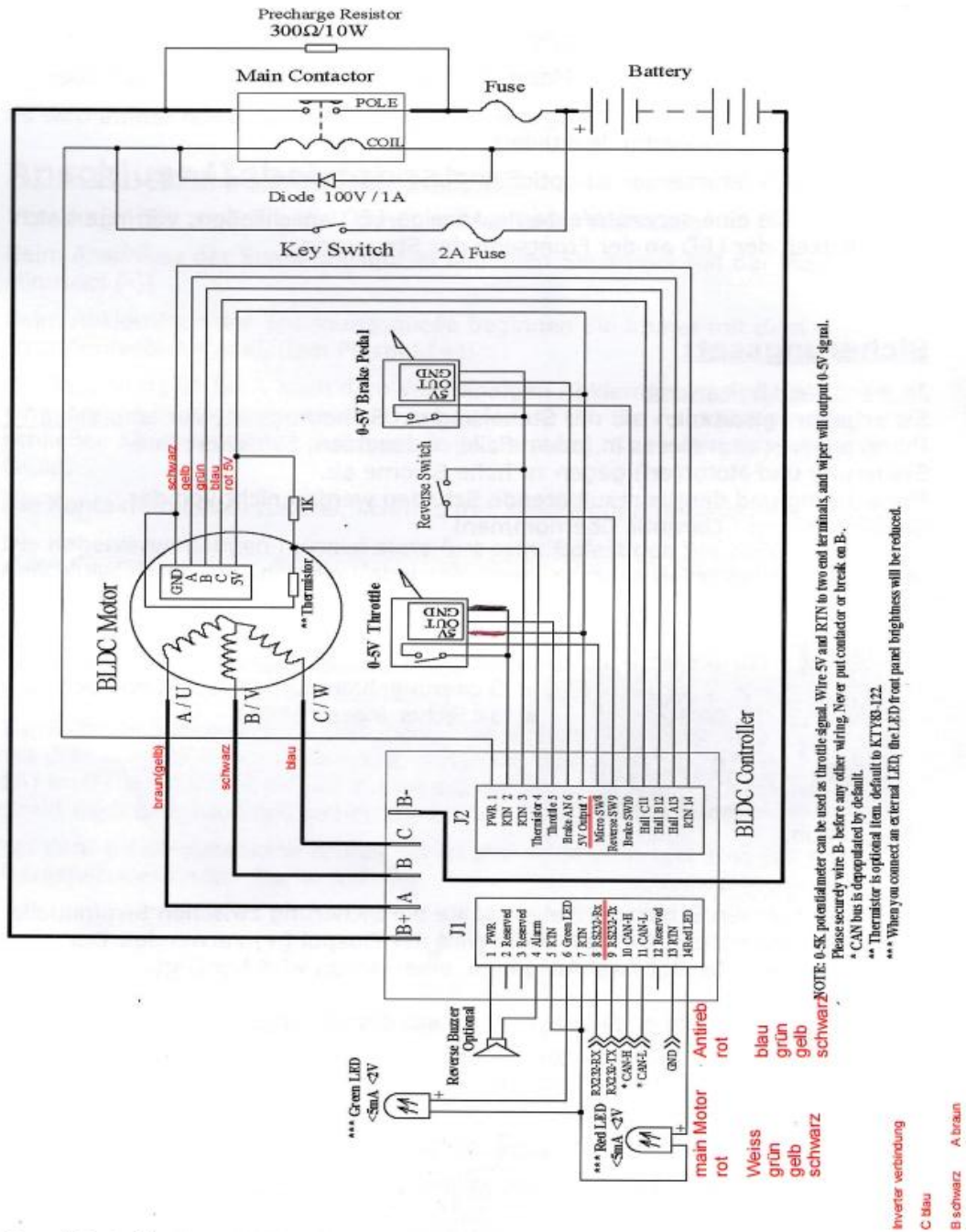
## Literaturverzeichnis

- [1] Fang, Lin Luo; Hong Ye: Advanced DC/AC Inverters: Applications in Renewable Energy. 2020
- [2] Kelly KBL Brushless Motor Controller User's Manual. URL: <http://www.KellyController.com>
- [3] Hendershot Jr, J. R.; Miller, T.J.E: Design of Brushless permanent-Magnet Motors. Oxford University Press, New York 1994.
- [4] Padmaraja Yedamle: Brushless DC (BLDC) Motor Bundamentals. Microchip Technology
- [5] Dr. W. Höger: Elektrische Maschinen und Antrieb. Vorlesung der FH München Stand SS 2002.
- [6] Prof. Dr.-Ing. Lutz Rauchfuß: Leistungelektronik. Vorlesung der Hochschule Mittweida mit Stand von 2011.
- [7] Johanna Kasper: Sensorgestützte Ansteuerung eines BLDC-Motors. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2013.
- [8] Prof. Dr.-Ing. Lutz Rauchfuß: Elektrische Maschinen. Vorlesung der Hochschule Mittweida mit Stand von 2023.
- [9] [http://de.nanotec.com/schrittmotor\\_animation.html](http://de.nanotec.com/schrittmotor_animation.html) [Zugriff am: 19.12.2012]

# Anlagen

## A1 Schaltung der Ansteuerung

### Schaltbild/Anschlussplan



## Chapter 3 Wiring and Installation

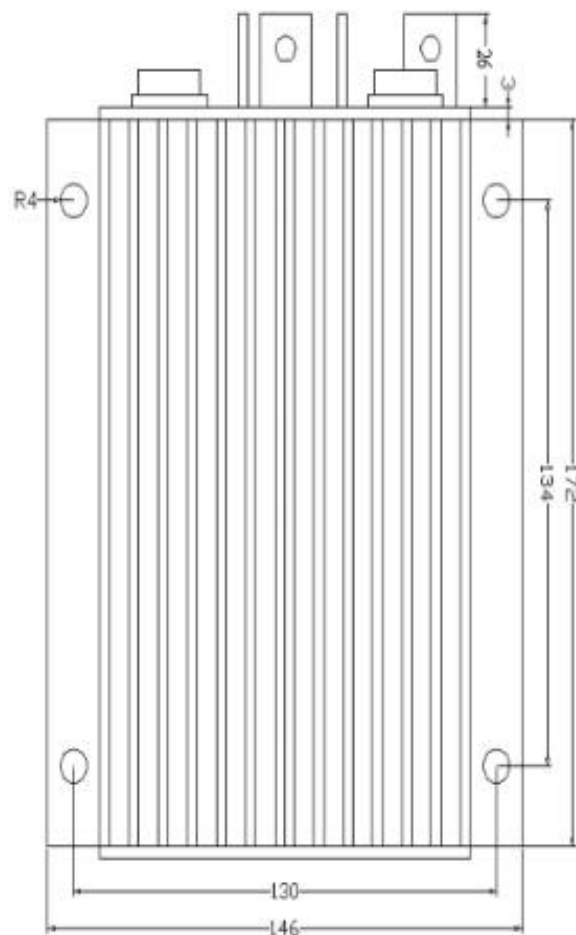
### 3.1 Mounting the Controller

The controller can be oriented in any position which should be as clean and dry as possible, if necessary, shielded with a cover to protect it from water and contaminants.

To ensure full rated output power, the controller should be fastened to a clean, flat metal surface with four or six screws. Applying silicon grease or some other thermal conductive material to contact surface will enhance thermal performance.

Proper heat sinking and airflow are vital to achieve the full power capability of the controller.

The case outline and mounting holes' dimensions are shown in Figure 1, 2.



Height: 62 millimeters

Figure 1: KBL mounting holes' dimensions (dimensions in millimeters)



## 3.2 Connections

### 3.2.1 Front Panel of BLDC Motor Controller:

Five metal bars and two plugs (J1, J2) are provided for connecting to the battery, motor and control signals in the front of the controller shown as Figure 3, 4 and 5.

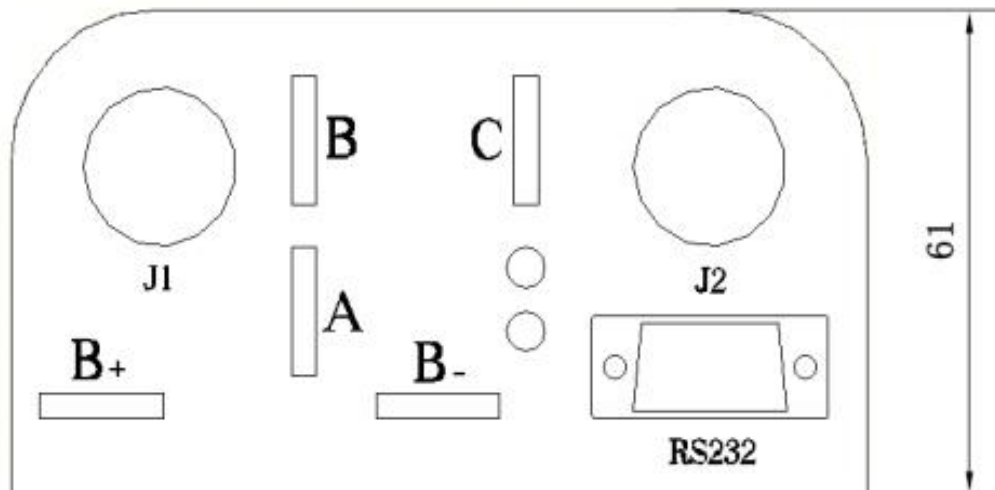


Figure 3: Front panel of KBL/KBL-X motor controller

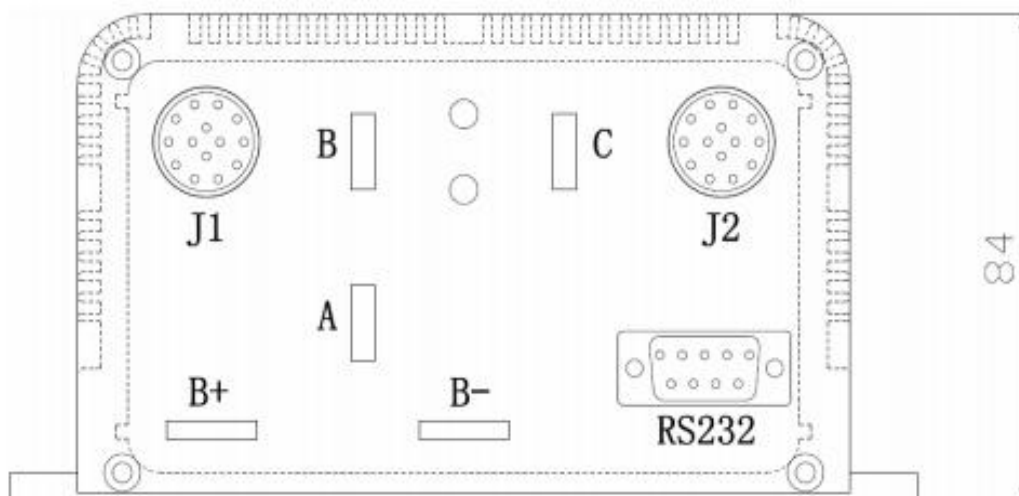


Figure 4: Front panel of KBL-E motor controller

- B+: battery positive
- B-: battery negative
- A: Output U/1/A phase
- B: Output V/2/B phase
- C: Output W/3/C phase



**Figure 5:** The connecting diagram of J1 and J2

### J1 Pin Definition

- 1- 12V 30mA. Only can be used for switch signals.
- 2- Current meter. <200mA
- 3- Main contactor driver. <2A
- 4- Alarm: To drive reverse beeper. <200mA
- 5- RTN: Signal return
- 6- Green LED: Running indication
- 7- RTN: Signal return

- 8- RS232 receiver
- 9- RS232 transmitter
- 10- CAN bus high
- 11- CAN bus low
- 12- Reserved
- 13- RTN: Signal return, or power supply return
- 14- Red LED: Fault code.

### J2 Pin Definition

- 1. PWR: Controller power supply (input)
- 2. RTN: Signal return, or power supply return
- 3. RTN: Signal return
- 4. 12V high-level brake and motor temperature input
- 5. Throttle analog input, 0-5V
- 6. Brake analog input, 0-5V
- 7. 5V: 5V supply output. <40mA
- 8. Micro\_SW: Throttle switch input
- 9. Reversing switch input
- 10. Brake switch input
- 11. Hall phase C
- 12. Hall phase B
- 13. Hall phase A
- 14. RTN: Signal return

## **Selbstständigkeitserklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

---

Chemnitz, 30.11.2023

