

# Entwicklung einer Ansteuerung für die Schaltaktorik im Doppelkupplungsgetriebe

Bachelor-Thesis am Institut für Mechatronische Systeme im Maschinenbau  
Technische Universität Darmstadt



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



Diese Arbeit wurde vorgelegt von

**Felix Bert**

Betreuer: Andreas Bieseowski, M. Sc.

Bearbeitungszeitraum: 01.12.2013 bis 01.03.2014

Darmstadt, den 27.02.2014

---

## Kurzfassung

---

**Schlagwörter:** Doppelkupplungsgetriebe, Schaltaktorik, Brushless DC Motor, Brushless DC Motor Controller

In der vorliegenden Bachelor-Thesis werden die bei der Entwicklung einer Ansteuerung für die Schaltaktorik eines Doppelkupplungsgetriebes durchgeführten Schritte erläutert. Es wird zunächst ein Überblick über die Motivation und den Stand der Wissenschaft und Technik gegeben. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Ansteuerung bürstenloser Gleichstrommotoren. Anschließend wird anhand der Aufgabenstellung sowie technischer Rahmenbedingungen ein Pflichtenheft abgeleitet, auf dessen Grundlage die zu beschaffende Hardware ausgewählt wird. Die Inbetriebnahme und konstruktive Umsetzung wird beschrieben. Die erstellte Software für die Zielhardware wird erläutert und die Ergebnisse durchgeführter Tests präsentiert. Abschließend folgen eine Zusammenfassung der Ergebnisse und der Ausblick auf mögliche Verbesserungen und Einsatzzwecke.

---

## Abstract

---

**Keywords:** Dual-Clutch Transmission, Shifting System, Brushless DC Motor, Brushless DC Motor Controller

In this bachelor thesis, the process of the development of a control for the shifting system in a dual-clutch transmission is described. First, a scientific and technological overview is provided; the main focus of this part lies on drive techniques for brushless DC motors. Subsequently, a book of requirements is derived from the electrical specifications of the motors and on basis of the requirements set in the definition of tasks. Suitable hardware is chosen and the procedure of putting the system into operation as well as its technical implementation are stated. The set of developed software for the target hardware and the results of the carried out tests are described. In conclusion, a summary of the results and indications for further improvement of the system are given.



---

## Aufgabenstellung

---

---

## Erklärungen

---

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Bachelor-Thesis selbständig angefertigt habe. Es wurden nur die in der Arbeit ausdrücklich benannten Quellen und Hilfsmittel benutzt. Wörtlich oder sinngemäß übernommenes Gedankengut habe ich als solches kenntlich gemacht.

Darmstadt, den 27.02.2014

Ort, Datum

\_\_\_\_\_

Unterschrift

Ich bin damit einverstanden, dass das Urheberrecht an meiner Arbeit zu wissenschaftlichen Zwecken genutzt werden kann.

Darmstadt, den 27.02.2014

Ort, Datum

\_\_\_\_\_

Unterschrift

---

# Inhaltsverzeichnis

---

KURZFASSUNG .....	2
ABSTRACT .....	2
AUFGABENSTELLUNG .....	3
ERKLÄRUNGEN .....	4
INHALTSVERZEICHNIS.....	5
ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	7
TABELLENVERZEICHNIS .....	7
FORMELZEICHEN UND SYMBOLE .....	8
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	9
1 ÜBERBLICK.....	10
2 PROBLEMSTELLUNG UND ZIEL DER ARBEIT.....	12
3 STAND DER TECHNIK.....	13
3.1 DOPPELKUPPLUNGSGETRIEBE .....	13
3.2 BÜRSTENLOSE GLEICHSTROMMOTOREN IM ÜBERBLICK.....	14
3.2.1 Aufbau und Einordnung des Motorentyps .....	15
3.2.2 Wirkprinzip und Drehmomentbildung.....	17
3.3 GRUNDLAGEN DES BETRIEBS BÜRSTENLOSER GLEICHSTROMMOTOREN .....	18
3.3.1 Blockstromspeisung und Sinusstromspeisung .....	18
3.3.2 Sensorgestützte und sensorlose Ansteuerung .....	19
3.3.3 Pulsweitenmodulation (PWM) .....	20
3.3.4 4-Quadranten-Betrieb.....	21
3.4 ETABLIERTE TECHNISCHE ANSTEUERUNGSLÖSUNG.....	23
4 ABLEITUNG EINES PFLICHTENHEFTS .....	24
4.1 SYSTEMANALYSE .....	24
4.2 ANFORDERUNGEN NACH AUFGABENSTELLUNG .....	26
4.3 ANFORDERUNGEN NACH MOTOR.....	26
5 AUSWAHL GEEIGNETER HARDWARE ZUR ANSTEUERUNG DER AKTORIK.....	28
5.1 ENERGIESTELLER UND REGLER.....	28
5.1.1 Kommerzielle BLDC-Controller.....	28

5.1.2	<i>Vor- und Nachteile von Eigenbau BLDC-Controllern</i> .....	29
5.1.3	<i>Auswahl eines BLDC-Controllers</i> .....	30
5.1.4	<i>Regelung und Konfiguration des BLDC-Controllers durch ein Controller Board</i> .....	31
5.2	ENERGIESPEICHER.....	32
5.3	GESAMTSYSTEM.....	33
<b>6</b>	<b>AUFBAU UND INBETRIEBNAHME</b> .....	<b>35</b>
6.1	BESCHALTUNG DER STEUERELEKTRONIK.....	35
6.1.1	<i>Übersicht der benötigten Ein- und Ausgänge</i> .....	35
6.1.2	<i>Sensorsystem</i> .....	36
6.1.3	<i>Serielle Schnittstellen</i> .....	39
6.1.4	<i>Analoge Vorgabe der Referenzspannung</i> .....	39
6.2	AUFBAU DER SPANNUNGSVERSORGUNG.....	40
6.3	INBETRIEBNAHME DER HARDWARE .....	41
6.3.1	<i>Prüfung der Funktionalität</i> .....	41
6.3.2	<i>Umsetzung einer Startup-Sequenz</i> .....	42
<b>7</b>	<b>ENTWICKLUNG EINER ANSTEUERUNGSSOFTWARE</b> .....	<b>43</b>
7.1	ÜBERBLICK ÜBER DIE VERWENDETE SOFTWARE.....	43
7.2	UMSETZUNG IN MATLAB/SIMULINK .....	44
7.2.1	<i>Auslesen des HRS</i> .....	44
7.2.2	<i>Vorgabe der Referenzspannung</i> .....	45
7.3	VISUALISIERUNG UND AUFZEICHNUNG DER ERGEBNISSE .....	47
<b>8</b>	<b>TEST DER ANSTEUERUNGSSOFTWARE</b> .....	<b>49</b>
8.1	ERKLÄRUNGEN ZU DEN DURCHGEFÜHRTEN TESTS .....	49
8.2	DURCHFahren DER TEILGETRIEBE MIT KONSTANTEM DUTY CYCLE .....	50
<b>9</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK</b> .....	<b>52</b>
<b>ANHANG A: DOKUMENTATION</b> .....		<b>53</b>
A.1	PIN-BELEGUNGEN .....	53
A.2	QUELLCODE .....	55
	<i>Kalibrierung</i> .....	55
A.3	INFORMATIONEN ZUM MAGNETISCHEN HOCHGESCHWINDIGKEITS-DREHGEBER .....	59
A.4	STÜCKLISTE DER VERWENDETEN BAUTEILE .....	60
<b>ANHANG B: PFLICHTENHEFT BLDC-CONTROLLER</b> .....		<b>61</b>
<b>LITERATURVERZEICHNIS</b> .....		<b>64</b>

---

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 1.1: Blockschaltbild des technischen Systems und zugeordnete Hardware-Komponenten, nach Nordmann [1] .....	10
Abbildung 3.1: 3D-CAD-Darstellung der Schaltaktorik eines Doppelkupplungsgetriebes [6].....	14
Abbildung 3.2: Grundsätzlicher Aufbau eines bürstenlosen Gleichstrommotors, in Anlehnung an Meins [10] .....	16
Abbildung 3.3: B6-Wechselrichterschaltung [13] .....	19
Abbildung 3.4: Pulsweitenmodulierte Signale mit verschiedenem Tastgrad .....	21
Abbildung 3.5: 4-Quadranten Betriebsbereich, in Anlehnung an Viramontes [19] .....	22
Abbildung 4.1: Allgemeines Blockschaltbild eines technischen Systems, nach Nordmann [1].....	25
Abbildung 5.1: Schematische Darstellung des ausgewählten Gesamtsystems .....	33
Abbildung 6.1: Elektrisches Ersatzschaltbild Sensorsystem/BLDC-Controller.....	37
Abbildung 6.2: Anschluss einer variablen Spannungsquelle an den Analogeingang des MBL1660 [30] ..	39
Abbildung 6.3: Spannungsversorgung des BLDC-Controllers [30] .....	40
Abbildung 7.1: Blockschaltbild zur Bestimmung des Motordrehwinkels aus dem HRS Duty Cycle.....	45
Abbildung 7.2: Blockschaltbild zur Vorgabe der Referenzspannung über einen Schieber in ControlDesk .....	46
Abbildung 7.3: Dekodiertes High Resolution Signal bei Motorstillstand .....	47
Abbildung 8.1: Durchfahrt Teilgetriebe 1 .....	50
Abbildung 8.2: Durchfahrt Teilgetriebe 2.....	51

---

## Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 5.1: Gegenüberstellung ausgewählter BLDC-Controller.....	29
Tabelle 6.1: Geräteanschlüsse und ihre Verwendung.....	36

---

## Formelzeichen und Symbole

---

$\varphi_{mech.}$	Mechanischer Motordrehwinkel
$\varphi_{el.}$	Elektrischer Motordrehwinkel
$p$	Polpaarzahl
$F$	Kraft
$I$	Strom
$s$	Bogenkoordinate eines Leiters
$B$	Magnetische Flussdichte
$M_M$	Motormoment
$k_M$	Motorkonstante
$U_S$	Versorgungsspannung ( <i>Supply Voltage</i> )
$U_M$	Angelegte Motorspannung
$t$	Zeit
$T$	Periodendauer
$\delta$	Auflösung
$i$	Übersetzung
$C$	Kapazität (Akkumulator)
$s$	Sicherheitsfaktor
$R$	Ohmscher Widerstand



---

## Abkürzungsverzeichnis

---

IMS	Institut für Mechatronische Systeme im Maschinenbau
DKG	Doppelkupplungsgetriebe
NVH	Noise, Vibration, Harshness
BLDC	Brushless Direct Current
TCU	Transmission Control Unit
BEMF	Back Electromotive Force
PWM	Pulsweitenmodulation
PMSM	Permanentmagneterregte Synchronmaschine
EC	Electronically Commutated
IC	Integrated Circuit
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
HRS	High Resolution Signal
USB	Universal Serial Bus
GND	Ground
CP	Connector Panel
CLP	Connector/LED Panel
RTI	Real-Time Interface



---

Kapitel 7 erläutert die in MATLAB/SIMULINK erstellte Software für die Zielhardware. Es wird beschrieben, welche Softwarekomponenten eingesetzt werden und welche Überlegungen den erstellten Blockschaltbildern zugrunde liegen.

Die durchgeführten Tests mit dem entwickelten System und deren Ergebnisse werden in Kapitel 8 präsentiert und analysiert.

Abschließend folgen die Zusammenfassung der durchgeführten Arbeiten und der Ausblick auf mögliche Verbesserungen und zukünftige Betriebsweisen des entwickelten Systems (Kapitel 9).

---

## 2 Problemstellung und Ziel der Arbeit

---

Am Institut für Mechatronische Systeme im Maschinenbau (IMS) der TU Darmstadt wird derzeit die Schaltwalzenaktorik eines Doppelkupplungsgetriebes (DKG) in Hinblick auf die Größen Noise, Vibration, Harshness (NVH) sowie Schaltdynamik und Kosten mit Hilfe eines mathematischen Modells optimiert. Zur Evaluation der gewonnenen Erkenntnisse und zum Abgleich des mathematischen Modells mit dem realen System werden praktische Versuche am DKG durchgeführt.

Am institutseigenen Prüfstand soll es in Zukunft möglich sein, verschiedene Schaltstrategien zu implementieren und die verschiedenen Prozessgrößen in Echtzeit aufzuzeichnen. Dazu ist es in einem ersten Schritt notwendig, die Dynamik der Schaltwalzen bestmöglich beeinflussen zu können und eine Schnittstelle zur elektronischen Datenverarbeitung zu schaffen.

Die Schaltwalzen im DKG werden von je einem bürstenlosen Gleichstrommotor (Brushless Direct Current Motor, BLDC-Motor) angetrieben. Die Ansteuerung der Aktorik übernimmt dabei ein zentrales Steuergerät, die Transmission Control Unit (TCU). Da Änderungen an der Software der TCU durch Dritte vom Hersteller nicht freigegeben sind, kann bislang kein Einfluss auf die Schaltabläufe genommen werden. Lediglich die Vorgabe von gewünschten Schaltsequenzen, das heißt die Abfolge anzufahrender, fest vorgegebener Winkel der Schaltwalzen, ist möglich.

Ziel dieser Arbeit ist es, eine Ansteuerung zu konzipieren, die es ermöglicht, gewünschte Schaltabläufe unabhängig von der Getriebesoftware durchzuführen und die Verwendung verschiedener

Reglerstrukturen und Schaltstrategien erlaubt. Gleichzeitig soll die Aufzeichnung verschiedener elektrischer wie mechanischer Prozessgrößen sowie der Sensorsignale erfolgen können und von einem Computer visualisiert und gespeichert werden.

Zur Umsetzung soll zunächst passende Hardware ausgewählt, beschafft und in Betrieb genommen und anschließend eine Ansteuerungssoftware in MATLAB/SIMULINK implementiert werden. Abschließend folgt der Test von Hard- und Software.

---

## 3 Stand der Technik

---

In Kapitel 3 dieser Arbeit wird der Stand der Technik in den für die Aufgabenstellung relevanten Themengebieten allgemein präsentiert. Technische Besonderheiten, die speziell für das am IMS untersuchte DKG von Bedeutung sind, werden besonders herausgestellt.

Zunächst wird in Abschnitt 3.1 ein Überblick über Doppelkupplungsgetriebe und deren technische Relevanz gegeben. Die Bauart des vorliegenden DKG wird genauer beschrieben. In Abschnitt 3.2 wird eine Einordnung des Motortyps „bürstenloser Gleichstrommotor“ vorgenommen. Außerdem erfolgt eine terminologische Abgrenzung der gebräuchlichen Bezeichnungen. Anschließend werden der charakteristische Aufbau und das zugrunde liegende Wirkprinzip beschrieben. Nachdem in Abschnitt 3.3 die Grundlagen und Eigenheiten der Ansteuerung von BLDC-Motoren erläutert werden, werden abschließend etablierte technische Ansteuerungslösungen in Abschnitt 3.4 vorgestellt.

---

### 3.1 Doppelkupplungsgetriebe

---

Unter den zentralen Entwicklungszielen von Automobilherstellern nehmen die Reduktion des Kraftstoffverbrauchs und der  $CO_2$ -Emissionen eine größer werdende Rolle ein. Grund dafür sind u. a. die zunehmend stärker werdenden rechtlichen Rahmenbedingungen dieser Punkte. Dabei liegt ein größer werdender Fokus der Entwicklungsanstrengungen auf dem Getriebe als Teil des Antriebsstrangs. Unter den verschiedenen Getriebearten sind Doppelkupplungsgetriebe aufgrund ihres, im Vergleich zu Wandler-Automatikgetrieben und manuell geschalteten Getrieben, geringeren Kraftstoffverbrauchs besonders relevant. [2]

Doppelkupplungsgetriebe weisen zwei Teilgetriebe auf. In einem Teilgetriebe können die geraden und im anderen Teilgetriebe die ungeraden Gänge geschaltet werden. Die Teilgetriebe können über je eine Kupplung kraftschlüssig mit der Antriebswelle verbunden werden. Dabei wird jeweils ein Teilgetriebe aus- und das andere zeitgleich eingekuppelt. Der Vorgang wird dabei so gesteuert, dass keine spürbare Zugkraftunterbrechung auftritt. Das Schalten der Gänge sowie das Betätigen der Kupplungen übernehmen, je nach Bauart, verschiedene elektro-hydraulische oder elektro-mechanische Aktoren. Da die nächsthöher- beziehungsweise -tiefergelegenen Gänge jeweils im anderen Teilgetriebe liegen, erfolgt das Schalten der Gänge lastfrei. [3], [4]

Eine Bauform des Doppelkupplungsgetriebes verwendet sogenannte Schaltwalzen zum Schalten der Gänge. Über eine Schaltwalzennut oder andere Kurvenfolger werden die mit dem Kurvenfolger verbundenen Schaltgabeln bewegt und die Gänge eingelegt. Fokus dieser Arbeit ist die Schaltaktorik eines solchen Doppelkupplungsgetriebes. [5]

In dem am IMS untersuchten DKG sind für den Antrieb der Schaltwalzen bürstenlose Gleichstrommotoren als elektro-mechanische Energiewandler verbaut. Sie sind über zwei Stirnradstufen mit

---

den Schaltwalzen verbunden und bilden zusammen mit den Schaltgabeln und einem Motorsteuergerät den Aktor des Systems.

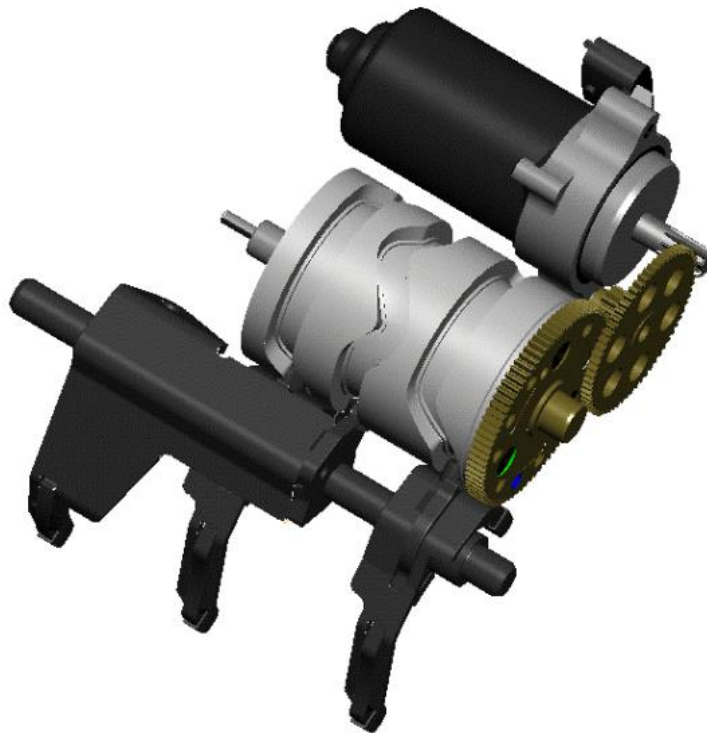


Abbildung 3.1: 3D-CAD-Darstellung der Schaltaktorik eines Doppelkupplungsgetriebes [6]

Abbildung 3.1 zeigt eine 3D-CAD-Darstellung der Schaltaktorik eines wie oben beschrieben arbeitenden Getriebes. Hier ist in grau eine Schaltwalze mit Schaltwalzennuten dargestellt. Werden die Schaltwalzen gedreht, wird die rotatorische Bewegung in eine translatorische Bewegung der Schaltgabeln (hier schwarz, unten im Bild) in axialer Richtung gewandelt. Dieser Mechanismus ist den Kulissengetrieben zuzuordnen. Ein BLDC-Motor (oben im Bild) treibt den Mechanismus an.

---

## 3.2 Bürstenlose Gleichstrommotoren im Überblick

---

Bürstenlose Gleichstrommotoren werden in der jüngeren Vergangenheit zunehmend häufig in der Industrie, speziell der Automobilindustrie, eingesetzt. Der Grund dafür findet sich in der Kombination aus einer stetig steigenden Anzahl verbauter elektrischer Kleinantriebe und vorteilhafter technischer Eigenschaften der BLDC-Motoren gegenüber anderen Antrieben, wie beispielsweise den mechanisch kommutierten Gleichstrommotoren [7]. Zu diesen Vorteilen zählen neben dem durch den Wegfall der Bürsten reduzierten Verschleiß und der dadurch bedingten Wartungsfreiheit eine sehr gute Dynamik und hohe Überlastbarkeit [1].

BLDC-Motoren bilden die Schnittstelle zur Ansteuerung der Schaltwalzenaktorik und sind daher für die vorliegende Arbeit von zentraler Bedeutung. In Abschnitt 3.2.1 wird ihr Aufbau beschrieben und

---

eine Einordnung des Motortyps vorgenommen. Abschnitt 3.2.2 erläutert das Wirkprinzip, nach welchem BLDC-Motoren arbeiten. Die Ausführungen beschränken sich dabei auf die zum prinzipiellen Verständnis der Funktion notwendigen Informationen. Weiterführende Inhalte über die verschiedenen Bauformen und das Wirkprinzip finden sich bei Cravero [7] und Hembach [8]. Die notwendigen Methoden zur Berechnung der für den BLDC-Motor relevanten Größen werden umfassend von Binder [9] behandelt.

---

### 3.2.1 Aufbau und Einordnung des Motorentyps

---

Dem grundsätzlichen Aufbau nach gleichen bürstenlose Gleichstrommotoren den permanentmagnetregten Synchronmotoren: Der Rotor trägt Permanentmagnete, wobei gegen den Stator gerichtet, entlang des Umfangs, abwechselnd magnetische Nord- und Südpole angeordnet sind. Im Unterschied zu den permanenterregten Synchronmaschinen für den Netzbetrieb findet jedoch eine rotorlageabhängige Umrichterspeisung statt. Aufgrund dessen ist ein Anlaufkäfig – wie für den Betrieb am starren Netz – nicht notwendig [9]. Die Magnete werden als Oberflächenmagnete, in Form von Segment- oder Ringmagneten, oder als eingebettete Magnete in radialer oder tangentialer Anordnung, verbaut [7].

Der Stator trägt seinerseits Wicklungen, die im Betrieb in einer festen Reihenfolge mit Spannung beaufschlagt werden, um so ein magnetisches Drehfeld zu erzeugen. Mit Ausnahme von speziellen Bauformen sind für die Wicklungen auf den sogenannten Statorzähnen Nuten vorgesehen, in die diese eingelegt sind. Bei dem überwiegenden Anteil der heute verwendeten Motoren handelt es sich um Motoren in Ausführung mit drei Phasen, die typischerweise auf mehrere Wicklungen am Stator aufgeteilt werden. [7]

Abbildung 3.2 zeigt den vereinfachten Aufbau eines BLDC-Motors mit zwei Polen ( $p = 1$ ) und in Ausführung mit drei Phasen. Die Wicklungen 1-1', 2-2' und 3-3' sind in einem Sternpunkt miteinander verbunden. Neben der Schaltung der Phasen im Stern ist auch die Schaltung im Dreieck gebräuchlich. Eine Motorelektronik, in der Abbildung angedeutet durch eine Blackbox, führt die Kommutierung (Feldumpolung) in Abhängigkeit der Rotorlage durch und stellt die Leistung. Der permanentmagnetbesetzte Rotor folgt dem Statorfeld. Zur Abstimmung des Kommutationszeitpunktes ist die Rückführung der Rotorlage zur Motorelektronik erforderlich, im dargestellten Aufbau realisiert über die drei am Umfang verteilten Sensoren  $s_1$ ,  $s_2$  und  $s_3$ . [9]

Die Steuereinheit schaltet die Leistungselektronik so, dass immer eine der drei Phasen an positiver Versorgungsspannung liegt und eine Phase an negativer Versorgungsspannung. Die dritte Phase wird nicht beschaltet. In der Abbildung sind die Phasen so bestromt, wie für den nächsten Kommutierungsschritt erforderlich: Phase 2 ist auf + und Phase 1 auf – geschaltet. Das resultierende Statorfeld zeigt in diesem Fall von der Rotorachse aus betrachtet auf die Wicklung 3. Bei Motoren in dreiphasiger Ausführung ergeben sich 6 mögliche Kommutationszustände für eine elektrische Umdrehung. Die für eine mechanische Umdrehung nötigen elektrischen Umdrehungen bestimmen sich aus der Polpaarzahl  $p$ . Vergrößert man die Polpaarzahl  $p$ , verkleinert sich das Verhältnis zwischen

dem mechanischen Winkel  $\varphi_{mech.}$  und dem elektrischen Winkel  $\varphi_{el.}$ . Diese Tatsache wird durch Formel ( 3.1 ) beschrieben.

$$\varphi_{mech.} \cdot p = \varphi_{el.} \quad ( 3.1 )$$

Bei dem in der Abbildung dargestellten Motor sind der mechanische und der elektrische Winkel auf Grund der Polpaarzahl von  $p = 1$  gleich.

In der Literatur finden sich drei Ansätze zur Einordnung des Motortyps in der Gruppe der Elektromotoren:

- i) Nach dem Betriebsverhalten,
- ii) nach der Art des Speisestroms und
- iii) nach dem Aufbau.

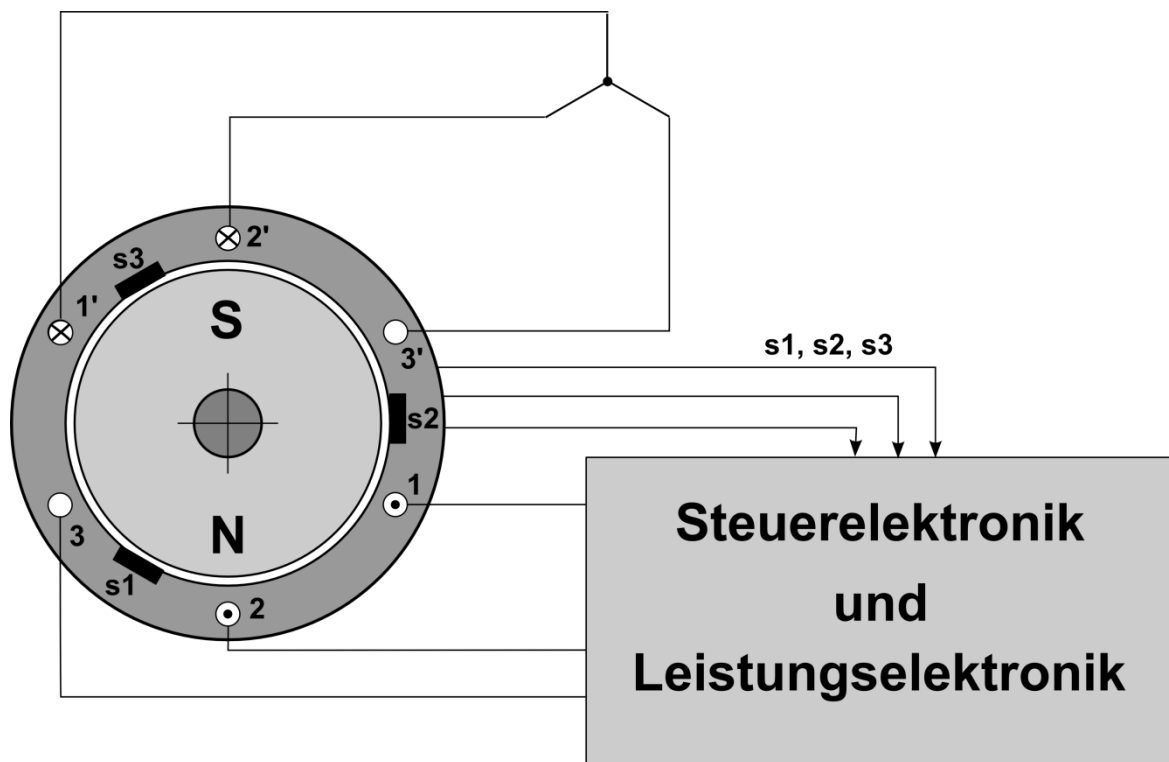


Abbildung 3.2: Grundsätzlicher Aufbau eines bürstenlosen Gleichstrommotors, in Anlehnung an Meins [10]

Wird eine Einordnung nach i) oder ii) vorgenommen, werden BLDC-Motoren den Gleichstrommotoren (GSM) zugerechnet. In der Gruppe dieser wird dann zwischen bürstenlosen und bürstenbehafteten GSMs unterschieden [1]. Direkt mit dieser Zuordnung verknüpft sind auch die in der Literatur gängigen Termini „bürstenloser GSM“ und „elektronisch kommutierter GSM“ bzw. „brushless direct current (BLDC) motor“ und „electronically commutated (EC) motor“ [8]. Die Einordnung nach i) erfolgt aufgrund der den bürstenbehafteten GSMs sehr ähnlichen, näherungsweise linear fallenden Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie der BLDC-Motoren (vgl. [9]).



---

Eine Einordnung nach iii) wird zum Beispiel von Binder [9] vorgenommen. Wie oben beschrieben ist der Aufbau von BLDC-Motoren mit dem der permanentmagneterregten Synchronmaschinen vergleichbar. Innerhalb dieser Gruppe wird dann in permanentmagneterregte Synchronmaschinen für den Netzbetrieb und permanentmagneterregte Synchronmaschinen mit Umrichterspeisung und Polradlagegebersteuerung untergliedert.

Keinem der drei Kriterien für die Einordnung des Motors in eine Gruppe von Motoren zuzuordnen sind die ebenfalls gebräuchlichen Bezeichnungen „Brushless Permanentmagnet Motor“ und „Elektronikmotor“ [8]. Der Begriff „BLDC-Motor“ und damit die Zuordnung zu den Gleichstrommotoren hat sich mittlerweile für den beschriebenen Motorentyp weitgehend durchgesetzt [9].

---

### 3.2.2 Wirkprinzip und Drehmomentbildung

---

Hauptwirkprinzip des BLDC-Motors ist das elektrodynamische Prinzip, nach dem auf einen sich im Magnetfeld befindlichen, stromdurchflossenen, differentiell kleinen Leiter eine elektromagnetische Kraft ausgeübt wird (Lorentz-Kraft). Diese Kraft steht senkrecht auf der von Leiterstück und Magnetfeld aufgespannten Ebene [9]. Durch Integration entlang des gesamten Leiterweges erhält man die auf den Leiter wirkende Kraft. Dieser Zusammenhang wird in der allgemeinen Form durch Formel ( 3.2 ) beschrieben.

$$\vec{F} = \int_l I \cdot (d\vec{s} \times \vec{B}) \quad (3.2)$$

Darin ist  $\vec{F}$  die Kraft auf den Leiter,  $I$  der durch den Leiter fließende Strom,  $l$  die Leiterlänge,  $d\vec{s}$  ein differentiell kurzes Leiterstück und  $\vec{B}$  das den Leiter durchsetzende Magnetfeld. Zur Erzeugung eines Drehmoments wird eine tangential zum Umfang gerichtete Kraft benötigt. Da die Leiter axial zur Motorwelle verlaufen, ist die Radialkomponente der magnetischen Flussdichte des Permanentmagnetrotors aufgrund der Definition des Kreuzproduktes die drehmomentwirksame Komponente.

Um das gesamte, auf alle Teilwicklungen und Windungen resultierende Drehmoment im Motor zu berechnen, muss die Tangentialkomponente der Lorentzkraft auf sämtliche Leiter im Stator summiert werden. Je nach Bauart können auch Reluktanzmomente einen nicht vernachlässigbaren Anteil zum Motormoment beitragen. Die Grundlagen und Methoden zur praktischen Berechnung des Drehmoments in BLDC-Motoren finden sich bei Cravero [7] und Binder [9].

In der Regel werden von Motorherstellern alle geometrieabhängigen Größen zu einer Drehmomentkonstante  $k_M$  ( $[k_M] = \frac{Nm}{A}$ ) zusammengefasst, sodass das Motormoment  $M_M$  zu

$$M_M = k_M \cdot I \quad (3.3)$$

---

berechnet werden kann. Der Phasenstrom wird mit  $I$  bezeichnet. Eine Kenntnis des Wicklungsaufbaus und sonstiger konstruktiver Gegebenheiten ist damit auf Seiten des Anwenders nicht mehr erforderlich [1].

Formel ( 3.3 ) zeigt, dass das Motormoment positiv mit dem Phasenstrom verknüpft ist. Stellt man eine beliebige Maschengleichung des Motors mit Spannungsversorgung auf, erkennt man, dass der Motorstrom in seiner Größe durch die aufgrund der Rotordrehung in den Wicklungen induzierte Spannung begrenzt ist. In der Literatur wird diese Spannung als *Back Electromotive Force* oder kurz *BEMF* bezeichnet (vgl. [11]). Bei größer werdenden Drehzahlen und gleicher Stellspannung kann nur noch ein geringeres Motormoment erreicht werden.

---

### 3.3 Grundlagen des Betriebs bürstenloser Gleichstrommotoren

---

Im folgenden Abschnitt werden die zur Ansteuerung von BLDC-Motoren verwendeten Verfahren beschrieben. Außerdem werden die Funktionsweise der in den Schaltwalzenmotoren verbauten Sensoren und die verschiedenen Möglichkeiten des Bremsens von BLDC-Motoren erklärt.

---

#### 3.3.1 Blockstromspeisung und Sinusstromspeisung

---

Wie in Abschnitt 3.2.2 beschrieben wurde, ist das Motormoment bei BLDC-Motoren abhängig von den momentan beschalteten Wicklungen in Form des Betrags und der Fließrichtung des geführten Stromes sowie der Radialkomponente der sie durchsetzenden magnetischen Flussdichte. Will man das Motormoment berechnen, besteht zwischen den genannten Größen ein multiplikativer Zusammenhang. Beide sind von der Rotorlage bzw. der entsprechenden Stelle der Umfangskoordinate abhängig. Um ein konstantes Drehmoment zu erhalten, muss also der Speisestromverlauf auf die Flussdichteverteilung abgestimmt sein [9]. Nach Binder [9] gibt es dafür in Abhängigkeit der auftretenden Luftspaltfeldverteilungstypologien zwei Möglichkeiten:

- i) Das Luftspaltfeld ist räumlich sinusförmig verteilt: In diesem Fall muss idealer Sinusstrom eingespeist werden.
- ii) Das Luftspaltfeld ist über der Umfangskoordinate stückweise konstant: Die Wicklungen müssen mit ideal blockförmigen Gleichstrom gespeist werden.

Die im DKG verbauten Motoren sind laut Herstellerangabe mit blockförmigem Gleichstrom zu speisen, weshalb sich die weiteren Ausführungen auf die Blockstromspeisung beschränken. Einzelheiten zur Sinusstromspeisung finden sich bei Binder [9].

Zum Einspeisen blockförmiger Ströme entsprechend der jeweiligen Kommutationsphase werden sogenannte B6-Wechselrichterschaltungen eingesetzt. Abbildung 3.3 zeigt schematisch eine solche Schaltung in vereinfachter Form. Drei parallel zur Spannungsversorgung verbundene Zweige sind je mit einer der drei Phasen (in der Abbildung durch die Wicklungsinduktivitäten angedeutet) des Motors verbunden. Diese Knoten sind jeweils gegen das positive und negative Versorgungspotenzial mit einem IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) bzw. MOSFET (Metal Oxide Semiconductor

Field Effect Transistor) und einer parallel geschalteten Diode verbunden. Die zwischen dem höheren Potenzial und der Phase liegenden Schalter werden dabei als Highside-IGBT bzw. -MOSFET bezeichnet (in der Abbildung rot umrandeter Bereich), die zwischen Phase und niedrigerem Potenzial liegenden Schalter als Lowside-IGBT bzw. -MOSFET (in der Abbildung schwarz umrandeter Bereich). Die in der Abbildung aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht enthaltene Steuerungselektronik steuert je einen Highside- und einen Lowside-Schalter über seinen Gate-Anschluss an. Die Dioden erfüllen den Zweck, den Motor im generatorischen Betrieb vor schädigenden Spannungserhöhungen zu schützen, da in einem solchen Fall die Diode leitet und beispielsweise ein Kondensator oder Akkumulator geladen werden kann. Dieses Verhalten ist insbesondere beim regenerativen Bremsen erwünscht [12].

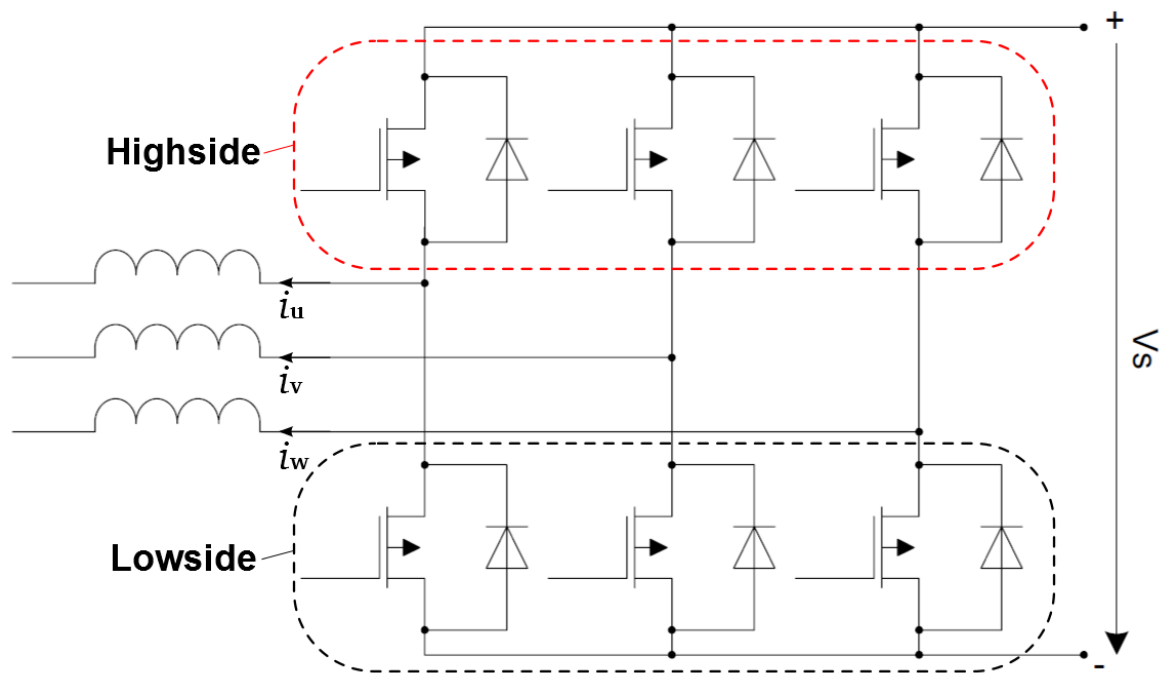


Abbildung 3.3: B6-Wechselrichterschaltung [13]

### 3.3.2 Sensorgestützte und sensorlose Ansteuerung

Zur Bestimmung des Kommutationszeitpunktes ist es, wie in Abschnitt 3.2.1 erläutert wurde, notwendig, Rotorlageinformationen zum Controller zurückzuführen. Technisch etabliert haben sich dabei zwei Verfahren:

- i) Das Erfassen der Rotorlage durch Sensoren (sensorgestütztes Verfahren) und
- ii) das Messen der BEMF und die anschließende Zuordnung zu einem Rotorlagewinkel (sensorloses Ansteuerungsverfahren).

Beim sensorgestützten Verfahren werden Hall-Sensoren, Inkrementalgeber oder andere Drehgeber verwendet, die sich in der Applikation vor allem in ihren Ausgangssignalen unterscheiden [7]. Beim

---

sensorlosen Verfahren ist der Nulldurchgang der BEMF für den Kommutationszeitpunkt entscheidend [14].

In den Schaltwalzenmotoren sind Hall-Sensoren verbaut, sowie ein spezieller Drehgeber, der eine besonders hohe Auflösung als besonderes Merkmal bietet. Der Drehgeber ist für die Bestimmung des Kommutationszeitpunktes vom Getriebehersteller nicht vorgesehen und wird in Anhang A.3 gesondert betrachtet. Das sensorgestützte Verfahren wird daher am Beispiel von Hall-Sensoren beschrieben. Weiterführende Informationen zum sensorlosen Verfahren finden sich bei Su [14].

Hall-Sensoren sind Halbleiterplättchen, die von einem Steuerstrom durchflossen werden. Werden die Plättchen von einem Magnetfeld durchsetzt, kann entsprechend des Neigungswinkels des Plättchens in Bezug auf die Orientierung des B-Feldes eine elektrische Spannung quer zur Flussrichtung des Steuerstromes abgegriffen werden. Diese Spannung bezeichnet man als Hall-Spannung, den zugehörigen physikalischen Effekt als Hall-Effekt. [15]

Für die Ansteuerung des verbauten dreiphasigen BLDC-Motors benötigt man drei Hall-Sensoren. Diese sind entlang des Umfangs in  $120^\circ$ -Schritten verteilt und geben je nach Flussdichteverteilung und damit Rotordrehwinkel  $5\text{ V}$  bzw.  $0\text{ V}$  an ihren Ausgängen aus. Ordnet man den Spannungen die logischen Zustände 1 und 0 zu, ergeben sich, geometrisch bedingt durch die Verteilung der Permanentmagnete und der Sensoren, sechs mögliche Kombinationen von Sensorsignalzuständen, welche je einer Kommutationsphase zugeordnet werden können. Die Steuerlogik ist damit in der Lage die Rotorlage auf  $\frac{360^\circ}{6} = 60^\circ$  (elektrisch) genau aufzulösen und entsprechend zu kommutieren.

---

### 3.3.3 Pulsweitenmodulation (PWM)

---

Die beschriebenen Grundlagen zur Pulsweitenmodulation basieren auf den Ausführungen von Brinkschulte [16], Hristu-Varakelis [17] und Schröder [18].

Pulsweitenmodulation (PWM) ist ein Verfahren zur Erzeugung eines modulierten Signals, dessen Mittelwert dem Referenzsignal folgt. Dabei wird ein Rechteck-Pulssignal mit konstanter Periodendauer  $T$  für eine vorgegebene Zeit  $t_{ON}$  auf ein dem „An“-Zustand zugeordnetes Spannungsniveau gesetzt und für den Rest der Periode ( $t_{OFF}$ ) abgeschaltet. Die Frequenz des Signals wird dabei so hoch gewählt, dass der Mittelwert der PWM als wirksame Prozessgröße wahrgenommen wird.

Die Stellgröße für den BLDC-Motor ist die effektiv angelegte Spannung. Während eines Positionierungsvorgangs sollte diese im Idealfall stufenlos verstellbar sein, um die von einer Regelung errechneten Stellwerte bestmöglich umsetzen zu können. Die Spannungsversorgung am Bordnetz stellt aber eine Konstantspannungsquelle dar. Um dennoch eine Stellmöglichkeit für die effektive Motorspannung zu erhalten, werden die in der B6-Wechselrichterschaltung verbauten IGBT bzw. MOSFET durch ein pulswertenmoduliertes Signal angesteuert.

Zwischen der Versorgungsspannung  $U_S$  und der effektiven Motorspannung  $U_M$  besteht dann folgender Zusammenhang:

$$U_M = \frac{t_{ON}}{T} \cdot U_S \quad (3.4)$$

Den Quotienten  $\frac{t_{ON}}{T}$  bezeichnet man als Tastgrad bzw. Tastverhältnis und in der englischsprachigen Literatur als Duty Cycle. Die Motorspannung ist, wie aus Formel ( 3.4 ) ersichtlich wird, direkt proportional zum Duty Cycle: Der gewünschte Motorspannungsverlauf kann also über die Veränderung des Duty Cycle auch mit der Konstantspannung des Bordnetzes realisiert werden.

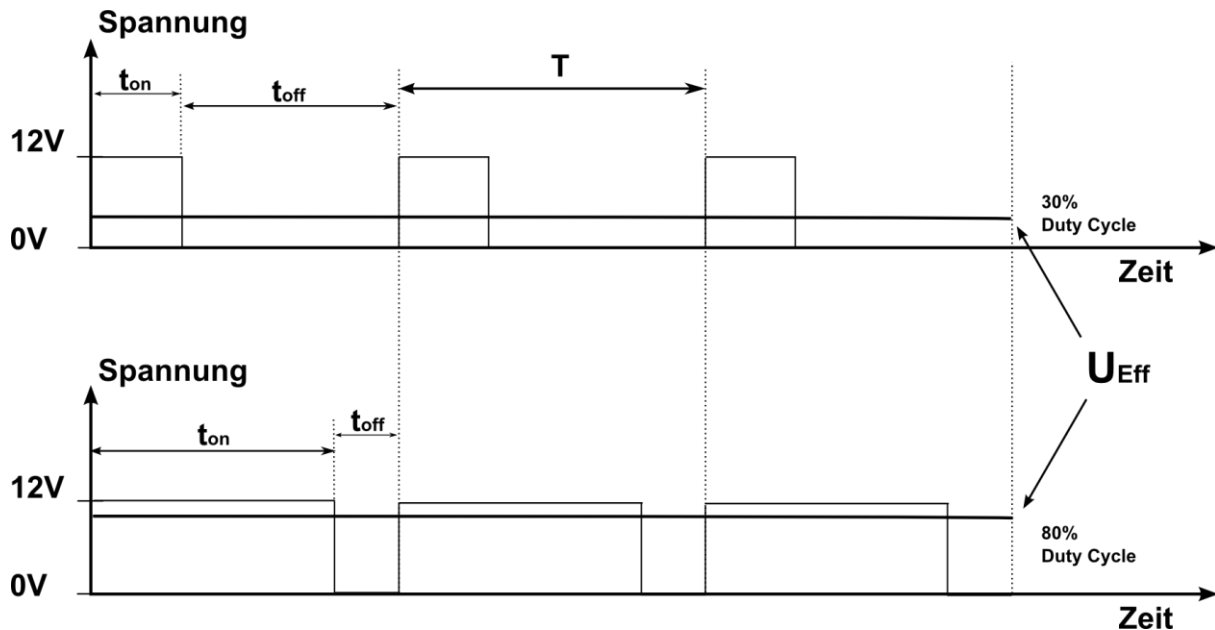


Abbildung 3.4: Pulsweitenmodulierte Signale mit verschiedenem Tastgrad

Abbildung 3.4 zeigt exemplarisch den idealen Spannungsverlauf von zwei durch PWM-Signale angesteuerten Leistungsschaltern, mit denen eine effektive Motorspannung von 30% respektive 80% der Versorgungsspannung realisiert wird. Bei der dargestellten PWM beginnt jede Periode mit dem „An“-Zustand und endet mit dem „Aus“-Zustand. Daneben sind auch PWM-Signale mit umgekehrter Reihenfolge der „An“-/„Aus“-Zustände und zentriertem „An“-Zustand gebräuchlich.

### 3.3.4 4-Quadranten-Betrieb

Für das Schalten der Gänge ist es notwendig, die Schaltwalzen in beide Drehrichtungen bewegen zu können. Die kurzen Schaltzeiten von wenigen hundert Millisekunden machen weiterhin eine möglichst hohe Dynamik erstrebenswert. Neben dem zügigen Anfahren der Schaltwalzenmotoren soll es auch möglich sein, möglichst effektiv zu verzögern. In Abwesenheit mechanischer Bremsen ist es also erforderlich, dass der jeweilige Motor in beide Bewegungsrichtungen ein Drehmoment sowohl mit der Drehrichtung als auch gegen die Drehrichtung aufbringen kann.

Die entsprechenden Drehmoment-Drehzahl-Kombinationen wurden in Abbildung 3.5 eingezeichnet. Da der Betrieb in jedem Quadranten der Motormoment-Drehzahl-Darstellung möglich ist, spricht man von „4-Quadranten-Betrieb“. [19]

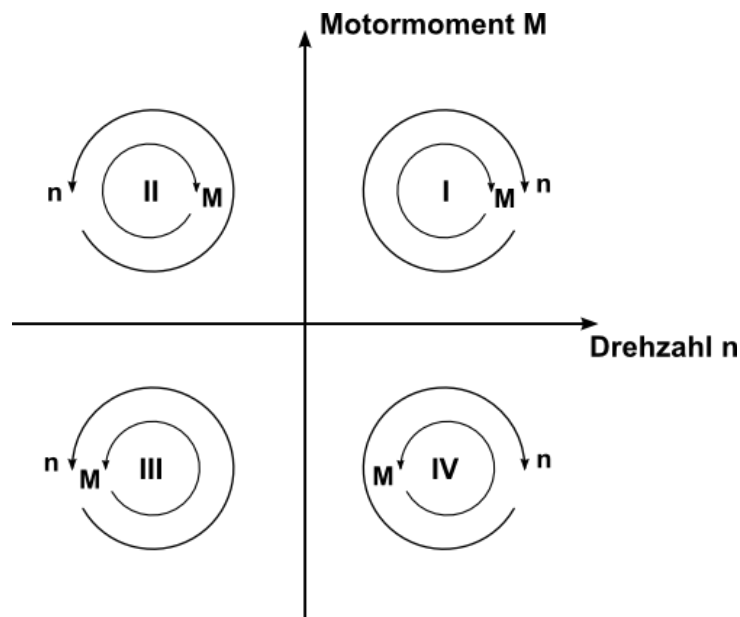


Abbildung 3.5: 4-Quadranten Betriebsbereich, in Anlehnung an Viramontes [19]

Um den Motor zu bremsen, muss ein Moment entgegen der Drehrichtung aufgebracht werden. Diese Betriebsweise entspricht dem zweiten und vierten Quadranten aus Abbildung 3.5. Ausgangszustand ist die Vorwärts- beziehungsweise Rückwärtsfahrt. Soll aktiv verzögert werden, das heißt das Motormoment entgegen der Bewegungsrichtung wirken, so muss dem System kinetische Energie entzogen werden. Es handelt sich daher um einen generatorischen Betrieb des Motors. [12]

Um dies zu realisieren, gibt es verschiedene Ansätze:

- i) *Dynamisches Bremsen:* Bei dieser Methode wird die Spannungsversorgung eingestellt und die Wicklungen gleichzeitig so geschaltet, dass die durch die induzierte Spannung in den elektrischen Kreis eingebrachte Energie in einem Widerstand dissipiert wird. Dies kann über einen extern zuschaltbaren Widerstand oder über das Kurzschließen der Wicklungen geschehen.
- ii) *Plugging:* Beim Plugging wird die Kommutierungssequenz während der Vorwärtsfahrt (Rückwärtsfahrt) umgekehrt, so dass der der Bewegung entgegenwirkende Effekt der BEMF noch verstärkt wird.
- iii) *Regeneratives Bremsen:* Beim regenerativen Bremsen wird eine Spannung gestellt, die kleiner als die momentan an den Motorklemmen messbare BEMF ist. Die Fließrichtung des Stroms kehrt sich um und die dem System entzogene Energie kann zum Beispiel in einem Akkumulator oder einem Elektrolytkondensator gespeichert werden.

Beim Plugging können besonders große Momente erreicht werden. Allerdings gehen damit auch sehr große Ströme einher, dies stellt besonders hohe Anforderungen an die Leistungselektronik und den Motor. Beim dynamischen Bremsen wird die dem System entzogene Energie durch die Größe der BEMF bestimmt, da diese komplett über dem Widerstand abfallen muss. Regeneratives Bremsen

---

hingegen ermöglicht es, die abfallende Spannung und damit die Größe des entgegengerichteten Stroms und Moments durch die Differenz aus Stellspannung und BEMF zu begrenzen. [20], [21]

Da die zulässige Betriebsspannung und der zulässige Betriebsstrom bei den Schaltwalzenmotoren begrenzt sind, soll das regenerative Bremsen zum Einsatz kommen.

---

### **3.4 Etablierte technische Ansteuerungslösung**

---

In den Abschnitten 3.2 und 3.3 wurden die einzelnen zur Ansteuerung von BLDC-Motoren gebräuchlichen Komponenten und Verfahren beschrieben. Zum Abschluss von Kapitel 3 soll nun noch auf in der Anwendung etablierte Ansteuerungslösungen eingegangen werden.

Um aus der speisenden Gleichspannung ein für den BLDC-Motor notwendiges Drehfeld zu erzeugen, ist eine B6-Wechselrichterschaltung notwendig, wie in Abschnitt 3.3.1 beschrieben wurde. Die verbauten MOSFET oder IGBT werden mit pulsweitenmodulierten Signalen entsprechend der gewünschten Stellspannung angesteuert, weshalb PWM erzeugende Bauteile benötigt werden. Entsprechend der Signale der Halleffekt-Sensoren muss ein elektronisches Bauteil die der Kommutierungslogik entsprechenden High- und Lowsideschalter ansteuern. Für beide Aufgaben haben sich Mikrocontroller mit integrierten PWM-Einheiten bewährt. Diese können kompakt mit der Wechselrichterschaltung auf einer Platine integriert werden [22].

Sollen dem Mikrocontroller Sollwerte vorgegeben werden oder die Programmierung bzw. einzelne Parameter geändert werden können, sind auf der Platine noch Anschlüsse für die verwendeten Ein- und Ausgänge des Mikrocontrollers bzw. die für eine (oder mehrere) Schnittstelle(n) eventuell zusätzlich notwendigen Bauteile, wie beispielsweise ein Universal Asynchronous Receiver Transmitter (UART), vorzusehen.

Ist kein für die Ansteuerung des BLDC-Motors dezidierter Mikrocontroller vorhanden oder soll ausschließlich eine Geschwindigkeitssteuerung (Open Loop Control) aufgebaut werden, können spezielle Integrated Circuits (ICs) den Platz des Mikrocontrollers einnehmen oder das Zwischenglied zwischen Mikrocontroller und Wechselrichterschaltung bilden. Als Beispiel für einen solchen IC sei der „Automotive, Sensorless BLDC Controller A4960“ von Allegro MicroSystems, LLC angeführt.

Das beschriebene Grundmodell zur Ansteuerung wird im Allgemeinen als BLDC-Controller oder BLDC-Motor-Controller bezeichnet und von diversen Motorenherstellern und spezialisierten Unternehmen kommerziell angeboten.

---

## 4 Ableitung eines Pflichtenhefts

---

Übergeordnete Grundlage für die Erstellung des Pflichtenhefts für die auszuwählende Hard- sowie Software stellen

- die Vorgaben aus der Aufgabenstellung und
- die Angaben des Motorherstellers

dar.

Weiterhin sind mehrere Komponenten zum Aufbau des Gesamtsystems notwendig, deren Kompatibilität untereinander gewährleistet sein muss. Aus diesem Grund soll in Abschnitt 4.1 zunächst eine Analyse des technischen Systems „Schaltwalzenpositionierung“ vorgenommen werden, sodass diese Komponenten identifiziert und in Kapitel 5 die passenden Teilkomponenten für die jeweilige zu erfüllende Aufgabe ausgewählt werden können. In den Abschnitten 4.2 und 4.3 werden dann konkrete quantitative und qualitative Anforderungen nach Aufgabenstellung und Motordatenblatt abgeleitet.

---

### 4.1 Systemanalyse

---

In Kapitel 3 wurde bereits auf den BLDC-Motor und die zur Ansteuerung eingesetzten Umrichter-schaltungen (Leistungselektronik) eingegangen sowie die Aufgaben und Arbeitsweise der Steuer-elektronik beschrieben. Auf Grundlage des von Nordmann [1] verwendeten Modells eines techni-schen Systems sollen diese Komponenten nun eingeordnet und weitere benötigte Komponenten ergänzend vorgestellt werden. Des Weiteren folgt eine Einteilung in bereits verbaute oder vorhan-dene Komponenten und während der Umsetzung der Arbeit zu beschaffende Teile.

Abbildung 4.1 zeigt das allgemeine Blockschaltbild eines technischen Systems. Es handelt sich dabei um ein technisches System mit einer Regelung (Closed Loop Control), bei dem eine Rückkopplung der Prozessausgangsgröße(n) auf die Aktoreingangsgröße(n) stattfindet. Nach den zugrundeliegen-den Regelgesetzen wird dabei vom Regler die Soll-Ist-Abweichung verarbeitet. Bei der Ansteuerung von BLDC-Motoren kann diese Aufgabe je nach Anwendung vom verwendeten BLDC-Controller (dem die Kommutation steuernden Gerät) oder einem externen Gerät erfolgen. Der rot eingefärbte Kasten repräsentiert den Aktor, bestehend aus Energiesteller, Energiewandler und Energieumfor-mer.

- Der *Energiesteller* nimmt gemäß einer leistungsarmen Stellgröße Energie aus dem Energie-speicher auf und gibt Energie auf höherem Niveau an die nachfolgend geschaltete Kompo-nente ab.
- Der *Energiewandler* wandelt seine Eingangsenergie in eine andere Energieart um. Dabei bleibt das Energieniveau weitestgehend erhalten.



- Aufgabe des *Energieumformers* ist es, die die Arbeit leistenden Größen bzw. die Leistung erbringenden Größen in ihrem Verhältnis an die Erfordernisse des Prozesses anzupassen. Die Energieart am Eingang liegt dabei auch am Ausgang vor.

Im Gesamtsystem „Schaltwalzenpositionierung“ erfüllt die in Abschnitt 3.3.1 beschriebene B6-Wechselrichterschaltung die Aufgabe des Energiestellers. Diese ist Bestandteil eines BLDC-Controllers und erhält die erforderlichen pulsweitenmodulierten Stellsignale i.d.R. von einem Mikrocontroller oder Mikroprozessor. Der Mikrocontroller ist erforderlich, um zum einen die PWM zu erzeugen (meist über verbaute PWM-Module [17]) und zum anderen die Sensorsignale einer Rotorlage zuzuordnen und entsprechend die Kommutierung durchzuführen. Da der Mikrocontroller bzw. -prozessor ohnehin im Gerät integriert werden muss, wird bei käuflichen BLDC-Controllern und auch im Eigenbau-Segment die Aufgabe der Regelung (zumindest des Stromes und/oder der Drehzahl) vom BLDC-Controller mit übernommen. Ein passender BLDC-Controller ist bislang nicht vorhanden und soll deswegen beschafft werden. Die Sensorik ist bereits verbaut.

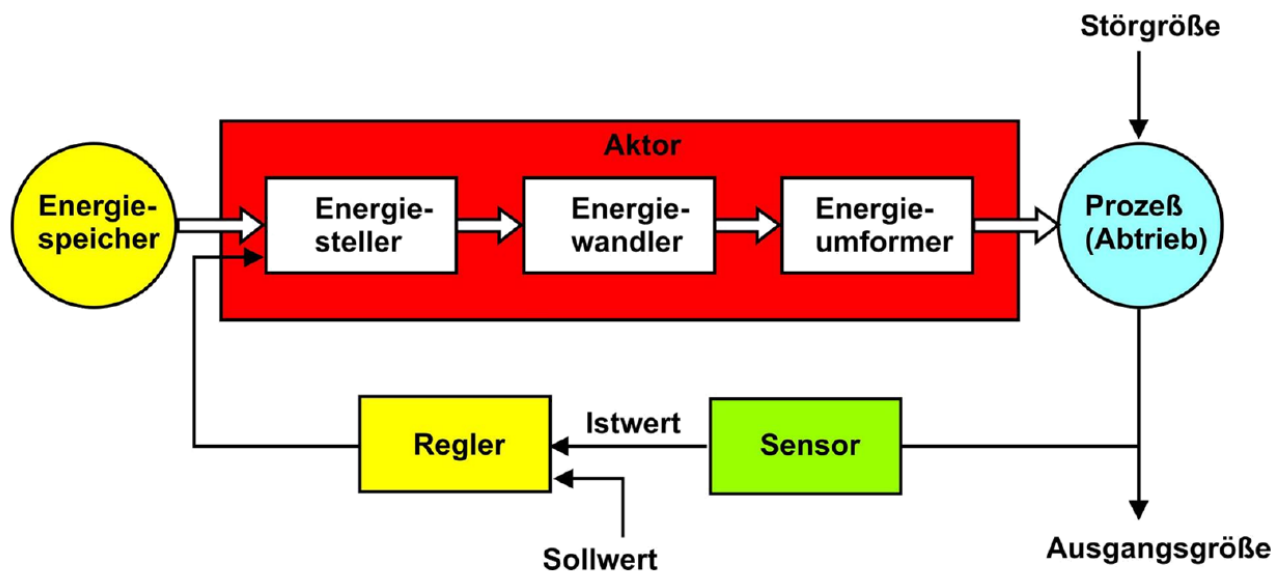


Abbildung 4.1: Allgemeines Blocksaltbild eines technischen Systems, nach Nordmann [1]

Der Energiewandler des Systems ist der BLDC-Motor. Die elektrische Eingangsenergie wird in mechanische Ausgangsenergie gewandelt. Das gezahnte Wellenende des Motors, ein dreistufiges Zahnradgetriebe, welches die Schaltwalze dreht, und ein Kurvenfolgermechanismus bilden den Energieumformer des Systems. Sowohl Energiewandler als auch Energieumformer sind bereits Teil des DKG.

Bei Kfz-Getrieben ist das Bordnetz der Energiespeicher. Das am IMS untersuchte DKG ist für eine Bordnetzspannung von 13 V ausgelegt. Für den Aufbau ist es notwendig, eine Spannungsversorgung aufzubauen, die auf dieser Nennspannung basiert und unter Last möglichst geringe Spannungseinbrüche aufweist. Die erforderlichen Komponenten sollen während der Arbeit beschafft werden.

---

## 4.2 Anforderungen nach Aufgabenstellung

---

Nach Abschluss der vorliegenden Arbeit soll es möglich sein, verschiedene Reglerstrukturen und Schaltstrategien zu implementieren. Das heißt konkret, dass das Einbeziehen verschiedener Prozessgrößen in die Regelung möglich sein soll und dass während des Schaltvorgangs verschiedene Reglertypen während verschiedener Phasen dieses Vorgangs zum Einsatz kommen können sollen. Es ist also erforderlich, im Betrieb Einfluss auf den Betriebsmodus des BLDC-Controllers nehmen zu können. Aus diesem Grund soll es auch möglich sein, den Duty Cycle und damit die Spannung über eine analoge Referenzspannung stellen zu können und die Regelung und Auswertung in einem externen Gerät durchzuführen, um größtmögliche Beeinflussungsmöglichkeiten zu haben. Der BLDC-Controller muss daher über einen konfigurierbaren Analogeingang verfügen oder, falls die Forderung nicht erfüllbar ist, digitale Werte entgegen nehmen, nach denen der Duty Cycle gestellt werden kann.

Weiterhin sollen die Prozessgrößen während des Betriebs aufgezeichnet und an einem Computer visualisiert werden. Der BLDC-Controller sollte daher weitgehende Konfigurationsmöglichkeiten bieten und muss die notwendigen Schnittstellen zum Datenaustausch und zur Entgegennahme von Anweisungen bieten. Die gemessenen Größen sollten dabei idealerweise digital an den Computer übermittelt werden. Das die Kommunikation mit dem BLDC-Controller und Computer übernehmen sowie die Regelung verarbeitende Gerät muss ebenfalls über die vom Controller verwendeten Hardwareschnittstellen (z.B. USB oder andere serielle Schnittstelle) und weiterhin über ausreichend Rechenleistung verfügen um die Regelgesetze schnell genug verarbeiten zu können und die Dynamik der Regelung nicht zu limitieren. Die Software für die verwendete Hardware soll mit MATLAB/SIMULINK erstellt und für die Zielhardware kompiliert werden.

Zum Abgleich der aus den Hall-Sensorsignalen errechneten Position mit dem tatsächlichen Motordrehwinkel sollte mindestens eines der Geräte das vorhandene High-Resolution-Signal des verbauten Drehgebers dekodieren können, da dieses über eine höhere Auflösung verfügt, als die Positionserrechnung mittels Zählen der aufeinanderfolgenden Zustände der Hall-Sensoren.

---

## 4.3 Anforderungen nach Motor

---

Neben den für den BLDC-Controller relevanten, vom Getriebehersteller explizit vorgegebenen Rahmenbedingungen für den Betrieb des BLDC-Motors, sind noch die aus diesen Anforderungen resultierenden Implikationen für die Spannungsversorgung zu berücksichtigen. Diese können allerdings erst nach der konkreten Entscheidung für ein Modell auf Grundlage der elektrischen Spezifikationen des Controllers berücksichtigt werden.

Auf die wichtigsten Anforderungen wird in diesem Abschnitt explizit eingegangen. Über die vollständige Auflistung bei der Auswahl des BLDC-Controllers zugrunde gelegten Forderungen und Wünsche gibt Anhang B einen Überblick.

---

Den äußersten Rahmen für die Auswahl des Controllers stellen die Nennspannung der Motoren von 13 V, sowie der maximal zulässige effektive Kurzzeitphasenstrom von 60 A dar. Von Seiten des Getriebeherstellers war ein Effektivstrom-Zeit-Anforderungsprofil zur Verfügung gestellt worden, nach welchem die Motoren dauerhaft betrieben werden können. Aus diesem Profil wurde abgeleitet, dass der Controller auch durch einen Dauerstrom von 20 A nicht zerstört werden können soll. Dies ist eine konservative Abschätzung, die gewährleisten soll, dass der Controller auch bei zeitweise höheren Versorgungsspannungen und daraus resultierend höheren Strömen nicht zerstört wird.

Ein weiterer wichtiger Faktor ist die PWM-Frequenz, mit der die Leistungselektronik angesteuert wird: Reale MOSFET weisen eine Gate-Kapazität auf, die bei jedem Schaltvorgang umgeladen werden muss. Bei zu hoher Schaltfrequenz wird die dazu verfügbare Zeit zu gering und der Betrieb wird unmöglich [23]. Laut Hersteller ist eine PWM-Frequenz von 20 kHz für die Motoren vorgesehen. Nach Möglichkeit sollte daher möglichst nicht oder nur wenig von dieser Frequenz abgewichen werden.

Wie in 3.3.1 erläutert wurde, ist die Flussdichteverteilung im Motor entscheidend dafür, welche Form des Speisestroms zum Erzielen eines konstanten Drehmoments gewählt werden muss. Nach Herstellerangabe ist für die Schaltwalzenmotoren die Blockstromspeisung zu wählen; das Verfahren muss also vom zu beschaffenden BLDC-Controller unterstützt werden.

Zur Vergleichbarkeit mit der Ansteuerung durch die TCU soll auch von der zu entwickelnden Ansteuerung die verbaute Hall-Sensorik zur Bestimmung des Kommutationszeitpunktes genutzt werden. Neben der grundsätzlichen Möglichkeit des BLDC-Controllers diese Signale zu verarbeiten, ist dabei darauf zu achten, dass die sich aus der räumlichen Anordnung der Sensoren ergebende Sequenz für die Vorwärts- und Rückwärtsfahrt vom Controller unterstützt oder im Idealfall geändert werden kann.

Die Tatsache, dass die Wicklungen der verbauten BLDC-Motoren im Dreieck geschaltet sind, spielt für den auszuwählenden BLDC-Controller keine Rolle, da auch hier immer zwei Phasen beschaltet sind und die Zuordnung zwischen Sensorzuständen und Kommutationssequenz wie bei Motoren in Sternschaltung vom Motorenhersteller zur Verfügung gestellt wird; eine Forderung nach Kompatibilität mit Motoren in Dreieckschaltung wurde aus Gründen der Absicherung gegenüber den Anbietern der angefragten Controller dennoch ins Pflichtenheft mit aufgenommen.

---

## 5 Auswahl geeigneter Hardware zur Ansteuerung der Aktorik

---

Kapitel 5 dieser Arbeit beschreibt den durchgeführten Auswahlprozess bzw. die Vorauslegung der eingesetzten Hardware.

Die Abschnitte 5.1 und 5.2 widmen sich der Auswahl eines geeigneten integrierten Energiestellers/Reglers beziehungsweise eines Energiespeichers. Abschnitt 5.3 beschreibt zusammenfassend das gewählte Gesamtsystem.

---

### 5.1 Energiesteller und Regler

---

Wie in Abschnitt 4.1 erläutert wurde, sind bei der Ansteuerung von BLDC-Motoren Energiesteller und zumindest Teile der Reglerstruktur in einem Gerät – dem BLDC-Controller – integriert. Es sollen nun drei der bei der Recherche gefundenen Controller vorgestellt und verglichen werden. Weiterhin wird auf die Vor- und Nachteile einer Eigenbaulösung eingegangen und im Anschluss eine passende Lösung / ein passendes Modell ausgewählt.

---

#### 5.1.1 Kommerzielle BLDC-Controller

---

Bei der Recherche nach geeigneten BLDC-Controllern hat sich der hohe Kurzzeitphasenstrom von 60 A als die stärkste Restriktion erwiesen. Es wurden 7 Geräte gefunden, die Stromspitzen von 60 A oder mehr unterstützen. Davon wurden vier aus der Auswahl gestrichen, da entweder weitere Pflichtforderungen aus dem Pflichtenheft verletzt wurden, oder weil sie für die angedachte Verwendung keinen zusätzlichen Nutzen bei gleichzeitig höherem Kaufpreis boten.

Die verbleibenden Geräte der engeren Auswahl sind

- der SCA-B4-70-30 von ElectroCraft
- das Cello von Elmo Motion Control und
- der MBL1660 von RoboteQ.

Tabelle 5.1 gibt einen Überblick über die für die Auswahl wichtigsten technischen Spezifikationen. Alle drei Controller sind für den 4-Quadranten-Betrieb geeignet und besitzen einen Analogeingang zur Vorgabe einer Referenzspannung. Ebenfalls von allen Geräten erfüllt sind die Anforderungen an den Kommutationstyp und die zulässigen Phasenströme (in der Spitze und im Dauerbetrieb). Für den Einsatz des Cello wäre es notwendig, die PWM der Leistungsstufe so zu begrenzen, dass maximal die geforderten 13 V an den Motorphasen anliegen. Die PWM Frequenz des SCA-B4-70-30 liegt mit 49 kHz deutlich über der Sollvorgabe von 20 kHz. Die Frequenz des Cello kann auf 25 kHz begrenzt werden – ein nach Rücksprache mit dem Getriebehersteller tolerabler Wert. Die PWM Frequenz des MBL1660 ist zwischen 10 kHz und 20 kHz frei konfigurierbar und der Controller erfüllt damit, als einziges Gerät im Vergleich, die genaue Anforderung.

Eigenschaft	SCA-B4-70-30	Cello	MBL1660
Spannung	11 V bis 70 V	14 V bis 94 V	9 V bis 60 V
Kommutationstyp: Blockkommutation	Ja	Ja	Ja
Phasenstrom dauer/spitze	30 A / 60 A	50 A / 100 A	80 A / 120 A
PWM Frequenz	49 kHz	25 kHz oder 50 kHz	10 kHz bis 20 kHz
Serielle Schnittstellen	Nicht vorhanden	USB	USB, RS-232
Analogeingang	Ja	Ja	Ja

Tabelle 5.1: Gegenüberstellung ausgewählter BLDC-Controller

Bezüglich der Konfigurationsmöglichkeit unterscheidet sich der SCA-B4-70-30 im Umfang und der Qualität der Einstellungsmöglichkeiten von den anderen beiden Geräten: Neben dem Festlegen von Maximalwerten für Strom und Drehzahl sowie von die Kommutation betreffenden Parametern über das Verstellen von Drehpotentiometern am Gehäuse des Gerätes, kann nur der Betriebsmodus gewählt, nicht aber beeinflusst werden. Der Betriebsmodus wird dabei über das Setzen von Jumpers gewählt. Im Gegensatz dazu verfügen sowohl das Cello als auch der MBL1660 über die Möglichkeit, eigene Software auf das Gerät zu laden und nahezu alle Betriebsparameter nach Wunsch zu verändern.

Problematisch erweist sich das Umgehen der integrierten Reglerstufen der Geräte: Eine Referenzspannung kann für das Cello und den SCA-B4-70-30 nur als Sollwert für eine minimale Reglerstufe des Stromes oder der Drehzahl konfiguriert werden – der Duty Cycle der Leistungsstufe kann nicht direkt beeinflusst werden. Lediglich der MBL1660 von RoboteQ bietet die Möglichkeit, die internen Reglerstufen zu umgehen und direkt den Duty Cycle der PWM und damit die Spannung zu stellen.

Keines der gefundenen Geräte ist in der Lage, das HRS des Sensor-IC auszuwerten. Unter den verglichenen BLDC-Controllern erfüllt der MBL1660 als einziges Gerät alle übrigen Pflichtanforderungen aus dem Pflichtenheft ohne Einschränkung und ist daher unter den kommerziellen BLDC-Controllern zu favorisieren.

### 5.1.2 Vor- und Nachteile von Eigenbau BLDC-Controllern

Einer der Gründe für die Entscheidung, einen BLDC-Controller zu entwickeln, besteht darin, dass diese genau für die gegebenen Erfordernisse ausgelegt werden können. Kompromisse für die Aufrechterhaltung der Kompatibilität mit anderen als dem verwendeten Motor müssen daher nicht eingegangen werden. Die Leistungselektronik kann entsprechend der gewünschten Versorgungsspannung, der zu erwartenden Phasenströme und der geforderten PWM-Frequenz ausgelegt werden und muss nicht überdimensioniert werden. Außerdem werden nur die Bauteile auf der Platine

---

verbaut, die auch tatsächlich für den Betrieb genutzt werden sollen, wodurch unter Umständen wichtiger Bauraum eingespart werden kann. Positiv anzumerken bleiben außerdem die, im Vergleich zu kommerziellen BLDC-Controllern, etwa 50% geringeren Kosten der Eigenbaulösung, die sich aus dem vorwiegenden Bedarf an Standardbauteilen und der Verfügbarkeit von kostengünstigen Mikrocontrollern ergeben.

Als einer der Nachteile der Eigenbau-Lösung ist zu nennen, dass die zu entwickelnden Schaltungen je nach gewünschtem Funktionsumfang schnell komplex werden: Soll der gleiche Funktionsumfang wie beispielsweise beim MBL1660 von RoboteQ erreicht werden, werden neben dem Mikrocontroller und den Bauelementen der B6-Wechselrichterschaltung zur Ansteuerung der Highside-MOSFET Bootstrap-Schaltungen oder dezidierte Brückentreiber-ICs benötigt, ein UART für die RS-232-Schnittstelle, Stromsensoren bzw. Shunt-Widerstände um nur einige Bestandteile zu nennen.

Der größte Vorteil von Eigenbau BLDC-Controllern liegt in der Möglichkeit, den Mikrocontroller und damit den programmierbaren und von der Rechenleistung her umsetzbaren Funktionsumfang des BLDC-Controllers frei wählen zu können. Die zur Programmierung des Cello und des MBL1660 verwendeten Programmiersprachen lassen zum Teil den Zugriff auf grundlegende Funktionen des Controllers nicht zu, weshalb zum Beispiel die Kommutierungssequenz des MBL1660 softwareseitig nicht geändert werden kann. Ein Eigenbau BLDC-Controller bietet dagegen mit dem entsprechenden Mikrocontroller prinzipiell alle technisch realisierbaren Konfigurationsmöglichkeiten.

Gleichzeitig stellt die Möglichkeit zur eigenständigen Programmierung sämtlicher gewünschter Funktionen auch den größten Nachteil dieser Lösung dar: Jede Grundfunktion muss zunächst aufwändig implementiert werden, was die Entwicklungszeit des Gesamtsystems gegenüber den kommerziellen BLDC-Controllern, die über diese Funktionen bereits in der Firmware verfügen, verlängert. Außerdem sind Kenntnisse über die hardwarenahe Programmierung und Architektur des Mikrocontrollers erforderlich (vgl. [16]) wohingegen die Programmiersprachen für den MBL1660 oder das Cello weiter von der Hardware abstrahieren und den Zugriff auf die relevanten Laufzeitparameter über dafür vorgesehene Funktionen erlauben (vgl. [12]). Aus diesem Grund ist bei der Entscheidung für oder gegen die eigenständige Entwicklung eines BLDC-Controllers immer eine Abwägung zwischen dem gewünschten/realisierbaren Funktionsumfang und der Entwicklungsdauer/dem Entwicklungsaufwand zu treffen.

---

### 5.1.3 Auswahl eines BLDC-Controllers

---

In Abschnitt 5.1.1 konnte der MBL1660 von RoboteQ als geeignetster kommerzieller BLDC-Controller unter den gefundenen Alternativen identifiziert werden. Wie in Abschnitt 5.1.2 abschließend bemerkt wurde, sind bei einer Entscheidung zwischen einer Eigenbaulösung und einem kommerziellen Gerät der gewünschte bzw. bei kommerziellen Controllern erreichbare Funktionsumfang und die Entwicklungsdauer gegeneinander abzuwägen.

---

Der MBL1660 erfüllt alle sich aus der Aufgabenstellung ergebenden Anforderungen an die Software: Der Duty Cycle, mit dem die Wechselrichterschaltung angesteuert wird, kann direkt beeinflusst werden und eine eigene Skriptsprache ermöglicht die Implementierung von eigenen Funktionen. Nicht in der Skriptsprache implementierbare Funktionen können von einem externen Gerät ausgeführt werden, welches über eine Referenzspannung den Sollwert für den Duty Cycle oder über eine serielle Schnittstelle den entsprechenden Parameter stellt. RoboteQ stellt außerdem ein Softwaretool zur Verfügung, das Roborun+ Motor Control Utility, welches sich in seiner Funktionalität gut für die Konfiguration des Controllers und erste Tests eignet. Weiterhin sind verschiedene Schutzmaßnahmen, wie ein Überspannungsschutz, eine Strombegrenzung, ein Kurzschlusschutz und eine Ansteuerung, die das regenerative Bremsen erlaubt, bereits integriert.

Ein gleichwertiger Funktionsumfang ließe sich zwar auch mit einer Eigenbaulösung realisieren, jedoch nur mit erheblichem Zeitaufwand für die Entwicklung des Hardwarelayouts, das Fertigen und Bestücken der Platine und die Programmierung sämtlicher Softwarefunktionen. Aus diesem Grund wurde der MBL1660 von RoboteQ beschafft.

---

#### **5.1.4 Regelung und Konfiguration des BLDC-Controllers durch ein Controller Board**

---

Wie in Abschnitt 5.1.1 festgestellt wurde, ist der MBL1660 nicht in der Lage das HRS des Sensor-IC auszuwerten. Da aber zum einen die Positionsermittlung mit Hilfe von Hall Counts mit dem hochauflösenden Signal verglichen werden soll und zum anderen das Signal eine gute Möglichkeit bietet, die Position in die Regelung mit aufzunehmen, muss ein zusätzlicher Baustein gefunden werden, der dieses auswerten kann. Ein solcher Baustein sollte im besten Fall das Signal

- i) auswerten können,
- ii) die dekodierten Daten zur Visualisierung und Aufzeichnung an den Host-PC übertragen können und
- iii) die Daten in einer Weise aufbereiten und ausgeben können, dass sie auch von dem ausgewählten BLDC-Controller als Feedback-Größe genutzt werden können.

Auch weil, wie in Abschnitt 4.2 beschrieben, ein externer Controller den Betriebsmodus verstellen und zumindest Teile der Regelung übernehmen soll, bietet sich das am Institut zur Verfügung stehende DS1104 Controller Board von dSpace für diese Aufgabe an. Das DS1104 wird über die PCI-Express-Schnittstelle mit dem Host-PC verbunden. Die Steckkarte trägt einen Hauptprozessor, einen ergänzenden digitalen Signalprozessor (Slave-DSP-Einheit, mehrere D/A- und A/D-Kanäle sowie einen UART für RS-232, um einige Features zu nennen. Zur Erleichterung der Verbindung mit externer Hardware ist ein Anschlusspanel, das CLP1104 Combined Connector/LED Panel, vorhanden.

In SIMULINK erstellte Blockschaltbilder können für das DS1104 kompiliert und auf der Hardware ausgeführt werden. Das Controller Board ist für Echtzeitanwendungen vorgesehen und eignet sich aufgrund seines mit 250 MHz getakteten Hauptprozessors und der umfangreichen Input-/Output-Möglichkeiten gut, um auch über die zunächst vorgesehene Verwendung hinaus umfangreiche



---

Regelungsaufgaben zu erfüllen. Die zugehörige Software zur Einbindung der Hardwareschnittstellen in SIMULINK sowie das zur Visualisierung und Aufzeichnung von Messergebnissen gedachte Programm ControlDesk werden in Kapitel 7 näher erläutert.

---

## 5.2 Energiespeicher

---

Wie in Abschnitt 4.1 angemerkt wurde, soll die Spannungsversorgung möglichst konstant, also last-unabhängig erfolgen. Für die hohen Kurzzeitströme von 60 A ausgelegte Schaltnetzteile haben sich bei der Recherche als sehr teuer erwiesen. Das günstigste Gerät im Vergleich wird für 270 € angeboten, weshalb zunächst ein Kfz-Akkumulator als Energiespeicher dienen soll.

Zur Ermittlung des Betriebsverhaltens unter Last stehen grundsätzlich zwei Arten von Modellen zur Verfügung. Das sind zum einen Modelle aufgrund physikalisch-chemischer Grundlagen und zum anderen Modelle, welche das Betriebsverhalten in mathematischen Gleichungen annähern. Für beide Modelle sind zur Parametrierung aufgrund der schlechten Verfügbarkeit von entsprechenden Herstellerangaben Versuche notwendig, weshalb das Betriebsverhalten des auszuwählenden Energiespeichers unter Last zunächst nicht vorhergesehen werden kann [24]. Eine Überprüfung der tatsächlichen Eignung kann daher in Verbindung mit den durchzuführenden Tests erfolgen.

Eine für die Auswahl eines Akkumulators vorab berücksichtigbare Größe ist seine Kapazität. Die Kapazität ist ein Maß dafür, wie viel Ladung dem Akkumulator entnommen werden kann und wird typischerweise in Amperestunden angegeben.

Zur Abschätzung der benötigten Kapazität wurde zunächst, auf Grundlage eines vom Motorenhersteller bereitgestellten maximal dauerhaft zulässigen Strom-Zeit-Profiles, der gerade noch zulässige durchschnittliche Motorstrom berechnet. Dieser Strom muss dauerhaft vom Akkumulator abgegeben werden können. Weiterhin ist der Stromverbrauch des Controllers und der Sensoren zu berücksichtigen. Aufgrund der in den Datenblättern der Geräte gemachten Angaben zum Stromverbrauch kann davon ausgegangen werden, dass diese im Vergleich zum Motorstrom gering ausfallen werden. Als konservative Abschätzung wird ein Sicherheitszuschlag von  $s = 15\%$  des errechneten durchschnittlichen Motorstroms addiert. Insgesamt ergibt sich der durchschnittliche maximale Batteriestrom zu

$$I_{Bat} = I_{Motor} \cdot (1 + s) = 11,5 \text{ A} \cdot (1,15) = 13,225 \text{ A} \quad (5.1)$$

Dabei ist  $I_{Bat}$  der konservativ ermittelte Batteriedauerstrom und  $I_{Motor}$  der aus dem Strom-Zeit-Profil errechnete Motorstrom.

Von Seiten des IMS besteht der Wunsch, den Aufbau bei maximal zulässiger Schaltfrequenz mindestens 8 Stunden betreiben zu können. Es ist damit ein Akkumulator mit einer Kapazität  $C$  von mindestens



$$C_{min} = I_{Bat} \cdot t_{min} = 13,225 \text{ A} \cdot 8 \text{ h} = 105,8 \text{ Ah} \quad (5.2)$$

erforderlich.

Für den Aufbau ist die Auswahl auf einen Blei-Gel-Akkumulator mit einer Nennspannung von 12 V und einer Kapazität von 120 Ah gefallen.

### 5.3 Gesamtsystem

Abbildung 5.1 zeigt das entwickelte Gesamtkonzept in schematischer Darstellung. Das DS1104 ist in der Lage, sämtliche im System zur Verfügung stehenden Prozessgrößen entgegenzunehmen und aufzubereiten. Auf dem Host-PC werden Blockschaltbilder erstellt, nach deren Regelgesetzen das DS1104 die Größen in Echtzeit verarbeitet. Die Werte sollen am Host-PC mit Hilfe des Programms ControlDesk visualisiert und aufgezeichnet werden. Die Abfrage der vom BLDC-Controller gemessenen oder berechneten Ist-Werte wie Strom, Drehzahl oder Motor- und Schaltwalzendrehwinkel soll vom DS1104 über die RS-232-Schnittstelle erfolgen. Eine Sollwertvorgabe für den MBL1660 erfolgt über einen D/A-Ausgang des DS1104. Das Stellen der Strangspannungen, die Kommutierung und die Umsetzung des gewünschten Betriebsmodus sollen im MBL1660 erfolgen. Das Abfahren des kompletten Stellweges innerhalb der Teilgetriebe und die anschließende Übermittlung der vor- und rückwärtigen Endposition an das dSpace-System sollen zu jedem Start des Controllers automatisch erfolgen. Die Stromversorgung wird zunächst von einem Blei-Gel-Akkumulator gewährleistet.

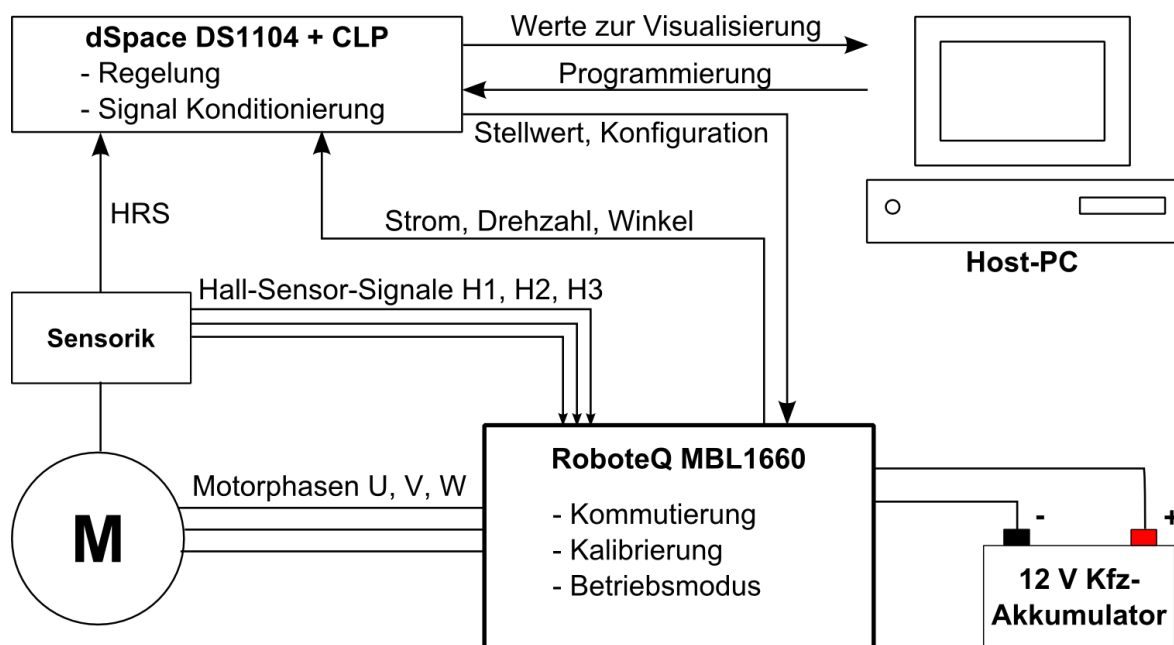


Abbildung 5.1: Schematische Darstellung des ausgewählten Gesamtsystems

---

Das Gesamtkonzept lässt auch im Nachgang der Arbeit noch verschiedene weitere Betriebsweisen zu und die Arbeitsteilung zwischen den einzelnen Systemkomponenten kann flexibel gestaltet werden. Beispielsweise wäre die Berechnung der Geschwindigkeit auch aus den eingelesenen Werten des HRS möglich. Sollte in Zukunft der Wunsch bestehen, die internen Reglermodi des MBL1660 zu nutzen, könnte die aus dem HRS gewonnene Winkelinformation vom DS1104 aufbereitet und dem MBL1660 als Feedback-Größe zur Verfügung gestellt werden. Auch die digitale Sollwertvorgabe kann in Betracht gezogen werden, falls sich die analoge Sollwertvorgabe als zu ungenau herausstellen sollte. Um die serielle Schnittstelle zu entlasten und schneller über entsprechende Werte zu verfügen, könnten die Hall-Sensor-Signale zusätzlich im DS1104 ausgewertet werden.

---

## 6 Aufbau und Inbetriebnahme

---

Kapitel 6 dieser Arbeit erläutert das Vorgehen beim Aufbau und der Inbetriebnahme der ausgewählten Hardware. Daneben wird auf Besonderheiten in der konstruktiven Umsetzung sowie durchgeführte Vorauslegungen eingegangen.

Abschnitt 6.1 behandelt die Beschaltung der Steuerelektronik des Systems. Dazu wird eine Übersicht über die benötigten Ein- und Ausgänge gegeben und die Notwendigkeit weiterer Schaltungselemente untersucht. Abschnitt 6.2 beschreibt den Aufbau und die Installation der Spannungsversorgung des Systems. In dem darauf folgenden Abschnitt 6.3 wird die Inbetriebnahme der Hardware erläutert.

Eine Übersicht der Pin-Belegung der verwendeten Anschlüsse sowie eine Stückliste der verwendeten Bauteile befinden sich in Anhang A der Arbeit.

---

### 6.1 Beschaltung der Steuerelektronik

---

Im folgenden Abschnitt wird die Beschaltung der Steuerelektronik erläutert. Informationen zu der elektrischen Spezifikation der einzelnen Ein- und Ausgänge sind den Datenblättern der Hersteller entnommen. Wo möglich, wurde auf geschirmte Kabel zurückgegriffen um elektromagnetische Einstrahlungen wie Crosstalk zu vermeiden [25]. Wo erforderlich, wurde die Notwendigkeit zusätzlicher Schaltungselemente, etwa aufgrund der Überschreitung von zulässigen Maximalwerten, überprüft.

---

#### 6.1.1 Übersicht der benötigten Ein- und Ausgänge

---

Gemäß dem in Abschnitt 5.3 vorgestellten ausgearbeiteten Gesamtsystem und den an den ausgewählten Geräten vorhandenen Schnittstellen wurden die zu verwendenden Anschlüsse für die Kommunikation unter den einzelnen Komponenten ausgewählt. Tabelle 6.1 gibt einen Überblick über die jeweiligen Anschlüsse und Anschlusstypen sowie die Verwendung der zugehörigen Ein- und Ausgänge.

Die umgesetzten Pin-Belegungen wurden den Datenblättern der Geräte entnommen und können in Anhang A.1 eingesehen werden.

Gerät	Anschluss	Anschlusstyp am Gerät	Verwendung Ein- / Ausgänge
MBL1660	I/O Connector	15-pin D-Sub, weiblich	- Serielle Schnittstelle (RS232) - Entgegennahme Referenzspannung
MBL1660	Hall Sensors Connector	6-pin Molex Microfit 3.0, Modell 43645	- Versorgung Sensorsystem - Entgegennahme Sensorsignale
MBL1660	USB-Anschluss	USB-mini, weiblich	Laden von Software auf den BLDC-Controller
DS1104 CLP	D/A-Ausgang	BNC, männlich	Vorgabe Referenzspannung
DS1104 CLP	Slave DSP I/O Connector	37-pin D-Sub, weiblich	Entgegennahme des HRS
DS1104 CLP	UART für RS232	9-pin D-Sub, männlich	Serielle Schnittstelle (RS232)
Host PC	PCI-Express	Onboard Steckplatz für PCI-Express-Karten	Kommunikation und Programmierung DS1104

Tabelle 6.1: Geräteanschlüsse und ihre Verwendung

### 6.1.2 Sensorsystem

Für die Versorgung des Sensorsystems sowie die Verarbeitung der Hall-Sensor-Signale steht am verwendeten BLDC-Controller eine Anschlussbuchse mit fünf Anschlüssen zur Verfügung. Diese sind ein Anschluss an die benötigte 5 V-Versorgungsspannung, eine Verbindung mit Masse (GND, Ground) sowie drei Eingänge für die Hall-Sensor-Signale. Das High-Resolution-Signal kann von dem Controller nicht verarbeitet werden und soll von der Slave-DSP-Einheit des DS1104 Controller Boards ausgewertet werden. Ein von RoboteQ bezogenes Anschlusskabel führt die Anschlüsse am Controller auf eine Platine auf der die einzelnen Signalleitungen sowie die motorseitig für die Versorgungsspannung und Masse vorgesehenen Leiter angelötet wurden. Ebenfalls auf den auf der Platine vorgesehenen Massepunkt gelötet ist der Rückleiter des vom DS1104 auszuwertenden HRS-Signals. Die Signalleitung und die eben beschriebene Masseverbindung wurden über Lüsterklemmen mit einem geschirmten Kabel verbunden und zum Connector Panel des dSpace-Systems geführt. Beide wurden entsprechend der Pin-Belegung des „Slave DSP I/O“ Anschlusses am Connector Panel mit dem 37-pin D-Sub Stecker des Anschlusses verlötet.

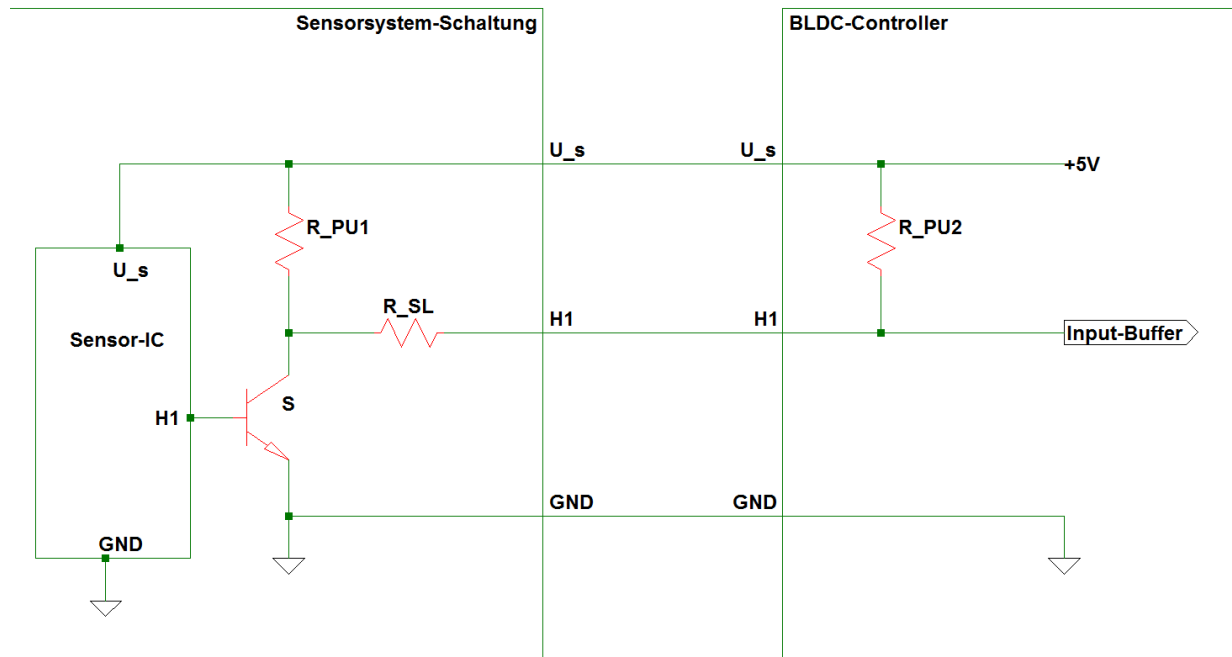


Abbildung 6.1: Elektrisches Ersatzschaltbild Sensorsystem/BLDC-Controller

Abbildung 6.1 zeigt die für die Hall-Sensorik relevante Ein- und Ausgangsbeschaltung der verbauten Sensorsystem-Schaltung und des BLDC-Controllers. Aus Übersichtlichkeitsgründen wurde auf die Darstellung von Entkopplungskondensatoren verzichtet und nur einer der Sensorsignalausgänge eingezeichnet. Die übrigen Sensorsignalausgänge weisen die gleiche Beschaltung auf. Gibt der Ausgang H1 des Sensor-IC einen Low-Pegel aus, sperrt der Schalter S – er nimmt einen hochohmigen Zustand ein. Um zu verhindern, dass an der Leitung H1-H1 zwischen Sensorsystem-Schaltung und BLDC-Controller in diesem Fall kein definierter Spannungszustand vorliegt, muss ein sogenannter Pull-Up Widerstand das Potenzial der Leitung auf den logischen High-Pegel ziehen [26]. Dieser wurde bei der Entwicklung durch den Getriebehersteller in Absprache mit dem Sensorentwickler bereits in der Sensorsystem-Schaltung integriert. Der Hersteller des MBL1660 BLDC-Controllers hat seinerseits ebenfalls intern einen Pull-Up Widerstand vorgesehen.

Der die Sensorsystem-Schaltung versorgende Ausgang ist der in der Abbildung mit  $U_s$  bezeichnete Ausgang am BLDC-Controller. Es soll nun überprüft werden, ob durch den zusätzlichen Pull-Up Widerstand die Strombelastbarkeit des versorgenden Ausgangs überschritten wird oder ob die Sensorsystem-Schaltung gegebenenfalls modifiziert werden muss.

Alle Signalleitungen sowie der Sensor-IC werden über den gleichen 5 V-Ausgang am BLDC-Controller versorgt. Daher sind für die Berechnung zu berücksichtigen:

- i) Der vom Sensor-IC maximal benötigte Strom im Betriebszustand
- ii) Der während eines High-Pegels geführte Strom
- iii) Der während eines Low-Pegels geführte Strom
- iv) Der für die Erzeugung der Pegel in der HRS-Signalleitung benötigte Strom.

### Strom aus i)

Laut Getriebeherstellerangabe benötigt der Sensor-IC im Betrieb weniger als 35 mA Strom. Diese Information wurde dem Datenblatt entnommen.

### Strom aus ii), iii) und iv)

Die Tatsache, dass die Hall-Sensor-Signal-Eingänge des MBL1660 intern über einen Pull-Up-Widerstand mit  $U_S$  verbunden sind, zieht die Schlussfolgerung nach sich, dass die verbauten Input-Buffer hochohmig sind, da sich sonst ein nicht zu vernachlässigender Spannungsabfall am Pull-Up-Widerstand einstellen würde („Spannungsteiler“) und die von der Signalleitung geführten Pegel unter Umständen nicht mehr korrekt zugeordnet werden könnten. Da aber über konkrete elektrische Eigenschaften der im MBL1660 verbauten Input-Buffer nichts bekannt ist, wird zur Durchführung einer konservativen Überschlagsrechnung davon ausgegangen, dass alle Ausgänge des Sensor-IC einen High-Pegel führen und der Schalter S damit gegen Masse leitet. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass im leitfähigen Zustand der Widerstand des Schalters S gegen null geht (ebenfalls konservative Annahme).

Der für eines der Sensorsignale relevante Innenwiderstand  $R_i$  der Schaltung ermittelt sich dann zu

$$R_i = R_{PU1} || (R_{PU2} + R_{SL}) = \frac{R_{PU1} \cdot (R_{PU2} + R_{SL})}{R_{PU1} + R_{PU2} + R_{SL}} = 1,179 \text{ k}\Omega \quad (6.1)$$

Für den vom Versorgungsausgang benötigten Strom pro Signalleitung folgt damit

$$I_{signal} = \frac{U_S}{R_i} = \frac{5 \text{ V}}{1,179 \text{ k}\Omega} = 4,24 \text{ mA} \quad (6.2)$$

Der Eingang des HRS-Signals an der Slave-DSP-Einheit des DS1104 verfügt nicht über einen internen Pull-Up-Widerstand und ist ebenfalls als hochohmig anzunehmen. Da  $R_{PU1} > R_{PU1} || (R_{PU2} + R_{SL})$  kann die Verrechnung von  $I_{signal}$  für den von der HRS-Signalleitung benötigten Strom auch als konservative Annahme angesehen werden. Bei vier Sensor-Signalausgängen ergibt sich für den Gesamtstrom aus ii), iii) und iv)

$$I_{ii),iii),iv)} = 4 \cdot 4,24 \text{ mA} = 16,96 \text{ mA} \quad (6.3)$$

### Insgesamt benötigter Strom

Es ergibt sich damit ein Vergleichswert für den von der Sensorsystem-Schaltung benötigten Strom von

$$I_{ges} = \sum_{j=1}^4 I_j = 35 \text{ mA} + 16,96 \text{ mA} = 51,96 \text{ mA} \quad (6.4)$$

Nach Herstellerdatenblatt [27] liegt der maximal zulässige Versorgungsstrom des Ausgangs bei  $I_{max} = 100 \text{ mA} > I_{ges}$ . Der Ausgang wird also auch durch den zusätzlichen Pull-Up-Widerstand nicht überlastet.

### 6.1.3 Serielle Schnittstellen

Die eingesetzten seriellen Schnittstellen sind der EIA/TIA-232-E Standard, besser bekannt als RS-232, sowie der Universal Serial Bus (USB). Beide Schnittstellen weisen für die teilnehmenden Geräte genau spezifizierte elektrische Charakteristiken auf [28], [29]. Eine Überprüfung der Kompatibilität der Spannungspegel oder der Ein-/Ausgangsbeschaltung ist daher nicht notwendig.

### 6.1.4 Analoge Vorgabe der Referenzspannung

Der Anschluss einer variablen Spannungsquelle an den MBL1660 erfolgt nach Herstellerangaben ohne zusätzliche Beschaltung direkt an einem Analog-Input-Pin und einem der Ground-Pins des 15-pin D-Sub Connectors. Laut Datenblatt sind Spannungen zwischen 0 V und 5 V am Eingang zulässig. Abbildung 6.2 zeigt elektrische Eingangscharakteristik der Analogeingänge mit angeschlossener variabler Spannungsquelle am MBL1660. Der Widerstand des Eingangs gegen Masse beträgt  $53 \text{ k}\Omega$  und der vom DS1104 zu liefernde Strom ist bei Spannungen bis 5 V damit vernachlässigbar gering. Bei der Konfiguration des dSpace Controller Boards ist zu berücksichtigen, dass der zulässige Spannungsbereich nicht über- oder unterschritten wird. Diese Konfiguration erfolgt softwareseitig.

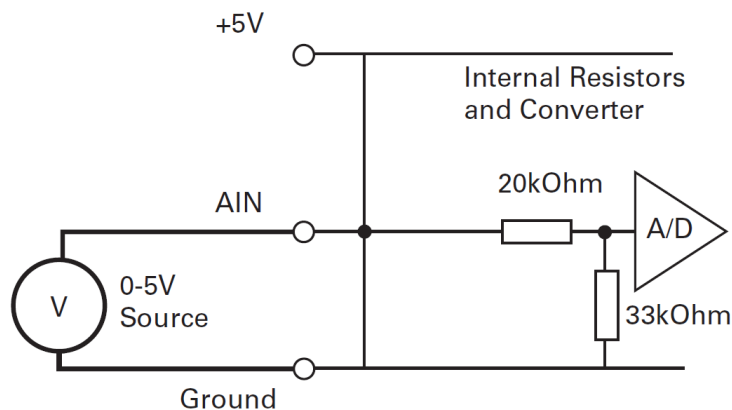


Abbildung 6.2: Anschluss einer variablen Spannungsquelle an den Analogeingang des MBL1660 [30]

## 6.2 Aufbau der Spannungsversorgung

Bei der Konzeptionierung oder Entwicklung mechatronischer Systeme ist es stets erforderlich, sicherheitstechnische Überlegungen durchzuführen, mögliche Fehlerfälle auf ihr Gefahrenpotenzial für Personen und die einzelnen Systemkomponenten hin zu untersuchen und, falls erforderlich, Sicherheitsmechanismen und Sicherungen zu verbauen.

Für den Aufbau der Ansteuerung wird ein kommerzieller BLDC-Controller eingesetzt. Daher sind hier die Sicherheitsanweisungen des Herstellers maßgeblich. Abbildung 6.3 zeigt die empfohlene Versorgungsbeschaltung des Controllers im Betrieb ohne Notfallstromversorgung. Der in der Abbildung durch einen digitalen Ausgang betätigte Schalter inklusive des zum Schalter parallelen Widerstands ist für die Anwendung des Controllers bei hohen Spannungen vorgesehen, bei denen mit einer Gefahr für Personen gerechnet werden muss. Aufgrund der geringen Nennspannung der Spannungsversorgung von 12 V kann hier auf den Schalter verzichtet werden.

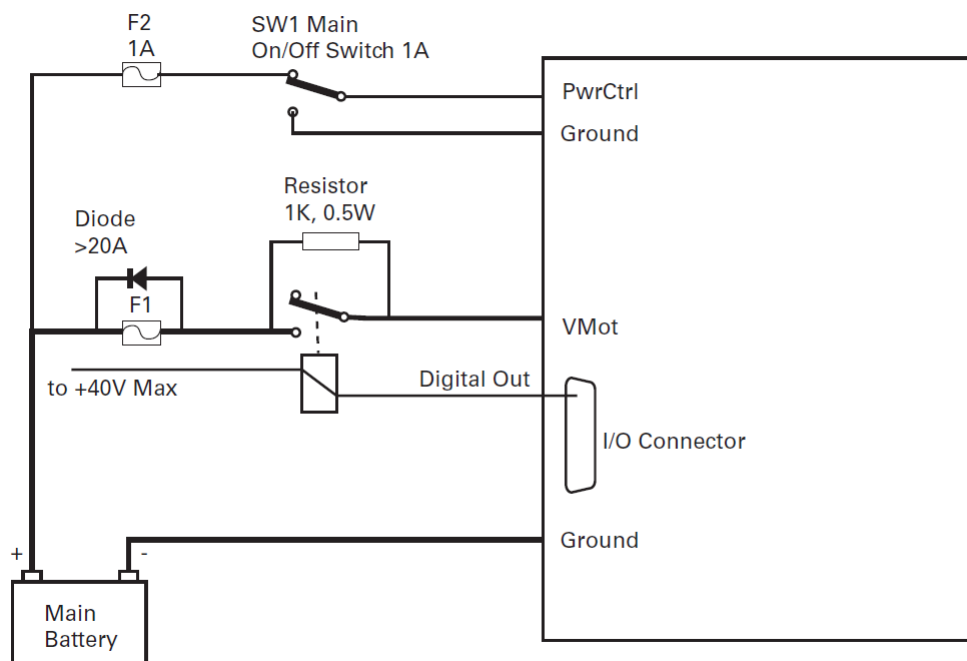


Abbildung 6.3: Spannungsversorgung des BLDC-Controllers [30]

Als Sicherheitselemente der Schaltung sind die Sicherung F2, die Sicherung F1 sowie die zu F1 parallele Diode zu nennen. Aufgabe von F2 ist die Sicherung der Steuerelektronik des Controllers. Sie wurde zusammen mit dem Umschalter SW1 auf einer Lochrasterplatine verlötet und in einem Verteilerkästchen untergebracht. Der Umschalter ermöglicht das Ein- und Ausschalten des Controllers. Für die Sicherung F1 wurde eine Kfz-Flachsicherung gewählt. Sie schützt im Falle einer Fehlfunktion wie eines Kurzschlusses gegen Masse das Leiternetzwerk und die Leistungsstufe des Controllers vor Schäden. Die verbaute Diode ist für Ströme  $> 60\text{ A}$  ausgelegt. Sie bietet eine Rücklaufmöglichkeit des Stroms zum Akkumulator im Falle eines Durchbrennens der Sicherung F1 und weiteren Drehens des Motors. An den Knotenpunkten der Versorgungsschaltung sind die Ring-



---

kabelschuhe der Leiter miteinander verschraubt, die Schraubverbindungen wurden zusammen mit der Diode in einem Verteilerkästchen untergebracht. Die Kabelenden des Sicherungshalters von F1 wurden von außen in das Verteilerkästchen eingeführt, sodass der Sicherungshalter von außen zugänglich bleibt.

Der Anschluss am verwendeten Akkumulator wurde ebenfalls durch Schraubverbindungen realisiert. Plastik schützt die Pole vor Berührung.

Die für die Spannungsversorgung und die Motorphasen vorgesehenen Anschlüsse des MBL1660 sind Steckverbinder vom Typ „Faston“. Die zum Controller führenden Leiter der Spannungsversorgung wurden mit entsprechenden Kabelschuhen bestückt.

Um den Kabelwiderstand und den daraus resultierenden Spannungsabfall bei höheren Strömen so gering wie möglich zu halten, wurden für die Versorgung der Leistungselektronik und für die Verbindungen zum Akkumulator Kabel mit  $6 \text{ mm}^2$  Querschnittsfläche ausgewählt.

Das Gegenstück für den Steckverbinder der Motorkabel am Getriebe wurde vom Getriebehersteller inklusive der Pin-Belegung zur Verfügung gestellt. Die Kabel für die Motorphasen wurden entsprechend der Vorgaben aus dem Datenblatt des MBL1660 mit Kabelschuhen vom Typ „Faston-Tab“ versehen und mit den vorgesehenen Anschlüssen am Controller verbunden. Für die Motorphasen wurden Leiter mit gleicher Querschnittsfläche wie im vom Getriebehersteller erhaltenen Motorkabel verwendet.

---

## **6.3 Inbetriebnahme der Hardware**

---

Im folgenden Abschnitt werden die Inbetriebnahme des MBL1660 und seine Konfiguration für den gewünschten Betrieb beschrieben. Die Inbetriebnahme und Konfiguration des DS1104 Controller Boards wird in Kapitel 7 beschrieben, da die zur Funktionalität benötigten Einstellungen rein softwareseitig erfolgen und Teil der Implementierung sind.

---

### **6.3.1 Prüfung der Funktionalität**

---

Zur Inbetriebnahme der Hardware wurde der MBL1660 zunächst nur mit der Versorgungsspannung und dem Host-PC verbunden. Für die Konfiguration des Controllers sowie zum Schreiben und Testen von Programmen für den Controller wurde das kostenfrei erhältliche Roborun+ Utility von Roboteq verwendet. Nach Installation des Utilities wurde der Controller vom Betriebssystem des Host-PCs sofort erkannt und das Laden der Controllerkonfiguration funktionierte problemlos. Mit dem Roborun+ Utility wurde eine erste auf den Schaltwalzenmotor angepasste Konfiguration des Controllers durchgeführt.

Im Anschluss wurden die Motorphasen an den Controller angeschlossen und geringe Spannungen mit Hilfe des Roborun+ Utilities gestellt. Dabei konnte mit Augenmerk auf den Rundlauf des Mo-

---

tors augenscheinlich und über die Visualisierungsfunktionen des Utilities die Möglichkeit eines Verkabelungsfehlers der Hall-Sensoren ausgeschlossen werden.

Das Stellen verschiedener Duty Cycle zeigte aufgrund des Motordatenblatts zu erwartende stationäre Drehzahlen.

---

### 6.3.2 Umsetzung einer Startup-Sequenz

---

Der BLDC-Controller sollte so konfiguriert werden, dass nach dem Starten zunächst ein Kalibrierungsvorgang stattfindet. Ziel des Kalibrierungsvorgangs ist das Speichern der zu der Anfangs- und Endposition der Schaltwalze gehörigen Positionen innerhalb des jeweiligen Teilgetriebes (gemessen in Hall Counts), das Übermitteln dieser Positionen an das DS1104 über die serielle Schnittstelle sowie das anschließende Anfahren der Mittelposition. Diese Funktionen wurden in einem Programm in der Skriptsprache des RoboteQ-Controllers implementiert. Der Quellcode des Skripts befindet sich in Anhang A.2 Im Folgenden soll die Funktionsweise des Programms kurz beschrieben werden.

Der Controller befindet sich in der Ausgangssituation im *Open-Loop-Mode*, in dem der Duty Cycle der Leistungsstufe direkt über Motorbefehle gestellt werden kann. Die Startposition wird in Form des aktuellen Wertes des Hall Counters gespeichert. Der Motor wird dann in positiver Drehrichtung mit einer definierten Spannung angefahren, bis ein zuvor durch Tests bestimmter Schwellwert des Motorstroms überschritten wird. Dies ist genau dann der Fall, wenn der Endanschlag des Teilgetriebes erreicht wird. Die Endposition wird gespeichert und die Richtung wird bei gleicher Stellspannung umgehend umgekehrt. Sollte innerhalb von zehn Sekunden der Endanschlag nicht erreicht werden, wird die Richtung umgekehrt und eine Fehlermeldung über die serielle Schnittstelle gemeldet. In negativer Drehrichtung ist das Vorgehen analog. Nach Erreichen der Endposition wird der Motor gestoppt und die Spanne der Positionen berechnet. Die Endpositionen sowie die Positionsspanne werden über die serielle Schnittstelle gesendet und die Mittelposition angefahren.

Der MBL1660 kann über das Roborun+ Utility so konfiguriert werden, dass der beschriebene Kalibrierungsvorgang automatisch bei jedem Start des Controllers ausgeführt wird. Das Skript kann leicht um eine Routine zur anschließenden Konfiguration des gewünschten Dauerbetriebsmodus ergänzt werden, sodass dem DS1104 dann die genaue Position der Schaltwalze sowie der minimale und maximale Drehwinkel vor Start der Positioniervorgänge bekannt sind.

---

## 7 Entwicklung einer Ansteuerungssoftware

---

Kapitel 7 der Arbeit beschreibt die softwareseitige Umsetzung der Ansteuerung sowie der Visualisierung und Aufzeichnung von Prozessgrößen. Abschnitt 7.1 gibt zunächst einen Überblick über das Zusammenspiel der dazu verwendeten Softwarekomponenten. In Abschnitt 7.2 wird der Aufbau des zur Ableitung des auf dem DS1104 lauffähigen Codes verwendeten Blockschaltbildes beschrieben. Abschließend wird auf die Visualisierung der Ergebnisse eingegangen (Abschnitt 7.3).

---

### 7.1 Überblick über die verwendete Software

---

Die Entwicklung von Software für das DS1104 und das Erstellen einer grafischen Benutzeroberfläche erfolgt über MATLAB/SIMULINK von The MathWorks und ControlDesk von dSpace.

Die zu MATLAB gehörige Software „Real-Time Workshop“ wandelt dabei zunächst die in SIMULINK erstellten Blockschaltbilder in C-Code um, welcher während des Build-Prozesses von einem Compiler für das DS1104 kompiliert wird. Zur Einbindung der Zielhardware in SIMULINK wird das in der dSpace-Software enthaltene „Real-Time Interface“ (RTI) verwendet. Bei RTI handelt es sich um ein SIMULINK -Blockset, welches neben dem direkten Einbeziehen von Ein- und Ausgängen des DS1104 als Sources oder Sinks im Blockschaltbild unter anderem auch die Konfiguration des RS-232 UART und den Umgang mit Interrupts ermöglicht. Wird der Build-Prozess aus SIMULINK heraus initialisiert, wird die kompilierte Software direkt im Anschluss auf der Zielhardware ausgeführt. [31]

Der Vorteil der automatischen C-Code Generierung aus den Blockschaltbildern gegenüber der händischen C-Programmierung liegt vor allem in der schnelleren Entwicklungszeit [32]. Ein Nachteil bestünde dann, wenn auf der Zielhardware mit restringiertem Programmspeicher zu rechnen wäre, da die automatische Code-Generierung zu Lasten eines schlanken Programmierstiles geht. Bei dem verwendeten DS1104 kann aufgrund des großen Speichers von 32 MB SDRAM und 6,5 MB Flash-Speicher nicht davon ausgegangen werden, dass dieser Nachteil zum Tragen kommt [33].

Zur Interaktion mit der laufenden Software und zum Zugriff auf die verwendeten Laufzeitvariablen dient die Experimentier- und Instrumentierungssoftware ControlDesk. In einer grafischen Benutzeroberfläche wird die Möglichkeit geboten, Projekte und Experimente zu verwalten sowie ein Layout aus Instrumenten wie Plottern, Schiebern, Drehknöpfen und verschiedenen anderen Anzeigeelementen, zu erstellen. Zur Aufzeichnung gemessener Werte steht eine Recorder-Funktion zur Verfügung.

---

## 7.2 Umsetzung in MATLAB/SIMULINK

---

Derzeit ist die auf dem DS1104 laufende Software in der Lage, das High Resolution Signal auszuwerten und die analoge Referenzspannung vorzugeben. Die Kommunikation zwischen MBL1660 und DS1104 über die serielle Schnittstelle ist bislang nicht implementiert, eine weitere Umsetzung ist aber möglich. Der Aufbau des Programms wird anhand des erstellten SIMULINK-Blockschaltbilds in den Abschnitten 7.2.1 und 7.2.2 erläutert.

---

### 7.2.1 Auslesen des HRS

---

Zum Auslesen des HRS werden nach Herstellerangabe das von der Sensorschaltung an das DS1104 übertragene PWM-Signal und ein Referenztakt benötigt, zu dessen Schlägen das Spannungsniveau der PWM ausgelesen wird. Die empfangenen High- bzw. Low-Pegel werden dann abgezählt und nach einem vorgegebenen Muster einem Winkel zugeordnet (vgl. Anhang A.3). Da auf diesen internen Takt des Sensor-IC kein Zugriff besteht, soll der Duty Cycle der PWM direkt einem entsprechenden Rotorwinkel zugeordnet werden. Die Slave-DSP-Einheit des DS1104 verfügt über die Möglichkeit, diesen auszulesen (vgl. [34]). Als prozentuale, einheitenlose Größe muss der Duty Cycle zur Visualisierung des Motordrehwinkels im Gradmaß zunächst mit Hilfe einer Formel umgerechnet werden. Dabei muss folgende Tatsache für die Dekodierung des Signals berücksichtigt werden: Da der Ausgang des Sensor-IC über einen elektronischen Schalter und einen Pull-Up-Widerstand mit der Versorgungsspannung und dem Eingang am dSpace Connector Panel verbunden ist, wird das Ausgangssignal des Sensor-IC invertiert. Jeder High-Pegel am Ausgang des IC entspricht demnach einem Low-Pegel am Eingang der Slave-DSP-Einheit und jeder Low-Pegel einem High-Pegel.

Damit ergeben sich folgende Rahmenbedingungen:

- i)  $0^\circ$  entsprechen 16 clocks *Low* und 367 clocks *High*, das entspricht einem Duty Cycle von 95,82 %
- ii)  $359^\circ$  entsprechen 375 clocks *Low* und 8 clocks *High*, das entspricht einem Duty Cycle von 2,09 %
- iii) Die dazwischenliegenden Winkel teilen sich in gleich große Intervalle und dürfen linear interpoliert werden. Die Steigung berechnet sich zu  $\frac{-360^\circ}{95,82\% - 2,09\%} = -3,84 \frac{^\circ}{\%}$
- iv) Zur Berechnung des  $\varphi$ -Achsenabschnittes wird vom Nulldurchgang der Geraden bei 95,82 % mit der errechneten Steigung zurückgerechnet. Für einen Duty Cycle von 0 % ergibt sich damit ein theoretischer Winkel von  $95,82\% \cdot 3,84 \frac{^\circ}{\%} = 367,95^\circ$

Die daraus abgeleitete Formel ergibt sich zu

$$\varphi = 367,95^\circ - 3,84 \frac{^\circ}{\%} \cdot \text{Duty Cycle} \quad (7.1)$$

Dabei ist  $\varphi$  der Motordrehwinkel im Gradmaß.

Im für die Code-Generierung verwendeten Blockschaltbild in SIMULINK wurde zur Einbindung der Hardware-Schnittstelle zunächst der entsprechende Block aus dem RTI-Blockset zum Blockschaltbild hinzugefügt. Eine weitere Konfiguration war nicht erforderlich. Der eingelesene Wert wurde mit einem Gain-Block skaliert und über einen Summationsblock, in den auch der Offset aus der Formel eingeht, in den Winkel nach Formel ( 7.1 ) umgerechnet. Der entsprechende Ausschnitt aus dem Blockschaltbild ist in Abbildung 7.1 dargestellt. Die auszuwertenden Größen wurden mit Scope-Blöcken verbunden, sodass in ControlDesk auf die Variablen zugegriffen werden kann.

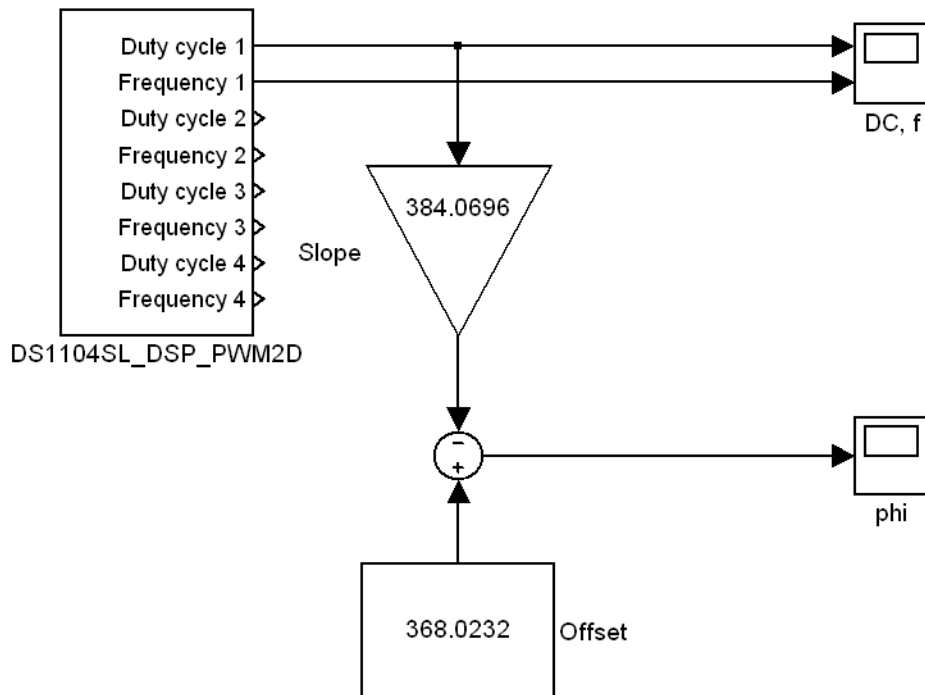


Abbildung 7.1: Blockschaltbild zur Bestimmung des Motordrehwinkels aus dem HRS Duty Cycle

### 7.2.2 Vorgabe der Referenzspannung

Die analoge Referenzspannung wird Millivolt genau vom Controller eingelesen und in einen ganzzahligen Wert zwischen  $-1000$  und  $+1000$  gewandelt, welcher als Anweisung für einen Stellwert oder als Feedback (zum Beispiel Positionsfeedback) genutzt werden kann. In der Wunschkonfiguration soll der Duty Cycle der Leistungselektronik gestellt werden: Bei  $12\text{ V}$  Nennspannung ergibt sich damit, dass die Motorspannung minimal in  $12\text{ mV}$  Inkrementen verändert werden kann. Das Auflösungsvermögen der D/A-Ausgänge des DS1104 ist im Datenblatt zu  $16\text{ bit}$  bei einem ausgebenen Spannungsbereich von  $20\text{ V}$  angegeben, die Ausgangsspannung teilt sich also in  $2^{16} = 65536$  darstellbare Teilbereiche. Die Referenzspannung kann damit theoretisch auf  $\frac{20\text{ V}}{65536} = 0,3\text{ mV}$  genau gestellt werden und beeinflusst wegen des Auflösungsvermögens des Controllers von  $1\text{ mV}$  die Gesamtauflösung nicht weiter negativ.

Die Werte zwischen  $-1$  und  $-1000$  bewirken bei Vorwärtsfahrt zunächst das Stellen eines Duty Cycle von  $0\%$  und ab einer gemessenen Drehzahl von  $0 \frac{U}{min}$  die Umkehr der Kommutationsreihenfolge (kein Plugging). Für das Stellen positiver Motorbefehle während der Rückwärtsfahrt gilt die Aussage analog. Da aufgrund äußerer Störeinflüsse nie eine ideale Gleichspannung am Eingang des Controllers anliegen kann, ist es möglich, einen Spannungsbereich um den zu  $0$  zugeordneten Wert ( $2,5\text{ V}$ ) festzulegen (Deadband, Totzone). Liegt die Eingangsspannung in diesem Bereich, wird der Wert bei der Umwandlung im BLDC-Controller als  $0$  interpretiert. Eine Schwankung in diesem Bereich führt damit nicht zu einer Motoranweisung.

Da bislang in SIMULINK der Motorstrom und die vom Controller berechnete Drehzahl noch nicht zur Verfügung stehen, soll zum Test der analogen Sollwertvorgabe zunächst die Möglichkeit geboten werden, über einen Schieber in ControlDesk den Duty Cycle zu steuern.

Abbildung 7.2 zeigt die Realisierung der Sollwertvorgabe im SIMULINK-Blockschaltbild. Oben rechts im Bild ist der in RTI enthaltene Block zur Einbindung eines Digital/Analog-Kanals des DS1104. Der Spannungsbereich der Analogausgänge des DS1104 reicht von  $-10\text{ V}$  bis  $+10\text{ V}$ . Diesen Ausgangsspannungen sind am Eingang des Blocks Werte zwischen  $-1$  und  $+1$  zugeordnet. Da für den MBL1660 an den Analogeingängen Spannungen zwischen  $0\text{ V}$  und  $5\text{ V}$  zulässig sind, wird die zum Eingang des D/A-Kanal-Blocks führende Größe über einen Saturation Block auf Werte zwischen  $0$  und  $0,5$  begrenzt. Die Konstante „Initial Value“ initialisiert eine Variable zur Laufzeit auf dem Prozessor des DS1104. Diese Variable kann mit einem Schieber in ControlDesk verstellt werden. Der der Konstanten zugewiesene Wert wird der Variable auf dem DS1104 bei der Initialisierung zugewiesen und kann als Anfangswert betrachtet werden. In SIMULINK wird daher ein Wert von  $0,25$  eingestellt, um die Referenzspannung zunächst im Bereich der am BLDC-Controller zugewiesenen Totzone zu halten. Das Scope „Reference Voltage“ dient dazu, den Wert vor Eingang in den D/A-Wandler zu überwachen und der aufgenommene Wert kann mit der tatsächlich am MBL1660 gemessenen Spannung verglichen werden.

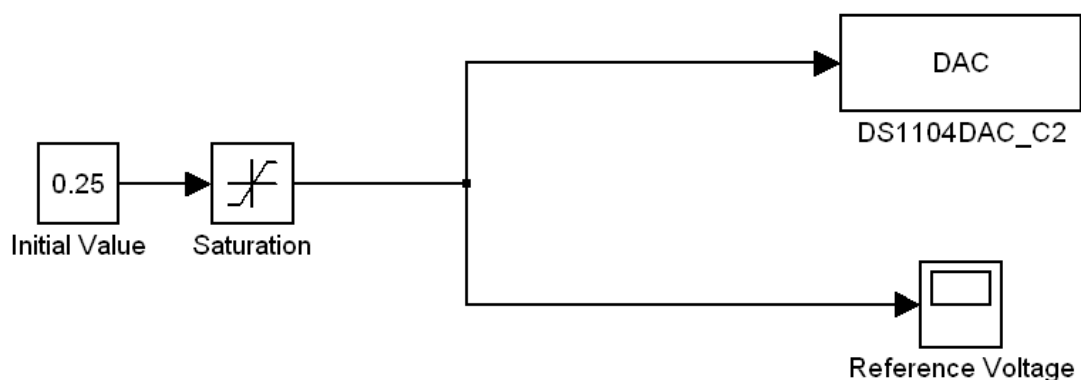


Abbildung 7.2: Blockschaltbild zur Vorgabe der Referenzspannung über einen Schieber in ControlDesk

### 7.3 Visualisierung und Aufzeichnung der Ergebnisse

Zur Visualisierung des aus dem HRS errechneten Motordrehwinkels wurde das in ControlDesk zur Verfügung stehende Instrument „Plotter“ gewählt. Die Y-Achsenkalierung wird dabei von ControlDesk dynamisch entsprechend der Minima und Maxima eingelesener Werte während des Beobachtungszeitraums angepasst.

Abbildung 7.3 zeigt das ausgewertete High Resolution Signal bei Motorstillstand. Auf der Y-Achse ist der errechnete Motordrehwinkel im Gradmaß abgetragen, auf der X-Achse die Zeit in Sekunden. Die Differenz zwischen den maximal und minimal aufgezeichneten Werten liegt im Bereich um  $0,1^\circ$ . Die Entscheidung das HRS über die in Abschnitt 7.2.1 hergeleitete Formel auf Grundlage des Duty Cycle zu berechnen, anstatt zeitdiskret Pegelstände abzuzählen, wie im Sensordatenblatt angegeben, ist daher als taugliches Vorgehen einzustufen.

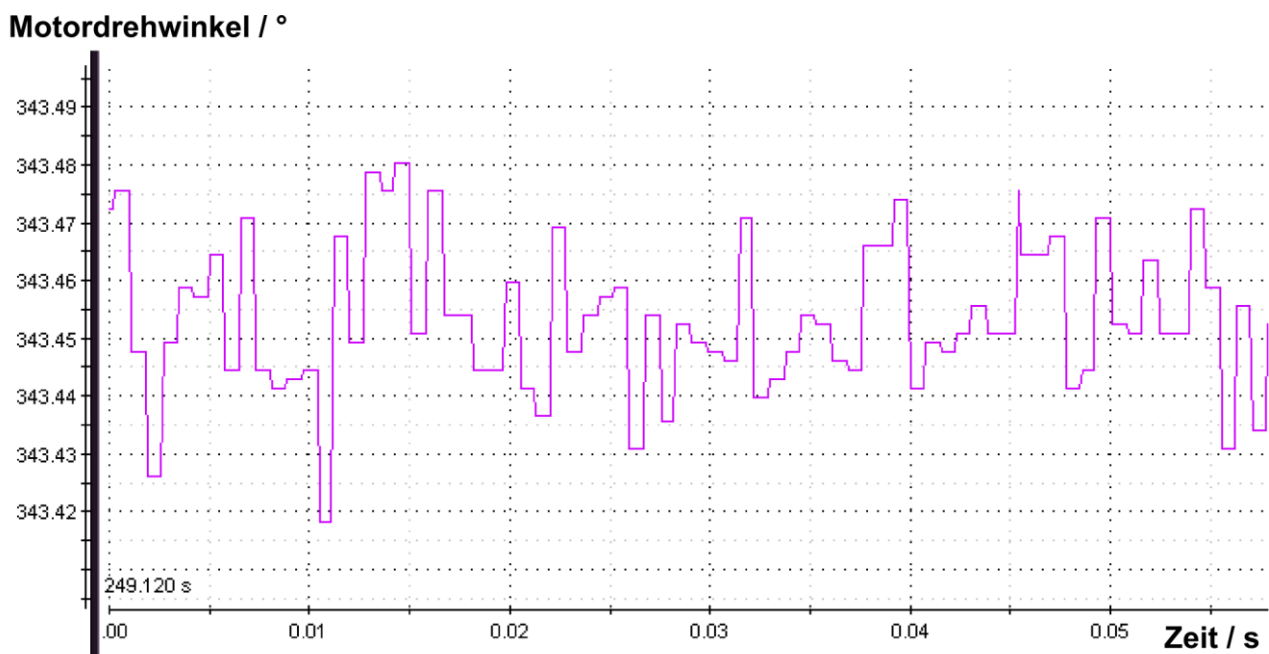


Abbildung 7.3: Dekodiertes High Resolution Signal bei Motorstillstand

Vor allem für die in die vorgesehene Regelung eingehende Ist-Größe der Drehzahl festigt das Ergebnis die Implikation, diese aus ersten Differenzen des errechneten Winkels abzuleiten. Dafür sprechen mehrere Gründe:

- i) Das Senden der vom MBL1660 berechneten Drehzahl an das DS1104 wird überflüssig. Stattdessen können im dadurch frei werdenden Übertragungszeitraum andere Parameter über die serielle Schnittstelle abgefragt werden oder zum Beispiel der Strom häufiger abgetastet werden, wodurch die Regelung schneller und präziser gestaltet werden kann.
- ii) Der MBL1660 berechnet die Drehzahl aufgrund der zwischen zwei Hall Counts gemessenen Zeit. Bei kleiner werdender Drehzahl und damit größer werdendem zeitlichen

---

Abstand zwischen den Hall Counts stehen auch die errechneten Werte in immer größeren Abständen zur Verfügung. Für die Positionierungsvorgänge der Schaltwalze sind aber für die Regelung gerade während des Verzögerns kurz vor Erreichen der Zielposition exakte Werte bei hoher Abtastrate wünschenswert. Die Frequenz der zur Verfügung stehenden Werte des HRS ist dagegen unabhängig von der Drehzahl und nahezu konstant – im Normalbetrieb stehen mehr als 1280 Werte pro Sekunde zur Verfügung (vom DS1104 während des Betriebs gemessener Wert für die Frequenz des HRS).

- iii) Sowohl bei der Berechnung der Geschwindigkeit auf Grundlage der Hall Counts als auch bei der Berechnung auf Grundlage der aus dem HRS gewonnenen Informationen wird die Winkeldifferenz während eines bestimmten Zeitraums gebildet. Der dabei gemachte Fehler entspricht jeweils maximal der doppelten Auflösung der Sensoren geteilt durch den zugrunde gelegten Zeitraum. Bei gleicher Abtastrate stehen also unter Verwendung des HRS genauere Werte zur Verfügung bzw. bei gleicher Genauigkeit ist eine höhere Abtastrate möglich.



---

## 8 Test der Ansteuerungssoftware

---

Im folgenden Kapitel werden die mit dem Ansteuerungssystem durchgeführten Tests und deren Ergebnisse beschrieben. In Abschnitt 8.1 wird dazu zunächst erläutert, zu welchem Zweck die Tests durchgeführt wurden, wie der Testablauf war und welche Rahmenbedingungen während der Tests gültig waren. Abschnitt 8.2 beschreibt die Ergebnisse der Tests und aus den Ergebnissen gezogene Schlüsse.

---

### 8.1 Erklärungen zu den durchgeführten Tests

---

Da die Regelung der Positioniervorgänge zum gegenwärtigen Zeitpunkt wegen der fehlenden Implementierung der Kommunikation über die serielle Schnittstelle noch nicht möglich ist, wurden die Teilgetriebe zunächst mit verschiedenen, während der Fahrt konstanten Stellspannungen, durchfahren, um Aufschlüsse über die tatsächliche Eignung des Controllers zu erhalten und um erste Referenzwerte zum Abgleich mit den Ergebnissen der am Institut durchgeführten Simulationen aufzeichnen zu können.

Zur Umsetzung der Tests wurde das in Abschnitt 6.3.2 beschriebene Skript modifiziert und erweitert. Im modifizierten Skript findet der Anfahrvorgang mit der Änderung statt, dass die rückwärtige Endposition als Ausgangsstellung für das Durchfahren des Teilgetriebes genutzt wird. Der jeweilige Duty Cycle wird gestellt und 100 Hall Counts vor dem Erreichen des Endanschlags abrupt null gesetzt, um der Trägheit der Strecke Rechnung zu tragen und eine mechanische oder durch hohe Ströme bedingte Beschädigung des Motors zu verhindern. Nach Erreichen des Motorstillstands wird das Getriebe in gleicher Weise in der entgegengesetzten Richtung durchfahren.

Aufgezeichnet werden sollten der Verlauf des Motorstroms, der Klemmenspannung am Akkumulator, des Hall Count und der Drehzahl. Die Aufzeichnung sämtlicher Werte sollte hierbei im gleichen Testlauf erfolgen. Zunächst wurden für jede der Größen separat Tests mit einer Abtastfrequenz von 1000 Hz durchgeführt. Der Ist-Wert der betrachteten Größe wurde dazu jede Millisekunde über die serielle Schnittstelle an den Host-PC übertragen. Dabei hat sich gezeigt, dass die Klemmenspannung am Akkumulator keinen nennenswerten Schwankungen während der Getriebedurchfahrt unterliegt, weshalb zugunsten einer höheren Abtastrate der übrigen Größen auf eine Aufzeichnung der Spannung verzichtet wurde. Um einen Zeitstempel realisieren zu können, wurde eine Abfragelatenz von 1 ms nach jeder Ausgabe eines der übrigen Werte vorgesehen. Jede Größe wurde damit mit 333 Hz abgetastet.

Die Akkumulator-Leerlaufspannung während der Tests betrug 12,7 V.

## 8.2 Durchfahren der Teilgetriebe mit konstantem Duty Cycle

Abbildung 8.1 zeigt die Ergebnisse der Durchfahrt des Teilgetriebes, dem der obere Schaltwalzenmotor am Getriebe angehört.

Die grüne Kurve zeigt den Verlauf der Drehzahl. Man erkennt, dass die im Motordatenblatt angegebene Leerlaufdrehzahl (im Diagramm hellblau eingezeichnet) annähernd erreicht wird. Nach dem Anfahrvorgang liegt die Drehzahl im Mittel leicht unter der Leerlaufdrehzahl. Als möglicher Grund hierfür sind Reibungs- und Dämpfungseinflüsse in der mechanischen Strecke zu sehen.

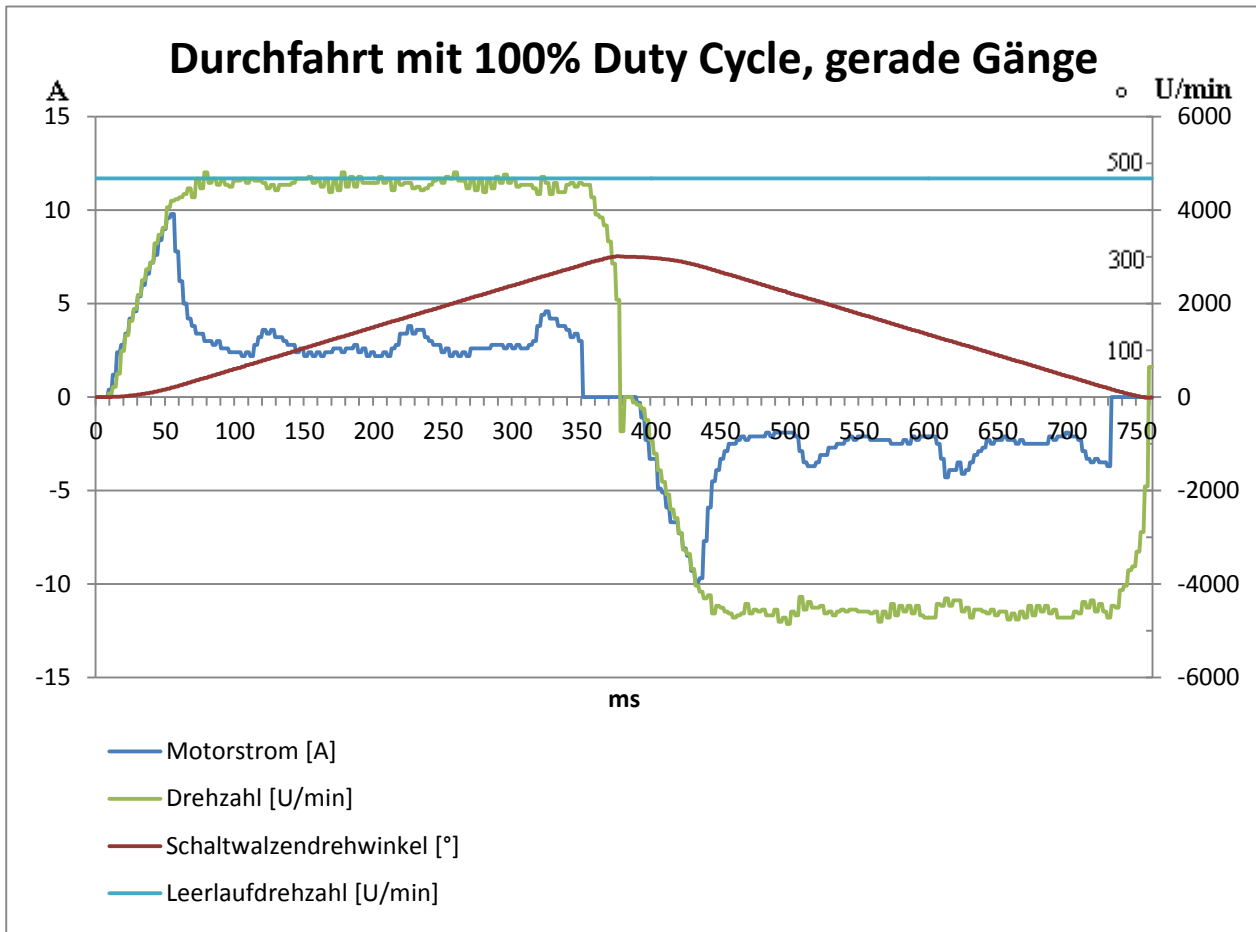


Abbildung 8.1: Durchfahrt Teilgetriebe 1

Auf Basis der Spanne der aufgezeichneten Hall Counts wurde für das Teilgetriebe ein maximaler Schaltwalzendrehwinkel von  $301,27^\circ$  ermittelt. Gemäß der vom Getriebehersteller erhaltenen Informationen konnte das Teilgetriebe damit als das die geradzahligen Gänge tragende Teilgetriebe identifiziert werden. Die den einzelnen Gängen zugeordneten Drehwinkel und die Winkelbereiche, in denen Stromspitzen auftreten, stimmen, wie der Vergleich zeigte, überein.

Am Drehzahlverlauf ist deutlich zu erkennen, dass die Schaltwalze bei Erreichen des Endanschlags gegen diesen stößt und kurzzeitig Verzerrungen auftreten, obwohl bereits, wie in Abschnitt 8.1 be-

schrieben, 100 Hall Counts (also einem Schaltwalzendrehwinkel von  $24,21^\circ$ ) vor Erreichen des Endanschlags die Stellspannung auf 0 V reduziert wurde.

Der Verlauf des Motorstroms (dunkelblau in der Grafik) weist einen maximalen Absolutwert von  $\sim 10$  A auf, was deutlich unter dem im Datenblatt geforderten Werten liegt. Ströme im Bereich um 60 A konnten nur reproduziert werden, wenn die Schaltwalze ohne Verminderung der Stellspannung gegen den Endanschlag gefahren wurde.

Abbildung 8.2 zeigt analog die mit dem gleichen Skript erstellten Verläufe für das andere Teilgetriebe. Der maximale Schaltwalzendrehwinkel lag hier bei  $201,9^\circ$ . Auffällig sind die im Vergleich zum oberen Teilgetriebe höheren Stromspitzen im Bereich der Gänge.

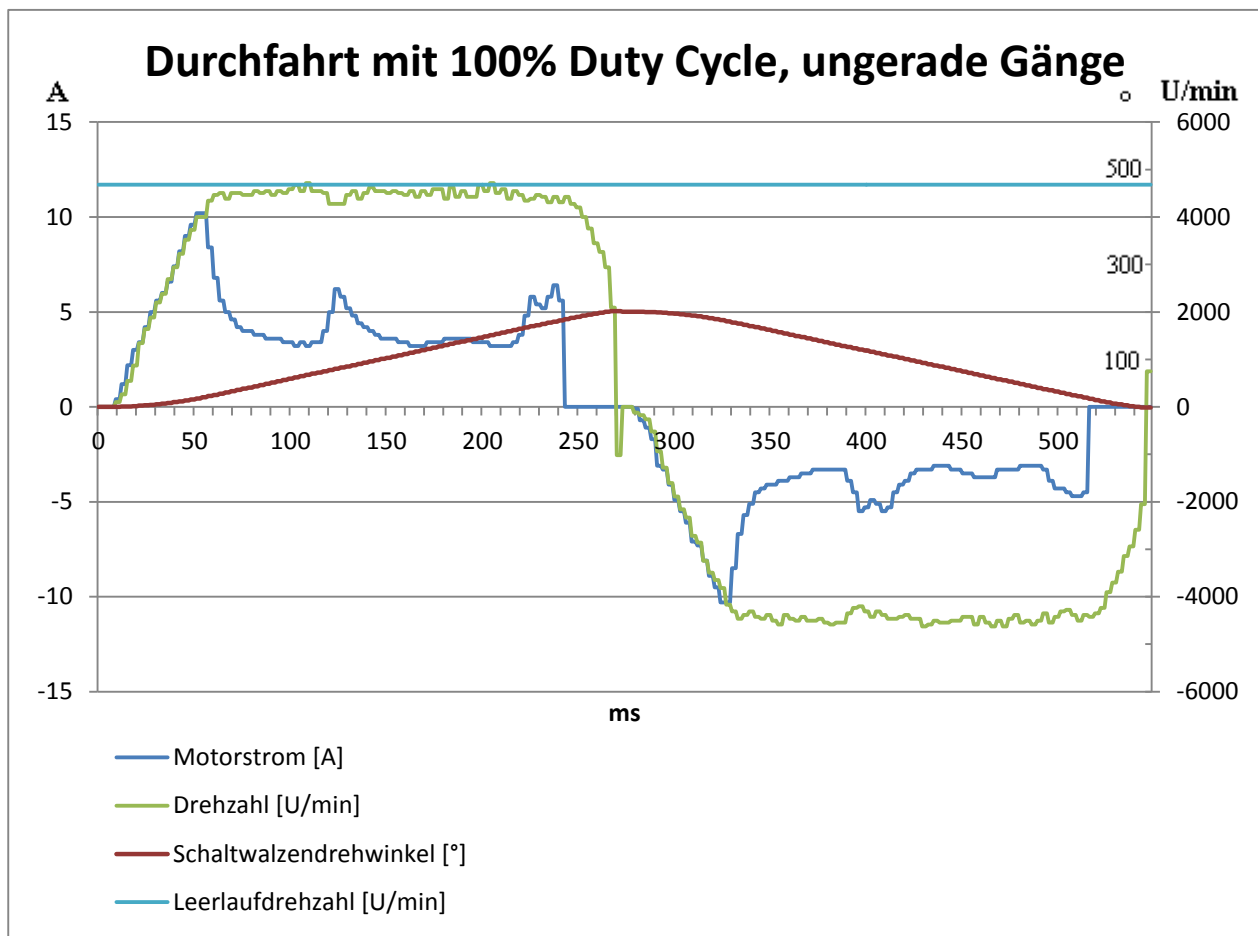


Abbildung 8.2: Durchfahrt Teilgetriebe 2

---

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

---

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Konzept zur Ansteuerung der Schaltaktorik eines Doppelkupplungsgetriebes entwickelt, die passende Hardware ausgewählt, beschafft und in Betrieb genommen sowie anschließend die Möglichkeit der Entwicklung von Software zu Regelungszwecken in MATLAB/SIMULINK geschaffen.

Es wurde zunächst ein Pflichtenheft abgeleitet, auf dessen Grundlage eine Auswahl potentiell geeigneter BLDC-Controller recherchiert wurde. Eine Kombination aus einem BLDC-Controller von RoboteQ Inc. und einem R&D Controller Board der dSpace GmbH wurde ausgewählt. Die Übermittlung verschiedener Ist-Größen über die RS-232-Schnittstelle zum Controller Board konnte im Bearbeitungszeitraum nicht realisiert werden, weshalb das System zu Testzwecken von einem in den Flash-Speicher des BLDC-Controller geladenen Skript gesteuert wurde. Die Vorgabe der Stellspannung für den BLDC-Motor ist über eine softwareseitig stellbare Referenzspannung möglich, welche den Duty Cycle der Leistungsstufe linear beeinflusst. Das Signal des verbauten magnetischen Hochgeschwindigkeits-Drehwinkelgebers konnte mit guter Genauigkeit ausgewertet werden.

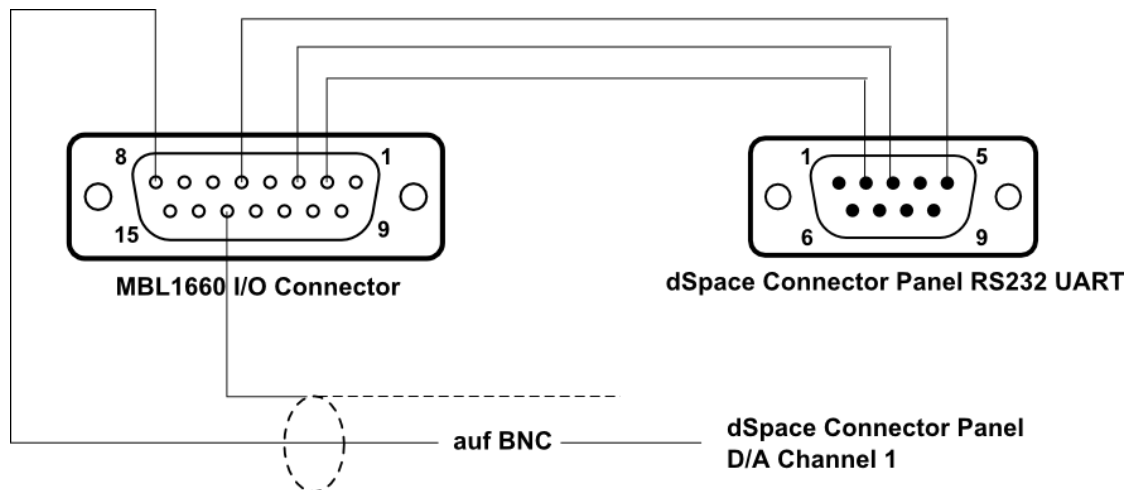
Die bei den Tests aufgezeichneten Geschwindigkeitsverläufe decken sich mit den zeitlichen Angaben des Getriebeherstellers bezüglich der Schaltvorgänge, weshalb grundsätzlich für die in der Problemstellung (Kapitel 2) geschilderten Versuche auf das System aufgebaut werden kann. Wie in Abschnitt 7.3 erläutert wurde, sprechen mehrere Gründe dafür, abweichend von der ursprünglichen Konzeption, die Ist-Drehzahl aus dem ausgewerteten High Resolution Signal abzuleiten. Um Vergleichswerte für die mit der dann verwendeten Reglerstruktur durchgeführten Tests zu erhalten, bietet es sich an, den aus dem HRS entschlüsselten Winkel in ein vom BLDC-Controller unterstütztes Format zu wandeln und diesem als Feedback-Größe zur Verfügung zu stellen. Dadurch kann der Funktionsumfang des BLDC-Controllers weitgehend ausgeschöpft werden.

Eine weitere Verbesserungsmaßnahme könnte darin bestehen, die Ströme in den einzelnen Phasen über Shunt-Widerstände zu messen. Der Spannungsabfall könnte verstärkt und von den 12 bit A/D-Eingängen des DS1104 eingelesen und in einen Strom umgerechnet werden. So könnte wegen der höheren möglichen Abtastfrequenzen durch das DS1104 zum einen überprüft werden, ob etwaige Stromspitzen möglicherweise vom BLDC-Controller nicht erfasst werden konnten und zum anderen, ob die vom Controller aus dem Batteriestrom berechneten Werte für den Motorstrom den tatsächlich an den Phasen messbaren Werten entsprechen. Die dem DS1104 zusätzlich zur Verfügung stehenden Informationen müssten nicht mehr über die serielle Schnittstelle abgefragt werden und würden eine schnellere Regelung erlauben.

Bis zur vollen Einsatzbereitschaft des DS1104 zu Regelungszwecken muss die Kommunikation über die RS-232-Schnittstelle noch implementiert werden. Stehen die darüber erhaltenen Eingangsgrößen zur Verfügung, kann weiter auf das bereits erstellte Blockschaltbild aufgebaut werden.

# Anhang A: Dokumentation

## A.1 Pin-Belegungen



**Hinweis:** Die Darstellung zeigt jeweils die Frontansicht des Geräteanschlusses!

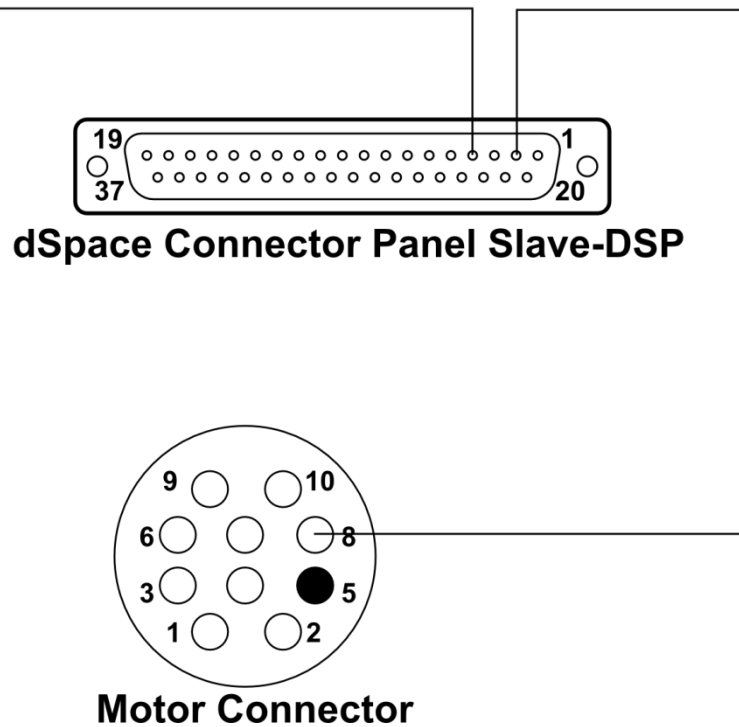
Pin	Verwendung
2	RS232Tx
3	RS232Rx
5	GND (RS232)
8	Analogeingang Referenzspannung
13	GND (Referenzspannung)

Tabelle A.1: Pin-Belegung MBL1660 I/O Connector

Pin	Verwendung
2	RS232Rx
3	RS232Tx
5	GND (RS232)

Tabelle A.2: Pin-Belegung DS1104 CLP UART

zu MBL1660 Sensoranschluss GND



**Hinweis:** Die Darstellung zeigt jeweils die Frontansicht des Geräteanschlusses!

Pin	Verwendung
2	HRS Eingang
4	GND

Tabelle A.3: Pin-Belegung DS1104 CLP Slave-DSP

Pin	Verwendung
1	Phase U
2	Phase V
3	Phase W
4	GND
5	Nicht gepinnt
6	5 V Versorgungsspannung
7	Hall 1
8	HRS Ausgang
9	Hall 2
10	Hall 3

Tabelle A.4: Pin-Belegung Motor Connector

---

## A.2 Quellcode

---

Eine Referenz für den Aufbau der Skriptprache sowie die zur Verfügung stehenden Befehle bieten [30] und [35].

---

### Kalibrierung

---

```
1 top:
2   'Initialisierungsphase
3   ' Kalibrieren des Motors
4   '   HINWEIS: Konfiguration im Open-Loop Modus mit steiler Beschleunigungsrampe
5   '       - der Motor soll langsam bis zum Anschlag drehen. Steigt der Strom
6   '       über einen festgesetzten Schwellenwert wird der Motorbefehl zur
7   '       Richtungsumkehr gegeben und der Hall Count gespeichert
8   '       - anschließend analoges Vorgehen für die andere Drehrichtung und anfahren
9   '       der Mittelposition zwischen den gespeicherten Endwerten.
10
11
12   ' ACHTUNG, MOTORKONFIGURATION MUSS VOR BEGINN DES VORGANGS ÜBERPRÜFT WERDEN!
13
14   ' Deaktivieren des Watchdog timers
15   SetConfig(_RWD, 0)
16
17
18   ' Vorwärts einfahren
19
20   '   Nullsetzen des Relativzählers
21   position = GetValue(_BLRCNTR)
22   '   Ausgabe verschiedener Werte
23   Print("\nAktuelle Position (absolut): ")
24   Print(GetValue(_BLCNTR))
25   Print("\nAktuelle Position (relativ): ")
26   Print(GetValue(_BLRCNTR))
27   Print("\n")
28
29   '   Setzen von Boole'schen Variablen zur Vermeidung von Fehlerfällen
30   dim zulaessigV as Boolean
31   dim zulaessigR as Boolean
32   zulaessigV = TRUE
33   zulaessigR = FALSE
34
35   maxAbsStrom = 180          ' Schwellenwert des Stroms in 1/10-Ampere
36   SetCommand(_G, 300)       ' Stellen von 30% Duty Cycle
37   i = 0                     ' Initialisierung einer Zählvariable
```

```

38 while zulaessigV
39
40     if i < 10000 then      ' die Zulässigkeitsprüfung in Zeile 38 i.V.m. dem wait-
41                           ' Befehl aus Zeile 56 und der if-Abfrage ermöglichen
42                           ' faktisch eine Timer-gesteuerte Stromprüfung
43     motorStrom = GetValue(_MOTAMPS)
44     if maxAbsStrom <= motorStrom then
45         endPositionV = GetValue(_BLRCNTR)      ' Speichern der Endposition und
46         endPositionVabs = GetValue(_BLCNTR)    ' Richtungsumkehr wenn der Schwell-
47         SetCommand(_G, -300)                  ' wert getriggert wird
48         zulaessigV = FALSE
49         zulaessigR = TRUE
50     end if
51     i ++
52     Print(GetValue(_MOTAMPS)) ' Ausgabe von Strom und Hall Count zu
53     Print("\n")              ' Dokumentationszwecken
54     Print(GetValue(_BLCNTR))
55     Print("\n")
56     wait(1)
57 else      ' Fehlerfallbehandlung (Zeitüberschreitung des Vorgangs)
58     SetCommand(_G, -300)
59     zulaessigV = FALSE
60     zulaessigR = TRUE
61     endPositionV = GetValue(_BLRCNTR)
62     endPositionVabs = GetValue(_BLCNTR)
63     Print("Endposition Vorwaerts wurde nicht erreicht!\n")
64 end if
65
66 end while
67     wait(50) ' Wartezeit soll das versehentliche triggern der Schwellenspannung
68     i = 0    ' während des Anfahrvorgangs verhindern
69
70
71 ' Zur Vorwärtsfahrt analoger Code für die andere Drehrichtung
72 while zulaessigR
73
74     if i < 10000 then
75         motorstrom = GetValue(_MOTAMPS)
76         motorStromInv = (-1)*motorstrom
77         if maxAbsStrom <= (-motorStrom) then
78             endPositionRelativ = GetValue(_BLRCNTR)
79             SetCommand(_G, 0)
80             endPositionR = endPositionV + endPositionRelativ
81             endPositionRabs = GetValue(_BLCNTR)
82             zulaessigR = FALSE
83         end if

```



```

84         i ++
85         Print (GetValue (_MOTAMPS))
86         Print ("\n")
87         Print (GetValue (_BLCNTR))
88         Print ("\n")
89         wait(1)
90     else
91         SetCommand(_G, 0)
92         zulaessigR = FALSE
93         Print("Endposition Rueckwaerts wurde nicht erreicht!\n")
94         endPositionRrelativ = GetValue(_BLRCNTR)
95         endPositionRabs = GetValue(_BLCNTR)
96         ' relative Positionen beziehen sich auf den zuletzt ausgelesenen Hall Count,
97         ' daher muss zur rückwärtigen Endposition die Endposition Vorwärts addiert
98         ' werden
99         endPositionR = endPositionV + endPositionRrelativ
100     end if
101 end while
102
103 ' Stoppen des Motors falls aufgrund eines Fehlerfalls noch nicht geschehen
104 SetCommand(_G, 0)
105
106 ' Senden der ermittelten Informationen über die serielle Schnittstelle
107 Print("Endposition Vorwaerts (relativ): ")
108 Print(endPositionV)
109 Print("\nEndposition Vorwaerts (absolut): ")
110 Print(endPositionVabs)
111 Print("\nEndposition Rueckwaerts (relativ): ")
112 Print(endPositionR)
113 Print("\nEndposition Rueckwaerts (absolut): ")
114 Print(endPositionRabs)
115 positionsSpanne = endPositionV - endPositionR
116 Print("\nSpanne der Positionen: ")
117 Print(positionsSpanne)
118 Print("\n")
119
120 'Mitte anfahren
121 aktuellePosition = GetValue(_BLCNTR)
122 startPosition = GetValue(_BLCNTR)
123 zielPosition = startPosition + (positionsSpanne/2)
124
125 while aktuellePosition < zielPosition
126     SetCommand(_G, 300)
127     aktuellePosition = GetValue(_BLCNTR)
128     Print(GetValue(_MOTAMPS))
129     Print("\n")

```

---

```
130     Print(GetValue(_BLCNTR))
131     Print("\n")
132     wait(1)
133 end while
134 ' Stoppen des Motors und Ausgabe der tatsächlichen Position
135 SetCommand(_G, 0)
136 Print("\nEndposition: ")
137 Print(aktuellePosition)
138
139 Print("\nEinfahrtvorgang beendet!\n")
140 SetConfig(_RWD, 1000) 'Watchdog-Timer aus Sicherheitsgründen wieder auf 1 s
141
142
143 Terminate
```

### A.3 Informationen zum magnetischen Hochgeschwindigkeits-Drehgeber

Bei dem verbauten magnetischen Hochgeschwindigkeits-Drehwinkelgeber handelt es sich um einen Drehgeber mit einer Auflösung von  $\delta_{HRS} = \frac{360^\circ}{8,5 \text{ bit}} \approx 1^\circ$  (vgl. [36]). Gepaart mit der Übersetzung der Getriebestufen von  $i = 61,44$  kann er damit den Schaltwalzenwinkel auf  $\frac{\delta}{i} = \frac{1^\circ}{61,44} = 0,016^\circ$  genau auflösen. Aufgrund der hohen Genauigkeit wird sein Ausgangssignal als High Resolution Signal (HRS) bezeichnet. Demgegenüber steht eine theoretische Auflösung der Positionsermittlung durch Zählen der von den Hall-Sensoren eingenommenen Zustände (Hall Transitions oder Hall Counts) von  $\delta_{Hall} = \frac{360^\circ}{6 \cdot p} = \frac{360^\circ}{6 \cdot 4} = 15^\circ$  und somit ein auflösbarer Schaltwalzenwinkel von  $\frac{\delta}{i} = \frac{15^\circ}{61,44} = 0,244^\circ$ . Ausgangssignal des Drehwinkelgebers ist ein PWM-Signal, dessen Pegel zu jedem Takt eines Timers (Clock) ausgelesen wird. Abbildung A.1 zeigt das Schema, nach dem die ausgelesenen Werte in einen Winkel umgerechnet werden können:

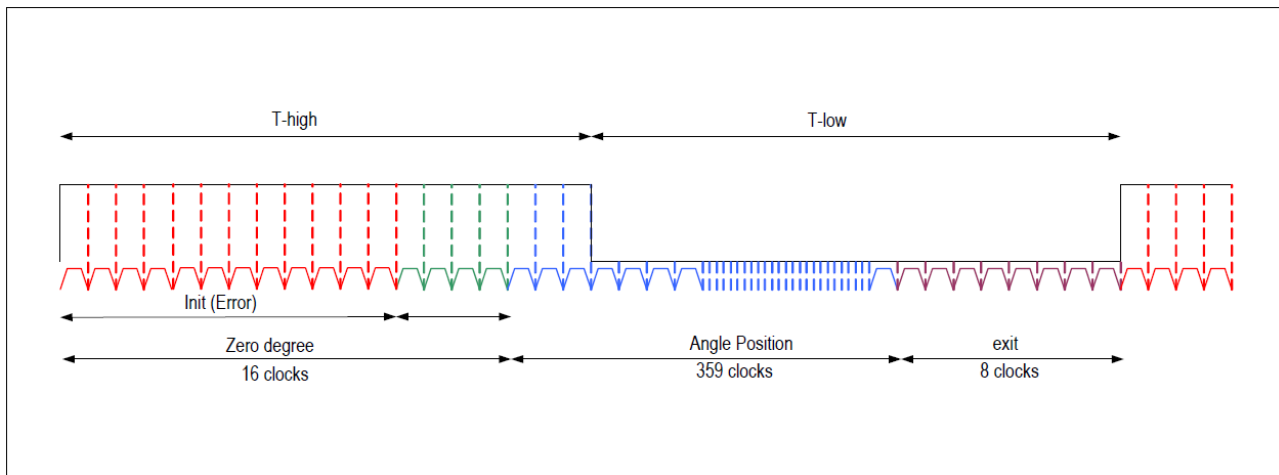


Abbildung A.1: Prinzipdarstellung des Signals am HRS-Ausgang des Sensor-IC [36]

Jede Periode beginnt mit einer Initiationsphase von 16 Clocks, in denen der High-Pegel ausgegeben wird. Anschließend folgen 359 Clocks, welche die Winkelinformation beinhalten: Jede weitere Clock auf dem Low-Pegel entspricht einem zusätzlichen Grad des Rotorlagewinkels. Die Periode endet mit einer Terminationsphase von 8 Clocks auf dem Low-Pegel.

In Tabelle A.5 ist die Kodierung verschiedener Rotorlagewinkel im HRS zur Veranschaulichung in übersichtlicher Form aufbereitet.

Winkel	Initiation	Winkelangabe	Termination
0°	16 clocks <i>High</i>	0 clocks <i>High</i> , 359 clocks <i>Low</i>	8 clocks <i>Low</i>
120°	16 clocks <i>High</i>	120 clocks <i>High</i> , 239 clocks <i>Low</i>	8 clocks <i>Low</i>
359°	16 clocks <i>High</i>	359 clocks <i>High</i> , 0 clocks <i>Low</i>	8 clocks <i>Low</i>

Tabelle A.5: Kodierung verschiedener Winkel im HRS

## A.4 Stückliste der verwendeten Bauteile

Bezeichnung	Anzahl	Eigenschaft
Kippschalter	1 Stk.	$> 13\text{ V DC}$ , $> 1\text{ A}$ (siehe Abbildung A.2)
Diode	1 Stk.	$> 60\text{ A}$ , $> 20\text{ V}$ Sperrspannung
Kfz-Flachsicherungshalter	1 Stk.	$> 60\text{ A}$
Kfz Flachsicherung	1 Stk.	$30\text{ A}$
Feinsicherungshalter	1 Stk.	-
Feinsicherung	1 Stk.	$1\text{ A}$

Tabelle A.5: Stückliste

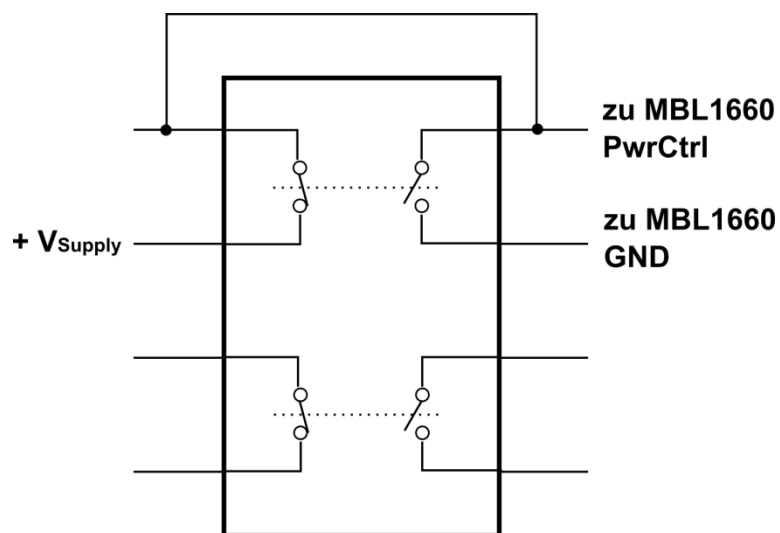


Abbildung A.2: Elektrisches Ersatzschaltbild Kippschalter mit äußerer Beschaltung

---

## **Anhang B: Pflichtenheft BLDC-Controller**

---





---

## Literaturverzeichnis

---

- [1] R. Nordmann und H. Birkhofer, *Maschinenelemente und Mechatronik*. Aachen: Shaker, 2003.
- [2] E. DeVincent, U. C. Blessing und L. Herdle, "Leichtes Frontquer-Doppelkupplungsgetriebe mit hoher Effizienz," *ATZ*, vol. 115, no. 12, pp. 944–949, Dezember 2013.
- [3] H. Naunheimer, B. Bertsche, G. Lechner, J. Ryborz und W. Novak, *Fahrzeuggetriebe Grundlagen, Auswahl, Auslegung und Konstruktion*. Berlin: Springer, 2007.
- [4] R. Fischer, G. Jürgens, F. Küçükay, R. Najork und B. Pollak, *Das Getriebebuch*. Vienna: Springer, 2012.
- [5] S. Kapp, R. Schaarschmidt, G. Burgardt und O. Eppler, "Aktuatoranordnung mit Schaltwalzen für ein Doppelkupplungsgetriebe," EP 1 817 515 B1.
- [6] "Gear selection motor.," *www.smartz.co.uk*. [Online]. URL: <http://www.smartz.co.uk/showthread.php?15649-Gear-selection-motor./page3>. [Abgerufen am: 07. Februar 2014].
- [7] L. G. Cravero und D. Oesingmann, "Entwurf, Auslegung und Betriebsverhalten von dauermagnetenerregten bürstenlosen Motoren kleiner Leistung," ISLE, Ilmenau, 2006.
- [8] H. Hembach, "Systematischer Vergleich von BLDC-Motorkonzepten mit Anwendung auf nass laufende Wasserpumpen kleiner Leistung," Shaker, Aachen, 2007.
- [9] A. Binder, *Elektrische Maschinen und Antriebe: Grundlagen, Betriebsverhalten*. Berlin: Springer, 2012.
- [10] J. Meins, *Elektromechanik*. Stuttgart: Teubner, 1997.
- [11] Atmel Corporation, "AVR493: Sensorless Commutation of Brushless DC Motor (BLDC) using AT90PWM3 and ATAVRMC100." Application Note 7658B–AVR–12/06.
- [12] Roboteq, Inc, "Managing regeneration in RoboteQ controllers." 14. Juni 2007.
- [13] J. Richter, "Systemmodellierung eines bürstenlosen Gleichstrommotors mit Drehzahlregelung." 15. Juli 2009.
- [14] G.-J. Su und J. W. McKeever, "Low-cost sensorless control of brushless DC motors with improved speed range," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, no. 2, pp. 296–302, März 2004.
- [15] H. Frohne, F. Moeller, K. H. Löcherer, H. Müller, T. Harriehausen und D. Schwarzenau, *Moeller, Grundlagen der Elektrotechnik: mit 36 Tabellen und 182 Beispielen*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011.
- [16] U. Brinkschulte und T. Ungerer, *Mikrocontroller und Mikroprozessoren*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010.
- [17] D. Hristu-Varsakelis und W. S. Levine, *Handbook of networked and embedded control systems*. Boston: Birkhäuser, 2005.
- [18] D. Schröder, *Elektrische Antriebe - Regelung von Antriebssystemen*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009.
- [19] Freescale Semiconductor, Inc., "BLDC Motor Control with Hall Effect Sensors Using the 9S08MP." April 2010.



- 
- [20] M. Rakesh und P. Narasimham, "Different Braking Techniques Employed to a Brushless DC Motor Drive used in Locomotives," *IEEJ*, vol. 3, pp. 784–790, 2013.
- [21] Roboteq, Inc, "Controlled Regenerative Braking using Real Time Speed Sensing | Roboteq," *www.roboteq.com*. [Online]. URL: <http://www.roboteq.com/index.php/applications/how-to/156-controlled-regen-braking>. [Abgerufen am: 15. Februar 2014].
- [22] NXP Semiconductors, "Brushless DC motor control using the LPC2141." 17. Oktober 2007.
- [23] M. Michel, *Leistungselektronik Einführung in Schaltungen und deren Verhalten*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011.
- [24] M. Auer und S. Krug, "Gesamtfahrzeugsimulation eines batterieelektrischen Fahrzeugs," Universität Stuttgart, im Auftrag des Ministeriums für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg, Stuttgart, September 2012.
- [25] dSpace GmbH, "DS1104 R&D Controller Board, Hardware Installation and Configuration." Juni 2009.
- [26] K. Wüst, *Mikroprozessortechnik: Grundlagen, Architekturen und Programmierung von Mikroprozessoren, Mikrocontrollern und Signalprozessoren*. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag GWV Fachverlage GmbH, 2006.
- [27] Roboteq, Inc, "MBL1xxx Motor Controller Datasheet." 15. Dezember 2013.
- [28] Dallas Semiconductor Corporation, "Fundamentals of RS-232 Serial Communications." Application Note 83-2005.
- [29] Compaq Computer Corporation, Hewlett-Packard Company, Intel Corporation, Lucent Technologies Inc, Microsoft Corporation, NEC Corporation und Koninklijke Philips Electronics N.V., "Universal Serial Bus Specification, Revision 2.0." 2000.
- [30] Roboteq, Inc, "Advanced Digital Motor Controllers User Manual." 01. September 2013.
- [31] dSpace GmbH, "Real-Time Interface - Implementation software for running models on dSPACE hardware," 2013. [Online]. URL: <https://www.dspace.com/de/gmb/home/products/sw/impsw/realtimeinterf.cfm>. [Abgerufen am: 10. Februar 2014].
- [32] G. Quaranta und P. Mantegazza, "Using MATLAB-Simulink RTW to Build Real Time Control Applications in User Space with RTAILXRT," in *Realtime Linux Workshop*, 2001.
- [33] dSpace GmbH, "DS1104 R&D Controller Board, Features." 2004.
- [34] dSpace GmbH, "DS1104 R&D Controller Board, RTI Reference." 2004.
- [35] "MicroBasic Reference | Roboteq," *www.roboteq.com*. [Online]. URL: <http://www.roboteq.com/index.php/support/microbasic-reference>. [Abgerufen am: 09. Februar 2014].
- [36] ams AG, "AS5132 Datasheet." Revision 1.4.