



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

# Bachelorthesis

Julian Alexander Lobisch

Aufbau, Optimierung und Simulation eines  
Gleichstrommaschinen-Antriebssystems für den  
Versuchsstand Windenergie-Netzeinspeisung

Julian Alexander Lobisch

Aufbau, Optimierung und Simulation eines  
Gleichstrommaschinen-Antriebssystems für den  
Versuchsstand Windenergie-Netzeinspeisung

Bachelorthesis eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung  
im Studiengang Informations- und Elektrotechnik  
am Department Informations- und Elektrotechnik  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer : Prof. Dr.Ing. Michael Röther  
Zweitgutachter : Prof. Dr.Ing. Gustav Vaupel

Abgegeben am 16. März 2016

**Julian Alexander Lobisch**

**Thema der Bachelorthesis**

Aufbau, Optimierung und Simulation eines Gleichstrommaschinen-Antriebssystems für den Versuchsstand Windenergie-Netzeinspeisung

**Stichworte**

Gleichstrommotor, Gleichstrommaschine, Stromrichter, Regelungstechnik, Matlab, Simulink, Simscape, AL-Labor, Windenergie, Netzeinspeisung

**Kurzzusammenfassung**

Diese Arbeit beschreibt die Simulation, den Aufbau, die Inbetriebnahme sowie die regelungstechnische Auslegung einer Gleichstrommaschine als Belastungseinheit für den Prüfstand "Windenergie-Netzeinspeisung" im Labor für Antriebe und Leistungselektronik an der Hochschule für Angewandte Wissenschaft Hamburg.

**Julian Alexander Lobisch**

**Title of the paper**

Construction, optimisation and simulation of a DC drive for the test bench wind power grid feed-in

**Keywords**

DC drive, DC motor, current converter, control engineering, Matlab, Simulink, Simscape, AL laboratory, wind power, grid feed-in

**Abstract**

This thesis contains the simulation, construction, commissioning and control engineering design of a DC motor as a load unit integrated into in a test bench for wind power grid feed-in located in the laboratory for drive systems and power electronics at the university of Applied Siences in Hamburg

---

## **Danksagung**

Zunächst möchte ich mich an dieser Stelle bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Bachelor-Arbeit unterstützt und motiviert haben.

In erster Linie gebührt mein Dank Prof. Dr.-Ing. Michael Röther, welcher mich im Rahmen dieser Arbeit betreut und mich bei Problemen mit kritischen Fragen auf den richtigen Weg brachte. Des weiteren möchte ich meinem Zweitprüfer Prof. Dr.-Ing. Gustav Vaupel danken, der durch die Vorlesung Grundlagen der Energietechnik den Grundstein für diese Arbeit legte. Ebenfalls danke ich Dipl.-Ing. Frank Korpel und Dominik Bothe für die Betreuung in der Werkstatt und im Labor beim Aufbau und der Inbetriebnahme der Anlage. Mein Dank geht ebenso an die SIEMENS Healthcare GmbH, die mich als Dualer Student aufnahm. Dadurch konnte ich mich gezielt auf das Studium konzentrieren.

Last but not least möchte ich meinen Eltern danken. Ohne ihre Unterstützung im Rahmen der Schule und des Studiums wäre ich nicht dort, wo ich heute bin.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>Die Gleichstrommaschine</b>	<b>10</b>
2.1	Aufbau und Funktion . . . . .	10
2.1.1	Ständer . . . . .	11
2.1.2	Läufer . . . . .	11
2.1.3	Kompensation des Ankerfelds . . . . .	12
2.2	Verwendete Gleichstrommaschine . . . . .	14
<b>3</b>	<b>Aufbau der Simulation</b>	<b>15</b>
3.1	Matlab-Skript . . . . .	15
3.2	Spannungsversorgung . . . . .	16
3.3	Drosseln . . . . .	16
3.4	Gleichstrommaschine . . . . .	16
3.5	Messglieder . . . . .	17
3.6	B2 Brückengleichrichter . . . . .	19
3.6.1	Thyristor-Brücke . . . . .	19
3.6.2	Sollwertbestimmung . . . . .	20
3.6.3	PI-Regler . . . . .	21
3.6.4	Pulserzeugung . . . . .	21
3.7	B6 Brückengleichrichter . . . . .	22
3.7.1	Thyristor-Brücke . . . . .	23
3.7.2	Freigabe der Thyristor-Brücken . . . . .	25
3.7.3	Pulserzeugung . . . . .	27
3.7.4	Stromregler . . . . .	28
3.7.5	Drehzahlregler . . . . .	29
<b>4</b>	<b>Aufbau des Schaltschranks</b>	<b>30</b>
4.1	Stromrichter Synamics DC-Master . . . . .	30
4.2	Komponenten des Hauptstromkreises . . . . .	32
4.2.1	Netzfilter V1 . . . . .	32
4.2.2	Kommutierungsdrosseln L1 und L2 . . . . .	32

---

4.2.3	Hauptschütz Q1 . . . . .	35
4.2.4	Sicherungen F1-F6 . . . . .	35
4.2.5	Schaltschranklüfter M3 - M4 . . . . .	37
4.2.6	Anschlüsse und Kabelquerschnitte . . . . .	38
4.3	Komponenten des Steuerstromkreises . . . . .	39
4.3.1	Bedienpult . . . . .	39
4.3.2	Koppelrelais K1 und K2 . . . . .	40
4.3.3	Optokoppler T3 - T6 . . . . .	40
4.3.4	Spannungswandler T7 . . . . .	41
4.3.5	Inkrementalgeber . . . . .	41
4.3.6	Anschlüsse und Kabelquerschnitte . . . . .	42
4.4	Der Schaltschrank . . . . .	43
4.5	Materialliste . . . . .	43
4.6	Schaltpläne . . . . .	43
4.7	Aufbau des Schaltschranks . . . . .	44
<b>5</b>	<b>Inbetriebnahme</b> . . . . .	<b>47</b>
5.1	Prüfung nach DIN VDE 0113 . . . . .	47
5.2	Programmierung des Stromrichters . . . . .	50
5.2.1	Erstellung des Projekts . . . . .	51
5.2.2	Konfiguration der Maschinendatensätze . . . . .	52
5.2.3	Verriegelung der Regelungsarten . . . . .	54
5.2.4	Einstellung der erweiterten Parameter . . . . .	55
5.2.5	Laden in den Stromrichter . . . . .	58
5.2.6	Optimierungsläufe . . . . .	58
5.2.7	Einstellung der Regler . . . . .	60
<b>6</b>	<b>Regelung der Gleichstrommaschine</b> . . . . .	<b>62</b>
6.1	Optimierungsverfahren . . . . .	62
6.1.1	Betragsoptimum (BO) . . . . .	63
6.1.2	Symmetrisches Optimum (SO) . . . . .	63
6.2	Kaskadenregelung . . . . .	64
6.2.1	Auslegung der Stromregelung . . . . .	65
6.2.2	Gegenspannungskompensation . . . . .	68
6.2.3	Auslegung der Drehzahlregelung . . . . .	68
6.2.4	Sollwertglättung . . . . .	70
6.3	Feldschwächeregelung . . . . .	72
6.3.1	Funktionsweise der Feldschwächeregelung . . . . .	72
6.3.2	Regelstrecke der Feldschwächeregelung . . . . .	73
6.4	Analyse der Regelstrecke . . . . .	75
6.4.1	Gesamtverstärkung des Ankerstromkreises . . . . .	75

---

6.4.2	Zeitkonstante der Leistungselektronik $t_{St}$	75
6.4.3	Zeitkonstante des Ankerstromkreises $T_A$	76
6.4.4	Zeitkonstante des Strommesglieds $t_{gi}$	77
6.4.5	Hochlaufzeitkonstante $T_H$	78
6.4.6	Zeitkonstante des Inkrementalgebers	79
6.4.7	Drehmoment-Strom Verhältnis	80
6.5	Messung der Erregerstrecke	82
6.6	Auslegung der Ankerstromregelung	83
6.6.1	Optimierung des Ankerstromreglers	83
6.7	Auslegung des Drehzahlreglers	85
6.7.1	Optimierung des Drehzahlreglers	85
6.7.2	Ausregelung von Störsprüngen	86
6.8	Sollwertglättung	87
6.8.1	Auslegung der Sollwertglättung	87
6.8.2	Optimierung der Sollwertglättung	88
6.9	Feldschwächeregelung	89
6.9.1	Auslegung der Feldschwächeregelung	89
6.9.2	Optimierung der Feldstromregelung	90
<b>7</b>	<b>Vergleich von Simulation und realem Modell</b>	<b>92</b>
7.1	Ankerstromregler	92
7.2	Drehzahlregelung	93
7.2.1	Sprungverhalten	94
7.2.2	Störverhalten	95
7.3	Sollwertglättung	96
7.4	Erregerstromregler	97
<b>8</b>	<b>Fazit</b>	<b>98</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>100</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>103</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>104</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>107</b>
	<b>Anhang</b>	<b>109</b>

# 1 Einführung

In letzten Jahren ist auf dem Energiemarkt ein starker Trend in Richtung der erneuerbaren Energien sichtbar. Hierbei ist seit dem Jahr 2001 ein stetiges Wachstum des Anteils der erneuerbaren Energien im Primärenergieverbrauch festzustellen. Lag im Jahre 2001 der Anteil der erneuerbaren Energien lediglich bei 2.9 %, so ist dieser bis zum Jahre 2014 auf 11.3 % angestiegen (Nieder und Bickel (2015, S. 5)).

Hierbei steht neben der Gewinnung von Energie aus Biomassen als Strom oder als Brennstoff für Kraftfahrzeuge und der Gewinnung von Energie aus Wasserkraft, vor allem die Windenergie und die Photovoltaik für die Gewinnung von Strom im Fokus. Die Ausbeute bei der Wandlung von Windenergie und von Photovoltaik hängt hierbei stark vom Standort ab: Begünstigt durch mehr Sonnenstunden und einen größeren Einfallswinkel der Sonnenstrahlen werden Photovoltaikanlagen meist im Süden Deutschlands installiert. Windkraftanlagen werden hingegen mit dem Vorteil des flachen Landes und der höheren durchschnittlichen Windgeschwindigkeit eher im Norden Deutschlands aufgestellt. Unter diesen Voraussetzungen konnten mit Photovoltaik 6.0 % und mit Windkraft 13.3 % der Bruttostromerzeugung in Deutschland im Jahre 2015 erzielt werden (BmWE (2015)). Um diesem Wachstum zu folgen, wächst auch der Arbeitsmarkt im Bereich der erneuerbaren Energien und im Speziellen im Bereich der Windenergie ständig an.

Um dem Bedarf an Ingenieuren gerecht zu werden, werden heutzutage immer mehr Studenten im Bereich der erneuerbaren Energien an Hochschulen ausgebildet. Im Zuge dieser Ausbildung soll an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg ein neuer Laborversuch zum Thema Windenergie erstellt werden. Der Versuchsaufbau besteht hierbei aus einer Gleichstrommaschine, die das vom Wind erzeugte Drehmoment simulieren soll und einem doppelt gespeistem Asynchrongenerator, der die vom Wind bereitgestellte mechanische Energie in elektrische Energie wandelt und diese ins Netz einspeist. Die Anlage soll im Laborbetrieb über ein System der Firma DSpace in Echtzeit mit einem Computer gesteuert werden. Diese Arbeit beschäftigt sich hierbei mit dem Aufbau der Gleichstrommaschine für den zweiten Versuchsstand im Labor für regenerative Energien. Die Arbeit stellt hierbei ein Nachbau und eine Optimierung der von Herrn Klotz 2014 gebauten Gleichstrommaschine dar (Klotz (2014)). Zusätzlich zum Aufbau wird eine Simulation erstellt werden, die das Verhalten der Gleichstrommaschine widerspiegelt.

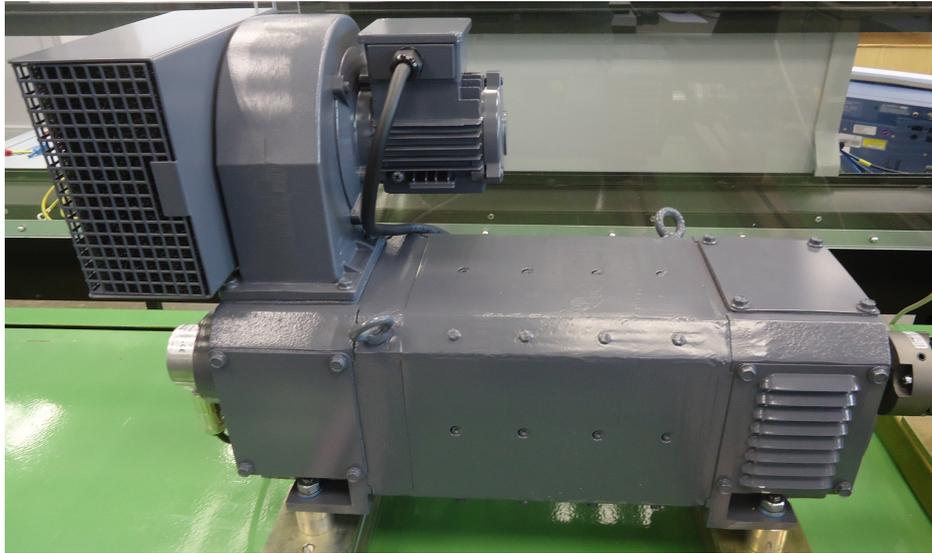


Abbildung 1.1: Aufgebaute Gleichstrommaschine

Ein weiteres Ziel der Arbeit beschäftigt sich mit dem Regelkonzept des Stromrichters. Dieser soll auf sein Regelverhalten analysiert werden. Es soll herausgefunden werden, ob der Stromrichter über reine Regler verfügt, oder ob diese durch die interne Software mit Aufschaltungen behaftet sind. Diese Auswertung soll Aufschluss über eine mögliche Verwendung des Stromrichters in weiteren Versuchsständen geben.

Zu Beginn der Arbeit wird die Funktionsweise der Gleichstrommaschine erläutert. Im nächsten Abschnitt wird die in Simulink angefertigte Simulation beschrieben und die Funktionsweisen der einzelnen Bausteine erläutert. Anschließend wird der Aufbau des Schaltschranks für die Gleichstrommaschine beschrieben. Hierbei wird zunächst auf die verwendeten Bauteile und danach auf den Prozess des Aufbaus eingegangen. Darauffolgend wird auf die Inbetriebnahme des Schaltschranks eingegangen. In diesem Zusammenhang wird die Sicherheitsprüfung nach VDE und die Programmierung des Stromrichters betrachtet. In der Folge wird die Regelung der Gleichstrommaschine vorgenommen. Im Zuge dessen wird die Regelung theoretisch durchgeführt, die Regelstrecke ausgemessen und abschließend die reale Regelung anhand der Theorie ausgelegt und optimiert. Final wird die reale Gleichstrommaschine mit der Simulation verglichen. Hierbei wird sowohl auf das Führungsverhalten als auch auf das Störverhalten eingegangen. Unter Betrachtung all dieser Dinge werden die Ergebnisse der Arbeit abschließend bewertet.

## 2 Die Gleichstrommaschine

In diesem Kapitel wird auf den Aufbau und die Funktionsweise der Gleichstrommaschine eingegangen. Anschließend werden die Nennparameter der verwendeten Gleichstrommaschine erläutert. Hierbei wird die Gleichstrommaschine mit Fremderregung betrachtet, da diese im Zuge der Arbeit verbaut wurde. Das Kapitel lehnt sich hierbei an die Vorlesung "Antriebe und Leistungselektronik" (Röther (2015a)), dem Buch "Elektrische Maschinen" (Spring (2009)) und einem Laborversuch der Universität Stuttgart zur Gleichstrommaschine (Parspour (2008)) an.

### 2.1 Aufbau und Funktion

Eine fremderregte Gleichstrommaschine teilt sich in einen statischen Teil - dem Ständer - und in einen beweglichen Teil - dem Läufer - auf.

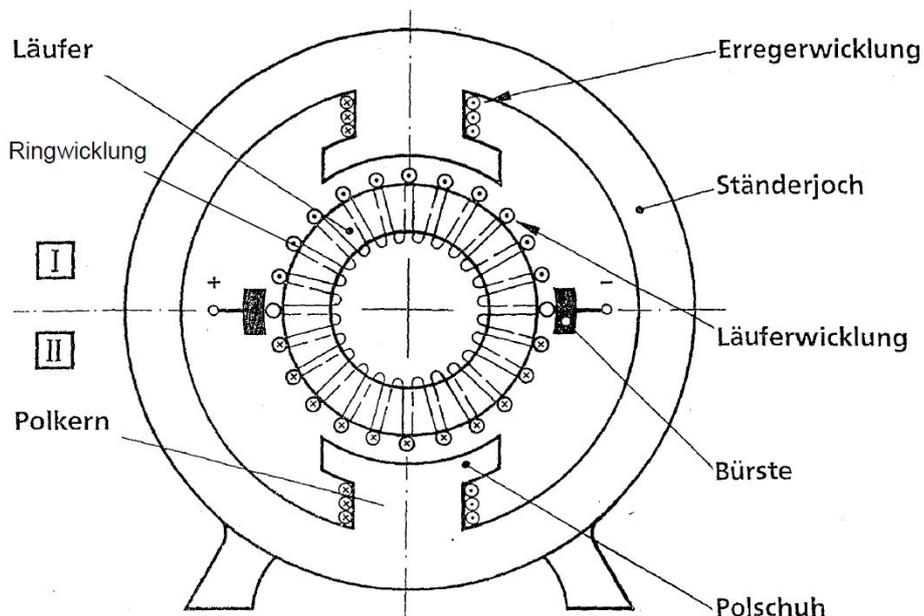


Abbildung 2.1: Aufbau einer Gleichstrommaschine (Parspour (2008, S. 4))

### 2.1.1 Ständer

Der Ständer besteht aus dem Ständerjoch, dem Polkern, dem Polschuh und der Erregerwicklung (Abb. 2.1). Im Ständer wird das Erregerfeld mit dem Erregerfluss  $\Phi_E$  erzeugt. Dies geschieht durch den Erregerstrom, der durch die Erregerwicklung fließt. Das induzierte Feld breitet sich von der Erregerwicklung und dem Polkern über das Ständerjoch auf den ganzen Ständer aus und wird durch den metallenen Ständer gelenkt und fokussiert. Über den breiteren Polschuh wird das Feld in den Läufer übertragen (Abb. 2.2, Spring (2009, S. 23)). Der induzierte Erregerfluss ist hierbei bei Vernachlässigung der Eisensättigung proportional von der Anzahl der Wicklungen der Erregerspule, der Größe des Erregerstroms und der Permeabilität des durchfluteten Materials abhängig. Er bildet die Erste von drei Grundgleichungen für die Berechnung der Gleichstrommaschine.

$$\Phi_E = c \cdot N_E \cdot I_E \quad (2.1)$$

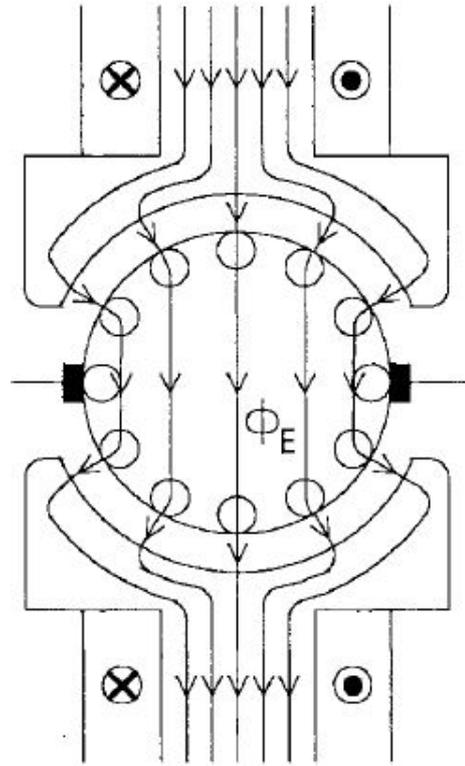


Abbildung 2.2: Erregerfeld (Spring (2009, S. 70))

### 2.1.2 Läufer

Der Läufer besteht aus der Ringwicklung und der Läuferwicklung (Abb. 2.1). In die Läuferwicklung wird der Ankerstrom eingepreßt. Die Läuferwicklung beschließt hierbei einen geschlossenen Kreis. Die Verbindung des Läufers und des Stators geschieht über die Kommutierungsbürsten. Diese sind direkt mit der Läuferwicklung verbunden. An den Bürsten ist die Ankerspannung angelegt. Es fließt nun über die Läuferwicklung der Ankerstrom. Dieser nimmt zwei Richtungen: Zur einen Hälfte fließt er über die obere Seite des Läufers, zur andern Hälfte über die untere Seite des Läufers. Durch die Bürsten, die fest am Stator verankert sind, bleibt hierbei der Stromfluss des rotierenden Läufers immer konstant, da die Kontaktpunkte immer an der selben Stelle bleiben und somit der Stromfluss sich bei Rotation des Läufers nicht mit dreht. Der Stromfluss einer einzelnen Läuferwicklung ändert somit binnen einer Umdrehung zwei Mal die Richtung.

Durch die Bewegung der Läuferwicklung im Erregerfeld wird eine Gegenspannung in die Läuferwicklung induziert.

$$U_i = \int_L (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{s} \quad (2.2)$$

Über die Aufsummierung dieser Gegenspannung einer Läufer Schleife erhält man die Gegenspannung des Ankers. Diese ist von der Stärke des Erregerfelds, der Bewegungsgeschwindigkeit der Läuferwicklung und der Motorkonstante abhängig. Sie bildet die zweite Grundgleichung zur Beschreibung der Gleichstrommaschine (Spring (2009, S. 46)).

$$U_q = k_u \cdot \Phi_E \cdot n \quad (2.3)$$

Durch den eingepprägten Ankerstrom und den Erregerfluss wird eine Kraft in der Läuferwicklung erzeugt. Diese Kraft sorgt für die Rotation der Maschine. Für eine einzelne Leiterringleife lässt sich die Kraft wie folgt berechnen:

$$F_{Lorentz} = Q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.4)$$

Summiert man die entstehenden Kräfte auf und betrachtet weiterhin die Richtung der Kräfte, lässt sich das innere Drehmoment der Maschine berechnen. Es ist vom Erregerfluss, dem Ankerstrom und der Motorkonstante abhängig und ist die Letzte der drei Grundgleichungen, mit der die Gleichstrommaschine beschrieben werden kann (Spring (2009, S. 52)).

$$M_i = K_M \cdot \Phi_E \cdot I_A \quad (2.5)$$

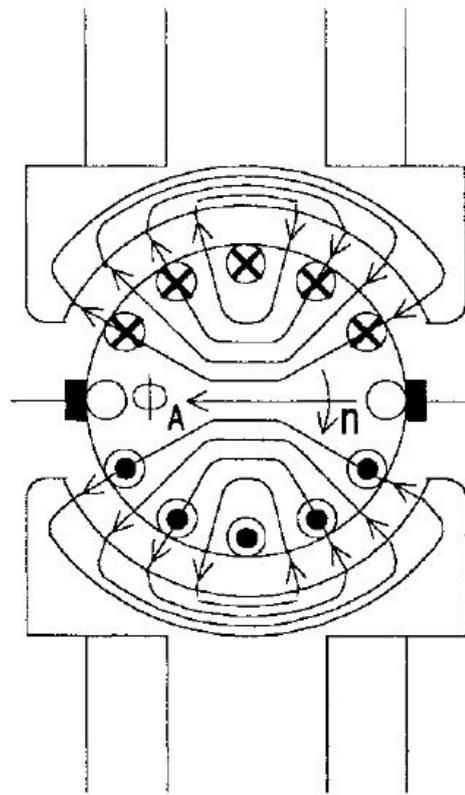


Abbildung 2.3: Läuferfeld (Spring (2009, S. 70))

### 2.1.3 Kompensation des Ankerfelds

Durch den Stromfluss in der Läuferwicklung wird ebenfalls ein magnetisches Feld erzeugt (Abb. 2.3). Dieses verändert die Beschaffenheit des Erregerfeldes, sodass sowohl das generierte Drehmoment als auch die Gegenspannung am Läufer nicht gleichmäßig ist. Um das vom Läufer erzeugte Feld auszugleichen, wird eine zusätzliche Kompensationswicklung im

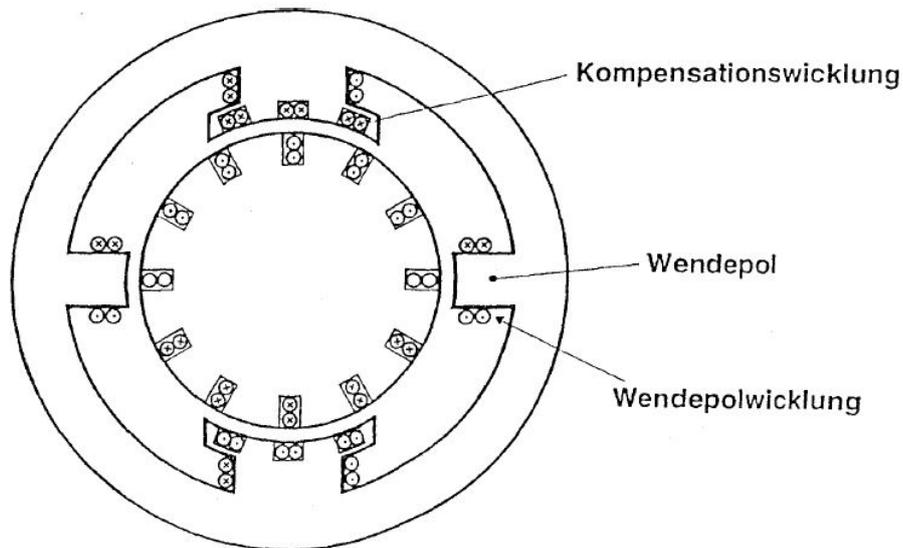


Abbildung 2.4: Aufbau einer Gleichstrommaschine (Parspour (2008, S. 15))

Stator angebracht. Das entstehende Feld wirkt dem Ankerfeld entgegen (Spring (2009, S. 73)).

Ebenfalls wird im Bereich der Kommutierbürsten ein Feld durch den Ankerstrom erzeugt. Dieses erzeugt nach der Kommutierung durch die Bürsten eine hohe Gegenspannung, die zu Funkenstrüngen während des Kommutierungsvorgangs führt. Um diesen Funkenstrung, der zu einer schnellen Abnutzung der Bürsten führt, zu unterbinden, wird im Bereich der Bürsten das Wendepolfeld zum Ankerfeld aufgebaut. Dieses sorgt dafür, dass sich im Moment der Kommutierung das Ankerfeld und das Wendepolfeld aufheben und dadurch das Bürstenfeuer zu verringern (Spring (2009, S. 72)).

Das Feld des Ankerstroms ist proportional zum Strom. Somit müssen auch das Kompensationsfeld und das Wendepolfeld proportional zum Ankerstrom sein. Aus diesem Grund wird sowohl die Kompensationsspule als auch der Wendepol mit dem Anker in Reihe geschaltet (Abb. 2.5).

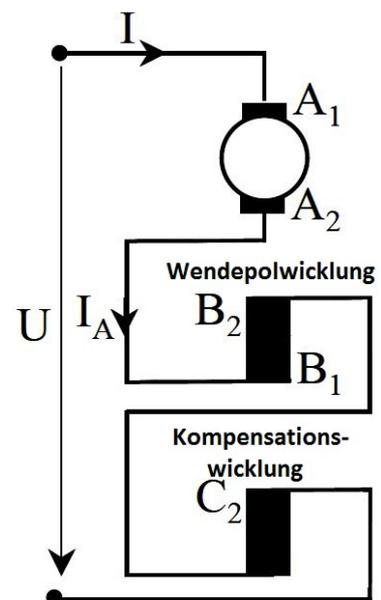


Abbildung 2.5: Verschaltung des Ankers (nach Parspour (2008, S. 16))

## 2.2 Verwendete Gleichstrommaschine

Die in der Arbeit verbauten Gleichstrommaschine entspricht der bereits im ersten Versuchstand verbauten Maschine. Die Baumüller GNA 100 LN-274P 01 BE ist eine Gleichstrom-Nebenschlussmaschine (Abb. 1.1). Die Nennwerte der Maschine können in Tab. 2.1 nachgelesen werden.

In der Gleichstrommaschine sind zwei Temperaturschalter verbaut. Diese lösen bei einer Temperatur von 165 °C aus. Dies schützt den Motor der Isolierklasse H mit einer maximalen Betriebstemperatur von 180 °C. Die Betriebsart des Motors ist S1. Somit ist der Motor für den Dauerbetrieb geeignet (Dzieia u. a. (2011, S. 76, S. 308)).

Die Gleichstrommaschine wird mit einem Fremdlüfter vom Typ DF 56 2A von Baumüller ausgeliefert. Dieser verfügt über einen Drehstromanschluss und wird in Sternschaltung angeschlossen. Durch den Fremdlüfter ist es möglich die Maschine auch im Stillstand mit vollem Nennstrom zu betreiben, da für die Kühlung keine Rotation des Motors nötig ist.

Tabelle 2.1: Angaben des Datenblatts der Gleichstrommaschine

Parameter	Formelzeichen	Größe
Ankernennspannung	$U_{AN}$	420 [V]
Ankernennstrom	$I_{AN}$	21 [A]
Nennleistung	$P_N$	6.9 [kW]
Nenndrehmoment	$M_N$	46 [Nm]
Nenndrehzahl	$n_N$	1420 [ $\frac{1}{\text{min}}$ ]
elektrische Maximaldrehzahl	$n_{Maxel}$	2500 [ $\frac{1}{\text{min}}$ ]
mechanische Maximaldrehzahl	$n_{Maxmech}$	6000 [ $\frac{1}{\text{min}}$ ]
Erregernennspannung	$U_{EN}$	310 [V]
Erregernennstrom	$I_{EN}$	1.6 [A]
Gesamtwirkungsgrad	$\eta_{ges}$	0.758
Ankerwiderstand	$R_A$	2.17 [ $\Omega$ ]
Ankerinduktivität	$L_A$	15.6 [mH]

## 3 Aufbau der Simulation

In diesem Kapitel wird die Simulation der Gleichstrommaschine, die mit Matlab realisiert ist, beschrieben und die Funktionsweise der einzelnen Bausteine der Simulation erläutert. Die Simulation wurde in Simulink, einer Toolbox von Matlab, erstellt. In Simulink wird die Gleichstrommaschine und der Gleichrichter mit Komponenten aus der Simscape-Bibliothek simuliert. Diese Bibliothek enthält alle elektrischen Komponenten, die für die Simulation der Maschine notwendig sind.

Die Simulation lässt sich in sieben Teile unterteilen:

- das Matlab-Skript zur Eingabe von Parametern
- die dreiphasige Spannungsversorgung
- die Drosseln
- das Modell vom Motor
- die Messglieder
- der selbstgeführte B2 Brückengleichrichter für den Erregerstromkreis
- der selbstgeführte B6 Brückengleichrichter für den Ankerstromkreis

Im Nachfolgendem werden alle Elemente beschrieben und die jeweiligen Funktionen der Blöcke analysiert, um ein Verständnis für die Funktion des Modells zu gewinnen.

### 3.1 Matlab-Skript

In dem Matlab-Skript können ausgewählte Parameter für die Simulation eingestellt werden. Das Skript ist hierbei in sechs Abschnitte unterteilt:

- Simulationsschrittweite
- Sollwerte und Störgrößen für die Simulation
- Regelparameter für Anker- und Erregerkreis

- Messfilter für die Erfassung der Ist-Werte
- Einstellungen des Stromrichters
- Nenngrößen der Gleichstrommaschine

Die Parameter werden nach Ausführung des Skripts für die Simulation übernommen.

## 3.2 Spannungsversorgung

Die Spannungsversorgung ist die dreiphasige programmierbare Spannungsversorgung aus der Simscape Bibliothek. Die Spannungsversorgung erzeugt Drehstrom mit drei elektrischen Sinusspannungen mit einem Phasenversatz von  $120^\circ$  und mit einer Spannung von 400 V Phase-zu-Phase. Zusätzlich können die im Netz vorkommenden Oberschwingungen simuliert werden. Diese entstehen durch andere Verbraucher im Netz und beeinflussen den Gleichrichter und somit die Gleichstrommaschine. Die Spannungsversorgung stellt hierbei einen Drehstromanschluss dar, wie er auch im Labor zu finden ist.

## 3.3 Drosseln

Die Drosseln sind als Widerstand und Spule (RL-Glied) implementiert. Sie tragen die selben Werte wie die verbauten Drosseln in der Anlage:

- Dreiphasige Drossel:  $R = 15\text{m}\Omega$ ,  $L = 0.889\text{ mH}$
- Einphasige Drossel:  $R = 15\text{m}\Omega$ ,  $L = 6.5\text{ mH}$

## 3.4 Gleichstrommaschine

Im Block der Gleichstrommaschine wird das Verhalten des Motors simuliert. Hierbei gibt es als Eingangsparameter vier elektrische Eingänge für die Anschlüsse des Ankerstromkreises ( $U_{A+}$ ,  $U_{A-}$ ) und des Erregerstromkreises ( $U_{E+}$ ,  $U_{E-}$ ). Ebenso kann am Port  $M_L$  ein Lastmoment für den Motor simuliert werden. Hier können Störsprünge und Lastkurven im Modell implementiert werden. Die Ausgänge des Blocks sind Werte, die für die Simulation des Motors eine hohe Bedeutung haben. Diese sind die induzierte Gegenspannung ( $U_q$ ), die Drehzahl ( $n$ ), der Ankerstrom ( $I_A$ ), der Erregerstrom ( $I_E$ ) sowie das

vom Motor entwickelte elektrische Drehmoment ( $M_{Motor}$ ) und das Gesamtdrehmoment ( $M_{Motor} - M_{Last}$ ).

Das Motormodell besteht aus dem Ankerstromkreis und dem Erregerstromkreis. In diese ist sowohl die Ankerwicklung als auch die Erregerwicklung über ein RL-Glied dargestellt. Zusätzlich befindet sich im Ankerstromkreis noch eine steuerbare Spannungsquelle. Über diese wird die induzierte Gegenspannung im Ankerkreis simuliert. Die Spannungsquelle wandelt hierbei den Eingangswert in eine gleich große Spannung um. Der Ankerstrom und der Erregerstrom werden im System gemessen.

Final wird in dem Block Momentenberechnung aus den fließenden Strömen und dem Lastmoment das Drehmoment der Gleichstrommaschine berechnet. Hierfür wird zunächst das Drehmoment des Motors berechnet (Gl. 3.1). Die Drehzahl wird anschließend über einen Integrator aus dem Drehmoment berechnet (Gl. 3.2). Die vom Motor erzeugte Gegenspannung wird nach Gl. 2.3 berechnet. Um die Erzeugung einer geschlossenen Schleife im System zu verhindern, muss die Berechnung der Gegenspannung um einen Simulationsschritt verschoben werden. Diese hat durch die Senkung des Ankerstroms direkte Auswirkung auf das Drehmoment und somit wieder auf die Drehzahl und die Gegenspannung. Um diesen algebraischen Kreis zu unterbrechen, muss die Verzögerung eingefügt werden.

$$M_{Gesamt} = M_{Motor} - M_{Last} - M_{Reib} = I_A \cdot \Phi_E - M_{Last} - M_{Reib} \quad (3.1)$$

$$n = \int_0^t \frac{M_{Gesamt}}{J} dt \quad (3.2)$$

### 3.5 Messglieder

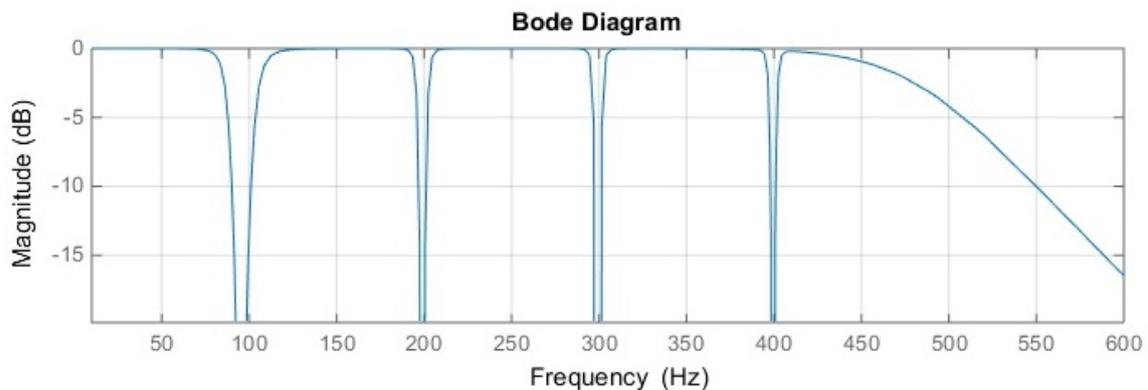


Abbildung 3.1: Bodeplot des Notch-Filters für das Strom und das Drehzahlsignal

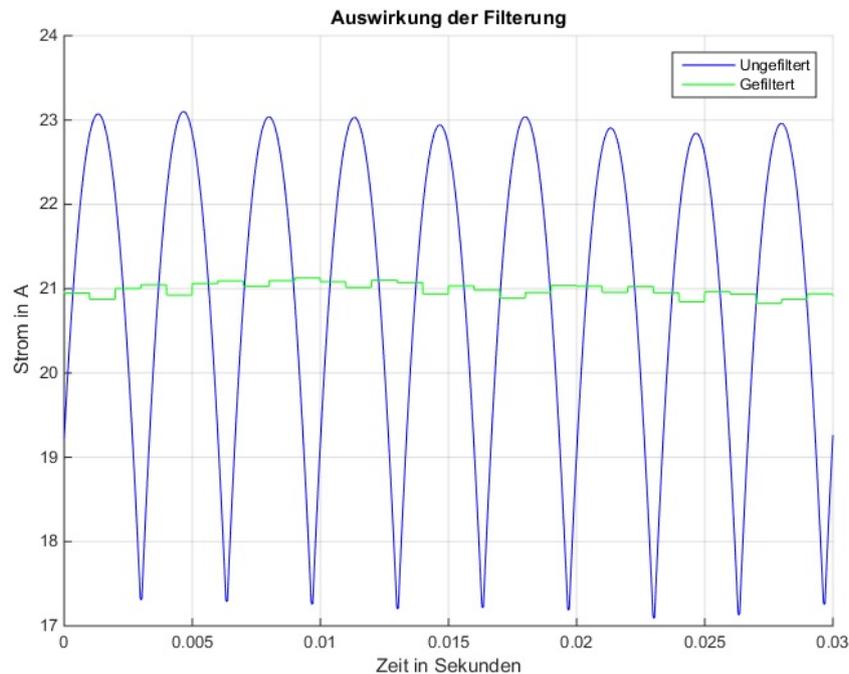


Abbildung 3.2: Auswirkung der Filterung in den Messgliedern

Für die Regelung wird der Ankerstrom, der Erregerstrom und die Drehzahl des Gleichstrommotors benötigt. Die Istwerte unterliegen aufgrund der gleichgerichteten sinusförmigen Eingangsspannung einer Störung mit einer Frequenz von 300 Hertz ( $6 \cdot f_{Netz}$ ) beim Ankerstrom und der Drehzahl sowie einer Störung mit einer Frequenz von 100 Hertz ( $2 \cdot f_{Netz}$ ) beim Erregerstrom. Der Erregerstrom erzeugt wiederum eine Schwankung in der Gegenspannung, welche eine weitere 100 Hertz Schwankung im Ankerstrom bewirkt. Der Ankerstrom unterliegt hierbei einer Schwankung von 6 A bei einem Nennstrom von 21 A. Durch diese Schwankung ändert sich die Regeldifferenz und somit auch der Ausgang des Reglers ständig. Um dies zu unterbinden muss der Messwert des Stromes gefiltert werden. Diese Filterung kann am Besten mit einem Notch-Filter vorgenommen werden (Schröder (2015, S. 265)). Hierbei wird jeweils die Hauptfrequenz von  $2 \cdot p \cdot f_{Netz}$  (300 Hz und 100 Hz) und weitere Oberschwingungen herausgefiltert. Diese Filter wurde in Matlab aus einer Reihenschaltung von mehreren separaten Notch-Filtern realisiert. Ebenfalls muss die Abtastfrequenz des Reglers beachtet werden. Die Filter werden jede Millisekunde neu ausgeführt. Die Abtastfrequenz  $f_a$  beträgt somit 1 kHz. Zur Unterdrückung von Aliasing wird deshalb zusätzlich ein Tiefpass hinzugefügt. Dieser hat eine Grenzfrequenz von  $f_g = 0.5 f_a = 500$  Hz. Er ist als Butterworthfilter implementiert. Nach dem Filtern wird das Signal mit einer Frequenz von 1 kHz abgetastet und wird nach der anschließenden Normierung für die Regelung verwendet. Die Schwankung des Ankerstroms beträgt nun lediglich 0.4 A. Durch die gefilterten Messwerte erreicht die Re-

gelung schneller ihren Sollwert und schwingt nach der Erreichung des Sollwerts weniger um diesen. Das Bodeplot des Filters kann in Abbildung 3.1 eingesehen werden. Durch die Abtastung entsteht eine Totzeit des Messglieds von  $t_{gi} = 1$  ms.

## 3.6 B2 Brückengleichrichter

Der B2 Brückengleichrichter (BGR) erzeugt die Gleichspannung für den Erregerstromkreis. Das Eingangssignal für den BGR sind die Spannungssignale von L1 und L3. Ebenfalls wird als Eingang für die Regelung des Erregerstroms der Istwert des Erregerstroms  $I_E$  und die aktuelle Drehzahl  $n_{ist}$  benötigt. Der Ausgang sind die Spannungsanschlüsse für die Erregerspannung  $U_{E+}$  und  $U_{E-}$ .

Weiterhin besteht der Block aus vier Teilstücken. Diese sind die Thyristor-Brücke, die Pulserzeugung, die Bestimmung des Sollwerts und der Stromregler für den Erregerstrom.

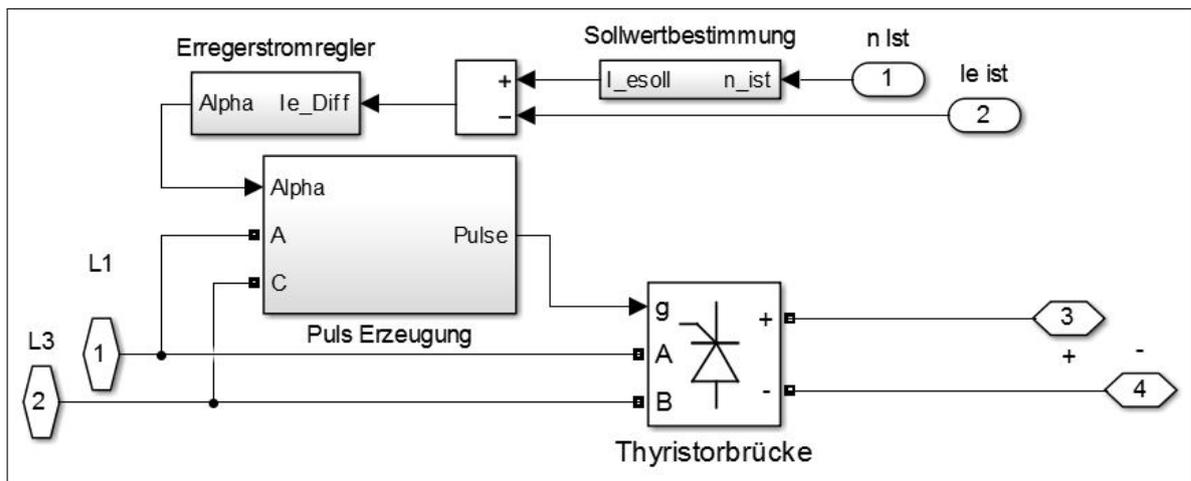


Abbildung 3.3: Blöcke der Realisierung des B2- Gleichstromrichters

### 3.6.1 Thyristor-Brücke

Die Thyristor-Brücke hat neben den Ein- und Ausgängen für Strom und Spannung noch den Eingang g für den Vektor mit Pulssignalen. Hierbei wird die Stelle im Vektor dem Thyristor zugeordnet (z.B. Vektorelement 3 zu Thyristor 3). Die Thyristoren leiten nach der Zündung durch den Strom so lange, bis der durch den Thyristor fließende Strom auf 0 Ampere fällt.

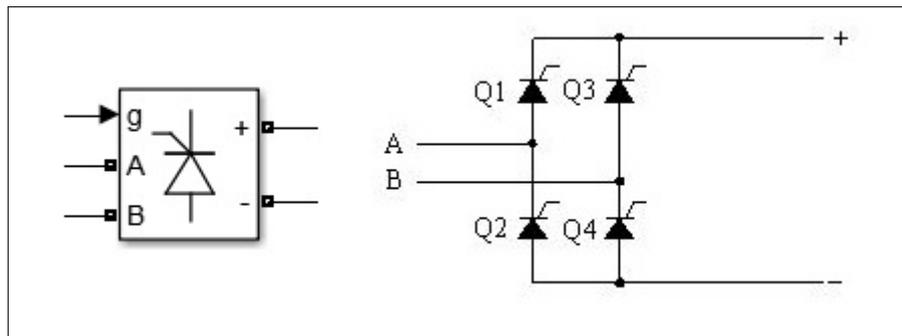


Abbildung 3.4: B2-Thyristorbrücke in Matlab mit Schaltbild

### 3.6.2 Sollwertbestimmung

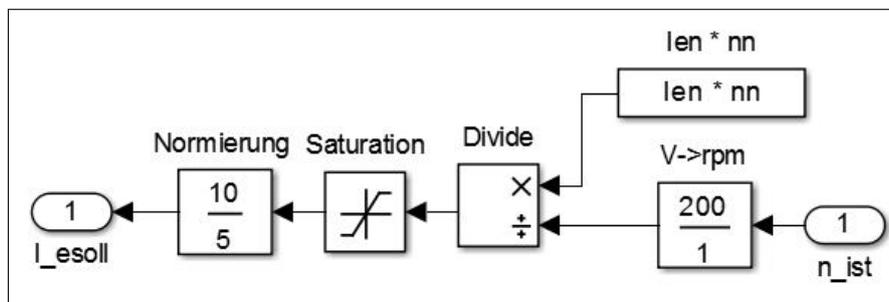


Abbildung 3.5: Errechnung des Sollwerts des Erregerstroms

Der Sollwert des Erregerstroms ist abhängig vom Arbeitsbereich des Gleichstrommotors. Ist die Drehzahl des Motors kleiner als die Nenndrehzahl, befindet sich der Motor im Ankerstellbereich. Es soll der Erregernennstrom  $I_{EN}$  fließen. Ist die Drehzahl größer als die Nenndrehzahl, befindet sich der Motor im Feldschwächebereich. In diesem Bereich muss der Erregerstrom reduziert werden, sodass die Gegenspannung reduziert wird. Hierbei muss der Erregerstrom antiproportional zur Drehzahl verringert werden (Gl. 2.3).

$$I_{Esoll} = \begin{cases} I_{EN}, & \text{wenn } n \leq n_N \\ \frac{I_{EN} \cdot n_N}{n_{ist}}, & \text{wenn } n \geq n_N \end{cases} \quad (3.3)$$

Im Modell wird hierbei ständig der maximal erlaubte Erregerstrom ermittelt. Dieser wird dann durch den Begrenzer auf den im Matlab-Skript vorgegebenen Sollwert beschränkt. Fällt der berechnete Wert unter diesen Sollwert, so wird dieser direkt durchgeschaltet. Abschließend wird der Sollwert noch für das System normiert. Hierbei entspricht ein Erregerstrom von 5 A einer Spannung von 10 V.

### 3.6.3 PI-Regler

Der PI-Regler ist als diskreter Regler implementiert, um in der diskreten Simulation zu funktionieren. Der Regler erhält als Eingang die Sollwertdifferenz des Erregerstromkreises. Der Integrator des PI- Reglers ist mit einer Anti- Windup- Funktion versehen. Diese verhindert, dass der Ausgabewert des Integrators über die Grenzwerte des Reglers wächst und hält den Ausgabewert fest, bis dieser wieder fällt. Der Regler ist auf einen Bereich des Anschritzwinkels von  $0^\circ$  bis  $180^\circ$  begrenzt, da dies der Operationsbereich der B2- Gleichrichterbrücke ist. Hierbei beträgt das Ausgangssignal des Reglers  $-10\text{ V}$  bis  $10\text{ V}$  ( $0^\circ - 180^\circ$ ).

Die Parameter für den PI- Regler sowie der Sollwert für den Erregerstrom können im Matlab-Skript (Kap. 3.1) vorgegeben werden. Der Regler arbeitet hierbei mit einer Schrittweite  $t_s$  von  $1\text{ ms}$ . Diese entspricht der Aufrufzeit des Reglers im verwendeten Stromrichter. Die Übertragungsfunktion des Reglers lautet:

$$G_R(z) = V_{nei} \cdot \left( 1 + \frac{t_s}{t_{nei} \cdot (z - 1)} \right) \quad (3.4)$$

### 3.6.4 Pulserzeugung

Die Erzeugung der Pulse orientiert sich an dem Modell zum B2-BGR aus der Simscape-Bibliothek und wurde für die Simulation angepasst und erweitert. Für die Pulserzeugung wird zunächst das Spannungssignal gemessen. Dies geschieht mit einem Voltmeter aus der Simscape Toolbox. Das Spannungssignal wird mit einem Bandpass mit einer Mittelfrequenz von  $50\text{ Hertz}$  geglättet. Dies dient zur Filterung von Oberschwingungen und Signalstörungen, die durch den Phasenanschnitt bei der Gleichrichtung entstehen.

Für den Phasenanschnitt wird über einen Integrator ein Rampensignal erzeugt. Dieses Rampensignal hat eine Reichweite von  $0\text{ V}$  bis  $20\text{ V}$  und wird Netzgeführt zurückgesetzt. Dies geschieht durch einen Abgleich mit der Eingangsspannung. Wenn diese einen positiven Nulldurchgang, also einen Phasenwinkel von  $0^\circ$  hat, wird der Integrator zurückgesetzt. Der Ausgang des Integrators wird nun mit dem vorgegebenen Phasenanschnittswinkel  $\alpha$  verglichen. Ist die Rampe größer als der Anschritzwinkel  $\alpha$  wird ein Puls erzeugt.

Die Länge des erzeugten Pulses kann im Matlab- Skript (Kap. 3.1) angegeben werden. Sie wird ebenfalls über einen Integrator erzeugt. Dieser wird mit Beginn eines neuen Pulses zurückgesetzt und integriert zu einem maximalen Wert von  $360$ . Solange der Integrationswert unter der geforderten Pulsbreite liegt, wird eine positive Ausgabe gegeben (Puls ist aktiv).

Sobald der Integrationswert die geforderte Pulsbreite überschreitet, wird der Ausgang auf 0 gesetzt und somit der Puls beendet.

Über den Selektionsblock wird das Signal in den Vektor an die Stellen eins und vier für die Thyristoren eins und vier geschrieben, da diese Parallel zünden müssen.

Die Pulse für die Thyristoren zwei und drei werden auf gleiche Weise erzeugt. Allerdings wird das Spannungssignal invertiert, sodass ein Phasenversatz von  $180^\circ$  entsteht.

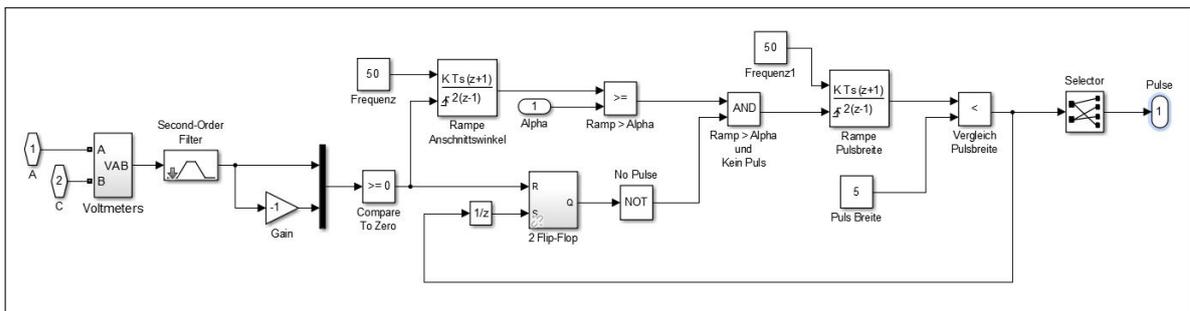


Abbildung 3.6: Erzeugung der Pulse für die B2 Brücke über Rampen für Phasenanschnitt und Pulsbreite

### 3.7 B6 Brückengleichrichter

Mit dem B6 Brückengleichrichter wird die Gleichspannung für den Ankerstromkreis erzeugt. Die Eingänge des Gleichrichters sind der dreiphasige Drehstrom mit den Phasen L1, L2 und L3, die Ist-Werte der Drehzahl, des Ankerstroms und des Erregerstroms und ein Sperreingang, mit dem die Brücke deaktiviert werden kann. Für die Realisierung des Vier-Quadranten-Betriebs (Abb. 3.9) sind zwei B6-Thyristor-Brücken anti parallel verschaltet. Durch diese Verschaltung ist es möglich auch negative Ströme in den Ankerstromkreis einzuprägen. Hierbei müssen die Brücken mit unterschiedlichen Zündwinkeln geschaltet werden. Diese Funktion wird nachfolgend beim Aufbau des Simulationsbausteins erläutert.

Die Brücke besteht aus fünf Komponenten. Diese sind die anti parallel verschalteten B6-Thyristorbrücken, der Pulserzeugung, der Freigabe für die Thyristorbrücken, dem Stromregler für die Einstellung des Ankerstroms und der Erzeugung des Phasenanschnittwinkels

und dem Drehzahlregler. Zusätzlich besteht die Möglichkeit zur Umstellung von Stromregelung und Drehzahlregelung. Ebenfalls ist ein Soll-Wert-Filter für die Drehzahl eingesetzt.

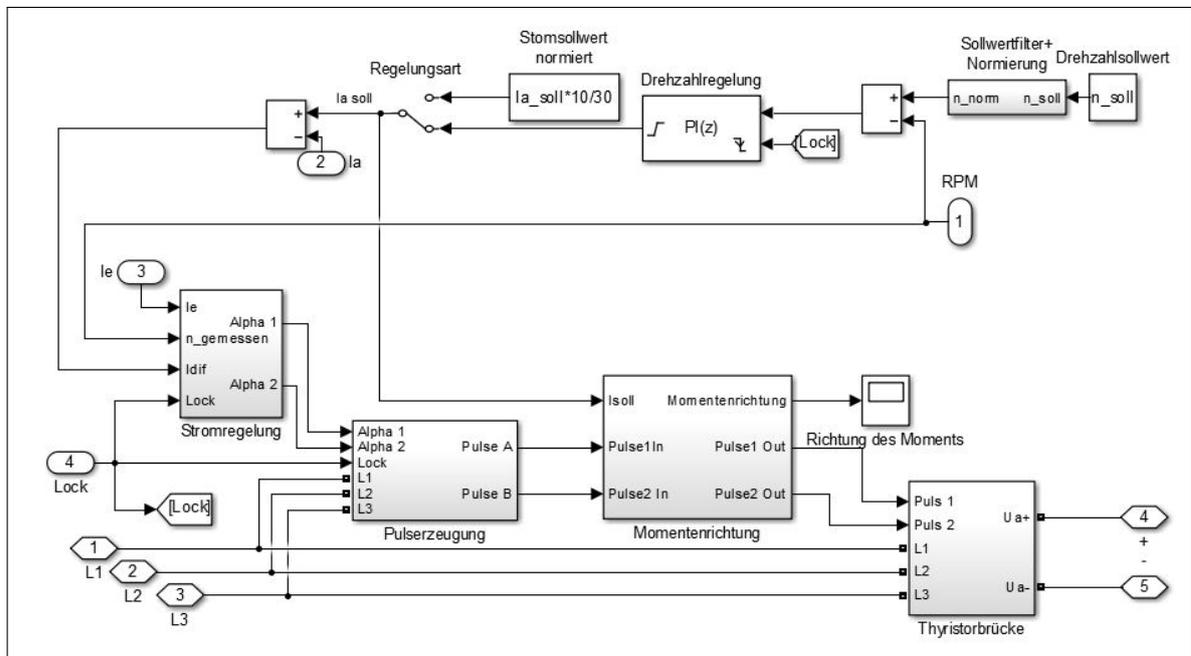


Abbildung 3.7: Blöcke der Realisierung des B6- Gleichstromrichters

### 3.7.1 Thyristor-Brücke

Die Thyristor-Brücke für die doppelte B6-Verschaltung hat neben den Eingängen für die Drehstromversorgung und die Ausgänge für den Ankeranschluss  $U_{a+}$  und  $U_{a-}$  ebenfalls noch Eingänge für die Zündimpulse. Die Thyristor-Brücken ist auf der Wechselstromseite parallel angeschlossen (L1 an A, L2 an B, L3 an C), sind allerdings auf der Gleichstromseite anti-parallel angeschlossen, damit die gesamte Brücke sowohl einen positiven als auch einen negativen Strom führen kann. Bei der Schaltung handelt es sich um eine kreisstromfreie Gegenparallelschaltung. Diese zeichnet sich dadurch aus, dass immer nur eine Thyristor-Brücke aktiv leitet.

Diese Schaltung führt dazu, dass der angeschlossene Motor alle vier Quadranten anfahren kann. Er kann bei positivem Strom sowohl motorisch mit positiver Spannung (Quadrant 1) als auch generatorisch mit negativer Spannung (Quadrant 2) im Rechtslauf betrieben

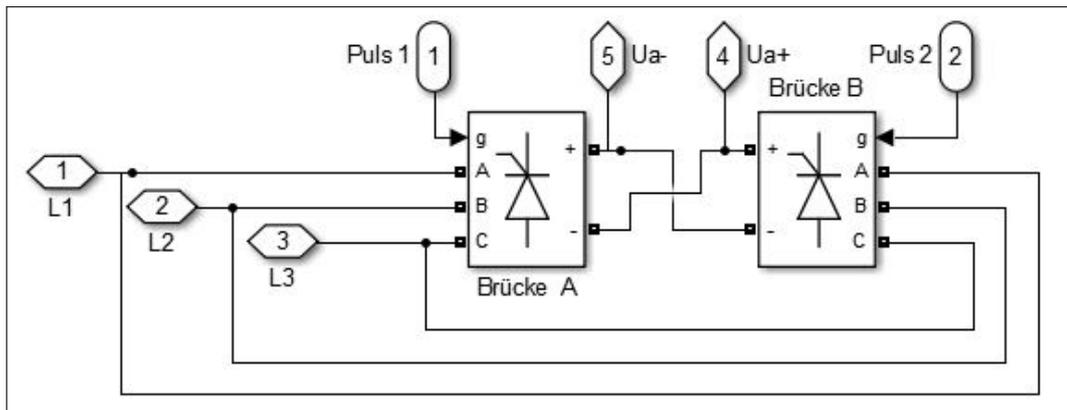


Abbildung 3.8: Verschaltung der zwei B6-Brücken

werden. Ebenso kann er mit negativem Strom und negativer Spannung motorisch (Quadrant 3) und positiver Spannung generatorisch (Quadrant 4) im Linkslauf betrieben werden. Hierbei befindet sich der Stromrichter während des motorischen Betriebs im Gleichrichterbetrieb und während des generatorischen Betriebs im Wechselrichterbetrieb (Abb. 3.9).

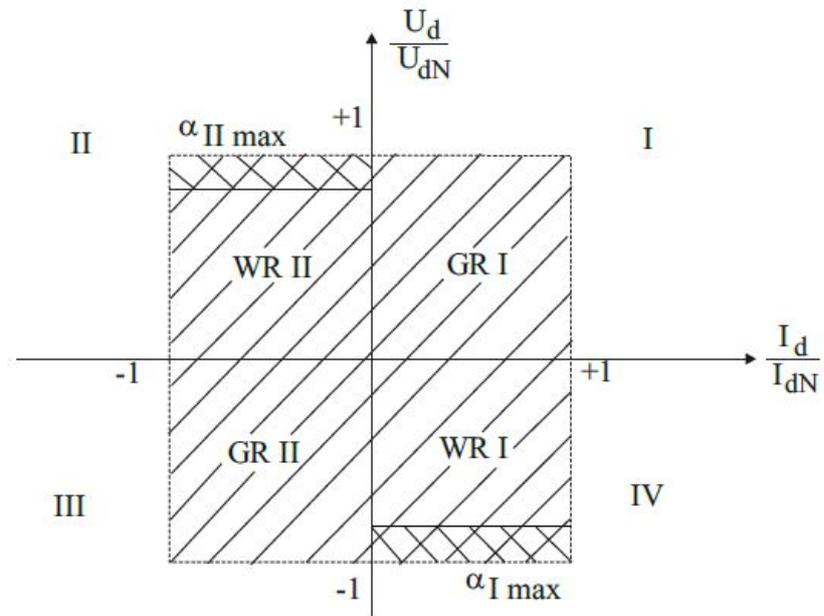


Abbildung 3.9: Vier Quadranten des Stromrichters (Schröder (2012, S. 104))

### 3.7.2 Freigabe der Thyristor-Brücken

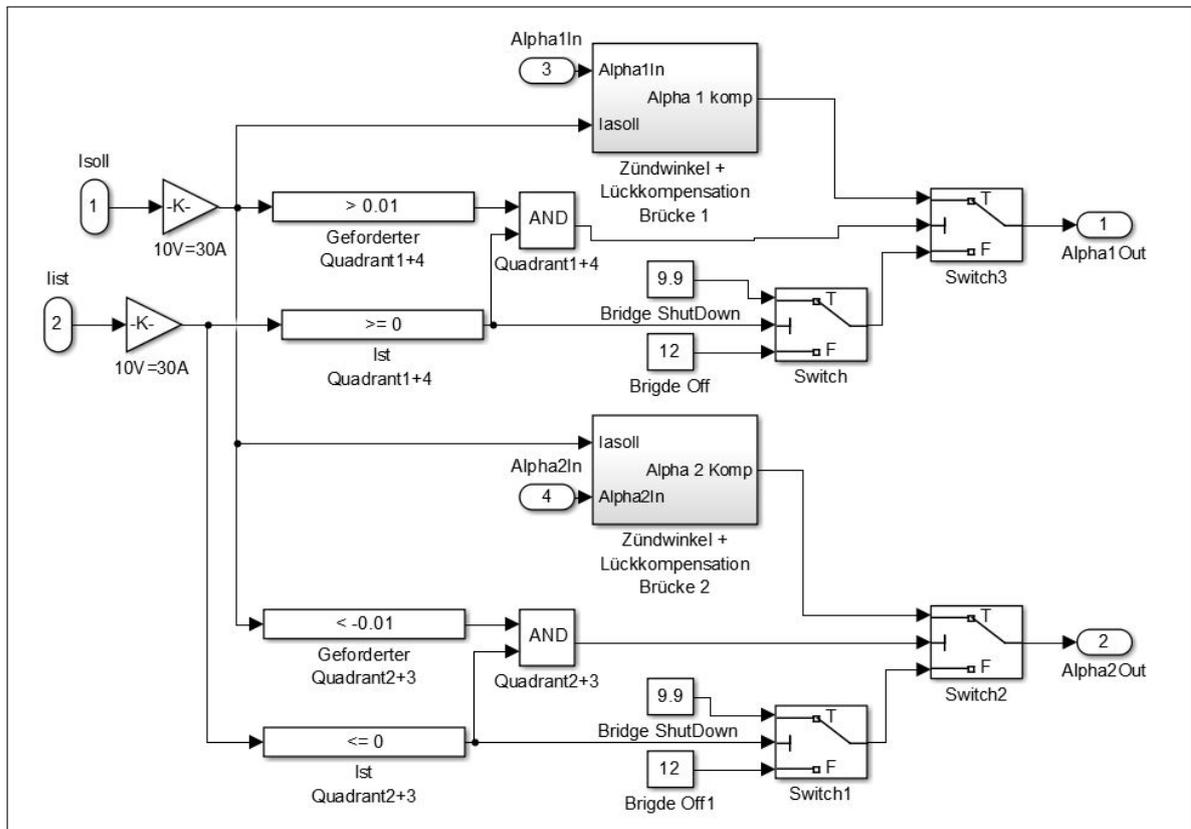


Abbildung 3.10: Freigabe von Pulsen der doppelten B6-Brücken

Beim Betrieb der Thyristor-Brücken dürfen nicht beide Brücken parallel aktiv sein. Dies führt zu Kurzschlüssen zwischen den Leitern. Der Block Freigabe Thyristorbrücke verhindert das Entstehen dieser Kurzschlüsse. Er hat als Eingang den Stromsollwert, den Stromistwert und die Ansteuerwinkel  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$ . Die Ausgänge sind die modifizierten Ansteuerwinkel. Für die Sperrung und die Zündwinkelvorgabe werden hierbei vier verschiedene Zustände erzeugt, die im folgenden für die Erzeugung des Ansteuerungswinkels für die Brücke 1 beschrieben werden.

#### Nichtlückender Betrieb

Im nichtlückenden Betrieb wird der vorgegebene Zündwinkel direkt durch den Block durchgeschaltet. Das Verhältnis von Zündwinkel zu fließendem Strom ist hierbei in guter Näherung linear.

### Lückender Betrieb

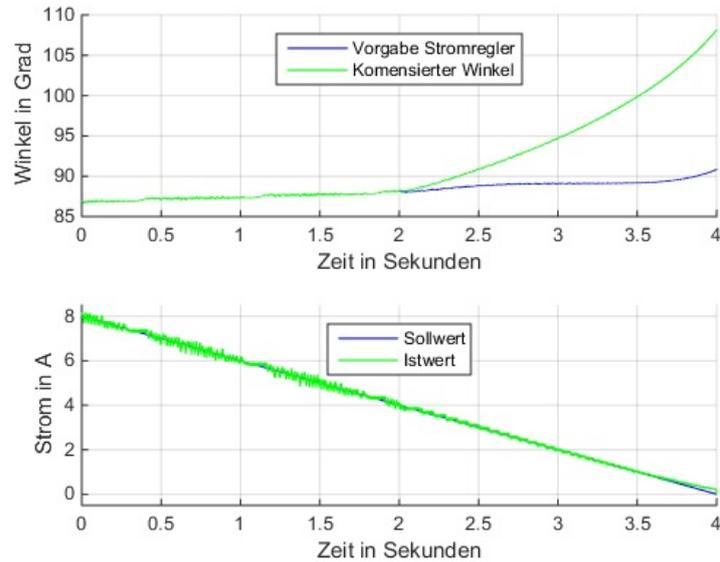


Abbildung 3.11: Kompensation des Phasenanschnittswinkel im Lückbereich

Fällt der Ankerstrom unter einen Wert von 4 A, beginnt der Strom zu lücken. In diesem Bereich ist die Kennlinie des Stromrichters nicht mehr linear und die Zeit, in der die Thyristoren leitend sind, sinkt. Für eine kleine Änderung des Stroms muss sich der Zündwinkel der Thyristor-Brücke wesentlich mehr verändern, als dies im nichtlückenden Betrieb der Fall ist. Im lückenden Betrieb bewirkt eine Änderung des Zündwinkels um 0.05 V eine Änderung des Ankerstroms von 8 A auf 4 A. Im lückenden Bereich ist eine Änderung von 0.62 V erforderlich, um den Strom von 4 A auf 0 A abzusenken. Die Dynamik des Reglers reicht im lückenden Betrieb nicht aus, die Stellgröße schnell genug zu verändern, um den Strom bei schnellen Sollwertänderungen zu regeln. Um das Verhalten zu optimieren, wird eine Umschaltung der Stellgröße im lückenden Betrieb hinzugefügt. Hierbei wurde zur Ermittlung für die Umschaltung Messungen durchgeführt, um das Zündwinkel-zu-Strom Verhältnis zu messen. Dieses wurde anschließend durch ein Polynom zweiter Ordnung Approximiert. Die Umschaltung kompensiert hierbei die Nichtlinearität, die durch den lückenden Strom entsteht. Der durch den Regler vorgegebene Zündwinkel ist somit auch unterhalb der Lückgrenze linear. Der Bereich umfasst hierbei  $-4A \leq I_a \leq 4A$ . Dies entspricht einer Spannung von  $-9.88V \leq \frac{U_{di}}{U_q} \leq 9.88V$ . Die Kompensation ist hierbei in allen Quadranten, die vom Stromrichter angefahren werden können, aktiv, da der Lückbereich und der Stromfluss vom Verhältnis von erzeugter Gleichspannung und Gegenspannung abhängt.

### Sperrvorgang

Ändert sich das Vorzeichen des Stromsollwerts, muss sich auch die aktive Brücke ändern. Die Brücke 1 ist für das Leiten des positiven Ankerstroms zuständig. Wenn ein negativer Ankerstrom gefordert wird, muss jedoch zunächst die Brücke 1 sperren, bevor die zweite Brücke die Arbeit aufnehmen kann. Dies geschieht, wenn der Stromsollwert negativ ist, der Stromwert aber noch positiv ist. In diesem Moment wird auf die Brücke ein Zündwinkel von  $150^\circ$  (8.33 V) geschaltet. Dieser erzeugt eine Gleichspannung von -467.65 V am Ausgang der Thyristor-Brücke. Diese führt zu einer schnellen Abnahme des Ankerstroms. Fällt dieser auf 0 A, sperrt die Thyristor-Brücke und der Sperrvorgang ist abgeschlossen (Schröder (2012, S. 105 f.)).

### Sperrbereich

Ist der Erregerstrom negativ, so ist die Brücke gesperrt. Demnach dürfen keine Zündimpulse für die Brücke erzeugt werden. Zündimpulse werden generiert, wenn der Wert der Integration für den Phasenanschnitt größer als der geforderte Zündwinkel ist (vgl. Kap. 3.6.4). Dies geschieht durch eine Spannungsvorgabe von 0 V bis 10 V. Im Sperrbereich wird dadurch eine Spannung von 12 V ausgegeben. Dadurch kann kein Zündimpuls erzeugt werden. Die Brücke wird somit nicht in den leitenden Zustand versetzt.

### 3.7.3 Pulserzeugung

Die Erzeugung der Zündimpulse für die B6-Brücke ähnelt der Erzeugung der Pulse für die B2-Brücke (vgl. Kap. 3.6.4). Die Spannungen werden als Phase-zu-Phase Spannungen gemessen und über Bandpassfilter mit einer Mittelfrequenz von 50 Hertz geglättet, um die Störungen der Phasenanschnittsteuerung und Oberschwingungen zu filtern. Anschließend werden die Signale und die Invertierung der Signale als Vektor in die Schaltreihenfolge der Thyristoren gebracht. Im nächsten Schritt werden Rampen durch einen Integrator erzeugt. Dieser gibt den Phasenwinkel der Spannung aus und wird beim positiven Nulldurchgang der Spannung zurückgesetzt. Wenn der Phasenwinkel den vom Regler vorgegebenen Phasenanschnittswinkel  $\alpha$  überschreitet, wird ein Puls erzeugt (siehe Kap. 3.6.4). Hierbei entsteht eine Totzeit  $t_{st}$  von 1.67 ms.

$$t_{st} = \frac{2 \cdot p}{f_{Netz}} = \frac{2 \cdot 6}{50\text{Hz}} = 1.67\text{ms} \quad (3.5)$$

Die Brücke wird Doppelgezündet simuliert. Thyristor 1 wird zu seinem definierten Zündzeitpunkt eingeschaltet. Zusammen mit einem zweiten aktiven Thyristor 6 leitet er für eine Winkellänge von  $60^\circ$  den Strom. Nach dem der Thyristor  $30^\circ$  der Sinusperiode leitend war, wird der Thyristor 2 gezündet. Um zu garantieren, dass Thyristor 1 nach wie vor aktiv ist, erhält auch Thyristor 1 einen weiteren Zündimpuls. Jeder Thyristor wird somit im Laufe einer Sinusperiode des Drehstroms zwei Mal - sprich doppelt - gezündet (Specovius (2015, S. 166)). Im letzten Block können die Pulse deaktiviert werden. Dies geschieht über den Sperreingang des Blocks.

### 3.7.4 Stromregler

Die Eingänge des Stromreglers sind die Regelabweichung, die Aktualwerte der Drehzahl und des Erregerstroms sowie ein Sperreingang. Der Stromregler besteht aus zwei Teilen. Zum einen wird, wie auch schon bei der Regelung des Erregerstroms, ein diskreter PI-Regler für die Regelung verwendet. Zum anderen erfolgt die Kompensation der Gegenspannung im Reglerblock. Hierbei wird die Spannung zunächst aus der gemessenen Drehzahl und dem gemessenen Erregerstrom berechnet (Gl. 2.3). Anschließend wird der berechnete Spannungswert zum Ausgang des Stromreglers addiert. Hierbei wird er noch mit der Verstärkung der Leistungselektronik gewichtet (siehe Kap. 6.2.2). Abschließend wird der Ausgang auf eine Spannung von 0 V bis 10 V gewandelt. Diese entspricht einem Zündwinkel von  $0^\circ$  bis  $180^\circ$ . Der Zündwinkel wird nun auf die Wechselrichterendlage ( $\alpha = 150^\circ$ ) und die Gleichrichterendlage ( $\alpha = 30^\circ$ ) begrenzt (Röther (2015b, S. 30)). Die Zündwinkel der zwei Brücken sind versetzt. Dadurch ist die resultierende Gleichspannung der beiden Brücken gleich (Abb. 3.12). Im Stillstand des Motors (keine Gegenspannung) wird der Nennstrom von 21 A mit einer Ausgangsspannung von 0.72 V erreicht. Dieser Wert weicht somit nur minimal von dem real gemessenen Wert ab. Der Stromregler für den Ankerstrom wird ebenfalls alle 1 ms ausgeführt.

$$\alpha_2 = 180^\circ - \alpha_1 \quad (3.6)$$

$$U_{di}(\alpha_1) = U_{dimax} \cdot \cos(\alpha_1) \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} U_{di}(\alpha_2) &= U_{dimax} \cdot (-\cos(\alpha_2)) = U_{dimax} \cdot (-\cos(180^\circ - \alpha_1)) \\ &= U_{dimax} \cdot \cos(\alpha_1) = U_{di}(\alpha_1) \end{aligned} \quad (3.8)$$

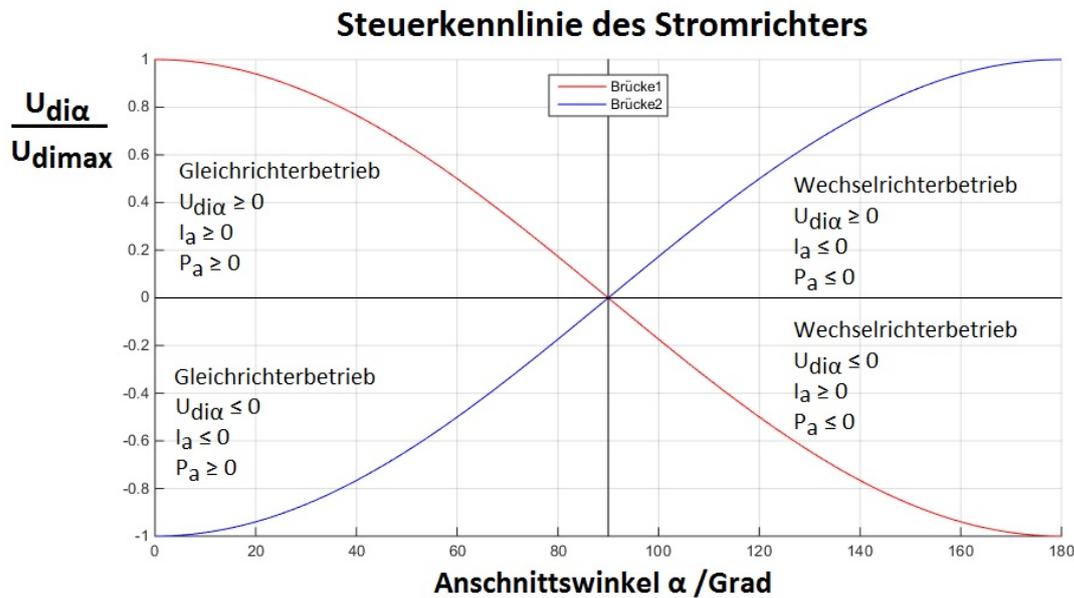


Abbildung 3.12: Steuerkennlinie des Stromrichters mit zwei B6-Brücken (erweitert nach Röther (2015b, S. 30))

Für die Kompensation der Gegenspannung gilt nach Schröder (2012, S. 89):

$$U_q = U_{di\alpha} = 1.35 \cdot U_{I0} \cdot \cos(\alpha) \quad (3.9)$$

$$\alpha = \arccos\left(\frac{U_q}{1.35 \cdot U_{I0}}\right) = \arccos\left(\frac{U_q}{1.35 \cdot 400V}\right) \quad (3.10)$$

### 3.7.5 Drehzahlregler

Wie auch der Ankerstromregler ist auch der Drehzahlregler als PI-Regler ausgelegt. Der Ausgang des Reglers ist hierbei durch die Strombegrenzung mit  $+/- I_{amax}$  begrenzt. Der Ausgabewert entspricht hierbei einer Normierung, bei der 30 A 10 V entsprechen. Hierbei wird der Drehzahlregler analog zum realen Stromrichter alle 1 ms berechnet.

Vor den Drehzahlregler ist die Sollwertglättung geschaltet. Über die Sperrung des Stromrichters wird ebenfalls der Sollwert auf 0 gesetzt. Somit wird der Sollwert auch bei Aufhebung der Sperrung geglättet.

## 4 Aufbau des Schaltschranks

In diesem Kapitel geht es um die Komponenten und um den Aufbau des Schaltschranks. Zunächst werden hierbei die verwendeten Komponenten für den Schaltschrank beschrieben. Hierbei wird zwischen dem Stromrichter, der das Kernstück des Schaltschranks bildet, dem Hauptstromkreis, in dem die Leistung für die Gleichstrommaschine geführt wird und dem Steuerstromkreis, der für Regelmodus und Sollwertvorgabe genutzt wird, unterschieden. Im Anschluss wird auf den Schaltschrank, die Materialliste und den Schaltplan eingegangen. Abschließend wird der Prozess des Aufbaus erläutert.

### 4.1 Stromrichter Synamics DC-Master

Kern des Schaltschranks ist der Stromrichter SIEMENS Sinamics DC-Master Typ D420/30 Mreq-GeG6V62 (Abb. 4.1). Dieser wurde zu Beginn der Arbeit vom Labor bereitgestellt. Er arbeitet im Vier-Quadranten-Betrieb, welcher über zwei antiparallel verschaltete Thyristor B6-Brücken realisiert ist. Diese sorgen für die Versorgung des Ankerstromkreises. Mit einem Nennstrom von  $I_{AN} = 30 \text{ A}$  und einer Nennspannung von  $U_{AN} = +/ - 420 \text{ V}$  ist der Stromrichter für den Motor geeignet. Zusätzlich wird über eine Thyristor B2-Brückenschaltung der Erregerstromkreis der Gleichstrommaschine betrieben. Der Stromrichter unterstützt einen Erregerstrom von  $I_{EN} = 5 \text{ A}$  und eine Erreger-spannung von  $U_{EN} = 325 \text{ V}$ , welches für den Betrieb der Gleichstrommaschine ebenfalls ausreichend ist.

Der Stromrichter besteht aus drei Komponenten:



Abbildung 4.1: Stromrichter SIEMENS Sinamics DC-Master [A29]

Tabelle 4.1: Nenndaten des Stromrichters nach [A30]

Größe	Formelzeichen	Wert
Nennfrequenz der Versorgungsspannung	$f_N$	50/60 [Hz]
Ankernennspannung AC	$U_{NA}$	3AC 400 [V]
Ankernennstrom AC	$I_{NA}$	25 [A]
Ankernennspannung DC	$U_{AN}$	+/- 420 [V]
Ankernennstrom DC	$I_{AN}$	30 [A]
Erregernennspannung AC	$U_{NE}$	2AC 400 [V]
Erregernennstrom AC	$I_{NE}$	5 [A]
Erregernennspannung DC	$U_{EN}$	325 [V]
Erregernennstrom DC	$I_{EN}$	5 [A]

- Converter-Module (CM)
- Control-Unit (CU)
- CBE-20 Zusatzkarte

Auf dem CM befinden sich die B6- und die B2-Thyristorbrücken. Diese Erzeugen die Gleichspannung für den Gleichstrommotor. Die CU beherbergt die Steueranschlüsse für Parametereingaben im Betrieb der Anlage. Sie stellt auch die Steuerspannung für den Steuerstromkreis in +24 V DC für Schalter und Schütze und in +/- 10 V DC für Sollwertvorgaben bereit. Die Zusatzkarte CBE-20 ermöglicht die Kommunikation mit dem Stromrichter über eine als PROFINET realisierte Ethernet Schnittstelle. Über diese Verbindung kann der Stromrichter konfiguriert werden. Die Nenndaten des Stromrichters können der Tabelle 4.1 entnommen werden. Zusätzliche Daten können den Handbüchern und der von Siemens bereitgestellten Dokumentation entnommen werden. Diese beziehen sich auf Teilbereiche des Stromrichters.

- Control Module für drehzahlveränderbare Gleichstromantriebe (Handbuch für CU) [A30]
- DC Converter (Handbuch für CM und Anschluss des Leistungsteils) [A31]
- Freie Funktionsblöcke (Handbuch über erweiterte Funktionen der CU) [A32]
- Listenhandbuch (Funktionspläne und Parameterlisten des Stromrichters) [A33]
- Maßzeichnung des Stromrichters [A34]

## 4.2 Komponenten des Hauptstromkreises

Über den Hauptstromkreis fließen die Leistungen, die für den Betrieb der Gleichstrommaschine benötigt werden. Zusätzlich befindet sich im Hauptstromkreis der Anschluss für den externen Lüfter des Motors, die Spannungsversorgung für den Gleichrichter, sowie die Versorgung für die internen Lüfter zur Kühlung des Schaltschranks.

Neben dem Stromrichter waren auch die Kommutierungsdrosseln für den Ankerstromkreis und den Erregerstromkreis sowie der Netzfilter schon zu Beginn der Arbeit im Labor vorhanden. Die Komponenten wurden nach Überprüfung der Nennwerte in den Schaltschrank eingebaut. Hierbei wurde auf die Vorgabe für den verwendeten Stromrichter geachtet.

Weitere Komponenten des Leistungsteil sind Sicherungen, ein Motorschutzschalter und ein Leistungsschütz.

### 4.2.1 Netzfilter V1

Der Netzfilter dient zur Filterung von hochfrequenten Signalen und Störungen. Er wird zwischen dem Versorgungsnetz und dem Stromrichter eingebaut. Der verwendete Netzfilter der Firma Siemens vom Typ SIEMENS 6SE7023-4ES87-0FB1 führt einen Nennstrom von 36 A. Der vom Stromrichter benötigte Strom beträgt für den Ankerdrehstromkreis  $I_{NA} = 25 \text{ A}$  und für den Erregerwechselstromkreis  $I_{NE} = 5 \text{ A}$ .

Über die Filtercharakteristik dieses speziellen Netzfilters lässt sich leider keine Aussage treffen, da die Kenndaten zum Bodeplot des Filters von Siemens unter Verschluss gehalten werden. Im Allgemeinen sind Netzfilter Tiefpässe, die aus Induktivitäten und Kapazitäten bestehen (Specovius (2015, S. 335)).

### 4.2.2 Kommutierungsdrosseln L1 und L2

Für den Betrieb von Stromrichtern, die mit Halbleitern betrieben werden, ist der Einsatz von Drosseln zwingend notwendig. Die Kommutierungsdrosseln begrenzen im Schaltmoment des Thyristors den fließenden Kurzschlussstrom. Dieser entsteht, wenn ein Brückenarm im Gleichrichter geschaltet wird. Zum Zündzeitpunkt des Thyristorarms leitet der Thyristorarm, der vor der neuen Zündung den Strom geleitet hat, immer noch den Strom. Die bereits aktiven Thyristoren können nicht ausgeschaltet werden. Sie verlieren erst ihre Leitfähigkeit,

wenn der durch sie fließende Strom auf  $I_T \leq 0$  A fällt. Zum Zündzeitpunkt sind somit zwei Brückenarme gleichzeitig leitend. Dadurch entsteht ein Kurzschluss zwischen den Thyristoren. Der Strom des Kurzschlusses wird durch die Kommutierungsdrosseln begrenzt, da sich der Strom durch die Drosseln nicht sprunghaft ändern kann und den ersten Brückenarm durch den konstanten Strom abschaltet.

Die Kommutierungsdrosseln werden hierbei auf den Bemessungsstrom des Stromrichters ausgelegt. Dieser entspricht im Falle des Stromrichters dem Nennstrom ( $I_{BA} = I_{NA}$ ). Die Induktivität wird hierbei nach der VDE-Vorschrift 0160 ausgelegt. Diese sagt aus: Ist die Kurzschlussleistung des Netzes mindestens um den Faktor 100 höher als die Anschlussleistung des Stromrichters, so treten bei Verwendung einer Kurzschlussleistung von 4 % Kommutierungseinbrüche mit maximal 20 % der Spitzenspannung des Netzes auf (Dzieia u. a. (2011, S. 104)). Folglich berechnet sich die Größe der Induktivität L1 für die Versorgung des Ankerdrehstromkreises und der Induktivität L2 für die Versorgung des Erregerdrehstromkreises wie folgt:

$$U_k = \frac{U_L}{\sqrt{3}} \cdot 0.04 = \frac{400\text{V}}{\sqrt{3}} \cdot 0.04 = 9.238\text{V} \quad (4.1)$$

$$X_{L1} = \frac{U_k}{I_{NA}} = \frac{9.238\text{V}}{25\text{A}} = 0.370\Omega \quad (4.2)$$

$$L_{L1} = \frac{X_{L1}}{2 \cdot \pi \cdot f_N} = \frac{0.037\Omega}{2 \cdot \pi \cdot 50\text{Hz}} = 1.178\text{mH} \quad (4.3)$$

$$X_{L2} = \frac{U_k}{I_{NE}} = \frac{9.238\text{V}}{5\text{A}} = 1.848\Omega \quad (4.4)$$

$$L_{L2} = \frac{X_{L2}}{2 \cdot \pi \cdot f_N} = \frac{1.848\Omega}{2 \cdot \pi \cdot 50\text{Hz}} = 5.885\text{mH} \quad (4.5)$$

Die Kommutierungsdrosseln für den Ankerstromkreis wird als dreiphasige Drossel eingesetzt. Die Kommutierungsdrosseln für den Erregerstromkreis wird hingegen als einphasige Drossel eingesetzt. Die Nenndaten der Drossel L1 und L2 können den nachfolgenden Tabellen entnommen werden.

Tabelle 4.2: Nenndaten der dreiphasigen Drossel L1 [A2]

Größe	Formelzeichen	Wert
Nennfrequenz der Versorgungsspannung	$f_N$	50 [Hz]
Nennspannung	$U_N$	3AC 400 [V]
Nennstrom	$I_N$	22.5 [A]
Spitzenstrom	$I_{max}$	31 [A]
Induktivität	$L$	0.889 [mH]
Verlustleistung bei Nennstrom	$P_{VN}$	62 [W]

Tabelle 4.3: Nenndaten der einphasigen Drossel L2 [A3]

Größe	Formelzeichen	Wert
Nennfrequenz der Versorgungsspannung	$f_N$	50 [Hz]
Nennspannung	$U_N$	AC 230 [V]
Nennstrom	$I_N$	7.2 [A]
Spitzenstrom	$I_{max}$	8 [A]
Induktivität	$L$	6.05 [mH]
Verlustleistung bei Nennstrom	$P_{VN}$	17.7 [W]

Über die Induktivität der Kommutierungsdrosseln kann nun die relative Kurzschlussspannung im Nennbetrieb errechnet werden.

$$X_{L1real} = L_{L1real} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_N = 0.889\text{mH} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50\text{Hz} = 0.279\Omega \quad (4.6)$$

$$U_{kL1} = I_N \cdot X_{L1real} = 25\text{A} \cdot 0.279\Omega = 6.98\text{V} \triangleq 0.03 \cdot U_L \quad (4.7)$$

$$X_{L2real} = L_{L2real} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_N = 6.05\text{mH} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50\text{Hz} = 1.90\Omega \quad (4.8)$$

$$U_{kL2} = I_N \cdot X_{L2real} = 5\text{A} \cdot 1.90\Omega = 9.5\text{V} \triangleq 0.0411 \cdot U_L \quad (4.9)$$

Die Kommutierungsdrossel L1 ist mit  $L1 = 0.889$  mH leicht unterdimensioniert. Sie leistet lediglich eine Kurzschlussspannung von 3 %. Die fehlende Induktivität wird durch den Hausanschluss des Labors gewährleistet. Das Labor wird über hauseigenen Versorgungstransformator versorgt. Diese zusätzliche Induktivität der Versorgung sorgt, da sie mit der Kommutierungsdrossel L1 in Reihe geschaltet ist, für eine Erhöhung der Kurzschlussspannung. Die zu klein dimensionierte Drossel L1 hat somit keinen negativen Einfluss auf den Stromrichter. Des weiteren liegt der Nennstrom des Stromrichters mit  $I_{NA} = 25$  A über dem Nennstrom der Drossel L1 von  $I_{ND} = 22$  A. Allerdings wird der Spitzenstrom  $I_{max} = 31$  A der Drossel mit dem Stromrichter nicht erreicht. Die Kommutierungsdrossel kann somit im Schaltschrank verbaut werden.

Die Kommutierungsdrossel L2 ist mit  $L1 = 6.05$  mH richtig dimensioniert. Sie hält eine Kurzschlussspannung von 4.11 % und liegt somit in dem, von der VDE-0160 vorgegebenen Bereich von  $4 \% \leq U_k \leq 10 \%$ . Die Drossel L2 konnte somit ebenso für den Schaltschrank verwendet werden.

### 4.2.3 Hauptschütz Q1

Das im Schaltschrank verbaute Hauptschütz ist das Schütz SIEMENS 3RT2027-1AP00 (Abb. 4.2, [A4]). Das Schütz wird über 230 V AC Angesteuert. Es kann eine dreiphasige Last (Klasse AC-3) mit einem Wechselstrom von 32A sicher abschalten. Die Lastklasse AC-3 beschreibt das Abschaltverhalten des Schützes. Dieses kann induktive Lasten trennen. Im Schaltschrank dient das Schütz der Zu- und Abschaltung der Drehstrom-Versorgungsspannung des Stromrichters. Dieser sendet das Steuersignal, dass das Schütz ein und ausschalten kann. Im Fehlerfall (z.B. ein Thyristor brennt durch) kann der Stromrichter das Schütz lösen und somit die Verbindung zur Versorgungsspannung unterbrechen. Durch diese Trennung kann der Stromrichter vor weiteren Schäden geschützt werden und der Anker des Motors selbst bei durchgebrannten Thyristoren vom Netz getrennt wird.



Abbildung 4.2: Hauptschütz Q1 [A4]

Beim Abschalten des Schützes können in der Schützspule große Spannungen auftreten. Um diese kontrolliert abzuführen wird als Überspannungsschutz ein Varistor vom Typ SIEMENS 3RT2926-1BD00 verwendet. Dieser Überspannungsschutz ermöglicht es, die Spannung, die beim Abschalten der Schützspule entsteht auf 275V zu begrenzen [A5].

### 4.2.4 Sicherungen F1-F6

Die Sicherungen im Schaltschrank sollen die verbauten Komponenten vor Überlastung durch zu hohe Ströme oder vor Kurzschlüssen schützen. Sie werden auf der Montageplatte des Hauptstromkreises verbaut und verdrahtet (Abb. 4.3). Die verbauten Sicherungen können in Tab. 4.4 eingesehen werden.



Abbildung 4.3: Verbaute Sicherungen im Schaltschrank

Tabelle 4.4: Verwendete Sicherungen und Motorschutzschalter im Schaltschrank

Typ	Nr.	Nennstrom	Stromkreis	Datenblatt
SIBA 5012406.32	F1	32 A	Drehstrom Stromrichter	[A12]
SIBA 5020106.32	F2	32 A	Gleichstrom Ankerstromkreis	[A13]
SIBA 5017906.4	F3	4A	Gleichstrom Erregerstromkreis	[A14]
SIEMENS 3RV2011-0FA10	F4	0.35-0.5A	Drehstrom Motorlüfter	[A15]
SIEMENS 5SY4101-7	F5	4A	Versorgung Steuerkreis	[A16]
ESKA 520.607 flink	F6	0.1A	Gleichstromsteller Drehgeber	[A17]

Die Sicherungen F1, F2 und F3 sind als Sicherungspatronen installiert. Sie haben die Auslösecharakteristik gR (flink) und sind damit für den Halbleiterschutz geeignet. Sie schalten sowohl bei Überstrom als auch bei Kurzschluss in schneller als 20 Millisekunden ab (Dzieia u. a. (2011, S. 98)). Vor allem im Kurzschlussfall ist die schnelle Abschaltzeit von Bedeutung, da so die Thyristoren des Stromrichters vor Zerstörung geschützt werden können. Die Sicherungspatronen der Sicherungen F1 und F2 wurden in Sicherungsautomaten der Firma SIBA verbaut [A18]. Die Sicherungspatronen der Sicherung F3 wurden in Sicherungsautomaten der Firma Ferraz verbaut [A19]. F2 und F3 sind Sicherungen, die speziell für Gleichstrom verwendet werden können. Anders als bei Wechselstrom reißt der Gleichstrom nicht durch einen Phasenwechsel in der Versorgung ab, sondern fließt kontinuierlich. Dadurch bleibt der Lichtbogen, der beim Durchbrennen der Sicherung entsteht länger erhalten. Gleichstromsicherungen sind daher speziell für die schnelle Löschung des Lichtbogens ausgelegt.

Der als F4 verbaute Leitungsschutzschalter schützt die Versorgung des Stromrichters, das Netzteil für die Gehäuselüfter und das Leistungsschutz Q1. Dieses verfügt der Leitungsschutzschalter über einen Bimetallauslöser. Das Bimetall erwärmt sich durch den Strom und beginnt sich zu verformen. Ist die Erwärmung und somit die Verformung zu stark, löst der Leitungsschutzschalter aus. Dieses Verhalten ist durch die langsame Erwärmung träge und löst daher bei kontinuierlichem Überstrom aus. Kurzschlüsse werden vom elektromagnetischen Auslöser getrennt. Eine Spule, durch die der Kurzschluss fließt, bewegt einen Metallkern im Inneren des Leitungsschutzschalters. Dieser löst die Sicherung aus. Die Auslösegeschwindigkeit ist hierbei für die Versorgung der Komponenten ausreichend.

Der Motorschutzschalter F5 schützt den Lüftermotor der Gleichstrommaschine. Wie der Leitungsschutzschalter besitzt auch der Motorschutzschalter einen Bimetall-Auslöser und einen elektromagnetischen Auslöser. Der Auslösestrom für den Bimetall-Auslöser ist von 0.35-0.5 A verstellbar. Für den Lüftermotor mit einem Nennstrom von  $I_{LN} = 0.33$  A wird die Sicherung auf 0.35 A eingestellt.

Die im Gleichstromsteller T7 für den Drehgeber verwendete Feinsicherung wird in Kap. 4.3.4 beschrieben. Sie schützt den Drehgeber vor Überstrom und löst bei einem Stromfluss von 0.1 A aus.

#### 4.2.5 Schaltschranklüfter M3 - M4

Die in der Decke des Schaltschranks installierte Lüftung wird ebenfalls über den Hauptstromkreis versorgt. Hierbei wird die Spannung durch das Netzteil TDK-Lambda DSP-10-12 12V/DC versorgt. Dieses kann auf einer Hutschiene montiert werden und erzeugt einen Ausgangsstrom von  $I_{NN} = 0.83$  A und eine Ausgangsleistung von  $P_{NN} = 12$  W, über die die Lüfter versorgt werden.

Die beiden Lüfter vom Typ BeQuiet PURE Wings 2 120mm werden an der Decke des Schaltschranks montiert. Sie fördern jeweils eine Luftmenge von  $87.33 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$  bei einer Leistungsaufnahme von  $P_{NL} = 1.08$  W. Sie können somit problemlos mit dem Netzteil betrieben werden.

Die im Schaltschrank abzuführende Wärmeleistung setzt sich hauptsächlich durch folgende Komponenten zusammen:

- Verlustleistung Stromrichter im Nennbetrieb: 180 W
- Verlustleistung Drossel L1 bei Nennstrom: 62 W
- Verlustleistung Drossel L2 bei Nennstrom: 18 W

Die Verlustleistung der Leitungen und anderen im Schaltschrank befindlichen Bauteile kann nicht bestimmt werden, kann aber im Vergleich zu den großen Verlustleistungen im Schaltschrank durch die Drosseln und den Stromrichter vernachlässigt werden.

## 4.2.6 Anschlüsse und Kabelquerschnitte

### Anschlüsse im Schaltschrank

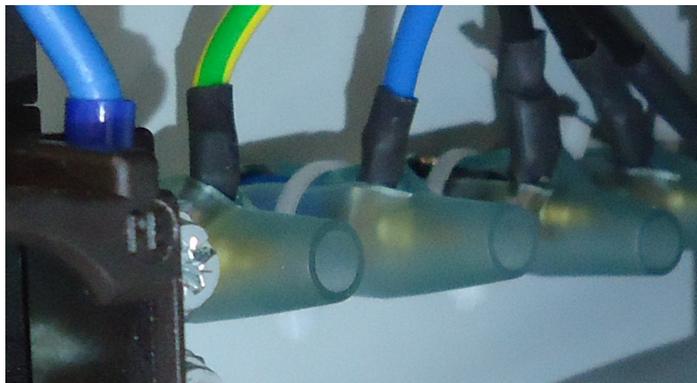


Abbildung 4.4: Anschlussbuchsen der Spannungsversorgung

Die verwendeten Klemmen der Firma Phoenix Contact vom Typ UK-4 [A7] verfügen über einen Nennstrom von  $I_N = 30 \text{ A}$  und einem Spitzenstrom von  $I_S = 41 \text{ A}$ . Sie sind sowohl im Regelbetrieb als auch im Kurzschlussfall ausreichend, da sie durch die Sicherungen geschützt werden.

Die Anschlussbuchsen zum Schaltschrank wurden mit 4 mm Sicherheitslaborbuchsen der Firma Multi-Contact realisiert. Diese führen einen Nennstrom von  $I_N = 30 \text{ A}$  und sind daher für den Schaltschrank geeignet. Für den Schutz gegen direktes Berühren sind die Anschlussbuchsen mit einem Kunststoffüberzug bespannt, der mithilfe eines Kabelbinders fest fixiert ist. Die Kabelschuhe sind zusätzlich mit einem Schrumpfschlauch isoliert (Abb. 4.4).

### Verwendete Leitungen

Alle Leitungen des Ankerstromkreises sind anhand des zulässigen Stromes ausgewählt. Die Versorgung im Labor ist über eine 32 A Sicherung abgesichert. Somit müssen die Leiter

einen maximalen Strom von 32 A problemlos führen können. In einem belüfteten Verdrahtungskanal ist eine Leitung mit einem Querschnitt von 4 mm<sup>2</sup> laut VDE 0100 Teil 430 bis zu 32 A belastbar (Dzieia u. a. (2011, S. 89)). Die Leitungen des Ankerstromkreises und alle Leitungen bis zur selektiven Sicherung sind daher als H05Z-K 90° 4 mm<sup>2</sup> verlegt. Nach den Sicherungen F3, F4 und F5 wurden Leitungen vom Typ H05Z-K 90° 1.5 mm<sup>2</sup> verlegt. Der Anschluss des Lüftermotors erfolgte mit einer Mantelleitung vom Typ 4 x 1.5 mm<sup>2</sup>. Die Gleichstrommaschine wurde mit einer Mantelleitung vom Typ 5 x 2.5 mm<sup>2</sup> angeschlossen. Dieser Querschnitt reicht aus, da der maximal transportierte Ankerstrom  $I_{AN}$  lediglich 21 A beträgt.

### 4.3 Komponenten des Steuerstromkreises

Der Steuerstromkreis setzt sich aus mehreren Bestandteilen zusammen. Er besteht aus dem Bedienpult, zwei Koppelrelais, den Optokopplern, dem Spannungswandler sowie dem Inkrementalgeber.

#### 4.3.1 Bedienpult



Abbildung 4.5: Bedienpult mit Beschriftungen

Das Bedienpult HITPULT 3003 [A10] der Firma WeroPlast besteht aus einem graphitfarbenen Kunststoffgehäuse und hat eine silberfarbig eloxierte Aluminium Frontplatte (Abb. 4.5).

Auf dieser sind die Bedienelemente verarbeitet. Hierbei handelt es sich um drei Kippschalter [A24] für den Betrieb über das Bedienpult oder das D-Space System, ein Kippschalter für das Ein- und Ausschalten der Anlage sowie ein Kippschalter für die Reglerfreigabe des Stromrichters. Die Regelungsart kann über einen Dreistufenschalter ausgewählt werden [A23]. Der Regelsollwert und die Strombegrenzung können über zwei  $10\text{ k}\Omega$  Potentiometer eingestellt werden [A21]. Diese sind mit Zählköpfen zur besseren Justierung versehen [A22]. Ebenfalls sind zwei BNC- Buchsen verbaut. An diesen kann der Regelsollwert und die Strombegrenzung ausgelesen werden.

Der Anschluss des Bedienpults erfolgt mit einem LiYCY  $16 \times 0,25\text{ mm}^2$  Kabel. Dieses wird über eine Kabelverschraubung in das Gehäuse geführt. Die Kabelverschraubung sorgt gleichzeitig für die Zugentlastung des Kabels. Am Schaltschrank ist das Kabel über einen 25-poligen D-Sub Stecker verbunden.

Die Beschriftung des Bedienpults erfolgte mit dem P-Touch Brother 9500PC und der Software P-touche Editor der Firma Brother, welche von Herrn Korpel bereitgestellt wurden.

### 4.3.2 Koppelrelais K1 und K2

Die Koppelrelais K1 und K2 der Firma Phoenix Contact vom Typ RIF-2-RPT-LDR-24DC/4x21 (Abb. 4.6) werden für die Umschaltung des Betriebs vom Bedienpult zur D-Space Box verwendet. Jedes Relais verfügt über vier Wechselkontakte und wird über eine 24 VDC Magnetspule betrieben. Über den Kippschalter "Hand/PC" des Bedienpults werden die Relais geschaltet. Über eine LED auf dem Kontaktblock ist der Schaltzustand des Relais ersichtlich. Leuchtet die LED wird die Anlage über die D-Space Box gesteuert [A11].



Abbildung 4.6: Hilfsschütz K1 und K2 [A11]

### 4.3.3 Optokoppler T3 - T6

Im Schaltschrank sind vier Optokoppler vom Typ Wago 859-793 (Abb. 4.7) verbaut. Sie dienen zur galvanischen Trennung für eingehende TTL-Signale des D-Space Systems zum Schaltschrank. Die zwei Systeme benötigen somit kein gleiches Massepotential. Die Optokoppler erkennen ein TTL-Signal im Bereich von  $1,2\text{ V} - 25\text{ V}$  als "high"-Signal an und

übertragen dieses in den Schaltschrank. Hierbei belasten sie das D-Space System mit einem maximalem Strom von 10 mA. Die Versorgung des Ausgangs erfolgt mit 24 VDC vom Stromrichter [A20].

#### 4.3.4 Spannungswandler T7

Der Spannungswandler T7 versorgt den Inkrementalgeber der Gleichstrommaschine (Abb. 4.8). Hierbei wird die Spannung von 15 V DC, die vom Stromrichter geliefert wird, in eine Gleichspannung mit 5 V umgewandelt. Diese Umwandlung wird von einem Festspannungsregler Typ 7805 [A26] durchgeführt. Die überschüssige Spannung von 10 V fällt dabei am Festspannungsregler ab und wird in Wärme umgewandelt. Zur Glättung der Spannung werden die vom Datenblatt geforderten Elektrolytkondensatoren in beiden Spannungsbereichen eingesetzt. Diese filtern niederfrequente Störungen aus der Gleichspannung. Zusätzlich wurden noch zwei Folienkondensatoren verbaut. Diese haben einen geringeren Innenwiderstand als die Elektrolytkondensatoren und können somit die hochfrequenten Störungen filtern.

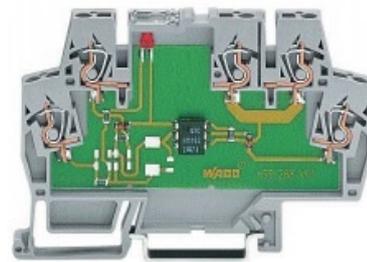


Abbildung 4.7: Optokoppler T3 - T6 [A20]

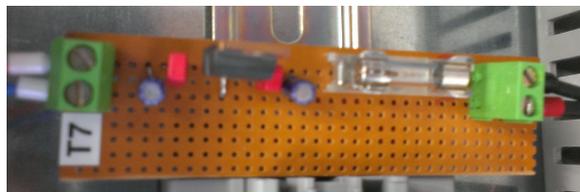


Abbildung 4.8: Spannungswandler T7

#### 4.3.5 Inkrementalgeber

Der im Lieferumfang der Gleichstrommaschine enthaltene Inkrementalgeber vom Typ SICK DFS60E-S1AA01024 (Abb. 4.9, [A25]) wird mit einer Spannung von 5 V DC und einem Strom von 40 mA über den Spannungswandler T7 versorgt. Er liefert drei Signale für die Rotation der Gleichstrommaschine. Die Signale A und B wechseln 1024 mal pro Umdrehung des Motors ihre Polarität. Zusätzlich sind die Signale um einen Phasenwinkel von  $90^\circ$  versetzt. Durch die hohe Anzahl an Polaritätswechseln und den Versatz der Signale ist eine sehr

genaue Drehzahlbestimmung mit integrierter Richtungsbestimmung möglich. Das dritte Signal Z liefert pro Umdrehung einen Puls bei einem Drehwinkel von  $0^\circ$ . Über diesen ist eine zusätzliche Drehzahlreferenz möglich.

Der Inkrementalgeber ist über einen neun-poligen D-Sub Stecker mit dem Gehäuse verbunden. Über die Leitung des Steckers werden sowohl die Steuerspannung von 5 V DC als auch die TTL- Signale des Drehgebers übertragen.



Abbildung 4.9: Inkrementalgeber

### 4.3.6 Anschlüsse und Kabelquerschnitte

#### Anschlüsse im Schaltschrank

Die Verdrahtung im Schaltschrank erfolgt mit Klemmen vom Typ UK-2,5 [A8]. Hierbei fließen im Steuerstromkreis keine hohen Ströme, nach denen die Klemmen ausgelegt werden müssen. Ein maximaler Querschnitt von  $2.5 \text{ mm}^2$  ist ebenfalls ausreichend.

Das Bedienpult ist über einen 25-poligen D-Sub Stecker angeschlossen. Ebenfalls ist ein 25-poliger D-Sub Stecker für den Anschluss des D-Space Systems vorgesehen. Dieser findet jedoch im Rahmen dieser Arbeit keine Verwendung. Der Inkrementalgeber ist über einen neun-poligen D-Sub Stecker verbunden. Der Anschluss für die Thermoschalter der Gleichstrommaschine wird durch eine Kabelverschraubung in den Schaltschrank eingeführt, da der Anschluss lediglich aus zwei Adern besteht.

#### Verwendete Leitungen

Der Stromrichter ist über zwei geschirmte Leitungen vom Typ LiYCY  $18 \times 0.5 \text{ mm}^2$  angeschlossen. Das Bedienpult wird über eine geschirmte Leitung vom Typ LiYCY  $16 \times 0.25 \text{ mm}^2$  versorgt. Die Verdrahtung im Schaltschrank erfolgt über Leitungen vom Typ H05Z-K  $90^\circ\text{C } 1.5 \text{ mm}^2$  und H05Z-K  $90^\circ\text{C } 1.0 \text{ mm}^2$ .

## 4.4 Der Schaltschrank

Der Schaltschrank der Firma Rittal vom Typ AE1055.500 [A9] wird für den Aufbau der Anlage verwendet.

Der Aufbau im Inneren des Schaltschranks erfolgt in zwei Ebenen. Auf der mitgelieferten Montageplatte, die die hintere Ebene bildet, wird der Hauptstromkreis verdrahtet. Auf dieser Platte befinden sich ebenfalls der Netzfilter, die Drosseln und der Stromrichter. Auf der zusätzlichen vorderen Montageplatte wird der Steuerstromkreis verdrahtet. Dies bietet den Vorteil, dass der Steuerstromkreis gänzlich vom Leistungsteil des Schaltschranks entfernt ist. Dadurch ist der Einfluss durch elektromagnetische Felder, die durch hohe Spannungen und Ströme im Leistungsteil des Schaltschranks entstehen, auf den Steuerstromkreis geringer.

Die Befestigung in die Laboreinrichtung erfolgte über zwei Beschläge, wie sie auch schon an anderen Schaltschränken verwendet wurden.

## 4.5 Materialliste

Alle verbrauchten Materialien sind in der Materialliste im Anhang [A37] zu finden. Hierbei sind ebenfalls das Schaltschrank- und Schaltplankürzel, die Bestellnummer, der Bezugsort sowie der Nettopreis zu finden.

## 4.6 Schaltpläne

Die Schaltpläne wurden mit der Software WSCAD SUITE Education 2015 erstellt. Mit dieser Software war es möglich die erforderlichen Elemente in den Schaltplan einzutragen.

Der Schaltplan wurde aus der vorangehenden Arbeit von Herrn Klotz übernommen und angepasst. Hierbei wurden ausgewählte Klemmplätze für die Aufteilung von Zuleitungen zu verschiedenen Klemmleisten (Bedienpult auf Klemmleiste X4, D-Space und Tachogenerator auf Klemmleiste X3) verändert. Ebenfalls wurden die Steckverbindungen der D-Sub Stecker mit in den Schaltplan eingetragen, sodass die Stecker bei Defekt nachgebildet werden können.

Der vollständige Schaltplan ist als WSCAD [A36] Projekt und als PDF [A36] in der Anlage zu finden.

## 4.7 Aufbau des Schaltschranks

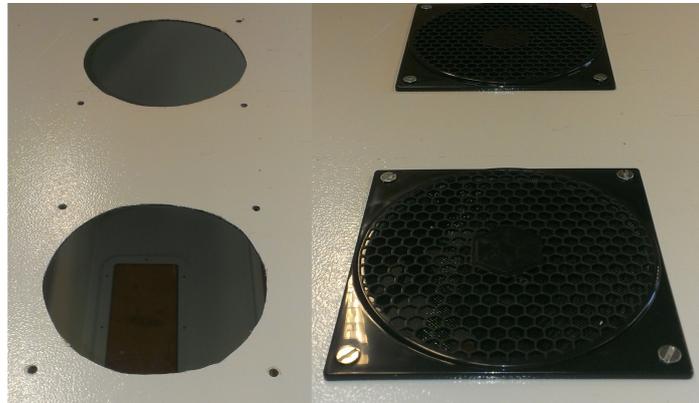


Abbildung 4.10: Löcher und eingesetzte Lüfter



Abbildung 4.11: Einspeisung und Hauptschalter

Der komplette Aufbau des Schaltschranks erfolgt in der Werkstatt des AL-Labors.

Auf der Oberseite des Schaltschranks sind zwei Löcher für die Einbringung der Lüfter gesägt (Abb. 4.10). An der linken Seite des Schaltschranks befinden sich die fünf Löcher für den Anschluss der Drehstromversorgung sowie der Hauptschalter, über den die Spannung zugeschaltet wird (Abb. 4.11). Die rechte Seite ist dem Anschluss der Steuergeräte und der Gleichstrommaschine vorbehalten. Hier befinden sich die zwei 25-poligen und der neun-polige D-Sub Stecker. Ebenfalls sind die drei Anschlussbuchsen für den Lüftermotor und die vier Anschlussbuchsen für die Gleichstrommaschine sowie eine PE-Buchse in die rechte Wand eingelassen (Abb. 4.12). An der Unterseite befinden sich drei weitere Lüfteröffnungen sowie eine Kabelverschraubung für den Temperaturschalter des Motors.

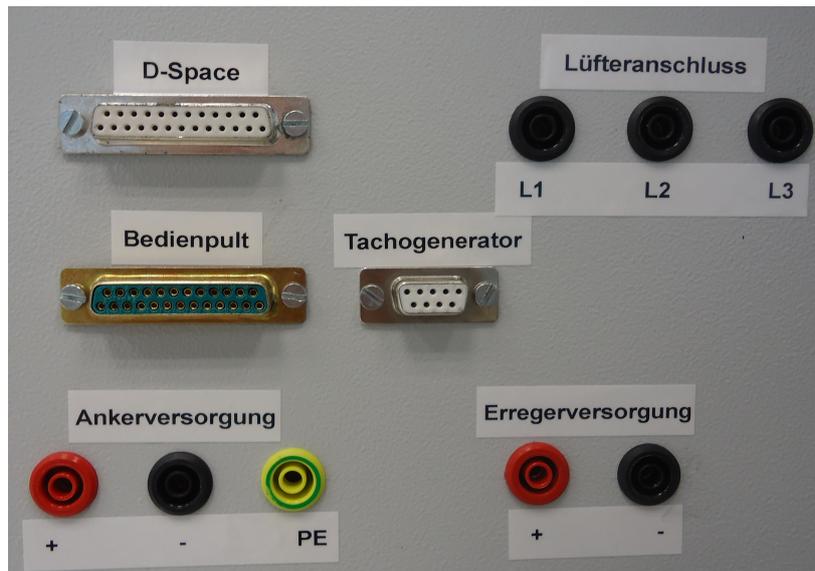


Abbildung 4.12: Ausgänge zum Motor und zu den Bedieneinheiten

Die Kabelkanäle und Hutschienen sind mit Nieten mit einem Durchmesser von 4.8 mm befestigt. Der Stromrichter, die Drosseln und der Netzfilter sind mit M4-M6 Schrauben auf der Montageplatte befestigt. Die zweite Montageplatte ist mit vier M10 Gewindestangen befestigt.

Die Verdrahtung des Schaltschranks erfolgt mit dem in Kapitel 4.2.6 und Kapitel 4.3.6 beschriebenen Leitungen. Zusätzlich ist ein Schutzleiter aus dem Schaltschrank geführt, welcher den Schaltschrank direkt mit den Labortischen verbindet. Dies führt zu einem geringeren Erdungswiderstand und somit zu einem effektiven Auslösen der Sicherungen. Mit der Verdrahtung ist der Aufbau des Schaltschranks abgeschlossen (Abb. 4.13).



Abbildung 4.13: Blick in den fertig verdrahteten Schaltschrank

# 5 Inbetriebnahme

In diesem Kapitel geht es um die Inbetriebnahme des Schaltschranks und des Stromrichters. Hierzu wird zunächst die Sicherheitsprüfung nach DIN VDE 0113 beschrieben. Anschließend wird der Stromrichter mit der von SIEMENS bereitgestellten Starter-Software in Betrieb genommen.

## 5.1 Prüfung nach DIN VDE 0113

Die Prüfung erfolgt nach der DIN VDE 0113. Der aufgebaute Prüfstand fällt unter diese Kategorie, da sowohl der Motor als auch der Schaltschrank transportfähig sind und an anderer Stelle erneut aufgebaut werden können.

Eine Prüfung bei der Inbetriebnahme teilt sich hierbei in drei Bereiche ein. Diese sind das Besichtigen, das Erproben und das Messen der Anlage. Beim Besichtigen wird die Anlage auf äußere Mängel geprüft. Hierbei müssen die Schaltpläne und die Typenschilder vorhanden und korrekt beschriftet sein. Ebenfalls ist festzustellen, ob ein Schutz gegen direktes Berühren spannungsführender Leiter gewährleistet ist. Auch sind Kabelquerschnitte, die Verlegung, der Anschluss aller Leiter und die Kennzeichnung des Schutz- und Erdungsleiters zu überprüfen. Die Erprobung bezieht sich auf die Funktion des Schaltschranks. Hierbei ist zu überprüfen, ob die Schutzeinrichtungen wie z.B. Notaus richtig funktionieren und die Anlage ordnungsgemäß arbeitet. Bei der Messung wird ermittelt, ob die Anlage die angegebenen Grenzwerte einhält. Unter diese fallen die Nennströme und Spannungen der aktiven Komponenten. Die Prüfung darf hierbei nur von einer Elektrofachkraft oder einer unterwiesenen Person durchgeführt werden.

Die Prüfung nach DIN VDE 0113 teilt sich in die fünf folgenden Schritte auf (Fluke Messfibel, 2011, S. 67ff) :

### 1. Sichtprüfung der Anlage:

- richtige Verwendung der eingebauten Komponenten im Bezug auf Einsatzzweck und Art des Einbaus

- korrekte Beschriftung und Bezeichnung der verwendeten Bauteile, der Klemmen und Gleichheit zum Schaltplan
  - Gewährleistung des Schutzes gegen direktes Berühren spannungsführender Leiter
  - korrekte Verlegung und Verschraubung des Schutzleitersystems im Schaltschrank
2. Messung des Schutzleiterwiderstands: Hierbei darf bei einem Querschnitt von  $6 \text{ mm}^2$  und einem Prüfstrom von  $10 \text{ A}$  der gemessene Spannungsabfall  $U_{R_{Low}} < 1 \text{ V}$  nicht überschritten werden.
  3. Prüfung des Isolationswiderstands: Anlegen einer Spannung von  $U_{Iso} > 500 \text{ V DC}$  von allen Leitern zum Schutzleiter. Hierbei müssen alle Schalter und Schütze des Hauptstromkreises geschlossen sein, sodass der komplette Leiter der Phase im Schaltschrank geprüft wird. Diese Prüfung ist notwendig für Stromkreise mit einer Spannung von  $U_{AC} \geq 25 \text{ V}$  und  $U_{DC} \geq 60 \text{ V}$ . Somit wird im Schaltschrank nur der Hauptstromkreis im AC und DC Bereich geprüft. Für den Steuerstromkreis entfällt die Prüfung. Für den Isolationswiderstand gilt:  $R_{Iso} > 1 \text{ M}\Omega$
  4. Durchführen einer Spannungsprüfung: Hierbei muss die doppelte Nennspannung, mindestens aber  $1000 \text{ V}$  Wechselspannung, für eine Prüfzeit von mindestens einer Sekunde angelegt werden. Die geforderte Leistung des Prüfgeräts beträgt hierbei  $500 \text{ VA}$ .
  5. Prüfung auf Restspannung: Bei Maschinen mit Steckvorrichtung, wie sie im Schaltschrank verwendet werden, dürfen an berührbaren Teilen eine Sekunde nach Abschalten der Anlage eine maximale Restspannung von  $U_{Rest} < 60 \text{ V}$  anliegen, damit die Gefahr eines elektrischen Schlags so gering wie möglich ist.

Die Messung wurde mit dem Profitest 204+ der Firma Gossen Metrawatt durchgeführt (Abb. 5.1). Dieses leistet sowohl die nötige Prüfspannung von  $500 \text{ V}$  als auch den Prüfstrom von  $10 \text{ A}$ . Lediglich für die Spannungsprüfung reicht die bereitgestellte Leistung des Profitest 204+ nicht (Gossen Metrawatt (2015)).

Die Prüfung wurde am 29.01.2016 vom Verfasser der Arbeit mit folgendem Ergebnis durchgeführt:

1. Die Sichtprüfung wurde erfolgreich durchgeführt. Die Anlage ist fachgerecht verdrahtet. Ein Schutz gegen direktes Berühren besteht in der ganzen Anlage.
2. Die Schutzleiterprüfung wurde erfolgreich bestanden. Der höchste gemessene Spannungsabfall betrug  $0.43 \text{ V}$  bei einem Widerstand im Schutzleiter von  $43 \text{ m}\Omega$ . Die Auflistung aller gemessene Schutzleiterwiderstände ist in Tabelle 5.1 zu finden.



Abbildung 5.1: Prüfgerät Profitest (Gossen Metrawatt (2015))

3. Die Prüfung des Isolationswiderstands wurde mit einer Spannung von  $U_{ISO} = 1000 \text{ V}$  DC durchgeführt. Bei allen durchgeführten Messungen ergab diese einen Widerstand  $R_{ISO} \geq 1 \text{ G}\Omega$ . Die Prüfung gilt somit als bestanden.
4. Mit dem vorhandenen Messgerät kann die Spannungsprüfung nicht durchgeführt werden. Aus diesem Grund wurde die Isolationsprüfung mit einer höheren Spannung als notwendig durchgeführt. Durch diese kann auf eine ausreichende Isolation geschlossen werden.
5. Die Prüfung auf Restspannung wurde an allen Anschlussdosen des Schaltschranks durchgeführt. Diese wurde bestanden.

Die von der DIN VDE 0113 geforderten Prüfungen wurden bis auf die Prüfung der Spannungsfestigkeit anstandslos bestanden. Für die Prüfung der Spannungsfestigkeit wurde eine erweiterte Isolationsprüfung durchgeführt, welche als ausreichende Alternative einzuschätzen ist. Die Anlage kann somit in Betrieb genommen werden.

Festzuhalten ist, dass der Schutzleiter der Anlage zum Rack des Labors bei einem Ortswechsel der Anlage erneut geprüft werden muss, bevor die Anlage an diesem in Betrieb genommen werden darf. Durch diese Nachprüfung muss die Sicherheit des Aufbaus am neuen Standort bewiesen werden.

Tabelle 5.1: Messpunkte und Messwerte der Schutzleiterprüfung

Prüfpunkt 1	Prüfpunkt 2	Widerstand [ $m\Omega$ ]	Spannung [V]
Schaltschrankgehäuse	L1	15	0.15
Schaltschrankgehäuse	L2	19	0.19
Schaltschrankgehäuse	V1	42	0.42
Schaltschrankgehäuse	DC-Master T1	18	0.18
Schaltschrankgehäuse	Montageplatte hinten	8	0.08
Schaltschrankgehäuse	Montageplatte vorne	32	0.32
Schaltschrankgehäuse	Schaltschranktür	15	0.15
Schaltschrankgehäuse	DC-Motor	43	0.43
Schaltschrankgehäuse	Befestigungsrack im Labor	29	0,29

## 5.2 Programmierung des Stromrichters

Für die Inbetriebnahme des Stromrichters wurde das Programm SIEMENS Starter in der Version V4.4 verwendet. Diese ist die aktuellste Version der Software. Die zu programmierende Firmware des Stromrichters hat die Version 1.4.1 und ist somit auch auf dem neusten Stand. Um eine Neuprogrammierung bei Datenverlust oder Austausch des Stromrichters mit einer anderen Firmware zu gewährleisten, wird anschließend die Programmierung durchgegangen.

Die Konfiguration des Stromrichters erfolgt in sieben Schritten:

- Erstellung des Projekts
- Konfiguration des Stromrichters auf die Maschinendatensätze
- Verschaltung der internen Logik für die verschiedenen Regelungsarten
- Konfiguration der Sollwerte, der Strombegrenzung und weiterer Parameter
- Laden des Programms in den Stromrichter

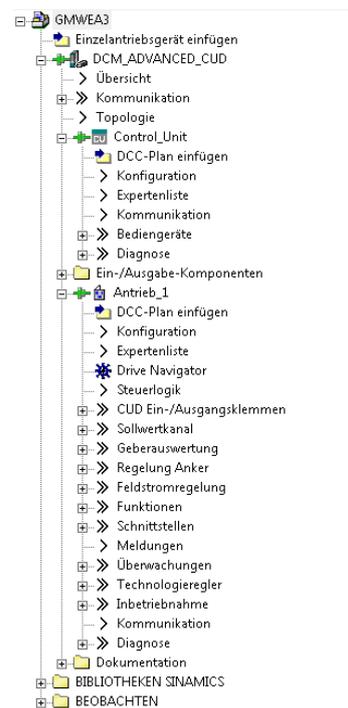


Abbildung 5.2: Navigationsbaum

- Durchführung von Optimierungsläufen
- Einstellung der Regler

### 5.2.1 Erstellung des Projekts

Das Projekt für die Programmierung des Stromrichters wurde mit dem Projektassistenten der SIEMENS Starter-Software erstellt. Hierbei wird zunächst der Projektname "GM-WEA2" für das Projekt vergeben. Im nächsten Schritt wird die Schnittstelle, mit der der Stromrichter mit dem PC verbunden ist, kalibriert. Die Kommunikation erfolgt hierbei über das Protokoll TCP/IP und mittels der normalerweise für das Oszilloskop vorgesehenen Ethernet- Schnittstelle. Dem Stromrichter wird die IP 192.168.0.199 zugewiesen (Abb. 5.3). Die Starter-Software kann sich nun mit dem Stromrichter DC-Master verbinden. Der Stromrichter trägt den internen Namen "DCM\_ADVANCED\_CDU", da er - zusätzlich zu der Standardausführung - die CBE-20 Karte zur Kommunikation über Ethernet beinhaltet (Abb. 5.4). Die Erstellung des Projekts ist nun abgeschlossen.

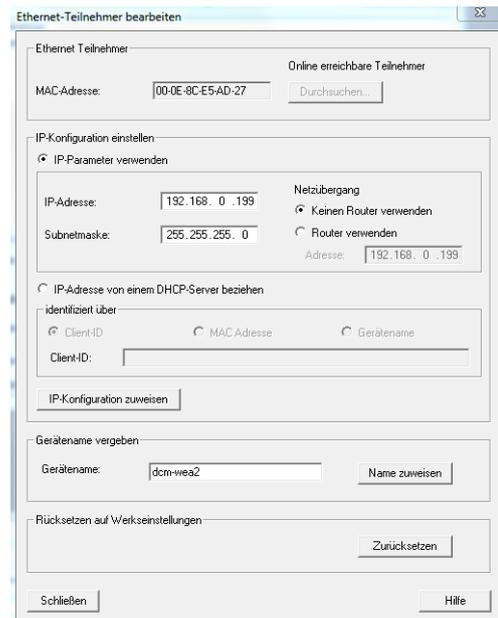


Abbildung 5.3: Einstellung der IP-Adresse

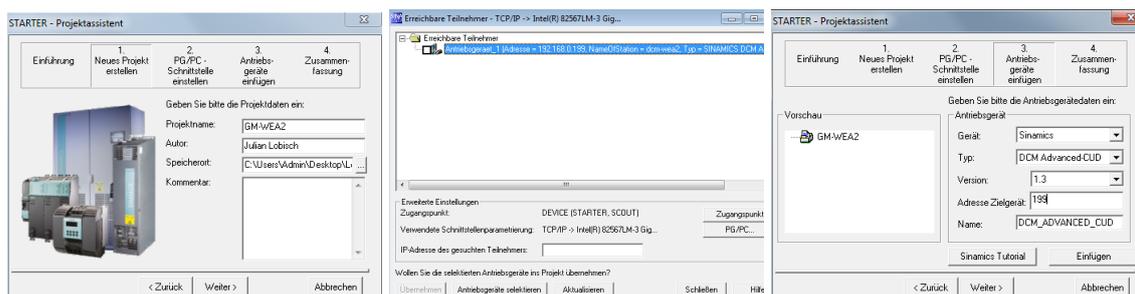


Abbildung 5.4: Erstellung des Projekts in SIEMENS-Starter

## 5.2.2 Konfiguration der Maschinendatensätze

Im folgenden müssen die drei Regeltypen festgelegt werden. Hierzu müssen drei separate Drive Data Sets (DDS) initialisiert werden. Diese können anschließend über die Eingänge p820[0] und p821[0] umgeschaltet werden. Sie entsprechen den Eingangsklemmen X177.16 und X177.17 des Stromrichters. Maximal können vier DDS für den Stromrichter erstellt werden. Die DDS werden wie folgt verwendet:

- DDS0 Drehzahlregelung ( $n$ )
- DDS1 Ankerstromregelung ( $I_A$ )
- DDS2 Ankerspannungsregelung ( $U_A$ )

### Konfiguration DDS0

Die Konfiguration des Maschinendatensatzes wird über einen Rechtsklick auf "DCM\_ADVANCED\_CDU" und dem Menüpunkt "Antrieb konfigurieren" gestartet. Nun müssen acht Aktionen zur Konfigurierung durchgeführt werden. Diese werden nun für jedes Konfigurationsfenster einzeln beschrieben. Die Schritte können ebenfalls in Abbildung 5.5 nachvollzogen werden.

1. Auswahl der Optionsbaugruppe "CBE20"
2. Namen für das Antriebsobjekt (Hier "Antrieb\_1")
3. Aktivierung der Funktion "Technologieregler" und "Freie Funktionsblöcke" zur logischen Programmierung
4. Auswahl des Leistungsteils mit Bestell-Nr. 6RA8018-6DV62-0AA0 für Drehstrom vom Typ 3 AC 400 V
5. Eingabe des Motor-Bemessungs-Ankerstroms 21.0 A, der Motor-Bemessungs-Ankerspannung 420 V und des Motor-Bemessungs-Erregerstroms 1.6 A
6. Auswahl des Standardgebers [3006] 1024 TTL A/B, Einstellung n-Regler Istwertauswahl zu [2] Impulsgeber und einer Bezugsdrehzahl von  $2000 \frac{1}{\text{min}}$
7. Steuerung des Erregerfeldes mit dem Hauptschütz (Auswahl [1]) und Aktivierung der Feldschächeregelung (Auswahl [2])
8. Bestätigung des Prozessdatenaustausches, der wichtigen Parameter und der Zusammenfassung (keine Änderung)

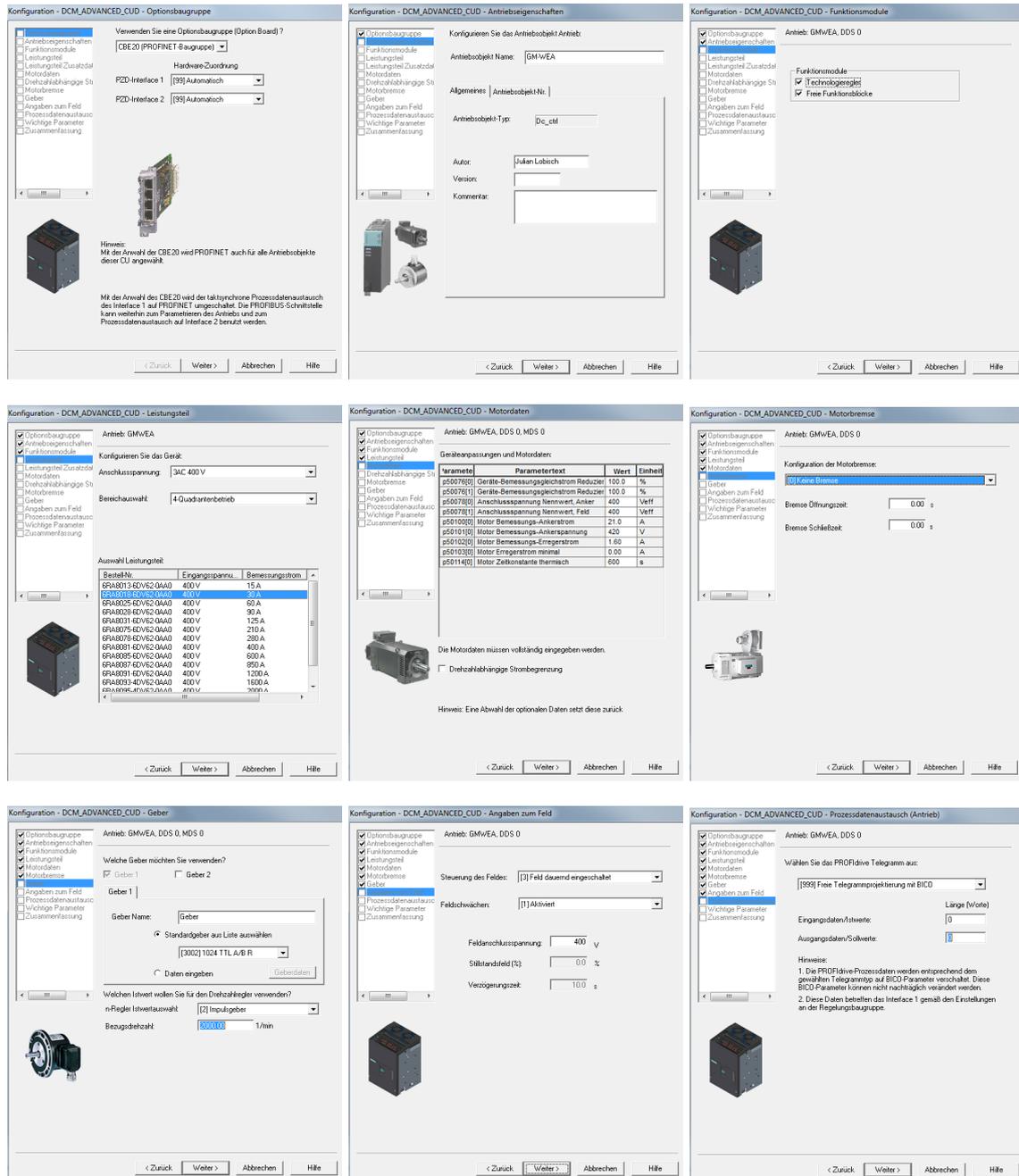


Abbildung 5.5: Anlegen des Datensatzes für die Steuerung der Drehzahlregelung

Nach Abschluss der Konfigurationsschritte ist der Maschinendatensatz fertig konfiguriert. Er erscheint nun als "Antrieb\_1" im Navigationsbaum (Abb. 5.2) und enthält alle Konfigurationsdaten. Wichtige Parameter wie Sollwerte und die Verschaltung der Regler werden bei der Erstellung des DDS automatisch vorgenommen und müssen nicht manuell verschaltet werden.

### Konfiguration DDS1 und DDS2

Im Navigationsbaum unter "Antrieb\_1/Konfiguration" können nun DDS1 und DDS2 konfiguriert werden. Hierbei ist DDS1 identisch zu DDS0 und kann über den Button kopieren übernommen werden. DDS2 ist bis auf eine Abweichung identisch zu DDS0. Sowohl bei der Stromregelung als auch bei der Drehzahlregelung ist die Feldschwächungsregelung aktiv. Diese erlaubt es, den Motor über seine Nenndrehzahl von  $1420 \frac{1}{\text{min}}$  zu fahren und dabei die Ankernennspannung von 420 V nicht zu überschreiten. Bei der Spannungsregelung im DDS2 muss die Feldschwächeregelung jedoch deaktiviert werden. Diese würde dazu führen, dass der Motor bei konstanter Ankerspannung und schwächer werdendem Feld immer mehr beschleunigen würde. Dieses Verhalten ist jedoch unerwünscht.

### 5.2.3 Verriegelung der Regelungsarten

Im Betrieb der Anlage darf es nicht möglich sein, zwischen zwei Regelungsarten zu springen. Um dieser Fehlbedienung entgegen zu wirken, müssen die Regelungsarten im Programm verriegelt werden. Hierfür werden Flipflops verwendet, welche ein dominantes Rücksetzverhalten haben. Für jede Regelungsart wird je ein Flipflop benötigt. Zu den freien Funktionsblöcken des Leistungsteils, welcher zwei Flipflops liefert, wird ein zusätzlicher Flipflop aus den freien Funktionsblöcken der CU verwendet. Hierbei setzt man unter dem Pfad "DCM\_ADVANCED\_CUD/Control\_Unit/Konfiguration/Funktionsmodule/" (Abb. 5.2) den Parameter "Freie Funktionsblöcke". Zusätzlich muss für die Aktivierung der Stromregelung noch die Sollwertvorgabe geändert werden. Dies geschieht dadurch, dass der Parameter p50601[0], welcher vor dem Strombegrenzer liegt, über die Aktivierung der Stromregelung (DSS1) zwischen dem Sollwert und dem Ausgang des Drehzahl und Spannungsreglers umgeschaltet werden kann. Ebenso muss der Istwert des Drehzahlreglers für die Spannungsregelung umgestellt werden. Dieser wird mit dem Aktualwert der Ankerspannung verschaltet. Die Verschaltungen werden hierbei über die Expertenliste der CU und des Antriebs nach dem Funktionsplan (Abb. 5.2.3) vorgenommen.

Die Bearbeitung der einzelnen Logikbausteine erfolgt in sogenannten Ablaufgruppen. Diese müssen sowohl in der CU über den Parameter p20000[1] für die Ablaufgruppe 1 und in dem

Antrieb über den Parameter p20000[0] für die Ablaufgruppe 0 gesetzt werden. Zusätzlich müssen die einzelnen Operatoren den Ablaufgruppen zugeordnet werden. Ein Operator besteht hierbei aus drei Parametern: Den Eingängen, den Ausgängen und der Zuordnung zu der Ablaufgruppe des Bausteins.

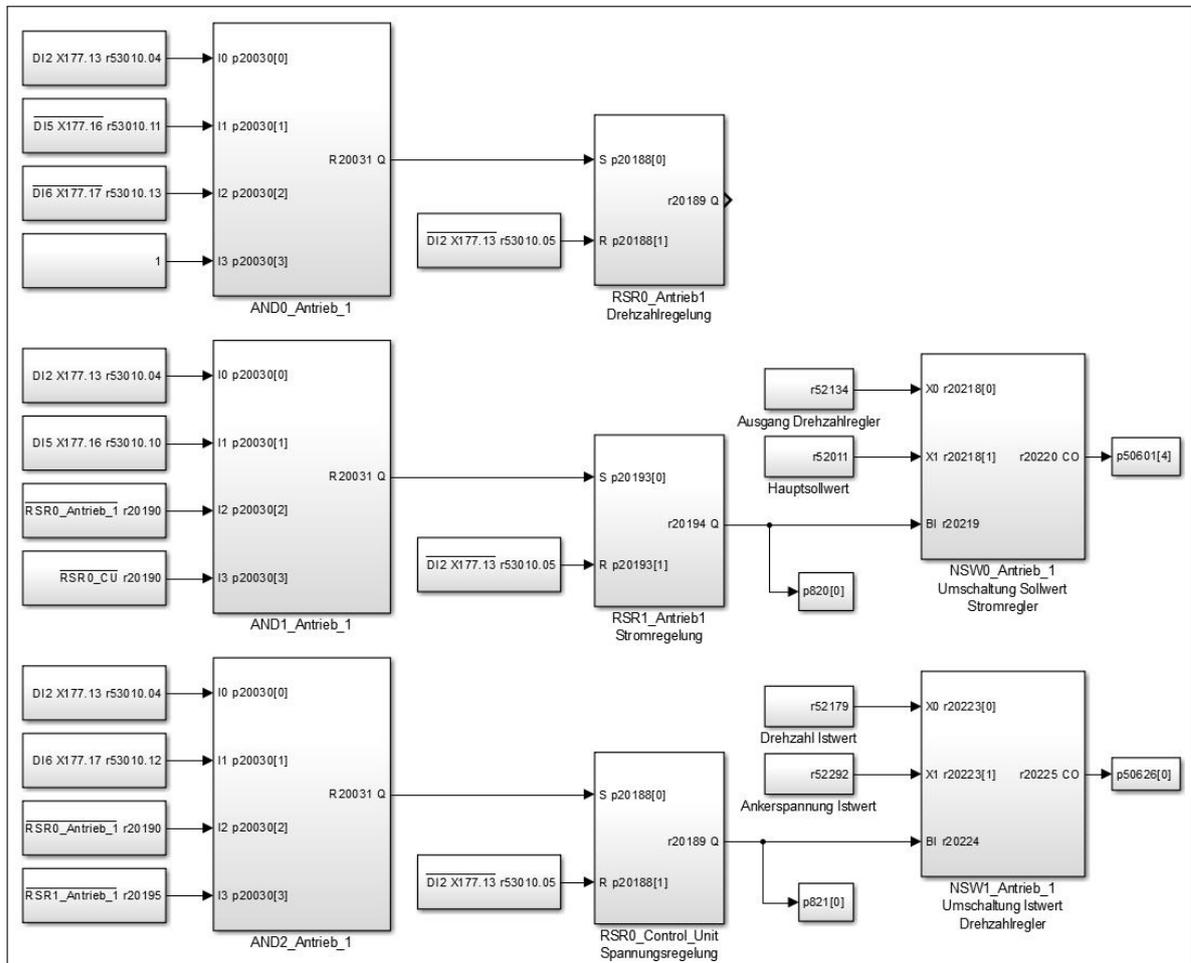


Abbildung 5.6: Logische Programmierung der Regelungsarten mit Ist- und Sollwert Umschaltung

## 5.2.4 Einstellung der erweiterten Parameter

Die folgenden Einstellungen werden alle in der Expertenliste des Antriebs vorgenommen. Die angegebenen Parameternamen sind Werte aus dieser Liste, die verändert werden müssen.

### Sollwertbegrenzung

Für die Drehzahlregelung (DSS0) muss keine Begrenzung des maximalen Wertes vorgenommen werden. Es wird der eingestellte Wert der Bezugsdrehzahl des Drehgebers von  $2000 \frac{1}{\text{min}}$  verwendet.

Der Sollwert der Stromregelung (DSS1) wird durch die im Folgenden beschriebene Strombegrenzung realisiert. Bei der Stromregelung kann die Maschine durch das vom Strom erzeugte Drehmoment eine Drehzahl erreichen, die über der Bezugsdrehzahl von  $2000 \frac{1}{\text{min}}$  liegt. Die Abschaltung der Anlage erfolgt dann aus Sicherheitsgründen bei einer Drehzahl von  $2250 \frac{1}{\text{min}}$  mit einer Störung.

Der Sollwert für die Spannungsregelung (DSS2) muss angepasst werden. Der Stromrichter liefert eine maximale Ausgangsspannung von 540 V. Die Spannung des Ankers soll jedoch die Nennspannung der Gleichstrommaschine von 420 V nicht überschreiten. Hierzu wird der Parameter p50701[2], welcher die Sollwertanpassung vornimmt, auf  $\frac{420\text{V}}{540\text{V}} = 0.7778 = 77.78 \%$  gesetzt.

### Strombegrenzung

Da sich der Bemessungsstrom des Stromrichters mit 30 A und der Nennstrom der Gleichstrommaschine mit 21 A unterscheiden, muss eine Anpassung des Maximalstroms vorgenommen werden. Hierfür wird der Parameter p50701[1] auf  $\frac{21\text{A}}{30\text{A}} = 0.7 = 70 \%$  gesetzt.

Für die zusätzliche Strombegrenzung durch das Potentiometer muss der analoge Eingang AI2 verschaltet werden. Hierzu wird der Wert r52017, welcher für AI2 steht, mit p50366[0] verbunden. Somit kann über das Potentiometer der maximale Strom vorgegeben werden.

### Hochlaufgeber

In der Regelkette ist in der Standardkonfiguration ein Hochlaufgeber für den Drehzahlsollwert eingeschaltet. Dieser soll jedoch in der Laboreinrichtung deaktiviert werden. Hierzu müssen in der Konfiguration des Hochlaufgebers unter "Antrieb\_1/Sollwertkanal/Hochlaufgeber/Einstellungen für Hochlaufgeber" die Werte für die Hochlaufzeit und die Rücklaufzeit auf Null gesetzt werden. Dies muss für alle drei Antriebsarten durchgeführt werden. Hierzu müssen die Antriebsdatensätze DDS0 - DDS2 durchgeschaltet werden. Dies ist über eine Dropdown-Liste am unteren Fensterrand möglich.

### **Soll-/Istwert Störung**

Bei der Benutzung der Anlage können große Störwerte im Soll-/Istwert-Vergleich beim Drehzahlregler auftreten. Diese entstehen zum einen durch das schnelle Umschalten des Sollwerts, aber auch im Modus der Stromregelung. Bei diesem wird der Drehzahlregler trotzdem vom Programm im Stromrichter berechnet. Da der Drehzahlregler allerdings keinen Einfluss auf die Stromregelung hat, treten große Abweichungen in der Soll/Ist-Differenz des Drehzahlreglers auf. Um zu verhindern, dass der Stromrichter in den Fehlermodus schaltet, müssen folgende Parameter für die Störschwelle auf 100 % gestellt werden:

- p50373[0-3]
- p50376[0-3] - p50378[0-3]
- p50388[0-3] - p50390[0-3]

### **Fehlerquittierung**

Falls im Betrieb des Stromrichters dieser in den Fehlermodus schaltet, muss dieser Zustand zurückgesetzt werden können. Der Fehlerzustand wird im Display des Stromrichters mit der Ziffer "10.3" gekennzeichnet. Fehler sollen durch deaktivieren der Reglerfreigabe zurückgesetzt werden. Hierzu muss der Parameter p2103[0] mit r53010.5 verschaltet werden. Der Betrieb kann nach der Quittierung mit dem Aktivieren der Reglerfreigabe fortgesetzt werden. Sollte der Fehler nicht durch das Quittieren behoben sein, muss der Grund der Störung behoben werden.

### **Ausgabeparameter**

Auf dem Display des Stromrichters soll die aktuelle Drehzahl angezeigt werden. Hierfür muss der Parameter p5[0] den Wert 22 erhalten. Zusätzlich wird der Parameter p5[1] auf Null gesetzt. Somit wird auf p22[0] referenziert. Dieser Parameter enthält die aktuelle Drehzahl der Gleichstrommaschine.

Die BNC-Buchsen erhalten Spannungswerte für den Sollwert und die Strombegrenzung. Hierzu muss der Parameter p50750 für den analogen Ausgang AO0 mit dem Rohwert des Hauptsollwertes r52010 verschaltet und der Parameter p50755 für den analogen Ausgang AO1 mit dem Rohwert der Strombegrenzung r52016 verschaltet werden.

### 5.2.5 Laden in den Stromrichter

Nach der Konfigurierung muss diese nun in den Stromrichter übertragen werden. Hierfür muss der Button “Zielgerät verbinden“ im oberen Rand des Fenster geklickt werden. Die Software ist nun Online mit dem Stromrichter verbunden. Alle Werte, die in den verschiedenen Fenstern des Reglers eingesehen werden können und in der Expertenliste zu finden sind, sind nun die Live-Daten des Stromrichters. Über den Befehl “Zielgerät/Laden ins Zielgerät...” wird das Projekt in den Stromrichter geladen. Hierbei muss die Option “RAM nach ROM kopieren“ gesetzt werden (Abb. 5.7). Die Option “RAM nach ROM kopieren“ ermöglicht es dem Stromrichter das Projekt intern zu speichern. So kann der Stromrichter auch nach einem Wegfall der Versorgungsspannung mit den vorgenommenen Einstellungen neu gestartet werden.

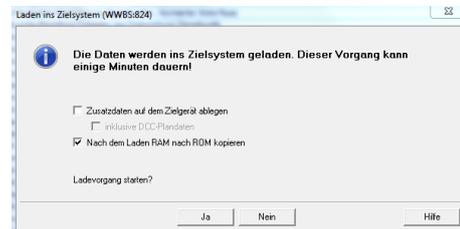


Abbildung 5.7: Laden in den Stromrichter

Bei der Änderung von Parametern im Onlinemodus werden diese nicht im Projekt zwischengespeichert. Änderungen, die im Onlinemodus gemacht werden, müssen somit gespeichert werden, sodass die auch im Projekt in der Starter-Software enthalten sind. Wird ohne Speicherung das Projekt neu in den Stromrichter geladen, werden die im Onlinemodus vorgenommenen Veränderungen überschrieben.

### 5.2.6 Optimierungsläufe

Über die Starter-Software können bei der Inbetriebnahme Optimierungsläufe vorgenommen werden. Diese optimieren die Regelparameter und Messen die Stromkreise aus. Die folgenden Optimierungsläufe wurden während der Inbetriebnahme gefahren:

1. Feldstromregelung
2. Ankerstromregelung
3. Drehzahlregelung
4. Feldschwächeregelung
5. Reibungskennlinie

### **Durchführung eines Optimierungslaufes**

Die Optimierungsläufe können in der Starter-Software im Navigationsbaum unter "Antrieb\_1/Inbetriebnahme/Optimierungslauf" gestartet werden. Hierzu ist der gewünschte Optimierungslauf anzuwählen. Nach dem Drücken des Buttons Aktivieren kann der Optimierungslauf innerhalb von 30 Sekunden gestartet werden. Hierfür wird der Antrieb auf dem Bedienpult eingeschaltet und die Reglerfreigabe erteilt. Nach der Durchführung des Optimierungslaufes werden die angepassten Parameter im Ergebnisfeld im Fenster angezeigt. Um die Parameter in das Starter-Projekt zu übernehmen, muss nach der Durchführung der Optimierungsläufe die Funktion "Laden in PG" (Programm) durchgeführt werden. Diese Funktion lädt alle Daten vom Stromrichter in das Starter-Projekt. Andernfalls würden die Daten nicht in das Projekt übernommen werden und die Optimierungsläufe müssten wiederholt werden.

### **Verfahren der Optimierungsläufe**

Die Optimierungsläufe für die Feldstromregelung, die Ankerstromregelung und die Drehzahlregelung bestimmen die Trägheit der jeweiligen Kreisläufe. Nach der Messung legen sie neue Parameter für die Regelung der jeweiligen Bereiche fest. Bei den Stromregelungen dreht sich der Motor nicht. Bei der Drehzahlregelung fährt der Motor an um das Trägheitsmoment der Gleichstrommaschine zu bestimmen.

Bei dem Optimierungslauf für die Feldschwächeregelung wird die Gleichstrommaschine auf 80 % ihrer Nenndrehzahl gefahren. Nun wird das Feld schrittweise geschwächt. Hierbei wird die Drehzahl des Motors konstant gehalten. Über die kontrollierte Absenkung der Feldstärke des Erregerstromkreises werden so die Parameter für die Feldschwächung bestimmt.

Während des Optimierungslaufs für die Reibungskennlinie wird der Motor in fünf-Prozent-Schritten vom Stillstand bis zur maximalen Drehzahl von  $2000 \frac{1}{\text{min}}$  gefahren. Hierbei wird der Strom gemessen, der für die Erhaltung der Drehzahl aufgewendet werden muss, um das Reibmoment der Gleichstrommaschine zu bestimmen.

### **Auswirkung der Feldschwächeregelung**

Wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben, wird das Feld im Erregerkreis gesenkt, damit die Gegenspannung der Gleichstrommaschine sinkt und somit ein höherer Ankerstrom fließen kann.

Dadurch kann eine höhere Drehzahl als die Nenndrehzahl erzielt werden. Ziel der Feldschwächeregelung ist hierbei, dass die Spannung  $U_q$  über dem Motor bei steigender Drehzahl über der Nenndrehzahl konstant bleibt. Um dies zu überprüfen wurde die Gleichstrommaschine im Feldschwächebereich von der Nenndrehzahl  $1420 \frac{1}{\text{min}}$  bis zur maximalen Drehzahl von  $2000 \frac{1}{\text{min}}$  gefahren. Hierbei blieb die Spannung im Ankerstromkreis konstant bei 368 V. Dieser Wert stimmt mit dem berechneten Wert für die maximale Gegenspannung überein (Gl. 5.1). Durch die Feldschwächung wird eine Ankerspannung von 420 V nicht überschritten.

$$U_{qmax} = U_{AN} - I_{AN} \cdot R_A = 420\text{V} - 21\text{A} \cdot 2.47\Omega = 368.13\text{V} \quad (5.1)$$

### 5.2.7 Einstellung der Regler

Für die Optimierung des Antriebssystems müssen die errechneten Regelparameter aus Kapitel 6 für die Strom- und den Drehzahlregler eingetragen werden.

#### Ankerstromregler

Die Regelparameter können im Stromregler unter "Antrieb\_1/Regelung Anker/ Regelung Anker" vorgenommen werden. Hierbei sind die Parameter im oberen Bereich des Fensters über dem Regler einzutragen. Ebenfalls ist ein Einstellen des Reglers über die Parameter p50155[0] für  $V_{ni}$  und p50156[0] für  $T_{ni}$  möglich.

#### Drehzahlregler

Um die Regelparameter für den Drehzahlregler einstellen zu können, muss der Pfad "Antrieb\_1/Regelung Anker/Drehzahlregler/Einstellungen für Drehzahlregler" geöffnet werden. Hier können die Parameter am Regler im oberen Fensterbereich eingestellt werden. Ebenfalls ist die Einstellung über die Parameter p50225[0-3] für  $V_{nn}$  und p50226[0-3] für  $T_{nn}$  möglich.

Die Sollwertglättung  $t_{gs}$  kann am Eingang des Sollwertes unter dem Pfad "Antrieb\_1/Regelung Anker/Drehzahl Soll-Ist-Differenz" eingetragen werden oder über den Parameter p50228[0-3] eingestellt werden.

### Erregerstromregler

Die Regelparameter können im Stromregler unter "Antrieb\_1/Regelung Anker/Regelung Anker" vorgenommen werden. Hierbei sind die Parameter im oberen Bereich des Fensters über dem Regler einzutragen. Ebenfalls ist ein Einstellen des Reglers über die Parameter p50255[0-3] für  $V_{nei}$  und p50256[0-3] für  $T_{nei}$  möglich.

Nach Änderung der Parameter werden diese gespeichert und in den Stromrichter geladen. Der Stromrichter ist nur vollständig konfiguriert und kann eingesetzt werden.

# 6 Regelung der Gleichstrommaschine

In diesem Kapitel wird die Regelung der Gleichstrommaschine behandelt. Hierzu wird zunächst auf die Standardoptimierungsverfahren des Betragsoptimums und des symmetrischen Optimums eingegangen. Anschließend wird das verwendete Prinzip der Kaskadenregelung als Drehzahlregelung mit unterlagerter Stromregelung erläutert und theoretisch ausgelegt. Im nächsten Schritt wird auf die Regelung des Erregerstroms im Feldschwächebereich eingegangen. Im Anschluss werden die Streckenparameter der realen Gleichstrommaschine ausgemessen und die Regler für die Praxis ausgelegt. Abschließend wird der Regler getestet und mit dem vorgegebenen Regelverhalten verglichen. Die Auslegung und Optimierung der Regelkreise orientiert sich hierbei an der Vorlesung "Antriebe und Leistungselektronik" (Röther (2015c)) und dem Buch "Elektrische Antriebe- Regelung von Antriebssystemen" (Schröder (2015)).

## 6.1 Optimierungsverfahren

Bei der Regelung von linearen Strecken ist das Ziel einen ausgeregelten Zustand zu erreichen. Hierbei liegen bei der Regelung drei Hauptmerkmale im Fokus:

- stationäre Genauigkeit (Der Istwert erreicht den Sollwert genau)
- Führungsverhalten (dynamisches Verhalten der Regelung bei Sollwertänderungen)
- Störverhalten (Auswirkung und Ausregelung von Störgrößen)

Hierbei muss bei der Auslegung des Reglers ein Kompromiss zwischen diesen Eigenschaften geschlossen werden. Eine Erhöhung der Verstärkung des Reglers erhöht im allgemeinen die Genauigkeit der Regelung, vermindert jedoch die Stabilität. Für die Regelung von elektrischen Antriebssystemen wird hierbei für den inneren Regelkreis der Kaskadenregelung bevorzugt das Betragsoptimum (BO) und für den äußeren Regelkreis das symmetrische Optimum (SO) angewendet.

Ziel der Optimierung ist eine möglichst schnelle, möglichst genaue und möglichst gut gedämpfte Regelung der Strecke bei einer Störung oder einer Änderung des Sollwerts. Die Güte der Regelung kann hierbei an dem Verhalten des Systems abgelesen werden. Die wichtigen Parameter sind hierbei die Anregelzeit  $t_{an}$  [ms], die Aussage über den ersten Durchgang des Istwerts durch den Sollwert trifft, die Überschwingweite [%], die die Größe des Überschingers beschreibt und die Ausregelzeit  $t_{aus}$  [ms], die eine Aussage über das Erreichen des Sollwerts mit einer Toleranz von  $\pm 2\%$  gibt (Abb. 6.1, Schröder (2015, S. 46)).

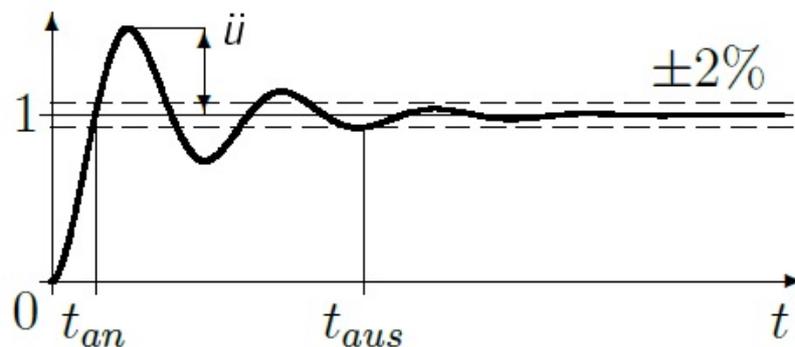


Abbildung 6.1: Optimierungsparameter für die Reglerauslegung (Schröder (2015, S. 82))

### 6.1.1 Betragsoptimum (BO)

Die Auslegung eines Regelkreises nach dem BO erfolgt bei Strecken, die nicht schwingungsfähig sind. Ziel ist eine schnelle Ausregelung bei der Änderung des Sollwerts und bei Störungen. Bei der Auslegung wird die größte Zeitkonstante der Strecke kompensiert. Dies erhöht die Dynamik und ermöglicht eine schnellere Regelung. Die Verstärkung des Reglers wird so eingestellt, dass der Betrag der Führungsübertragungsfunktion über einen möglichst großen Frequenzbereich nahe 1 bleibt. Dies führt zu einer schnellen Regelung von Störungen, die in diesem Frequenzbereich auftreten (Schröder (2015, S. 46)).

### 6.1.2 Symmetrisches Optimum (SO)

Das SO wird bevorzugt bei Strecken mit integrierendem Anteil eingesetzt oder bei Strecken, bei denen eine Zeitkonstante deutlich größer als alle anderen Zeitkonstanten ist. Ziel der Regelung nach SO ist eine sehr schnelle Ausregelung von Störgrößen. Hierfür sind die Stellgrößen des Reglers im Vergleich zum BO größer. Der dadurch entstehende Nachteil ist, dass



### 6.2.1 Auslegung der Stromregelung

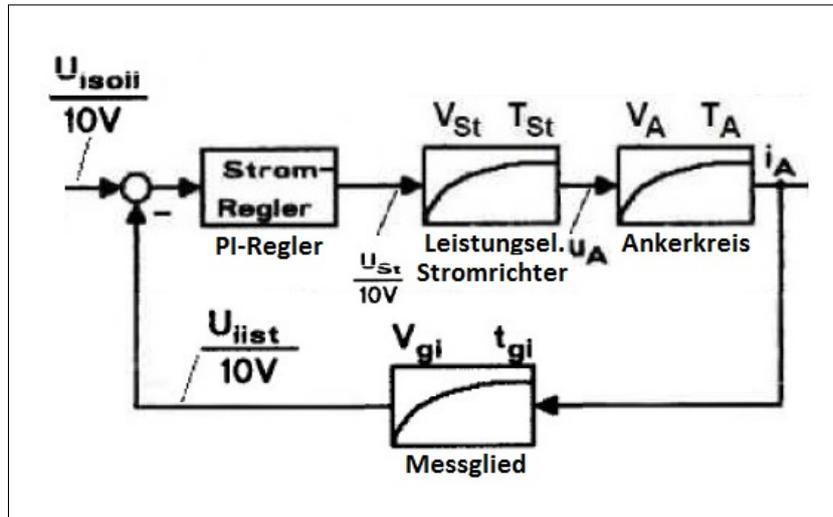


Abbildung 6.3: Stromregelkreis (nach Rötter (2015c, S. 6))

Der Stromregelkreis besteht aus vier Komponenten.

- Verzögerung durch die Leistungselektronik des Stromrichters
- RL-Glied des Ankerkreises
- Strommessglied
- PI-Stromregler

#### Stromrichter

Der Stromrichter besitzt die Verstärkung  $V_{ST}$ . Diese beschreibt das Verhältnis des Ausgangsstroms aus dem Stromrichter zum Eingang der Leistungselektronik des Stromrichters. Letzterer wird mit einem Steuersignal von  $\pm 10$  V versorgt. Die Ströme können durch die Begrenzung einen Maximalwert von 21 A annehmen. Die Zeitkonstante des Stromrichters  $t_{ST}$  ist die Totzeit, die vergeht, bis der Ausgang des Stromrichters auf eine Veränderung am Eingang der Leistungselektronik reagiert. Diese Totzeit ist über ein PT1-Glied angenähert.

### Ankerstromkreis

Die Verstärkung  $V_A$  des Ankerstromkreises beschreibt die Verstärkung des Stroms beim Durchfließen des Ankers. Da im Anker keine aktiven Bauelemente verwendet wurden, wird der Strom im Anker nicht verstärkt.  $V_A$  ist somit eins. Die Zeitkonstante  $T_A$  beschreibt die RL-Charakteristik des Ankerstromkreises. Bei einer Änderung der Spannung ändert sich der Strom nicht Sprunghaft. Der Aufbau des Stroms wird durch das PT1-Glied und der Zeitkonstante  $T_A$  beschrieben.

### Strommessglied

Bei der Messung des Stroms wird dieser im Stromrichter mit einer Spannung von +/- 10 V angegeben. Das Verhältnis von Messwert zu fließendem Strom ist die Verstärkung  $V_{gi}$ . Zusätzlich wird der Messwert intern mit der Zeitkonstante  $t_{gi}$  geglättet.

### Auslegung des Stromreglers

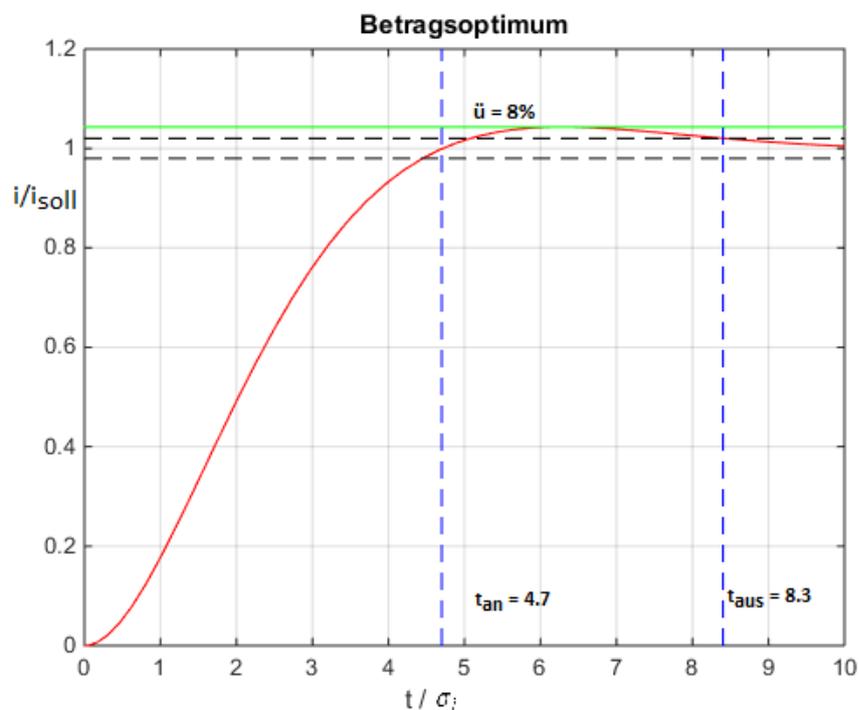


Abbildung 6.4: Sprungantwort beim BO (nach Schröder (2015, S. 54))

Der Stromregler soll nach dem BO ausgelegt werden. Die zu regelnde Strecke besteht hierbei nur aus PT1-Gliedern. Sie besitzt also kein integrales Verhalten und kann deshalb nach dem BO geregelt werden. Ebenfalls wird die Strecke nicht durch Störgrößen beeinflusst. Die Sprungantwort soll hierbei die folgenden Kriterien erfüllen (Abb. 6.4, Schröder (2015, S. 82)):

$$t_{an} = 4.7 \cdot \sigma_i \quad (6.1)$$

$$t_{aus} = 8.4 \cdot \sigma_i \quad (6.2)$$

$$\ddot{u} = 8\% \quad (6.3)$$

Für die Auslegung des Stromregelkreises gelten folgende Vereinfachungen (Röther (2015c, S. 15)):

$$\text{Streckenverstärkung } V_{Si} = V_{St} \cdot V_A \cdot V_{gi} \quad (6.4)$$

$$\text{Summenzeitkonstante } \sigma_i = t_{St} + t_{gi} \quad (6.5)$$

Die Strecke besteht vereinfacht somit nur noch aus zwei PT1-Gliedern.

Es ergibt sich die folgende Übertragungsfunktion des offenen Kreises des Stromregelkreises.

$$G_{OI}(s) = G_{RI}(s) \cdot G_{SI}(s) = V_{ni} \frac{1 + T_{ni} \cdot s}{T_{ni} \cdot s} \cdot \frac{V_{Si}}{(1 + T_A \cdot s) \cdot (1 + \sigma_i \cdot s)} \quad (6.6)$$

Durch Kompensation der größten Zeitkonstante und Umformung erhält man die Gleichungen zur Auslegung des Reglers.

$$T_{ni} = T_A \quad (6.7)$$

$$V_{ni} = \frac{T_A}{2 \cdot V_{Si} \cdot \sigma_i} \quad (6.8)$$

Nach der Auslegung kann der Stromregelkreis mit einem PT1-Glied approximiert werden (Schröder (2015, S. 81)).

$$G_{ei}(s) = \frac{V_{ei}}{1 + t_{ei} \cdot s} \quad \text{mit} \quad t_{ei} = 2 \cdot \sigma_i, \quad V_{ei} = \frac{\Delta I_A / I_{AN}}{\Delta U_{isoll} / 10V} \quad (6.9)$$

Der Regler im Stromrichter ist zusätzlich mit einer Anti-Windup Funktion ausgestattet. Diese begrenzt den Maximalwert, den der Ausgang des Integrators annehmen kann. Durch diese Funktion wird verhindert, dass der Regler, wenn die Strecke im aktuellen Zustand nicht ausregelbar ist, eine immer stärkere Ausgabe erzeugt. Der Integrationswert müsste andernfalls über einen längeren Zeitraum abgebaut werden. Dadurch beginnt das System zu schwingen und benötigt mehr Zeit für die Ausregelung einer Störung oder eines Sollwertsprungs (Schröder (2015, S. 282)).

## 6.2.2 Gegenspannungskompensation

Durch das magnetische Feld des Erregers wird bei Rotation der Gleichstrommaschine eine Gegenspannung induziert. Diese ist abhängig von dem magnetischen Fluss  $\Phi_E$  und der Drehzahl  $n$  der Gleichstrommaschine (Gl. 2.3). Durch die auftretende Gegenspannung bleibt bei der Regelung eine Regeldifferenz übrig, die vom Stromregler nicht korrigiert werden kann. Zur Kompensation der Gegenspannung muss der Eingang des Stromrichters mit einer Korrektur beaufschlagt werden (Schröder (2015, S. 266f)). Hierbei ist zu beachten, dass keine Übertragungsfunktion entstehen darf, bei der das Zählerpolynom eine höhere Ordnung hat, als das Nennerpolynom. Aus diesem Grund wird lediglich die Verstärkung des Stromrichters bei der Kompensation berücksichtigt.

$$G_A(s) = \frac{1}{G_{St}(s)} = \frac{1 + t_{st} \cdot s}{V_{St}} \approx \frac{1}{V_{St}} \quad (6.10)$$

## 6.2.3 Auslegung der Drehzahlregelung

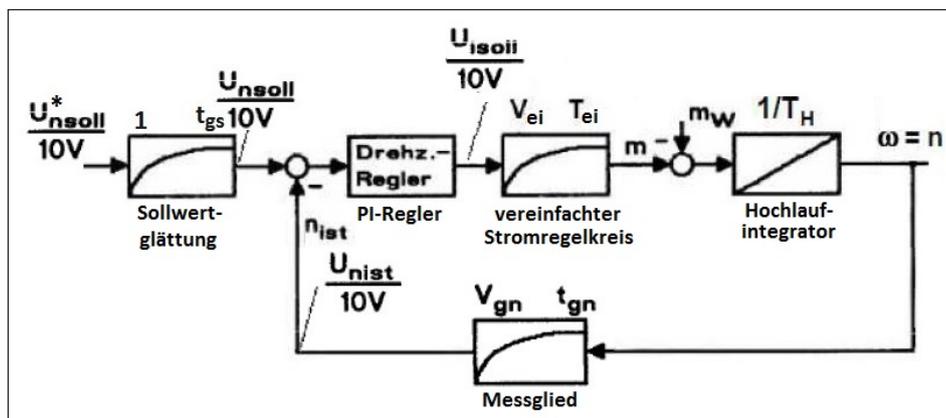


Abbildung 6.5: Drehzahlregelkreis mit Sollwertglättung (nach Rötter (2015c, S. 21))

Der Drehzahlregelkreis besteht aus vier Bestandteilen:

- vereinfachter Stromregelkreis
- Hochlauf der Gleichstrommaschine
- Drehzahlmessglied
- PI-Drehzahlregler

## Stromregelkreis

Im Drehzahlregelkreis ist der geregelte Stromkreis nach Gleichung 6.9 unterlagert.

## Hochlauf der Gleichstrommaschine

Diese Übertragungsfunktion beschreibt das Hochlaufverhalten der Gleichstrommaschine. Dieses ist vom anliegenden Moment abhängig. Ist das anliegende Moment größer als Null, beschleunigt die Maschine. Ist das Moment kleiner als null, wird die Maschine gebremst. Dieses Verhalten wird durch den Integrator mit der Zeitkonstante  $T_H$  ausgedrückt. Das Moment, welches durch den Strom erzeugt wird, setzt sich aus dem Strom  $I_A$  und dem Feldfluss  $\Phi_E$  zusammen.

## Drehzahlmessglied

Das Messglied erzeugt eine Spannung von +/- 10 V für einen Drehzahlbereich von +/- 2000  $\frac{1}{\text{min}}$ . Aus diesem Verhältnis ergibt sich die Verstärkung  $V_{gn}$ . Zusätzlich wird der Messwert intern mit der Zeitkonstante  $t_{gn}$  geglättet.

## Drehzahlregler

Der Drehzahlregler wird nach dem SO ausgelegt. Diese Auslegung eignet sich für Strecken mit integralem Verhalten und für Regler, die starke Störungen ausregeln müssen. Das integrale Verhalten ist durch den Hochlauf der Drehzahl gegeben. Die auszuregelnde Störung ist das Drehmoment, das auf die Achse wirkt. Die Sprungantwort auf den Drehzahlkreis soll hierbei folgende Anforderung erfüllen (Abb. 6.6, Schröder (2015, S. 82)):

$$t_{an} = 3.1 \cdot \sigma_n \quad (6.11)$$

$$t_{aus} = 16.5 \cdot \sigma_n \quad (6.12)$$

$$\ddot{u} = 43\% \quad (6.13)$$

Für die Auslegung des Drehzahlreglers gilt folgende Vereinfachung (Röther (2015c, S. 19)):

$$\sigma_n = t_{ei} + t_{gn} = 2 \cdot \sigma_i + t_{gn} \quad (6.14)$$

$$V_{Sn} = V_{ei} \cdot \Phi_E \cdot V_{gn} \quad (6.15)$$

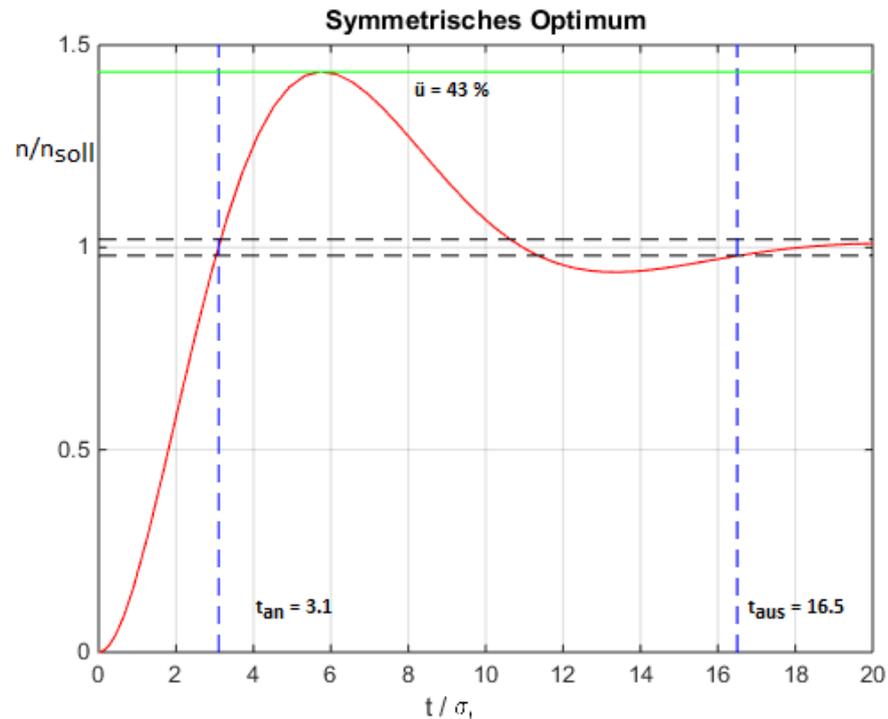


Abbildung 6.6: Sprungantwort bei SO (nach Schröder (2015, S. 62))

Somit ergibt sich die Übertragungsfunktion des offenen Drehzahlregelungskreises als

$$G_{O_n}(s) = G_{R_n}(s) \cdot G_{S_n}(s) = V_{RN} \cdot \frac{1 + T_{Rn} \cdot s}{T_{Rn} \cdot s} \cdot \frac{V_{Sn}}{(1 + \sigma_n \cdot s) \cdot T_H \cdot s} \quad (6.16)$$

Über die Einstellvorschrift erhalten wir somit folgende Vorgaben zur Auslegung des Reglers (Schröder (2015, S. 81)):

$$T_{nn} = 4 \cdot \sigma_n \quad (6.17)$$

$$V_{nn} = \frac{T_H}{2 \cdot \sigma_n} \quad (6.18)$$

Wie der Ankerstromregler ist auch der Drehzahlregler mit der Anit-Windup Funktion ausgestattet (Kap 6.2.1).

## 6.2.4 Sollwertglättung

Der Fokus bei der Auslegung des Drehzahlreglers liegt vor allem auf der schnellen Ausregelung von Störgrößen. Für diese schnelle Ausregelung wurden größere Stellgrößen verwen-

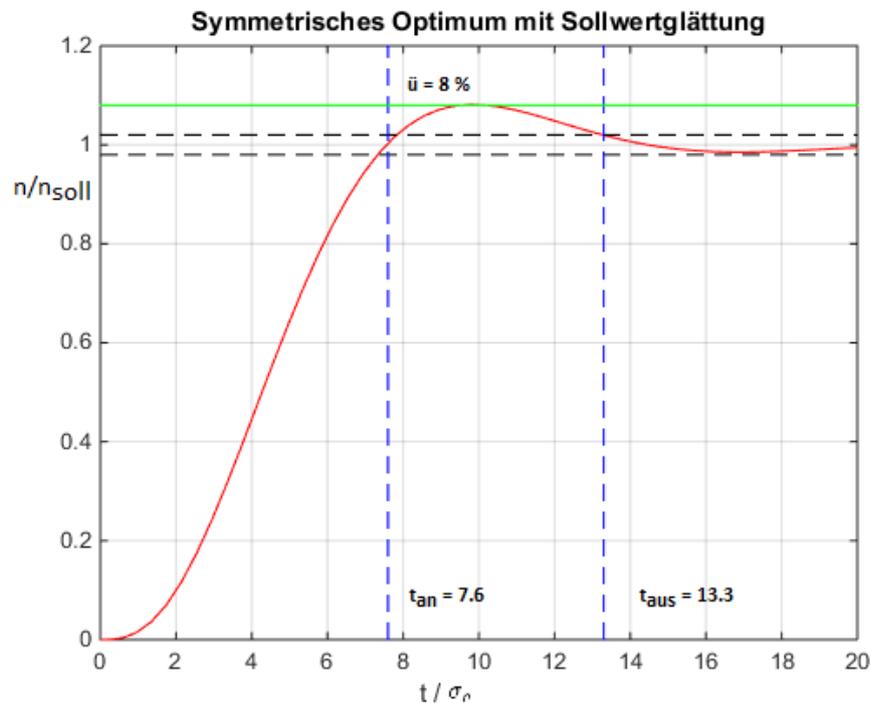


Abbildung 6.7: Sprungantwort bei SO mit Sollwertglättung (nach Schröder (2015, S. 62))

det, die bei einer Sollwertänderung zu einem starken Überschwingen führen würden. Um das Einschwingen zu verringern, muss der Sollwert über ein PT1-Glied verzögert transportiert werden. Durch eine langsamere Sollwertänderung fallen die Stellgrößen im Regelkreis kleiner aus und die Überschwingweite des Systems wird deutlich minimiert. Für die Sollwertglättung bei der Regelung im SO verändert sich die Vorgabe für das Verhalten bei einem Sollwertsprung (Abb. 6.7, Schröder (2015, S. 62)).

$$t_{an} = 7.6 \cdot \sigma_n \quad (6.19)$$

$$t_{aus} = 13.3 \cdot \sigma_n \quad (6.20)$$

$$\ddot{u} = 8\% \quad (6.21)$$

Die Zeitkonstante der Sollwertglättung  $t_{gs}$  entspricht hierbei der Zeitkonstante des Drehzahlreglers  $T_{Rn}$ . Somit gilt für die Sollwertglättung

$$G_{gs}(s) = \frac{1}{1 + t_{gs} \cdot s} = \frac{1}{1 + 4 \cdot \sigma_n \cdot s} \quad (6.22)$$

## 6.3 Feldschwächerregelung

### 6.3.1 Funktionsweise der Feldschwächerregelung

Die Regelung des Erregerstroms sorgt dafür, dass der Motor auch eine Drehzahl über  $n_n$  erreichen kann. Durch Absenken des Erregerstroms sinkt die Gegenspannung (Gl. 2.3). Hierbei ist die Änderung des Stroms proportional zur Änderung der Gegenspannung. Durch Absenkung des Erregerstroms senkt sich allerdings auch das Drehmoment der Maschine linear (Gl. 2.5). Es muss somit eine Regelung gefunden werden, durch die die Nennspannung des Motors nicht überschritten wird, bei der jedoch das Drehmoment des Motors so groß wie möglich ist. Die Gegenspannung, die vom Motor induziert wird, ist hierbei von der Drehzahl und dem magnetischen Fluss, der durch den Erregerstrom induziert wird, abhängig.

Für die Regelung des Erregerstroms bilden sich somit zwei Teilbereiche heraus. Diese sind der Ankerstellbereich und der Feldschwächebereich (Abb. 6.8).

Es gelten folgende Proportionalitätsverhältnisse im Ankerstellbereich mit  $I_e = \text{konstant}$ :

$$P \sim n \quad (6.23)$$

$$M \sim I_A \quad (6.24)$$

$$u_q \sim n \quad (6.25)$$

Für den Feldschwächebereich gelten mit  $u_q = \text{konstant}$  folgende Proportionalitätsverhältnisse:

$$P \sim I_A \quad (6.26)$$

$$M \sim I_e \sim \frac{1}{n} \quad (6.27)$$

Für den Ankerstellbereich muss folglich der Erregerstrom den Nennstrom  $I_{EN}$  führen. Für den Feldschwächebereich muss der Erregerstrom proportional zu  $1/n$  abnehmen. Somit ergibt sich für den Sollwert des Erregerstroms:

$$I_{Esoll} = \begin{cases} I_{EN}, & \text{wenn } n \leq n_N \\ \frac{U_A - I_A \cdot R_A}{C_{Motor} \cdot \Phi_E \cdot n} = \frac{I_{EN} \cdot n_N}{n}, & \text{wenn } n > n_N \end{cases} \quad (6.28)$$

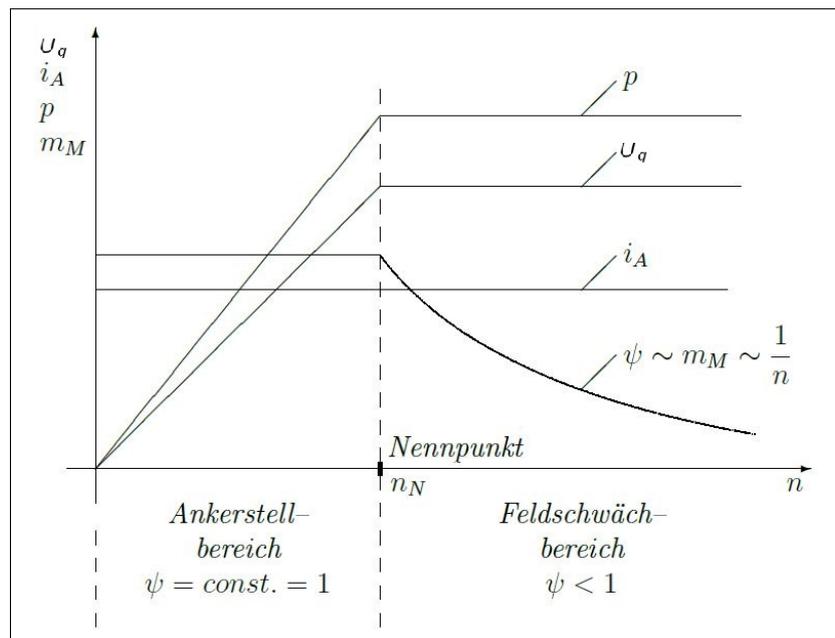


Abbildung 6.8: Verhalten der Gleichstrommaschine im Ankerstellbereich und im Feldschwächbereich (Schröder (2015, S. 293))

Für die Regelung kann das Verhältnis von Erregerstrom zu magnetischer Flussdichte vereinfacht als linear angesehen werden. Demnach muss direkt der Erregerstrom geregelt werden, da dieser sich proportional auf den magnetischen Fluss auswirkt. Auf diese Weise wird die Nennspannung des Motors nie überschritten und es kann zu jedem Zeitpunkt der Nennstrom  $I_{AN}$  fließen. Die maximale Gegenspannung kann bei erfolgreicher Regelung wie folgt berechnet werden:

$$U_{qmax} = U_{AN} - I_{AN} \cdot R_A \quad (6.29)$$

### 6.3.2 Regelstrecke der Feldschwächregelung

Der Regelkreis für die Feldschwächregelung ähnelt dem Regelkreis des Ankerstromkreises. Er besteht aus folgenden Elementen:

- Übertragungsfunktion des Stromrichters
- Verzögerungsglied des Erregerstromkreises
- Strommessglied
- PI-Stromregler

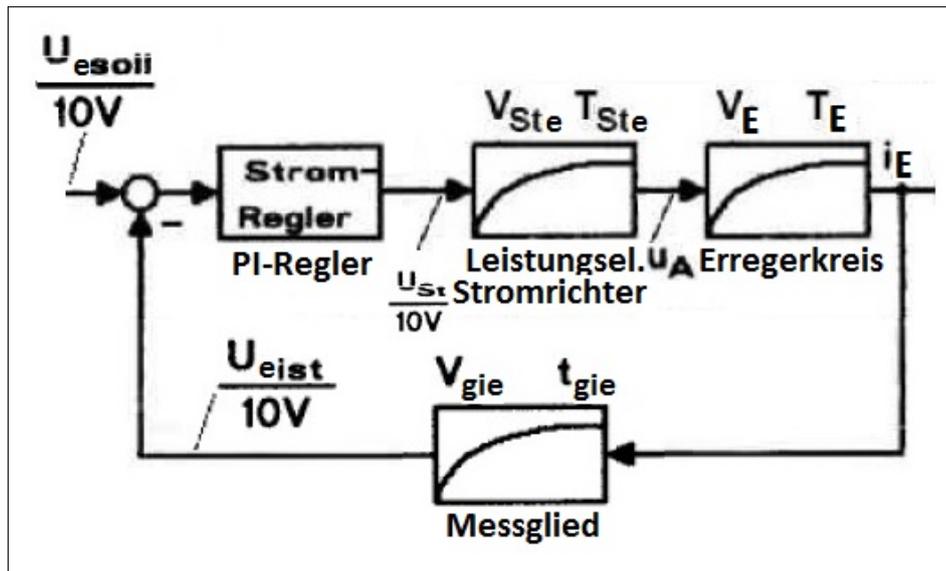


Abbildung 6.9: Regelung des Erregerkreises (nach Schröder (2015, S. 292 ff.))

Die einzelnen Abschnitte der Regelstrecke haben hierbei dieselbe Funktion, wie sie auch im Ankerstromkreis in Kap. 6.2.1 besitzen. Im Falle des Ankerstromkreises muss allerdings keine Gegenspannung kompensiert werden.

Laut Schröder (2015, S. 82) kann die Regelung des Erregerstromkreises sowohl nach dem BO als auch dem SO erfolgen. Grund hierfür ist die große Zeitkonstante des Erregerstromkreises  $T_E$  (meißt  $\geq 200$  ms). Diese wirkt für kleine Eingangsfrequenzen gepaart mit der wesentlich kürzeren Summenzeitkonstante  $\sigma_{ei}$  wie eine IT1-Strecke (Schröder (2015, S. 295)). Für die Regelung nach dem SO muss allerdings zusätzlich eine Sollwertglättung eingesetzt werden. Dies ist im verwendeten Stromrichter nicht möglich. Somit wird der Erregerstromkreis nach dem BO geregelt. Ziel der Regelung ist hierbei eine Sprungantwort mit Charakteristik des BO (Schröder (2015, S. 82)):

$$t_{an} = 4.7 \cdot \sigma_{ei} \quad (6.30)$$

$$t_{aus} = 8.4 \cdot \sigma_{ei} \quad (6.31)$$

$$\ddot{u} = 8\% \quad (6.32)$$

Somit gelten für die Regelparameter  $V_{Rie}$  und  $T_{Rie}$  nach Schröder (2015, S. 81))

$$T_{nie} = T_E \quad (6.33)$$

$$V_{nie} = \frac{T_E}{2 \cdot \sigma_{ei} \cdot V_s} \text{ mit } V_s = V_{Ste} \cdot V_E \cdot V_{gie} \quad (6.34)$$

Der Regler des Ankerstroms besitzt ebenso die in Kap. 6.2.1 beschriebene Anti-Windup Funktion.

## 6.4 Analyse der Regelstrecke

Die Parameter der Regelstrecke werden nun im folgenden bestimmt. Hierbei wird zunächst auf die Ankerstrecke, dann auf die Drehzahlstrecke und schließlich auf die Erregerstrecke eingegangen. Die Messungen wurden mit einem Oszilloskop der Firma LeCroy vom Typ WaveSurfer 424 durchgeführt. Mit einer Bandbreite von 200 MHz und einer internen Verzögerung von 1.75 ns ist es für die Aufnahme der Regelstrecke geeignet [A27].

### 6.4.1 Gesamtverstärkung des Ankerstromkreises

Die Verstärkung des Ankerstromkreises beinhaltet drei Teilverstärkungen:

- Verstärkung der Leistungselektronik  $V_{St}$
- Verstärkung des Ankerkreises  $V_A$
- Verstärkung des Strommessglieds  $V_{gi}$

Diese lassen sich aufgrund der Beschaffenheit des Systems nicht getrennt messen. Um die Gesamtverstärkung des Ankerstromkreises zu messen, wird der Leistungsteil des Stromrichters direkt mit einem Signal angesteuert. Für die Messung wird der Erregerstrom deaktiviert und die Regelung im Stromrichter deaktiviert. Bei einer Eingangsspannung von  $U_{Lt} = 0.7$  V stellt sich der Ankernennstrom von 21.0 A ein. Dieser Strom entspricht einem Sollwert von  $U_{Isoll} = 10$  V. Es gilt somit für die Verstärkung:

$$V_{Si} = V_{St} \cdot V_A \cdot V_{gi} = \frac{U_{Isoll}}{U_{Lt}} = \frac{10\text{V}}{0.7\text{V}} = 14.29 \quad (6.35)$$

### 6.4.2 Zeitkonstante der Leistungselektronik $t_{St}$

Die Zeitkonstante  $t_{St}$  beschreibt die Verzögerung, die durch die Leistungselektronik entsteht, wenn sich der vorgegebene Zündwinkel am Eingang der Leistungselektronik verändert. Im Idealfall hängt diese lediglich von der Netzfrequenz und Art der Thyristor-Brücke ab. Für die vorliegende B6-Brücke ergibt sich somit bei einer Netzfrequenz von 50 Hz eine Totzeit von

$t_{Stideal} = \frac{20\text{ms}}{2.6} = 1.67$  ms. Dieser Wert entspricht der längstmöglichen Zeit zwischen zwei Zündzeitpunkten des Stromrichters. In der Realität ist diese Totzeit bedingt durch die Rechenzeit, die im Stromrichter benötigt wird, allerdings größer.

Die Totzeit  $t_{St}$  des Stromrichters wird messtechnisch ermittelt. Hierfür wird der Eingang des Ankersteuersatzes mit dem Hauptsollwert verknüpft. Auch der interne Frequenzgenerator des Stromrichters wird mit dem Hauptsollwert verknüpft. Es ist nun über den Frequenzgenerator möglich, den Ansteuerwinkel des Stromrichters mit einem Rechtecksignal anzusteuern. An den Flanken des Steuersignals kann die Totzeit gemessen werden. Zu diesem Zweck wird der Eingang der Leistungselektronik auf einen analogen Ausgang gelegt. Die über zehn Messungen aus Tabelle 6.1 ermittelte Totzeit  $t_{St}$  beträgt 3.55 ms.

Tabelle 6.1: Messungen von  $t_{St}$ 

Messung	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_{St}$ [ms]	4.47	3.70	3.80	2.44	2.67	2.35	5.40	4.34	4.54	3.75

### 6.4.3 Zeitkonstante des Ankerstromkreises $T_A$

Die Zeitkonstante  $T_A$  besteht aus dem induktiven und dem ohmschen Widerstand der Ankerwicklung. Das Verhalten entspricht hierbei einem PT-1-Glied. Für die Messung des Widerstands und der Induktivität wird eine Spannungsquelle des Typs EA-PS 8360 T aus dem Labor verwendet [A Datenblatt]. Es wird nicht der Stromrichter für diese Messung verwendet, da der Ausgangsstrom und die Ausgangsspannung eine zu hohe Welligkeit haben. Diese erschwert die Messung. Neben der Zeitkonstante kann ebenso der Widerstand des Ankerkreises  $R_A$  und die Induktivität des Ankerkreises  $L_A$  bestimmt werden.

$$R_A = \frac{U_A}{I_A} \quad (6.36)$$

$$L_A = T_A \cdot R_A \quad (6.37)$$

Die Prüfung wurde bei Strömen von 5 A, 7.5 A und 10 A durchgeführt (Tab. 6.2). Bei der Messung wird ein Spannungssprung auf den Ankerkreis gegeben (Abb. 6.10). Durch den vorliegenden RL-Kreis steigt der Strom verzögert an. Beim Durchschreiten des Stromflusses von 63 % des Endflusses ist die Zeit  $T_A$  vergangen. Diese wird mithilfe der Cursor im Oszilloskop ausgewertet. Aus der Messung ergeben sich somit die Werte  $R_A = 2.47 \Omega$ ,  $L_A$

= 38.43 mH und  $T_A = 15.56$  ms. Der Wert des Ankerwiderstands weicht hierbei vom Datenblattwert von  $2.17 \Omega$  ab. Die Optimierungsläufe des Stromrichters ergaben einen Widerstand von  $R_A = 2.00 \Omega$  und eine Induktivität von  $L_A = 26.66$  mH.

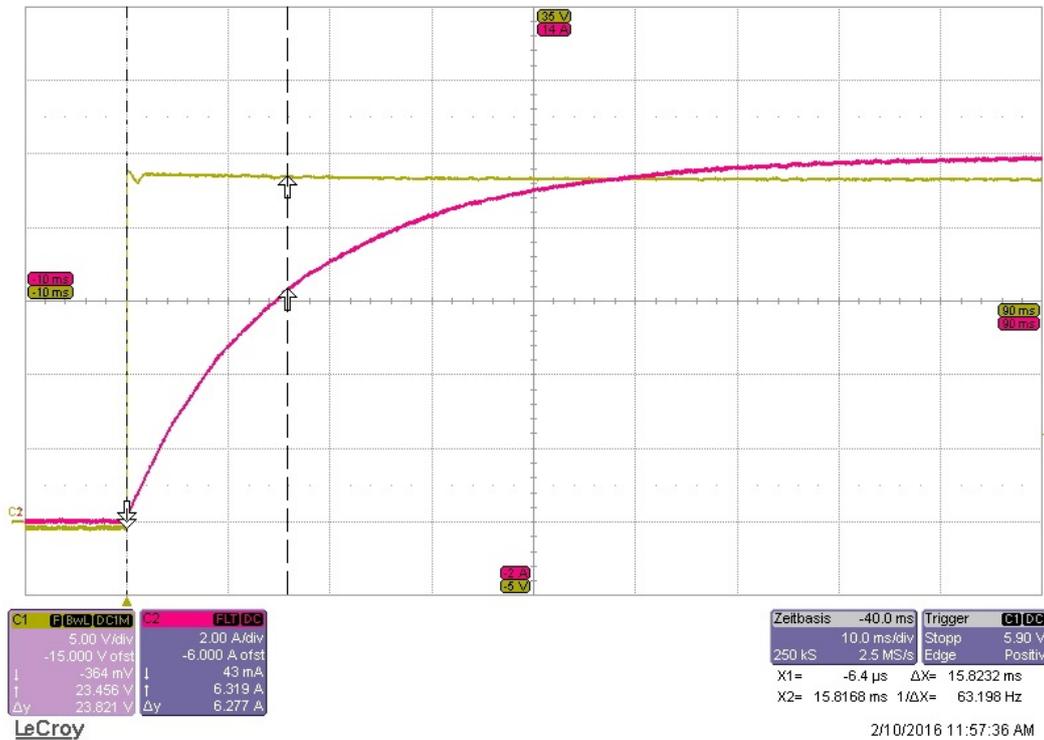


Abbildung 6.10: Messung der Ankerkreiszeitkonstante (gelb:  $U_A$ , pink:  $I_A$ )

Tabelle 6.2: Messung des Ankerstromkreises

$U_A$ [V]	$I_A$ [A]	$R_A$ [ $\Omega$ ]	$T_A$ [ms]	$L_A$ [mH]
24,2	10	2,42	15,82	38,28
18,5	7,5	2,47	15,78	38,98
12,6	5	2,52	15,09	38,03
Mittelwert		2,47	15,56	38,43

#### 6.4.4 Zeitkonstante des Stromesglieds $t_{gi}$

Der Stromwert wird laut Datenblatt vom Stromrichter alle 0.25 ms aufgenommen [A31]. Der Regler wird intern mit einem Bearbeitungstakt von 1 ms aufgerufen. Leider kann auf die

Messelektronik des Stromrichters nicht direkt zugegriffen werden. Legt man den Aktualwert des Stroms auf einen analogen Ausgang, entsteht durch die Beschaltung des Ausgangs eine weitere Verzögerung, durch die die Messung der Zeitkonstante nicht genau ist. Im weiteren Verlauf wird daher die Zeitkonstante  $t_{gi} = 1 \text{ ms}$  durch den regelmäßigen Aufruf des Reglers angenommen.

### 6.4.5 Hochlaufzeitkonstante $T_H$

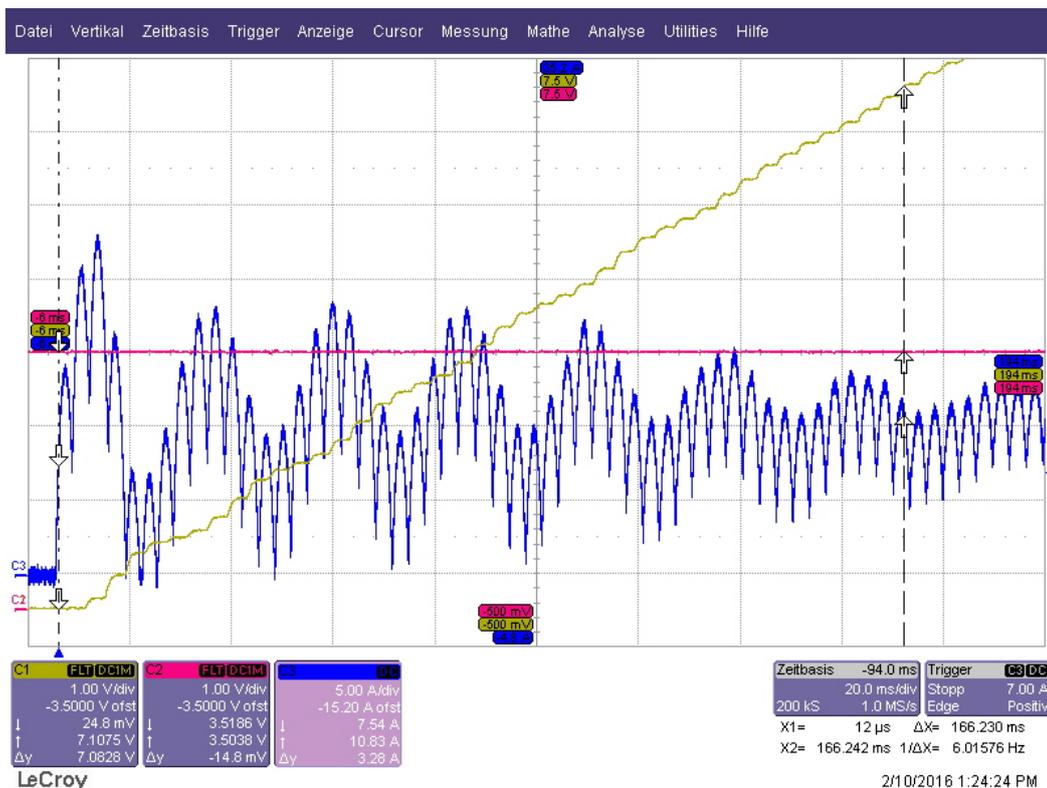


Abbildung 6.11: Hochlaufversuch (gelb:  $n$ , blau:  $I_A$ , pink:  $I_{A\text{soll}} \hat{=} 10.5 \text{ A}$ )

Beim Hochlaufversuch wurde ein Sprung auf den Stromregler gegeben. Durch einen konstanten Strom wird am Motor ein konstantes Drehmoment erzeugt (Gl. 2.5). Durch dieses Drehmoment wird der Motor über den ganzen Versuch hinweg konstant beschleunigt. Über die Auswertung des Drehzahlgebers kann im Anschluss die Integrationskonstante  $T_H$  bestimmt werden.

Für die Messung ist es wichtig, dass der Strom nicht lückt. Ebenso sollte der Strom auch nicht zu hoch sein, da somit der Hochlauf der Maschine verkürzt wird und folglich für die Messung weniger Stützpunkte vorliegen. Bei einem Strom von  $I_A = 0.5 \cdot I_{AN} = 10.5 \text{ A}$

Tabelle 6.3: Messergebnisse des Hochlaufversuchs

<b>Messung</b>	1	2	3	4	5	Mittelwert $\bar{T}_{AV}$
$\bar{T}$ [ms]	167.91	170.63	189.22	165.23	193.37	
<b>Messung</b>	6	7	8	9	10	
$\bar{T}$ [ms]	175.57	175.14	171.87	167.18	166.23	

lückt der Strom nicht mehr. Die Schwankungen des Stroms entstehen hierbei durch das Einschwingen der Ankerstromregelung. Zunächst muss der Regler auf dem gewünschten Sollwert einschwingen. Bei Erhöhung der Drehzahl steigt die vom Motor induzierte Gegenspannung linear an. Diese muss als Störung ausgeregelt werden und verursacht weitere Schwingungen im Stromfluss. Im Anschluss durch die Messung wird die Zeit, die für den Hochlauf auf die Nenndrehzahl von  $1420 \frac{1}{\text{min}}$  benötigt wurde, gemessen (Abb. 6.11). Um Schwankungen in den Messungen entgegenzuwirken wurde die Messung zehn Mal wiederholt um einen Mittelwert der Ergebnisse zu gewinnen (Tab. 6.3). Es ergibt sich eine mittlere Messzeit von  $\bar{T} = 174.24$  ms.

Es gilt nun für die Hochlaufzeitkonstante:

$$T_H = \frac{T_{AV}}{\frac{I_{AN}}{I_A}} = \frac{174.24 \text{ms}}{\frac{21 \text{A}}{10.5 \text{A}}} = 87.12 \text{ms} \quad (6.38)$$

#### 6.4.6 Zeitkonstante des Inkrementalgebers

Um die Totzeit des Inkrementalgebers zu messen, wird das Signal der Drehzahlauswertung auf einen analogen Ausgang gelegt. Deutlich sichtbar ist die treppenförmige Funktion, die bei der Ausgabe des Drehgebers entsteht (Abb. 6.12). Diese ist von der internen Auswertung des Drehgebers und der Ausgabe des Analogwertes abhängig. Messtechnisch lässt sich im Oszilloskop eine Verzögerung von  $t_{gn} = 4$  ms ermitteln. Hierbei benötigt der Wert bei einer Veränderung des Ausgangs eine Millisekunde um den neuen Ausgabewert anzunehmen und hält diesen dann für weitere drei Millisekunden. Die Totzeit wird in der Regelung als PT-1-Glied angenähert.

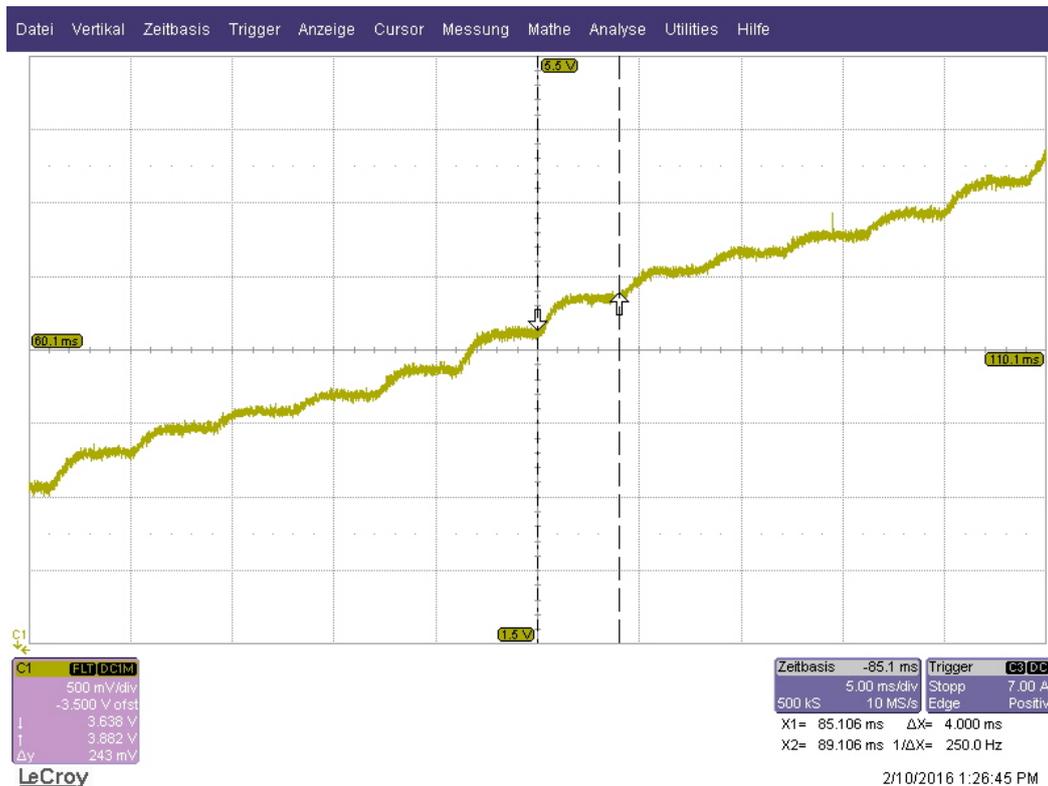


Abbildung 6.12: Treppenförmige Ausgabe des Inkrementalgebers

### 6.4.7 Drehmoment-Strom Verhältnis

Wie bereits in Kapitel 2.1.2 Gleichung 2.5 zu sehen ist, ist das Verhältnis von Strom und Drehmoment proportional, solange das Erregerfeld konstant bleibt. Aus diesem Grund kann ein festes Verhältnis von Drehmoment und Ankerstrom bestimmt werden. Da die Maschine ohne Belastung aufgebaut ist, wird eine Kalibrierungsvorrichtung für Drehmomentgeber verwendet. Hierzu wird an die Drehachse des Motors ein Hebel mit der Länge von 50 cm angebracht. Dieser besitzt ein Gegengewicht, sodass von dem Hebel kein Drehmoment auf die Achse des Motors ausgeübt wird. Im Folgenden wird an dem Hebel eine Masse angebracht (Abb. 6.13). Diese erzeugt durch die Erdanziehungskraft und den Hebel ein konstantes Drehmoment auf den Motor (Gl. 6.39, Dzieia u. a. (2011, S. 19f.)). Es wird nun auf den Anker ein Strom eingeprägt, der den Motor im Stillstand und das Gewicht der Messeinrichtung im rechten Winkel hält. Das Gewicht wird schrittweise so lange erhöht, bis der Nennstrom von 21 A in der Ankerwicklung fließt. Aus den Messwerten (Tab. 6.4) wird die Drehmoment-Strom-Kennlinie entwickelt (Abb. ??). Die Messung wird im Stillstand der Maschine durchgeführt. Dadurch kann keine präzise Aussage über das Verhältnis von Ankerstrom und Drehmoment im Nennbetrieb getroffen werden. Ebenfalls ist die Messung durch die Haftreibung, die die

Maschine am Drehen hindert beeinflusst. Diese ist aber im Vergleich zum maximal gemessenen Drehmoment zu vernachlässigen.



Abbildung 6.13: Vorrichtung zur Messung des Drehmoment-Strom Verhältnisses

$$\begin{aligned} M &= F_G \cdot l = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \cdot l \\ &= m \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0.5\text{m} \quad \text{mit} \quad \alpha = \frac{\pi}{2} \end{aligned} \quad (6.39)$$

Es stellt sich ein Verhältnis von Drehmoment zu Strom mit 2.54 : 1 ein.

$$M_{GM} = 2.54 \cdot I_A \quad \text{bei} \quad I_E = I_{EN} \quad \text{und} \quad n = 0 \frac{1}{\text{min}} \quad (6.40)$$

Im Stillstand lässt sich somit ebenfalls der Nennfluss  $\Phi_{EN}$  bestimmen.

$$\Phi_E = \frac{M}{I_A \cdot I_E} = \frac{2.54 \frac{\text{Nm}}{\text{A}}}{1.6\text{A}} = 1.59\text{Tm}^2 \quad (6.41)$$

Tabelle 6.4: Messwerte der Drehzahl-Strom-Kennlinie

Gewicht [kg]	Drehmoment [Nm]	Ankerstrom $I_A$	Nm / A
0.5	2.45	0.98	2.50
1	4.91	1.98	2.48
1.5	7.36	2.85	2.58
2	9.81	3.75	2.62
2.5	12.26	4.69	2.61
3	14.72	5.95	2.47
3.5	17.17	6.97	2.46
4.2	20.60	8.2	2.51
4.7	23.05	9.13	2.53
5	24.53	9.67	2.54
5.5	26.98	10.55	2.56
6	29.43	11.54	2.55
6.5	31.88	12.49	2.55
7	34.34	13.51	2.54
7.5	36.79	14.45	2.55
8	39.24	15.38	2.55
8.5	41.69	16.15	2.58
9.2	45.13	17.8	2.54
9.7	47.58	18.61	2.56
10.2	50.03	19.85	2.52
10.7	52.48	20.73	2.53

## 6.5 Messung der Erregerstrecke

Die Messung der Erregerstrecke erfolgt mit den bereits in den Kapiteln 6.4.2 bis 6.4.4 beschriebenen Verfahren zur Bestimmung der Parameter des Ankerstromkreises. Hierbei ergaben sich bei der Messung der jeweiligen Parameter die folgenden Zeitkonstanten und Verstärkungen:

$$V_{Sei} = V_{Ste} \cdot V_E \cdot V_{gie} = \frac{3.2V}{1.83V} = 1.79 \quad (6.42)$$

$$t_{Ste} = 14.34ms \quad (6.43)$$

$$T_E = 179.76ms \quad \text{mit} \quad R_E = 144.3\Omega, \quad L_E = 25.94H \quad (6.44)$$

$$t_{gie} = 8ms \quad (6.45)$$

Auffällig ist hierbei der Unterschied in der Zeitkonstante der Leistungselektronik  $t_{Ste}$ . Diese ist deutlich größer, da es sich beim Stromrichter des Erregerstromkreises lediglich um eine B2-Brücke handelt, weshalb der Abstand zwischen zwei Pulsen 10 ms beträgt. Dadurch ist die Reaktionszeit des Stromrichters langsamer.

## 6.6 Auslegung der Ankerstromregelung

Mit den Gleichungen aus Abschnitt 6.2 können nun die Parameter für die Ankerstromregelung berechnet werden:

$$T_{Ni} \stackrel{(6.7)}{=} T_A = 15.56 \text{ms} \quad (6.46)$$

$$V_{Ni} \stackrel{(6.8)}{=} \frac{T_A}{2 \cdot V_{Sj} \cdot \sigma_j} = \frac{15.56 \text{ms}}{2 \cdot 14.29 \cdot (3.55 + 1) \text{ms}} = 0.120 \quad (6.47)$$

Durch die Eingabebegrenzung des Stromrichters wird in diesen  $T_{Ni} = 16 \text{ms}$  und  $V_{Ni} = 0.12$  eingesetzt.

Für die Vereinfachung des Stromregelkreises als PT1-Glied gilt die Zeitkonstante  $t_{ei} = 9.1 \text{ms}$ .

### 6.6.1 Optimierung des Ankerstromreglers

Der Ankerstromkreis wird nach dem BO ausgelegt. Es gelten also für die geforderten Regelzeiten und die Überschwingweite die Charakteristik des BO (Kap. 6.2.1).

$$t_{an} = 4.7 \cdot \sigma_j = 4.7 \cdot 4.55 \text{ms} = 21.39 \text{ms} \quad (6.48)$$

$$t_{aus} = 8.4 \cdot \sigma_j = 8.4 \cdot 4.55 \text{ms} = 38.22 \text{ms} \quad (6.49)$$

$$\ddot{u} = 8\% \quad (6.50)$$

Der Regler wird nun über einen Sollwertsprung angesteuert. Für die Messung wird das intern vom Stromrichter gemessene Signal genommen, da das Stromsignal des Ankerstromkreises durch die Gleichrichtung zu wellig ist, um ein präzises Ergebnis bei der Messung zu erhalten. Zusätzlich wird so das Messglied in der Kette betrachtet. Durch Variation der Regelparameter um die berechneten Werte wird versucht, die Vorgabe des BO besser zu erreichen. Hierbei werden die Parameter Schrittweise verändert, um die Überschwingweite  $\ddot{u}$  und die Ausregelzeit  $t_{aus}$  zu reduzieren (Tab. 6.5). Der zur Optimierung verwendete Sollwertsprung hat eine

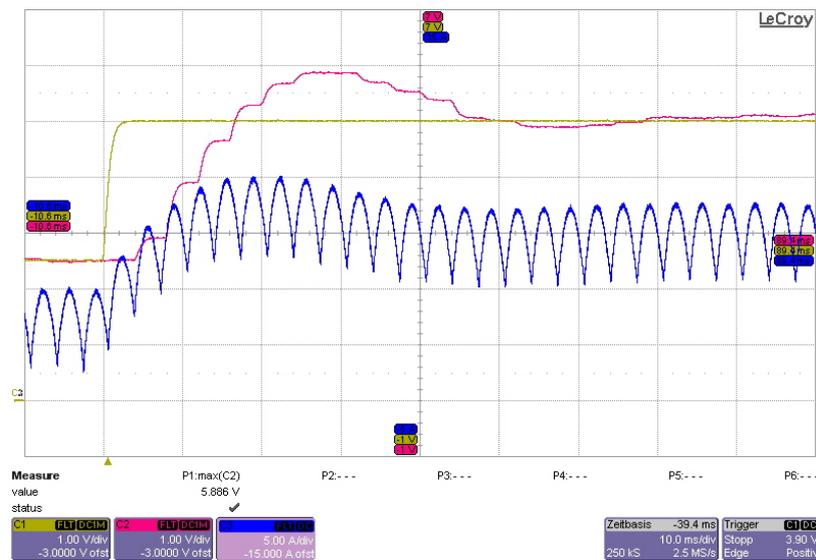


Abbildung 6.14: Sprungantwort des Ankerstromreglers mit  $V_{Ni} = 0.09$  und  $T_{Ni} = 22$  ms

Reichweite von  $I_{A1} = 5$  A bis  $I_{A2} = 15$  A. Hierbei läuft der Strom nicht in die Begrenzung hinein und lükt nicht.

Nach der Optimierung wurde der Regler mit den Werten  $T_{Ni} = 22$  ms und  $V_{Ni} = 0.09$  eingesetzt. Ein weiteres Absenken der Verstärkung zur Reduktion des Überschwingens hätte den Regler träger gemacht. Dadurch wäre der Regler zu langsam geworden, um als innerer Regler der Kaskadenregelung zu funktionieren. Der eingesetzte Regler ist somit ein Kompromiss zum BO. Die Sprungantwort des geregelten Kreises (Abb. 6.14) weicht weit vom geforderten Betragsoptimum (Abb. 6.4) ab.

Für den Einsatz als reiner Stromregler für die Regelung des Drehmoments führt die schnelle Anregelzeit zu einer guten Reaktion auf ändernde Vorgaben für ein simuliertes Windprofil.

Tabelle 6.5: Optimierung des Ankerstromreglers

Bemerkung	$V_{ni}$	$T_{ni}$ [ms]	$\ddot{u}$ [%]	$t_{an}$ [ms]	$t_{aus}$ [ms]
Vorgabe BO			8	21.4	38.2
Berechneter Regler	0.12	16	27.5	13.7	81.2
Optimierungslauf Stromrichter	0.19	19	38.2	13.4	80.5
Erhöhung von $T_{ni}$	0.12	22	24.9	14.7	61.3
Absenkung von $V_{ni}$	0.09	22	17.04	13.1	62.2

## 6.7 Auslegung des Drehzahlreglers

Der Drehzahlregler wird mit den Gleichungen aus Abschnitt 6.2.3 vorgenommen. Für die Auslegung gilt die beschriebene Vereinfachung der geregelten Ankerstromstrecke aus PT1-Glied.

$$T_{Nn} \stackrel{(6.17)}{=} 4 \cdot \sigma_n = 4 \cdot (t_{ei} + t_{gn}) = 4 \cdot (9.1 + 4) \text{ms} = 52.4 \text{ms} \quad (6.51)$$

$$V_{Nn} \stackrel{(6.18)}{=} \frac{T_H}{2 \cdot \sigma_n} = \frac{T_H}{2 \cdot (t_{ei} + t_{gn})} = \frac{87.12 \text{ms}}{2 \cdot (9.1 + 4) \text{ms}} = 3.325 \quad (6.52)$$

Für die Drehzahlregelung werden somit die Parameter  $T_{Rn} = 52 \text{ ms}$  und  $V_{Rn} = 3.33$  gesetzt.

### 6.7.1 Optimierung des Drehzahlreglers

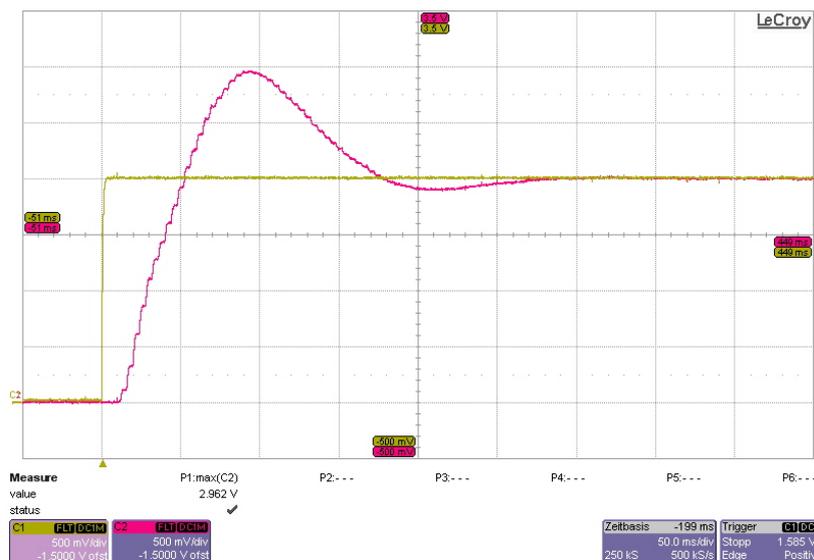


Abbildung 6.15: Sprungantwort der Drehzahlregelung mit  $V_{Rn} = 4.75$  und  $T_{Rn} = 52 \text{ ms}$

Der Drehzahlregler muss nach der Vorgabe mit SO die Vorgabe für einen Sollwertsprung aus Kap. 6.2.3 erfüllen.

$$t_{an} = 3.1 \cdot \sigma_n = 3.1 \cdot 13.1 \text{ms} = 40.61 \text{ms} \quad (6.53)$$

$$t_{aus} = 16.5 \cdot \sigma_n = 16.5 \cdot 13.1 \text{ms} = 216.15 \text{ms} \quad (6.54)$$

$$\ddot{u} = 43\% \quad (6.55)$$

Zur Ausmessung der Sprungantwort wird der Hauptsollwert und der Istwert der Drehzahl oszillographiert. Beide Werte werden mittels eines analogen Ausgangs über das Bedienpult ausgegeben. Die Regelparameter der Drehzahlregelung werden um die errechneten Werte variiert, um die Regelung zu optimieren (Tab. 6.6). Hierbei wurde ein Sollwertsprung von  $n_1 = 0 \frac{1}{\text{min}}$  zu  $n_2 = 200 \frac{1}{\text{min}}$ . Dieser führt zu keiner Feldschwächung und der Ankerstrom gerät nicht in die Begrenzung.

Der berechnete Regler ähnelt sehr stark dem automatisch vom Stromrichter erstelltem Regler. Beide erreichen jedoch das SO nicht, da die Anregelzeit  $t_{an}$  zu lang ist und die Überschwingweite  $\ddot{u}$  zu gering ist. Um die Schwingung des Reglers zu vergrößern wurde schrittweise die Verstärkung  $V_{nn}$  des Reglers reduziert. Die Reduktion vermindert die Gegensteuerung des Reglers im Moment des Überschwingens. Aus diesem Grund wird der Überschwinger größer. Für die Verstärkung des Reglers  $V_{nn}$  wurde 2.75 eingesetzt.

Das Vergrößern der Nachstellzeit  $T_{nn}$  führt zu einer Erhöhung der Anregelzeit  $t_{an}$  und zu einer Verminderung der Ausregelzeit  $t_{aus}$ . Eine Verkleinerung hat den gegenteiligen Effekt. Es wurde eine Nachstellzeit von 52 ms für den Regler eingetragen. Die sorgt für das gleiche Verhältnis von Anregelzeit zu Ausregelzeit, wie es vom symmetrischen Optimum vorgegeben wird. Der Regler ist lediglich etwas langsamer.

Der eingestellte Regler erfüllt die Vorgabe durch das symmetrische Optimum ausreichend genau (Abb. 6.15). Somit können Störungen durch den Regler schnell ausgeglet werden.

Tabelle 6.6: Optimierung des Drehzahlreglers

Bemerkung	$V_{nn}$	$T_{nn}$ [ms]	$\ddot{u}$ [%]	$t_{an}$ [ms]	$t_{aus}$ [ms]
Vorgabe SO			43	40.6	216.2
Berechneter Regler	3.33	52	30.2	57.1	158.7
Optimierungslauf Stromregler	3.38	54	29	56.1	156.5
Absenkung $V_{nn}$	2.75	52	44.8	48.5	243.9

## 6.7.2 Ausregelung von Störsprüngen

Zur Testen der Regelung in Störfällen werden diese im Stromrichter erzeugt. Dies ist nötig, da die Maschine noch nicht an eine Belastungseinheit angeschlossen ist. Deshalb wird für den Störsprung ein Drehmoment im Stromrichter vorgetäuscht. Hierfür wird der Istwert des Stromrichters mit dem internen Funktionsgenerator verbunden. Über die Addition des

Wertes wird ein Störstrom von 10.5 A erzeugt. Somit wird ein externes Drehmoment von  $0.5 M_N$  nachgebildet. Es wird sowohl im Stillstand als auch bei einer Drehzahl von  $1200 \frac{1}{\text{min}}$  die Störung angelegt. Die mittlere Ausregelzeit bei den Störungen beträgt 191 ms. Im Stillstand drehte die Maschine einen Winkel von  $80^\circ$ , bevor die Maschine erneut den Stillstand erreichte. Die mittlere maximale Drehzahlabweichung beträgt  $212 \frac{1}{\text{min}}$ . In den Oszillographen (Abb. 6.16 und 6.17) ist die Drehzahl in Gelb und der Ankerstrom in Blau dargestellt.

Die Drehzahlregelung nach dem SO ist in der Lage eine Störung schnell auszuregeln und ist somit für die Verwendung im Versuchsstand gut ausgelegt.

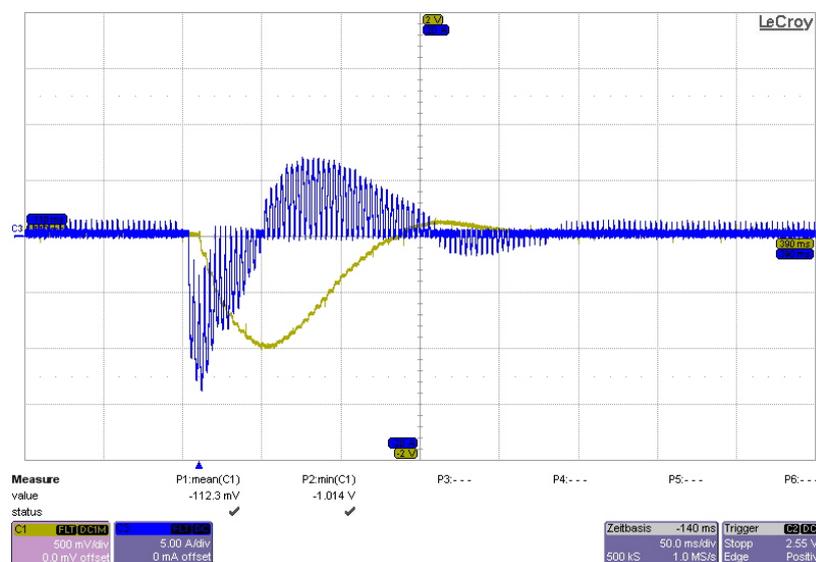


Abbildung 6.16: Störsprung im Stillstand mit  $M_{Str} = 0.5 \cdot M_N$

## 6.8 Sollwertglättung

### 6.8.1 Auslegung der Sollwertglättung

Für die Sollwertglättung ergibt sich nach Abschnitt 6.2.4 folgende Übertragungsfunktion:

$$G_{gs}(s) \stackrel{(6.22)}{=} \frac{1}{1 + t_{Nn} \cdot s} = \frac{1}{1 + 52.4 \text{ms} \cdot s} \quad (6.56)$$

Es wird  $T_{gs} = 52 \text{ ms}$  für die Sollwertglättung eingetragen.

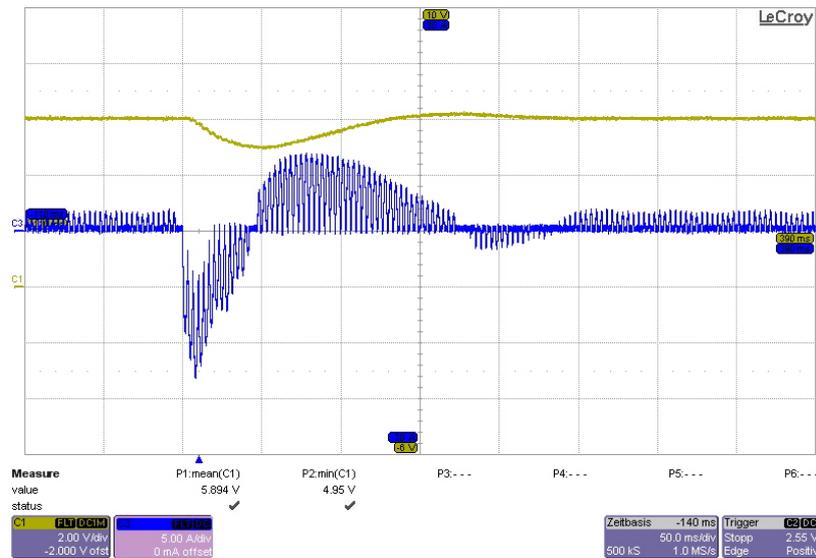


Abbildung 6.17: Störsprung bei  $1200 \frac{1}{\text{min}}$  mit  $M_{Str} = 0.5 \cdot M_N$

## 6.8.2 Optimierung der Sollwertglättung

Die Sollwertglättung soll nach Kap. 6.2.4 optimiert werden. Hierfür muss das Verhalten der Regelung der Vorgabe entsprechen.

$$t_{an} = 7.6 \cdot \sigma_n = 7.6 \cdot 13.1 \text{ ms} = 99.56 \text{ ms} \quad (6.57)$$

$$t_{aus} = 13.3 \cdot \sigma_n = 13.3 \cdot 13.1 \text{ ms} = 174.23 \text{ ms} \quad (6.58)$$

$$\ddot{u} = 8\% \quad (6.59)$$

Um diesem Verhalten näher zu kommen, wird die Zeitkonstante  $t_{gs}$  des PT1-Glieds angepasst (Tab. 6.7). Eine Erhöhung der Zeitkonstante reduziert das Überschwingen  $\ddot{u}$  und verlängert die Anregelzeit  $t_{an}$ . Durch das Verringern des Überschwingers verringert sich ebenfalls die Ausregelzeit  $t_{aus}$ .

Die eingestellte Zeitkonstante  $t_{gs}$  von 65 ms erfüllt das geforderte Kriterium für die Sollwertglättung am Besten, da sowohl die Überschwingweite also auch die Nachstellzeit des Reglers nah an der Vorgabe liegen. Lediglich die Anregelzeit ist größer als die Vorgabe. Eine Verringerung der Sollwertglättung wurde nicht in Betracht gezogen, da diese das Überschwingen lediglich verstärkt hätte. Der geglättete Sollwert (gelb) und die Auswirkung auf die Drehzahl (pink) können in der Oszillographie (Abb. 6.18) eingesehen werden.

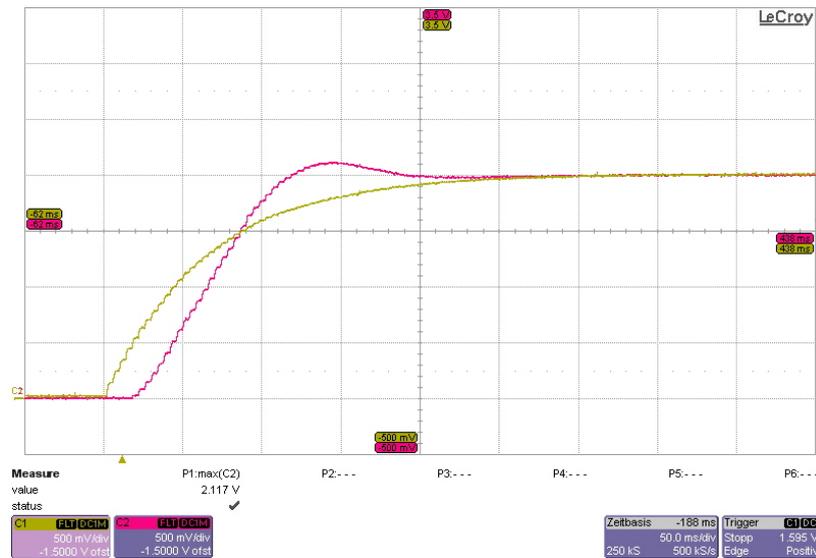
Abbildung 6.18: Sprungantwort der Drehzahlregelung mit Sollwertglättung  $t_{gs} = 65$ 

Tabelle 6.7: Optimierung der Sollwertglättung für die Drehzahlregelung

Bemerkung	$T_{gs}$ [ms]	$\ddot{u}$ [%]	$t_{an}$ [ms]	$t_{aus}$ [ms]
Vorgabe SO		8	99.6	174.2
Berechneter Wert	52	18.8	100.1	204.2
Erhöhung von $t_{gs}$	60	12.6	109.8	196.6
weitere Erhöhung von $t_{gs}$	70	3.1	135.3	149.3
eingestellter Wert	65	7.5	117.2	171.6

## 6.9 Feldschwächeregelung

### 6.9.1 Auslegung der Feldschwächeregelung

Aus Kapitel 6.3 erhalten wir für die Berechnung des Reglers folgende Vorschriften:

$$T_{Rie} \stackrel{(6.33)}{=} T_E = 179.76 \text{ms} \quad (6.60)$$

$$V_{Rie} \stackrel{(6.34)}{=} \frac{T_E}{2 \cdot \sigma_{ei} \cdot V_s} = \frac{179.76 \text{ms}}{2 \cdot (14.34 + 8) \cdot 1.749} = 3.35 \quad (6.61)$$

Für die Regelung des Erregerstromkreises wird eine Verstärkung von  $V_{Rie} = 4.02$  und eine Zeitkonstante von  $T_{Rie} = 180 \text{ms}$  eingesetzt.

## 6.9.2 Optimierung der Feldstromregelung

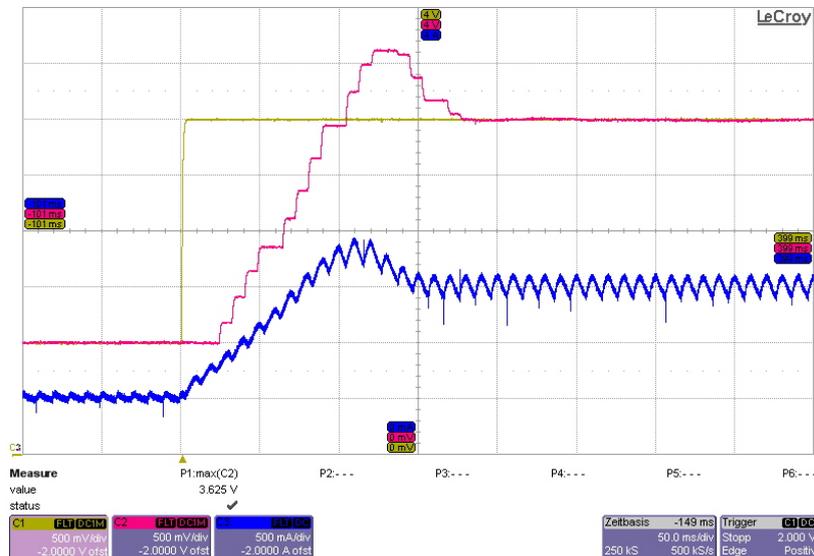


Abbildung 6.19: Sprungantwort der Erregerstromregelung mit  $V_{nei} = 5$  und  $T_{nei} = 20$  ms

Die Regelung des Erregerstroms wird nach dem BO durchgeführt. Hierbei liegen die zu erreichenden Kenngrößen nach Kap. 6.3.2 bei

$$t_{an} = 4.7 \cdot \sigma_{ei} = 105.00 \text{ ms} \quad (6.62)$$

$$t_{aus} = 8.4 \cdot \sigma_{ei} = 187.66 \text{ ms} \quad (6.63)$$

$$\ddot{u} = 8\% \quad (6.64)$$

Die Optimierung soll nach dem BO durchgeführt werden. Hierbei werden die Regelparameter um den errechneten Wert variiert (Tab 6.8). Für die Optimierung wird ein Sollwertsprung von  $I_{E1} = 0.5$  A auf  $I_{E2} = 1.5$  A durchgeführt.

Der eingesetzte Regler hat die Parameter  $V_{nei} = 6$  und  $T_{nei} = 30$  ms. Mit dem eingestellten Regler ist sowohl die Anregelzeit als auch die Ausregelzeit unterhalb der Forderung des BO. Lediglich das Überschwingen ist größer als die Vorgabe (Abb. 6.19). Sollwertänderungen können bei einer Veränderung des Erregerstroms schnell umgesetzt werden, sodass die Gegenspannung ausreichend gut geregelt wird.

Tabelle 6.8: Optimierung der Erregerstromregelung

<b>Bemerkung</b>	$V_{nei}$	$T_{nei}$ [ms]	$\dot{u}$ [%]	$t_{an}$ [ms]	$t_{aus}$ [ms]
Vorgabe BO			8	105.0	187.7
Berechneter Regler	4.03	180	21.0	96.3	430.5
Optimierungslauf Stromrichter	6.92	144	12.56	80.76	409.5
Erhöhung $V_{nei}$	6	180	15.8	97.12	331.6
Verringerung $T_{nei}$	6	30	20.8	97.9	171.9

# 7 Vergleich von Simulation und realem Modell

In diesem Kapitel werden wird die Simulation mit der real aufgebauten Gleichstrommaschine verglichen. Hierbei werden für die Simulation zunächst die berechneten Regler verwendet. Anschließend werden die Regler in der Simulation optimiert. Ziel ist es hierbei, Unterschiede zwischen dem Modell und der Simulation zu finden. Hierfür werden die Sprungantworten der einzelnen Regelkreise und der gemessene Störsprung aufgenommen. Die verwendeten Sprünge entsprechen hierbei den bei der Optimierung verwendeten Sprüngen. Somit kann ein direkter Bezug von der Simulation zur realen Regelung hergestellt werden.

## 7.1 Ankerstromregler

Tabelle 7.1: Optimierung der Stromregelung in der Simulation

Messung	$V_{ni}$	$T_{ni}$ [ms]	$\ddot{u}$	$t_{an}$ [ms]	$t_{aus}$ [ms]
Vorgabe BO			8	21.4	38.2
berechneter Regler in Real	0.12	16	27.5	13.7	81.2
berechneter Regler in Simulation	0.12	16	1.3	40	23
realer Regler	0.09	22	17	13.1	62.2
real verwendeter Regler in Simulation	0.09	22	1.1	139	125
Optimierung Simulation	0.19	16	8.7	14	28

In der Simulation wird für den Regler eine deutlich größere Verstärkung benötigt, als dies mit dem realen Stromrichter der Fall war. Auffällig hierbei ist, dass sich die gemessenen Streckenparameter kaum unterscheiden (vgl. Kap. 3 und 6.4). Dies könnte darauf hinweisen, dass im verwendeten Stromrichter kein reiner PI-Regler verwendet wird, sondern von

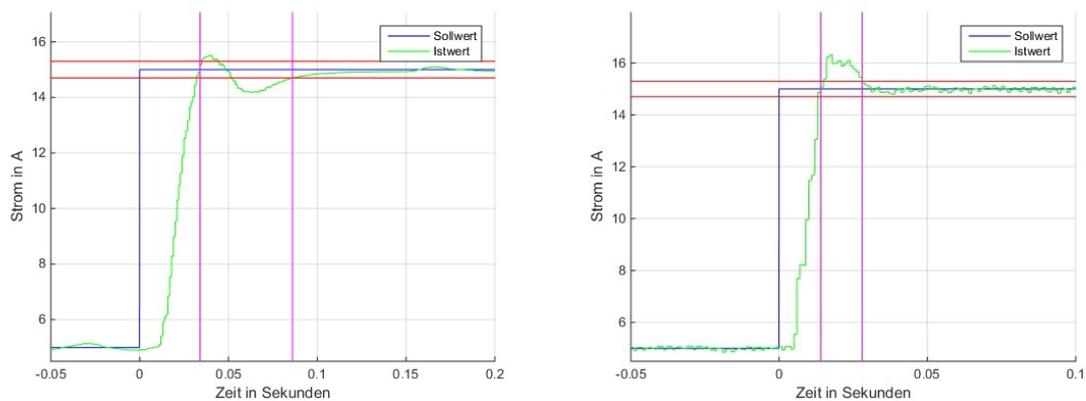


Abbildung 7.1: Sprung des Ankerstromsollwerts mit dem im Stromrichter verwendeten Regler (links) und dem in der Simulation nach BO optimierten Regler

der Software eine Vorsteuerung durchgeführt wird, die die Dynamik des Reglers und die Verstärkung des Stromrichters beeinflusst. Dies könnte auch erklären, warum es nicht möglich war, den Überschwinger bei der realen Regelung zu reduzieren, ohne die Regelung des Ankerstroms sehr träge zu machen.

In der Simulation ist weiterhin die Verzögerung des Stromrichters ideal. Diese beträgt  $t_{st} = 1.67$  ms. Hierdurch errechnet sich die Verstärkung für  $V_{Ni} = 0.20$ . Dieser Wert liegt nach an der Optimierung für die Simulation.

$$V_{Ni} \stackrel{(6.8)}{=} \frac{T_A}{2 \cdot V_{Si} \cdot \sigma_i} = \frac{T_A}{2 \cdot V_{Si} \cdot (t_{ei} + t_{st})} = \frac{15.56 \text{ ms}}{2 \cdot 14.29 \cdot (1.67 + 1) \text{ ms}} = 0.203 \quad (7.1)$$

Für die weiteren Vergleiche wird der Regler in der Simulation mit  $V_{ni} = 0.19$  und  $T_{ni} = 16$  ms eingestellt. Dies entspricht der Vorgabe für das Führungsverhalten nach BO.

## 7.2 Drehzahlregelung

Für die Drehzahlregelung muss sowohl das Führungsverhalten bei einem Sollwertsprung als auch das Störverhalten bei einer sprungförmigen Störung überprüft werden. Hierzu werden die Messungen, die an der Gleichstrommaschine durchgeführt wurde, wiederholt.

## 7.2.1 Sprungverhalten

Tabelle 7.2: Optimierung des Drehzahlreglers in der Simulation

Messung	$V_{nn}$	$T_{nn}$ [ms]	$\ddot{u}$	$t_{an}$ [ms]	$t_{aus}$ [ms]
Vorgabe SO			43	40.6	216.2
berechneter Regler in Real	3.33	52	30.2	57.1	158.7
berechneter Regler in Simulation	3.33	52	42.7	32	133
realer Regler	2.75	52	44.8	48.5	243.9
real verwendeter Regler in Simulation	2.75	52	41.5	34	202

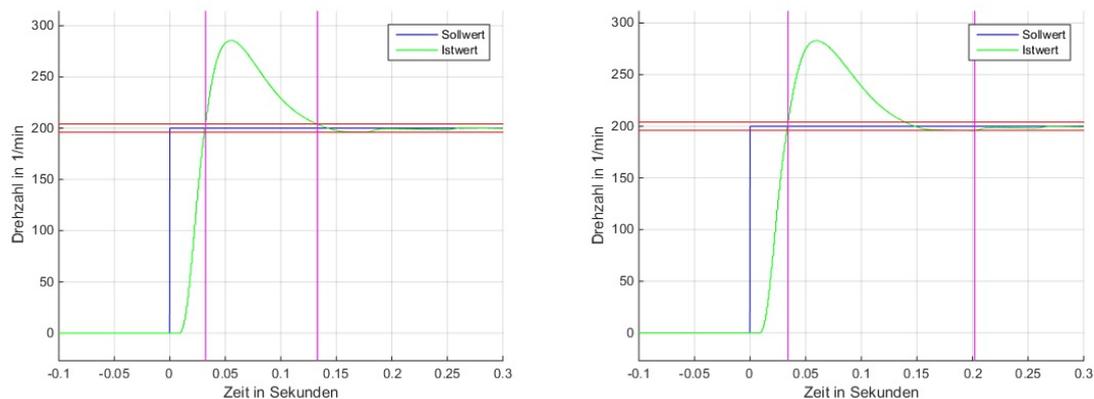


Abbildung 7.2: Sprungantwort der Drehzahlregelung mit berechnetem Regler (links) und im Stromrichter verwendetem Regler (rechts)

Durch die Optimierung des Ankerstromkreises verhält sich der Drehzahlregler mit den berechneten Parametern nahezu optimal zum SO. Durch den schnelleren Ankerstromregler wird die Anregelzeit des Drehzahlreglers ebenfalls schneller. Auch im Vergleich zum realen Regler ist die Abweichung durch den Stromregler zu begründen. Da der Stromregler im realen Modell langsamer ist, verzögert sich auch die Anregelung der Drehzahlregelung. Ebenfalls wird das zweite Überschwingen verstärkt, weswegen die Drehzahl länger braucht, um ausgeglichen zu sein. In der Simulation liegt der zweite Überschwinger bereits innerhalb der Toleranz von -2 %. Der Drehzahlregler im Stromrichter scheint somit, anders als der Stromregler, nicht durch interne Vorsteuerungen beeinflusst zu werden.

## 7.2.2 Störverhalten

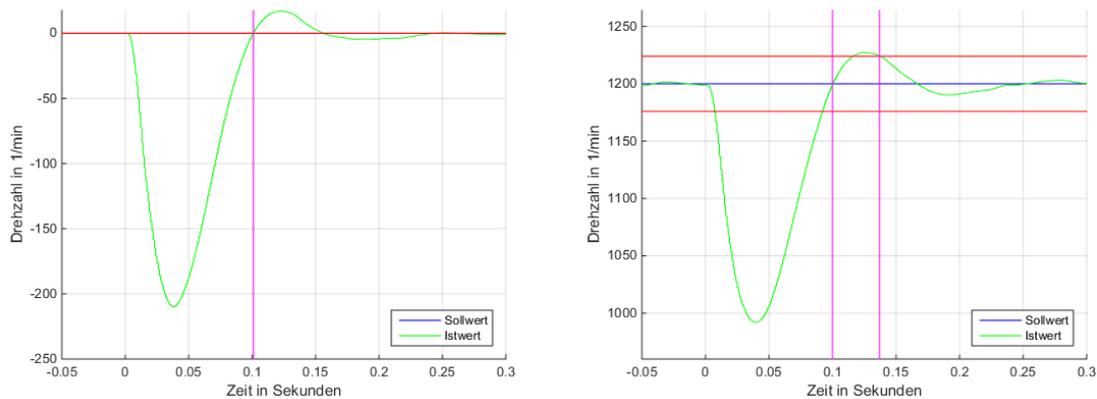


Abbildung 7.3: Ausregelung einer Störung von 23 Nm im Stillstand (links) und bei 1200  $\frac{1}{\text{min}}$  (rechts)

Um das Verhalten des Drehzahlreglers bei einer Störung zu messen, wurde auf den Motor in der Simulation ein Störsprung von 23 Nm gegeben. Dies entspricht der Hälfte des Nenn Drehmoments des Motors. Hierdurch ist die Störung in der Simulation mit der Störung, die an der Gleichstrommaschine untersucht wurde, zu vergleichen. Bei einer Drehzahl von 1200  $\frac{1}{\text{min}}$  wurde in der Simulation für die Ausregelung von 137 ms benötigt. Damit ist die Simulation wiederum schneller in der Regelung als das reale Modell. Dies liegt wiederum am langsameren Stromregler des realen Modells. Die Drehzahl wurde während des Störsprungs um 208  $\frac{1}{\text{min}}$  abgebremst. Dieser Wert liegt nah an dem real gemessenen Wert von 212  $\frac{1}{\text{min}}$ .

Bei der Simulation des Störsprungs im Stillstand der Maschine erreichte die Maschine eine maximale Abweichung vom Sollwert von -210  $\frac{1}{\text{min}}$ . Nach 235 ms war die Schwankung um den Nullpunkt geringer als 1  $\frac{1}{\text{min}}$ . Auch im Stillstand verhält sich die Maschine sehr ähnlich zur realen Gleichstrommaschine mit dem Unterschied, dass die Regelung schneller den Motor komplett bremst.

## 7.3 Sollwertglättung

Tabelle 7.3: Optimierung der Sollwertglättung in der Simulation

Messung	$T_{sn}$ [ms]	$\ddot{u}$	$t_{an}$ [ms]	$t_{aus}$ [ms]
vorgabe BO		8	99.6	174.2
berechneter Regler in Real	52	18.8	100.1	204.2
berechneter Regler in Simulation	52	2.4	97	196
realer Regler	65	7.5	117.2	171.6
real verwendeter Regler in Simulation	65	0.2	350	224
Optimierung Simulation	42	8.4	80	144

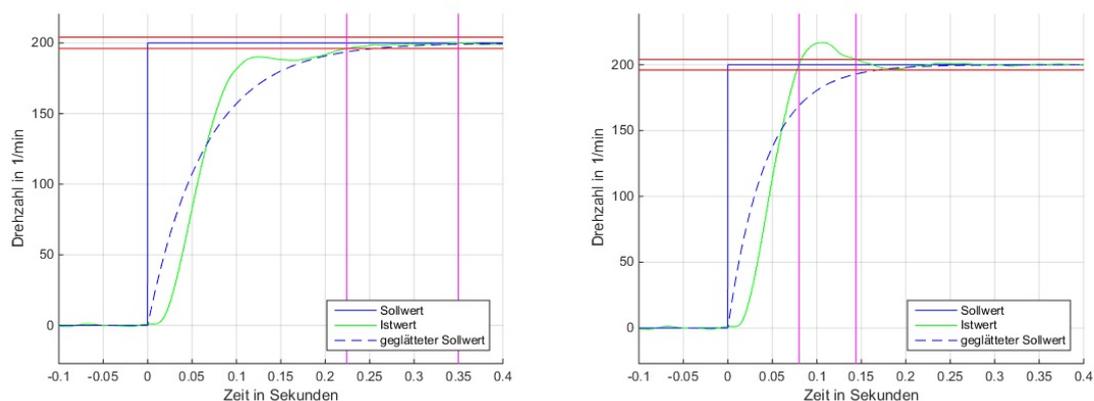


Abbildung 7.4: Simulationsergebnis der Drehzahlregelung mit Sollwertglättung mit  $t_{ns} = 65$  ms (links) und  $t_{ns} = 42$  ms (rechts)

Die Sollwertglättung, die in der Simulation erforderlich ist, ist deutlich kleiner, als die real Verwendete. Dies liegt zum einen an der schnelleren Regelung der Drehzahl in der Simulation. Durch diese muss auch die Sollwertglättung verringert werden, da sonst der Überschwinger zu stark gedämpft wird. Dies fällt vor allem bei der Glättungszeit von 65 ms auf. Bei dieser wird das Überschwingen komplett unterdrückt, da der Sollwert zu langsam ansteigt. Die reale Dimensionierung der Sollwertglättung muss neben dem Überschwingen der Drehzahlregelung auch noch den Ankerstromregler kompensieren, da dieser deutlich dynamischer ist, als er nach dem BO sein sollte.

## 7.4 Erregerstromregler

Tabelle 7.4: Optimierung der Feldstromregelung in der Simulation

Messung	$V_{nie}$	$T_{nie}$ [ms]	$\ddot{u}$	$t_{an}$ [ms]	$t_{aus}$ [ms]
vorgabe BO			8	105	187.7
berechnet Regler in Real	4.03	180	21	96.3	430.5
berechnet Regler in Simulation	4.03	180	0.3	539	266
realer Regler	6	30	20.8	97.9	331.6
real verwendeter Regler in Simulation	6	30	5.6	132	204

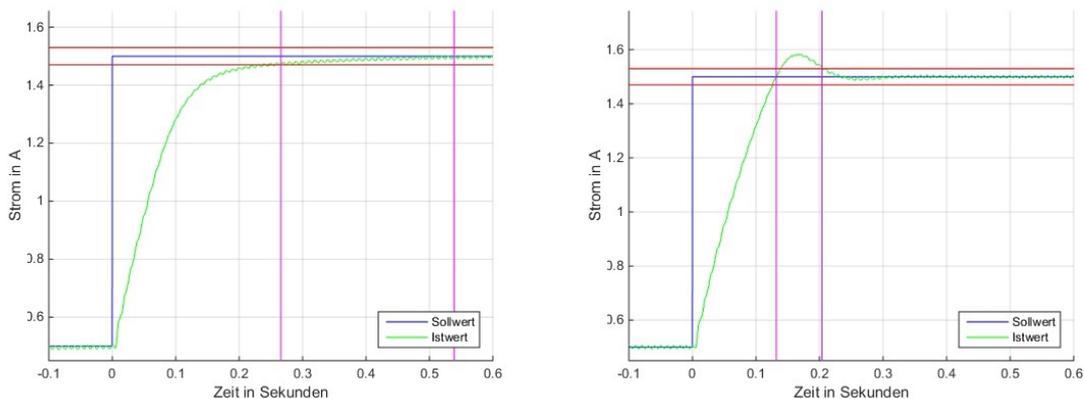


Abbildung 7.5: Sprung des Erregerstroms mit berechnetem Regler (links) und im Stromrichter verwendetem Regler (rechts)

Auffällig ist, dass in der Simulation das Überschwingen vor dem Erreichen des Sollwerts deutlich kleiner ausfällt, als in der im Stromrichter implementierten Regelung. Dies deutet darauf hin, dass auch in der Regelung des Erregerstromkreises im Stromrichter eine Vorsteuerung statt findet. Diese sorgt sogar bei der großen Verzögerungszeit von 180 ms, dass es zu einem deutlichen Überschwingen im Regelvorgang kommt. In der Simulation ist kein Überschwingen des Istwerts festzustellen. Die Nachstellzeit scheint auf die reale Regelung keinen großen Einfluss zu nehmen. In der Simulation beschleunigt sie die Regelung hingegen ungemein.

## 8 Fazit

Ziel der Arbeit war es, einen Schaltschrank für eine Gleichstrommaschine zu bauen und diese für den Prüfstand "Windenergie Netzeinspeisung" vorzubereiten. Der verbaute Stromrichter und die Gleichstrommaschine sollten hierbei analysiert werden, um eine Regelung für das Antriebssystem auszulegen. Ebenfalls sollte die Regelcharakteristik des Stromreglers untersucht werden. Im Zuge der Arbeit wurde zusätzlich eine Simulation der Gleichstrommaschine samt Stromrichter angefertigt.

Der Aufbau des Schaltschranks erfolgte nach den überarbeiteten Schaltplänen von Herrn Klotz (2014). Im Verlauf der Arbeit wurden hier Verbesserungen in dem Anschluss des Schaltschranks vorgenommen. Dieser kann nun leichter an einen neuen Arbeitsplatz installiert werden. Zusätzlich wurde die Steuerung des Lüfters mit der Ansteuerung des Motors gekoppelt. Der Lüfter arbeitet nur bei eingeschalteter Maschine. Dies führt zu einer erheblichen Lärmreduktion. Im Rahmen der Regelung wurden alle relevanten Parameter der Strecke aufgenommen. Auf der Basis dieser Streckenparameter beruht die Auslegung der Regelung, die nach den Optimierungsverfahren des Betragsoptimums und des symmetrischen Optimums ausgelegt wurden. Zusätzlich wurde die Drehmoment-Strom Kennlinie aufgenommen, um für die spätere Verwendung als simuliertes Windrad das Drehmoment einstellen zu können.

Durch den Vergleich der Simulation mit dem real verwendeten Regler lässt sich feststellen, dass sowohl die Regelung des Ankerstroms als auch die Regelung des Erregerstroms durch den Stromrichter beeinflusst wird. Dieser nimmt Aufschaltungen vor, durch welche der Regler sich nicht wie ein PI-Regler verhält. Dies führt bei der Optimierung der Regelungen zu starken Abweichungen von den berechneten Werten. Hierdurch ist eine Verwendung des Stromrichters im Zuge eines Laborversuchs zur Gleichstrommaschine abzuraten. Ferner sollte eine separate Thyristor-Brücke mit Ansteuerung verwendet werden.

Die in Matlab/Simulink erstellte Simulation spiegelt das Verhalten der Gleichstrommaschine gut wieder. Hierbei verhält diese sich ähnlich dem realen Modell.

Somit wurden die anfänglichen Fragestellungen und Anforderungen, die im Laufe der Thesis

---

erarbeitet wurden, überwiegend erfüllt. Lediglich die Funktionsweise der Regler im Stromrichter führten zu nicht optimal geregelten Stromkreisen.

In zukünftigen Arbeiten, die den Schaltschrank für den Asynchrongenerator sowie die Verbindung der Anlagen über das D-Space System umfassen, muss der Prüfstand vollendet werden. Dies schließt hierbei eine Windsimulation ein, die ein Belastungsprofil für die Gleichstrommaschine darstellt. Final müssen für den Prüfstand Laboraufgaben entwickelt werden, sodass der Prüfstand im Laborbetrieb der Hochschule aufgenommen werden kann.

# Abkürzungsverzeichnis

## Abkürzungen

<b>BO</b>	Betragsoptimum
<b>CM</b>	Converter-Module
<b>CU</b>	Control-Unit
<b>DDS</b>	Drive Data Set
<b>SO</b>	symmetrische Optimum

## Formelzeichen

$\alpha$	Phasenanschnittswinkel
$\eta_{ges}$	Gesamtwirkungsgrad
$f_N$	Nennfrequenz
$f_{Netz}$	Netzfrequenz
$G_{gs}$	Übertragungsfunktion der Sollwertglättung
$G_O$	Übertragungsfunktion des offenen Kreises
$G_R$	Übertragungsfunktion des Reglers
$I_A$	Ankerstrom
$I_{AN}$	Ankernennstrom
$I_e$	Erregerstrom
$I_{EN}$	Erregernennstrom
$I_{max}$	maximal zulässiger Spitzenstrom
$I_N$	Nennstrom

---

$I_{NA}$	Nennstrom der Versorgung für den Ankerkreis
$I_{NE}$	Nennstrom der Versorgung für den Erregerkreis
$I_{NN}$	Nennstrom des Netzteils
$K_M$	konstante zur Berechnung des Drehmoments
$k_u$	konstante zur Berechnung der Gegenspannung
$L_A$	Ankerkreisinduktivität
$L_L$	Induktivität der Spule
$M_i$	inneres Drehmoment
$M_N$	Nenndrehmoment
$n$	Istwert der Drehzahl
$N_e$	Wicklungszahl der Erregerwicklung
$n_{Maxel}$	maximale elektrische Drehzahl
$n_{Maxmech}$	maximale mechanische Drehzahl
$n_N$	Nenndrehzahl
$\Phi_e$	Feld des Erregerstroms
$P_N$	Nennleistung
$P_{NL}$	Nennleistung des Lüfters
$P_{NN}$	Nennleistung des Netzteils
$P_{VN}$	Verlustleistung im Nennbetrieb
$R_A$	Ankerkreiswiderstand
$R_{ISO}$	Isolationsspannung zwischen Leitern
$\sigma_i$	Summenzeitkonstante Stromregelkreis
$\sigma_n$	Summenzeitkonstante Drehzahlregelkreis
$T_A$	Zeitkonstante des Ankerstromkreises
$t_{an}$	Anregelzeit bei Regelung
$t_{aus}$	Ausregelzeit bei Regelung
$t_{ei}$	Zeitkonstante des vereinfachten Stromregelkreises

---

$t_{gi}$	Verzögerung des Ankerstrommessglieds
$t_{gs}$	Zeitkonstante der Sollwertglättung
$T_H$	Hochlaufzeit
$T_{ni}$	Nachstellzeit des Ankerstromreglers
$T_{nie}$	Nachstellzeit des Erregerstromreglers
$T_{nn}$	Nachstellzeit des Drehzahlreglers
$t_{st}$	Verzögerung des Stromrichters
$\ddot{u}$	Überschwingweite bei Regelung
$U_A$	Ankerspannung
$U_{AN}$	Ankernennspannung
$U_{di}$	Gleichspannung des Stromrichters
$U_E$	Erregerspannung
$U_{EN}$	Erregernennspannung
$U_k$	Kurzschlussspannung
$U_{NA}$	Nennspannung der Versorgung für den Ankerkreis
$U_{NE}$	Nennspannung der Versorgung für den Erregerkreis
$U_q$	Gegenspannung
$V_A$	Verstärkung des Ankerstromkreises
$V_{ei}$	Verstärkung des vereinfachten Stromregelkreises
$V_{gi}$	Verstärkung des Ankerstrommessglieds
$V_{ni}$	Verstärkung des Ankerstromreglers
$V_{nie}$	Verstärkung des Erregerstromreglers
$V_{nn}$	Verstärkung des Drehzahlreglers
$V_{Si}$	Steckenverstärkung
$V_{sn}$	Streckenverstärkung Drehzahlregelkreis
$V_{st}$	Verstärkung des Stromrichters
$X_L$	Impedanz der Drossel

# Tabellenverzeichnis

2.1	Angaben des Datenblatts der Gleichstrommaschine . . . . .	14
4.1	Nenndaten des Stromrichters nach [A30] . . . . .	31
4.2	Nenndaten der dreiphasigen Drossel L1 [A2] . . . . .	34
4.3	Nenndaten der einphasigen Drossel L2 [A3] . . . . .	34
4.4	Verwendete Sicherungen und Motorschutzschalter im Schaltschrank . . . . .	36
5.1	Messpunkte und Messwerte der Schutzleiterprüfung . . . . .	50
6.1	Messungen von $t_{St}$ . . . . .	76
6.2	Messung des Ankerstromkreises . . . . .	77
6.3	Messergebnisse des Hochlaufversuchs . . . . .	79
6.4	Messwerte der Drehzahl-Strom-Kennlinie . . . . .	82
6.5	Optimierung des Ankerstromreglers . . . . .	84
6.6	Optimierung des Drehzahlreglers . . . . .	86
6.7	Optimierung der Sollwertglättung für die Drehzahlregelung . . . . .	89
6.8	Optimierung der Erregerstromregelung . . . . .	91
7.1	Optimierung der Stromregelung in der Simulation . . . . .	92
7.2	Optimierung des Drehzahlreglers in der Simulation . . . . .	94
7.3	Optimierung der Sollwertglättung in der Simulation . . . . .	96
7.4	Optimierung der Feldstromregelung in der Simulation . . . . .	97

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Aufgebaute Gleichstrommaschine . . . . .	9
2.1	Aufbau einer Gleichstrommaschine (Parspour (2008, S. 4)) . . . . .	10
2.2	Erregerfeld (Spring (2009, S. 70)) . . . . .	11
2.3	Läuferfeld (Spring (2009, S. 70)) . . . . .	12
2.4	Aufbau einer Gleichstrommaschine (Parspour (2008, S. 15)) . . . . .	13
2.5	Verschaltung des Ankers (nach Parspour (2008, S. 16)) . . . . .	13
3.1	Bodeplot des Notch-Filters für das Strom und das Drehzahlssignal . . . . .	17
3.2	Auswirkung der Filterung in den Messgliedern . . . . .	18
3.3	Blöcke der Realisierung des B2- Gleichstromrichters . . . . .	19
3.4	B2-Thyristorbrücke in Matlab mit Schaltbild . . . . .	20
3.5	Errechnung des Sollwerts des Erregerstroms . . . . .	20
3.6	Erzeugung der Pulse für die B2 Brücke über Rampen für Phasenanschnitt und Pulsbreite . . . . .	22
3.7	Blöcke der Realisierung des B6- Gleichstromrichters . . . . .	23
3.8	Verschaltung der zwei B6-Brücken . . . . .	24
3.9	Vier Quadranten des Stromrichters (Schröder (2012, S. 104)) . . . . .	24
3.10	Freigabe von Pulsen der doppelten B6-Brücken . . . . .	25
3.11	Kompensation des Phasenanschnittswinkel im Lückbereich . . . . .	26
3.12	Steuerkennlinie des Stromrichters mit zwei B6-Brücken (erweitert nach Röther (2015b, S. 30)) . . . . .	29
4.1	Stromrichter SIEMENS Sinamics DC-Master [A29] . . . . .	30
4.2	Hauptschütz Q1 [A4] . . . . .	35
4.3	Verbaute Sicherungen im Schaltschrank . . . . .	36
4.4	Anschlussbuchsen der Spannungsversorgung . . . . .	38
4.5	Bedienpult mit Beschriftungen . . . . .	39
4.6	Hilfsschütz K1 und K2 [A11] . . . . .	40
4.7	Optokoppler T3 - T6 [A20] . . . . .	41
4.8	Spannungswandler T7 . . . . .	41
4.9	Inkrementalgeber . . . . .	42
4.10	Löcher und eingesetzte Lüfter . . . . .	44

4.11	Einspeisung und Hauptschalter . . . . .	44
4.12	Ausgänge zum Motor und zu den Bedieneinheiten . . . . .	45
4.13	Blick in den fertig verdrahteten Schaltschrank . . . . .	46
5.1	Prüfgerät Profitest (Gossen Metrawatt (2015)) . . . . .	49
5.2	Navigationsbaum . . . . .	50
5.3	Einstellung der IP-Adresse . . . . .	51
5.4	Erstellung des Projekts in SIEMENS-Starter . . . . .	51
5.5	Anlegen des Datensatzes für die Steuerung der Drehzahlregelung . . . . .	53
5.6	Logische Programmierung der Regelungsarten mit Ist- und Sollwert Umschal- tung . . . . .	55
5.7	Laden in den Stromrichter . . . . .	58
6.1	Optimierungsparameter für die Reglerauslegung (Schröder (2015, S. 82)) . . . . .	63
6.2	Aufbau der Kaskadenregelung für die Gleichstrommaschine (zusammenge- setzt nach Röther (2015c, S. 6, 12, 21)) . . . . .	64
6.3	Stromregelkreis (nach Röther (2015c, S. 6)) . . . . .	65
6.4	Sprungantwort beim BO (nach Schröder (2015, S. 54)) . . . . .	66
6.5	Drehzahlregelkreis mit Sollwertglättung (nach Röther (2015c, S. 21)) . . . . .	68
6.6	Sprungantwort bei SO (nach Schröder (2015, S. 62)) . . . . .	70
6.7	Sprungantwort bei SO mit Sollwertglättung (nach Schröder (2015, S. 62)) . . . . .	71
6.8	Verhalten der Gleichstrommaschine im Ankerstellbereich und im Feldschwä- chebereich (Schröder (2015, S. 293)) . . . . .	73
6.9	Regelung des Erregerkreises (nach Schröder (2015, S. 292 ff.)) . . . . .	74
6.10	Messung der Ankerkreiszeitkonstante (gelb: $U_A$ , pink: $I_A$ ) . . . . .	77
6.11	Hochlaufversuch (gelb: n, blau: $I_A$ , pink: $I_{Asoll} \hat{=} 10.5 \text{ A}$ ) . . . . .	78
6.12	Treppenförmige Ausgabe des Inkrementalgebers . . . . .	80
6.13	Vorrichtung zur Messung des Drehmoment-Strom Verhältnisses . . . . .	81
6.14	Sprungantwort des Ankerstromreglers mit $V_{Ni} = 0.09$ und $T_{Ni} = 22 \text{ ms}$ . . . . .	84
6.15	Sprungantwort der Drehzahlregelung mit $V_{Rn} = 4.75$ und $T_{Rn} = 52 \text{ ms}$ . . . . .	85
6.16	Störsprung im Stillstand mit $M_{Str} = 0.5 \cdot M_N$ . . . . .	87
6.17	Störsprung bei $1200 \frac{1}{\text{min}}$ mit $M_{Str} = 0.5 \cdot M_N$ . . . . .	88
6.18	Sprungantwort der Drehzahlregelung mit Sollwertglättung $t_{gs} = 65$ . . . . .	89
6.19	Sprungantwort der Erregerstromregelung mit $V_{nei} = 5$ und $T_{nei} = 20 \text{ ms}$ . . . . .	90
7.1	Sprung des Ankerstromsollwerts mit dem im Stromrichter verwendeten Regler (links) und dem in der Simulation nach BO optimierten Regler . . . . .	93
7.2	Sprungantwort der Drehzahlregelung mit berechnetem Regler (links) und im Stromrichter verwendetem Regler (rechts) . . . . .	94
7.3	Ausregelung einer Strörung von $23 \text{ Nm}$ im Stillstand (links) und bei $1200 \frac{1}{\text{min}}$ (rechts) . . . . .	95

---

7.4	Simulationsergebnis der Drehzahlregelung mit Sollwertglättung mit $t_{ns} = 65$ ms (links) und $t_{ns} = 42$ ms (rechts) . . . . .	96
7.5	Sprung des Erregerstroms mit berechnetem Regler (links) und im Stromrichter verwendetem Regler (rechts) . . . . .	97

# Literaturverzeichnis

[BmWE 2015] BMW: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Dezember 2015. – URL <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/B/bruttostromerzeugung-in-deutschland,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>. – Zugriffsdatum: 05.03.2016

[Dzieia u. a. 2011] DZIEIA, Michael ; HÜBSCHER, Heinrich ; JAGLA, Dieter ; PETERSEN, Hans-Joachim ; WICKERT, Harald: *Elektronik Tabellen - Betriebs- und Automatisierungstechnik*. Bildungshaus Schulbuchverlag, 2011. – ISBN 978-3-14-245035-3

[Fluke Messfibel 2011] FLUKE MESSFIBEL: Fluke Corporation, Juli 2011. – URL [http://www.rekirsch.at/user\\_html/1282834349/pix/user\\_img/pdfs/Center\\_Losungen/messfibel.pdf](http://www.rekirsch.at/user_html/1282834349/pix/user_img/pdfs/Center_Losungen/messfibel.pdf). – Zugriffsdatum: 09.02.2016

[Gossen Metrawatt 2015] GOSSEN METRAWATT: CMC-I Messtechnik GmbH, 2015. – URL [https://www.gossenmetrawatt.com/resources/p1/profi204/db\\_d.pdf](https://www.gossenmetrawatt.com/resources/p1/profi204/db_d.pdf). – Zugriffsdatum: 09.02.2016

[Klotz 2014] KLOTZ, Tim Eberhard T.: *Planung, Erstellung, Inbetriebnahme und regelungstechnische Analyse eines Gleichstromantriebssystems als Belastungseinrichtung für einen Windenergieanlagen Simulator*. Hochschule für Angewandte Wissenschaft Hamburg - Bachelorarbeit im Labor für Energietechnik und Leistungselektronik. 2014. – URL <https://kataloge.uni-hamburg.de/DB=2/SET=1/TTL=1/SHW?FRST=2>. – Verweis auf Hochschulbibliothek

[Nieder und Bickel 2015] NIEDER, Thomas ; BICKEL, Peter: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Dezember 2015. – URL [http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/zeitreihen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-1.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=5](http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/zeitreihen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-1.pdf?__blob=publicationFile&v=5). – Zugriffsdatum: 05.03.2016

[Parspour 2008] PARSPOUR, Nejila: *Grundlagenpraktikum Versuch 002 Die Gleichstrommaschine*. Universität Stuttgart, 2008. – URL [http://www.ilea.uni-stuttgart.de/dateien/gp/Versuch\\_002\\_Gleichstrommaschine.pdf](http://www.ilea.uni-stuttgart.de/dateien/gp/Versuch_002_Gleichstrommaschine.pdf). – Zugriffsdatum: 27.02.2016

- [Röther 2015a] RÖTHER, Michael: *Antriebe und Leistungselektronik*. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 2015. – Kapitel 2 der Vorlesung
- [Röther 2015b] RÖTHER, Michael: *Antriebe und Leistungselektronik*. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 2015. – Kapitel 3 der Vorlesung
- [Röther 2015c] RÖTHER, Michael: *Antriebe und Leistungselektronik*. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 2015. – Kapitel 4 der Vorlesung
- [Schröder 2012] SCHRÖDER, Dierk: *Leistungselektronische Schaltungen-Funktion, Auslegung und Anwendung*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. – ISBN 978-3-642-30103-2
- [Schröder 2015] SCHRÖDER, Dierk: *Elektrische Antriebe-Regelung von Antriebssystemen*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015. – ISBN 978-3-642-30096-7
- [Specovius 2015] SPECOVIVUS, Joachim: *Grundkurs Leistungselektronik: Bauelemente, Schaltungen und Systeme*. Springer Vieweg, 2015. – ISBN 978-3-658-03308-8
- [Spring 2009] SPRING, Eckhard: *Elektrische Maschinen*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. – ISBN 978-3-642-00884-9

# Anhang

Die Anhänge können bei den Prüfern eingesehen werden. Diese sind nach folgender Struktur sortiert:

## Datenblätter

<b>A1</b>	Gleichstrommaschine
<b>A2</b>	dreiphasige Drossel
<b>A3</b>	einphasige Drossel
<b>A4</b>	Hauptschütz
<b>A5</b>	Überspannungsbegrenzer
<b>A6</b>	12 V-Netzteil
<b>A7</b>	UK-4 Klemme
<b>A8</b>	UK-2 Klemme
<b>A9</b>	Schaltschrank
<b>A10</b>	Bedienpult
<b>A11</b>	Koppelrelais
<b>A12</b>	Sicherung 32 A AC
<b>A13</b>	Sicherung 32 A DC
<b>A14</b>	Sicherung 4 A DC
<b>A15</b>	Sicherung 4 A AC
<b>A16</b>	Sicherung 0.1 A
<b>A17</b>	Motorschutzschalter
<b>A18</b>	Sicherungshalter 14x51

<b>A19</b>	Sicherungshalter 10x38
<b>A20</b>	Optokoppler
<b>A21</b>	10-Gang Potentiometer
<b>A22</b>	Potentiometerknopf
<b>A23</b>	Stufenschalter
<b>A24</b>	Kippschalter
<b>A25</b>	Drehgeber
<b>A26</b>	Spannungsregler 7805
<b>A27</b>	Konstantspannungsquelle
<b>A28</b>	Oszilloskop
<b>A29</b>	Profitest

### **Bedienungsanleitungen**

<b>A30</b>	Control-Unit
<b>A31</b>	Converter-Modul
<b>A32</b>	Freie Funktionsblöcke
<b>A33</b>	Listenhandbuch
<b>A34</b>	Maßzeichnung

### **Montage und Schaltpläne**

<b>A35</b>	Montageplan
<b>A36</b>	Schaltplan
<b>A37</b>	Materialliste

### **Montage und Schaltpläne**

**A38**            Matlab Simulation

**A39**            STARTER-Projekt

**A40**            WSCAD-Projekt

# Versicherung über die Selbstständigkeit

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

Hamburg, 16. März 2016

Ort, Datum

Unterschrift