



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

# Bachelorthesis

Florian Alpheis

Aufbau, Inbetriebnahme und Untersuchung eines  
Gleichstromantriebes

Florian Alpheis  
Aufbau, Inbetriebnahme und Untersuchung eines  
Gleichstromantriebes

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

Betreuender Prüfer : Prof. Dr. -Ing. Gustav Vaupel  
Zweitgutachter : Prof. Dr. Frerk Haase

Abgegeben am 12. Dezember 2017

**Florian Alpheis**

**Thema der Bachelorthesis**

Aufbau, Inbetriebnahme und Untersuchung eines Gleichstromantriebes

**Stichworte**

Gleichstromantrieb, Regelungsoptimierung, Symmetrisches Optimum, Betragsoptimum, Kaskadenregelung, Stromrichter, DC-Master, Siemens Starter

**Kurzzusammenfassung**

Diese Arbeit umfasst den Aufbau eines Stromrichters für einen Gleichstromantrieb und die Inbetriebnahme des Stromrichters. Zur Inbetriebnahme ist die genaue Vorgehensweise der Parametrierung beschrieben. Des Weiteren wird das Verhalten der Regelung untersucht, eine Regelung mittels Kaskadenregelung umgesetzt und eine Optimierung des Drehzahl- und Stromregelkreises nach dem Betragsoptimum und dem Symmetrischen Optimum durchgeführt.

**Florian Alpheis**

**Title of the paper**

Installation, commissioning and analysis of a DC drive

**Keywords**

DC-drive, control improvements, symmetrical optimum, optimum criteria, power converter, DC-Master, Siemens Starter

**Abstract**

Inside this report is a detailed description to install and commissioning of a DC-converter. This includes a very comprehensive documentation of the parameter setting. Furthermore there is a realization of a DC-drive control and implements to optimize the current and the speed circuit through the symmetrical and criteria optimum.

## **Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich Herrn Prof. Dr. -Ing. Vaupel dafür danken, dass ich diese Arbeit bei ihm im Labor der HAW anfertigen durfte und für die Beantwortung meiner zwischenzeitlichen Fragen sowie die doch sehr interessanten Anregungen zu meinem Thema. Natürlich möchte ich mich auch hiermit bei Herrn Korpel für die tatkräftigen Unterweisungen, Unterstützungen und die getätigten organisatorischen Aufgaben ganz besonders bedanken. Des Weiteren danke ich Herrn Prof. Dr. Haase für die Zweitkorrektur und die dafür genommene Zeit.

Zum Schluss danke ich meiner Familie und meinen Freunden für die Unterstützung während der kompletten Zeit des Studiums sowie ganz besonders für die Zeit während der Anfertigung dieser Arbeit.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Aufbau des Stromrichters bzw. Gleichstromantriebes</b>	<b>8</b>
2.1	Beschreibung des Laborstandes . . . . .	8
2.2	Realisierung des Stromrichters . . . . .	11
2.2.1	Übersicht der Komponenten . . . . .	11
2.2.2	Erweiterungen und Änderungen . . . . .	16
2.2.3	Fertigung des Stromrichterschaltchranks . . . . .	18
<b>3</b>	<b>Inbetriebnahme</b>	<b>21</b>
3.1	Prüfung des Stromrichter-Schaltchranks nach VDE 0100 Teil 600 . . . . .	21
3.2	Inbetriebnahme des Stromrichters mit dem Siemens STARTER . . . . .	24
3.2.1	Grundkonfiguration . . . . .	25
3.2.2	Parametrierung der Antriebsdatensätze . . . . .	28
3.2.3	Parametrierung der Analogeingänge und Analogausgänge . . . . .	30
3.2.4	Parametrierung der Digitaleingänge . . . . .	30
3.2.5	Soll-Istwert Einstellungen . . . . .	31
3.2.6	Fehler automatisch quittieren . . . . .	31
3.2.7	Hochlaufgeber umgehen . . . . .	31
3.2.8	Drehzahl auf dem Display des DC-Masters (BOP 20) . . . . .	32
3.2.9	Optimierungsläufe . . . . .	32
3.2.10	Funktionstest Bedienpult . . . . .	32
3.2.11	Hinweis zur Ankerspannungsreglung . . . . .	33
3.3	Bestimmung der Lückgrenze . . . . .	33
<b>4</b>	<b>Ersatzschaltbild der Gleichstrommaschine</b>	<b>35</b>
<b>5</b>	<b>Regelung von Gleichstrommaschinen</b>	<b>36</b>
5.1	Regelung mittels Kaskadenregelung . . . . .	36
5.2	Betragsoptimum . . . . .	37
5.3	Symmetrisches Optimum . . . . .	39

---

<b>6 Optimierung des Stromregelkreises</b>	<b>42</b>
6.1 Bestimmung der Streckenparameter des Stromregelkreises . . . . .	42
6.1.1 Ankerzeitkonstante $T_A$ . . . . .	43
6.1.2 Streckenverstärkung $V_{si}$ . . . . .	45
6.1.3 Summe der kleinen Zeitkonstanten $T_{\sigma i}$ . . . . .	48
6.1.4 Zusammenfassung der ermittelten und berechneten Streckenparameter	52
6.2 Auslegung des Stromreglers nach dem Betragsoptimum . . . . .	53
6.3 Validierung des Stromregelkreises . . . . .	54
6.3.1 Ankerstromregelung als PI-Stromregler . . . . .	54
6.3.2 Technologieregler als PI-Stromregler . . . . .	58
<b>7 Optimierung des Drehzahlregelkreises</b>	<b>63</b>
7.1 Bestimmung der Streckenparameter des Drehzahlregelkreises . . . . .	63
7.1.1 Ermittlung der Hochlaufzeitkonstante $T_H$ . . . . .	64
7.1.2 Summe der Zeitkonstanten $T_{\sigma n}$ . . . . .	70
7.1.3 Streckenverstärkung $V_{SN}$ . . . . .	71
7.1.4 Zusammenfassung der ermittelten und berechneten Streckenparameter	72
7.2 Auslegung des Drehzahlreglers nach dem Symmetrischen Optimum . . . . .	73
7.3 Validierung des Drehzahlregelkreises . . . . .	74
7.3.1 Drehzahlregelkreis Sprungantwort optimiert nach dem Symmetrischen Optimum . . . . .	74
7.3.2 Drehzahlregelkreis Sprungantwort optimiert nach Symmetrischen Op- timum mit Sollwertglättung . . . . .	77
<b>8 Fazit</b>	<b>79</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>81</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>83</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>85</b>
<b>Anhang</b>	<b>85</b>

# 1 Einführung

In dieser Bachelorarbeit wird ein Stromrichter, der Firma Siemens vom Typ DC-Master, mit welchem, die Steuerung und Regelung eines Gleichstromantriebes umgesetzt wird, aufgebaut, in Betrieb genommen und untersucht. Im Wesentlichen soll der neu aufgebaute Stromrichter dazu dienen, den vorhandenen Arbeitsplatz zur Untersuchung und Regelung einer Gleichstrommaschine zu modernisieren. Die Arbeit beinhaltet den Aufbau des Stromrichters in einem Schaltschrank mit allen zugehörigen Schutz- und Schaltapparaturen, die Inbetriebnahme nach den gültigen Vorschriften sowie die anschließende Parametrierung und Untersuchung des Gleichstromantriebes hinsichtlich der Regelung.

Zu der Untersuchung und Regelung gibt es zwei Laborversuche und Laborplätze. Einer bezieht sich dabei auf die Regelung einer Gleichstrommaschine, welche mit einer Technik aus den 1970iger Jahren umgesetzt wurde. Der Charme an der alten Technik ist es, dass sich die Regelung bzw. Optimierung der Regelung nach den Methoden des Symmetrischen Optimums und des Betragsoptimums, welche in der Vorlesung "Leistungselektronik" behandelt werden, sehr gut umgesetzt werden können. An dem anderen Labortisch regelt ein modernerer Stromrichter, aus den 2000ern, die Gleichstrommaschine mit welchem sich eine solche Regelung nicht umsetzen lässt. Es besteht die Hoffnung, dass sich der neu aufgebaute und moderne Stromrichter so parametrieren lässt, dass die Regelung, nach den erwähnten Optimierungsverfahren, umgesetzt werden kann. In vorangegangenen Diplom- und Bachelorarbeiten gab es dies bezüglich bereits Versuche, welche nicht zu den gewünschten Ergebnissen führten aber z.T. Ausblicke gaben, wie das Problem gelöst werden könnte. Einer dieser Ausblicke beschreibt die Regelung mittels eines in der Steuerung des Stromrichters implementierten Zusatzregler. Dieser Ansatz soll verfolgt und nach Möglichkeit umgesetzt werden.

Das Ziel und der eigentliche Kern dieser Arbeit ist es, den Stromrichter dahin zu untersuchen, dass eine Optimierung der Regelung umgesetzt werden kann und bei Nichtumsetzung die Gründe dafür aufzuzeigen. Des Weiteren soll eine Parametrierung des Stromrichters entwickelt werden, mit welcher sich die Laborversuche durchführen lassen. Der Laborversuch "LEP3.2: Stationäres und dynamisches Verhalten eines Gleichstromantriebes" bildet hierbei die Grundlage. Dieser wird auf die Bedienung des neuen Stromrichters angepasst.

## **2 Aufbau des Stromrichters bzw. Gleichstromantriebes**

In diesem Kapitel wird die Realisierung des Stromrichters beschrieben. Es wird gezeigt, wie dieser in den vorhandenen Laborplatz integriert wird und so den alten Stromrichter ersetzt. Hierfür wird der jetzige und geplante Aufbau des Laborstandes, wo der Stromrichter eingesetzt werden soll, erläutert. Da die Realisierung des Stromrichters auf den von Herrn Klotz in seiner Bachelorarbeit entwickelten Aufbau basiert, werden die benötigten Änderungen und Erweiterungen dabei in den Vordergrund gestellt. Es wird nicht darauf eingegangen, warum welche Komponenten zum Einsatz kommen. Es wird die Auswahl von Herrn Klotz übernommen und beim Einbau bzw. vor Einbau auf ihre Tauglichkeit nach den einschlägigen Normen wie VDE 0113 überprüft.

### **2.1 Beschreibung des Laborstandes**

Der Laborstand dient zur Untersuchung eines Gleichstrommaschinenantriebes. Es wird der Laborversuch "LEP3.2: Stationäres und dynamisches Verhalten eines Gleichstromantriebes" an diesem Laborplatz durchgeführt. Der Laborversuch soll weiterhin mit dem neuen Stromrichter durchgeführt werden. Der Versuch sieht vor, zuerst das stationäre und anschließend das dynamische Verhalten zu untersuchen. Unter dynamischen Verhalten ist die Regelung bzw. die Optimierung der Regelung zu verstehen. Auf die Regelung wird intensiv in den Kapiteln 5-7 eingegangen. Zur Vorgehensweise bei der Ermittlung des stationären Verhaltens werden Hinweise in Kapitel 3 gegeben. Darüber hinaus soll es möglich sein die Regelung der Gleichstrommaschine zu optimieren. Dies ist mit dem vorhandenen Stromrichter, vom Typ Simoreg der Firma Siemens, momentan nicht möglich. Der Laborstand besteht aus einem Gleichstrommotor, welcher die Antriebsmaschine darstellt und einem Asynchronmotor, welcher die Lastmaschine darstellt. Die beiden Motoren sind über eine Welle miteinander verbunden. Auf die Steuerung, Regelung und Kenndaten der Asynchronmaschine wird hier nicht weiter eingegangen, da diese für diese Arbeit nicht relevant sind. Die Funktion der Asynchronmaschine besteht darin die Gleichstrommaschine, wenn gefordert, zu belasten oder anzutreiben. Somit stellt diese eine gesteuerte Last oder ein Antrieb dar. Durch diese Funktion kann der Gleichstrommaschinenantrieb in allen 4-Quadranten betrieben werden.

Die Gleichstrommaschine wird von dem DC-Master gespeist und dadurch gesteuert und geregelt. Der DC-Master kann mittels Bedienpult oder PC via Inbetriebnahmetool Starter gesteuert werden. In der folgenden Abbildung 2.1 ist der Aufbau des Laborstandes vereinfacht dargestellt.

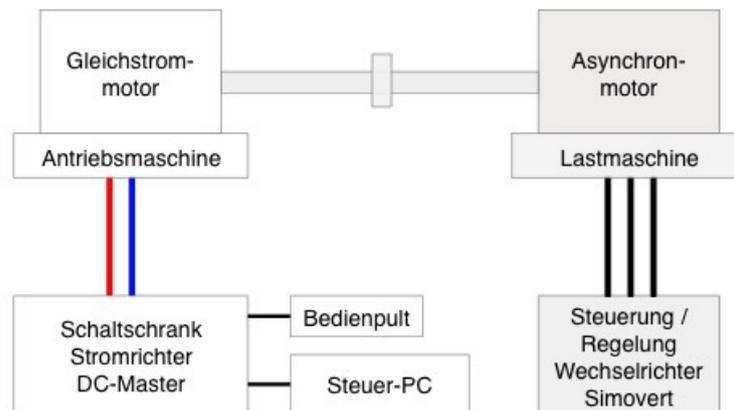


Abbildung 2.1: Vereinfachte Darstellung des Aufbaus des Laborstandes

Der hervorgehobene Bereich zeigt den für diese Arbeit relevanten Teil des Laborstandes. Der Aufbau wird in der folgenden Abbildung 2.2 als vereinfachtes Anlagenschaltbild dargestellt. Das Schaltbild der Asynchronmaschine ist unverändert geblieben und das der Gleichstrommaschine wurde an den neuen Aufbau angepasst.

Bei der verwendeten Antriebsmaschine handelt es sich um einen fremderregten Gleichstrommotor der Firma Siemens. Die Daten der Gleichstrommaschine sind in der folgenden Tabelle 2.1 zusammengefasst. In den folgenden Kapiteln wird sich immer wieder, auch ohne Verweis, auf diese Daten bezogen.

Tabelle 2.1: Typenschildangaben der Gleichstrommaschine

Hersteller:	Siemens	
Modellnummer:	1GG5106-0ED40-6VV1-Z	
	Formelzeichen:	Wert:
Ankernennspannung	$U_{AN}$	420 V
Ankernennstrom	$I_{AN}$	14,3 A
Erregernennspannung	$U_{EN}$	185 V
Erregernennstrom	$I_{EN}$	0,74 A
Nennmoment	$M_N$	22,4 Nm
Nennzahl	$n_N$	$2020 \text{ min}^{-1}$

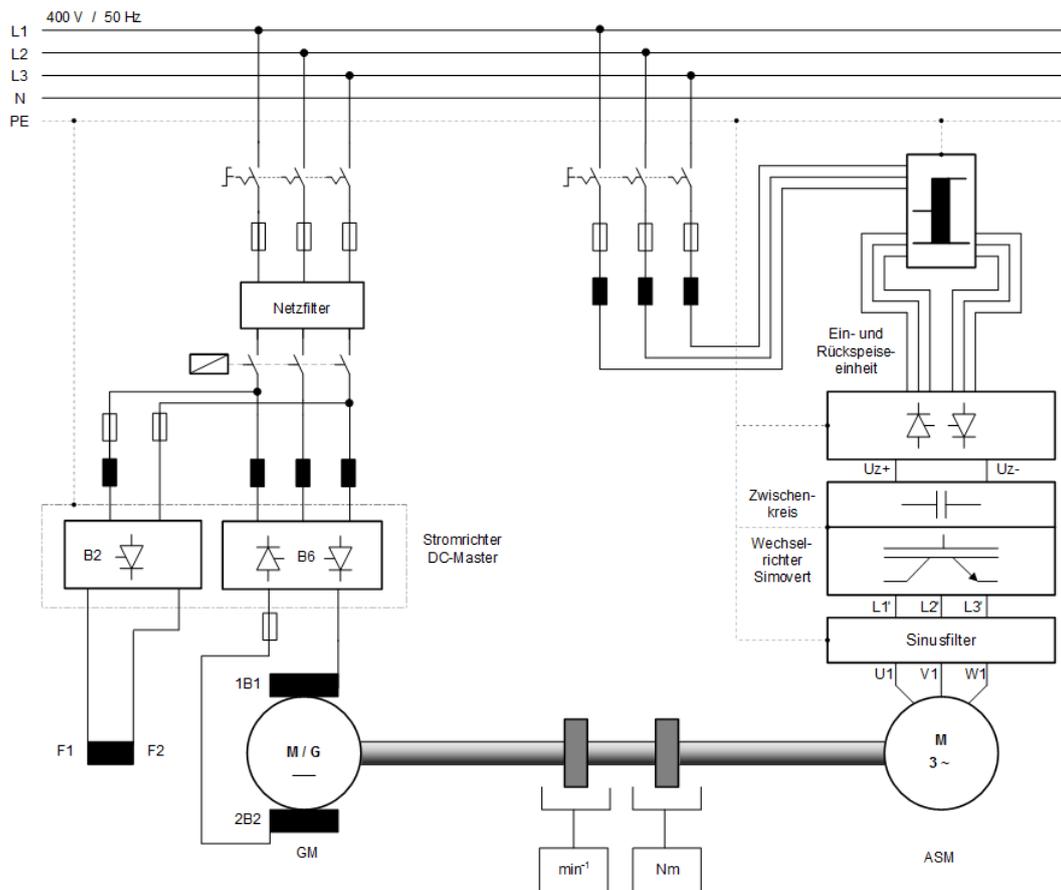


Abbildung 2.2: Vereinfachtes Anlagenschaltbild des Laborstandes

Aus den Daten des Typenschildes und den Nenndaten des DC-Masters, siehe Tabelle:2.3 wird deutlich, dass der DC-Master nicht unterdimensioniert ist, sondern gut ausgewählt wurde. Im Gegensatz zu anderen Aufbauten im Labor wird die Drehzahlerfassung nicht über einen Tachogenerator sondern über einen Inkrementalgeber erfasst. Dies bedeutet, dass die Erfassung der Drehzahl genauer und schneller ist und nicht unbedingt geglättet werden muss. Diese Art der Drehzahlerfassung ist später für die Regelung deutlich von Vorteil. Die Daten des installierten Inkrementalgeber sind in der folgenden Tabelle 2.2 zusammengefasst. Diese sind wichtig für die Inbetriebnahme des DC-Masters.

Tabelle 2.2: Typenschild Inkrementalgeber

Hersteller:	Heidenhain
Bezeichnung:	ROD 436 1024 27S12-03
HTL	10 V ... 30 V

Aus den Typenschildangaben ist die Strichzahlangabe von 1024, welche aus der Bezeichnung ersichtlich wird und die Angabe, dass es sich um HTL Signale handelt, entscheidend. Die Anschlussbelegung der Spuren findet sich in den Klemmplänen im Anhang.

Hinweis: Die Eingänge des DC-Masters sind lediglich für ein Spannungslevel von 27V ausgelegt [1, S.392]. Es ist also unbedingt darauf zu achten, dass die Versorgungsspannung des Inkrementalgeber dieses kritische Spannungsniveau nicht übersteigt. Bei Inbetriebnahme wurde der Inkrementalgeber aus dem Laborstand mit einer Versorgungsspannung von  $U_P = 24V$  versorgt.

## 2.2 Realisierung des Stromrichters

In diesem Abschnitt wird beschrieben mit welchen Geräten und Komponenten der Aufbau des Schaltschranks/Stromrichters durchgeführt wird. Dabei wird sich auf die wesentlichen Komponenten sowie alle Änderungen, Verbesserungen und Erweiterungen beschränkt. Die detailliertere Übersicht der Realisierung mit der Auswahl aller Bauteile, von der Bestimmung der Leitungsquerschnitte über die Auswahl der Trageschienen bis hin zu den verwendeten Laborbuchsen, findet sich in der Ausarbeitung von Herrn Klotz [2]. Die Realisierung des Schaltschranks erfordert einen hohen Grad an praktischer Erfahrung. Viele Arbeiten erfordern ein handwerkliches Geschick. So ist das Konzept der Grundplatte beispielsweise sehr individuell und erfordert ein hohes Maß an mechanischer Arbeit. Zunächst wird auf die einzelnen wichtigen Komponenten eingegangen. Danach wird auf die Änderungen und Verbesserungen hingewiesen und zum Schluss wird ein kurzer Einblick in den Aufwand der Fertigung gegeben.

### 2.2.1 Übersicht der Komponenten

Es wird eine Übersicht der relevanten Komponenten gegeben. In der folgenden Abbildung 2.3 ist das Innere des Schaltschranks zu erkennen. Die einzelnen Komponenten, auf welche eingegangen wird, sind farbig markiert.

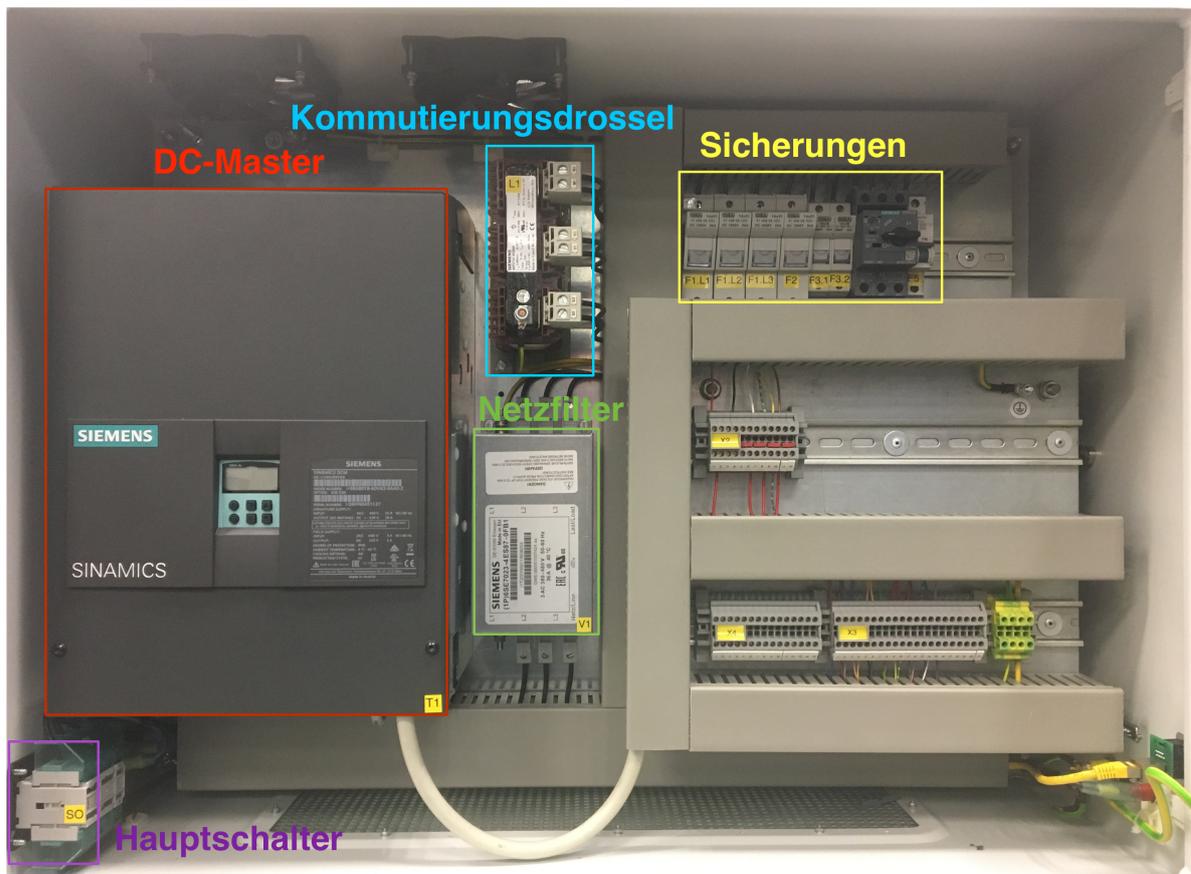


Abbildung 2.3: Blick in das Schaltschrankinnere

### Stromrichter / DC-Master

Bei dem verwendeten Stromrichter handelt es sich um einen sogenannten DC-Master der Firma Siemens. In dieser Arbeit ist immer, wenn DC-Master geschrieben ist, folglich von diesem hier beschriebenen Stromrichter die Rede. Es handelt sich um einen 4-Quadranten Stromrichter, dies bedeutet es kann Leistung aus dem Netz entzogen werden, welche hier in der Gleichstrommaschine umgesetzt wird, es kann aber auch Leistung in das Netz eingespeist werden. Die Umsetzung des 4-Quadranten-Betriebes erfolgt durch 2 antiparallele B6-Brücken. Die B6-Brücken versorgen den Anker der Gleichstrommaschine. Für die Versorgung des Erregers verfügt der DC-Master über eine B2-Brücken-Schaltung. Das Gerät besteht im wesentlichen aus der Control-Unit (CU) und dem Converter-Modul (CM). Die Nenndaten des verwendeten Gerätes sind in der folgenden Tabelle 2.3 zusammengefasst worden.

Tabelle 2.3: Nenndaten des Stromrichters / DC-Master

Hersteller:	Siemens	
Bezeichnung:	Sinamics DC-Master	
Typ:	D420/30	
Modellnummer:	6RA8018-6DV62-0AA0	
	Formelzeichen	Wert
Nennspannung	$U_N$	3AC 400V
Nennfrequenz (Versorgungsnetz)	$f_N$	50 Hz
Ankernennspannung	$U_{AN}$	+/- 420 V
Ankernennstrom	$I_{AN}$	30 A
Nennversorgungsspannung Erregung	$U_{NE}$	2AC 400 V
Nennversorgungsstrom Erregung	$I_{NE}$	5 A
Erregernennspannung	$U_{EN}$	325 V
Erregernennstrom	$I_{EN}$	5 A

Des Weiteren ist der DC-Master mit der Zusatzkarte CBE-20 ausgestattet. Diese Karte stellt eine PROFINET-Schnittstelle bereit, welche auf Ethernet basiert. Mittels dieser wird eine Kommunikation via Ethernet zwischen PC und DC-Master aufgebaut.

### Kommutierungsdrossel

Der DC-Master benötigt zwei Kommutierungsdrosseln. Eine für die antiparallele B6-Brücke, welche eine 3-Phasige-Drossel (L1) ist und eine für die B2-Brücke, welches eine 1-Phasige-Drossel (L2) ist. Die 3-Phasige-Drossel ist in der Abbildung 2.3 zu erkennen. Die 1-Phasige ist unter der vorderen Grundplatte verbaut. Die Drosseln sind nicht direkt im DC-Master verbaut sondern müssen zusätzlich verbaut werden. Die Kommutierungsdrosseln begrenzen den Kurzschlussstrom bei der Kommutierung 2er Ventile. Kommt es zur Kommutierung, findet der Wechsel von einem leitenden Ventil auf ein anderes statt. So fließt zwischen diesen beiden kurzzeitig ein Kurzschlussstrom. Dabei fließt der Strom bei einem Ventil in Durchlassrichtung und bei dem anderen in Sperrrichtung. Der Strom fließt so lange bis dieser die Ladungsträger des in Sperrrichtung durchflossenen Ventils ausgeräumt hat. Die Anstiegsgeschwindigkeit des Stromes wird durch die Drosseln begrenzt und damit wird verhindert, dass die Ventile Schaden nehmen und das Versorgungsnetz zu stark und plötzlich belastet wird. Die Kommutierungsdrosseln werden so dimensioniert, dass nicht mehr wie eine relative Kurzschlussspannung von  $u_k = 4\%$  bis  $u_k = 10\%$  über der Drossel abfallen [1, S.146]. Es wird auch von einer 4%-Kommutierungsdrossel gesprochen. Das die 3-Phasige Kommutierungsdrossel richtig dimensioniert ist, wurde durch die Ausarbeitung von Herrn Klotz [2] bewiesen. Es wird jedoch eine andere 1-Phasige-Kommutierungsdrossel verwendet, für

welche die Richtigkeit der Auslegung noch verifiziert werden muss. Zunächst sind in den folgenden zwei Tabellen die Nenndaten der verwendeten Kommutierungsdrosseln hinterlegt.

Tabelle 2.4: Nenndaten Kommutierungsdrossel L1

Hersteller:	Siemens	
Modellnummer.	4EP3701-5DS00	
	Formelzeichen:	Wert:
Nennspannung	$U_N$	3AC 400 V
Nennfrequenz (Versorgungsnetz)	$f_N$	50 Hz
Nennstrom	$I_N$	22,5 A
Spitzenstrom	$I_{max}$	31 A
Verlustwirkleistung bei Nennstrom	$P_{ges}$	62 W
Induktivität	$L$	0,889 mH

Tabelle 2.5: Nenndaten Kommutierungsdrossel L2

Hersteller:	Siemens	
Modellnummer.	6RX1800-4DE01	
	Formelzeichen:	Wert:
Nennspannung	$U_N$	AC 400 V
Nennfrequenz (Versorgungsnetz)	$f_N$	50 Hz
Nennstrom	$I_N$	5 A
Induktivität	$L$	10,186 mH

Zur Überprüfung der richtigen Dimensionierung der Drossel L2 wird zunächst der induktive Blindwiderstand  $X_L$  der Drossel mit der Formel 2.1 bestimmt. Die Werte werden aus der Tabelle 2.5 entnommen.

$$\begin{aligned}
 X_L &= L \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_N & (2.1) \\
 &= 10,186 \text{ mH} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz} \\
 &= 3,2 \Omega
 \end{aligned}$$

Mit dem berechneten induktiven Blindwiderstand  $X_L$ , dem Nennstrom  $I_N$  und der Nennspannung  $U_L$  wird die relative Kurzschlussspannung  $u_k$  mit der Formel 2.2 bestimmt.

$$\begin{aligned} u_k &= \frac{I_N \cdot X_L}{\frac{U_L}{\sqrt{3}}} \cdot 100\% & (2.2) \\ &= \frac{5A \cdot 3,2\Omega}{\frac{400V}{\sqrt{3}}} \cdot 100\% \\ &= \underline{\underline{6,9\%}} \end{aligned}$$

Mit einer relativen Kurzschlussspannung  $u_k = 6,9\%$  kann die Drossel L2 verwendet werden.

### Netzfilter

Der eingesetzte Netzfilter ist ebenfalls von der Firma Siemens mit der Modellbezeichnung: 6SE7023-4ES87-0FB1 mit einer Nennstromangabe von  $I_N = 32A$ . Der Netzfilter bildet ein zentrales Bauteil des Aufbaus, da dieser hochfrequente Signale und Störungen filtert, welche von dem Stromrichter verursacht werden. Durch die Filterung wird das Versorgungsnetz insbesondere die Netzfrequenz weniger belastet. Nach verschiedenen Normen, wie der Anschlussrichtlinie BDEW (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft), ist der Einsatz von Netzfiltern bei der Verwendung von Stromrichtern vorgeschrieben.

### Sicherungen

Die zum Einsatz kommenden Sicherungspatronen sind spezielle Halbleiter-Sicherungen der Firma Siba. Diese entsprechen der gR-Norm. Dies bedeutet, dass die Sicherungen superflink und deutlich empfindlicher im Vergleich zu den üblichen Sicherungspatronen der gL-Norm oder den bekannteren B- und C-Automaten aus der Industrie und Gebäudetechnik sind. Für den Ankerkreis wird eine spezielle Gleichspannungssicherung eingesetzt. Da es bei Gleichspannung sein kann, dass der Lichtbogen nicht von alleine abreißt, muss die Sicherung so gefertigt sein, dass diese ein Löschen des Lichtbogens vorsieht. Das Problem wird z.B. dadurch gelöst, dass die Sicherungen über Löschmittel verfügen, welches den Lichtbogen löscht. Beim Wechselstrom reißt der Lichtbogen durch den Nulldurchgang selbstständig ab. In der nachfolgenden Tabelle 2.6 sind die verwendeten Sicherungspatronen aufgelistet.

Tabelle 2.6: Eingesetzte Sicherungspatronen

Kennzeichnung	Bestimmung	Hersteller	Typ	Nennstrom	Abmessung
F1	Netz	Siba	5012406.32	32A	14x51 mm
F2	Ankerkreis	Siba	5020106.32	32A	14x51 mm
F3	Erregerkreis	Siba	5017906.4	4A	10x38 mm

## 2.2.2 Erweiterungen und Änderungen

Der wohl größte Unterschied im Vergleich zu der Realisierung des Stromrichters von Herrn Klotz ist der, dass der komplette Teil zur Einbindung eines D-Space-Systems eingespart wurde. Dies hat zur Folge, dass Bauteile wie Optokoppler und Koppelrelais eingespart werden können. Die Stromlaufpläne sind dazu angepasst worden und befinden sich im Anhang. Des Weiteren werden alle von außen kommenden Leitungen durch die Schaltschrankseiten eingeführt. So kann der Schaltschrank einfacher am Laborstand untergebracht werden.

Der vorgesehene Hauptschalter wird nach der Bemessungsleistung der eingesetzten Sicherungen (siehe Tabelle 2.6) ausgewählt. Der vorher eingesetzte Hauptschalter war für einen Nennstrom von  $I_N = 23A$  ausgelegt, was unterdimensioniert ist. Der Schalter würde für die vorhandene Gleichstrommaschine ausreichen, jedoch nicht für den Nennstrom des DC-Masters und der eingesetzten Sicherungen. Der Hauptschalter wurde also durch den Schalter der Firma Siemens mit der Bezeichnung: 3LD2003-0TK51, welcher auch noch bei einem Nennstrom  $I_{AN} = 35A$  verwendet werden kann, ersetzt. Eine Besonderheit des Hauptschalters ist es, dass dieser nicht nur die Außenleiter sondern auch den Neutralleiter schaltet. Dies soll verhindern, dass der Fehlerstromschutzautomat durch die Ableitströme des DC-Masters und der Gleichstrommaschine beim Abschalten auslöst.

Der Schaltschrank wird um eine Ethernet-Kupplung erweitert, welche es erlaubt die Ethernetverbindung des Schrankes von außen zu lösen oder zu stecken ohne den Schaltschrank zu öffnen und die Verkleidung des DC-Masters aufzuschrauben. Die Ethernet-Kupplung (RJ45), welche bereits in die Schaltschrankseite eingebaut ist, wird in Abbildung 2.4 gezeigt. Somit sind alle Verbindungen des Schaltschranks nach außen steckbar. Dadurch wird es enorm erleichtert, den Schaltschrank umzuhängen oder umzustellen. Der Arbeitsplatz kann jetzt sehr einfach umgebaut werden. Ein weiterer Vorteil ist es, dass nicht nur der vorhandene PC auf den DC-Master zugreifen kann, sondern es auch möglich ist eine Verbindung bspw. mit einem Laptop herzustellen ohne den Arbeitsplatz auseinander bauen zu müssen. Die verwendete Einbau-Kupplung ist von der Firma Neutrik mit der Bezeichnung NE8FDP.



Abbildung 2.4: Seitenansicht Schaltschrank mit Ethernet-Kupplung

Die Dokumentation des Aufbaus wurde überarbeitet und um Klemmleistenpläne erweitert. Ein Klemmleistenplan ermöglicht es eine schnelle und effiziente Fehlersuche durchzuführen. Außerdem helfen diese den Schaltschrank schneller nachzubauen und z.B. schnell Replikationen von Teilleitungen anzufertigen. Diese lassen sich, wenn diese mit Excel oder professionelleren Tools angefertigt sind, sehr einfach verwalten und handhaben. In der nachfolgenden Abbildung 2.5 ist ein Screenshot des angefertigten Klemmleistenplans für die Klemmleiste X1 gezeigt.

<b>Klemmleiste X1</b>				
<b>IN</b>	<b>X1</b>	<b>Bridge</b>	<b>Info</b>	<b>Out</b>
F2.2	1		DC 32A (Anker)	Anker +
1D1 (DCM)	2		DC (Anker)	Anker -
3D (DCM)	3		DC (Erreger)	Erreger -
3C (DCM)	4		DC (Erreger)	Erreger +
F4.6	5		Lüfter	1W1
F4.4	6		Lüfter	1V1
F4.2	7		Lüfter	1U1
F5.2	8		C4 Automat	5U1 / 5W1 (DCM)
	9			XR1.109 (DCM)
	10			T2.L
	11			

Abbildung 2.5: Klemmleistenplan X1

### 2.2.3 Fertigung des Stromrichterschaltchranks

In diesem Unterkapitel wird ein Einblick in die Fertigung des Schaltchranks gegeben. Es soll den ungefähren Vorgang des Prozesses abbilden. Dies soll eine Übersicht der einzelnen Teilschritte geben und zeigen, dass der Aufbau und die Fertigung mit zu der Arbeit gehört und keine bereits vorhandene Hardware genutzt wurde.

#### Grundplatte

Auf der Grundplatte sind alle Komponenten befestigt. Sicherungshalter, Sicherungsautomaten und Klemmen werden alle auf DIN-Trageschienen (Hutschienen) befestigt. Die Leitungen werden in Verdrahtungskanälen verlegt. Die Befestigung der Trageschienen und der Kanäle erfolgt mittels 4mm-Nieten. Die größeren Komponenten wie DC-Master, Kommutierungsdrosseln und Netzfilter werden auf der Grundplatte verschraubt. Alle Löcher müssen präzise vermessen und gebohrt werden. Gegebenenfalls muss noch ein Gewinde geschnitten werden. Da die Konstruktion eine aufgestockte zweite Grundplatte vorsieht, muss hierfür noch eine weitere Grundplatte zugeschnitten werden. Die beiden Grundplatten werden durch Gewindestangen (M8) miteinander verbunden. In den folgenden zwei Abbildungen ist einmal die Grundplatte während der Fertigung und einmal fertig gestellt mit aufgestockter 2.ter Grundplatte, Trageschienen und Verdrahtungskanälen zu sehen.

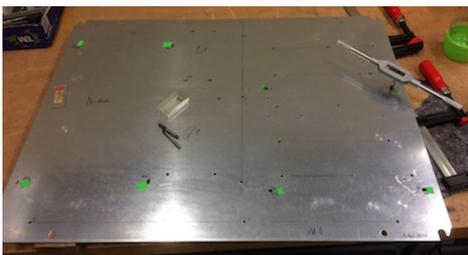


Abbildung 2.6: Fertigung der Grundplatte



Abbildung 2.7: Fertig gestellte Grundplatte

## Schaltschrank

Es muss nicht nur die Grundplatte individuell gefertigt werden, sondern auch der Schaltschrank muss an die Laborumgebung angepasst werden. Es müssen die Laborbuchsen, Steckverbindungen, Durchführungen und Lüftungslöcher eingebracht werden. Dies alles erfordert einen hohen mechanischen Aufwand. Bei der Fertigung muss vor allem darauf geachtet werden, dass keine Kratzer und Beschädigungen durch die eingesetzten Werkzeuge entstehen. Bis auf den Ausschnitt der Tür wurden alle Arbeiten in der Laborwerkstatt des Labors, für elektrische Antriebe und Leistungselektronik, in der HAW durchgeführt.



Abbildung 2.8: Einbringung  
Steckverbindungen



Abbildung 2.9: Einbringung Lüfterausschnitte

## Verdrahtung

Die Verdrahtung des Schaltschranks erfolgt durchgehend mit flexiblen Einzeladern des Typs: H07V-K in unterschiedlichen Querschnitten passend und normgerecht für die jeweiligen Strom- und Spannungsgrößen. Die Adern unterscheiden sich in ihrer Farbe, so werden schwarze Adern ausschließlich für den Leistungsteil und rote für den Steuerungsteil verwendet. Der Schutzleiter wird nach VDE 0113-1 und VDE 0100 Teil 545 ausgelegt. Damit folgt, dass dieser durchgehend in einem Querschnitt von  $4\text{mm}^2$  verdrahtet werden muss. Eine Ausnahme ist die Verbindung zu Tür mit  $8\text{mm}^2$ , welche in diesem Fall aber in  $10\text{mm}^2$  realisiert ist, da keine Einzelader in  $8\text{mm}^2$  vorhanden war und es unwirtschaftlich ist dies für

den geringen Bedarf zu besorgen. Die Leitungen dürfen nur mit den freigegebenen Aderendhülsen von Siemens [1, S.165] bestückt werden. Zu den Einzeladern kommen noch diverse Datenleitungen hinzu. Die genauen Typen können aus der Materialliste, im Anhang, entnommen werden. Die folgende Abbildung 2.10 gibt einen Einblick in den Umfang der Verdrahtung.

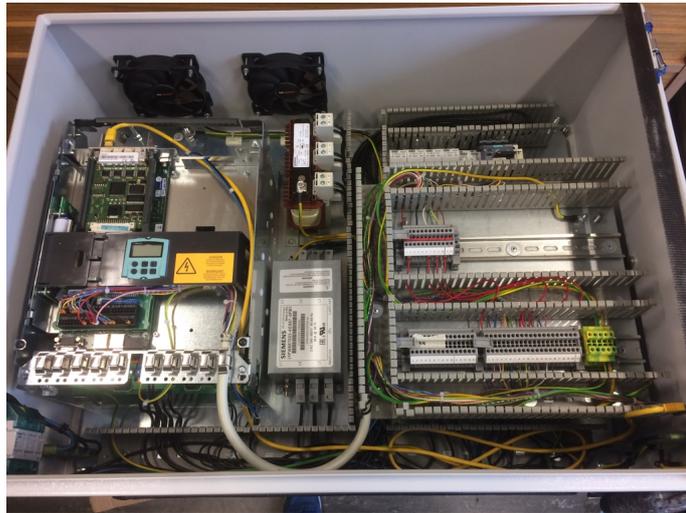


Abbildung 2.10: Verdrahtung Schaltschrank

### Ergebnis der Fertigung

In den folgenden zwei Abbildungen ist der fertig gestellte Stromrichterschaltschrank und das Bedienpult dargestellt.



Abbildung 2.11: Bedienpult



Abbildung 2.12: Stromrichter Schaltschrank

## 3 Inbetriebnahme

Dieses Kapitel beschreibt die Inbetriebnahme des Stromrichters. Es wird die ordentliche Prüfung des Schaltschranks nach VDE 0100 beschrieben. Anschließend wird die Grundparametrierung des Stromrichters erläutert. Es werden die programmierten Regelmodi getestet und Hinweise zur Durchführung des Laborversuchs LEP 3.2 gegeben. Hierbei wird insbesondere auf die Handhabung der Ankerspannungsregelung hingewiesen. Außerdem wird die Lückgrenze bestimmt, da es sehr nützlich ist, diese für die darauffolgenden Untersuchungen zu wissen.

### 3.1 Prüfung des Stromrichter-Schaltschranks nach VDE 0100 Teil 600

Die Prüfung des Schaltschranks wird nach der Norm VDE 0100 Teil 600 durchgeführt. Diese Norm bezieht sich auf die Prüfung von elektrischen Anlagen. Die Prüfung bezieht sich hier auf den Einspeiseteil und den Schaltschrank an sich. Der Stromrichter und die Gleichspannungsseite wird auf Funktion geprüft. Die Prüfung stellt im Wesentlichen die Funktion der Schutzmaßnahmen und der richtigen Verdrahtung der Einspeisung dar. Eine Prüfung des Gleichstrommotors und Laborstandes nach der VDE 0113 stellt das Labor der HAW sicher. Die Prüfung darf nur durch eine Elektrofachkraft mit zulässigen und geeichten Messgeräten erfolgen. Die Prüfung wird in folgende 5 Punkte untergliedert.

#### 1. Besichtigung der Anlage

Es werden alle Betriebsmittel hinsichtlich der richtigen Auswahl untersucht. Alle Beschriftungen und eine Dokumentation der Anlage müssen vorhanden sein. Des Weiteren werden alle Schraub- und Klemmverbindungen geprüft sowie alle Betriebsmittel und Leitungen auf Beschädigungen hin untersucht. Es muss sicher gestellt sein, dass der Schutz gegen direktes Berühren von gefährlichen Spannungen und Strömen gewährleistet ist und der Schutzleiter korrekt verlegt und ordnungsgemäß hinsichtlich des Querschnitts gewählt wurde.

## 2. Durchgängigkeit des Schutzleiters

Mit der Durchgängigkeit des Schutzleiters wird der Widerstand des Schutzleiters gemessen. Dieser darf nicht größer als  $1\Omega$  sein. Die Messung wird mit einem Prüfstrom von 200mA bei einer Spannung von 4V - 24V AC/DC durchgeführt. Die Messung wird von den leitenden Bauteilen, wie Gehäuse und Grundplatte, den Erdungspunkten, z.B. an den Spulen und den Klemmleisten bis hin zur Einspeisung des Schutzleiters durchgeführt.

## 3. Isolationswiderstand

Die Isolationswiderstandsmessung wird von den Aussenleitern und dem Neutralleiter bis hin zum PE gemessen. Es wird geprüft, ob eine ausreichende Isolation besteht. Es könnte z.B. sein, dass ein Aussenleiter beschädigt ist und so eine geringere Isolation gegen PE besteht. Dies kann zu einem Kurzschluss führen und des Weiteren bei ungewollten Übergangswiderständen zu Kriechströmen führen. Um diese Fehler erkennen zu können, bevor die Anlage eingeschaltet wird, muss die Messung des Isolationswiderstandes durchgeführt werden. Die Messung wird mit einer Prüfspannung von 500V oder höher durchgeführt. Der Isolationswiderstand muss größer  $1\text{ M}\Omega$  sein.

## 4. Schleifenimpedanz

Bei der Schleifenimpedanzmessung wird die Summe aller Widerstände der Leitungen ermittelt. Der so ermittelte Widerstand muss gering genug sein, um einen Strom fließen zu lassen, welcher die Sicherungen schnell genug auslösen lässt. Die Messung wird nicht durchgeführt, da der Laborstand in regelmäßigen Abständen geprüft wird und die Messung am Schaltschrank ohne Netzanschluss nicht aufschlussreich wäre.

## 5. Messen der Betriebsspannungen

Messen der Betriebsspannung bedeutet, es wird nachgewiesen, dass die richtigen Spannungen anliegen. Außerdem wird das Drehfeld geprüft, was immer einen Rechtsdreh Sinn haben sollte. Es wird also an der Einspeisung, den jeweiligen Sicherungen und den Klemmleistenplätzen gemessen.

## 6. Erproben

Es werden die Schutzeinrichtungen und die Funktion getestet. Dies bedeutet in diesem Fall, es wird die Funktion des Hauptschalters und der Lüfter überprüft.

### Ergebnis der Prüfung nach VDE 0100 Teil 600

Zur Besichtigung des Schaltschranks wurde an allen Leitungen gezogen und gerüttelt sowie die Schraubverbindungen nachgezogen. Es wurde nach Beschädigungen oder fehlenden Beschriftungen geschaut. Die Messung wird mit dem Messgerät: Profitest / MTech durchgeführt. Die Messergebnisse sind in der folgenden Tabelle 3.1 zusammengefasst. Die Erprobung hat gezeigt, dass die Funktion des Hauptschalters und der Lüfter gegeben ist. Die Messergebnisse sind alle in Ordnung und somit hat die Anlage die Prüfung bestanden und die Inbetriebnahme kann fortgesetzt werden.

Tabelle 3.1: Messergebnisse der Prüfung nach VDE 0100 Teil 600

Messung:	Messpunkt:	Ergebnis:
Durchgängigkeit PE	höchster gemessener Wert	$R_{LOW} \leq 0,02\Omega$
Isolationswiderstand	L1 -> PE	$R_{ISO} > 500M\Omega$
	L2m -> PE	$R_{ISO} > 500M\Omega$
	L3 -> PE	$R_{ISO} > 500M\Omega$
	N -> PE	$R_{ISO} > 500M\Omega$
Spannungsmessung	L1 -> L2	400 V
	L2 -> L3	400 V
	L3 -> L1	400 V
	N -> PE	0V
	Drehfeld	jeweils rechts

## 3.2 Inbetriebnahme des Stromrichters mit dem Siemens STARTER

Das Softwaretool STARTER ist eine von Siemens entwickelte Software, welche zur Inbetriebnahme des DC-Masters genutzt wird. Mit dem STARTER wird der DC-Master parametrieren und konfiguriert. Dies ermöglicht es die verschiedenen Regelmodi zu parametrieren und die Maschinennennaten, der Gleichstrommaschine, einzustellen. Des Weiteren ist die Software sehr anschaulich und es werden z.B. die Regler übersichtlich mit den parametrierbaren Parametern dargestellt. In der folgenden Abbildung 3.2 ist das Funktionsblatt des Drehzahlregelkreises durch den Starter visualisiert, dargestellt.

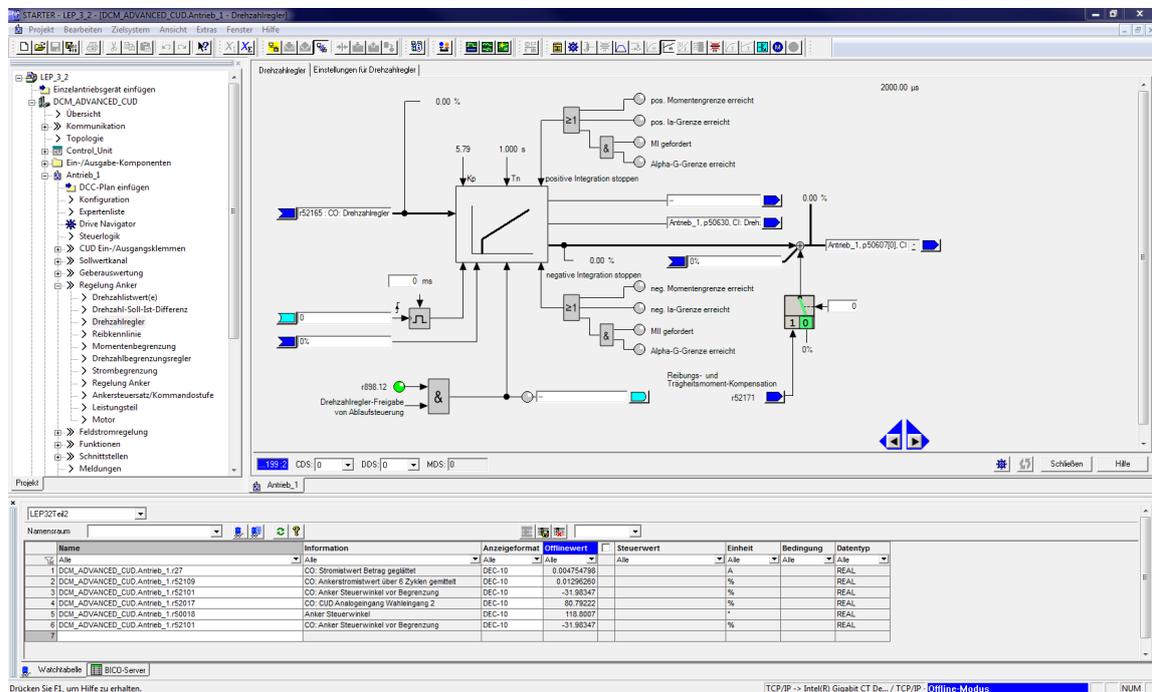


Abbildung 3.1: Siemens STARTER Funktionsblatt Drehzahlregler

Die wichtigen Aspekte, für die Regelung sowie der Parametrierung der Analogen und Digitalen Ein- und Ausgänge, Funktionsblätter aus dem Listenhandbuch [3], sind mit dem Starter visualisiert. Freie Funktionsblöcke und alle nicht grafisch dargestellten Parameter können und werden über die Expertenliste parametrieren. Die Software verfügt darüber hinaus über sehr nützliche Tools, wie bspw. den Geräte-Trace, welcher zur Messung in späteren Kapiteln verwendet wird, der Watchtabelle, welche es einem während des Betriebs ermöglicht Parameter zu beobachten und der Steuertafel, mit welcher die Gleichstrommaschine von der Software aus gesteuert werden kann.

### 3.2.1 Grundkonfiguration

In den folgenden Schritten wird gezeigt wie die grundlegende Inbetriebnahme mit dem Starter erfolgt. Dies dient zur Übersicht, um die Vorgehensweise zu erläutern. Ein sehr detailliertes Vorgehen kann in der Betriebsanleitung [1] nachgelesen werden.

#### Erstellung eines Projektes

Die erste Pflicht besteht darin ein Projekt zu erstellen, in dem gearbeitet wird. Ohne dieses lässt sich nicht online auf den DC-Master zugreifen. Wird die Software geöffnet, erscheint automatisch der Projektassistent. Wird sich durch den Projektassistent geklickt, werden die folgenden Grundeinstellungen getätigt:

- Projektname, Autor und Speicherort werden festgelegt.
- Kommunikationsart zwischen Starter und DC-Master wird bestimmt. Es wird die Kommunikation über Ethernet mit der Zusatzkarte CBE-20 und der Netzwerkkarte des PCs ausgewählt. Wichtig an dieser Stelle ist, dass das Gerät noch keine IP-Adresse besitzt und diese nun zugewiesen werden muss. Das Gerät bekommt die IP-Adresse: 192.168.0.199. Es kann eine beliebige IP-Adresse im Bereich der Netzwerkkarte des PCs gewählt werden.
- Antriebsgerät (DC-Master) und die Version der Gerätesoftware werden hinterlegt. Als Antriebsgerät wird Advanced CUD, welche dem DC-Master entspricht, mit der Geräte-Softwareversion v4.4 eingestellt.



Abbildung 3.2: Siemens STARTER Projektassistent

## Konfiguration der Antriebssätze

Für die drei verschiedenen Regelmodi, Drehzahl-, Ankerstrom- und Ankerspannungsregelung, werden drei Maschinendatensätze konfiguriert. Wobei lediglich ein Datensatz konfiguriert und dieser anschließend zweimal kopiert wird. Die Datensätze sind in der Grundkonfiguration für alle drei Regelmodi gleich. Wie der Name Maschinendatensätze schon vermuten lässt, werden hier hauptsächlich, dem DC-Master, die Nenndaten, der Typ, und die Art der Drehzahlerfassung der Antriebsmaschine mitgeteilt. Die Konfiguration wird ebenfalls mittels eines Assistenten durchgeführt. Im Nachhinein können die Daten zusätzlich auch über die Expertenliste geändert werden. Die Konfiguration wird über den Navigationsbaum, welcher rechts in der Abbildung 3.2 zusehen ist, unter dem Punkt "DCM Advanced CUD - Antriebsgerät hinzufügen" gestartet. In der Abbildung 3.3 ist beispielsweise gezeigt, wie der Konfigurationsassistent aussieht.

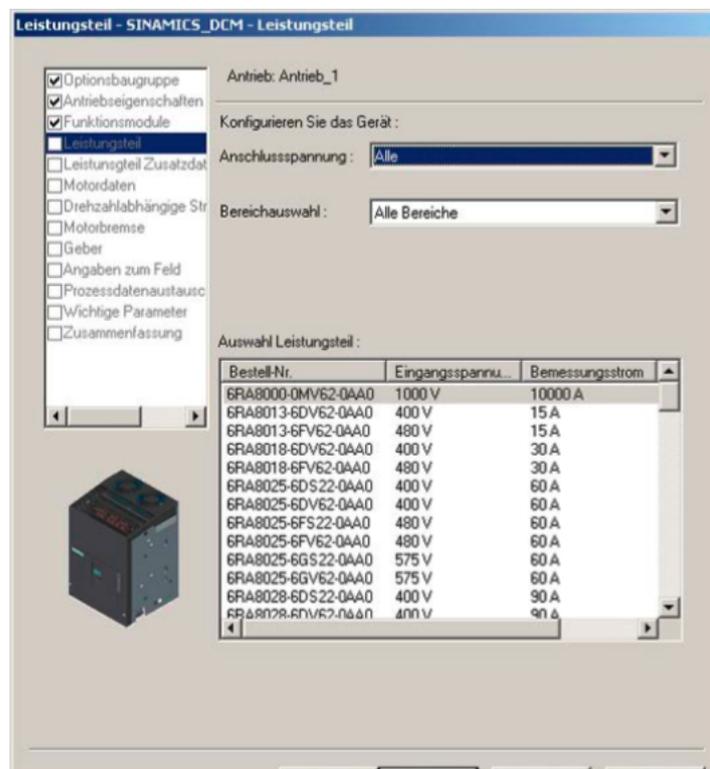


Abbildung 3.3: Bsp.:Konfigurationsassistent

Mit dem Assistenten werden im Wesentlichen die folgenden Punkte durchlaufen:

- Zunächst werden die optionalen Baugruppen hinzugefügt. Es wird die Zusatzkarte CBE-20 aktiviert. Daraufhin wird der interne Technologieregler und die freien Funktionsblöcke aktiviert.

- Es wird der Stromrichter hinzugefügt. In der Auswahlliste wird der DC-Master mit der Modellnummer, aus der Tabelle 2.3, gewählt.
- Die Nenndaten des Gleichstrommotors werden erfasst. Hierbei muss darauf geachtet werden, dass der Anker- und Erregerstrom sowohl als Festwert wie auch im Verhältnis zum Bemessungsstrom des DC-Masters angegeben werden. Dies bedeutet, dass die Bemessungsleistung des DC-Masters an den Motor angepasst wird. Der Nennankerstrom des Gleichstrommotors entspricht  $I_{AN} = 14,3A$  und dies entspricht demzufolge einer Reduzierung des Bemessungsstroms, des DC-Master ( $I_{AN-DC-Master} = 30A$ ), auf 47,3%. Für den Erregerstrom gilt dies äquivalent. Der Bemessungserregerstrom beträgt 5A. Damit muss eine Reduzierung, bei einem Erregerstrom von  $I_{EN} = 0,74A$ , auf 14,3% eingestellt werden. Diese Parametrierung stellt eine zentrale Rolle der Inbetriebnahme dar und darüber hinaus sind diese Parametereinstellungen für eine Handhabung des Stromrichter sehr wichtig. Aus diesem Grund sind die einzustellenden Parameter, an dieser Stelle, in der folgenden Tabelle 3.2 zusammengefasst. Alle weiteren Parameter behalten die voreingestellten Werte bei.

Tabelle 3.2: Grundkonfiguration Nennparameter

Parameter	Info zum Parameter	Wert
p50076[0]	Bessungsankerstrom reduzierung	47,3 %
p50076[1]	Bemessungserregerstrom reduzierung	14,3 %
p50078[0]	Netz-Anschlussspannung Ankerseitig	400 V
P50078[1]	Netz-Anschlussspannung Erregerseitig	400 V
p50100[0]	Ankernennstrom $I_{AN}$	14,3 A
p50101[0]	Ankernennspannung $U_{AN}$	420 V
p50100[0]	Erregerennstrom $I_{EN}$	0,74 A

- Der Drehzahlgeber wird ausgewählt. Der genutzte Inkrementalgeber, mit den Daten aus Tabelle 2.2, ist vorkonfiguriert und kann aus dem Auswahlmenü ausgewählt werden.
- Das Erregerfeld wird so eingestellt, dass es permanent anliegt.

Die so erstellte Konfiguration wird nun in den DC-Master geladen. Es sollte darauf geachtet werden, dass auch der RAM nach ROM kopiert wird. Somit gehen die Einstellungen nach einem Neustart des DC-Masters nicht verloren. Es sind jetzt die wesentlichen Daten eingestellt und es sollte probeweise der Motor mittels Steuertafel gedreht werden. Dies stellt sicher, dass die bis hier getätigten Einstellungen in Ordnung sind. Der konfigurierte Antriebsdatensatz wird in zwei weitere Antriebsdatensätze kopiert. Die konfigurierten Antriebsdatensätze sind, in Tabelle 3.3 zusammengefasst, den Regelmodi zugeteilt.

Tabelle 3.3: Übersicht der Antriebsdatensätze

<b>Antriebsdatensatz:</b>	<b>Regelmodus:</b>
DDS0	Drehzahlregelung
DDS1	Ankerstromregelung
DDS2	Ankerspannungsregelung

### 3.2.2 Parametrierung der Antriebsdatensätze

Die logischen Verschaltungen der einzelnen Antriebsdatensätze werden mit den freien Funktionsblöcken realisiert. Hierfür müssen die Antriebsdatensätze zunächst einmal aktiviert werden, damit diese genutzt werden können. Anschließend werden die Antriebsdatensätze über die Expertenliste verschaltet. Durch die logischen Verschaltungen sind die Antriebsdatensätze gegeneinander verriegelt.

#### Freie Funktionsblöcke aktivieren

Es stehen nur begrenzt viele Funktionsblöcke bzw. Logikbausteine zu Verfügung [3, S.21]. Die Antriebsdatensätze verfügen gemeinsam über einen Pool an Funktionsblöcken und die Control Unit CUD über einen weiteren. Das liegt daran, dass die CUD und die Antriebsregelung zwei Antriebsobjekte bilden. Die Antriebsdatensätze beziehen sich auf die Antriebsregelung. Die Logikbausteine werden aktiviert indem diese einer Ablaufgruppe zugewiesen werden. In einer Ablaufgruppe werden Logikbausteine zu Gruppen mit gleicher Abtastzeit zusammengefasst. Es wird eine Ablaufgruppe für die Antriebsdatensätze und eine für die CUD aktiviert. Dies geschieht über den Parameter p20000 in der Expertenliste. Die folgende Tabelle 3.4 soll veranschaulichen wie die Parameter gesetzt werden.

Tabelle 3.4: Ablaufgruppen aktivieren

<b>Antriebsobjekt</b>	<b>Ablaufgruppe</b>	<b>Parameter</b>	<b>Rechenzeit</b>
Antriebsdatensätze	0	p20000[0]	2 msec
Control Unit CUD	1	p20000[1]	2 msec

### Logische Verschaltungen der Regelmodi

Die drei unterschiedlichen Regelmodi werden ähnlich den logischen Verschaltungen vorgenommen, wie es in den bereits erwähnten Bachelorarbeiten geschehen ist. Dies hat den großen Vorteil, dass die Schaltschränke nicht unterschiedlich gesteuert werden und es somit die Handhabung, mittels Bedienpult, vereinfacht. Die Funktionen des Bedienpults sind somit die selben, wie die der anderen Stromrichter im Labor. Das Grundgerüst der logischen Verschaltungen ist in der Abbildung 3.4 dargestellt. Es werden in den folgenden Kapiteln diverse Erweiterungen an den Verschaltungen vorgenommen, welche jedoch nicht dieses Grundgerüst verändern und somit stets die Bedienung, mittels Bedienpult, erhalten bleibt.

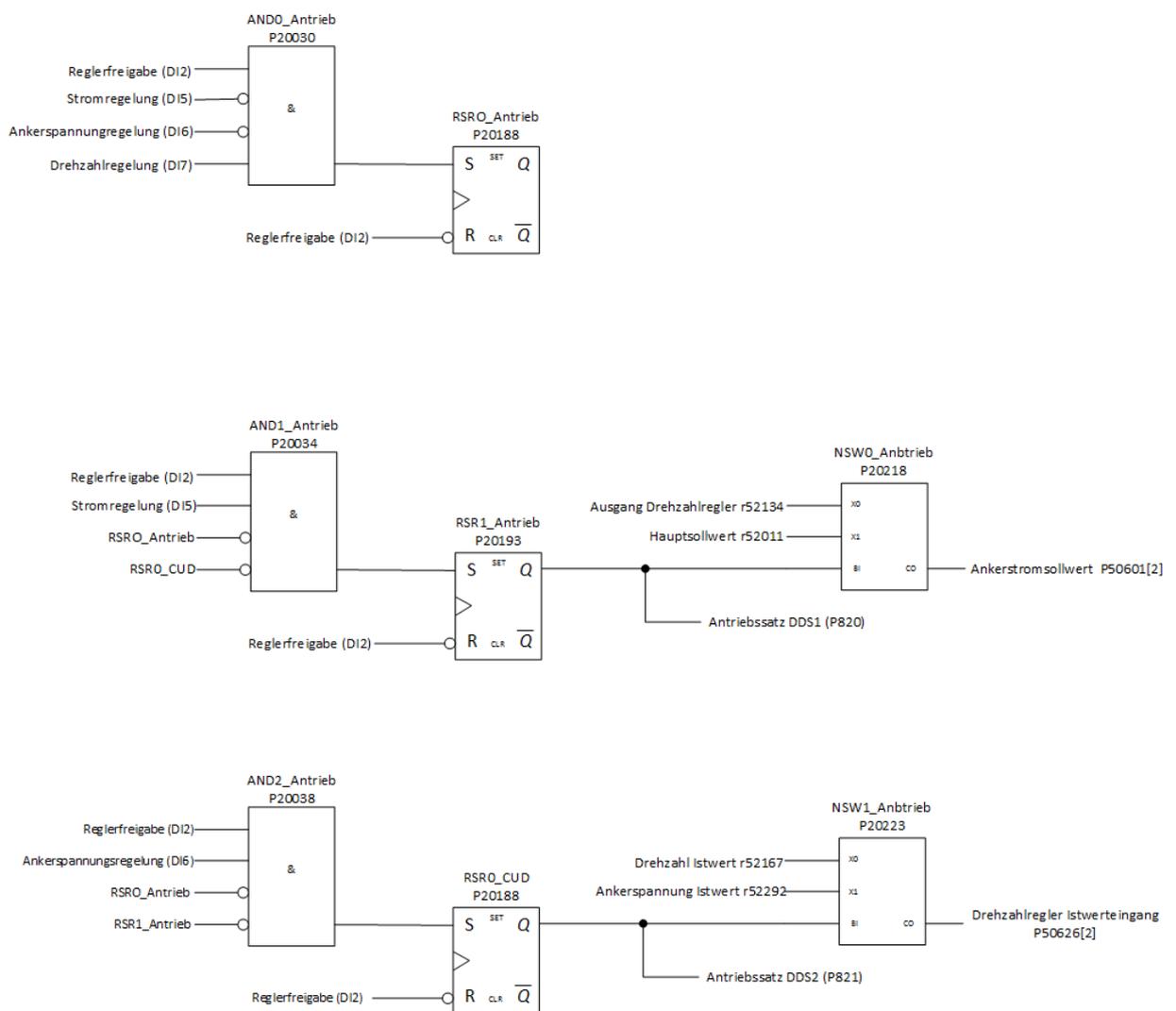


Abbildung 3.4: Logikverschaltungen der Regelmodi

### 3.2.3 Parametrierung der Analogeingänge und Analogausgänge

Es werden die Analogeingänge AI0 und AI2 genutzt. Der Eingangswert wird durch die beiden Potenziometer des Bedienpultes bestimmt. Wobei der Eingangswert des AI0 von -10V bis +10V und des AI2 von 0V bis 10V eingestellt werden kann. Die genaue Verdrahtung kann in den Stromlaufplänen im Anhang nachgelesen werden. Der AI0 ist als Hauptsollwert vorverschaltet und der AI2 soll als Strombegrenzung realisiert werden. Für die Ankerspannungsregelung muss der AI0 normiert werden, da die maximale Ausgangsgleichspannung des DC-Master 540V beträgt. Damit wird der AI0, für den Antriebsdatensatz DDS2, auf 83,3%, was 450V entspricht, normiert. So kann der Gleichstrommotor für Laborversuche auch mit einer leichten Überspannung betrieben werden. Dies wird umgesetzt in dem der Parameter  $p50701[2] = 0,83$  gesetzt wird. Die Strombegrenzung wird realisiert in dem der Parameter  $r52017$ , dieser entspricht dem Eingangswert des AI2, mit den Parametern  $p50603[0]$  und  $p50603[1]$ , welche die Parameter der Strombegrenzung sind, verschaltet wird. Die beiden zur Verfügung stehenden Analogausgänge AO0 und AO1 können mit beliebigen Beobachtungsparametern verschaltet werden. Die Signale sind auf die BNC-Buchsen des Bedienpultes geführt. Die folgende Tabelle 3.5 verschafft eine Übersicht der genutzten Analogeingänge und -ausgänge.

Tabelle 3.5: Übersicht der verwendeten Analogeingänge und -ausgänge

Klemmplatz	Analogeingang	Funktion
X177.25	AI 0	Hauptsollwert
X177.29	AI 2	Ankerstrombegrenzung
	Analogausgang	
X177.49	AO 0	Freibelegbar auf BNC-Buchse X5
X177.51	AO 1	Freibelegbar auf BNC-Buchse X6

### 3.2.4 Parametrierung der Digitaleingänge

Es werden 5 Digitaleingänge und keine Digitalausgänge genutzt. Die Eingänge werden genutzt um den Regelmodi auszuwählen und die Freigabe der Regelung zu bestätigen. Die Verschaltung der Digitaleingänge ist in der Abbildung 3.4 nachzuvollziehen. In der folgenden Tabelle sind die Digitaleingänge ihrer Funktion und der physikalische Klemmplatz am DC-Master zugeordnet. Wobei DI 1 für die Reglerfreigabe mit dem Parameter  $p0840[0]$  verschaltet wird und DI 2 als Reglerfreigabe in der Logikverschaltung genutzt wird. Die beiden Eingänge werden von einem Kippschalter des Bedienpultes geschaltet.

Tabelle 3.6: Übersicht der verwendeten Digitaleingänge

Klemmplatz	Digitaleingang	Funktion
X177.12	DI 1	Reglerfreigabe
X177.13	DI 2	Reglerfreigabe
X177.16	DI 5	Auswahl Ankerstromregelung
X177.17	DI 6	Auswahl Ankerspannungsregelung
X177.18	DI 7	Auswahl Drehzahlregelung

### 3.2.5 Soll-Istwert Einstellungen

Der DC-Master geht in Störung, wenn die Abweichung zwischen Soll- und Istwert zu groß wird. In der Grundeinstellung sind diese mit 3% Abweichung definiert. Das ist im Laborbetrieb nicht erwünscht und so werden diese Grenzen auf 100% angehoben. Diese Änderung wird bei den folgenden Parametern durchgeführt: p50373[0-3], p50376[0-3], p50378[0-3], p50388[0-3] p50390[0-3].

### 3.2.6 Fehler automatisch quittieren

Fehler und Störungen, welche auftreten können, können automatisch mit dem Bedienpult zurückgesetzt werden. Die Rücksetzung erfolgt über den Kippschalter Reglerfreigabe des Bedienpults. Dies entspricht dem digitalen Eingang DI2. Es muss nun der Parameter, der Fehlerquittierung p2103 mit dem Beobachtungsparameter des DI2, r53010.5 verschaltet werden.

### 3.2.7 Hochlaufgeber umgehen

Die Standardeinstellung der Regelung sieht vor, einen Hochlaufgeber zu verwenden. Dieser würde aber die Optimierung der Regelung, die in den folgenden Kapiteln beschrieben ist, stören. Allgemein beeinflusst dieser die Regelung, welches in den Laboranwendungen nicht erwünscht ist. Der Hochlaufgeber wird deswegen umgangen. Dies wird umgesetzt indem der Parameter p50641[0] = 1 gesetzt wird. Dies kann über die Expertenliste oder das Funktionsblatt des Hochlaufgebers gemacht werden.

### 3.2.8 Drehzahl auf dem Display des DC-Masters (BOP 20)

Eine Forderung des Labors ist es, dass die Drehzahl auf dem Display des DC-Masters während des Betriebes angezeigt wird. Hierfür wird der Drehzahl Istwert r22 mit dem Anzeigeparameter, des Displays (BOP 20), p5[0] verknüpft. Zusätzlich muss das Display noch freigeschaltet werden. Dies wird realisiert indem der Parameter p5[1] = 1 gesetzt wird.

### 3.2.9 Optimierungsläufe

Nach dem alle Änderungen getätigt sind und diese in den DC-Master übertragen wurden, werden die Optimierungsläufe durchgeführt. Diese dienen dazu, dass die Regler des Feld-, Drehzahl- und Ankerstromregelkreises annehmbare Größen eingestellt bekommen. Es werden die Regelkreise optimiert und Parameter der Regelstrecken bestimmt. Die folgenden Optimierungsläufe werden nacheinander durchgeführt [1, S.313].

1. Feldstromregelung
2. Ankerstromregelung
3. Drehzahlregelung

Nach der Optimierung ist der Gleichstromantrieb voll einsatzfähig und es müssen keine weiteren Einstellungen vorgenommen werden. Es lässt sich jedoch nicht nachvollziehen, wie und nach welchen Optimierungsverfahren das Optimieren der Regelungen stattgefunden hat. Mit dem so eingestellten Gleichstromantrieb können die statischen Parameter der Gleichstrommaschine und andere Laboraufgaben durchgeführt werden, ohne dass der Stromrichter in Störung geht.

### 3.2.10 Funktionstest Bedienpult

Die Bedienung des Gleichstromantriebes sollte nun mittels Bedienpult durchzuführen sein. Mit dem Bedienpult wird die Anlage freigeschaltet, dies erfolgt über den Kippschalter: Anlage Ein/Aus. Dieser ist mit dem E-Stopp des DC-Masters über die Klemmen XS1.105 und XS1.106 verbunden. Ist der Kippschalter in Position Aus sollte es nicht möglich sein die Anlage einzuschalten. Der Kippschalter: Reglerfreigabe schaltet die Kommandostufe und den Ankersteuersatz frei. Über den Drehschalter wird ein Reglemodi gewählt. Mit dem Potenziometer: Hauptsollwert wird der Sollwert des jeweiligen Regelmodus eingestellt. Das zweite Potenziometer dient zur Einstellung der Strombegrenzung. Die 3 Regelmodi sollten auf ihre Funktion hin getestet werden.

### 3.2.11 Hinweis zur Ankerspannungsregelung

Die parametrierte Ankerspannungsregelung funktioniert stabil. Bei der Belastung des Gleichstromantriebs, mit unterschiedlichen Lastdrehmomenten, hat sich jedoch gezeigt, dass es besser ist die erfasste Ankerspannung zu glätten. Das System fängt ansonsten an, unnötig stark zu schwingen. In der folgenden Abbildung 3.5 ist, in orange, die erfasste Ankerspannung  $U_A$  und in grün, der geglättete Wert im Verlauf zu erkennen.

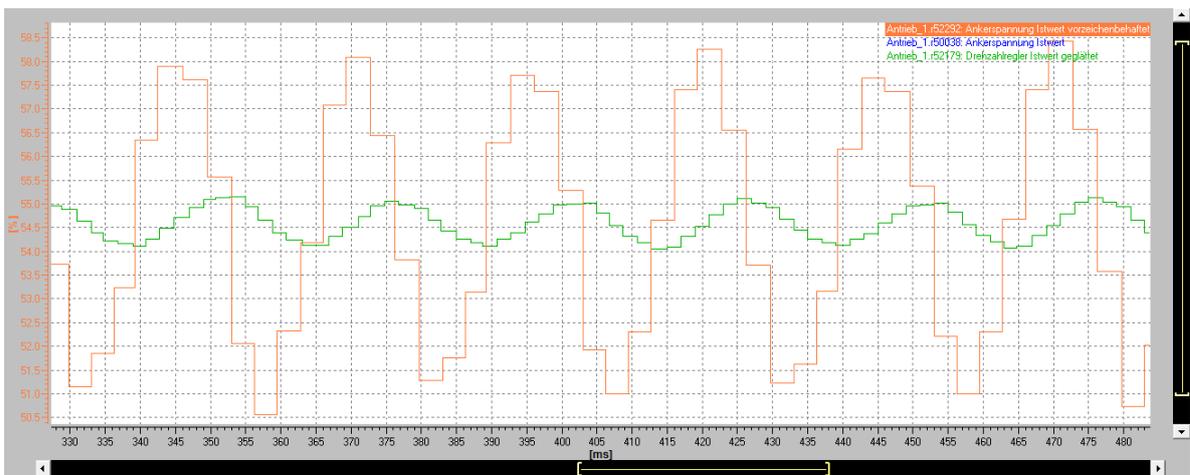


Abbildung 3.5: Ankerspannungsregelung Istwerterfassung

Der Verlauf der Ankerspannung sieht, aufgrund der Abtastung, nicht so aus wie erwartet. Die Abtastung müsste deutlich schneller gehen, um einen Verlauf, wie auf einem Oszilloskop dargestellt, erkennen zu können. Die Abtastung wird in den folgenden Kapiteln noch genauer thematisiert. Es hat sich gezeigt, dass eine Glättungszeitkonstante von 20msec bis 30msec optimal ist. In dem Laborversuch LEP3.2 wird genau beschrieben, wie und wann die Glättung genutzt werden sollte.

## 3.3 Bestimmung der Lückgrenze

Der Gleichstromantrieb ist jetzt voll funktionsfähig und kann genutzt werden. Der Siemens Starter bestimmt viele Parameter und Werte des Gleichstromantriebes, jedoch wird die Lückgrenze nicht ermittelt. Für die folgenden Kapitel ist es sinnvoll zu wissen, wo diese Grenze ungefähr liegt, damit der Bereich in dem die Untersuchungen statt finden richtig eingestellt werden kann. Am Bedienpult wird die Regelung auf Drehzahlregelung gestellt und ein Sollwert eingestellt. Mit der Asynchronmaschine wird der Gleichstrommotor belastet. Zeitgleich

wird der Ankerstrom, mit dem Oszilloskop beobachtet. Es wird für die Messung ein Oszilloskop der Firma LeCroy vom Typ: WaveSurfer 424 verwendet. In allen weiteren Messungen dieser Arbeit wird dieses Oszilloskop verwendet. Die Belastung durch die Asynchronmaschine wird soweit erhöht, bis der Strom nicht mehr lückt. Bei einem Ankerstrom von  $I_A = 4,19\text{ A}$  lückt der Strom kaum noch. Dies ist in der folgenden Abbildung 3.6 zu erkennen. In Kapitel 6.1.2, bei der Bestimmung der Streckenverstärkung des Stromregelkreises, wird deutlich, dass der Stromrichter, dass hier gezeigte minimale Lücken, nicht erkennt. Wird die Belastung weiter erhöht, ist das Lücken vollständig bei einem Ankerstrom von  $I_A = 4,9\text{ A}$  und einem Drehmoment von  $M=13\text{ Nm}$  überwunden.

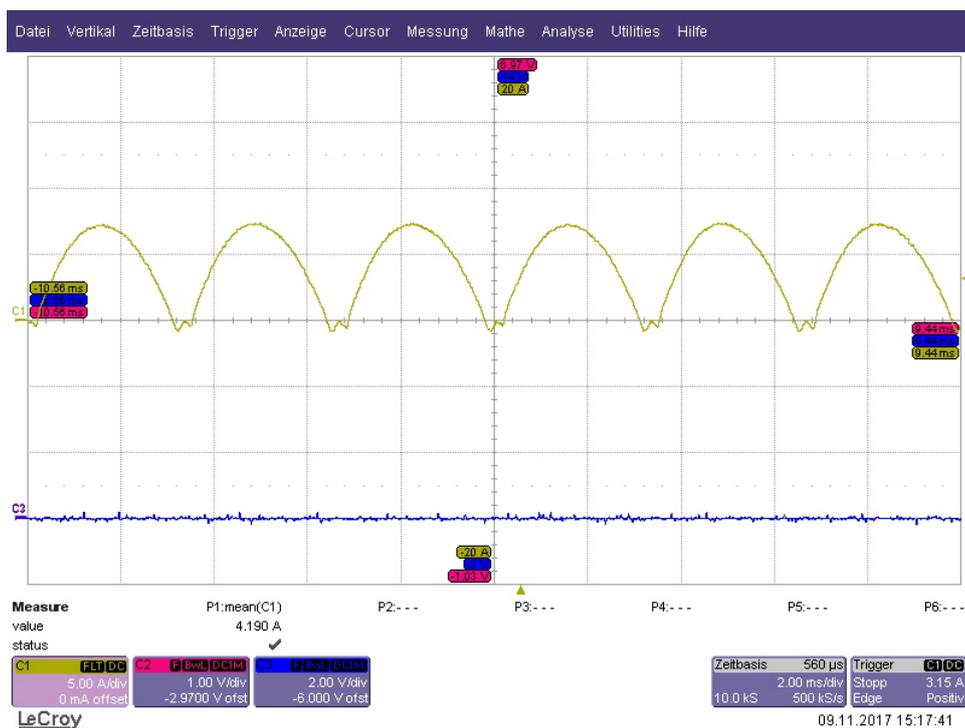


Abbildung 3.6: Bestimmung der Lückengrenze

## 4 Ersatzschaltbild der Gleichstrommaschine

Die Funktionsweise der Gleichstrommaschine wird hier nicht erläutert. Es wird lediglich sehr kurz auf das Ersatzschaltbild der Gleichstrommaschine eingegangen. Bei der verwendeten Maschine handelt es um einen fremderregten Gleichstrommotor. Damit ergibt sich das folgende Ersatzschaltbild, welches in Abbildung 4.1 dargestellt ist.

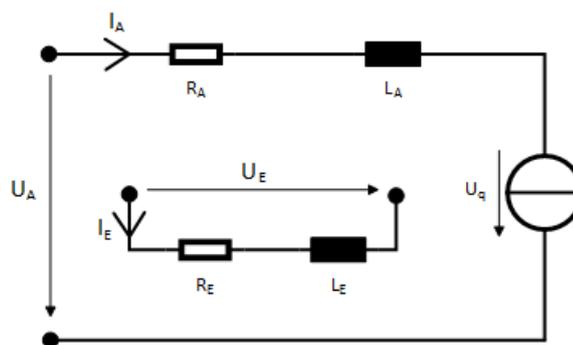


Abbildung 4.1: Ersatzschaltbild einer Nebenschlusserregten Gleichstrommaschine

Es wird keine Feldschwäche Regelung umgesetzt und somit das erregte Feld als konstant angenommen. Interessant ist also der Ankerstromkreis. Mit dem Ersatzschaltbild soll gezeigt werden, wo die Parameter der Regelung in den folgenden Kapiteln herkommen. Die Größen des Ankerstromkreises sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 4.1: Größen des Ankerstromkreises

$U_A$	Ankerspannung = angelegte Spannung zur steuerung des Motors
$R_A$	Widerstand der Ankerwicklung
$L_A$	Induktivität Ankerwicklung
$U_q$	Induzierte Spannung durch die Drehung des Rotors

# 5 Regelung von Gleichstrommaschinen

In diesem Kapitel wird erläutert, wie eine Gleichstrommaschine geregelt werden kann. Es wird kurz erklärt, wie der Antriebssatz mittels einer Kaskadenregelung geregelt wird und wie dieser nach dem Symmetrischen Optimum und dem Betragsoptimum eingestellt wird. Dies soll einen kurzen Einblick in die Regelung von Maschinen geben, damit nachvollzogen werden kann, wie die Regler des Antriebes in den folgenden Kapiteln eingestellt werden und welcher Zweck damit verfolgt wird. Während der Ermittlung der Streckenparameter wird noch einmal detaillierter auf die einzelnen Regelstrukturen eingegangen.

## 5.1 Regelung mittels Kaskadenregelung

Eine Regelung mittels einer Kaskadenregelung beschreibt eine Regelung aus mehreren verschachtelten Regelkreisen. Die Regelung baut sich somit quasi von innen nach außen auf. So gibt es einen inneren Regelkreis, welcher von einem äußeren Regelkreis umgeben ist und dieser kann wieder von einem Regelkreis umgeben sein. Der innere Regelkreis muss dabei immer schneller sein wie der Äußere. Es kann somit ein innerer Regelkreis für den äußeren Regelkreis vereinfacht dargestellt werden. Dies ist nicht immer möglich und ist mit gewissen Grenzen verbunden, welche beachtet werden sollten. Es ist jedoch von Vorteil für die Reglerauslegung des äußeren Regelkreises, wenn der innere Regelkreis vereinfacht durch ein Verzögerungsglied, wie z.B. ein P-T1-Glied angenommen wird. Für solch einen Regelkreis ist es dann relativ einfach einen Regler auszulegen. In der Abbildung 5.1 ist der allgemeine Aufbau einer Kaskadenregelung dargestellt, um das Prinzip zu verdeutlichen.

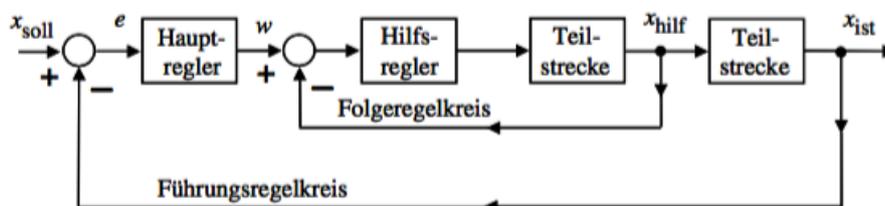


Abbildung 5.1: Kaskadenregelung Prinzip [4, S.14]

Bei der Gleichstrommaschinenregelung werden im Wesentlichen die Drehzahl und der Ankerstromfluss  $i_A$  bzw. das Drehmoment geregelt. Der Drehmoment Regelkreis ist derselbe wie der des Stromes. Das Drehmoment und der Strom sind proportional zueinander. Der Erregerkreis wird nicht geregelt, da er konstant ist. Die Erregerspannung bzw. der Erregerstrom bleiben konstant. Die Kaskadenregelung ist nun so aufgebaut, dass der deutlich schnellere Stromregelkreis den Inneren und die Drehzahlregelung den äußeren Regelkreis bilden. Dies ist in der Abbildung 5.2 dargestellt. Auf die Teilstrecken der Ankerstrom- und der Drehzahlregelung wird in den folgenden Kapiteln eingegangen.

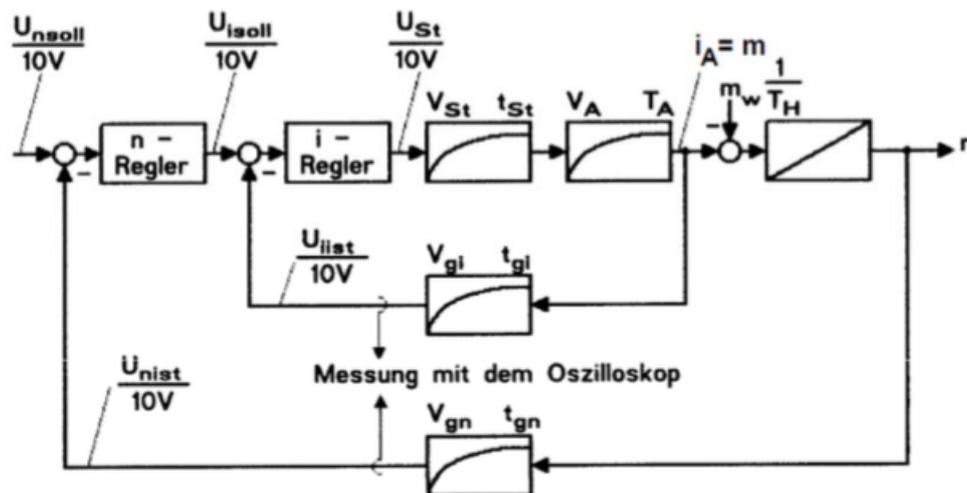


Abbildung 5.2: Kaskadenregelung einer Gleichstrommaschine [5, S.23]

Es sollte beachtet werden, dass es hier um die Umsetzung der Kaskadenregelung, wie diese hier dargestellt ist, geht. Es darf dabei nicht vergessen werden, dass der DC-Master im Hintergrund sowie noch parallel wesentlich mehr Regelungen durchführt, welche hier nicht betrachtet werden. Die Umsetzung dieser Struktur bürgt von daher Tücken auf, auf welche an den jeweiligen Stellen eingegangen wird.

## 5.2 Betragsoptimum

Das Betragsoptimum stellt ein Optimierungsverfahren für die Regelung von Regelstrecken dar, welche kein Integrales-Verhalten haben. Eine nach diesem Verfahren ausgelegte Regelung hat die Eigenschaft, dass es bei einer Anregung durch einen Sprung zu einem schnellen Erreichen der Führungsgröße mit einem leichten Überschwinger kommt siehe Abbildung

5.3. Ein großer Überschwinger würde eine Stromspitze bedeuten, welche allgemein zu vermeiden sind. Tritt eine Störung auf, so schafft es der optimierte Regler diese sehr schnell auszuregeln. Diese Eigenschaft ist sehr von Vorteil bei der Regelung des Ankerstromes  $I_A$ . Würde es nicht möglich sein, Störungen schnell auszuregeln, könnte der Stromrichter oder die Maschine Schaden nehmen.

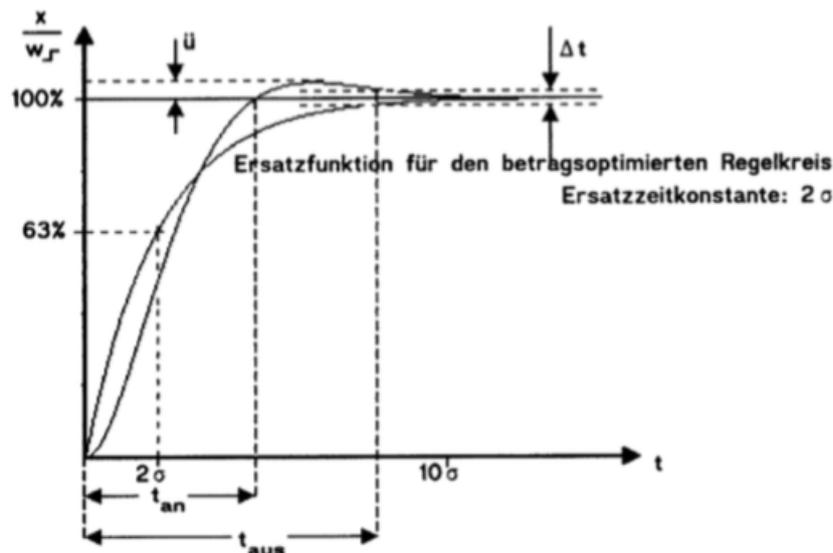


Abbildung 5.3: Sprungantwort Betrags Optimum [5, S.27]

In den nachfolgenden Kapiteln wird der Regler des Stromregelkreises folglich mit den Einstellregeln nach dem Betragsoptimum eingestellt. Die Abbildung 5.3 zeigt die zu erwartende Sprungantwort eines nach dem Betragsoptimum optimierten Regelkreises. Die Sprungantwort des später optimierten Regelkreises wird mit dieser hier verglichen. In der Tabelle 5.1 sind die Eigenschaften der Sprungantwort zusammengefasst. Die allgemeine Zeitkonstante  $\sigma$  wird dabei durch die des Stromregelkreises ersetzt.

Tabelle 5.1: Eigenschaften der Sprungantwort Betrags Optimum

Anregelzeit $t_{an}$	$4,7 \cdot T_{\sigma i}$
Ausregelzeit $t_{aus}$	$8,4 \cdot T_{\sigma i}$
Überschwinger $\ddot{u}$	4,3 %

Die Einstellregeln für einen PI-Regler nach dem Betrags-Optimum sind in den folgenden Formeln zusammengefasst. Es werden die Abkürzungen benutzt, welche auch im Stromre-

gelkreis verwendet werden.

$$K_{pi} = \frac{T_A}{2 \cdot V_{SI} \cdot T_{\sigma i}} \quad (5.1)$$

$$T_{ni} = T_A \quad (5.2)$$

Hinweis: Die Zeitkonstante  $T_A$  ist die Ankerzeitkonstante, welche die größte Zeitkonstante im Stromregelkreis darstellt.  $V_{SI}$  fasst die Streckenverstärkung zusammen.

### 5.3 Symmetrisches Optimum

Das Symmetrische Optimum wird bevorzugt bei Regelstrecken mit einem Integralen-Verhalten verwendet. Der Vorteil ist, dass der so optimierte Regler keinen Integralen-Anteil braucht, da die Strecke durch den schon vorhandenen Integralen-Anteil stationäre Genauigkeit erreicht. Dies hat den Nachteil, dass Störungen nicht ausgeregelt werden können. Es wird deswegen bevorzugt ein PI-Regler verwendet, dessen I-Anteil dann in der Lage ist die Störung auszuregeln. Typischerweise findet diese Optimierung ihre Anwendung bei einer Drehzahlregelung eines Antriebs mit innerem Stromregelkreis.

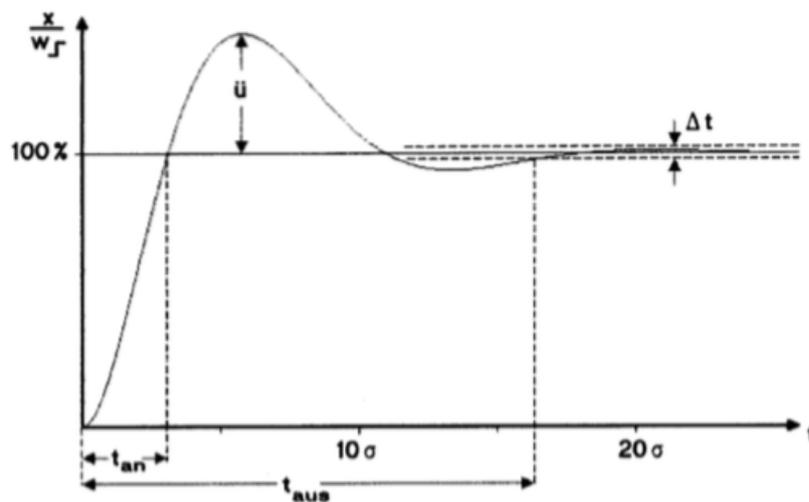


Abbildung 5.4: Sprungantwort Symmetrisches Optimum [5, S.29]

Die Abbildung 5.4 zeigt die typische Sprungantwort eines Regelkreises, welcher nach dem Symmetrischen Optimum optimiert wurde. Auffällig ist der sehr große Überschwinger, welcher zu einer kurzen Anregelzeit führt. Die Eigenschaften und Merkmale der Sprungantwort

sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst. Die allgemeine Zeitkonstante  $\sigma$  ist dabei durch die des Drehzahlregelkreises ersetzt worden.

Tabelle 5.2: Eigenschaften der Sprungantwort Symmetrisches Optimums

Anregelzeit $t_{an}$	$3,1 \cdot T_{\sigma n}$
Ausregelzeit $t_{aus}$	$16,5 \cdot T_{\sigma n}$
Überschwinger $\ddot{u}$	43 %

Der bereits erwähnte recht große Überschwinger ist nicht erwünscht. In vielen Anwendungsfällen ist ein Drehzahlüberschwingen in der hier gezeigten Dimension eher weniger optimal. Der Regler kann jedoch nicht einfach langsamer eingestellt werden, um diesem entgegen zu wirken. Durch einen langsameren Regler würde das Ausregeln von Störungen deutlich mehr Zeit in Anspruch nehmen. Es kann also nicht unmittelbar in den Regelkreis eingegriffen werden. Der Überschwinger kann jedoch mittels Sollwertglättung verringert werden. Dies geschieht durch ein vorgeschaltetes PT-1 Glied.

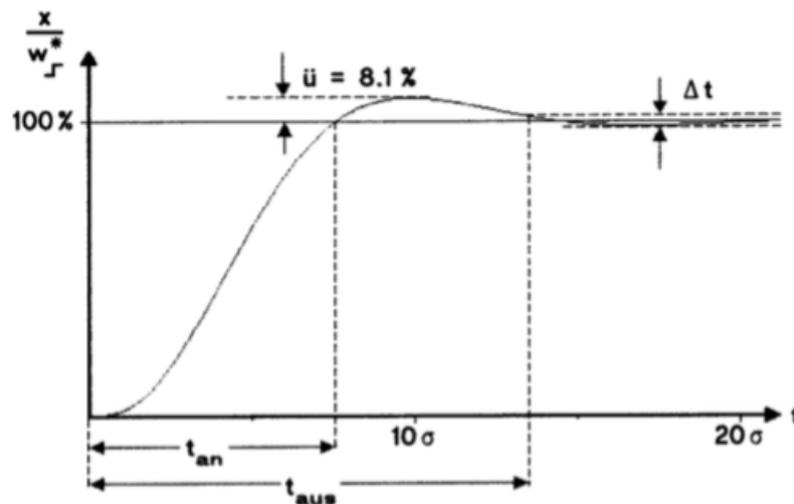


Abbildung 5.5: Sprungantwort Symmetrisches Optimum mit Sollwertglättung [5, S.31]

Die Abbildung 5.5 zeigt die zu erwartende Sprungantwort mit Sollwertglättung. Der Überschwinger ist nun deutlich geringer. Für die praktische Anwendung ist ein Überschwinger der Drehzahl von 8% bei einer Sollwertänderung annehmbarer und weniger kritisch. Die Tabelle 5.3 fasst die Eigenschaften der Sprungantwort mit Sollwertglättung zusammen.

Tabelle 5.3: Eigenschaften der Sprungantwort Symmetrisches Optimum mit Sollwertglättung

Anregelzeit $t_{an}$	$7,6 \cdot T_{\sigma n}$
Ausregelzeit $t_{aus}$	$13,3 \cdot T_{\sigma n}$
Überschwinger	8,1 %

Die Einstellregeln der Regelparameter sowie die Einstellung der Sollwertglättung des Symmetrischen Optimums ist in den nachfolgenden Formeln zusammengefasst.

$$K_{pn} = \frac{T_0}{2 \cdot V_{SN} \cdot T_{\sigma n}} \quad (5.3)$$

$$T_{nn} = 4 \cdot T_{\sigma n} \quad (5.4)$$

$$T_{gl} = T_{nn} \quad (5.5)$$

Hinweis:  $T_0$  beschreibt die größte Zeitkonstante und  $T_{gl}$  beschreibt die Zeitkonstante der Sollwertglättung.

## 6 Optimierung des Stromregelkreises

In diesem Kapitel wird der Stromregelkreis nach dem Betragsoptimum optimiert. Zunächst werden die Streckenparameter der Stromregelstrecke bestimmt. Mit den Ermittelten Parametern wird anschließend der PI-Stromregler ausgelegt und validiert. Es werden 2 verschiedene Möglichkeiten zur Umsetzung des Stromreglers untersucht.

### 6.1 Bestimmung der Streckenparameter des Stromregelkreises

In diesem Kapitel werden die Regelparameter des inneren Strom- bzw. Drehmoment-Regelkreises einer Gleichstrommaschinenregelung ermittelt und berechnet. Diese werden sowohl messtechnisch erfasst als auch rechnerisch bestimmt. So kann z.B. die Zeitkonstante der B6-Brücke  $t_{st}$  lediglich näherungsweise berechnet werden und wird deswegen messtechnisch ermittelt. Selbiges gilt für die Gesamtstreckenverstärkung  $V_{S1}$ .

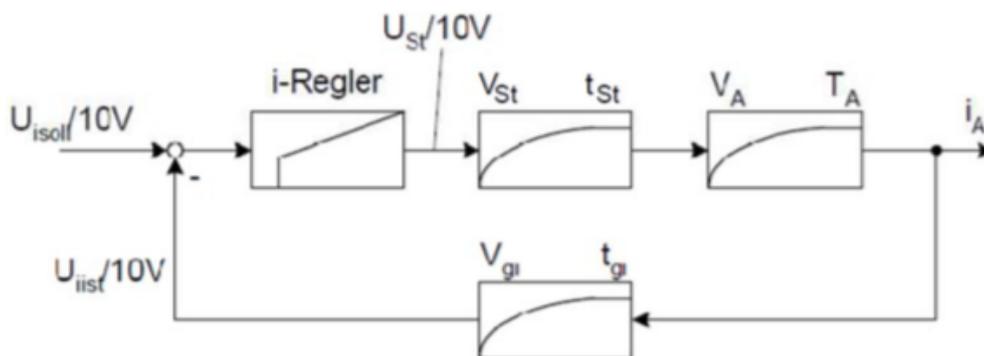


Abbildung 6.1: Regelungstechnisches Ersatzschaltbild Ankerstromregelkreis [5, S.32]

In den folgenden Abschnitten wird näher darauf eingegangen, wie die Parameter bestimmt und ermittelt werden und welche Schwierigkeiten und Möglichkeiten es gibt. Wo es möglich ist, werden diese überprüft und auf mehreren Wegen ermittelt. Aus den ermittelten

Parametern werden anschließend in den darauffolgenden Kapiteln die Stellgrößen des PI-Stromreglers nach dem Betragsoptimum berechnet. Zur Veranschaulichung und zum besseren nachvollziehen, um welche Parameter es in den folgenden Abschnitten genau geht, ist der Ankerstromregelkreis in der Abbildung 6.1 mit den genutzten Abkürzungen und Bezeichnungen der Parameter dargestellt.

### 6.1.1 Ankerzeitkonstante $T_A$

Die Ankerzeitkonstante  $T_A$  beschreibt die Verzögerungszeit des Ankerstromes  $I_A$ . Sie wird aus den Werten des Ankerwiderstandes  $R_A$  und der Ankerinduktivität  $L_A$  berechnet oder wird aus einer Ankerstromsprungantwort bestimmt. Zunächst wird der Ankerwiderstand und die Ankerinduktivität auf zwei unterschiedliche und unabhängige Varianten bestimmt. Daraufhin wird die Ankerzeitkonstante mit der Formel 6.1 berechnet und die Ergebnisse werden in der Tabelle 6.1 miteinander verglichen. Anschließend wird eine Ankerstromsprungantwort mit dem Geräte-Trace aufgezeichnet und mit den berechneten Werten für  $T_A$  verglichen.

$$T_A = \frac{L_A}{R_A} \quad (6.1)$$

#### Messung des Ankerkreiswiderstandes $R_A$ und Ankerinduktivität $L_A$

Der Ankerwiderstand  $R_A$  und die Ankerinduktivität  $L_A$  werden durch die folgenden 2 unabhängigen Varianten bestimmt.

##### 1.Variante: Ermittlung mit Hilfe des Inbetriebnahme Tool Starters

Bei der Inbetriebnahme mit dem Starter werden sogenannte Optimierungsläufe durchgeführt. Durch diese Optimierungsläufe ermittelt die Software die Werte für  $R_A$  und  $L_A$  und hinterlegt diese in den Parametern Ankerkreiswiderstand (p50110[0]) und Ankerkreisinduktivität (p50111[0]) [3]. Während des Untersuchungszeitraums wurden die Parameter mehrmals, mit leicht unterschiedlichen Werten bestimmt.

##### 2.Variante: Ermittlung mit der LCR-Messbrücke

Für diese Messung wird die LCR-Messbrücke HM8118 der Firma Rhode und Schwarz verwendet. Die Messung wird bei einer Frequenz von 20 Hz durchgeführt, da sich die zu messenden Größen in dem Ankerkreis befinden. Der Ankerkreis ist ein Gleichstromkreis und es sollte dadurch mit möglichst niedriger Frequenz gemessen werden.

### Messergebnisse von $R_A$ und $L_A$

In der folgenden Tabelle sind die ermittelten Werte für  $R_A$  und  $L_A$  dokumentiert. Zusätzlich wurde  $T_A$  mit der Formel 6.1 berechnet und eingefügt. Die Ergebnisse sind ausreichend dicht beisammen. Die Parameter ändern sich mit dem Betriebszustand der Gleichstrommaschine und sind des Weiteren von der Umgebungstemperatur anhängig. Die Parameter sind dynamisch und sind bei Messungen an unterschiedlichen Tagen und Betriebszuständen nicht identisch. Beide Messergebnisse können als glaubhaft und richtig angenommen werden. Für weitere Berechnungen werden die durch den Starter ermittelten Werte angenommen.

Tabelle 6.1: Messergebnisse von  $R_A$  und  $L_A$

	$R_A$	$L_A$	$T_A$
<b>Starter</b>	3,688 $\Omega$	48,669 mH	13,2 msec
<b>LCR-Messbrücke</b>	4,177 $\Omega$	44,982 mH	10,8 msec

### Aufnahme der Ankerzeitkonstante $T_A$

Die Aufnahme der Sprungantwort des Ankerstromes  $I_A$  wird mit dem Geräte-Trace des Starters aufgezeichnet. Der Sprung des Stromes wird mit dem integrierten Rechteckgenerator des Starters erzeugt. Hierfür wird der Ausgang des Rechteckgenerators (p50208) mit dem Eingang des Ankersteuersatzes (p50600[0]) verschaltet. Der Rechteckgenerator ist so eingestellt, dass der Ankerstrom  $I_A$  von einem Spitzenwert  $I_{A-Spitze} = 5,2A$  auf einen Wert von  $I_{A-Spitze} = 8,6A$  springt.

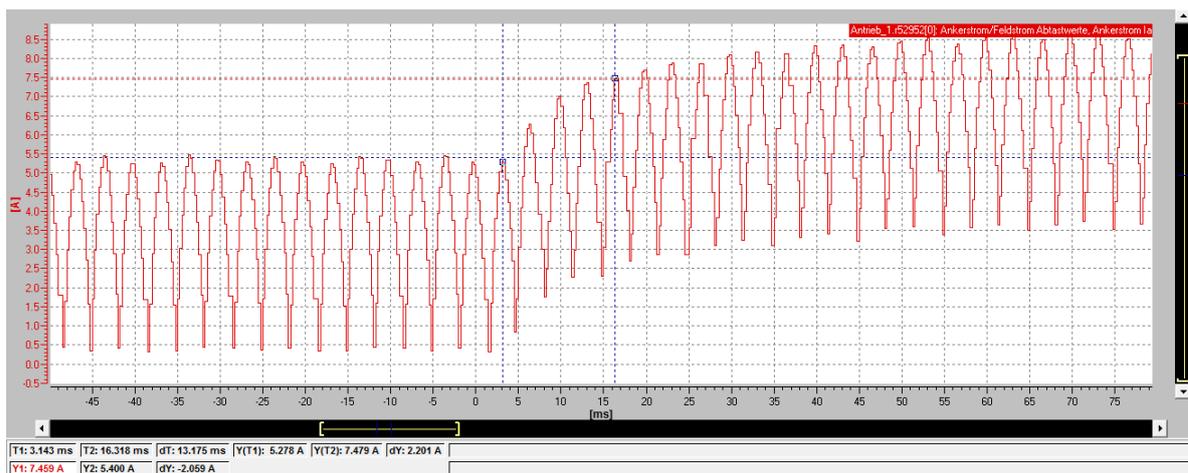


Abbildung 6.2: Ermittlung von  $T_A$  aus der Sprungantwort des Ankerstromes  $I_A$

Die Sprungantwort ist in der Abbildung 6.2 dargestellt. Die Ankerzeitkonstante  $T_A$  wird an dem Punkt bestimmt, wo der Ankerstrom  $I_A$  63% der Sprunghöhe erreicht. Mit den T- und Y-Cursor des Geräte-Traces lässt sich nun  $T_A = 13,175msec$  bestimmen. Dieser Wert reiht sich in die berechneten Werte ein und liegt sehr dicht an dem größeren Wert. Die Messung mit dem Geräte-Trace erfolgt mit einer Abtastrate von 0,25msec, was zu leichten Ungenauigkeiten führen kann, was hier jedoch nicht stört.

### 6.1.2 Streckenverstärkung $V_{SI}$

Die Streckenverstärkung  $V_{SI}$  ist die Gesamtverstärkung des geschlossenen Ankerstromregelkreises. Aus der Abbildung 6.1 wird die folgende Gesamtverstärkung  $V_{SI}$  in der Formel 6.2 zusammengefasst. Die Verstärkung ist also abhängig von der Gleichstrommaschine ( $V_A$ ), dem Stromrichter ( $V_{st}$ ) und der Messtechnik ( $V_{gi}$ ).

$$V_{SI} = V_{st} \cdot V_A \cdot V_{gi} \quad (6.2)$$

Eine Messung der einzelnen Verstärkung ist mit dem hier gewählten Aufbau nicht möglich, da sich die Regelstrecke nicht auftrennen lässt. Die Messung der Streckenverstärkung  $V_{SI}$  wird mithilfe des Starters parametrisiert und durchgeführt. Hierfür wird eine Messreihe aufgenommen, aus welcher die Streckenverstärkung bestimmt wird. Die Messreihe wird als Graph wiedergegeben, um den linearen Bereich zu bestimmen. Aus diesem wird die Verstärkung bestimmt. Wird der Lückbereich mit einbezogen, führt dies zur Ergebnisverfälschung und weitere darauf aufbauende Rechnungen würden kein plausibles Ergebnis mehr bringen.

### Messung der Streckenverstärkung $V_{SI}$

Vor Beginn der Messung sollte die Maschine warm gefahren sein, um ein optimales Ergebnis zu erzielen. Mit dem Starter wird der DC-Master so parametrisiert, dass der Analogeingang AI2 mit dem Eingang des Ankersteuersatzes (p50600[0]) verschaltet wird. Das Erregerfeld wird bei dieser Messung ausgeschaltet, um zu verhindern, dass sich der Motor dreht und eine Verfälschung der Messung durch die Erzeugung der Quellspannung  $U_q$  auftritt. Der Analogeingang AI2 wird am Bedienpult von 0V aus erhöht bis der Nennstrom  $I_{AN}$  fließt. Fließt der Nennstrom  $I_{AN}$  entspricht dies  $U_{iist} = 10V$ . Der Nennstrom stellt sich allerdings schon bei einer Eingangsspannung von  $U_{st} = 0,786V$  ein. Da der Analogeingang AI2 einen Eingangsspannungsbereich von 0V - 10V hat, siehe auch Kapitel 3.2.3, und sich der Nennstrom schon bei einer sehr geringen Steuerspannung einstellt, wird der Analogeingang AI2 auf 10 % normiert. Dies bedeutet, dass das Potenziometer am Bedienpult einen deutlich größeren Einstellbereich hat. Es sind nun mehrere Umdrehungen des Potenziometers nötig,

um Ankernennstrom zu erlangen. Der Ankerstrom  $I_A$  wird über den Parameter Ankerstromwert(r27) ermittelt. Der Strom könnte auch mit einem Oszilloskop oder einem anderen Messgerät ermittelt werden, was aber zu dem selben Ergebnis führen würde. Eine genauere Durchführungsbeschreibung kann in dem erstellten Laborversuch "LEP3.2: Stationäres und dynamisches Verhalten eines Gleichstromantriebes", welcher sich im Anhang befindet, nachgelesen werden.

### Messergebnis Streckenverstärkung $V_{SI}$

In der folgenden Tabelle 6.2 sind die Messergebnisse aufgeführt. Der Wert der Spannung  $U_{iist}$  wird über eine Verhältnisrechnung zum Ankerstrom  $I_A$  bestimmt. Für die Auswertung kann der Strom  $I_A$  und die Spannung  $U_{st}$  in Prozent betrachtet werden oder es werden die Spannungen  $U_{iist}$  und  $U_{st}$  betrachtet. In der grafischen Darstellung und der Berechnung der Verstärkung  $V_{SI}$  führt dies zu dem selben Ergebnis und Verlauf.

Tabelle 6.2: Messergebnisse der Streckenverstärkung  $V_{SI}$  im nicht lückenden Bereich

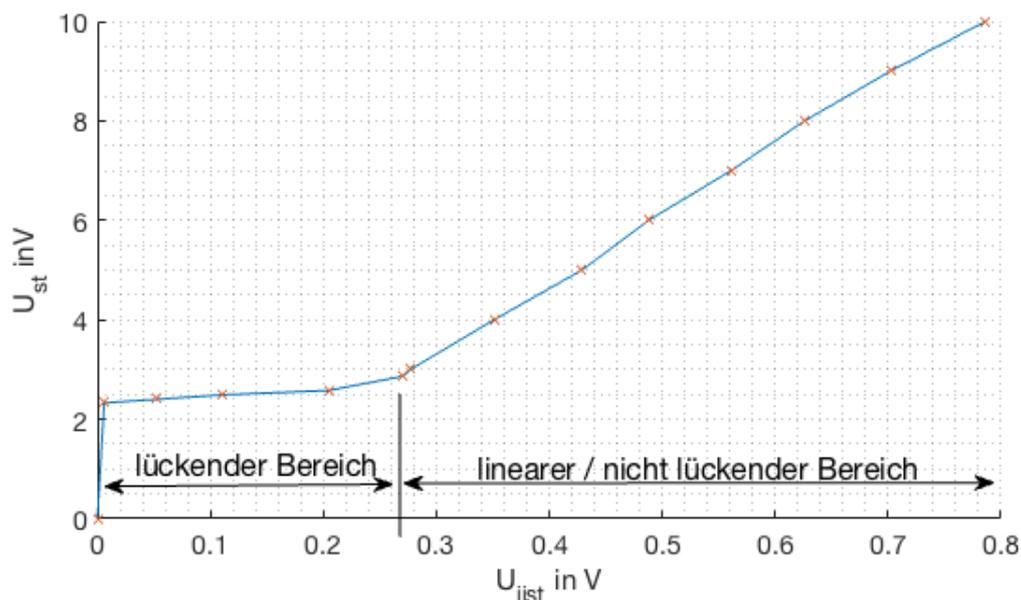
$U_{st}$ in V	$U_{iist}$ in V	$I_A$ in A
0,786	10	14,3
0,702	9	12,87
0,626	8	11,44
0,561	7	10,01
0,488	6	8,58
0,429	5	7,15
0,351	4	5,72
0,277	3	4,29

Während der Messung wurde festgestellt, dass beim Erhöhen des Potenziometers von 0V der Ankerstrom  $I_A$  direkt auf einen Wert von etwas über 3A springt und diesen Wert hält bzw. nur leicht erhöht, bis der Analogeingang AI2 einen Schwellwert von  $U_{st} = 0,27V$  überschreitet. Der Ankerstrom  $I_A$  übersteigt in diesem Fall einen Wert von 4A. Es ist nun davon auszugehen, dass der DC-Master so konfiguriert ist, dass er den Lückbereich mit dieser Eigenschaft adaptiert. Bei der Verschaltung des Messaufbaus ist die Ankervorsteuerung ausgekoppelt worden und hat somit keinen Einfluss auf die Messung. Trotzdem laufen im Hintergrund noch diverse Schutz- und Logikfunktionen, welche nicht umgangen werden können. Ist der Lückbereich überwunden, steigt der Ankerstrom  $I_A$  deutlich schneller. In der nachfolgenden Tabelle 6.3 sind die aufgenommenen Messpunkte im Lückbereich dokumentiert.

Tabelle 6.3: Messergebnisse der Streckenverstärkung  $V_{SI}$  im lückenden Bereich

$U_{st}$ in V	$U_{iist}$ in V	$I_A$ in A
0,27	2,87	4,1
0,25	2,58	3,7
0,11	2,49	3,57
0,052	2,4	3,44
0,06	2,33	3,33
0	0	0

Das Messergebnis wird nun grafisch in der folgenden Abbildung 6.3 dargestellt. Es ist der Sollwert  $U_{st}$  über den Ist-Wert  $U_{iist}$  dargestellt.

Abbildung 6.3: Verlauf der Streckenverstärkung  $V_{SI}$ 

Aus dem Verlauf der Streckenverstärkung lässt sich nun deutlich der Sprung des Ist-Wertes erkennen. Erst wenn der Lückbereich überwunden ist, steigt die Verstärkung  $V_{SI}$  linear an. Aus dem linearen / nicht lückenden Bereich wird die Verstärkung mit der folgenden Formel wie folgt berechnet.

$$\begin{aligned}
 V_{SI} &= \frac{\Delta U_{iist}}{\Delta U_{st}} & (6.3) \\
 &= \frac{10\text{V} - 2,87\text{V}}{0,786\text{V} - 0,271\text{V}} = \underline{\underline{13,84}}
 \end{aligned}$$

### 6.1.3 Summe der kleinen Zeitkonstanten $T_{\sigma i}$

In dem Strom-Regelkreis einer Gleichstrommaschine entstehen aufgrund seiner Beschaffenheit, siehe Abbildung 6.1, mehrere Zeitkonstanten, welche zu Verzögerungen führen. Werden die sehr kleinen Zeitkonstanten wie Übertragungszeiten vernachlässigt, bleiben im Wesentlichen die Totzeit  $t_{st}$  des Stromrichters und die Zeit  $t_{gi}$  welche das Ankerstrommessglied zur Glättung des Stromes benötigt. Die Zeitkonstanten werden in  $T_{\sigma i}$  zusammengefasst.

$$T_{\sigma i} = t_{st} + t_{gi} \quad (6.4)$$

Die ideale Totzeit des Stromrichters  $t_{st}$  [6] beschreibt die mittlere Zeit zwischen 2 Kommutierungen der Ventile in einer B6-Brücke. Sie wird durch die Periodendauer  $T_N$  des speisenden Netzes und der Anzahl der Pulse  $p$  bestimmt.

$$t_{st} = \frac{T_N}{2 \cdot p} \quad (6.5)$$

Mit der Formel 6.5 wird nun  $t_{st}$  mit der Periodenlänge des eingespeisten Netzes von  $T_N = 20msec$  und Anzahl der Pulse der B6-Brücke  $p = 6$  berechnet und führt zu folgendem Ergebnis.

$$t_{st} = \frac{20msec}{2 \cdot 6} = \underline{1.67msec}$$

Dies ist ein sehr theoretischer Wert und berücksichtigt keine Rechen- und Übertragungszeiten des digitalen Systems. Diese Art der Berechnung bezieht sich lediglich auf die B6-Brücke und nicht auf den digitalen Ankersteuersatz und die Kommandostufe, welche die Brücke steuern. Der tatsächliche Wert wird deutlich größer sein.

Die Totzeit  $t_{st}$  und die Messglättungszeitkonstante  $t_{gi}$  können leider nicht aus der Betriebsanleitung [1] des Stromrichters entnommen werden, da Siemens diese nicht angibt. Eine theoretische Berechnung bringt zu dem keine aussagekräftigen Ergebnisse bei einem digitalen System. Die Summe der kleinen Zeitkonstanten  $T_{\sigma i}$  wird also messtechnisch ermittelt. Zu diesem Zweck kann der Geräte-Trace des Startes oder ein Oszilloskop genutzt werden. Es hat sich jedoch herausgestellt, dass ein Oszilloskop dafür nicht geeignet ist. Der nachfolgende Abschnitt verdeutlicht dies.

Zur messtechnischen Ermittlung von  $T_{\sigma i}$  wird der Stromrichter über das Inbetriebnahmetool Starter bedient. Es wird der Ausgang des Rechteckgenerators (r52208) mit dem Eingang des

Ankersteuersatzes (p50600[0]) verschaltet. Der Rechteckgenerator erzeugt so einen wiederkehrenden Sprung auf den Eingang des Ankersteuersatzes, welcher den Ankerstrom  $I_A$  bestimmt. Aus der Sprungantwort wird  $T_{\sigma i}$  bestimmt. Wobei  $T_{\sigma i}$  die Zeit zwischen der positiven Flanke und der ersten ersichtlichen Änderung des Ankerstromes  $I_A$  ist.

### Messung von $T_{\sigma i}$ mit dem Oszilloskop

In der Abbildung 6.4 ist eine Messung von  $T_{\sigma i}$  mit dem Oszilloskop dargestellt. Der pinke Verlauf stellt den Ankerstrom  $I_A$ , welcher mittels einer Stromzange gemessen wurde und der blaue Verlauf stellt das Ausgangssignal des Rechteckgenerators dar. Das Ausgangssignal des Rechteckgenerators wird über einen der Analogausgänge an das Oszilloskop übermittelt. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Strom  $I_A$  sich ändert bevor die positive Flanke des Rechteckgenerators erscheint. Die interne Wandlung des digitalen Signals zu einem analogen Signals mittels DA-Wandler sorgt für lange Verzögerungszeiten. Ein Grund hierfür wird sein, dass der Ausgang des Rechteckgenerators auf einer anderen Zeitscheibe zu einem anderem Zeitpunkt verarbeitet wird, als der DA-Wandler des Analogausganges. Hinzu kommt die Taktung der Zeitscheiben mit  $T=1\text{msec}$  [1] welche zu Verzögerungen führt. Die Messergebnisse mit dem Oszilloskop sind also nicht aussagekräftig und führen somit zu keinem brauchbaren Ergebnis.

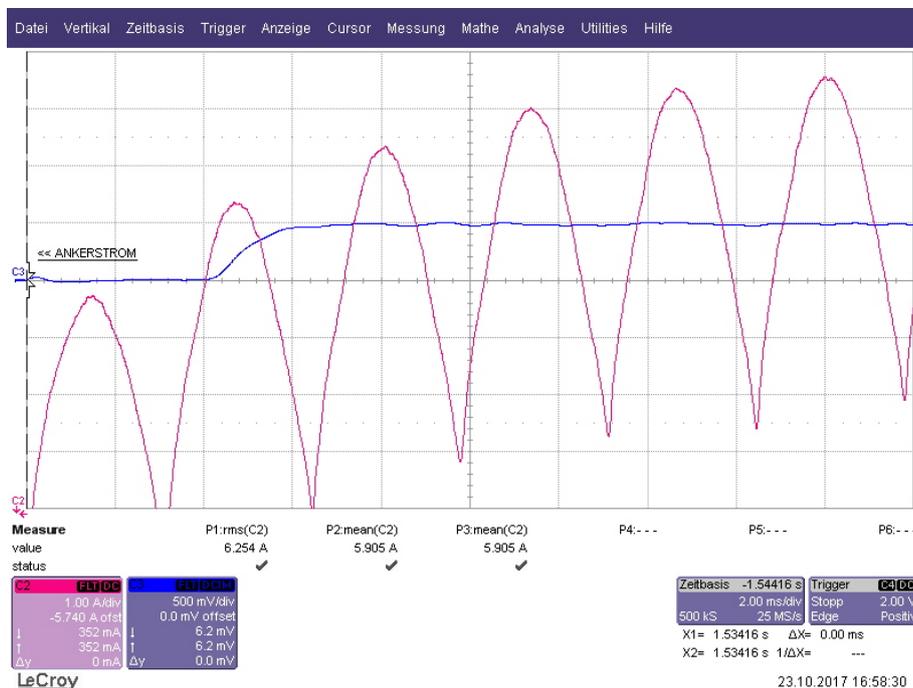


Abbildung 6.4: Messung  $T_{\sigma i}$  mit dem Oszilloskop

### Messung von $T_{\sigma i}$ mit dem Geräte-Trace

Die folgende Abbildung 6.5 zeigt eine Messung von  $T_{\sigma i}$  mit dem Geräte-Trace des Starters. Der Ankerstrom  $I_A$  ist in rot und der Ausgang des Rechteckgenerators ist in blau dargestellt. Der Trace wird mit einer Abtastrate von 0,25msec durchgeführt. Dies bedeutet, dass die ermittelten Messergebnisse eine gewisse Toleranz haben. Wird der Ankerstrom  $I_A$  betrachtet, fällt auf, dass dieser eine gewisse Grundschiwingung aufweist. In dem Zeitpunkt, wo sich die Grundschiwingung des Ankerstromes  $I_A$  ändert, wird  $T_{\sigma i}$  ermittelt. Damit ergibt sich aus der Abbildung 6.5 z.B. für  $T_{\sigma i}$  eine Zeit von 6msec. Der so ermittelte Wert schwankt je nachdem in welchem Abschnitt die Zeitscheiben der Steuerung gerade sind, wenn die positive Flanke des Rechteckgenerator erscheint. Der interne Ablauf der Steuerung und Übertragung der Zustandsflags bestimmt also die Reaktionszeit. Um einen Durchschnittswert für  $T_{\sigma i}$  zu erlangen, wird der Mittelwert aus 10 Messungen bestimmt.

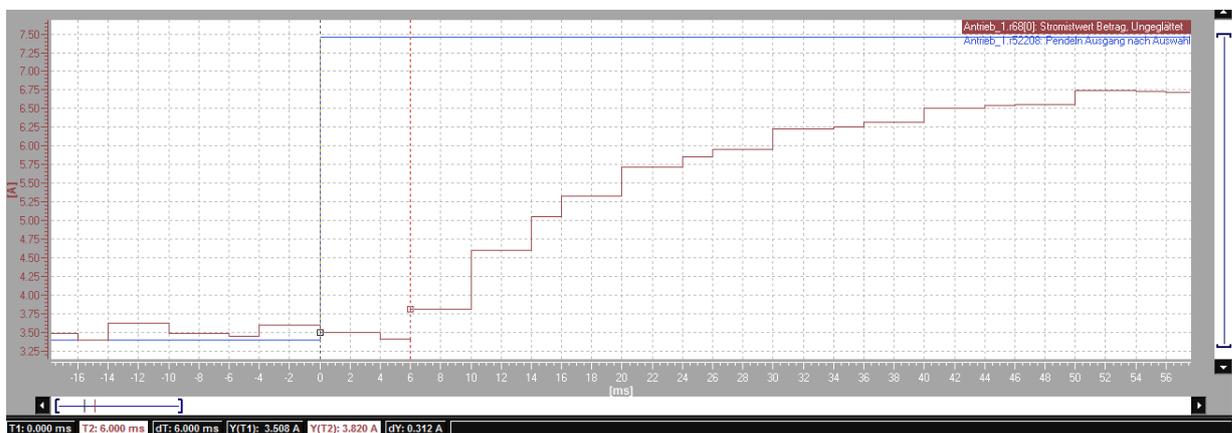
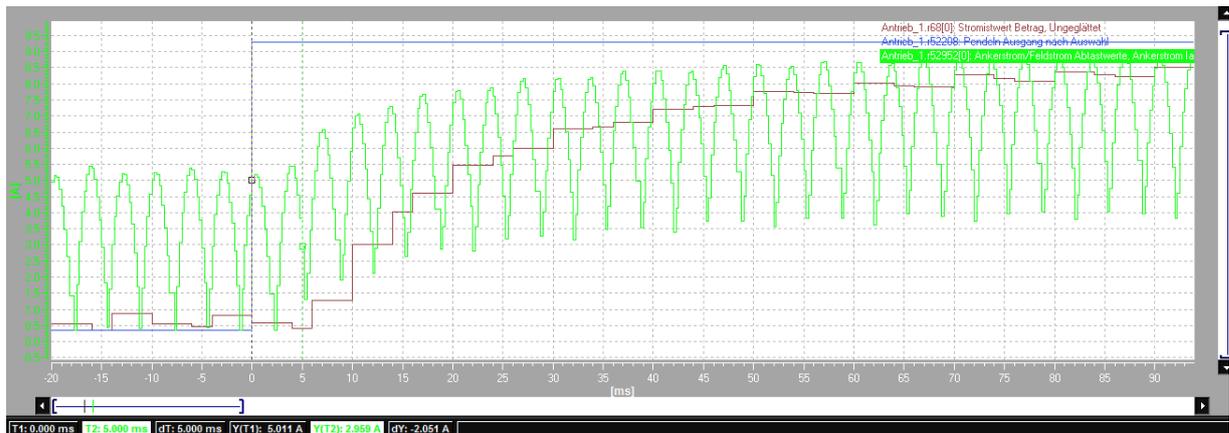


Abbildung 6.5: Messung  $T_{\sigma i}$  mit dem Geräte Trace

Um ein Erkenntnis darüber zu bekommen in welchem Verhältnis  $t_{gi}$  und  $t_{st}$  stehen, wird der abgetastete Strom  $I_A$  zusätzlich mit dem Trace aufgezeichnet. Auch der abgetastete Strom schwingt leicht und ist somit vor der Änderung des Sollwertes nicht konstant. In der Abbildung 6.6 ist zu erkennen, dass zwischen dem abgetasteten Ankerstrom und dem gemittelten Stromwert, welcher der PI-Stromregler als Istwert übergeben bekommt, eine Zeit von ca.1msec vergeht. Dies sollte nun der Messglättungszeitkonstante  $t_{gi}$  entsprechen. Die restliche Zeit indem sich der Ankerstrom nicht ändert, wird der Totzeit des Stromrichter  $t_{st}$  zugesprochen. Es zeigt sich, dass die Totzeit des Stromrichters, wie zu erwarten war, deutlich größer ist. Da es nicht notwendig ist die einzelnen Zeitkonstanten zu bestimmen, wird lediglich die Summe  $T_{\sigma i}$  betrachtet.

Abbildung 6.6: Messung  $T_{gi}$  mit dem Geräte Trace

### Messergebnis der Summe der kleinen Zeitkonstanten $T_{\sigma i}$

Die einzelnen Messergebnisse wurden mit dem Geräte-Trace ermittelt und in nachfolgender Tabelle 6.4 dokumentiert. Werden die einzelnen Ergebnisse aufaddiert und anschließend gemittelt, ergibt sich ein Mittelwert von  $T_{\sigma i} = \underline{\underline{6,17msec}}$

Tabelle 6.4: Messergebnisse von  $T_{\sigma i}$  mit dem Geräte Trace

Messung	$T_{\sigma i}$
1	6 msec
2	7 msec
3	8 msec
4	6 msec
5	6 msec
6	5,8 msec
7	4 msec
8	7,1 msec
9	6 msec
10	5,8 msec

Die Messergebnisse sind belastungsabhängig. Ist der DC-Master gerade erst hochgefahren und werden die Messungen durchgeführt, kommt es zu längeren Ergebnissen. Selbiges gilt, wenn freie Funktionsblöcke genutzt werden oder zusätzliche Operationen mit dem Starter im Online-Modus durchgeführt werden.

### Vergleich mit dem berechneten Ergebnis nach Siemens [7]

Wie bereits erwähnt, trifft Siemens keine explizite Aussage zur Totzeit  $t_{st}$  und Messglättungszeit  $t_{gi}$  in der Betriebsanleitung. In dem von Siemens veröffentlichten FAQ [7] wird jedoch empfohlen  $T_{\sigma i}$  für digitale Regelung wie folgt anzunehmen.

$$\begin{aligned} T_{\sigma i \text{Siemens}} &= 4 \cdot t_{st} \\ &= 4 \cdot 1.67 \text{msec} \\ &= \underline{\underline{6,68 \text{msec}}} \end{aligned}$$

Das messtechnisch ermittelte Ergebnis für  $T_{\sigma i}$  weicht nicht besonders von der Siemens Empfehlung ab. Dies gibt einen Anhaltspunkt darüber, ob das Ergebnis annehmbar ist.

#### 6.1.4 Zusammenfassung der ermittelten und berechneten Streckenparameter

In der folgenden Tabelle 6.5 sind noch einmal alle relevanten, ermittelten und berechneten Streckenparameter des Stromregelkreises für die Berechnung der Reglereinstellungen übersichtlich zusammengefasst.

Tabelle 6.5: Zusammenfassung der Streckenparameter des Stromregelkreises

Beschreibung	Abkürzung	Wert
Streckenverstärkung	$V_{SI}$	13,84
Ankerzeitkonstante	$T_A$	13,2 msec
Summe der kleinen Zeitkonstanten	$T_{\sigma i}$	6,17 msec

## 6.2 Auslegung des Stromreglers nach dem Betragsoptimum

Mit den bis hierher ermittelten Parametern und dem gewonnenen Erkenntnisstand können die Regelparameter des Stromreglers berechnet werden. Der Stromregler ist als PI-Regler ausgelegt. Die einstellbaren Parameter, Verstärkung  $K_{pi}$  und Nachstellzeit  $T_{NI}$ , werden mit den Einstellregeln aus dem Kapitel 5 und den ermittelten Streckenparametern aus Kapitel 6.1 berechnet.

Mit der Formel 5.1 wird  $K_{pi}$  nun wie folgt berechnet:

$$\begin{aligned} K_{pi} &= \frac{T_A}{2 \cdot V_{SI} \cdot T_{\sigma i}} \\ &= \frac{13,2msec}{2 \cdot 13,84 \cdot 6,17msec} \\ &= \underline{\underline{0,077}} \end{aligned}$$

Mit der Formel 5.2 folgt die Bestimmung der Nachstellzeit des PI-Stromreglers:

$$\begin{aligned} T_{ni} &= T_A \\ &= \underline{\underline{13,2msec}} \end{aligned}$$

Um die Störungen optimal auszuregeln wird die Nachstellzeit hinsichtlich der folgenden Bedingung [6, S.50] überprüft.

$$\begin{aligned} T_{\sigma i} < T_A \leq 4 \cdot T_{\sigma i} & \quad (6.6) \\ 6,17msec < 13,2msec \leq 24,68msec & \end{aligned}$$

Die Bedingung ist erfüllt. Somit sollten Störungen optimal ausgeregelt werden können. Ist diese Bedingung nicht erfüllt, sollte in Erwägung gezogen werden das Symmetrische Optimum zu nutzen und den Drehzahlregelkreis dementsprechend nach einem anderen Optimierungsverfahren zu optimieren.

## 6.3 Validierung des Stromregelkreises

Die berechneten Parameter aus Kapitel 6.2 für den PI-Stromregler des inneren Regelkreises werden in diesem Kapitel überprüft. Es wird die Sprungantwort des Stromregelkreises aufgenommen und mit der theoretisch zu erwartenden Sprungantwort, aus dem Kapitel 5.2, verglichen. Stimmt die Sprungantwort des Stromregelkreises mit der theoretischen überein, so hat die Optimierung nach dem Betragsoptimum funktioniert. Es werden zwei verschiedene Möglichkeiten untersucht die Stromregelung des Ankerstromes umzusetzen. Die erste Möglichkeit ist es die vorhandene Ankerstromregelung so zu parametrieren, dass nur der PI-Stromregler die Regelung des Ankerstromes  $I_A$  übernimmt. Die zweite Möglichkeit ist es den vorhandenen Technologieregler, welcher frei parametrierbar ist, zur Ankerstromregelung zu nutzen. In den folgenden Abschnitten werden diese Möglichkeiten nun der Tauglichkeit hin überprüft. Es werden außerdem die Vor- und Nachteile der Lösungen aufgezeigt. Die zu erwartenden An- und Ausregelzeiten mit  $T_{\sigma_i} = 6,17msec$  der Ankerstromsprungantwort nach dem BO (siehe Kapitel:5.2) sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 6.6: An- und Ausregelzeiten Ankerstromsprungantwort nach BO

$T_{AN}$	28,9msec
$T_{AUS}$	56,28msec

### 6.3.1 Ankerstromregelung als PI-Stromregler

Die Ankerstromregelung des DC-Masters ist deutlich komplexer, wie die hier verwendete Kaskadenregelung. Zunächst ein paar Worte zu den Schwierigkeiten und der Komplexität der vorhandenen Ankerstromregelung. Der Ankerstromregelkreis besteht aus einem PI-Regler und der dazu parallel geschalteten Ankervorsteuerung. Diese von Siemens entwickelte Vorsteuerung adaptiert den Ankerstrom  $I_A$  im Lückbereich und sorgt so für eine sehr gute Dynamik des Regelsystems. Des Weiteren steuert diese die Momentenrichtung und etliche Nebenlogiken. Die erste logische Herangehensweise ist es zu versuchen, die Ankervorsteuerung auszuschalten und vom System abzukoppeln. Dies stellt sich jedoch als extrem schwierig heraus, da diese Möglichkeit von Siemens nicht vorgesehen ist. Wird die Ankervorsteuerung an den falschen Stellen manipuliert, führt dies zu einem unbrauchbaren Gesamtsystem. Während der Analyse der Funktionsweise des Ankerstromkreises wurde jedoch ein "workaround" gefunden, mit welchem fast alle Funktionen erhalten bleiben. Lediglich ist darauf hinzuweisen, dass der Strom im Lückbereich nicht mehr adaptiert wird. Was zur Folge hat, dass der Antriebsstrang schlecht bis gar nicht mehr im Leerlauf betrieben werden kann. Gelegentlich kommt es zu Kommutierungsfehlern, welche aber nicht besonders oft und nur bei sehr plötzlichen und sehr massiven Sollwertsprüngen auftreten.

### Vorgehensweise und Probleme der Parametrierung

In der folgenden Abbildung 6.7 ist das Funktionsblatt der Ankerstromregelung abgebildet, welches so mit leichten Abänderungen auch in dem Inbetriebnahmetool Starter visualisiert ist. An diesem wird gezeigt, wie die Parametrierung des PI-Reglers erfolgt. Für die reine Nutzung des PI-Reglers der Ankerstromregelung ist nur der rot umrandete Bereich interessant. Es hat sich gezeigt, dass die parallel geschaltete Ankervorsteuerung nicht verändert werden sollte.

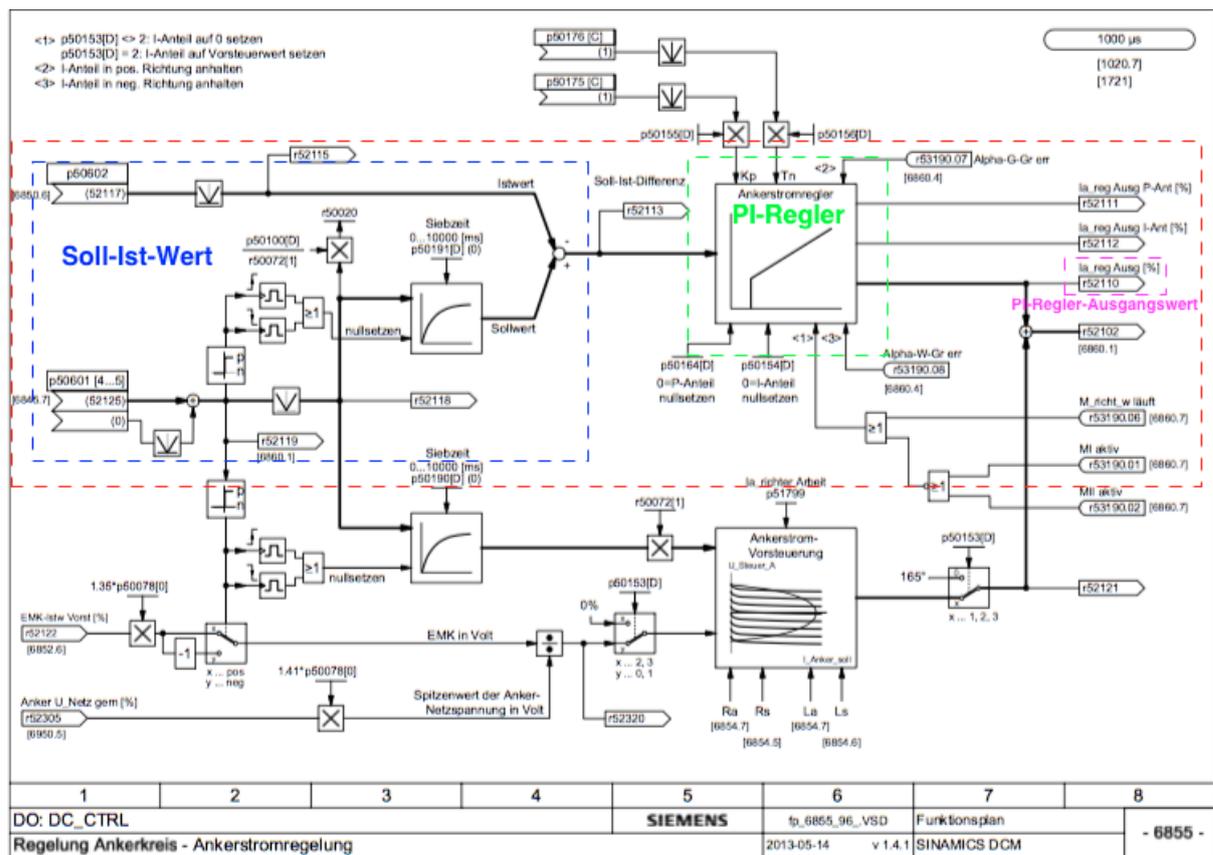


Abbildung 6.7: Funktionsblatt Ankerstromregelkreis [3, S.779]

In dem blau umrandeten Bereich wird der Ist- und Sollwert des Ankerstromes zusammengeführt. Bevor der Ist- und der Sollwert verglichen werden, durchläuft der Ist-Wert eine Betragsbildung. Er ist also stets positiv. Dies ist nötig, damit z.B. ein negativer Sollwert bei einem negativen Ankerstrom kein falscher bzw. unzulässiger Regelwert an den PI-Stromregler übergeben wird. In dem grün umrandeten Bereich ist der PI-Stromregler dargestellt. Die Stellgrößen können beliebig mit dem Starter geändert werden. Der pinke

Bereich zeigt den verwendeten Ausgang des PI-Reglers (r52110) an. Dieser Ausgangswert beschreibt rein den des PI-Reglers ohne Einflüsse der Ankervorsteuerung. Dieser wird mit dem Eingang des Ankersteuersatzes (p50600[0]) verschaltet. Den Strom des Ankers regelt jetzt ausschließlich der PI-Regler und die Ankervorsteuerung ist umgangen. Es ist zu beachten, dass die Vorsteuerung weiterhin parallel arbeitet aber ihr Ausgang nicht verschaltet ist. Somit ist sicher gestellt, dass die geforderte Momentenrichtung erhalten bleibt und sämtliche sonstige Prozesse, welche von der Ankervorsteuerung abhängen aber nicht den Ankerstrom  $I_A$  beeinflussen, erhalten bleiben. Zum Vergleich zum Funktionsblatt (Abb.:6.7) ist die Visualisierung der Ankerstromregelung durch den Starter in Abbildung 6.8 dargestellt.

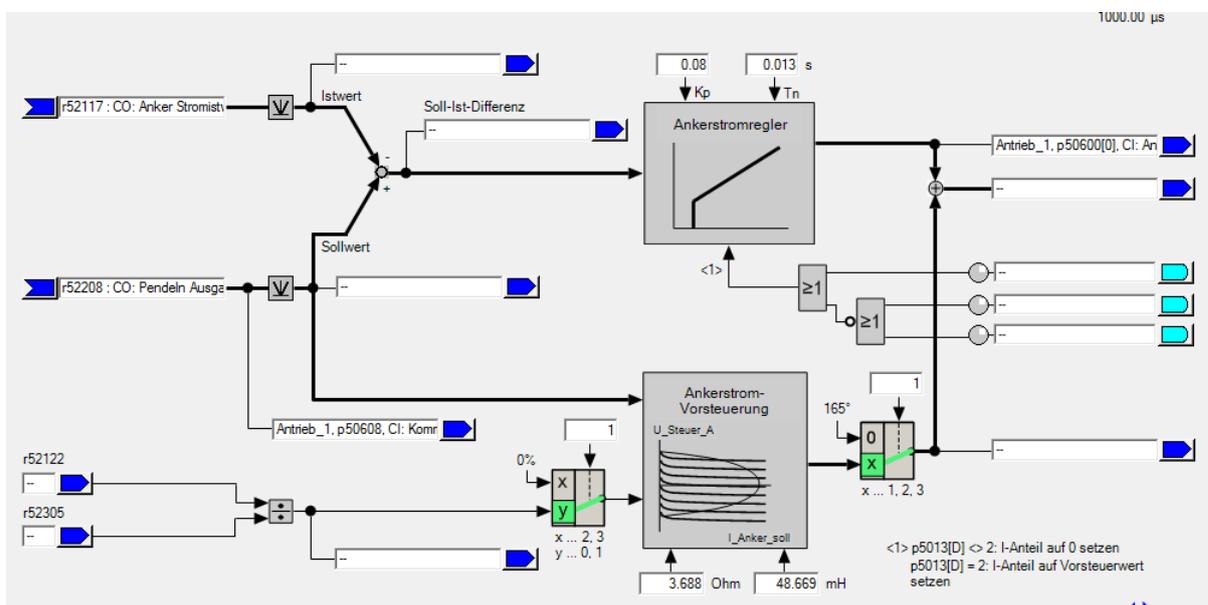


Abbildung 6.8: Starter Visualisierung des Funktionsblatt Ankerstromregelkreis [3]

Es hat sich als besonders trügerisch und als eine der größten Tücken der Parametrierung herausgestellt, dass eine neue Verschaltung der Ankerstromregelung nicht immer wirksam wird. Es kann dadurch dazu kommen, dass die Umparametrierung des Ankersteuersatzeinganges (p50600[0]) auf einen anderen Reglerausgang nicht in allen Fällen wirksam wird. Ein weiteres sporadisches Problem ist es, dass die Umrechnung vom Regelwert in Prozent auf einen Steuerwinkel des Stromrichters, welche im Hintergrund des Parameters p50600 stattfindet, nicht mehr arbeitet. Diese beiden schwerwiegenden Fehler können nur behoben werden, indem der DC-Master vom Netz genommen wird und daraufhin neu gestartet wird. Eine detaillierte Beschreibung der Parametrierung und Verschaltungen ist im Anhang im Laborversuch LEP3.2 zu entnehmen.

Eine mögliche Erklärung hierfür ist es, dass die Speicher, hauptsächlich der RAM (flüchtiger Speicher), des DC-Masters irgendwann überlaufen, da das Löschen unnötiger Daten nicht funktioniert hat. Sind alle Zwischenspeicher voll und es funktioniert kein vernünftiges Leeren dieser Speicher. Dann führt meist kein Weg daran vorbei, das System neu zu starten, damit es wieder einwandfrei funktioniert. Bei einem Neustart werden alle flüchtigen Speicher zurückgesetzt.

### Ankerstromsprungantwort mit optimierten PI-Ankerstromregler nach dem Betragsoptimum

Sofern sicher gestellt ist, dass die Parametrierung erfolgreich war, kann die Sprungantwort des Ankerstromregelkreises aufgenommen werden. Der PI-Regler des Ankerstromregelkreises wird mit den berechneten Parametern aus Kapitel 6.2 eingestellt. Der Verstärkungsfaktor  $P$  kann nur auf ein Hundertstel genau eingestellt werden und wird auf einen Wert von  $K_{pi} = 0,08$  gerundet. Der Sprung wird mit dem Rechteckgenerator erzeugt. Der Ankerstrom  $I_A$  wird dabei von 40% auf 50% erhöht. Der Sprung sollte oberhalb des Lückbereiches ausgeführt werden, da eine Regelung im Lückbereich nicht vorgesehen ist. Das Erregerfeld wird ausgeschaltet. Aufgezeichnet wird die Sprungantwort mit dem Geräte-Trace. Hierbei wird der Rechteckgeneratorausgang (r52208) und der Stromistwert (r52116) beobachtet.

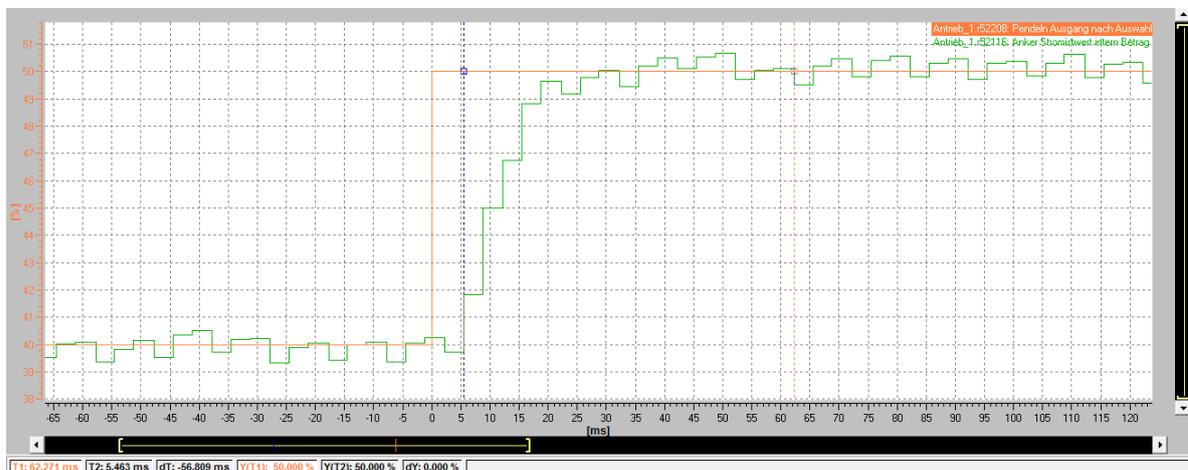


Abbildung 6.9: Ankerstromsprungantwort PI-Ankerstromregler optimiert nach BO

In der Aufnahme der Sprungantwort, Abbildung 6.9, lässt sich erkennen, dass der Strom  $I_A$  eine gewisse Grundschwingung aufweist. Außerdem vergeht eine Totzeit bis der Strom  $I_A$  anfängt zu steigen. Durch die Abtastung und der Rechenzeiten ist der Verlauf sehr stufenförmig abgebildet. Nichts desto trotz zeigt der Verlauf eine deutliche Ähnlichkeit mit der

erwarteten Sprungantwort des Betrags Optimums aus der Abbildung 5.3. Es ist ein leichter Überschwinger zu erkennen. Anschließend nimmt der Strom  $I_A$  um den Sollwert die gleiche Grundschiwingung, wie vor der Sollwertänderung, an. Mit der Messcursor Funktion wird aus der Sprungantwort die An- und Ausregelzeit sowie die Höhe des Überschingers bestimmt und in der Tabelle 6.7 zusammengefasst. Darüber hinaus werden diese den theoretisch zu erwartenden Werten gegenübergestellt.

Tabelle 6.7: Messergebnisse der Ankerstromsprungantwort mit optimierten PI-Ankerstromregler nach dem BO

	Theorie	Messung
$T_{AN}$	28,9 msec	ca.30 msec
$T_{AUS}$	56,28 msec	ca.58 msec
Überschwinger $\ddot{u}$	4%	ca.6%

Die ermittelten Werte der An- und Ausregelzeit stimmen sehr gut mit den theoretisch berechneten Werten überein. Der Überschwinger ist leicht größer als erwartet, dies kann zum einem an dem etwas größeren Verstärkungsanteil  $K_{pi}$  liegen und zum anderen an der Berechnung bzw. der Mittelwertbildung des erfassten Ankerstromes. Es ist also möglich, mit dem PI-Stromregler, den inneren Ankerstromregelkreis nach dem Betragsoptimum zu optimieren. Die Sprungantwort ähnelt der zu erwartenden sehr. Allerdings wäre gerade bei dieser Untersuchung eine deutlich bessere Abtastrate des Geräte-Traces wünschenswert gewesen. Es würde dadurch weniger Quantisierungsfehler geben. Ein Herausführen der Signale, um diese mit dem Oszilloskop aufzunehmen, bringt keine Besserung sondern eher eine Verschlechterung durch einen hohen Rausch-Anteil. Eine Messung des Ankerstromes mit dem Oszilloskop ist möglich, lässt sich aber dadurch nicht so einfach optisch vergleichen.

### 6.3.2 Technologieregler als PI-Stromregler

Der DC-Master verfügt über einen frei parametrierbaren Technologieregler. Dieser ist als PID-Regler aufgebaut. Somit kann er durch Abschalten des D-Anteils als PI-Regler verwendet werden. Der Regler ist dazu gedacht, einfache Regelungen wie eine Füllstands- oder Temperaturregelung durchzuführen. Es wird nun versucht den Technologieregler als Ersatzregler für die Ankerstromregelung zu nutzen. Damit wäre die vollständige Funktion der Standard Ankerstromregelung, wie in Abbildung 6.7 dargestellt, umgangen. Die Anregung zu dieser Umsetzung der Ankerstromregelung mittels PID-Regler stammt aus der Diplomarbeit von Herrn Klebe [8].

### Vorgehensweise und Probleme der Parametrierung

Zunächst ist der Technologieregler mit einer Abtastzeit von 4 msec vorkonfiguriert, welche nicht ausreichend sein wird um den Ankerstrom zu regeln. Es ist jedoch möglich, diese umzukonfigurieren und wird auf den geringsten einstellbaren Wert von 1 msec eingestellt. Zur Änderung muss der DC-Master in den Expertenmodus gesetzt werden. Dies geschieht über den Parameter p112 und anschließend wird die Abtastzeit des Technologiereglers über den Parameter p115[6] auf 1 msec eingestellt. Die Änderungen müssen Offline durchgeführt werden und erst danach werden diese in den DC-Master geladen. Die Änderung wird erst wirksam, wenn der DC-Master aus und wieder eingeschaltet wird. Der Ausgang des Technologiereglers wird mit dem Ankersteuersatzeingang (p50600) verschaltet. Die Soll- sowie Ist-Werteingänge werden äquivalent zur Ankerstromregelung verschaltet. Der Istwert wird mit dem Stromwert (p52115) und der Sollwert mit dem Ausgang des Rechteckgenerators (r52208) bzw. der Strombegrenzung, wenn dieser in dem Drehzahlregelkreis der Gleichstrommaschine verknüpft ist, verbunden. Der D-Anteil wird ausgeschaltet indem er eine 0 als Größe bekommt. Des Weiteren muss der Regler noch eine Freigabe bekommen. Hierfür wird, wie in der Inbetriebnahme die Reglerfreigabe über den Parameter r898[0] (AUS1) mit der Reglerfreigabe des Technologiereglers (p02200) verknüpft.

### Ankerstromsprungantwort mit optimierten Technologieregler nach dem Betragsoptimum

Der Technologieregler wird mit den bekannten Größen der Verstärkung  $K_{pi} = 0,08$  und der Nachstellzeit  $T_{ni} = 0,013sec$  eingestellt. Es wird erneut der Rechteckgenerator verwendet um einen Sprung auszuüben. Wird der Sprung auf den so eingestellten Regler geschaltet, geht das System direkt in Störung. Die darauffolgende Reaktion ist es den I-Anteil wegzuschalten, denn so lässt sich die Anlage einschalten. Der nächste Schritt besteht darin für die Nachstellzeit  $T_{ni}$  einen deutlich größeren Wert zu wählen. In der Abbildung 6.10 ist die Sprungantwort des Ankerstromregelkreises mit einer eingestellten Nachstellzeit von  $T_{ni} = 0,1sec$  zu sehen. Leider lassen sich die beiden Signale nicht besser skalieren, wie dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Ankerstrom  $I_A$  eine deutlich größere Grundschwingung aufweist als bei der Verwendung des PI-Reglers der Ankerstromregelung aus dem vorherigen Kapitel 6.3.1. Des Weiteren ist die Anregelzeit sehr lang und eine Ausregelzeit entweder sehr kurz oder nicht bestimmbar. Die Nachstellzeit von 0,1sec ist deutlich größer, wie die errechnete. Umso mehr die Nachstellzeit reduziert wird desto mehr schwingt der Strom. Die Grenzen an der dies kritisch wird, ist in der Abbildung 6.11 zu sehen. Schwingt der Strom zu stark, geht der Stromrichter in einen Fehlermodus und es kommt zur Störung.

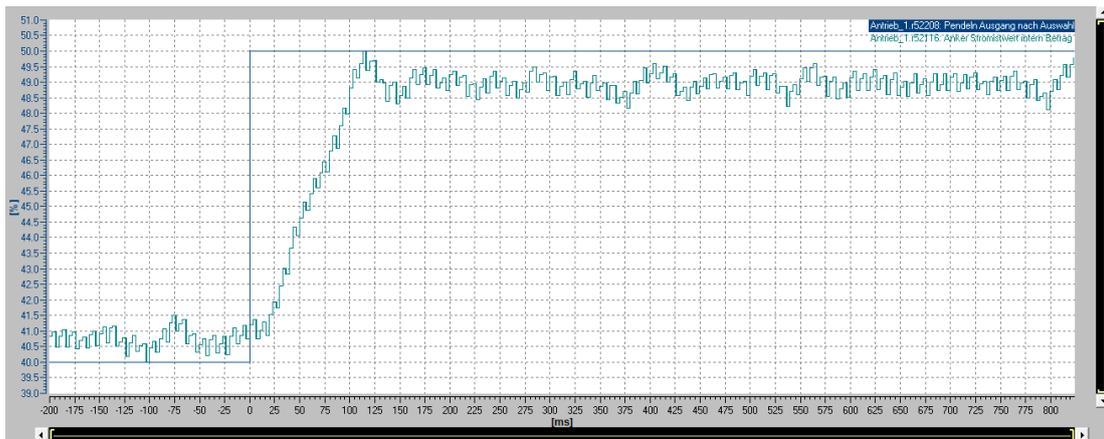


Abbildung 6.10: Sprungwort mit Technologieregler  $K_{pi} = 0,08$  und  $T_{ni} = 0,1sec$

Die geforderte Änderung des Stromes durch den PI-Regler ist für den Stromrichter zu schnell und zu radikal. Dieser kann den Forderungen des PI-Reglers dann nicht mehr folgen. Das Schwingen kann zum einen von einer zu geringen Abtastzeit und zum anderen von einer zu langen Rechenzeit des Technologiereglers kommen. Der Technologieregler erhöht den Strom um den Wert  $K_{pi}$  in der Zeit von  $T_{ni}$ , erkennt aber nicht schnell genug, dass der geforderte Wert schon lange erreicht ist und regelt sofort dagegen. Durch dieses Verhalten entsteht die Schwingung des Stromes. Außerdem erklärt es, warum der Strom weniger schwingt, wenn die Nachstellzeit deutlich größer gewählt wird.

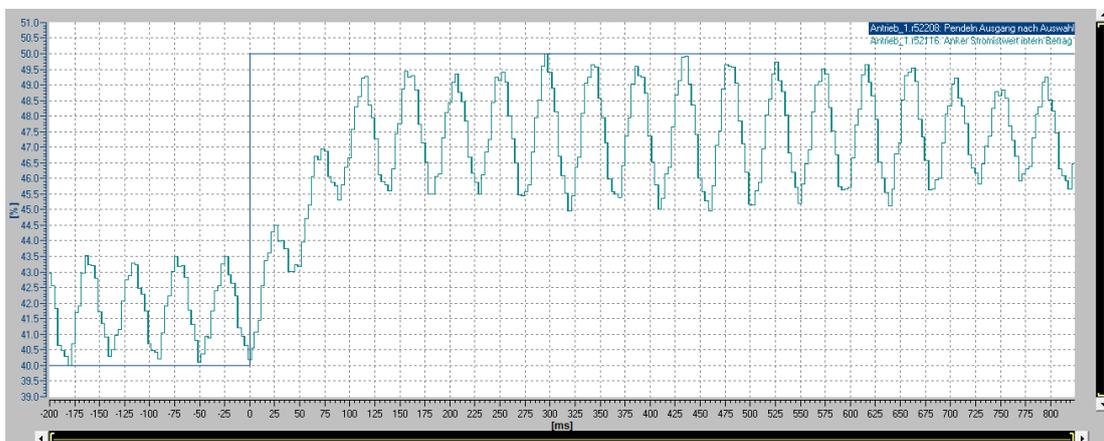


Abbildung 6.11: Sprungwort mit Technologieregler  $K_{pi} = 0,08$  und  $T_{ni} = 0,05sec$

Der Technologieregler eignet sich somit nicht zur Regelung des inneren Ankerstromregelkreises mit den optimierten Größen nach dem Betragsoptimum. Wäre es möglich, dass dieser langsamer reagieren könnte, könnte der Technologieregler als Alternative zur vorgesehenen Ankerstromregelung genutzt werden. Es müsste dann allerdings noch die Momentenrichtungssteuerung angepasst werden.

### Zusatz: Weitere Untersuchung des Technologiereglers

Der Technologieregler wird hinsichtlich seiner Laufzeit und der Abtastrate untersucht, um genauer herauszufinden, warum die Regelung nicht wie erwartet funktioniert. Die folgende Abbildung 6.12 zeigt einen Geräte-Trace, mit welchem die Verzögerungszeit zwischen Ausgangswert des Technologiereglers und Ist-Wertänderung des Stroms gezeigt wird. Aus dem Trace lässt sich eine Verzögerung der Istwert-Erkennung von ca. 10msec erkennen. Die ermittelte Tot- und Messungszeit  $T_{\sigma i}$  aus Kapitel 6.1.3 ist jedoch deutlich kürzer. Dies lässt darauf deuten, dass die Abtastung des Istwert-Einganges zu gering ist oder der aktuelle Wert des Ankerstromes nicht schnell genug auf den Parameter des Istwertes des Technologiereglers geschrieben wird. Wäre es möglich die Abtastzeit des Technologiereglers geringer einzustellen, könnte überprüft werden, ob es lediglich an der Abtastzeit liegt und das System unter abgetastet ist oder ob die Zeitscheiben des Programmablaufs zu langsam sind. Der Istwerteingang wird also nicht schnell genug beschrieben bzw. aktualisiert.

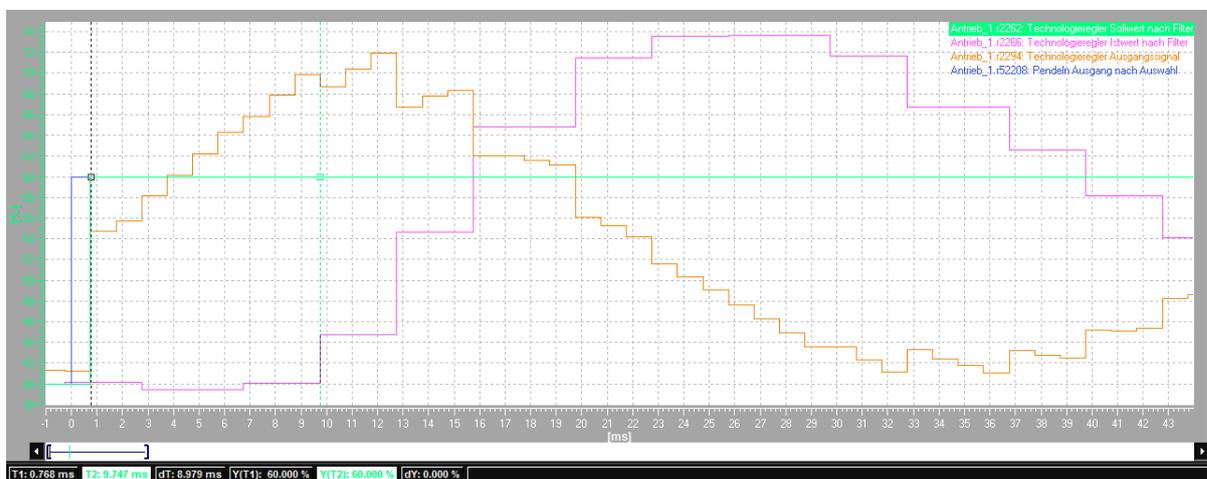


Abbildung 6.12: Messung der Totzeit zwischen Ausgangswert und Ist-Wert

In dem nachfolgenden Geräte-Trace (Abb.: 6.13) werden die Ist-Wert-Eingänge des Technologiereglers und des PI-Stromreglers der Ankerstromregelung verglichen. Ist- und Sollwertparameter sind bei beiden gleich verschaltet.

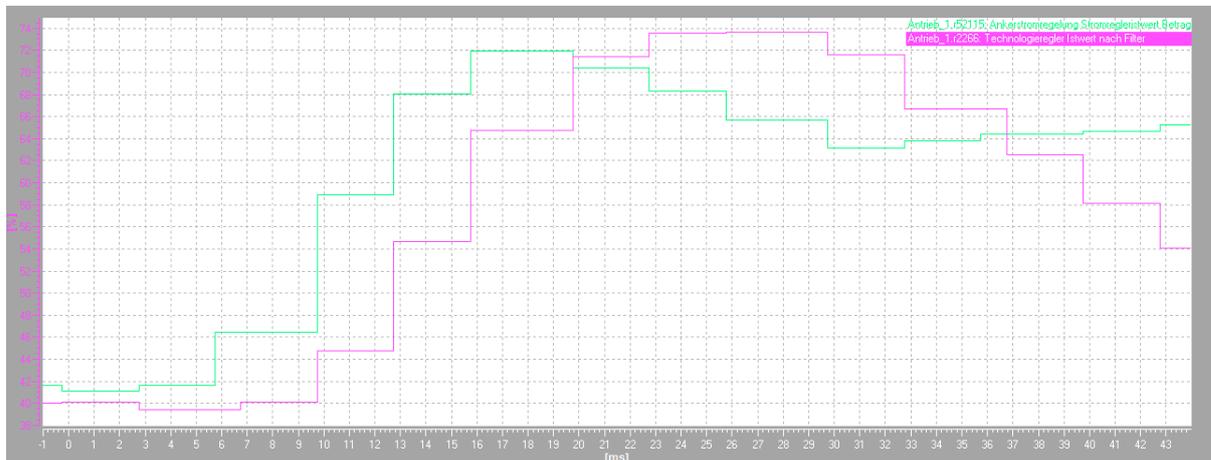


Abbildung 6.13: Istwert-Vergleich PI-Stromregler und Technologieregler

Anhand der Aufnahme lässt sich deutlich erkennen, dass der Ist-Wert des Technologiereglers (in pink) dem des PI-Stromreglers (in grün) hinterher hängt. Die Verzögerung liegt zwischen 3 msec und 4 msec. Somit ist der Technologieregler dem PI-Stromregler gegenüber benachteiligt. Bei gleichem Ist-Wert kommt hinzu, dass die Verläufe nicht nur zeitversetzt, sondern auch unterschiedlich sind. Dies bedeutet, die Abtastung kann nicht ausreichend sein. Eine weitere Erklärung ist auf den Programmablauf, welcher durch die Zeitscheiben gesteuert wird, zurückzuführen. Der Technologieregler scheint im Programmablauf eine niedrigere Priorität zu haben und ist somit unbrauchbar für eine schnelle Regelung des Ankerstromes.

# 7 Optimierung des Drehzahlregelkreises

In diesem Kapitel wird der Drehzahlregelkreis nach dem Symmetrischen Optimum optimiert. Es werden die Streckenparameter der Drehzahlregelstrecke bestimmt und daraufhin wird, mit den ermittelten Parametern, der PI-Drehzahlregler ausgelegt. Der optimierte Drehzahlregelkreis wird durch die Aufnahme der Sprungantworten validiert.

## 7.1 Bestimmung der Streckenparameter des Drehzahlregelkreises

In diesem Kapitel werden die noch fehlenden Streckenparameter des äußeren Drehzahlregelkreises der Kaskadenregelung ermittelt und bestimmt. Die unten eingefügte Abbildung 7.1 zeigt das regelungstechnische Ersatzschaltbild des Drehzahlreglers. Der Stromregelkreis wird dabei als vereinfachtes PT-1-Glied mit den Größen  $V_{ei}$  und  $t_{ei}$  angenommen. Das PT-1-Glied in der Rückführung mit den Größen  $V_{gn}$  und  $t_{gn}$  beschreibt die Drehzahlerfassung durch den Inkrementalgeber und die interne Verarbeitung des Drehzahlsignals hin zum Ist-Wert-Eingang des Drehzahlreglers. In den folgenden Abschnitten wird die Hochlaufzeitkonstante  $T_H$  mithilfe eines Hochlaufversuches und einem Belastungsversuch ermittelt. Des Weiteren wird die Summe der kleinen Zeitkonstanten des Drehzahlregelkreises  $T_{\sigma n}$  bestimmt und auf die Gesamtstreckenverstärkung eingegangen.

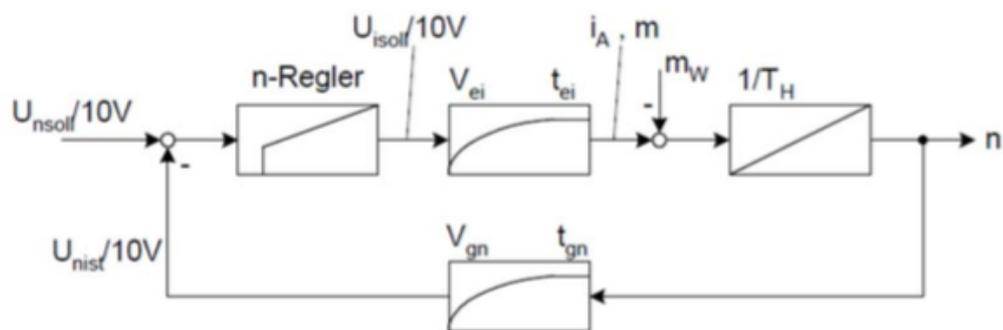


Abbildung 7.1: Regelungstechnisches Ersatzschaltbild des Drehzahlregelkreises [5, S.35]

### 7.1.1 Ermittlung der Hochlaufzeitkonstante $T_H$

Die Hochlaufzeitkonstante  $T_H$  wird über das Trägheitsmoment  $j$  und dem Drehmoment  $M$  sowie dem Verlustdrehmoment  $M_V$  berechnet. Zunächst wird das Drehmoment  $M$  durch einen Belastungsversuch bestimmt und anschließend ein Hochlaufversuch durchgeführt, um die Änderung der Drehzahl nach der Zeit zu bestimmen, also die Steigung. Mit diesen ermittelten Werten und der folgenden mechanischen Bewegungsgleichung 7.1 [5, S.16] lässt sich das Trägheitsmoment  $j$  bestimmen.

$$M - M_V = j \cdot \frac{d\Omega}{dt} \quad (7.1)$$

Umstellen nach  $j$ :

$$j = \frac{M - M_V}{\frac{d\Omega}{dt}} \quad (7.2)$$

Mit dem Trägheitsmoment  $j$ , dem Drehmoment  $M$  und der Drehzahl  $\Omega$  wird mit der folgenden Formel 7.3 die Hochlaufzeitkonstante  $T_H$  berechnet.

$$T_H = \frac{j \cdot \Omega}{M} \quad (7.3)$$

#### Ermittlung des Drehmoments $M$

Um das maximal abzugebende Drehmoment zu ermitteln, muss die Gleichstrommaschine bis zum Stillstand belastet werden. Wenn die Maschine im Stillstand ist, gibt sie das maximale Drehmoment  $M$  ab. Dies ist mit der am Laborstand verwendeten Belastungsmaschine nicht möglich. Die Asynchronmaschine, welche die Belastung auf den Gleichstrommotor ausübt, kann nicht genügend Drehmoment erzeugen und dadurch muss die Gleichstrommaschine mit geringerem Nennstrom betrieben werden. Aus dem Laborversuch LEP3.2 ist bekannt, dass eine Reduzierung des Nennankerstromes  $I_{AN}$  auf 80% nötig ist. Damit ergibt sich für die weiteren Berechnungen ein maximaler Ankerstrom  $I_{Amax}$  mit dem folgenden Verhältnis:

$$I_{Amax} = 0,8 \cdot I_{AN} = 0,8 \cdot 14,3A = \underline{\underline{11,44A}}$$

Die Stromgrenzen der Gleichstrommaschine werden über das Bedienpult am Drehpotenziometer des Analogeinganges 2 AI2 eingestellt. Anschließend wird die Gleichstrommaschine eingeschaltet. Mit der Asynchronmaschine erfolgt die Belastung der Gleichstrommaschine. Diese wirkt nun in entgegengesetzter Richtung. Die Belastung durch die Asynchronmaschine wird erhöht bis der Maschinenstrang zum Stillstand kommt. Das nun anliegende Drehmoment  $M$  ist das maximal abzugebende Drehmoment bei einem Ankerstromfluss von  $I_{AMax} = 11,44A$ . Das so ermittelte Drehmoment ist:

$$M_{I_{Amax}} = \underline{\underline{20,5Nm}}$$

### Ermittlung Verlustdrehmoments $M_V$

Das Verlustmoment  $M_V$  bezieht sich auf das Gesamtverlustmoment des Antriebsstrangs, also auf die Gleichstrom- und Asynchronmaschine. Der Maschinenstrang kann nicht aufgetrennt werden (Siehe Kapitel 2.1). Das Verlustmoment wird ermittelt in dem zunächst die Gleichstrommaschine im Leerlauf von der Asynchronmaschine angetrieben wird. Die Asynchronmaschine durchfährt die Drehzahlen von  $2000 \text{ min}^{-1}$  bis  $200 \text{ min}^{-1}$  und in logischen Abständen wird das Drehmoment am Drehmomentmessgerät abgelesen und dokumentiert. Sind die Messwerte aufgenommen, wird die Gleichstrommaschine als Antrieb genutzt und die Asynchronmaschine ist im Leerlauf. Es wird derselbe Drehzahlbereich durchfahren und das Drehmoment an den dementsprechenden Stellen dokumentiert. Die Messergebnisse sind in der folgenden Tabelle dokumentiert.

Tabelle 7.1: Messergebnisse der Bestimmung des Verlustdrehmoments  $M_V$

Drehzahl $n$ in $\text{min}^{-1}$	$M_{V-GM}$ in Nm	$M_{V-ASM}$ in Nm
2000	0,36	0,24
1800	0,28	0,22
1600	0,2	0,16
1400	0,26	0,16
1200	0,28	0,22
1000	0,2	0,2
800	0,26	0,16
600	0,24	0,18
400	0,22	0,18
200	0,08	0,12
<b>Durchschnitt</b>	<u>0,238</u>	<u>0,184</u>

Mit den Messergebnissen aus der Tabelle 7.1 ergibt sich die folgende Rechnung zur Bestimmung des Verlustmoments:

$$\begin{aligned}
 M_V &= M_{V-GM} + M_{V-ASM} & (7.4) \\
 &= 0,238Nm + 0,184Nm \\
 &= \underline{\underline{0,422Nm}}
 \end{aligned}$$

### Durchführung des Hochlaufversuches

Um einen Hochlaufversuch durchzuführen, wird der Drehzahlregler als reiner P-Regler ausgelegt. Auf den Integralen-Anteil des PI-Drehzahlreglers ist zu verzichten, damit die Drehzahl linear ansteigt. Aus dem linearen Bereich wird dann die Steigung bestimmt, welche zur Berechnung des Trägheitsmomentes benötigt wird.

Durch die Funktionspläne [3] des DC-Masters wird ersichtlich, dass es zwei Möglichkeiten gibt den Drehzahlregler als reinen P-Regler auszulegen. Die erste Möglichkeit ist es den Integralanteil über den Parameter p50224 wegzuschalten. Dies ist aber in Betrachtung auf die Durchführbarkeit im Laborpraktikum keine schöne visuelle Lösung. Der Parameter setzt die Nachstellzeit quasi auf unendlich, was zur Folge hat, dass der I-Anteil keinen Einfluss mehr hat. Die zweite Möglichkeit besteht darin, den aus dem Drehzahlregler rausgeführten P-Anteil zu nutzen. Der I-Anteil wird dabei komplett umgangen und so lediglich der reine P-Anteil genutzt. Die Vorgehensweise ist veranschaulicht in der Abbildung 7.2 dargestellt.

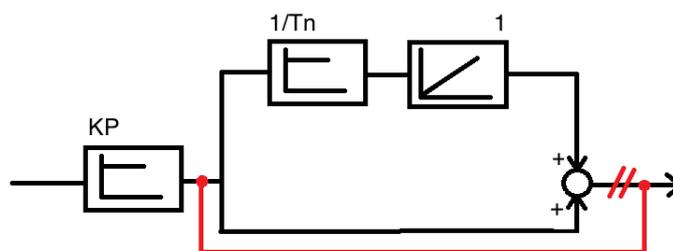


Abbildung 7.2: PI-Regler mit umgangenem I-Anteil

Der herausgeführte P-Anteil (r52161) ist frei verschaltbar und direkt auf dem Funktionsblatt des Drehzahlreglers über den Starter konfigurierbar. Die am Ausgang des PI-Drehzahlreglers verschalteten Parameter werden gelöst und neu mit dem reinen P-Anteil verknüpft. Die Aufnahme des Hochlaufversuches wird mit dem Geräte-Trace durchgeführt.

Es wird der Drehzahlwert (r63), der Ankerstromwert (r52107) und der Stromregelsollwert (r52218) sowie der Drehzahlsollwert (r52118) aufgezeichnet. Der Drehzahlsprung erfolgt von  $0 \text{ min}^{-1}$  auf  $1000 \text{ min}^{-1}$  und kann über das interne Steuerpult oder das Bedienpult eingestellt und freigegeben werden. Die Anlage wird bei diesem Versuch ohne Last betrieben. Eine genauere Versuchsdurchführung ist in dem erstellten Laborversuch LEP 3.2 im Anhang zu finden. Bei dieser Durchführung ist Vorsicht geboten, da die interne Strombegrenzung, welche über das Bedienpult eingestellt wird, bei einem Drehzahlsprung nicht greift. Interne Logiken des DC-Masters ignorieren die so eingestellte Strombegrenzung. Es wird versucht den Antrieb so schnell wie möglich bei Ankernennstrom  $I_{AN}$  auf Solldrehzahl zu beschleunigen. Wird die Maschine belastet, funktioniert die Strombegrenzung tadellos. Um dieses Problem zu umgehen, wird der Parameter des reduzierten Bemessungsankerstromes (p50701[0]) auf 38,2% eingestellt. Dies entspricht einer Änderung des Ankernennstromes auf  $I_{AN} = 11,44 \text{ A}$ . Der Stromregelsollwert wird mit beobachtet, um sicher zu gehen, dass kein größerer Strom vom System gefordert wird, als der reduzierte Ankernennstrom.

### Messergebnis des Hochlaufversuches

Aus dem linearen Verlauf der Drehzahl wird nun die Steigung ermittelt. Mit der Messcursor-Funktion des Geräte-Trace werden zwei Punkte bestimmt, mit welchen die Steigung bestimmt wird. Dies ist in der Abbildung 7.3 dargestellt. Auch in dieser Aufnahme lässt sich klar die Verzögerungszeit durch die Zeitscheiben der internen Ablaufsteuerung erkennen. Des Weiteren lässt sich deutlich die Ablaufreihenfolge beobachten.

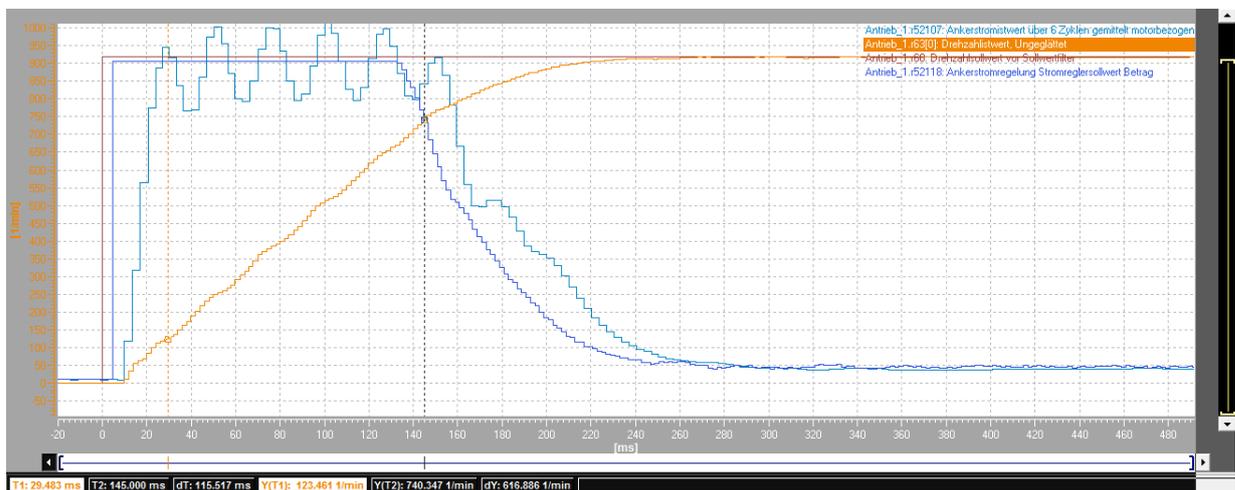


Abbildung 7.3: Hochlaufversuch eines Drehzahlsprunges von  $0 \text{ min}^{-1}$  auf  $1000 \text{ min}^{-1}$

Zuerst wird der Sollwertsprung mit dem Rechteckgenerator ausgeführt. Daraufhin durchlaufen die Zeitscheiben mehrere Funktionsblätter bis der erzeugte Sollwert an den Stromregler übergeben wird. Es folgt die Totzeit des Stromregelkreises. Sobald der Ankerstrom  $I_A$  fließt, ändert sich die Drehzahl fast unmittelbar. Der Strom steigt steil auf den maximalen Wert an. Durch die Regelung des Stromreglers schwingt der Ankerstrom  $I_A$  um den Sollwert. Sobald der lineare Bereich des Hochlaufens beendet ist, flacht der Verlauf ab. Die Drehzahl nähert sich nun langsamer der Soll-Drehzahl. Es ist außerdem zu beobachten, dass es zu keinem Überschwingen kommt. Der Strom schwächt ab sobald die Steigung der Drehzahl nachlässt und fällt langsam zurück auf einen minimalen Wert, welcher ausreichend ist, um den unbelasteten Motor auf der Soll-Drehzahl zu halten.

Die Änderung der Drehzahl nach der Zeit berechnet sich nun wie folgt.

$$\begin{aligned} \frac{d\Omega}{dt} &= \frac{\Delta\Omega}{\Delta t} & (7.5) \\ &= \frac{2 \cdot \pi \cdot 616,9 \cdot \frac{1}{60 \cdot \text{sec}}}{115,5 \text{ msec}} \\ &= \underline{\underline{559,3 \frac{1}{\text{sec}^2}}} \end{aligned}$$

### Berechnung von $T_H$

Um die Hochlaufzeitkonstante zu berechnen, wird zunächst das Trägheitsmoment  $j$  mit der Formel 7.2 mit den ermittelten Drehmomenten  $M_{I_{Amax}}$  und  $M_V$  sowie der Steigung  $\frac{d\Omega}{dt}$  berechnet.

$$j = \frac{20,5 \text{ Nm} - 0,422 \text{ Nm}}{559,3 \frac{1}{\text{sec}^2}} = \underline{\underline{0,0359 \text{ Nm} \cdot \text{sec}^2}}$$

Mit dem berechneten Trägheitsmoment  $j$  wird nun  $T_H$  wie folgt mit der Formel 7.3 berechnet.

$$T_H = \frac{0,0359 \text{ Nm} \cdot \text{sec}^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{1000}{60 \cdot \text{sec}}}{20,5 \text{ Nm}} = \underline{\underline{0,183 \text{ sec}}}$$

Die hier errechnete Hochlaufzeitkonstante  $T_H$  bezieht sich auf den reduzierten Ankerstrom  $I_{Amax}$  und muss für die folgenden Rechnungen mit der folgenden Verhältnisrechnung auf den tatsächlich wirkenden Ankernennstrom  $I_{AN}$  umgerechnet werden. Um keine Verwirrungen

mit den Abkürzungen zu erzeugen, bekommt die umgerechnete Hochlaufzeitkonstante die Bezeichnung  $T_{IA}$  (Zeitkonstante für die Integrierzeit des Ankerstromes  $I_A$ ).

$$\begin{aligned} T_{IA} &= \frac{I_{AMax}}{I_{AN}} \cdot T_H & (7.6) \\ &= \frac{14,3A}{11,44A} \cdot 0,183sec \\ &= \underline{0,229sec} \end{aligned}$$

### Zusätzliche Kontrolle von $T_H$

Zur Kontrolle wird die Hochlaufzeitkonstante mittels Geradengleichung bestimmt. Die Gleichung wird wie folgt mit der bereits ermittelten Steigung (siehe Abb.:7.3 ) aufgestellt. Zu beachten ist, dass die Gleichung einen Zeitwert(X-Achse) zu einer beliebigen Drehzahl  $n$  (y-Achse) bestimmt. Mit der Gleichung wird der lineare Anteil des Hochlaufversuches extrapoliert und es kann so die Hochlaufzeitkonstante bestimmt werden.

$$t(n) = \frac{1}{m} \cdot n \quad \left| \text{mit } m = \frac{\Delta\Omega}{\Delta t} \right. \quad (7.7)$$

Es ergibt sich mit den ermittelten Werten die folgende Berechnung:

$$\begin{aligned} T_{HKontrolle} = t(1000min^{-1}) &= \frac{115,5msec}{616,9min^{-1}} \cdot 1000min^{-1} \\ &= \underline{0,187msec} \end{aligned}$$

Es zeigt sich, dass diese Art der Berechnung nur eine geringe Abweichung zu dem vorherigen Ergebnis mit sich bringt. Die Differenz der Ergebnisse kommt sehr wahrscheinlich durch Messungenauigkeiten bei der Ermittlung des Verlustdrehmomentes  $M_V$  und des maximal abzugebenden Drehmoments  $M_{iamax}$ . Die Berechnung soll lediglich zur Kontrolle dienen und Aufschluss über die Glaubwürdigkeit der messtechnisch ermittelten Größen geben.

### 7.1.2 Summe der Zeitkonstanten $T_{\sigma n}$

Die Summe der Zeitkonstanten des Drehzahlregelkreises bildet sich aus den Zeitkonstanten der Streckenglieder.

$$T_{\sigma n} = t_{ei} + t_{gn} \quad (7.8)$$

Wobei sich die Ersatzzeitkonstante des Stromregelgliedes  $t_{ei}$  aus der Summe der kleinen Zeitkonstanten  $T_{\sigma i} = 6,17 \text{ msec}$  (siehe Kapitel: 6.1.3) des unter-lagerten Stromregelkreises ergibt.

$$\begin{aligned} t_{ei} &= 2 \cdot T_{\sigma i} & (7.9) \\ &= 2 \cdot 6,17 \text{ msec} \\ &= \underline{\underline{12,34 \text{ msec}}} \end{aligned}$$

Damit der Stromregelkreis ausreichend Zeit zur Verfügung hat, um eine Änderung des Stromes zu bewirken, auch wenn unter Umständen Störungen oder andere Verzögerungen auftreten, wird die Ersatzzeitkonstante  $t_{ei}$  des Drehzahlregelkreises doppelt so groß, wie die des Stromregelkreises gewählt.

Die Ersatzzeitkonstante der Drehzahlerfassung  $t_{gn}$  wird durch eine "worst-case" Betrachtung hergeleitet. Aus dem Listenhandbuch [3] lässt sich entnehmen, welche "Stationen" der Drehzahlwert (r61) durchläuft bis dieser am Ist-Wert-Eingang bzw. Soll-Ist-Differenz-Eingang des Drehzahlreglers erfasst wird. Der Drehzahlwert wird am Eingang des Gebers-1 (interne Bezeichnung für den Anschlussklemmpunkt) am DC-Master ausgewertet. Von diesem Zeitpunkt an wird dieser mehrere Male auf verschiedenen Funktionsblättern verarbeitet, bevor dieser am Drehzahlregler erkannt wird. In der folgenden Tabelle sind die einzelnen "Stationen" aufgeführt.

Tabelle 7.2: Bestimmung des Worst-Case Szenarios der Zeitkonstante  $t_{gn}$

Beschreibung der Station	Funktionsblatt [3]	Abtastzeit
Erfassung und Berechnung	4710	1msec
Wahl der Drehzahlregler Istwerterfassung	6810	2msec
Bildung Drehzahl Soll-Ist-Differenz	6812	2msec
Drehzahlregler Soll-Ist-Differenz Eingang	6815	2msec

Die ermittelten Abtastzeiten aus Tabelle 7.2 werden aufsummiert. Diese Summe der Abtastzeiten beschreibt den Worst-Case. Also die maximale Zeit, die vergehen kann bis der erfasste Drehzahlwert an den Drehzahlregler übergeben wird.

$$t_{gn} \leq \underline{7msec}$$

Mit den so ermittelten und bestimmten Ersatzzeitkonstanten ergibt sich mit der Formel 7.8 die folgende Summe der Zeitkonstanten.

$$\begin{aligned} T_{\sigma n} &\leq 12,34msec + 7msec \\ &\leq \underline{19,34msec} \end{aligned}$$

Eine messtechnische Ermittlung mit dem Geräte-Trace ist leider nicht möglich gewesen, da die interessanten und aussagekräftigen Parameter keine Beobachtungsparameter sind und diese nicht mit dem Geräte-Trace aufgezeichnet werden können. Mit dem Geräte-Trace konnte jedoch die Zeit von der Erfassung und der Berechnung (siehe Tab.:7.2) bis zur Bildung der Drehzahl Soll-Ist-Differenz ermittelt werden. Der Wert ist nicht stabil und weicht von Messung zu Messung ab. Es ergab sich jedoch ein mittlerer Wert von ca. 4,5 msec. Dies lässt darauf schließen, dass der über die Abtastzeiten bestimmte Wert für  $t_{gn}$  durchaus der Realität entspricht.

### 7.1.3 Streckenverstärkung $V_{SN}$

Die Gesamtstreckenverstärkung  $V_{SN}$  des Drehzahlregelkreises setzt sich wie folgt zusammen:

$$V_{SN} = V_{ei} \cdot V_{gn} \quad (7.10)$$

Eine Ermittlung der Streckenverstärkung  $V_{SN}$  ist aufgrund des Integralen-Verhaltens der Regelstrecke nicht möglich. Jedoch ist dies auch nicht notwendig, da diese bei der Ermittlung der Hochlaufzeit mitbestimmt wurde. Die Hochlaufzeitkonstante ist auch wie folgt definiert.

$$T_H = \frac{T_0}{V_{SN}} \quad (7.11)$$

Wobei  $T_0$  die Integrierzeit darstellt. Die Bestimmung der Streckenverstärkung  $V_{SN}$  ist somit zur Berechnung der Regelparameter des PI-Drehzahlreglers nicht notwendig.

### 7.1.4 Zusammenfassung der ermittelten und berechneten Streckenparameter

In der folgenden Tabelle sind die relevanten, ermittelten und berechneten Streckenparameter des Drehzahlregelkreises für die Berechnung der Reglereinstellungen übersichtlich zusammengefasst.

Tabelle 7.3: Zusammenfassung der Streckenparameter des Stromregelkreises

Beschreibung	Abkürzung	Wert
Hochlaufzeitkonstante	$T_{IA}$	0,229sec
Ersatzzeitkonstante Stromregelkreis	$t_{ei}$	12,34msec
Drehzahlerfassungersatzzeitkonstanten	$t_{gn}$	7msec
Summe der Zeitkonstanten	$T_{\sigma n}$	19,34msec

## 7.2 Auslegung des Drehzahlreglers nach dem Symmetrischen Optimum

Aus den ermittelten und berechneten Streckenparameter des Drehzahlregelkreises werden die Größen für den PI-Drehzahlregler berechnet. Die Berechnung wird nach dem Optimierungsverfahren des Symmetrischen Optimums aus Kapitel 5.3 durchgeführt. Die erforderlichen Parameter sind in dem vorangegangenen Kapitel 7.1 bestimmt worden und können in der Tabelle 7.3 nachgelesen werden.

Durch die Umstellung der Formel 7.11 nach  $T_0$  und Einsetzen in die Formel 5.3 ergibt sich die folgende neue Gleichung für die Verstärkung des PI-Drehzahlreglers  $K_{pn}$ :

$$K_{pn} = \frac{T_0}{2 \cdot V_{SN} \cdot T_{\sigma n}} \quad | \text{ mit } T_0 = T_H \cdot V_{SN}$$

$$K_{pn} = \frac{T_H}{2 \cdot T_{\sigma n}} \quad (7.12)$$

Mit der Formel 7.12 ergibt sich nun mit den ermittelten Parametern die folgende Berechnung für  $K_{pn}$ :

$$K_{pn} = \frac{0,229sec}{2 \cdot 0,01934sec}$$

$$= \underline{\underline{5,92}}$$

Die Nachstellzeit  $T_{nn}$  des PI-Drehzahlregler wird mit der Formel 5.4 und den ermittelten Parametern wie folgt berechnet:

$$T_{nn} = 4 \cdot T_{\sigma n} = 4 \cdot 19,34msec = \underline{\underline{0,077sec}}$$

Die Zeitkonstante der Sollwertglättung  $T_{gl}$  ergibt sich mit der Formel 5.5 damit wie folgt:

$$T_{gl} = T_{nn} = \underline{\underline{0,077sec}}$$

## 7.3 Validierung des Drehzahlregelkreises

In diesem Kapitel wird überprüft, ob die Optimierung nach dem Symmetrischen Optimum erfolgreich ist. Es wird der PI-Drehzahlregler des Drehzahlregelkreises mit den berechneten Parametern nach dem Symmetrischen Optimum aus Kapitel 7.2 eingestellt. Dem PI-Drehzahlregler ist keine parallele Vorsteuerung oder andere Glieder, welche Störungen oder zu einer nicht erwarteten Reaktion führen könnten, zu geschaltet. Somit ist die Einstellung des Drehzahlreglers relativ unkompliziert möglich. Der innere Ankerstromregelkreis ist dabei, wie in Kapitel 6.3.1 beschrieben, mit dem PI-Stromregler der Ankerstromregelung umgesetzt. Zunächst wird die Sprungantwort des Drehzahlregelkreises ohne Sollwertglättung und anschließend mit Sollwertglättung aufgezeichnet. Die Sprungantworten werden mit den theoretisch zu erwartenden verglichen. Es werden die Einstellungen und Schwierigkeiten, die dabei auftreten, gezeigt.

### 7.3.1 Drehzahlregelkreis Sprungantwort optimiert nach dem Symmetrischen Optimum

Der PI-Drehzahlregler wird mit den in Kapitel 7.2 berechneten Größen eingestellt. Der Drehzahlsprung wird mit dem Rechteckgenerator erzeugt. Der Sollwert der Drehzahl wird von 18% auf 20% der Nenndrehzahl durch den Sprung erhöht. Größere Sprünge sind aufgrund des großen Überschwingers nicht praktikabel und durchführbar, ohne eine Störung des DC-Masters auszulösen. Eine detaillierte Durchführungsbeschreibung findet sich in dem Laborversuch LEP3.2. Es sollte darauf geachtet werden, dass die so optimierte Regelung nicht den Fall des lückenden Stromes abdeckt. Lückt der Ankerstrom nur minimal, führt dies dazu, dass die Regelung nur teilweise funktioniert. In der Abbildung 7.4 ist eine Sprungantwort zu erkennen, welche bei einer Last von  $M_L = 7,5 Nm$  durchgeführt wurde. Der Ankerstrom lückt sehr gering, jedoch ist das Lücken ausreichend, damit die Regelung nicht mehr richtig arbeitet. Dies hat zur Folge, dass die Drehzahl mehrere Male überschwingt, bevor diese gegen den Sollwert strebt.

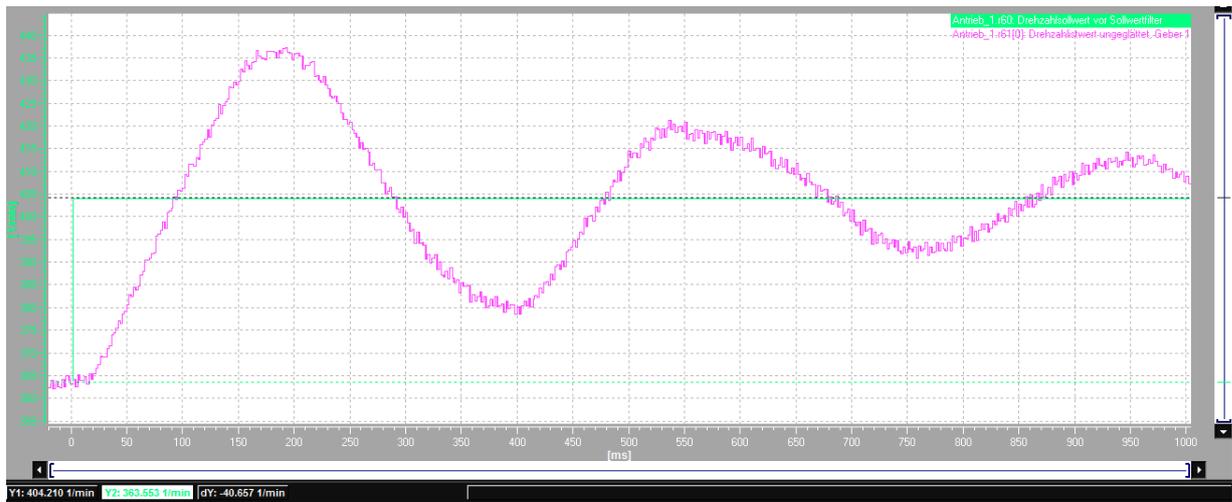


Abbildung 7.4: Drehzahl sprungantwort mit lückendem Strom

Die so ermittelte Sprungantwort entspricht nicht den Erwartungen. Es muss zur Durchführung also beachtet werden, dass die Lückgrenze des Ankerstromes bei ca.  $M_L = 10 Nm$  liegt. Das Lastdrehmoment sollte oberhalb der Lückgrenze liegen, um eine aussagekräftige Sprungantwort zu erzielen. Die folgende Abbildung 7.5 zeigt die Drehzahl sprungantwort mit einem eingestellten Lastdrehmoment von  $M_L = 15 Nm$ .

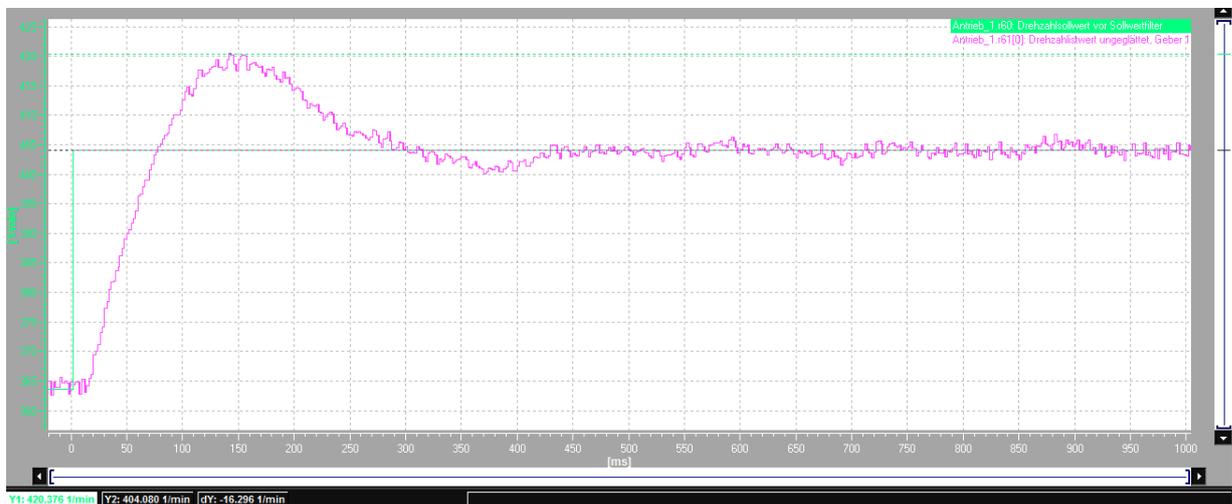


Abbildung 7.5: Drehzahl sprungantwort ohne lückendem Strom

Die Drehzahl sprungantwort zeigt den erwarteten Verlauf einer Sprungantwort eines nach dem Symmetrischen Optimum optimierten Regelkreises (siehe Abb.: 5.4). Die Drehzahl durchläuft einen relativ großen Überschwinger und schwingt anschließend kurz unter den

Sollwert. Daraufhin wird die Drehzahl auf den Sollwert stabilisiert. Die Aufnahme der Drehzahl ist leicht zackig, was an der Abtastung des Signals liegt. Es kann auch als Messrauschen bezeichnet werden. Objektiv lässt sich kein Schwanken der Drehzahl oder ein unruhiges Laufen des Gleichstrommotors wahrnehmen. Auch wenn das extern angeschlossene Drehzahlmessgerät beobachtet wird, fällt kein Schwanken der Drehzahl auf. Die An- und Ausregelzeit sowie der Überschwinger werden mit den Messcursors des Geräte-Traces bestimmt. In der folgenden Tabelle 7.4 sind die Messergebnisse sowie die theoretisch zu erwartenden Werte bei einem  $T_{\sigma n} = 19,34 \text{ msec}$  (siehe Kapitel: 7.1.4) abgebildet. Die theoretischen Werte werden nach den Formeln aus Kapitel 5.3 Tabelle 5.2 für einen nach dem Symmetrischen Optimum optimierten Regelkreis berechnet.

Tabelle 7.4: Vergleich der theoretischen und gemessenen Eigenschaften der Drehzahl-sprungantwort optimiert nach dem Symmetrischen Optimum

	<b>Theoretisch</b>	<b>Messung</b>
$T_{AN}$	59,95 msec	ca. 57,7 msec
$T_{AUS}$	319,11 msec	ca. 407,7 msec
Überschwinger $\ddot{u}$	43%	ca. 40%

Wird der theoretisch zu erwartende Wert mit dem gemessenen Wert verglichen, fällt auf, dass die Anregelzeit und der Überschwinger sehr gut überein passen und es kaum zu einer Differenz kommt. Die gemessene Ausregelzeit hingegen ist um ca. 89 msec länger als die erwartete. Dies sollte aber ein durchaus akzeptables Ergebnis darstellen. Die Abweichung kann durch die neben-läufigen Logiken und Berechnungen des DC-Masters kommen. Des Weiteren ist zu beachten, dass die Berechnungen für analoge Regler gelten und die eingesetzten Regler digitale quasi-stetige Regler sind.

### 7.3.2 Drehzahlregelkreis Sprungantwort optimiert nach Symmetrischen Optimum mit Sollwertglättung

Der nach dem Symmetrischen Optimum optimierten Drehzahlregelkreis wird um ein PT-1 Glied im Sollwertkanal erweitert. Dies sorgt dafür, dass der Überschwinger deutlich geringer wird. Bei den Einstellungen und Vorbereitungen zur Aufnahme der Sprungantwort wird nichts geändert. Es wird derselbe Sollwertsprung, wie ohne Sollwertglättung, durchgeführt. Die Sollwertglättung wird am sogenannten Sollwertfilter (p50228[0]) eingestellt, dieser ist ein PT-1 Glied in der Sollwertzuführung des PI-Drehzahlreglers und ist visuell dargestellt im Starter. Die Sollwertglättung wird mit dem berechneten Wert, in Kapitel 7.2, von  $t_{gl} = 0,077\text{sec}$  eingestellt. Die aufgenommene Sprungantwort ist in Abbildung 7.6 dargestellt. Im Vergleich zu der aufgenommenen Sprungantwort ohne Sollwertglättung (Abb.:7.5) ist der Überschwinger deutlich geringer, dafür ist die Anregelzeit ersichtlich länger.

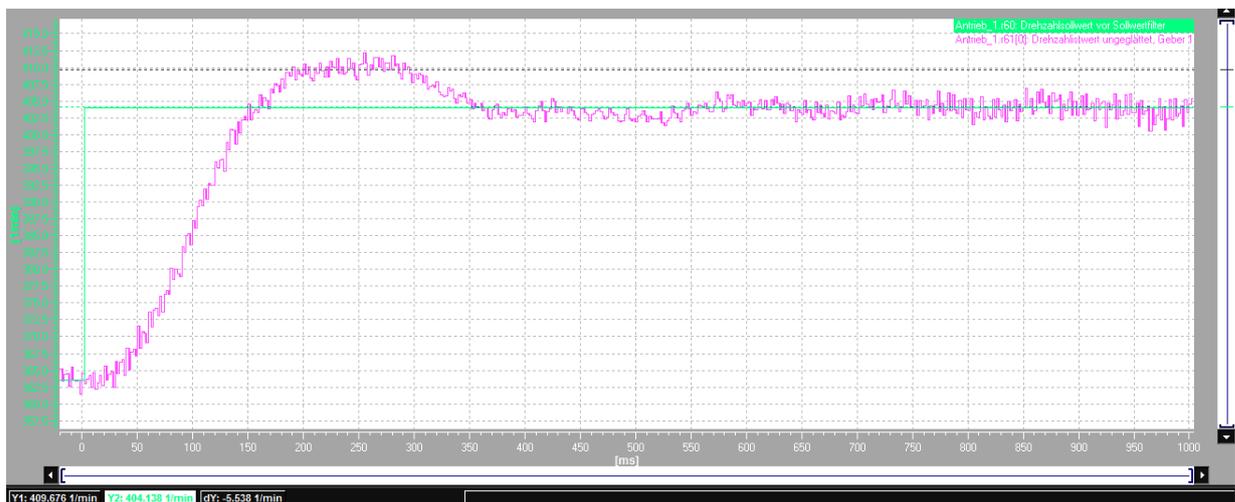


Abbildung 7.6: Drehzahl Sprungantwort Symmetrisches Optimum mit Sollwertglättung

Die An- und Ausregelzeit sowie der Überschwinger werden mittels der Messcursorfunktion des Geräte-Traces bestimmt. Die Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle 7.5 den theoretischen Werten gegenübergestellt.

Tabelle 7.5: Vergleich der theoretischen und gemessenen Eigenschaften der Drehzahlsprungantwort optimiert nach dem SO

	Theoretisch	Messung
$T_{AN}$	147 msec	ca. 127 msec
$T_{AUS}$	257,2 msec	ca. 327 msec
Überschwinger $\ddot{u}$	8,1%	ca. 8%

Aus der Gegenüberstellung der theoretischen und der praktisch ermittelten Ergebnisse zeigt sich, dass der Drehzahlregelkreis beim Anregen um ca. 20msec schneller ist, als die theoretisch berechnete Zeit. Wie zu erwarten, mit den Ergebnissen aus Abschnitt 7.3.1, ist die Ausregelzeit länger als die theoretische. Das Ausregeln nimmt 70 msec mehr Zeit in Anspruch, wie der erwartete Wert. Dies entspricht ungefähr der selben Größenordnung wie ohne Sollwertglättung.

Die Messergebnisse kommen allesamt in die Richtung der berechneten Werte. Natürlich stimmen diese an der einen oder anderen Stelle nicht exakt mit den Erwartungen überein, aber das Ergebnis der Aufnahme der Sprungantworten zeigt deutliche Übereinstimmungen mit den Erwartungen.

Es ist somit gezeigt, dass der Drehzahlregelkreis nach dem Symmetrischen Optimum ausgelegt werden kann. Des Weiteren ist damit bewiesen worden, dass sich die Kaskadenregelung mit dem optimierten Stromregelkreis und äußeren Drehzahlregelkreis mit dem DC-Master umsetzen lassen.

## 8 Fazit

Der Aufbau des Stromrichters und die Inbetriebnahme waren erfolgreich. Der hier aufgebaute Stromrichter kann in Zukunft für mehrere Labordurchführungen genutzt werden. Die Bedienung mittels Bedienpult und die Kommunikation zwischen PC und Siemens Starter wurden ausreichend getestet. Die Arbeit zeigt viele Schwachstellen und Tücken der zum Teil recht komplizierten Parametrierung des Stromrichters auf. Andererseits zeigt sie auf der anderen Seite aber auch viele sehr nützliche und gut einsetzbare Funktionen des Starters. So hat z.B. die Nutzung des Geräte-Traces praktische Vorteile gegenüber den Messaufzeichnungen mit dem Oszilloskop. Es können schnell viele unterschiedliche Parameter gleichzeitig beobachtet werden. Des Weiteren können Parameter beobachtet werden, welche sonst nur sehr aufwendig auf dem Oszilloskop dargestellt werden können, wie z.B. die Drehzahl und die Soll-Istwerte der Regler.

Außerdem konnten die Möglichkeiten zur Regelung der Gleichstrommaschine mit dem DC-Master intensiv untersucht werden. Es konnte gezeigt werden, dass der Technologieregler sich nicht für schnelle Regelungen, wie die Ankerstromregelung eignet und zudem konnte aufgezeigt werden, warum dies nicht möglich ist.

Die Optimierung nach den Methoden des Symmetrischen Optimums und des Betragsoptimums konnten dennoch durchgeführt werden. Es wurde ein Weg aufgezeigt und untersucht, wie sich der Drehzahl- und Stromregler nach den genannten Kriterien optimieren lassen. Hierbei wurde gezeigt, dass dies viel mit den Abtastzeiten und dem Programmablauf des Stromrichters zu tun hat.

Der Laborversuch LEP3.2 kann also mit dem hier realisierten Stromrichter durchgeführt werden und es können Ergebnisse erzielt werden, welche den Erwartungen, des erlernten Unterrichtsstoffes zu dem Thema Gleichstrommaschinen-Regelung, entsprechen.

Dennoch ist hinzuzufügen, dass die Handhabung des Starters nicht unbedingt intuitiv ist und es eventuell deutlich länger, als ein Labortermin, dauern kann, diesen in seinem vollen Umfang durch zu arbeiten.

Der DC-Master ist ein Gerät, welches für die Anwendung in der Industrie bestimmt ist und nicht für das Laborumfeld. Es zeigt sich sehr deutlich, dass das Gerät darauf ausgelegt ist eine möglichst unkomplizierte und schnelle Inbetriebnahme durchzuführen. Dies hat den Vorteil, dass die Anlagen sehr schnell einsatzbereit sind und mit diesen Geld verdient werden kann. Eine Untersuchung und Optimierung wie hier steht dabei nicht im Vordergrund. Wichtig ist dort, dass die Anlagen laufen und zuverlässig arbeiten.

Ein Ausblick wäre z.B. die Möglichkeiten des Geräte Traces weiter zu untersuchen. Dieser bietet noch ein großes Potenzial, denn es gibt noch viele Funktionen, die hier nicht genutzt wurden. Die entwickelte Umsetzung kann bestimmt beschleunigt werden, um diese schneller durch Studenten im Labor durchführen lassen zu können.

# Tabellenverzeichnis

2.1	Typenschildangaben der Gleichstrommaschine . . . . .	9
2.2	Typenschild Inkrementalgeber . . . . .	10
2.3	Nenndaten des Stromrichters / DC-Master . . . . .	13
2.4	Nenndaten Kommutierungsdrossel L1 . . . . .	14
2.5	Nenndaten Kommutierungsdrossel L2 . . . . .	14
2.6	Eingesetzte Sicherungspatronen . . . . .	16
3.1	Messergebnisse der Prüfung nach VDE 0100 Teil 600 . . . . .	23
3.2	Grundkonfiguration Nennparameter . . . . .	27
3.3	Übersicht der Antriebsdatensätze . . . . .	28
3.4	Ablaufgruppen aktivieren . . . . .	28
3.5	Übersicht der verwendeten Analogeingänge und -ausgänge . . . . .	30
3.6	Übersicht der verwendeten Digitaleingänge . . . . .	31
4.1	Größen des Ankerstromkreises . . . . .	35
5.1	Eigenschaften der Sprungantwort Betrags Optimum . . . . .	38
5.2	Eigenschaften der Sprungantwort Symmetrisches Optimums . . . . .	40
5.3	Eigenschaften der Sprungantwort Symmetrisches Optimum mit Sollwertglättung . . . . .	41
6.1	Messergebnisse von $R_A$ und $L_A$ . . . . .	44
6.2	Messergebnisse der Streckenverstärkung $V_{SI}$ im nicht lückenden Bereich . . . . .	46
6.3	Messergebnisse der Streckenverstärkung $V_{SI}$ im lückenden Bereich . . . . .	47
6.4	Messergebnisse von $T_{\sigma i}$ mit dem Geräte Trace . . . . .	51
6.5	Zusammenfassung der Streckenparameter des Stromregelkreises . . . . .	52
6.6	An- und Ausregelzeiten Ankerstromsprungantwort nach BO . . . . .	54
6.7	Messergebnisse der Ankerstromsprungantwort mit optimierten PI-Ankerstromregler nach dem BO . . . . .	58
7.1	Messergebnisse der Bestimmung des Verlustdrehmoments $M_V$ . . . . .	65
7.2	Bestimmung des Wort-Case Szenarios der Zeitkonstante $t_{gn}$ . . . . .	70
7.3	Zusammenfassung der Streckenparameter des Stromregelkreises . . . . .	72
7.4	Vergleich der theoretischen und gemessenen Eigenschaften der Drehzahl-sprungantwort optimiert nach dem Symmetrischen Optimum . . . . .	76

---

7.5 Vergleich der theoretischen und gemessenen Eigenschaften der Drehzahl- sprungantwort optimiert nach dem SO . . . . .	78
---	----

# Abbildungsverzeichnis

2.1 Vereinfachte Darstellung des Aufbaus des Laborstandes . . . . .	9
2.2 Vereinfachtes Anlagenschaltbild des Laborstandes . . . . .	10
2.3 Blick in das Schaltschrankinnere . . . . .	12
2.4 Seitenansicht Schaltschrank mit Ethernet-Kupplung . . . . .	17
2.5 Klemmleistenplan X1 . . . . .	17
2.6 Fertigung der Grundplatte . . . . .	18
2.7 Fertig gestellte Grundplatte . . . . .	18
2.8 Einbringung Steckverbindungen . . . . .	19
2.9 Einbringung Lüfterausschnitte . . . . .	19
2.10 Verdrahtung Schaltschrank . . . . .	20
2.11 Bedienpult . . . . .	20
2.12 Stromrichter Schaltschrank . . . . .	20
3.1 Siemens STARTER Funktionsblatt Drehzahlregler . . . . .	24
3.2 Siemens STARTER Projektassistent . . . . .	25
3.3 Bsp.:Konfigurationsassistent . . . . .	26
3.4 Logikverschaltungen der Regelmodi . . . . .	29
3.5 Ankerspannungsregelung Istwerterfassung . . . . .	33
3.6 Bestimmung der Lückgrenze . . . . .	34
4.1 Ersatzschaltbild einer Nebenschlusserregten Gleichstrommaschine . . . . .	35
5.1 Kaskadenregelung Prinzip [4, S.14] . . . . .	36
5.2 Kaskadenregelung einer Gleichstrommaschine [5, S.23] . . . . .	37
5.3 Sprungantwort Betrags Optimum [5, S.27] . . . . .	38
5.4 Sprungantwort Symmetrisches Optimum [5, S.29] . . . . .	39
5.5 Sprungantwort Symmetrisches Optimum mit Sollwertglättung [5, S.31] . . . . .	40
6.1 Regelungstechnisches Ersatzschaltbild Ankerstromregelkreis [5, S.32] . . . . .	42
6.2 Ermittlung von $T_A$ aus der Sprungantwort des Ankerstromes $I_A$ . . . . .	44
6.3 Verlauf der Streckenverstärkung $V_{SI}$ . . . . .	47
6.4 Messung $T_{\sigma_i}$ mit dem Oszilloskop . . . . .	49
6.5 Messung $T_{\sigma_i}$ mit dem Geräte Trace . . . . .	50

---

6.6	Messung $T_{gi}$ mit dem Geräte Trace . . . . .	51
6.7	Funktionsblatt Ankerstromregelkreis [3, S.779] . . . . .	55
6.8	Starter Visualisierung des Funktionsblatt Ankerstromregelkreis [3] . . . . .	56
6.9	Ankerstromsprungantwort PI-Ankerstromregler optimiert nach BO . . . . .	57
6.10	Sprungwort mit Technologieregler $K_{pi} = 0,08$ und $T_{ni} = 0,1sec$ . . . . .	60
6.11	Sprungwort mit Technologieregler $K_{pi} = 0,08$ und $T_{ni} = 0,05sec$ . . . . .	60
6.12	Messung der Totzeit zwischen Ausgangswert und Ist-Wert . . . . .	61
6.13	Istwert-Vergleich PI-Stromregler und Technologieregler . . . . .	62
7.1	Regelungstechnisches Ersatzschaltbild des Drehzahlregelkreises [5, S.35] . . . . .	63
7.2	PI-Regler mit umgangenem I-Anteil . . . . .	66
7.3	Hochlaufversuch eines Drehzahlsprunges von $0 \text{ min}^{-1}$ auf $1000 \text{ min}^{-1}$ . . . . .	67
7.4	Drehzahlsprungantwort mit lückendem Strom . . . . .	75
7.5	Drehzahlsprungantwort ohne lückendem Strom . . . . .	75
7.6	Drehzahlsprungantwort Symmetrisches Optimum mit Sollwertglättung . . . . .	77

# Literaturverzeichnis

- [1] Siemens AG. SIMAMICS DCM DC Converter, 2015.
- [2] Tim Eberhard Theo Klotz. Planung, Erstellung, Inbetriebnahme und regelungstechnische Analyse eines Gleichstromantriebssystems als Belastungseinrichtung für ein Windenergieanlagen Simulator, 2014.
- [3] Siemens AG. SINAMICS DCM Listenhandbuch, 2015.
- [4] Serge Zacher and Manfred Reuter. Regelungstechnik für Ingenieure. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017.
- [5] Prof. Dr. Gustav Vaupel. LE Handout Teil 3.
- [6] Dierk Schröder. Elektrische Antriebe – Grundlagen. Springer Berlin Heidelberg, 2017.
- [7] Siemens AG. FAQ für SINAMICS DCM; 6RA80. 2014.
- [8] Kay-Ole Klebe. Untersuchung und Optimierung der Kaskadenregelung einer Gleichstrommaschine, June 2012.
- [9] Berthold Heinrich, Petra Linke, and Michael Glöckler. Grundlagen Automatisierung. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017.
- [10] Siemens AG. SINAMICS Freie Funktionsblöcke, 2011.

# Anhang

Hier im Anhang ist der überarbeitete und teils neu erstellte Laborversuch "LEP3.2: Stationäres und dynamisches Verhalten eines Gleichstromantriebes" abgedruckt. Die Stromlaufpläne, Klemmpläne, Siemens Unterlagen etc. befinden sich auf einem Datenträger und sind bei den Prüfern einsehbar.



Studiengruppe:		Eingegangen am:	Protokollführer:	
Übungstag:			Weitere Teilnehmer:	
Professor:				
LEP3.2 ATP3.2	<b>Stationäres und dynamisches Verhalten eines Gleichstromantriebes</b>			10/2017

## 1 Einleitung

Ziel dieses Versuches ist die Untersuchung einer stromrichter gespeisten, fremderregten Gleichstrommaschine und die Analyse der wichtigsten Kenngrößen. Als Vorbereitung dienen die allgemeinen Grundlagen der Gleichstrommaschine, die theoretischen Zusammenhänge der B6-Brückenschaltung und der Kaskadenregelung einer Gleichstrommaschine aus der Vorlesung.

Der Versuchsaufbau (siehe Anlagenschaltbild) setzt sich aus einer fremderregten Gleichstrommaschine (Antriebsmaschine) und einer Drehstromasynchronmaschine (Belastungsmaschine) zusammen. Die Gleichstrommaschine wird über einen Vierquadrant-Stromrichter und die Drehstromasynchronmaschine über einen Frequenzumrichter gespeist. Beide Maschinen sind über eine Drehmoment-Drehzahlmesswelle gekoppelt. Die Steuerung und Parametrierung der Umrichter ist über eine Visualisierung möglich. Vor der Versuchsdurchführung werden Sie durch den Professor oder dem wissenschaftlichen Mitarbeiter in die Bedienung der Anlage eingewiesen.

## 2 Stationäres Verhalten des Gleichstromantriebes

Es sind drei Messreihen in Abhängigkeit vom Belastungsdrehmoment  $M$  aufzunehmen. Folgende Kenngrößen sollen gemessen bzw. berechnet werden:

Ankerspannung  $U_A$ , Ankerstrom  $I_A$ , Erregerstrom  $I_E$ , Drehzahl  $n$ , Drehmoment  $M$ , Nennmoment  $M_N$ , zugeführte Leistung  $P_{zu}$ , Wirkungsgrad  $\eta$ .

Zur Einstellung verschiedener Arbeitspunkte wird die Belastung des Gleichstrommotors angepasst. Dies geschieht durch die Veränderung des Drehmomentsollwertes am Frequenzumrichter (Hauptsollwert) der Drehstromasynchronmaschine, die als Belastungsmaschine im generatorischen Bereich betrieben wird. Bei der Einstellung der Belastung sollte der Phasenstrom der Drehstromasynchronmaschine den Nennstrom  $I_N$  nicht überschreiten, da sich sonst der Frequenzumrichter nach kurzer Zeit automatisch abschalten würde. Wird die Gleichstrommaschine mit Feldschwächung betrieben, ist darauf zu achten, dass kein instabiles Betriebsverhalten auftritt.

Nehmen Sie vor der Inbetriebnahme der Anlage die Nenndaten auf und berechnen Sie von beiden Maschinen die Nennmomente  $M_N$ .

Die Gleichstrommaschine wird mit einem DC-Master der Firma Siemens betrieben und gesteuert. Der Gleichstromantrieb wird somit über das vorhandene Bedienpult und mit der

Siemens Software Starter, welche auf dem PC des Laborstandes installiert ist, gesteuert und geregelt.

Um die folgenden Messreihen durchzuführen, schließen Sie den Schaltschrank des DC-Masters gemäß des Anlagenschaltplans an. Schalten Sie die Anlage nacheinander mit etwas Geduld ein und gehen Sie sicher, dass alle Lüfter in Betrieb sind, da die Gleichstrommaschine ansonsten sehr schnell sehr heiß wird. Stellen Sie zudem sicher, dass der Schaltschrank und der PC miteinander verbunden sind.

Schalten Sie den PC ein und öffnen Sie die Software Starter. Anschließend öffnen Sie das Projekt „LEP3\_2“. Um eine Verbindung zwischen PC und DCM herzustellen, wird zunächst mit dem Befehl „Projekt“ -> „Erreichbare Teilnehmer“ der DCM hinzugefügt und anschließend mit dem Befehl „Projekt“ -> „Mit ausgewähltem Zielgerät verbinden“ eine online Kommunikation hergestellt.

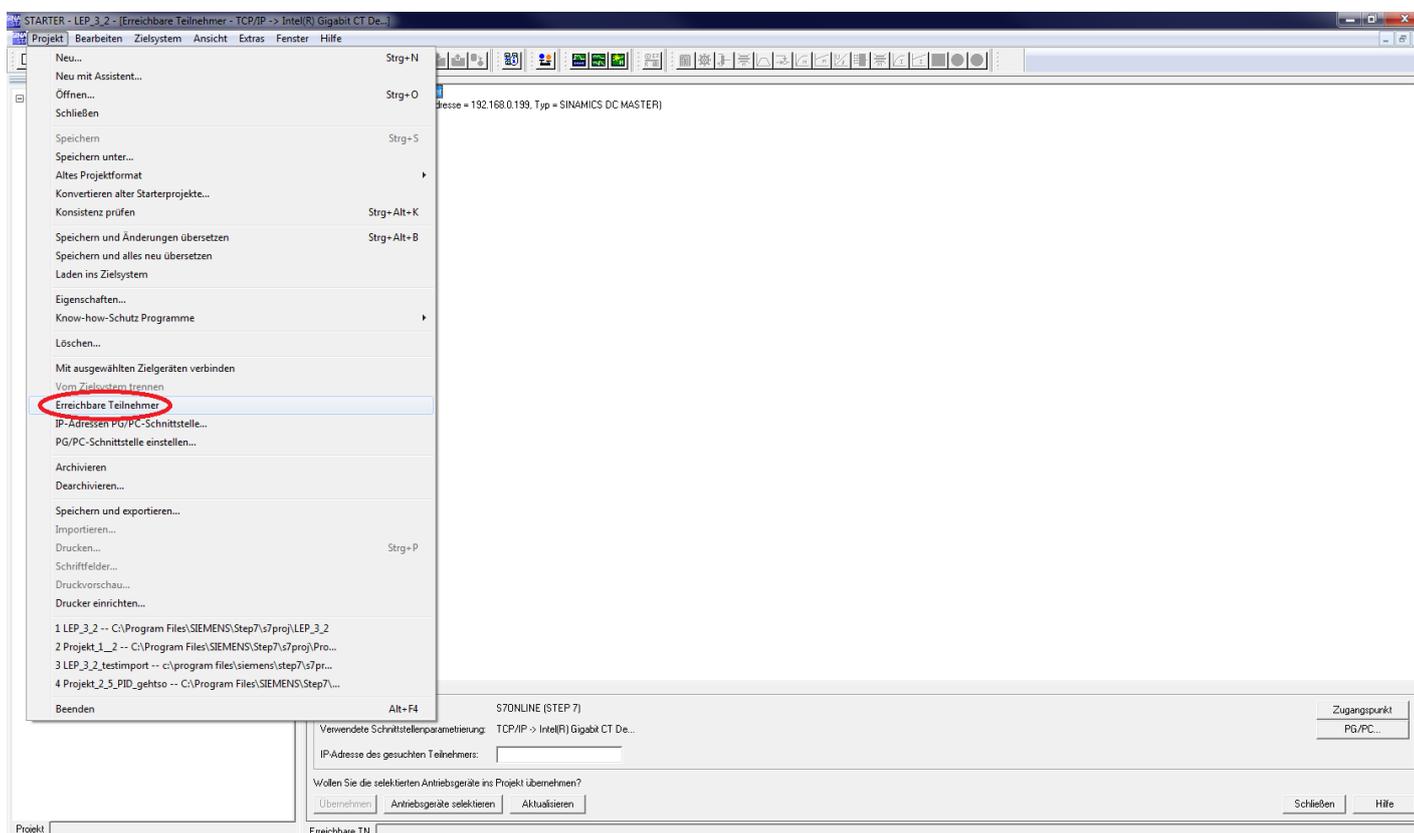


Abbildung 1 Erreichbare Teilnehmer

Der DCM sollte nun einmalig auf Werkseinstellungen zurückgesetzt werden. Anschließend wird das Projekt in den DCM geladen.

- Öffnen Sie den Drive Navigator. Klicken Sie auf die Schaltfläche “Inbetriebnahme” und anschließend auf “Werkseinstellungen herstellen”.
  - Navigationsbaum: Projekt -> DCM\_ADVANCED\_CUD -> Antrieb\_1 -> Drive Navigator
- Laden Sie das Projekt über den zugehörigen Button in der Kopfzeile in den DCM.
- Der DCM sollte sich während aller Messungen und Versuchsdurchführungen im Online-Modus befinden.

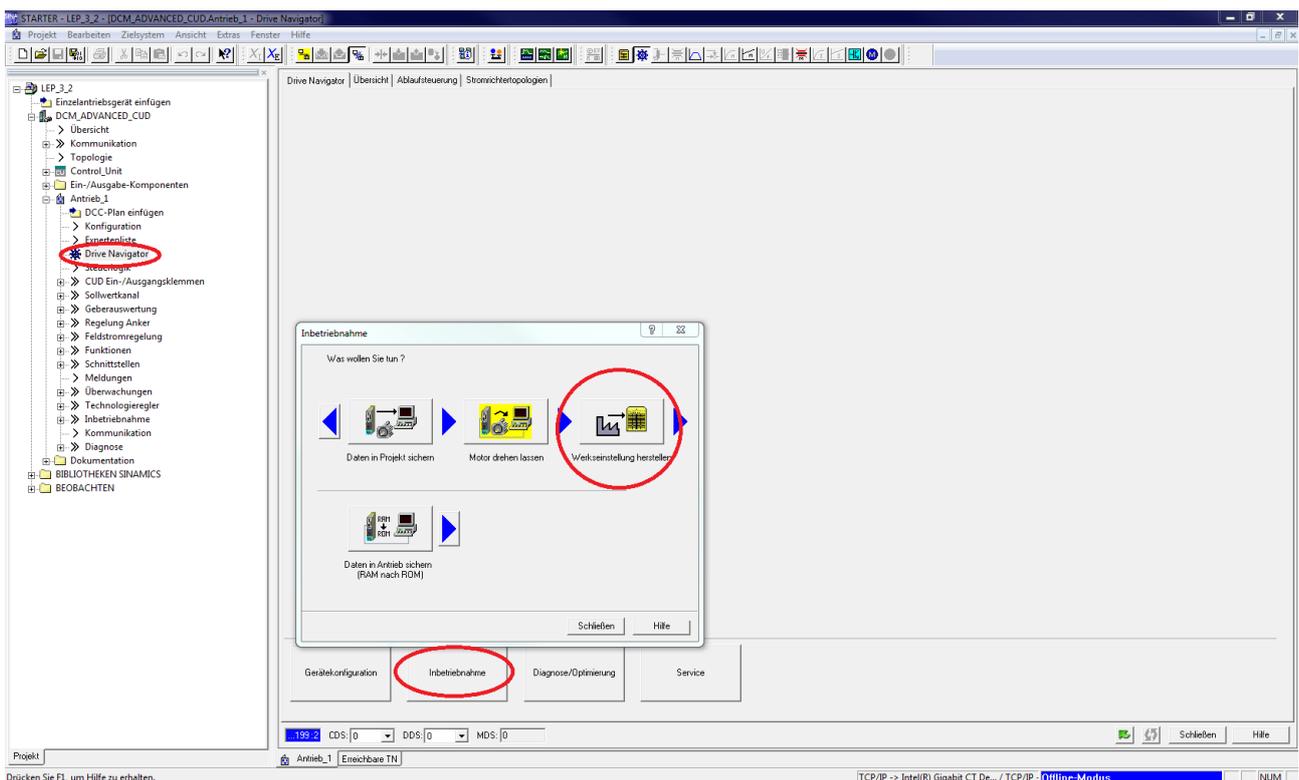


Abbildung 2 Werkseinstellungen herstellen

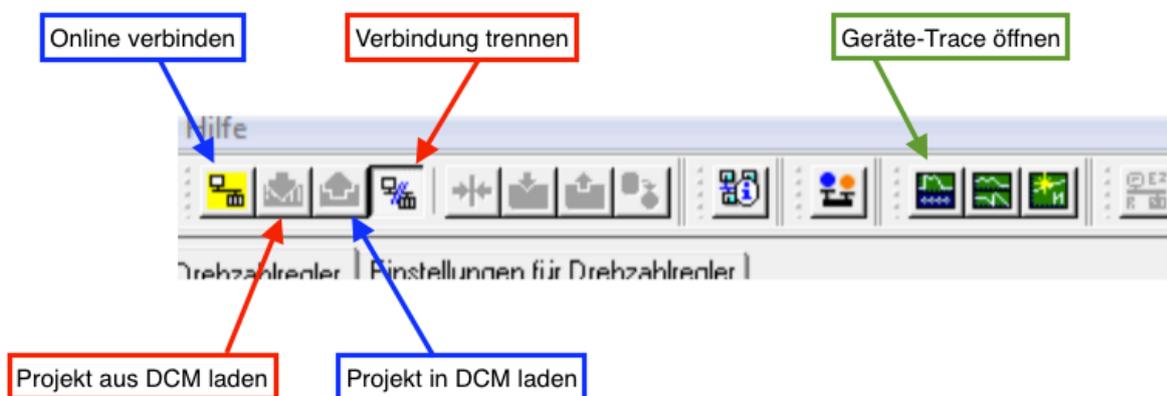


Abbildung 3 Funktion einiger wichtiger Buttons

## 2.1 Messreihe: (Betrieb mit Ankernennspannung)

$U_A = U_{AN}$  (Ankernennspannung) = konst.,  $I_E = I_{EN}$  (Nennerregerstrom) = konst.

Der Hauptsollwert für das Belastungsmoment ist so einzustellen, dass der Gleichstrommotor bei einem Drehmoment  $M = M_N$  annähernd die Drehzahl  $n = n_N$  erreicht. Die Messreihe ist beginnend beim Drehmoment  $M_N$  bis zum kleinsten einstellbaren Drehmoment aufzunehmen.

Vor dem Beginn sollte eine Drehzahl-Istwertglättung von 20msec eingestellt werden, damit der Drehzahlregler weniger schwingt.

- Schalten Sie das Bedienpult auf  $U_A$  – Regelung
- Öffnen Sie das Funktionsblatt „Drehzahl-Soll-Ist-Differenz“
  - Navigationsbaum: Projekt -> DCM\_ADVANCED\_CUD -> Antrieb\_1 -> Drive Navigator
- Stellen Sie eine Drehzahl-Istwert Glättung (p50200 [2]) von 20msec ein.

Hinweis: Achten Sie darauf, dass die Strombegrenzung richtig eingestellt ist und Sie die Einstellungen im Antriebssatz DDS2 vornehmen.

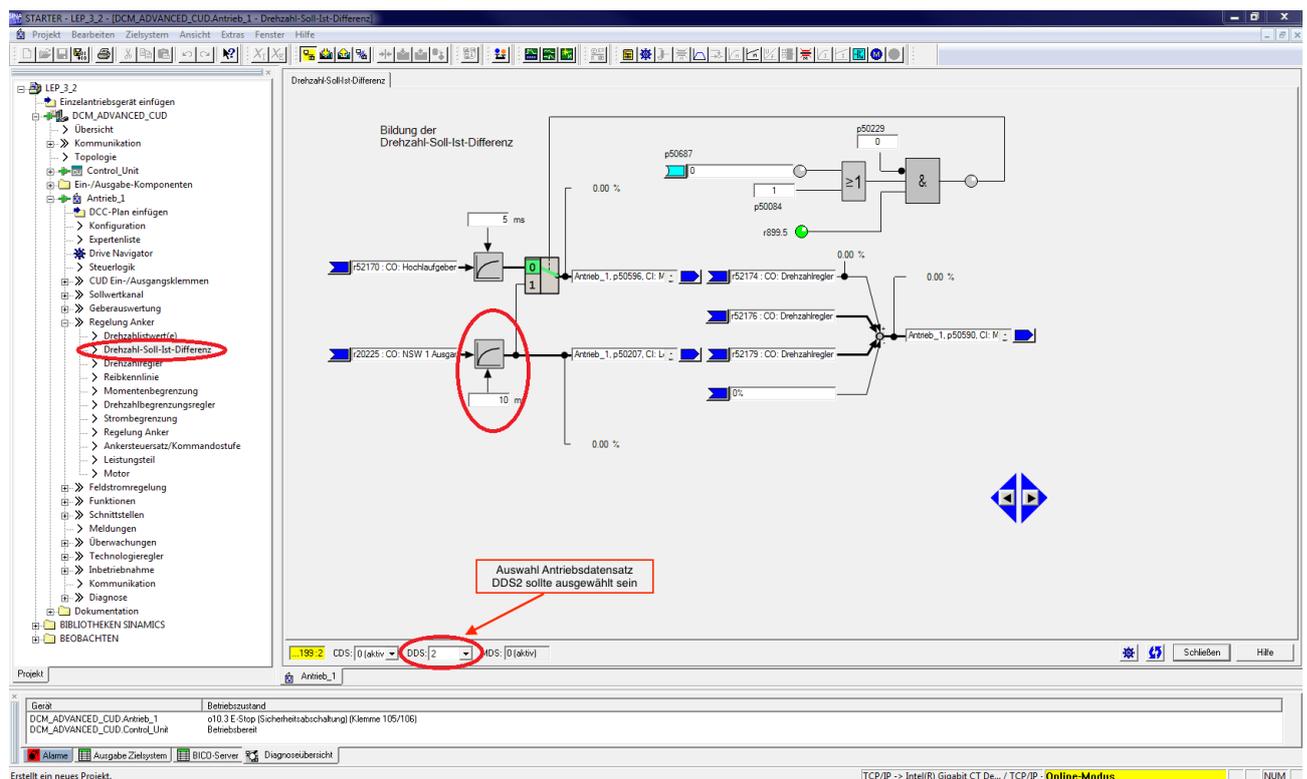


Abbildung 4 Ankerspannungsregelung Istwert Glättung

## 2.2 Messreihe: (Betrieb mit halber Ankernennspannung)

$$U_A = 0,5 * U_{AN} = \text{konst.}, I_E = I_{EN} = \text{konst.}$$

Der Hauptsollwert für das Belastungsmoment wird so eingestellt, dass der maximale Motorstrom  $I_{\max}$  den Nennstrom  $I_N$  der Drehstromasynchronmaschine nicht überschreitet. Die Messreihe ist beginnend beim größten Drehmoment  $M_{\max}$  bis zum kleinsten einstellbaren Drehmoment aufzunehmen.

Hinweis: Es sollte eine Istwert Glättung von 30msec eingestellt werden.

## 2.3 Messreihe: (Betrieb mit Feldschwächung)

$$U_A = 0,5 * U_{AN} = \text{konst.}, I_E = 0,5 * I_{EN} = \text{konst.}$$

(Achten Sie auf ein stabiles Betriebsverhalten der Gleichstrommaschine!)

Der Hauptsollwert für das Belastungsmoment wird so eingestellt, dass der maximale Motorstrom  $I_{\max}$  den Nennstrom  $I_N$  der Drehstromasynchronmaschine nicht überschreitet. Die Messreihe ist beginnend beim größten Drehmoment  $M_{\max}$  bis zum kleinsten einstellbaren Drehmoment aufzunehmen.

Die Feldschwächung wird wie folgt eingestellt:

- Öffnen Sie das Funktionsblatt „Leistungsteil“.
  - Navigationsbaum: Projekt -> DCM\_ADVANCED\_CUD -> Antrieb\_1 -> Regelung Anker -> Leistungsteil
- In der Spalte der Feld-Einstellungen ändern Sie die „Reduzierung des Bemessungsstromes (p50076[1])“ von 14,3% ( $I_F=0,84A$ ) auf 7,2% ( $I_F=0,37A$ ).
- Kontrollieren Sie die Änderung auf dem Messgerät.

Hinweis: Die Istwert-Glättung sollte auf 20msec eingestellt werden.

Leistungsteil Daten	
Bemessungsanschlussspannung:	400 Veff
Bemessungsstrom:	30.0 A
Bemessungsstrom reduziert:	14.4 A
Reduzierung des Bemessungsstromes:	47.5 %
Nennspannung des speisenden Netzes:	400 Veff

Leistungsteil Istwerte	
Steuwinkel:	119.14 °
Ia:	0.01 A
U_Netz:	0 Veff

Abbildung 5 Erregerfeldschwächung

### 3 Dynamisches Verhalten des Gleichstromantriebes

#### 3.1 Funktionsplan

Vorbereitend zum Praktikumsversuch, erstellen Sie mit Hilfe der Grundgleichungen der Gleichstrommaschine den Funktionsplan der Kaskadenregelung einer fremd-erregten Gleichstrommaschine. Wie können die Parameterwerte der Regelstrecke theoretisch und praktisch ermittelt werden?

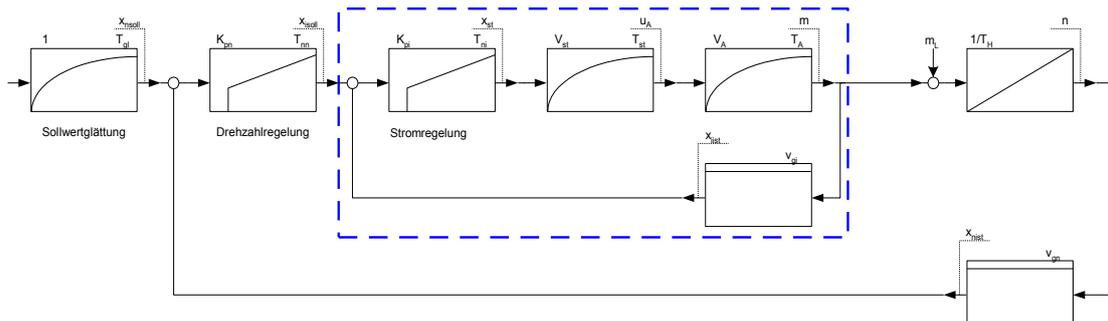


Abbildung 6 Funktionsplan der Kaskadenregelung einer Gleichstrommaschine

#### 3.2 Streckenverstärkung Vsi

Bestimmen Sie die Streckenverstärkung  $V_{si}$  des Stromregelkreises mithilfe des Startes und der Analogeingänge des DC-Masters. Gehen Sie dabei wie folgt vor:

- Stellen Sie sicher, dass die beiden Sollwerteingänge (AI 0 und AI 2) am Bedienpult auf „0“ gedreht sind und der Reglermodus „n“ ausgewählt ist.
- Schalten Sie das Erregerfeld aus. Hierfür öffnen Sie die Expertenliste des Antriebes und ändern den Parameter p50082[3] auf p50082[0] (Grundeinstellung „Feld dauerhaft eingeschaltet“)
- Navigationsbaum: Projekt -> DCM\_ADVANCED\_CUD -> Antrieb\_1 -> Expertenliste

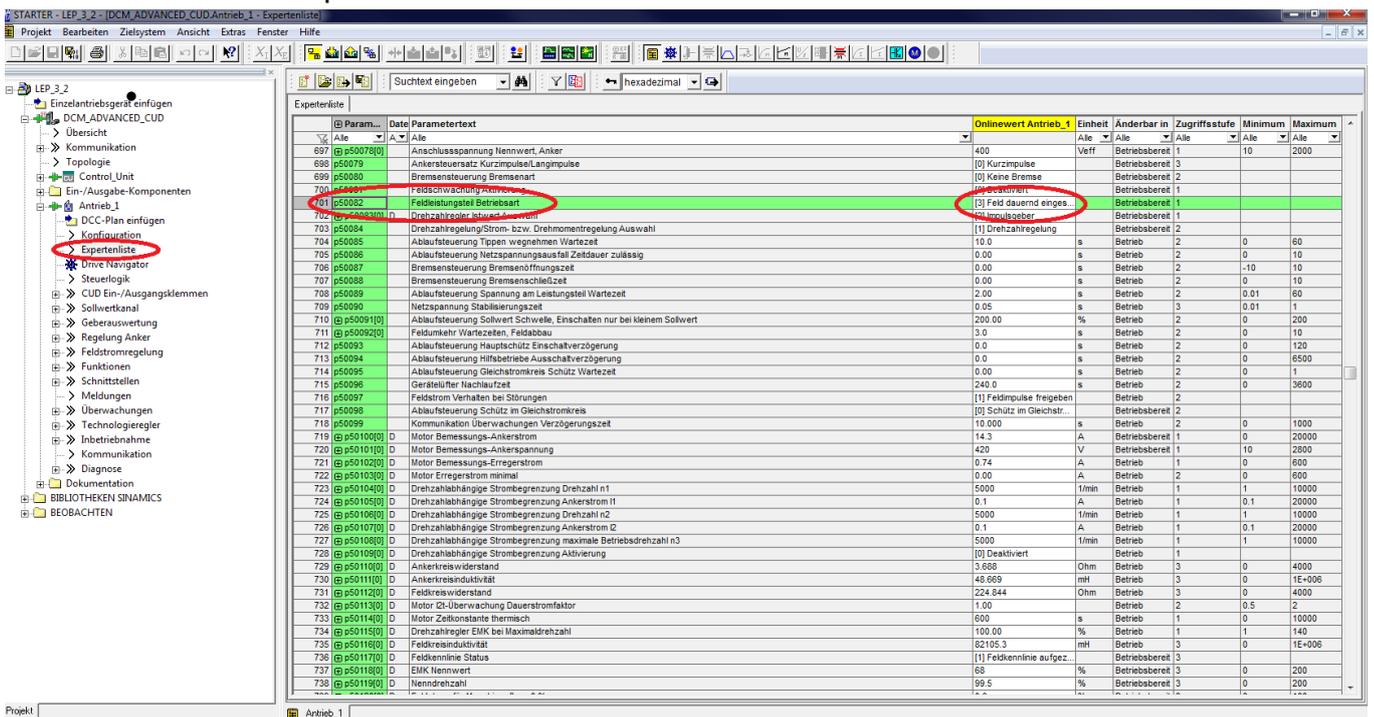


Abbildung 7 Erregerfeld ausschalten

Normieren Sie den Analogeingang AI 2 auf 10% um einen größeren Einstellbereich des Potenziometers zu erlangen. Öffnen Sie das Funktionsblatt „Analogeingänge“ und ändern Sie die Normierung des AI 2 über den Parameter p50721[0] entsprechend.

- Navigationsbaum: Projekt -> DCM\_ADVANCED\_CUD -> Antrieb\_1 -> CUD Ein-/Ausgangsklemmen -> Analogeingänge
- Verschalten Sie nun den Analogeingang AI 2 (r52017) mit dem Ankersteuer-  
 satzeingang (p50600[0]).

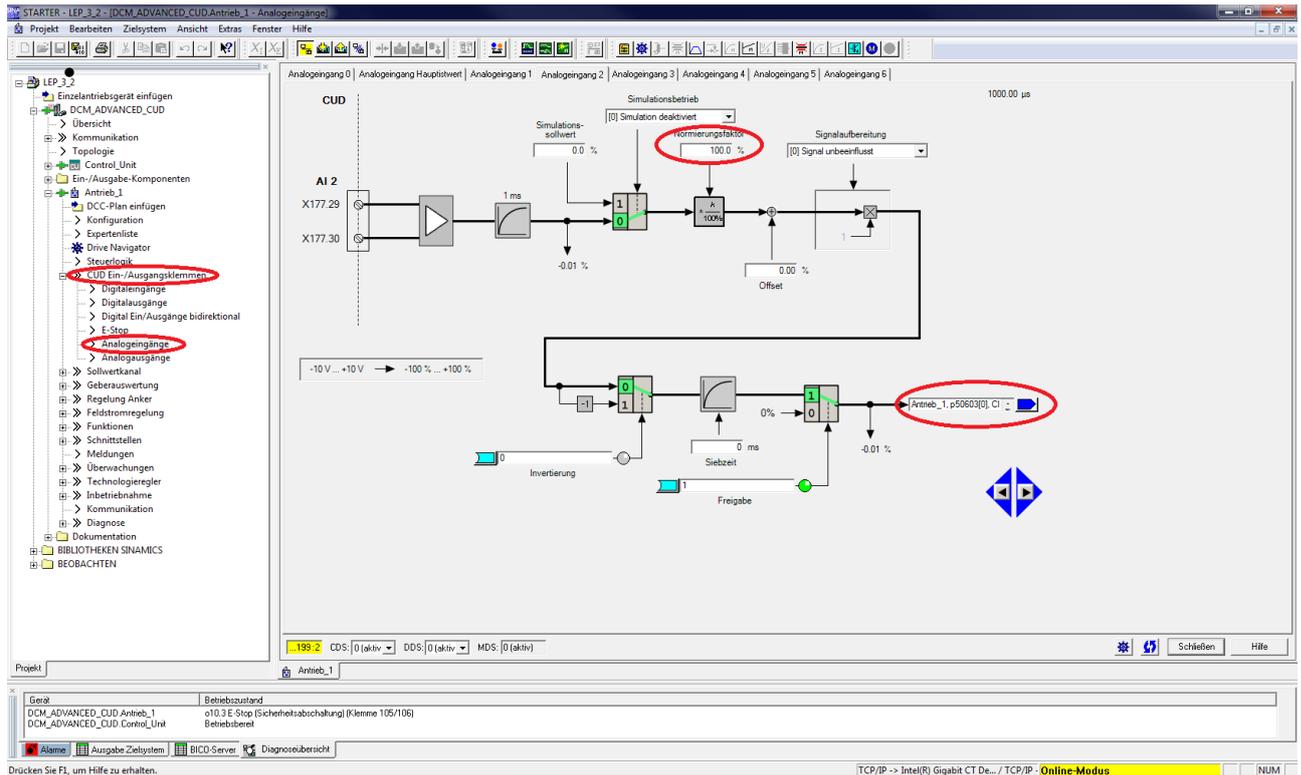


Abbildung 8 Analogeingänge normieren

- Öffnen Sie die Watchtabelle und beobachten Sie die Parameter: „Ankerstromwert r27“ , „AI 2 r52017“ und den „Ankersteuerwinkel r52101“
  - Navigationsbaum: Projekt -> DCM\_ADVANCED\_CUD -> Antrieb\_1 -> Beobachten -> Watchtabelle

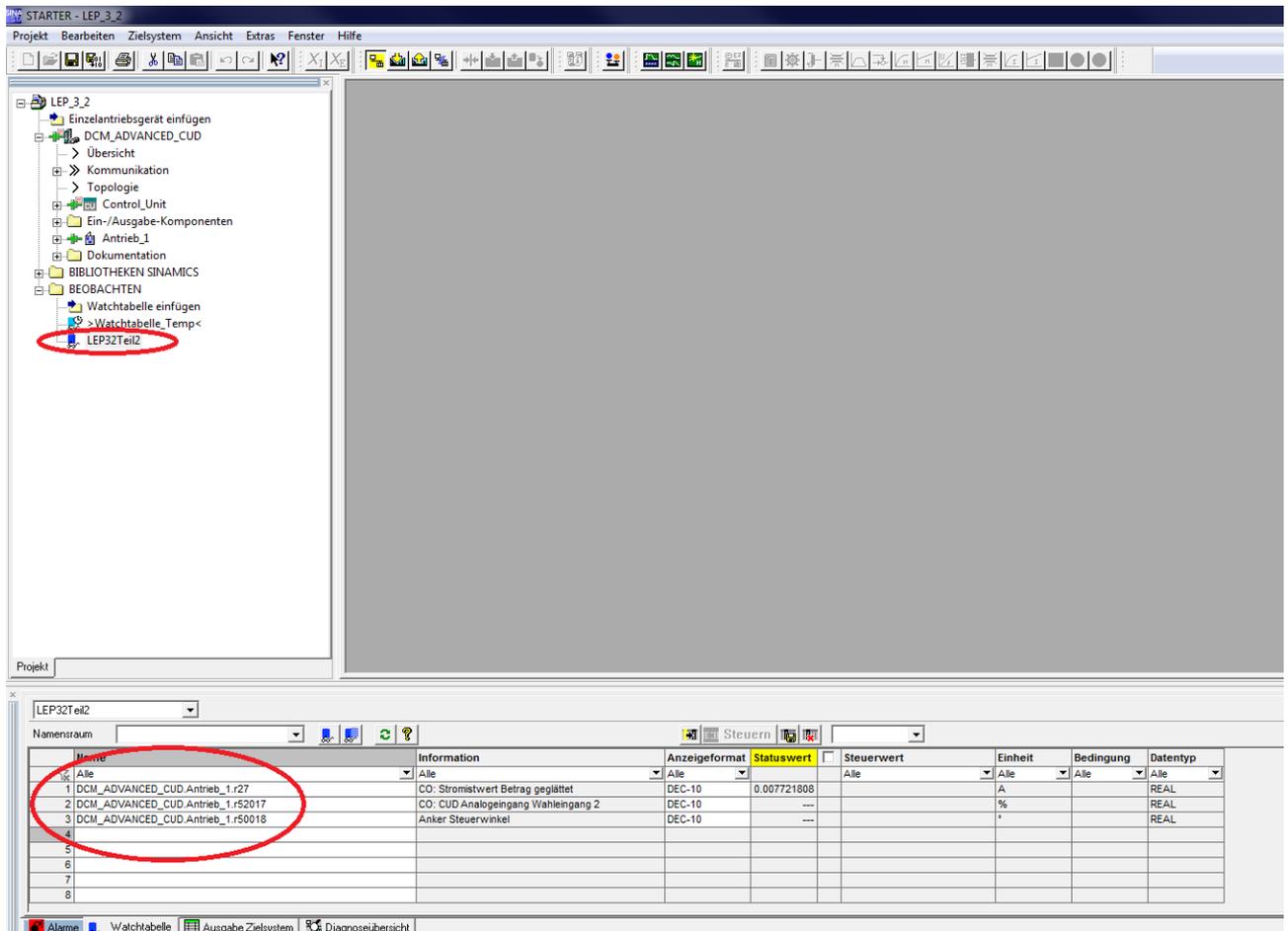


Abbildung 9 Watchtabelle

- Schalten Sie die Anlage ein und geben Sie die Regelung frei. Erhöhen Sie nun den Sollwerteingang AI 2 bis der Nennstrom  $I_A = 14.3$  A fließt und berechnen Sie  $V_{si}$ .

$$V_{si} = V_{st} * V_A * V_{gi} = \frac{X_{iist}}{X_{st}}$$

- Verschalten Sie den AI 2 (r52017) wieder mit der Strombegrenzung über die Parameter p50603[0] und p50603[6] und stellen Sie Normierung zurück auf 100%.

### 3.3 Summe der kleinen Zeitkonstanten

Bestimmen Sie die Summe der kleinen Zeitkonstanten  $T_{\sigma i}$ . Die Zeitkonstanten sind die Totzeit des Stromrichters  $t_{st}$  und die Messglättungszeit des Messgliedes  $t_{gi}$ . Die Zeitkonstanten werden nun wie folgt als Summe mithilfe des Starters und dem Trace ermittelt. Es wird hierfür Rechteckgenerator verwendet, um den Stromregler zu umgehen und einen Sprung auf den Ankersteuersatz zu geben. Aus der Sprungantwort wird anschließend die Summe der Zeitkonstanten ermittelt.

$$T_{\sigma i} = t_{st} + t_{gi}$$

- Das Erregerfeld bleibt weiterhin ausgeschaltet.
- Öffnen Sie das Funktionsblatt des Rechteckgenerators und nehmen Sie folgende Einstellungen vor: Der Pendelsollwert 1 p50480[0] wird auf 1% und der Pendelsollwert 2 p50482[0] auf 4% eingestellt. Stellen Sie die Zeiten jeweils auf 1 Sekunde ein.
  - Navigationsbaum: Projekt -> DCM\_ADVANCED\_CUD -> Antrieb\_1 -> Sollwertkanal -> Pendeln
- Der Ausgang des Rechteckgenerators (r52208) wird mit dem Eingang des Ankersteuersatzes p50600[0] verschaltet. Die vorhandenen Verschaltungen des Ausgangs sollten nicht gelöst werden!
- Rechteckgenerator einschalten (50485[0]=1)

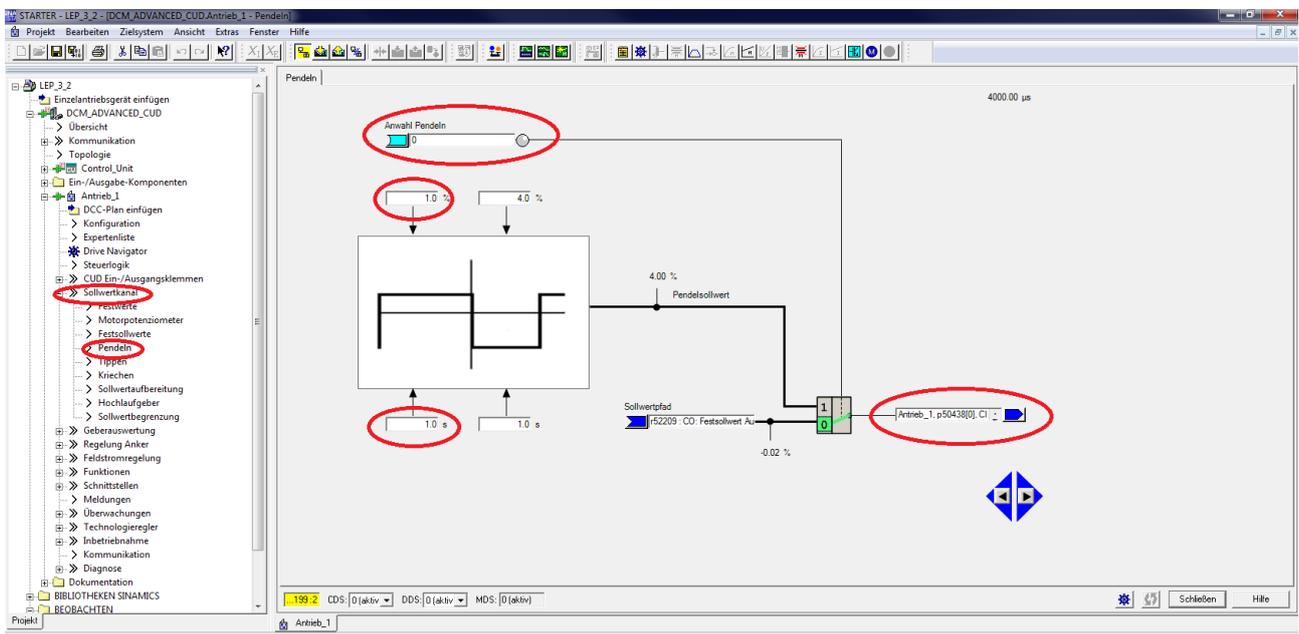


Abbildung 11 Einstellungen Rechteckgenerator

Der Geräte Trace wird folgendermaßen eingestellt:

- Öffnen Sie den Trace und fügen Sie die Signale „Stromistwert (r68)“ und „Pendeln Ausgang r52208“ hinzu.
- Die Messwertaufzeichnung wird auf „Aufzeichnung takt synchron-zeitbegrenzter Trace“ eingestellt. Wählen Sie den niedrigsten Takt, um eine möglichst genaue Messung zu erstellen.
- Stellen Sie den Trigger-Typ auf „Positive Flanke“ und wählen Sie als Variable „Pendeln Ausgang (r52208)“. Nutzen Sie zusätzlich die Funktion des Pre-Triggers und stellen Sie diesen auf 20msec.
- Schalten Sie nun die Anlage ein und geben Sie die Regler frei. Warten Sie einen Moment und starten Sie dann den Trace.
- Führen Sie dies nun mehrmals aus und mitteln Sie die Zeitkonstante.
- Lösen Sie die Verschaltung zwischen dem Rechtgenerator Ausgang und dem Ankersteuersatz wieder.

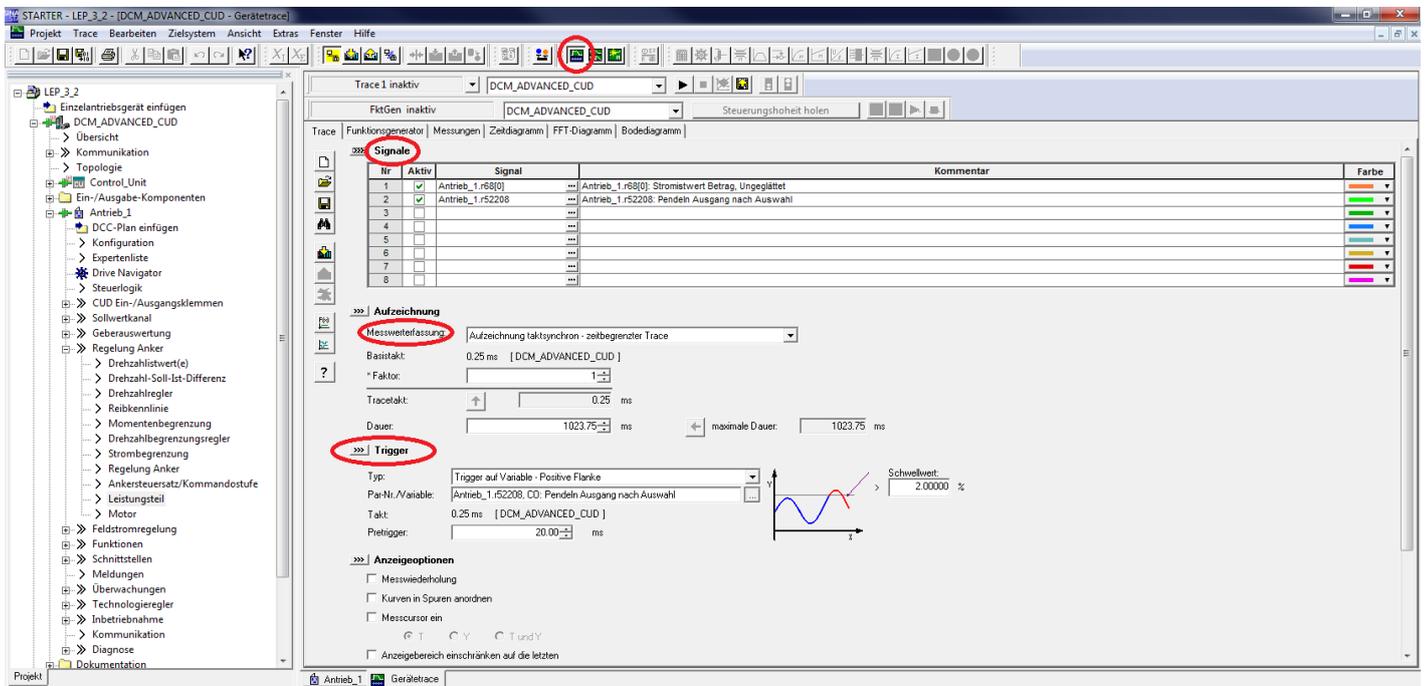


Abbildung 12 Einstellungen Geräte Trace

## Optimierung der Stromregelung des Gleichstrommotors

Aus den bisher ermittelten Parametern  $T_{\sigma i}$  und  $V_{si}$  sollen die Einstellungen für den PI-Regler des Stromregelkreises nach dem Betragsoptimum errechnet werden. Die Werte der Ankerinduktivität  $L_A$  und des Ankerwiderstandes  $R_A$  wurden von dem Starter ermittelt und können ohne weitere Messungen übernommen werden. Diese sind auf dem Funktionsblatt „Motor“ zu finden.

Navigationsbaum: Projekt -> DCM\_ADVANCED\_CUD -> Antrieb\_1 -> Regelung Anker -> Motor

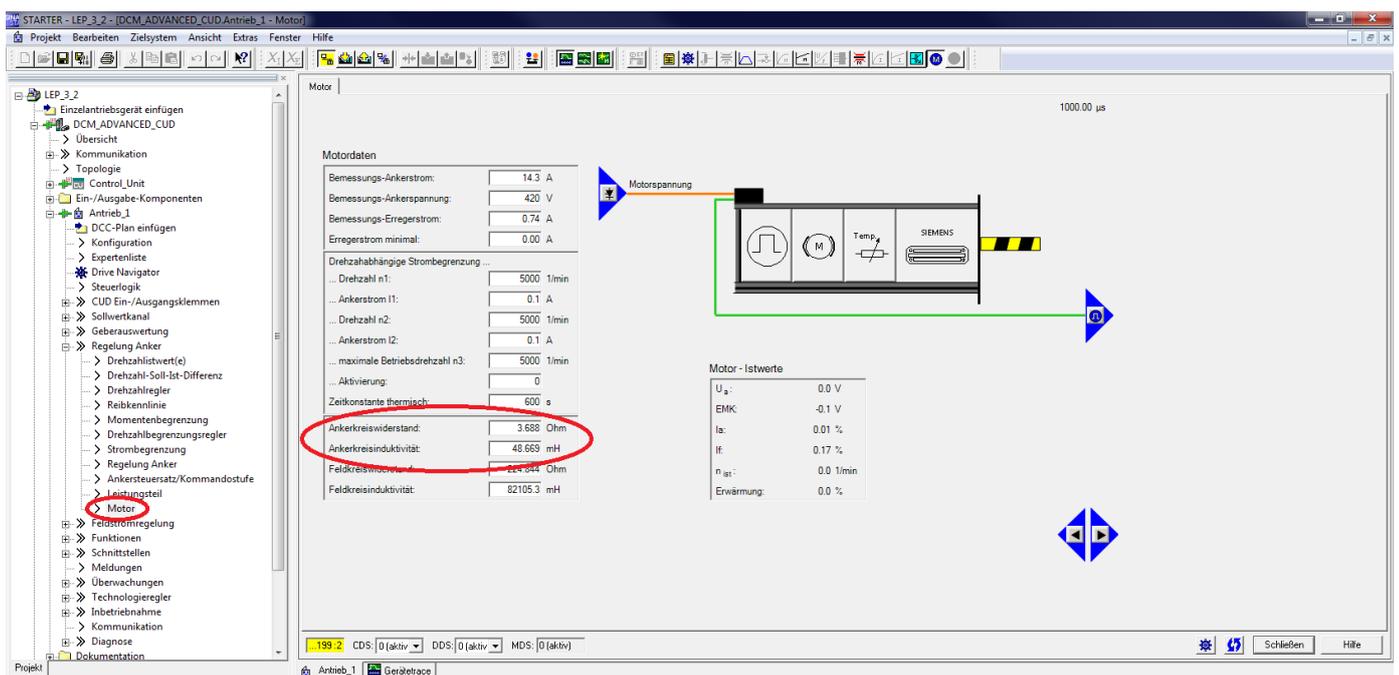


Abbildung 13 Parameter des Ankerstromregelkreises

Zur Berechnung von  $K_{pi}$  und  $T_{ni}$  nach dem Betragsoptimum BO werden folgende Formeln benötigt:

$$K_{pi} = \frac{T_A}{2 * V_{si} * T_{\sigma i}}$$

$$T_{ni} = T_A = \frac{L_A}{R_A}$$

### 3.4 Überprüfung der Parameter des optimierten Stromregelkreises nach dem BO

Die berechneten Parameter werden nun eingestellt und es wird ein Sprung auf den Stromregelkreis geben. Überprüfen Sie, ob die Sprungantwort Ihren Erwartungen entspricht. Variieren Sie  $K_{pi}$  und  $T_{ni}$ . Zur Überprüfung gehen Sie wie folgt vor:

- Das Erregerfeld bleibt ausgeschaltet
- Der Rechteckgenerator wird so eingestellt, dass er zwischen 40% auf 50% schwingt. Die Periodendauer sollte dabei auf 0,2sec eingestellt werden. Der Stromsollwert springt so von 40% auf 50%. Der Ausgang des Rechteckgenerators wird mit dem Sollwert des PI-Stromreglers (p50601[4]) verschaltet.
- Öffnen Sie das Funktionsblatt „Regelung Anker“:
  - Navigationsbaum: Projekt -> DCM\_ADVANCED\_CUD -> Antrieb\_1 -> Regelung Anker -> Regelung Anker

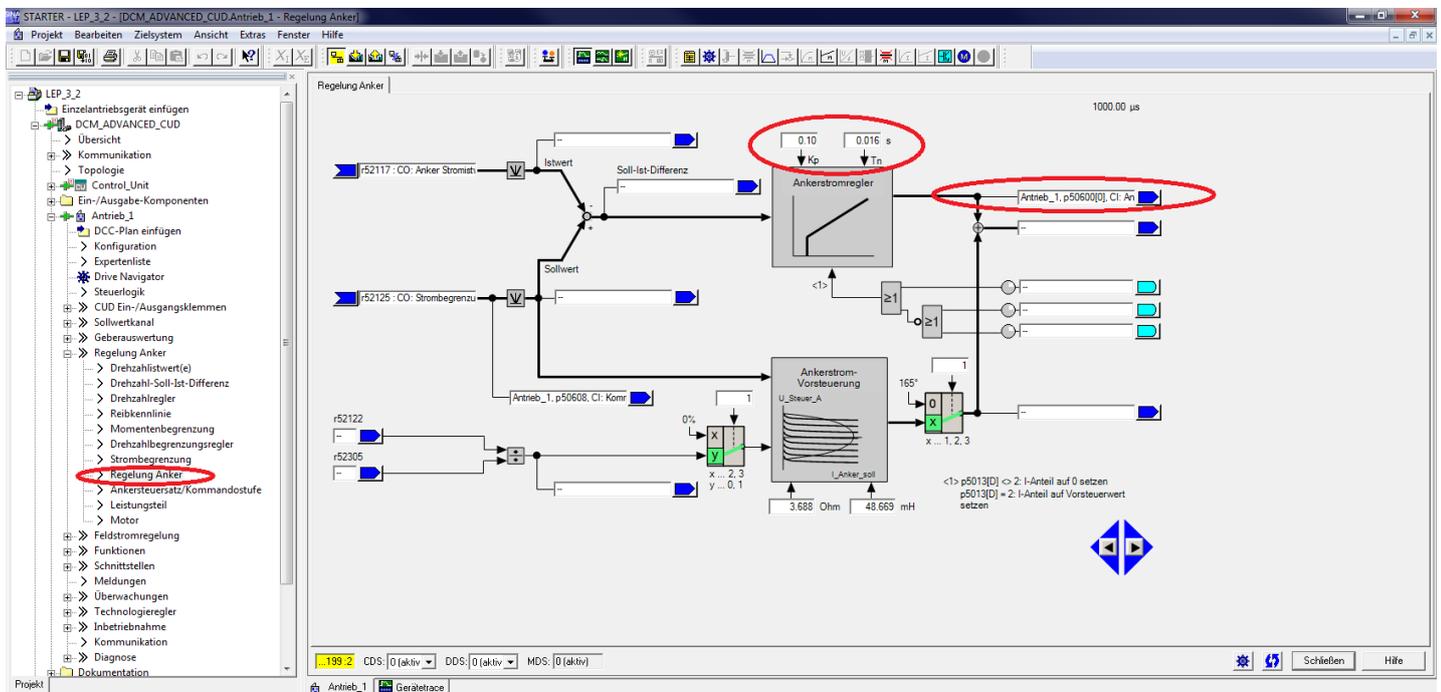


Abbildung 14 Einstellungen Stromregelkreis

- Der Ausgang des PI-Stromreglers (r52110) wird mit dem Eingang des Ankersteuersatzes verschaltet. **Achten Sie unbedingt darauf**, dass Sie den richtigen Ausgang, den oberhalb der Summationsstelle, benutzen.
- Stellen Sie die berechneten Parameter  $K_{pi}$  (p50155[0]) und  $T_{ni}$  (p50156[0]) ein.
- Zur Aufnahme der Sprungantwort wird der Geräte Trace verwendet. Beobachten Sie die Signale „Pendeln Ausgang (r52208)“ und „Stromistwert intern Betrag (r52116)“ und stellen Sie den Trigger auf den Ausgang des Rechteckgenerators.
- Schalten Sie die Anlage ein und geben Sie den Regler über das Bedienpult frei. Schalten Sie nun den Trace ein.
- Verschalten Sie den Rechteckgenerator zurück in den Ursprung. und schalten Sie diesen aus mit „Anwahl Pendeln (p50485[0]) = 0“



### 3.5 Verlustmoment

Bestimmen Sie, wie folgend beschrieben das gesamte Verlustmoment  $M_V$  des Antriebssatzes:

- Die Gleichstrommaschine wird im Leerlauf, also ohne Belastung durch die Drehstromasynchronmaschine, betrieben.
- Verändern Sie die Ankerspannung  $U_A$ , um unterschiedliche Leerlaufdrehzahlen  $n$  einzustellen. Beginnen Sie bei  $U_A = U_{AN}$ , beenden Sie die Messung bei  $U_A = 0V$
- Führen Sie denselben Versuch bei gleichen Drehzahlwerten noch einmal durch, vertauschen hierbei aber, ohne die Drehrichtung zu verändern, dabei Antriebs- und Lastmaschine.
- Berechnen Sie das gesamte Verlustmoment  $M_V = f(n)$  als Summe aus den zugehörigen Messwerten gleicher Drehzahl.

### 3.6 Trägheitsmoment

Bestimmen Sie unter Beachtung des Punktes 5 „Theoretische Grundlagen“ das Trägheitsmoment  $J$ .

- Stellen Sie die Stromgrenze des Stromrichters auf einen Wert entsprechend  $I_A = 0,8 \cdot I_{AN}$  ein.
- Zeichnen Sie den Verlauf der Funktion  $n = f(t)$  mit einem Speicheroszilloskop auf. Bilden Sie gleichzeitig  $I_A = f(t)$  und  $n_{Soll} = f(t)$  ab.
- Berechnen Sie das Motormoment  $M$ :
  - mit Hilfe der Angaben auf dem Typenschild.
  - aus den aufgenommenen stationären Belastungsmessungen  $M = f(n)$  mit den Einstellungen  $U_A = U_{AN}$  und  $I_E = I_{EN}$ .
- Berechnen Sie das Trägheitsmoment  $J$  des Antriebssatzes.

Damit ein Hochlaufversuch durchgeführt werden kann, darf der Drehzahlregler lediglich als P-Regler fungieren. Der integrale-Anteil muss also umgangen werden, um einen linearen Anstieg der Drehzahl zu erlangen. Hierfür müssen folgende Einstellungen getroffen werden:

- Verschalten Sie den Ausgang des PI-Stromreglers (r52102), nach der Summationsstelle, mit dem Ankersteuersatz (p50600[0]). Dies ist notwendig, da die Gleichstrommaschine bei diesem Versuch ohne Last betrieben wird. Die parallel geschaltete „Ankerstrom-Vorsteuerung“ übernimmt eine Adaption des Reglers für den Bereich in dem der Ankerstrom  $I_A$  lückt.
- Öffnen Sie das Funktionsblatt „Drehzahlregler“
  - Navigationsbaum: Projekt -> DCM\_ADVANCED\_CUD -> Antrieb\_1 -> Regelung Anker -> Drehzahlregler

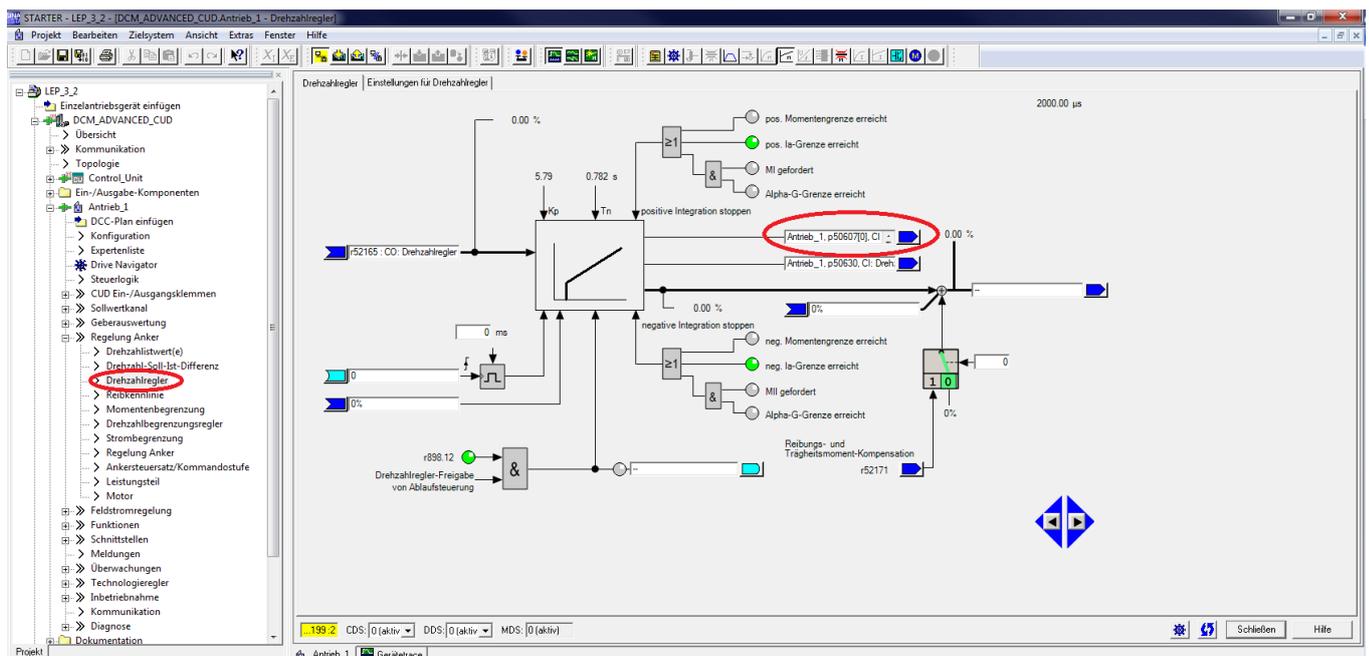


Abbildung 15 Drehzahlregler Einstellungen für den Hochlaufversuch

- Verschalten Sie den P-Anteil (r52161) des Drehzahlreglers mit p50607[0] und p50607[1]
- Öffnen Sie das Funktionsblatt „Leistungsteil“ und stellen Sie den Ankerbemessungsstrom auf 38,13 % ein. Der Ankerstrom ist damit begrenzt auf  $0,8 \cdot I_{AN}$ .
  - Navigationsbaum: Projekt -> DCM\_ADVANCED\_CUD -> Antrieb\_1 -> Regelung Anker -> Leistungsteil

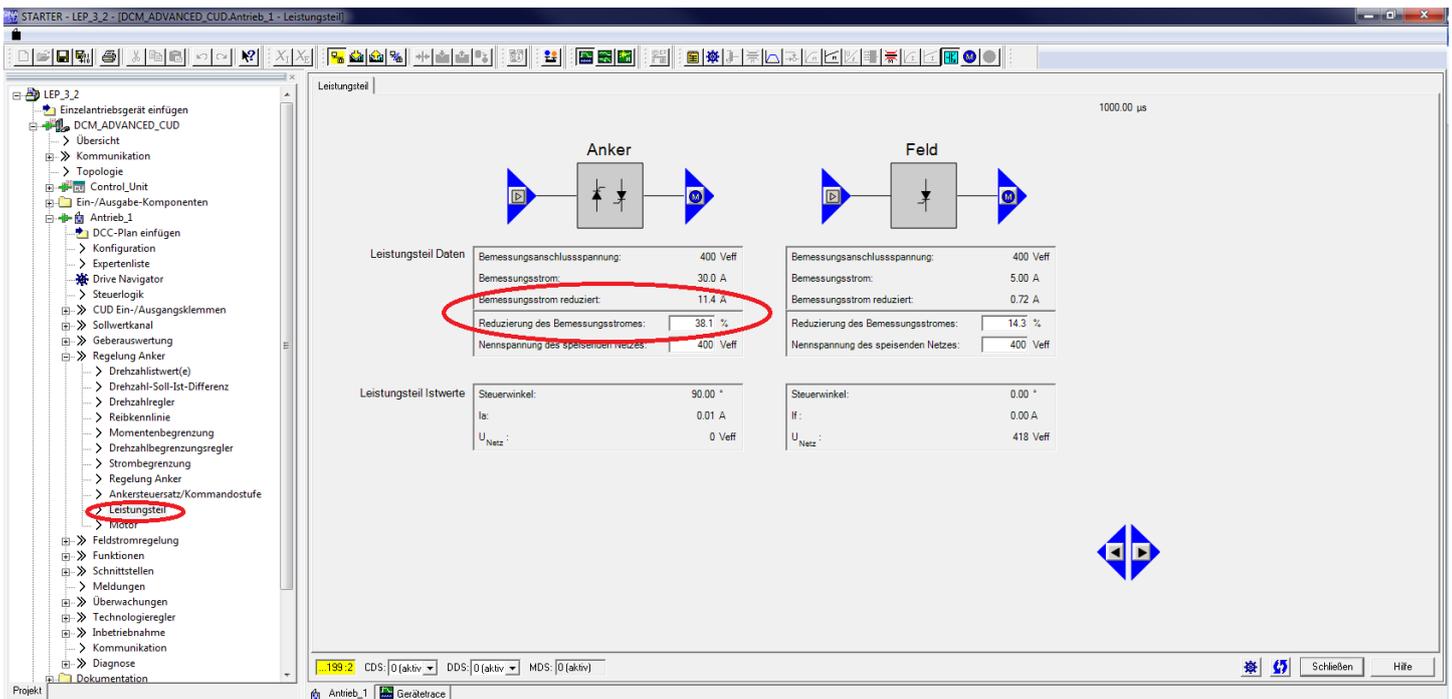


Abbildung 16 Ankerstrombegrenzung für den Hochlaufversuch

- Schalten Sie die Anlage im Regelmodus „n“ ein und stellen Sie eine Drehzahl von  $1000 \text{ min}^{-1}$  ein. Schalten Sie die Anlage anschließend wieder ab.
- Öffnen Sie den Geräte Trace und beobachten Sie die Signale Stromistwert (r68), Drehzahl Sollwert (r52170) und Drehzahl Istwert (r52179). Stellen Sie den Trigger ein und schalten Sie den Trace „scharf“.
- Schalten Sie die Anlage ein und geben Sie die Regler frei, um den Sprung aufzuzeichnen.
- Nach Aufzeichnung der Messung muss der Drehzahlregler in den Ursprung zurück verschaltet werden.

## Optimierung der Drehzahlregelung des Gleichstrommotors

Berechnen sie die Parameter des Drehzahl-reglers nach dem symmetrischen Optimum SO.

$$K_{pn} = \frac{T_{IA}}{2 * T_{on}} \quad T_{nn} = 4 * T_{on} \quad t_{abt} = \frac{T_{Netz}}{2 * p} \quad t_{ei} = 2 * T_{\sigma i}$$

$$T_{IA} = T_H * \frac{I_{AN}}{I_{Amax}} \quad T_H = \frac{2 * \pi * J * n_0}{M} \quad T_{on} = t_{ei} + 2 * t_{abt}$$

### 3.6.1 Überprüfung der Parameter des Optimierten Drehzahlregelkreises nach SO

Stellen Sie die berechneten Werte für  $K_{pn}$  und  $T_{nn}$  am Drehzahlregler ein und zeichnen Sie die Sprungantwort mit dem Geräte-Trace auf.

- Schalten Sie die Anlage im „n“ Regelmodus ein und stellen Sie eine Belastung von  $M_L = 15 \text{ Nm}$  ein.
- Öffnen Sie das Funktionsblatt „Drehzahlregler“ und wechseln Sie zu dem Funktionsblatt „Einstellungen für Drehzahlregler“. Der Wert für  $K_{pn}$  wird auf den Parameter p50225[0] und für  $T_{nn}$  auf den Parameter p50226[0] geschrieben.

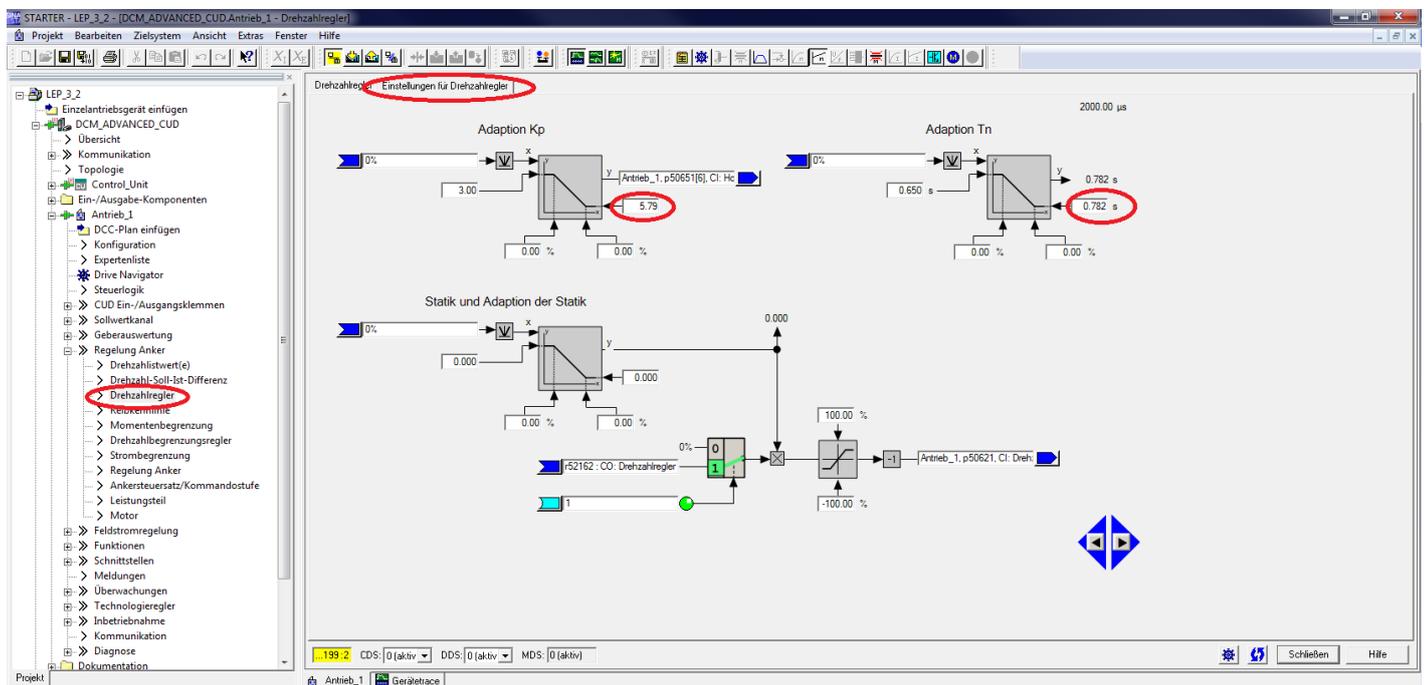


Abbildung 17 Einstellung der Drehzahlregelparameter für SO

- Der Ausgang des PI-Stromreglers (r52110) wird mit dem Eingang des Ankersteuersatzes verschaltet. **Achten Sie unbedingt darauf**, dass Sie den richtigen Ausgang, den oberhalb der Summationsstelle, benutzen. **Achten Sie darauf**, dass Ihre optimierten Parameter der Stromregelung eingetragen sind. Schalten Sie die Ankervorsteuerung nicht aus, da diese die Momenten-Richtung im Hintergrund regelt und es ansonsten zu verlängerten Rechenzyklen kommen kann!

- Stellen Sie den Rechteckgenerator so ein, dass er von 18% auf 20% pendelt. Eine halbe Periodenlänge sollte 5sec betragen. Schalten Sie den Rechteckgenerator aktiv.
- Öffnen Sie den Geräte Trace und beobachten Sie die Signale Drehzahlsollwert (r60) und den Drehzahlwert (r61). Stellen Sie einen zeitbegrenzten Trace ein. Der Trigger kann mit dem Ausgang des Rechteckgenerators sowie dem Drehzahlsollwert verschaltet werden.
- Schalten die Anlage ein und geben Sie die Regler frei. Lassen Sie den Gleichstrommotor mindestens einmal pendeln bevor Sie den Trace starten.

### 3.6.2 Sollwertglättung

Stellen Sie nach der Theorie des symmetrischen Optimums die Drehzahlsollwertglättung ein und nehmen Sie die Sprungantwort auf.

- Öffnen Sie das Funktionsblatt „Drehzahl-Soll-Ist-Differenz“ und Stellen Sie die Drehzahl-Sollwertglättung (p50228[0]) ein.
  - Navigationsbaum: Projekt -> DCM\_ADVANCED\_CUD -> Antrieb\_1 -> Regelung Anker -> Drehzahl-Soll-Ist-Differenz
- Nehmen Sie die Sprungantwort nach den Einstellungen aus Abschnitt 3.6.1: Überprüfung der Parameter des Optimierten Drehzahlregelkreises nach SO auf.

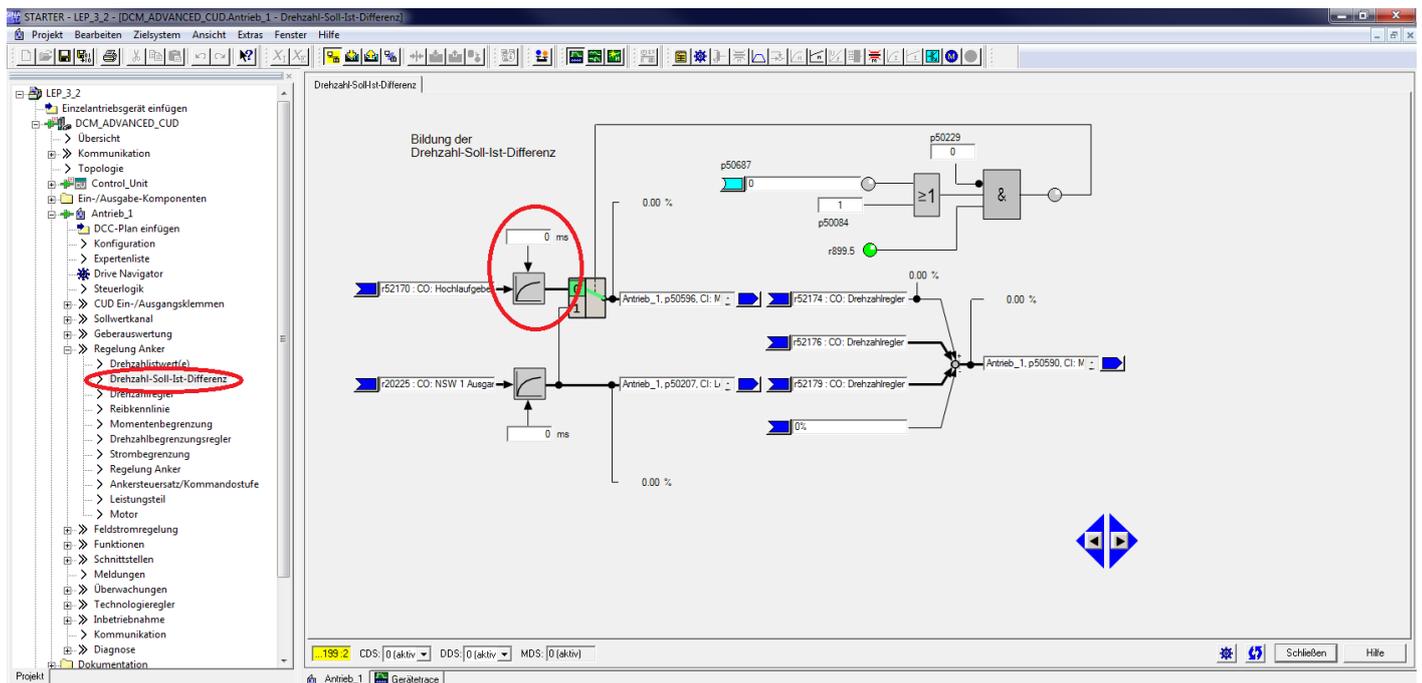


Abbildung 18 Einstellung der Sollwertglättung





Mittelwertes für  $M_V$  das Trägheitsmoment  $J$  genauer berechnet werden:

$$J = \frac{M_b}{\frac{d\omega}{dt}} = \frac{M - M_V}{\frac{d\omega}{dt}}$$

Da  $M$  und  $M_V$  und damit auch  $M_b$  konstant sind, ergibt sich für die Funktion  $n = f(t)$  beim Hochlauf eine ansteigende Gerade. Das gesuchte  $d\omega/dt$  findet man als Steigung der Funktion  $n = f(t)$  multipliziert mit  $2\pi$ .

Die Theorie des geregelten Gleichstromantriebes, sowie die Verfahren des Betrags- und symmetrischen Optimum, sollen hier nicht detailliert wiedergeben werden, da diese ausführlich in der Vorlesung besprochen werden bzw. in der Literatur dargestellt werden.

## 6 Literaturhinweis

- „Elektrische Antriebstechnik“, Band 2, Manfred Meyer.
- „Elektrische Maschinen“, Rolf Fischer.



# 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, 12. Dezember 2017

Ort, Datum

Unterschrift