

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Masterthesis

Kai Brandhoff

Optimierung, Aufbau und Inbetriebnahme eines
Windenergie-Laborversuchsstands mit Asynchron-
generator für Netz-, Vollumrichter- und doppelt
gespeisten Betrieb

Kai Brandhoff

Optimierung, Aufbau und Inbetriebnahme eines
Windenergie-Laborversuchsstands mit Asynchron-
generator für Netz-, Vollumrichter- und doppelt
gespeisten Betrieb

Masterthesis eingereicht im Rahmen der Masterprüfung
im Masterstudiengang Automatisierung
am Department Informations- und Elektrotechnik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

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

Abgegeben am 31. Januar 2019

Kai Brandhoff

Thema der Masterthesis

Optimierung, Aufbau und Inbetriebnahme eines Windenergie-Laborversuchsstands mit Asynchrongenerator für Netz-, Vollumrichter- und doppelt gespeisten Betrieb

Stichworte

Windenergieanlage, Netzeinspeisung, Leistungselektronik, Umrichter, Bremschopper, dSPACE, Schaltschrank, EMV, Asynchronmaschine, Parameteridentifikation, Echtzeitsystem

Kurzzusammenfassung

In dieser Arbeit wird für einen Praktikumsversuch im Labor für elektrische Energietechnik ein bestehender Laborversuchsstand für Windenergieanlagen neu aufgebaut. Dieser kann mit Hilfe eines Asynchrongenerators über drei verschiedene Konzepte (ASG direkt am Netz, ASG mit Vollumrichter und doppelt gespeister ASG mit Teilumrichter) Energie ins Versorgungsnetz einspeisen. Dazu wird zunächst die Systemportierung vom alten ACMC-System zum neuen System mit MicroLabBox aufgezeigt. Am Ende erfolgt ein Vergleich beider Versuchsstände.

Kai Brandhoff

Title of the paper

Optimization, construction and commissioning of a wind energy laboratory test stand with asynchronous generator for mains, full-inverter and double-fed operation

Keywords

Wind power station, network supply, power electronics, grid-inverter, brake chopper, dSPACE, electric cabinet, EMC, asynchronous machine, parameter identification, real-time system

Abstract

In this thesis, an existing test stand for a wind power station will be rebuilt for a lab experiment in the laboratory for electrical energy technology. With t an asynchronous generator, the test stand can feed energy into the supply network via three different concepts (AG directly on the grid, AG with full converter and double-fed AG with partial converter). First of all the system porting from the old ACMC system to the new system with MicroLabBox will be shown. At the end, a comparison of the two test stands is carried out.

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als Student im Masterstudiengang Automatisierung im Labor für elektrische Antriebe und Leistungselektronik an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW) in Hamburg.

An dieser Stelle möchte ich mich herzlichst bei allen bedanken, die mich während meines Studiums und meiner Masterthesis unterstützt haben. Insbesondere gilt mein Dank:

- Meinem Betreuer Prof. Dr.-Ing Michael Röther für das anspruchsvolle und interessante Thema meiner Thesis sowie die tolle Unterstützung und Betreuung während der Durchführung dieser Arbeit.
- Herrn Prof. Dr.-Ing. Gustav Vaupel für seine Bereitstellung als Zweitprüfer
- Frau M. Eng. Friederike Sczesny sowie Herrn Dipl.-Ing. Frank Korpel für die Einführung im Labor für elektrische Antriebe, Leistungselektronik und Energietechnik, sowie der Unterstützung bei der Beschaffung von Bauteilen, der Bereitstellung von Werkzeug etc.
- Den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der zentralen Laborwerkstatt des Departments Maschinenbaus der HAW für die Fertigung verschiedenster Anbauteile für den Versuchsstandes.
- Meiner Familie für die Unterstützung und das Verständnis meiner Abwesenheit während der Erstellung dieser Arbeit.

Hamburg, Januar 2019

Inhaltsverzeichnis

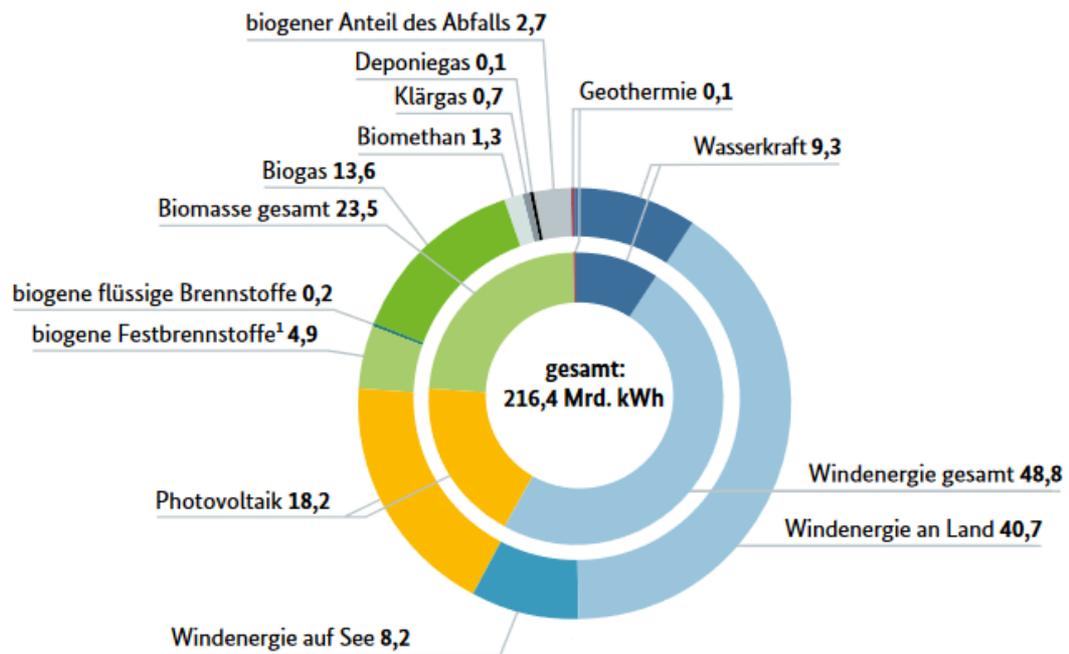
1	Einleitung	1
1.1	Ziel der Arbeit.....	2
2	Grundlagen	4
2.1	Windenergieanlagen	4
2.2	Drehstrom-Asynchronmaschine	5
2.2.1	ASG direkt am Netz	6
2.2.2	ASG mit Vollumrichter	7
2.2.3	DG-ASG mit Teilumrichter.....	8
2.3	Umrichter	9
2.4	Elektromagnetische Verträglichkeit	10
3	Realisierung.....	13
3.1	Aufbau des Versuchsstandes.....	13
3.2	Schaltschrank	17
3.2.1	Grundplatte	17
3.2.2	Elektronikplatte	18
3.2.3	Stecktafel	20
3.2.4	Externe Anschlüsse	21
3.3	Identifizierung der netz- und maschinenseitigen Größen.....	21
3.3.1	Parameteridentifizierung des Netzes	23
3.3.2	Parameteridentifizierung der ASM.....	23
3.4	Änderungen am Versuchsstand	30
3.4.1	Spannungsversorgung.....	31
3.4.2	Lüfter	36
3.4.3	MicroLabBox	37
3.4.4	Sicherungskonzept Schaltschrank	41
3.4.5	Systemportierung (MicroLabBox)	42

3.4.6	Softwarekorrektur Antriebsseite.....	47
3.4.7	Genereller Programmaufbau.....	48
3.4.8	Anpassungen in Simulink.....	50
3.4.9	Änderungen ControlDesk.....	56
4	Inbetriebnahme und Tests	57
4.1	Sicherheitsmessungen.....	57
4.2	Drehzahlgeber.....	57
4.2.1	Versuchsaufbau	58
4.2.2	Ergebnisse.....	58
4.3	Bremschopper	61
4.3.1	Versuchsaufbau	61
4.3.2	Ergebnisse.....	62
5	Vergleich der Versuchsstände	65
5.1	ASG direkt am Netz.....	65
5.1.1	Wirk- und Blindleistung	65
5.1.2	Drehzahl, Drehmoment und Pitch-Winkel	68
5.2	ASG mit Vollumrichter	70
5.2.1	Wirk- und Blindleistung	70
5.2.2	Drehzahl, Drehmoment, Pitch-Winkel und Leistungsbeiwert.....	71
5.2.3	Drehmomentkennlinien der WEA.....	73
5.3	DG-ASG mit Teilumrichter	76
5.3.1	Wirk- und Blindleistung	76
5.3.2	Drehzahl, Drehmoment, Pitch-Winkel und Leistungsbeiwert.....	78
5.4	Ergebnisse	80
6	Zusammenfassung und Ausblick	81
7	Literaturverzeichnis	83
8	Abkürzungsverzeichnis	87
9	Abbildungsverzeichnis	88

10	Tabellenverzeichnis	91
11	Verwendete Formelzeichen.....	92
12	Anhang.....	94
13	Versicherung über die Selbstständigkeit.....	95

1 Einleitung

Erneuerbare Energien nehmen eine zunehmend wichtigere Rolle bei der Stromerzeugung in der Bundesrepublik Deutschland ein. Ihr Ausbau ist eine zentrale Säule der Energiewende und wird seit dem Jahr 2000 über das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) gefördert. Neben ökologischen Aspekten, wie der Verringerung von Treibhausgasen, sprechen auch verschiedene gesellschaftliche, wirtschaftliche und politische Gründe, z. B. die Minderung von Importabhängigkeiten bei fossilen Rohstoffen, für den Ausbau der erneuerbaren Energien. Die Art und Weise in der diese genutzt werden können ist dabei regional stark unterschiedlich. In Deutschland wird neben der Biomasse und der Photovoltaik vor allem die Windenergie genutzt, um Energie aus erneuerbaren Quellen zu gewinnen. (vgl. Abb. 1-1)



¹ inkl. Klärschlamm

Abb. 1-1: Stromerzeugung durch erneuerbare Energien 2017 (in Prozent) [1]

Die an Land und auf See installierten Windenergieanlagen tragen fast zur Hälfte der gesamten Stromerzeugung durch erneuerbare Energie bei, zugleich nimmt seit Inkrafttreten des EEG die installierte Windenergieleistung von Jahr zu Jahr zu, wie die folgende Abb. 1-2 darstellt.

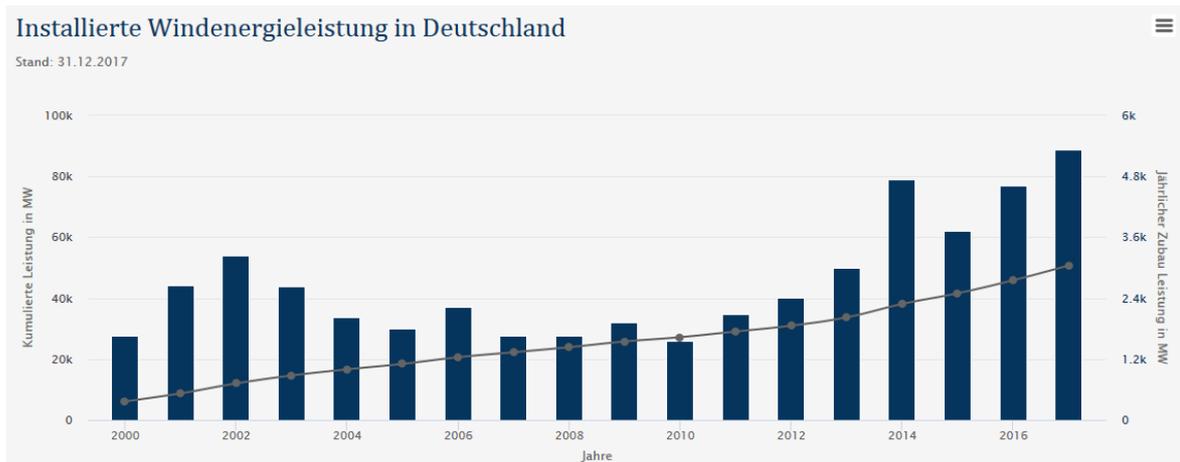


Abb. 1-2: Installierte Windleistung in Deutschland [2]

Aus der steigenden Anzahl an Windenergieanlagen resultiert ein wachsender Bedarf an Ingenieurinnen und Ingenieuren für die Projektierung, Planung und den Betrieb von diesen. Deshalb soll den Studierenden der Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW), z. B. aus den Studiengang Regenerative Energiesysteme und Energiemanagement – Elektro- und Informationstechnik, das Wissen und das Verständnis für Windenergieanlagen nähergebracht werden. Neben der Theorie sollen die Studierenden auch praktische Erfahrungen mit einer typischen, drehzahlvariablen Windenergieanlage (WEA) sammeln. Dazu dient ein Versuchsaufbau im Labor für elektrische Antriebe, Leistungselektronik und Energietechnik der HAW, an dem drei unterschiedliche Generatorkonzepte einer WEA umgesetzt sind:

1. Asynchrongenerator direkt am Netz
2. Asynchrongenerator mit Vollumrichter
3. Doppelt gespeister Asynchrongenerator mit Teilumrichter

1.1 Ziel der Arbeit

Im Rahmen dieser Masterthesis soll der WEA-Versuchsstand im Labor für elektrische Energietechnik ein zweites Mal erstellt werden. Dabei sind die drei oben genannten Generatorsysteme umzusetzen, in Betrieb zu nehmen und ausgiebig zu testen. Die dazu benötigte Hardware wird an einem benachbarten Laborplatz neu aufgebaut, während die Softwarekomponenten auf ein neu einzusetzendes dSPACE-System mit einer MicroLabBox portiert werden müssen. Der neue Laborversuchsstand ist dabei nach den geltende VDE/DIN Normen aufzubauen und zu prüfen. Der bereits vorhandene

Versuchsstand ist auf sein Optimierungspotenzial zu untersuchen und mögliche Verbesserungen sind an der neu aufzubauenden Anlage umzusetzen. Nach der erfolgreichen Inbetriebnahme sollen beide Versuchsstände miteinander verglichen. Dabei soll sichergestellt werden, dass mit beiden Anlagen dieselben Ergebnisse erzielt werden können, damit die Studierende später bei Ihren Experimenten vergleichbare Resultate erhalten.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden ausgewählte Grundlagen zu Windenergieanlagen, Asynchronmaschinen, Umrichtern und Maßnahmen zur elektromagnetischen Verträglichkeit beschrieben, die für den Aufbau eines WEA-Versuchsstandes und das weitere Verständnis dieser Arbeit notwendig sind.

2.1 Windenergieanlagen

Eine Windenergieanlage besteht im Wesentlichen aus einem Turm mitsamt Rotor sowie dem Maschinenhaus in dem die mechanischen Übertragungselemente und ein Generator untergebracht sind. Im Maschinenhaus befinden sich zudem die Schalt- und Schutzeinrichtungen und die für den Anschluss ans Verbundnetz benötigten Komponenten (z. B. Transformatoren). Ein Regelungs- und Betriebsführungssystem dient dazu auf äußere Einflüsse reagieren zu können und die WEA an gewünschte Erfordernisse wie beispielsweise eine bestimmte Leitungseinspeisung ins Netz anzupassen. [3]

Nachfolgende Abbildung 2-1 zeigt schematisch die Wirkungskette einer Windkraftanlage auf.

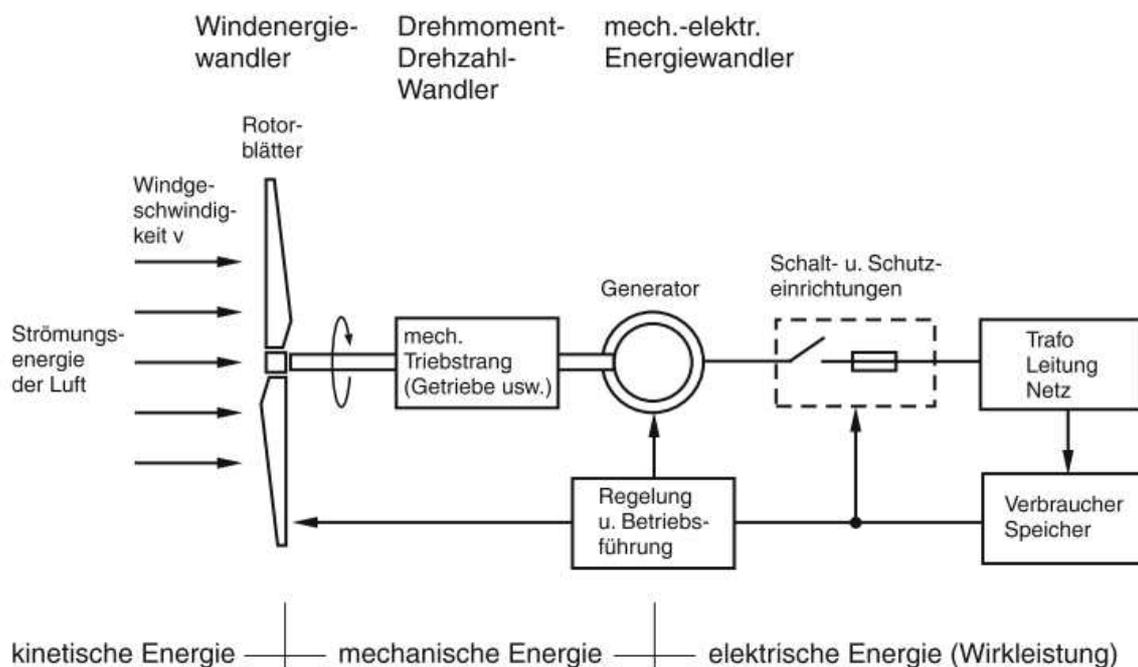


Abb. 2-1: Wirkungskette einer WEA [3]

Der Rotor wird durch den Wind angetrieben und treibt dadurch wiederum über die mechanischen Übertragungselemente, beispielsweise einem Getriebe, einen Generator an. Die Drehbewegung des Rotors wird durch diesen in elektrische Energie umgewandelt. Als Generatoren kommen hierbei meistens Synchron- oder Asynchronmaschinen zum Einsatz, wobei im Laufe dieser Arbeit die Synchronmaschine nicht weiter betrachtet wird. Als Rotoren kommen überwiegend Horizontalachsen-Rotoren in Propellerbauart zum Einsatz, weil diese über eine Veränderung der Rotorblattstellung um ihre Längsachse (auch Pitch-Regelung genannt) direkt die aus der Luft aufgenommene Strömungsenergie und damit die Rotordrehzahl und Leistungsabgabe der WEA beeinflussen können. Darüber hinaus bietet die Verstellung der Rotorblätter den wirksamsten Schutz gegen Überdrehzahl und zu hohen Windgeschwindigkeiten. [4]

2.2 Drehstrom-Asynchronmaschine

Asynchronmaschinen (ASM) gehören mit einem Anteil von über 75 % zu der wichtigsten Art von elektrischen Antrieben. Eine Drehstrom-Asynchronmaschine (DS-ASM) wird mit 3-phasigen Wechselstrom betrieben und kommt ab Leistungen von etwa 500 W zum Einsatz. Zu den drei relevantesten Ausführungsformen der DS-ASM gehören:

1. Drehstrom-Asynchronmaschine mit Schleifringläufer
2. Drehstrom-Asynchronmaschine mit Käfigläufer
3. Drehstrom-Asynchronmaschine mit Stromverdrängungsläufer

Eine DS-ASM besteht im Wesentlichen aus einem feststehenden Stator oder Ständer und dem sich drehenden Rotor, auch Läufer genannt. Diese sind jeweils mit drei symmetrischen Wicklungen (Strängen) u, v, w ausgestattet. Die Wicklungen sind hierbei um 120° zueinander versetzt. Der im Laufe dieser Arbeit eingesetzte Schleifringläufer unterscheidet sich dabei von den anderen Bauarten dadurch, dass seine Rotorwicklungen nicht kurzgeschlossen sind. Stattdessen werden diese über Schleifringe nach außen geführt.

Wird die im Stator liegende 3-strängige Wicklung an ein symmetrisches Spannungssystem angeschlossen, so fließen Strangströme i_s . Durch diese wird im Luftspalt zwischen Stator und Rotor ein Drehfeld erzeugt, welches mit der Synchrondrehzahl n_0

$$n_0 = \frac{f_n}{p} \quad (2-1)$$

umläuft. Hierbei ist f_n die Nennfrequenz und p die Polpaarzahl der Maschine.

Durch das Drehfeld werden im Rotor nach dem Induktionsgesetz Ströme induziert. Diese erzeugen wiederherum ein Magnetfeld, welches in Wechselwirkung mit dem Drehfeld ein Drehmoment M bildet. Nach der Lenz'schen Regel wirkt dies auf die Aufhebung der Stromursache hin. Solange die Drehzahl n also kleiner als die Synchrondrehzahl n_0 ist, wirkt ein Beschleunigungsmoment M_B , das unter Berücksichtigung einer mechanischen Last M_L sich wie folgt berechnen lässt:

$$M_B = M - M_L \quad (2-2)$$

Durch die Beschleunigung verringert sich die Drehzahldifferenz zwischen Drehfeld und Rotor, d.h. die Relativgeschwindigkeit $n_0 - n$ sinkt. Auf gleiche Weise sinkt der induzierte Rotorstrom, da dieser proportional zur Relativgeschwindigkeit ist. Sobald das Motormoment M und das Lastmoment M_L gleich groß sind, d. h. $M_B = 0$, ist der statische Arbeitspunkt erreicht. Dieser befindet sich im Motorbetrieb bei einer Drehzahl von $0 < n < n_0$. Die Abweichung der Motordrehzahl von der Synchrondrehzahl wird als Schlupf bezeichnet und berechnet sich folgendermaßen:

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} \quad (2-3)$$

Aus dem beschriebenen Verhalten ist auch der Name der Asynchronmaschine abgeleitet, da sie im Motorbetrieb immer dem Drehfeld hinterherlaufen muss um überhaupt ein Drehmoment erzeugen zu können, also asynchron zur Synchrondrehzahl betrieben werden muss.

[5]

2.2.1 ASG direkt am Netz

Eine der einfachsten Arten eine ASM als Asynchrongenerator (ASG) zu betreiben, ist die direkte Netzkopplung des Generators mit dem Verbundnetz.

Solche Anlagen werden seit Jahrzehnten eingesetzt und zeichnen sich vor allem durch ihren robusten Aufbau sowie ihren (besonders bei kleineren Anlagen) relativ geringen Anschaffungs- und Wartungskosten aus. Ein wesentlicher Nachteil dieses Systems ist jedoch, dass große Asynchrongeneratoren zugunsten ihres Wirkungsgrades mit einem geringen Nennschlupf konstruiert werden, was in Verbindung mit der Netzfrequenz f_{Netz} zu

fest eingepprägten Drehzahlen führt. Außerdem muss der zur Felderregung nötige Blindleistungsbedarf des ASG vom Netz bereitgestellt werden und kann nur durch zusätzlichen Aufwand mehr oder weniger kompensiert werden. [4]

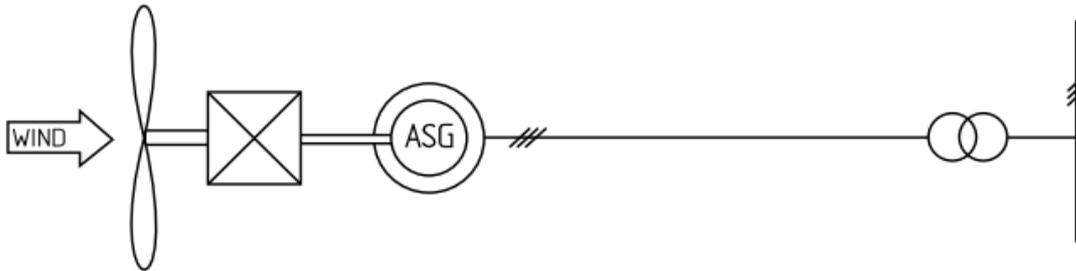


Abb. 2-2: Asynchronergenerator mit direkter Netzkopplung [4]

2.2.2 ASG mit Vollumrichter

Um einen regelbaren und drehzahlvariablen Betrieb einer Windenergieanlage zu ermöglichen, wird der Asynchronergenerator über einen nachgeschalteten Frequenzumrichter an das Verbundnetz angeschlossen. Ein Wechselstromgenerator, der mit einer variablen Drehzahl läuft, erzeugt einen Wechselstrom mit veränderlicher Frequenz. Diese wird durch den Frequenzumrichter auf die geforderte Netzfrequenz gebracht. Der Umrichter muss hierbei für die volle Leistung der ASM ausgelegt sein, woraus sich der Name Vollumrichter ableitet.

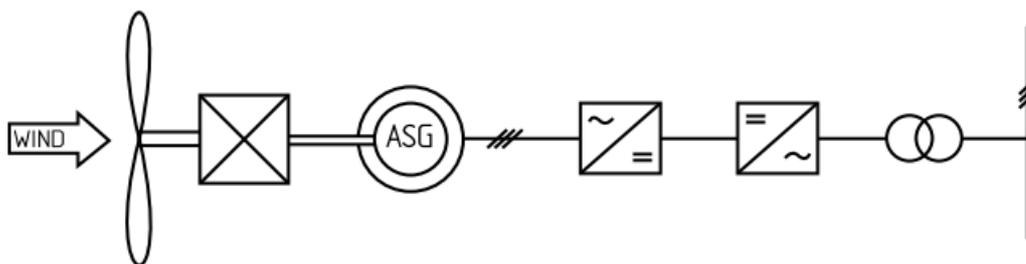


Abb. 2-3: ASG mit Vollumrichter nach [4]

Der große Vorteil von diesem Prinzip liegt in der frequenzmäßigen Entkopplung von Generator und Netz, was es erlaubt durch die Verschiebung der Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie der Asynchronmaschine den optimalen Arbeitspunkt einzustellen. Darüber hinaus ist eine Regelung der Netzblindleistung möglich und es kann auch Blindleistung für das Netz bereitgestellt werden. Der Nachteil einer solchen Anlage

sind die vergleichsweise hohen Kosten der Leistungselektronik, da diese auf die gesamte Leistung des ASG ausgelegt sein müssen.

2.2.3 DG-ASG mit Teilumrichter

Beim Konzept des doppelt gespeisten Asynchrongenerators (DG-ASG) kommen Schleifringläufermaschinen zum Einsatz, um die Rotorwicklungen zugänglich zu machen. Im Gegensatz zum Vollumrichter wird hier der Rotor über den Frequenzumrichter mit dem Netz verbunden, während der Stator wie beim ersten Konzept direkt an das Netz angeschlossen wird. Die Leistung- und Drehzahlregelung wird dabei über eine Beeinflussung des Rotorfeldes realisiert. Der große Vorteil dieses Systems liegt darin, dass über den Rotorkreis nur etwa ein Drittel der Generatormennleistung fließt. Dadurch kann der Umrichter wesentlich kleiner als im Vergleich zum Vollumrichterbetrieb ausgelegt werden, wodurch sowohl die Kosten als auch die Wirkungsgradverluste des Umrichters reduziert werden. Nachteilig an diesem Konzept ist jedoch, dass die geringere Umrichterleistung auch die Blindleistungsbereitstellung begrenzt. Auch die einstellbaren Drehzahlbereiche sind auf etwa $\pm 30\%$ der synchronen Drehzahl beschränkt. [3]

Als Umrichter kommen dabei meist sogenannte Spannungszwischenkreisumrichter, kurz U-Umrichter, zum Einsatz (vgl. Abschnitt 2.3), weil diese in Bezug auf den Drehzahlbereich einem Direktumrichter überlegen sind.

[4]

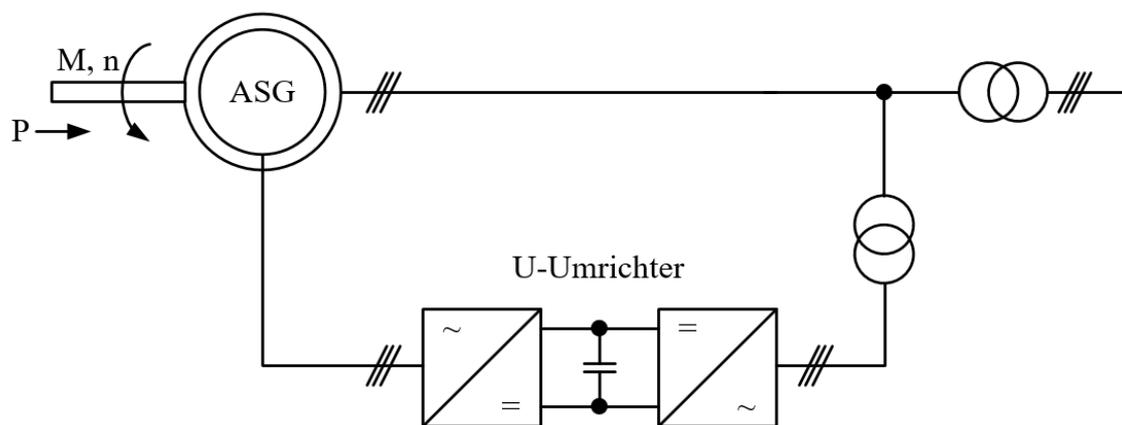


Abb. 2-4: DG-ASG mit Teilumrichter

2.3 Umrichter

Umrichter bzw. Stromrichter sind leistungselektronische Bauteile, die zur Umformung von elektrischer Energie eingesetzt werden. Je nach Art der Umformung werden Umrichter dabei in vier Grundtypen eingeteilt. [6]

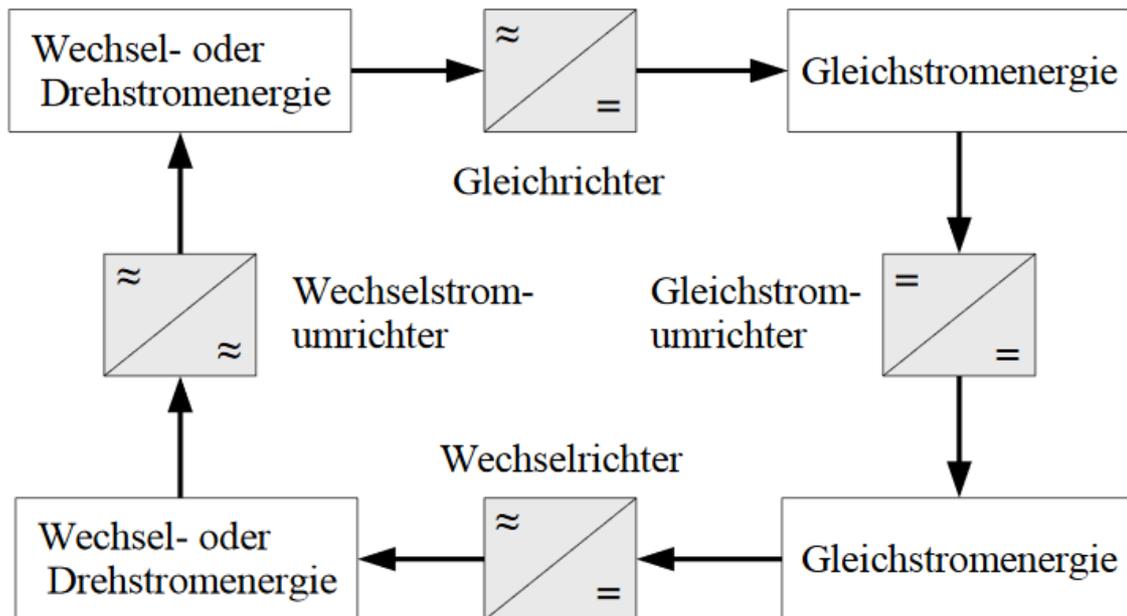


Abb. 2-5: Umrichter Typen [6]

- **Gleichrichter:** zur Umformung von Wechselstrom (\approx) in Gleichstrom ($=$)
- **Wechselrichter:** zur Umformung von Gleich- in Wechselstrom
- **Gleichstrom-Umrichter:** zur Umformung von Gleichstrom mit gegebener Spannung und Polarität in Gleichstrom anderer Spannung/Polarität
- **Wechselstrom-Umrichter:** zur Umformung von Spannung, Frequenz und/oder Phasenzahl einer gegebenen Wechselspannung

Anstelle der oben beschriebenen Direktumrichter kommt im Versuchsstand ein sogenannter Spannungszwischenkreisumrichter zum Einsatz. Bei dieser Art von Umrichtern wird ein Gleichrichter über einen sogenannten Gleichspannungszwischenkreis mit einem Wechselrichter verbunden. Der Zwischenkreis wird aus Zwischenkreiskondensatoren gebildet. Diese glätten die vom Gleichrichter erzeugte Spannung und speichern die elektrische Energie, die dann wiederum vom Wechselrichter in eine Wechselspannung der gewünschten Art (Amplitude, Frequenz usw.) gewandelt wird. [6]

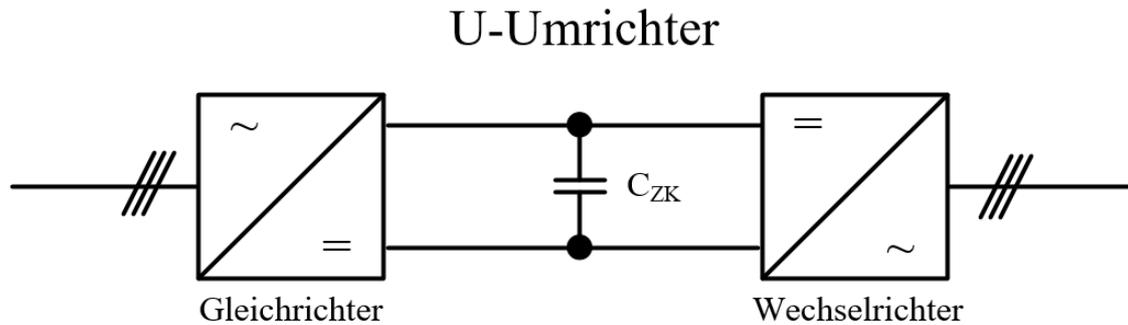


Abb. 2-6: U-Umrichter

Bremschopper

Ein Bremschopper dient zum Schutz des Zwischenkreises vor gefährlichen Überspannungen. Diese entstehen, wenn ein am Umrichter angeschlossener Motor im generatorischen Betrieb arbeitet und Energie in den Zwischenkreis zurückspeist. Kann diese Energie nicht in Netz eingespeist werden, steigt die Zwischenkreisspannung U_{ZK} in Abhängigkeit der ihr zugeführten Energie ΔW und der Kapazität des Zwischenkreises C_{ZK} .

$$\Delta U_{ZK} = \sqrt{\frac{2\Delta W}{C_{ZK}}} \quad (2-4)$$

Um Überspannungen zu vermeiden, muss die zugeführte Zwischenkreisenergie abgebaut werden. Dazu wird, parallel zu den Zwischenkreiskondensatoren, ein Bremswiderstand in Reihe mit einem gepulst geschalteten Transistorsteller (Bremschopper) geschaltet, über den überschüssige Energie in Wärme umgewandelt werden kann.

[6]

2.4 Elektromagnetische Verträglichkeit

Unter elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) versteht man im Allgemeinen die Fähigkeit von elektrischen Geräten und Anlagen andere Geräte nicht durch ungewünschte elektrische oder elektromagnetische Effekte zu stören bzw. von diesen gestört zu werden.

Die Übertragung solcher Störsignale vom Sender (Störquelle) zum Empfänger (Störsenke) kann dabei auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen. Die erste Kopplungsart zwischen

Sender und Empfänger stellt die sogenannte galvanische Kopplung dar. Diese treten auf, wenn Quelle und Senke über Leitungsimpedanzen Z_K miteinander verbunden sind. Unter induktiven Kopplungen wird die gegenseitige Beeinflussung von Leitern über (zeitveränderliche) magnetische Flüsse verstanden. Diese Flüsse entstehen durch stromdurchflossene Leiter und induzieren ihrerseits in benachbarten Leitern eine Störspannung. Neben der gegenseitigen Beeinflussung durch magnetische Felder existiert auch eine Beeinflussung über elektrische Felder. Dies wird kapazitive Kopplung genannt und tritt zwischen benachbarten Leitern unterschiedlichen Potentials auf. Ein solcher Potenzialunterschied, z. B. zwischen Signal- und Hauptstromkreis, erzeugt ähnlich wie bei Kondensatoren zwischen den Leitern ein elektrisches Feld. Dadurch werden Ladungen von einem Stromkreis in den anderen verschoben. Als vierte Kopplungsart ist die sogenannte Strahlungskopplung zu nennen. Bei dieser Art der Kopplung wirken elektrische Leiter wie eine Antenne und empfangen elektromagnetische Strahlung, beispielsweise von Radio- oder Funksignalen. Diese führen dann zu Störsignalen auf den Leitern.

[3] [6]

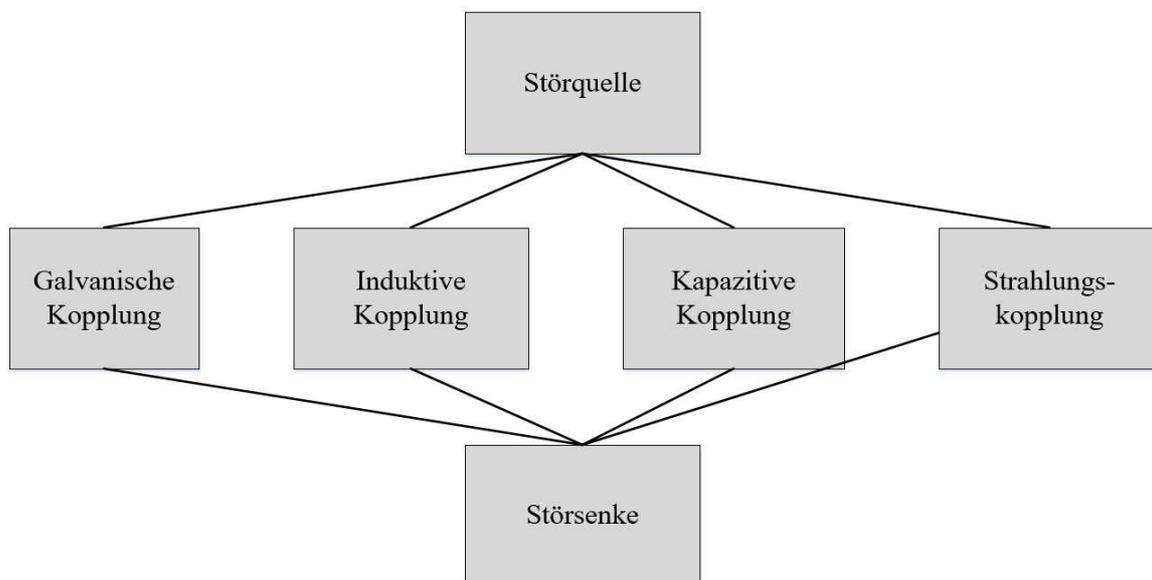


Abb. 2-7: EMV Kopplungspfade

Um EMV bedingte Störungen so weit wie möglich zu vermeiden, und problemfrei die gewünschte Funktion herstellen zu können, müssen bei der Projektierung und den Aufbau elektrischer Anlagen, insbesondere der Schaltschränke, gewisse EMV-Aufbau Richtlinien beachtet werden. Zu diesen gehören unter anderem:

- Räumliche Trennung von Störsenken (z. B. Signalelektronik) und Störquellen (z. B. Umrichter)
- Potenzialausgleich zwischen allen metallischen Anbauteilen des Schaltschranks (Erzeugung eines Faraday'schen Käfigs)
- EMV- bzw. PE-Schiene möglichst großflächig mit den Schrankrahmen zu verbinden
- Metallische Gehäuse der im Schrank verbauten Komponenten gut leitend mit EMV- und PE-Schiene zu verbinden
- Entstörglieder für Schütze und Relais vorzusehen
- Räumliche Trennung von Lastleitungen und Signalleitungen
- Leitungen möglichst nahe an geerdeten Gehäuseteilen zu verlegen
- Schirmung von Signal- und Motorleitungen
- Reserveadern von Signal-/Datenleitungen zu erden
- Verwendung von entsprechenden Filtern auf Netz- und Maschinenseite (z. B. Netzdrossel, Ausgangsdrossel, Sinusfilter usw.)

[6] [7]

3 Realisierung

Das Kapitel Realisierung beschreibt zunächst das Konzept und den grundlegenden Aufbau des Laborversuchsstandes. Im Anschluss daran wird eine Parameteridentifizierung der vorhandenen Asynchronmaschine durchgeführt. Zum Abschluss des Kapitels werden die Unterschiede zwischen dem alten und neuen Laborversuchsstand erläutert, die zum Teil durch den Einsatz neuer Hard- und Software bedingt sind oder aufgrund von Optimierungsmaßnahmen entstanden sind.

3.1 Aufbau des Versuchsstandes

Vereinfacht ausgedrückt besteht der Versuchsstand aus zwei miteinander gekoppelten elektrischen Maschinen, wodurch eine reale WEA simuliert werden kann. Als Generator kommt eine Asynchronmaschine (Arbeitsmaschine) zum Einsatz, die von einer Gleichstrommaschine (GM) angetrieben wird. Die GM dient zur Simulation einer echten WEA. Die in der Realität vom Rotor über die mechanischen Übertragungselemente an den Generator abgegebene mechanische Leistung wird hier direkt von der GM eingepreßt. Dazu kommen noch weitere für den Betrieb nötige Komponenten, die den Versuchsstand in fünf räumlich voneinander getrennte Bereiche aufteilen:

- **Labortisch**, der die Netzanschlüsse für die gesamte Anlage bereitstellt.
- **Schaltschrank ASM**, indem sowohl die leistungselektronischen Komponenten des Umrichters, als auch weitere benötigte Komponenten für die Steuerung und Regelung der ASM wie Sicherungen, Messwandler, Netzteile, Schütze und Platinen zur Signalanpassung integriert sind.
- **Schaltschrank GM**, beinhaltet ähnlich wie der Schaltschrank der ASM die erforderlichen elektronischen Komponenten für die Steuerung und Regelung der Gleichstrommaschine.
- **Maschinentisch**, auf dem die ASM als Arbeitsmaschine und die GM als Antriebsmaschine befestigt sind. Beide Maschinen sind über eine Messwelle zur Aufnahme von Drehzahl und Drehmoment starr miteinander verkoppelt.
- **Arbeitsstation**, bestehend aus einem dSPACE-Regelungssystem und einem PC-Arbeitsplatz zur Steuerung des Versuchsstandes.

Diese Bereiche sind in den folgenden Abbildungen 3-1 und 3-2 dargestellt.

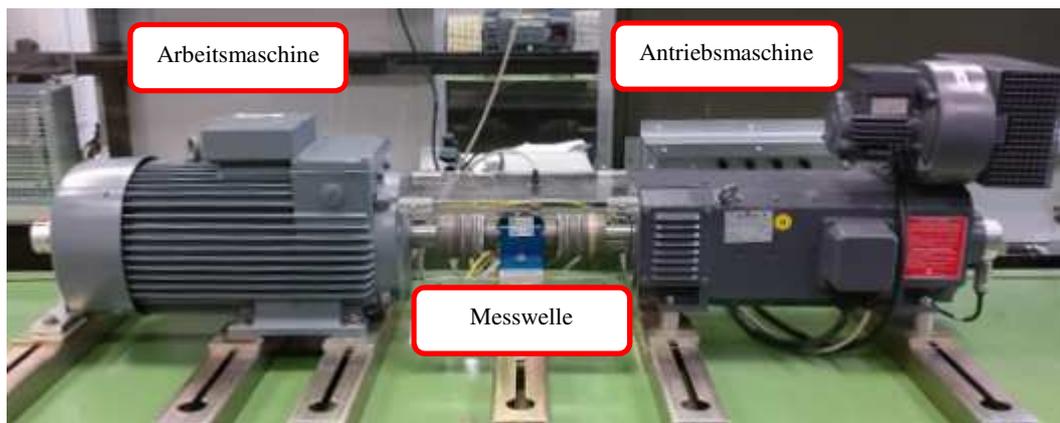


Abb. 3-1: Maschinentisch

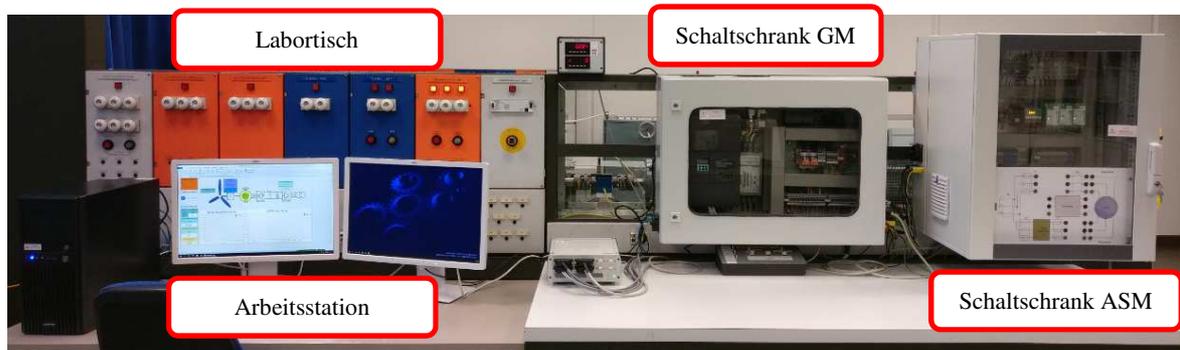


Abb. 3-2: Versuchsstand

Das auf Seite 16 dargestellte Blockdiagramm (Abbildung 3-3) zeigt den grundlegenden Aufbau des Versuchsstandes, wobei zur besseren Übersichtlichkeit nicht alle verbauten Komponenten bzw. die Verbindungen zwischen diesen abgebildet sind.

Die gesamte Anlage wird über den PC der Arbeitsstation gesteuert. Über diesen Bedienplatz können je nach durchzuführendem Versuch verschiedene Projekte angewählt werden, mit denen dann die jeweils benötigten Steuerungseingaben getätigt werden können. Diese werden wiederum von einer dSPACE-MicroLabBox in entsprechende Steuersignale für die GM bzw. ASM umgesetzt. Dabei gibt es jedoch Unterschiede im Signalfluss zwischen dSPACE und den jeweiligen Schaltschränken der Arbeits- bzw. Antriebsmaschine. Während bei der Arbeitsmaschine die gesamte Steuerung und Regelung durch die MicroLabBox durchgeführt wird, was bedeutet, dass sowohl Stellsignale ausgegeben als auch Messwerte eingelesen werden müssen, erfolgt die Regelung der Antriebsmaschine über den im Schaltschrank verbauten Stromrichter. Über die

Arbeitsstation wird lediglich die Regelart der Antriebsmaschine vorgegeben (Drehzahl oder Drehmoment) sowie der dazugehörige Sollwert.

Die Entwicklung und der Aufbau der gesamten Antriebsseite inklusive des Schaltschranks der GM und die Realisierung der Drehzahl- und Drehmomentregelung sind im Verlauf einer vorangegangenen Arbeit entstanden und es wird in dieser Arbeit nur auf die benötigten Schnittstellen zwischen Antriebsseite und dem restlichen Laborstand sowie auf notwendige Änderungen des Stromrichter-Programms eingegangen. Die genaue Implementierung der Antriebsseite kann in [8] nachgesehen werden.

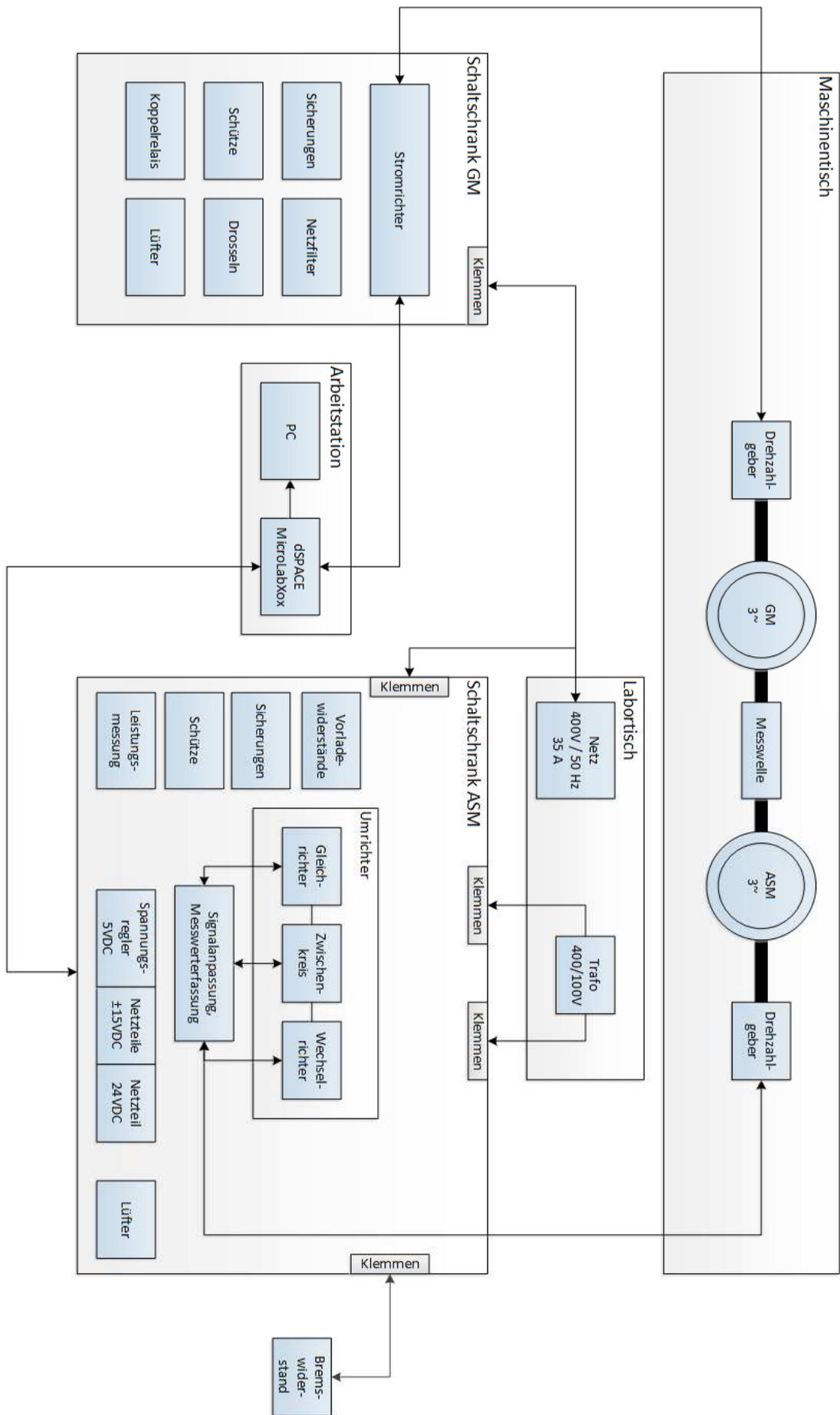


Abb. 3-3: Blockdiagramm Versuchsstand

3.2 Schaltschrank

Als Grundlage für die Entwicklung des Schaltschranklayouts diente ein bereits vorhandenes 3-teiliges Wandgehäuse (EL 2265.605) der Firma Rittal, welches sich nach Prüfung der technischen Dokumentation als geeignet erwiesen hat.

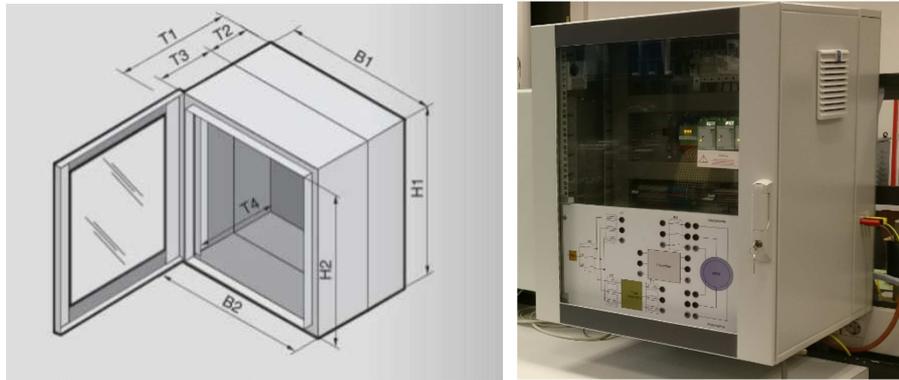


Abb. 3-4: Schaltschrank Zeichnung [9] und Laboraufbau

In der Abb. 3-4 lässt sich die Aufteilung des Schaltschranks in drei Teile erkennen. Die Glastür zum Verschließen des Schrankes, ein schwenkbarer vorderer Bereich T3 und der hintere Bereich T2. Aufgrund der Aufteilung des Schaltschranks und der Anzahl an benötigten Komponenten ist es sinnvoll, das Schaltschranklayout ebenfalls auf mehrere Ebenen aufzuteilen. Diese Ebenen sind die Grundplatte im hinteren Bereich, die Elektronikplatte im vorderen Bereich sowie eine zwischen der Glastür und dem Bereich T3 angebrachte Stecktafel für den Anschluss von Laborleitungen.

Aus Platzgründen und um den Studierenden einen einfachen Zugang zum Schaltschrank zu ermöglichen, ist dieser am Rahmen des Labortisches befestigt. Deshalb kann keine Standard Wandbefestigung von Rittal eingesetzt werden. Deswegen wurde eine entsprechende Halterung konstruiert und von der zentralen Laborwerkstatt des Departments Maschinenbau der HAW gefertigt. Die technischen Zeichnungen dazu befinden sich im Anhang dieser Arbeit.

3.2.1 Grundplatte

Die Grundplatte befindet sich im hinteren Bereich des Schaltschranks. Auf ihr befindet sich mit den Komponenten des Umrichters die Leistungselektronik des Versuchsstandes. Den Aufbau der Grundplatte zeigt Abb. 3-5.

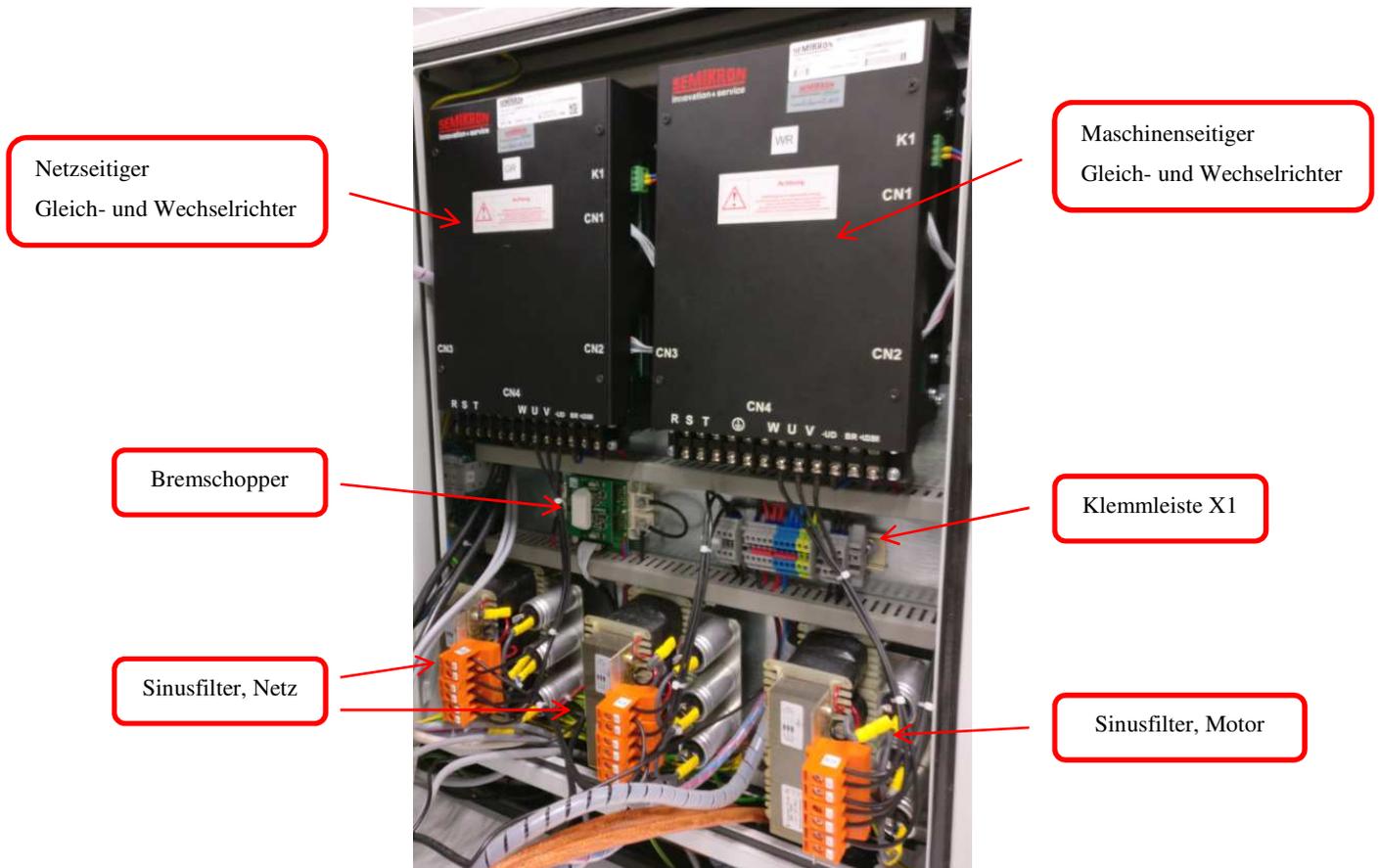


Abb. 3-5: Grundplatte

Die Umrichterkomponenten sind aus EMV-Gründen auf der Grundplatte angebracht, weil diese hier als Störquelle auftreten. Die Störer werden so einerseits räumlich von der Signalelektronik (Störsenke) auf der Elektronikplatte getrennt und andererseits dient so die Elektronikplatte selbst als zusätzliche Abschirmung zwischen Leistungs- und Signalelektronik. Zu den Umrichterkomponenten gehören der netzseitige Gleich- und Wechselrichter (NWR), der maschinenseitige Gleich- und Wechselrichter (MWR), der Bremschopper sowie die netz- und motorseitigen Sinusfilter. Die Anschlüsse der einzelnen Komponenten sind auf eine Klemmleiste ausgeführt, die als Schnittstelle nach außen dient. Eine (auf obiger Abbildung nicht erkennbare) PE-Schiene dient als zentraler Erdungspunkt, der alle Komponenten des Schaltschranks miteinander und mit dem Erdungsanschluss des Labortisches verbindet.

3.2.2 Elektronikplatte

Die Elektronikplatte befindet sich im vorderen Bereich des Schaltschranks (T3). Auf ihr befinden sich hauptsächlich die Steuer- und Messelektronik des Versuchsstandes.

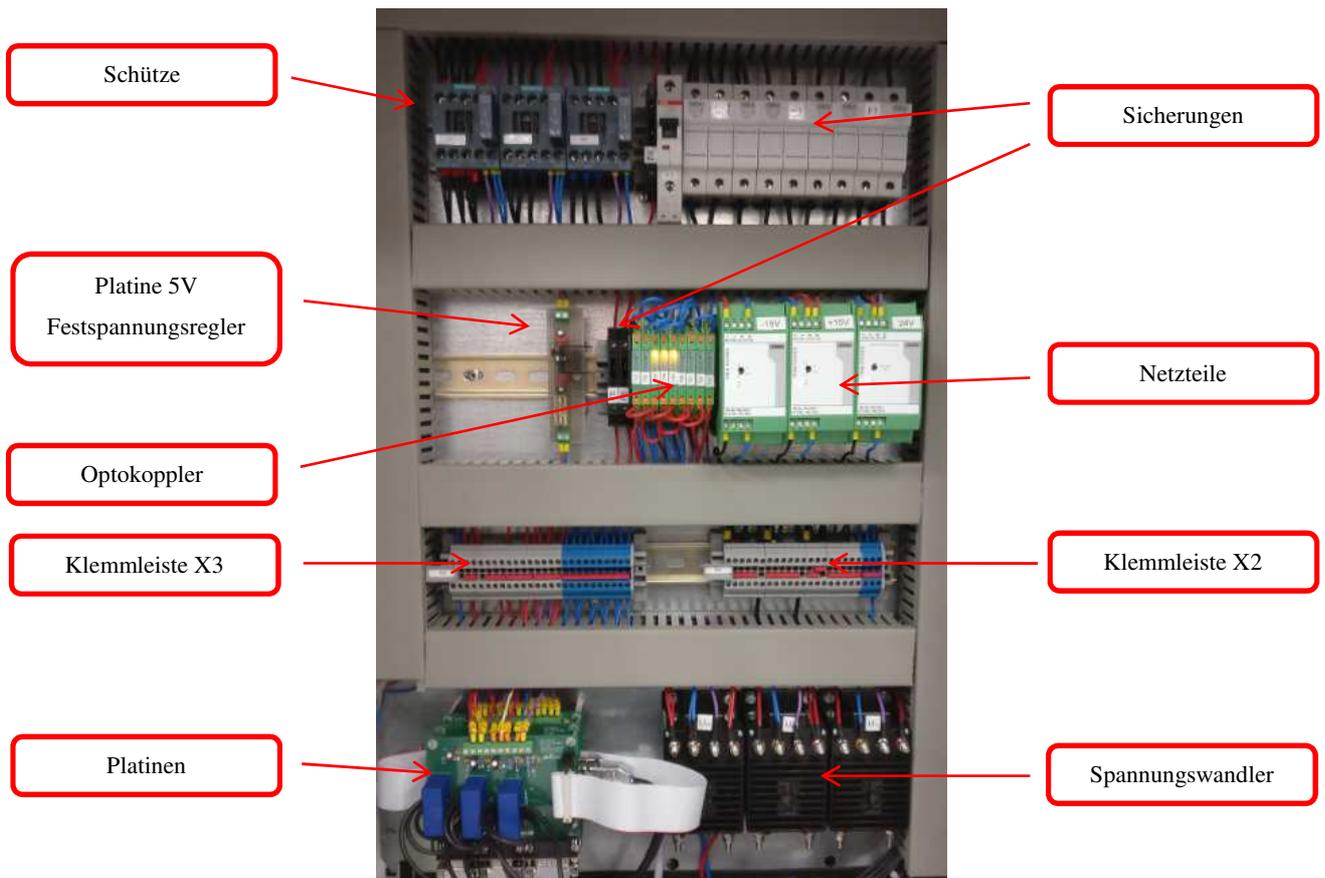


Abb. 3-6: Elektronikplatte

Im oberen Bereich der Elektronikplatte befinden sich die Sicherungen und Schütze des Hauptstromkreises (230 VAC bzw. 400 VAC). Darunter befinden sich Netzteile, die die nötigen Gleichspannungen der Steuerstromkreise herstellen (5 V, ± 15 V sowie 24 V DC). Daneben befinden sich Optokoppler, mit denen eine Signalübertragung zwischen den Steuerstromkreisen möglich ist. Die Verteilung des Hauptstromkreises befindet sich auf der Klemmleiste X2, die der Steuerstromkreise auf Klemmleiste X3. Im unteren Bereich befinden sich Spannungswandler für die Netz- und Zwischenkreisspannungen und drei übereinander angeordnete Platinen, auf denen sich weitere Messelektronik befindet. Daneben dienen die Platinen als Schnittstelle zur Arbeitsstation.

Auf der Rückseite der Elektronikplatte befinden sich die drei Vorladewiderstände des Umrichters. Diese sind unter einer Plexiglasscheibe angebracht, die im Falle einer thermischen Überlastung der Widerstände die Leistungselektronik schützen soll.

Um EMV-Beeinflussungen zwischen den verschiedenen Spannungskreisen möglichst gering zu halten, sind die Verbindungsleitungen des Hauptstromkreises überwiegend auf

der rechten Seite der Montageplatte verlegt, während die Steuerstromkreise weitestgehend auf der linken Seite verlegt sind.

3.2.3 Stecktafel

Wie bereits in der Aufgabenstellung erläutert sollen am Versuchsstand drei unterschiedliche Einspeisevarianten untersucht werden.

1. ASG direkt am Netz
2. ASG mit Vollumrichter
3. DG-ASG mit Teilumrichter

Um möglichst einfach zwischen den unterschiedlichen Generatorsystemen wechseln zu können, ist der Schaltschrank der Asynchronmaschine mit einer Stecktafel ausgestattet. Darüber kann die Maschine, entsprechend der gewünschten Variante, schnell neu verdrahtet werden. Die Anschlüsse selbst sind mithilfe von Laborbuchsen berührungssicher ausgeführt und mit einer Folie gekennzeichnet, die die wichtigsten Elemente der Verschaltung zwischen Stecktafel und Laborversuchsstand benennt.

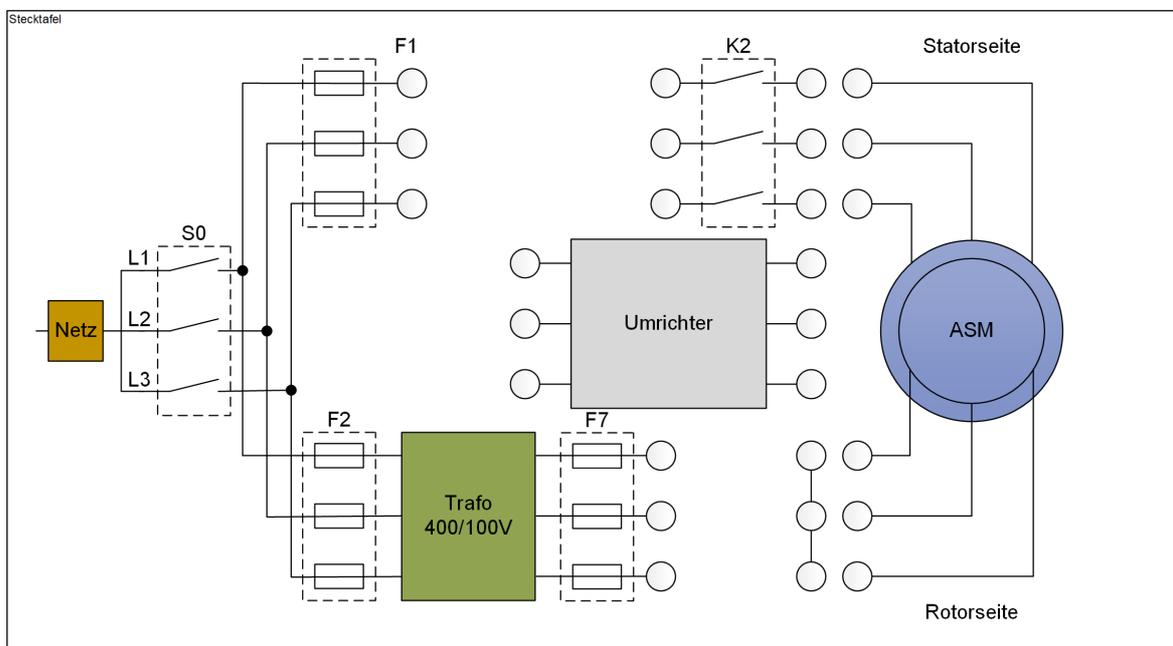


Abb. 3-7: Stecktafel

3.2.4 Externe Anschlüsse

Neben der Stecktafel verfügt der Schaltschrank noch über weitere Anschlüsse nach außen, die ebenfalls mit berührungssicheren Laborbuchsen realisiert sind. Zu diesen externen Anschlüssen gehören auf der linken Seite des Schrankes die Anschlüsse für die Netzversorgungsspannung (400 V, 50 Hz) mit dem dazugehörigen Hauptschalter S0. Dieser dient zur Freischaltung der internen Spannungsversorgung.

Auf der rechten Seite befinden sich Anschlüsse für den Bremswiderstand des Umrichters, der aufgrund seiner Größe außerhalb des Schaltschranks platziert werden muss.

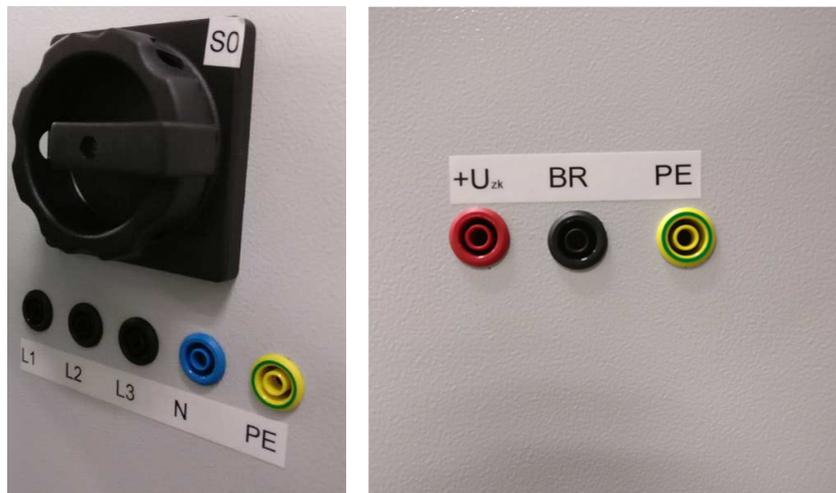


Abb. 3-8: Anschlüsse Netz- und Bremswiderstand

3.3 Identifizierung der netz- und maschinenseitigen Größen

Für eine erfolgreiche Regelung der ASM ist es erforderlich, bestimmte netz- und maschinenseitige Parameter zu kennen. Diese können zum Teil aus den jeweiligen Maschinendatenblättern entnommen werden, während einige berechnet werden müssen.

Die aus den Datenblättern bekannten Werte für die eingesetzte Asynchronmaschine vom Typ SPER 132 MX4 SW TPM HW der VEM motors GmbH sind in Tabelle 3-1 und Tabelle 3-2 dargestellt.

Tabelle 3-1: Nenndaten SPER 132 MX4 SW TPM HW [10]

Bezeichnung	Wert
Nennleistung (P_{Nenn})	5 kW
Polpaarzahl (p)	2
Nennfrequenz (f_n)	50 Hz
Nenndrehzahl (n_{Nenn})	1450 min^{-1}
Nennspannung (U_{Nenn}) in Y	400 V
Nennstrom (I_{Nenn}) in Y	11 A
Nennleistungsfaktor ($\cos(\phi)_{Nenn}$)	0,79

Daraus ergeben sich das Nenndrehmoment und der Nennschlupf wie folgt [11] :

$$M_{Nenn} = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot n_{Nenn}} = 32,9 \text{ Nm} \quad (3-1)$$

$$s_{nenn} = \frac{n_0 - n_{Nenn}}{n_0} = 0,033 \quad (3-2)$$

Mit $n_0 = \text{synchrone Drehzahl} = \frac{f_n}{p} = 1500 \text{ min}^{-1}$

Tabelle 3-2: Statorseitig bezogene Parameter der ASM [12]

Bezeichnung	Wert
Ständerwiderstand (R_1)	1,0446 Ω
Läuferwiderstand (R_2)	0,757 Ω
Ständerstreureaktanz ($X_{\sigma 1}$)	1,293 Ω
Läuferstreureaktanz ($X_{\sigma 2}$)	1,818 Ω
Hauptreaktanz (X_h)	39,486 Ω

Die Kapazität des Zwischenkreises C_{ZK} berechnet sich aus den Einzelkapazitäten des NWRs und MWRs und beträgt 1,88 mF [13].

3.3.1 Parameteridentifizierung des Netzes

Für das Labor erfolgte die Parameteridentifizierung des Netzes bereits im Rahmen einer Vorarbeit [14]. Die dabei ermittelten Gesamtgrößen für den netzseitigen Widerstand $R_g = 147,5 \text{ m}\Omega$ und die dazugehörige Induktivität $L_g = 4,1 \text{ mH}$ müssen jedoch korrigiert werden, weil zum Zeitpunkt der Parameteridentifizierung nur ein Sinusfilter vom Typ DEOKWN 125/125/41,5 der Firma Tauscher als Netzfilter zum Einsatz gekommen ist. Beim neuen Versuchsstand werden allerdings zwei Filter des gleichen Typs als eine Reihenschaltung von Netzdrosseln, d. h. mit abgeklemmten Kondensatoren, verwendet. In der nachfolgenden Tabelle sind die Werte eines Sinusfilters für die Identifizierung angegeben.

Tabelle 3-3: Kennwerte Sinusfilter [15] [16]

Bezeichnung	Wert
Filterwiderstand (R_f)	64,8 m Ω
Filterinduktivität (L_f)	4,1 mH

Aufgrund der Reihenschaltung ergeben sich die neuen Gesamtgrößen für das Netz aus der Addition der alten Gesamtgrößen mit den entsprechenden Kenngrößen des zweiten Filters.

$$R_g = 147,5 \text{ m}\Omega + 64,8 \text{ m}\Omega = 212,3 \text{ m}\Omega \quad (3-3)$$

$$L_g = 4,1 \text{ mH} + 4,1 \text{ mH} = 8,2 \text{ mH} \quad (3-4)$$

3.3.2 Parameteridentifizierung der ASM

Zur Überprüfung der aus den Datenblättern bekannten maschinenseitigen Parameter können diese auch messtechnisch bestimmt werden. Nachfolgend wird die an der realen Maschine durchgeführte Parameterermittlung gezeigt.

Für den stationären Betrieb der ASM lässt sich dafür das in Abbildung 3-9 dargestellte einphasiges Ersatzschaltbild zugrunde legen.

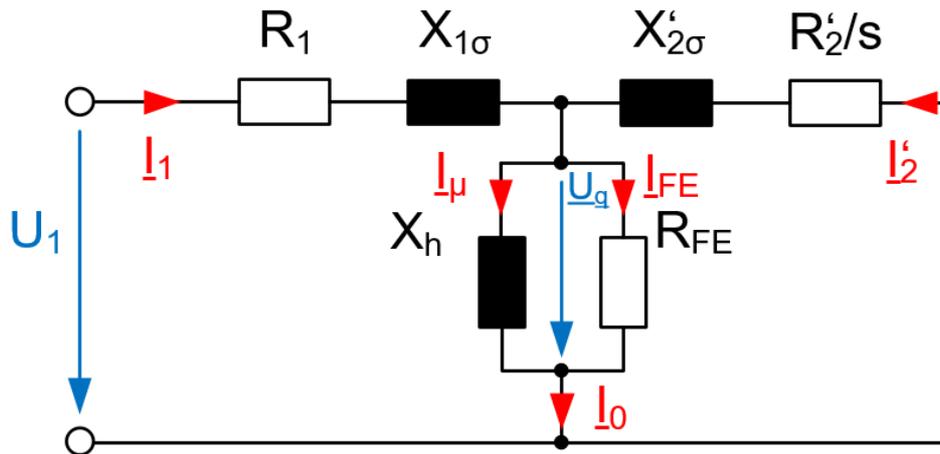


Abb. 3-9: Einphasiges Ersatzschaltbild der ASM [17]

Mit: \underline{I}_1 = Ständerstrom, \underline{I}_2 = Läuferstrom, \underline{I}_μ = Magnetisierungsstrom, \underline{I}_{FE} = Eisenstrom, \underline{I}_0 = Eisen- und Magnetisierungsstrom, R_1 = Ständerwicklungswiderstand, R'_2 = Läuferwiderstand, R_{FE} = Eisenwiderstand, \underline{U}_q = induzierte Hauptfeldspannung, \underline{U}_1 = Ständerspannung, $X_{\sigma 1}$ = Ständerstreureaktanz, $X'_{\sigma 2}$ = Läuferstreureaktanz, X_h = Hauptreaktanz

Der Ständerwiderstand lässt sich mit Gleichspannung messen. Hierbei ist zu beachten, dass die Ständerwicklungen bei der eingesetzten Asynchronmaschine in Stern geschaltet sind und daher die Widerstandsmessung über zwei Wicklungen erfolgt.

$$R_{12}(T_{20}) = 1,7 \, \Omega \quad (3-5)$$

$$R_1(T_{20}) = \frac{R_{12}}{2} = 0,85 \, \Omega \quad (3-6)$$

Umgerechnet auf Betriebstemperatur ergibt sich:

$$R_1 = R_1(T_{20}) \cdot (1 + \alpha_{20} \cdot (T - T_{20})) = 1,03 \, \Omega \quad (3-7)$$

T_{20} = Raumtemperatur = 20°C und α_{20} = Temperaturkoeffizient (für Kupfer $3,93 \cdot 10^{-3} \frac{1}{K}$)

Leerlaufversuch

Im Leerlaufversuch braucht der Rotorkreis nicht berücksichtigt zu werden, weil die elektrische Rotorkreisfrequenz nahezu identisch mit der Synchrodrehzahl ist. Das bedeutet, dass R'_2/s gegen unendlich geht und dadurch nur ein minimaler Strom im

Rotorkreis fließt. Zusätzlich wird beim Leerlaufversuch die Ständerstreureaktanz vernachlässigt, wodurch sich das Ersatzschaltbild folgendermaßen vereinfacht.

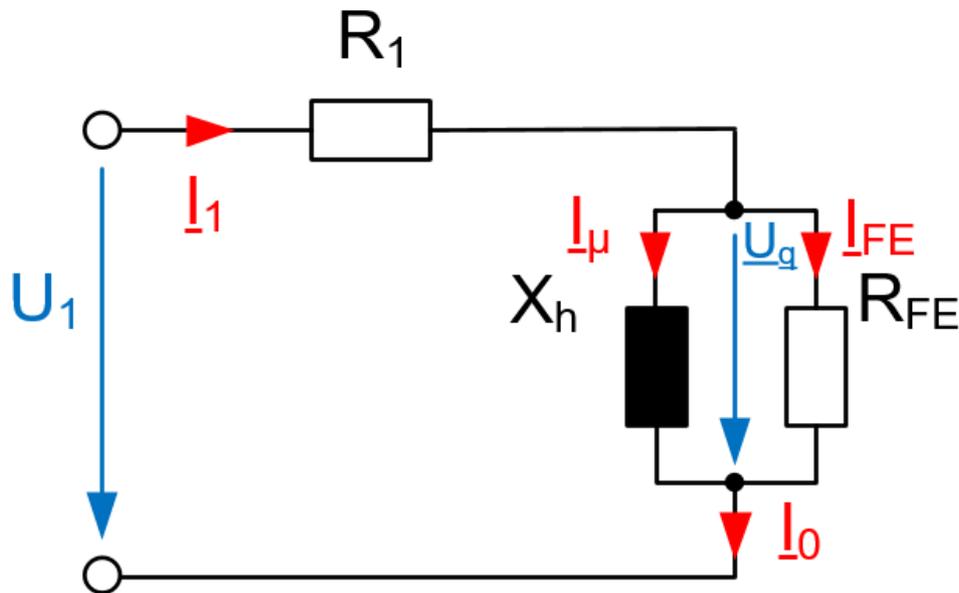


Abb. 3-10: Ersatzschaltbild ASM Leerlaufversuch (vgl. Abb. 3-9)

Während des Versuches ist die eingespeiste Leistung (P_0), eine Außenleiterspannung (U_{12}) sowie der Ständerstrom einer Phase (I_1) zu messen. [18]

Die nachfolgende Tabelle zeigt die aufgenommene Messreihe.

Tabelle 3-4: Messreihe Leerlaufversuch

Gemessene Größen			Berechnete Größen			
U_{12} [V]	I_1 [A]	P_0 [W]	$P_{FE+Reib}$ [W]	$P_{1,CU}$ [W]	U_{12}^2 [V ²]	$\cos(\varphi)$
130	1,8	250	239,95	10,05	16900	0,62
160	2	260	247,59	12,4	25600	0,47
190	2,2	265	249,99	15,01	36100	0,37
220	2,5	280	260,62	19,38	48400	0,29
250	2,8	310	285,69	24,31	62500	0,26
280	3,2	340	308,24	31,76	78400	0,22
310	3,65	355	313,68	41,32	96100	0,18
340	4,2	392	337,3	54,7	115600	0,16
370	5,1	453	372,34	80,66	136900	0,14
400	6,5	575	444	131,03	160000	0,13

Der Leistungsfaktor $\cos(\varphi)$ ergibt sich folgendermaßen:

$$\cos(\varphi) = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot U_{12} \cdot I_0} \quad (3-8)$$

$P_{1,CU}$ stellt die Kupferverluste dar, welche von den Ständerwicklungen in Wärme umgesetzt werden. Sie lassen sich folgendermaßen berechnen:

$$P_{1,CU} = 3 \cdot I_1^2 \cdot R_1 \quad (3-9)$$

Die Eisen- und Reibungsverluste $P_{FE+Reib}$ lassen sich dann aus der Differenz der im Leerlauf eingespeisten Leistung P_0 und der Kupferverlustleistung $P_{1,CU}$ ermitteln.

$$P_{FE+Reib} = P_0 - P_{1,CU} \quad (3-10)$$

Um die Eisenverluste von den Reibungsverlusten zu trennen, wird die Leistung $P_{FE+Reib}$ in Abhängigkeit der Spannung zum Quadrat aufgezeichnet und anschließend die Regressionsgerade bestimmt.

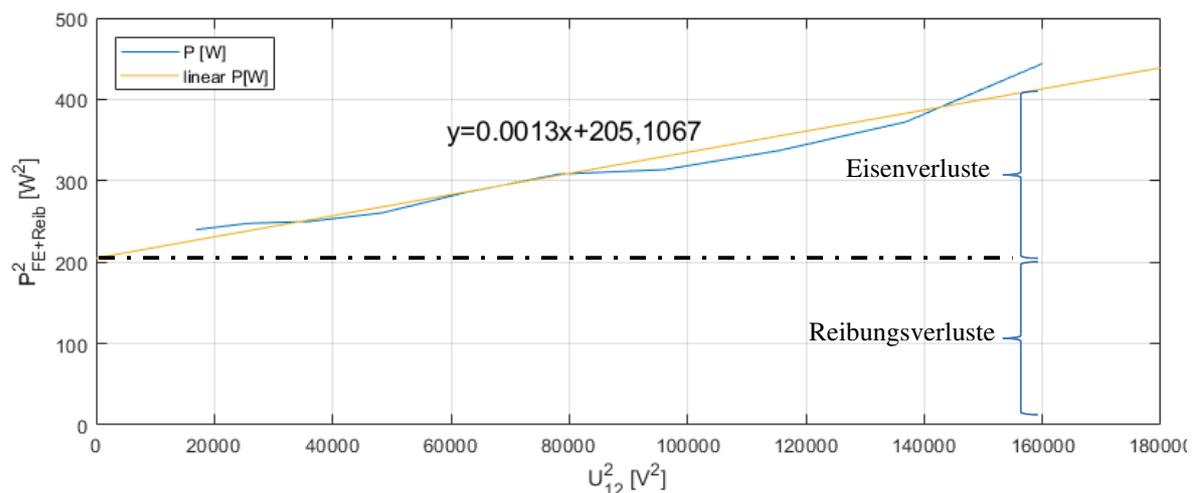


Abb. 3-11: Eisen- und Reibungsverluste

Wie in Abb. 3-11 veranschaulicht, ergibt sich die Reibungsverlustleistung aus dem Y-Achsenabschnitt der Regressionsgeraden und beträgt damit 205,11 W. Die Eisenverluste gehen dann aus der Differenz hervor:

$$P_{FE} = P_{FE+Reib} - P_{Reib} \quad (3-11)$$

Dadurch resultiert für den Nennbetrieb ($U_{12} = 400V$) eine Eisenverlustleistung von:

$$P_{FE} = 413,11W - 205,11W = 208W \quad (3-12)$$

Damit lässt sich nun der Eisenwiderstand

$$R_{FE} = \frac{\left(\frac{U_{12}}{\sqrt{3}} - U_{R1}\right)^2}{P_{Fe}} = 724,8\Omega \quad (3-13)$$

mit

$$U_{R1} = I_0 \cdot R_1 = 6,71V \quad (3-14)$$

und die Hauptreaktanz berechnen.

$$X_\mu = \frac{\frac{U_{12}}{\sqrt{3}} - U_{R1}}{I_\mu} = 34,5\Omega \quad (3-15)$$

$$I_\mu = \sqrt{I_0^2 - I_{FE}^2} \text{ mit } I_{FE} = \frac{\frac{U_{12}}{\sqrt{3}} - U_{R1}}{R_{FE}} \quad (3-16)$$

Damit ergibt sich nach [18] die Hauptinduktivität zu:

$$L_h = \frac{X_h}{\omega_N} = \frac{X_\mu}{\omega_N} = \frac{34,5\Omega}{2 \cdot \pi \cdot 50\text{Hz}} = 109,81\text{mH} \quad (3-17)$$

Kurzschlussversuch

Der Kurzschlussversuch wird mit festgesetztem Rotor durchgeführt, wodurch die gleichen Bedingungen vorliegen, wie im ersten Moment des Anlaufens einer Asynchronmaschine (Schlupf $s = 1$). Im Ersatzschaltbild können die Querimpedanzen (X_h und R_{FE}) vernachlässigt werden, da diese wesentlich größer als die Längsimpedanzen sind. [18]

Nach Zusammenfassung der Längsimpedanzen entsteht folgendes Ersatzschaltbild.

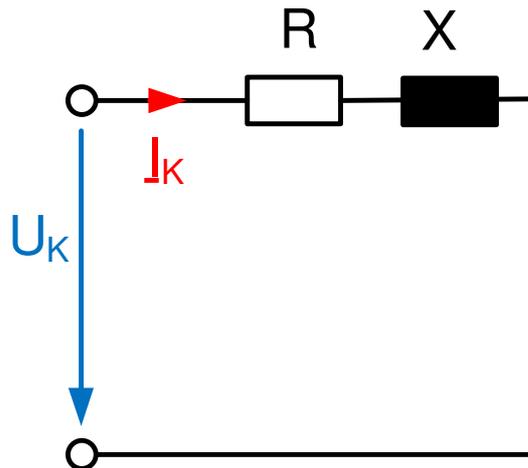


Abb. 3-12: Ersatzschaltbild ASM Kurzschlussversuch [18]

Da bei Asynchronmaschinen der Anlaufstrom deutlich größer als der Nennstrom ist und zusätzlich der Rotor festgesetzt ist, wodurch sich der Lüfter nicht dreht, muss der Kurzschlussversuch bei reduzierter Spannung durchgeführt werden. Ansonsten besteht das Risiko einer thermischen Überlastung und damit eine Beschädigung bzw. Zerstörung der Maschine. Die Spannung wird dann langsam gesteigert, bis maximal das 1,2-fache des Nennstromes fließt.

Die so aufgenommene Messwertreihe kann nachfolgender Tabelle entnommen werden.

Tabelle 3-5: Messreihe Kurzschlussversuch

U_K [V]	I_K [A]	P_K [W]
17,36	2,26	25
34,6	4,15	84
52,1	6,6	189
69,4	8,3	328
86,7	10,6	584
104,2	13,2	878

Durch die Linearbeziehungen zwischen Strom und Spannung lassen sich diese Werte auf die Bemessungsspannung ($U_{Nenn} = 400V$) umrechnen. [17]

$$I_{KNenn} = I_K \cdot \frac{U_{Nenn}}{U_K} = 13,2A \cdot \frac{400V}{104,2V} = 50,67A \quad (3-18)$$

Die Kurzschlussleistung ist der Spannung quadratisch proportional und ergibt sich damit zu:

$$P_{KNenn} = P_K \cdot \left(\frac{U_{Nenn}}{U_K} \right)^2 = 12938,4W \quad (3-19)$$

Dadurch lässt sich der im Kurzschlussversuch zusammengefasste Widerstand berechnen.

$$R = \frac{P_K}{I_K^2} = 1,68\Omega \quad (3-20)$$

Für den auf die ständerseite bezogenen Läuferwiderstand geht hervor:

$$R'_2 = R - R_1 = 0,647\Omega \quad (3-21)$$

Die Ständer- und Läuferreaktanzen können näherungsweise bestimmt werden, in dem die Gesamtreaktanz X zwischen den Reaktanzen aufgeteilt wird. [18]

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2} = \sqrt{\left(\frac{U_K}{I_K} \right)^2 - R^2} = 4,24\Omega \quad (3-22)$$

$$X_1 = X'_2 = \frac{X}{2} = 2,12\Omega \quad (3-23)$$

Daraus folgt für die Streureaktanzen:

$$L_{\sigma 1} = L'_{\sigma 2} = \frac{X_1}{\omega_N} = 6,743mH \quad (3-24)$$

Damit sind auch die Ständerreaktanz und die statorseitig bezogene Läuferreaktanz gleich.

$$L_1 = L'_2 = L_h + L_{\sigma 1} = 116,55mH \quad (3-25)$$

Ergebnisse

Nachfolgend sind die messtechnisch ermittelten Maschinenparameter und die aus dem Datenblatt der ASM [12] entnommenen Parameter aufgeführt.

Tabelle 3-6: Parametervergleich zwischen Datenblattwerten und gemessenen Werten

Bezeichnung	Gemessen	Datenblatt	Abweichung zum Datenblatt
Ständerwiderstand R_1	1,03 Ω	1,0446 Ω	1,4 %
Läuferwiderstand R_2	0,647 Ω	0,757 Ω	14,53 %
Ständerstreureaktanz $L_{\sigma 1}$	6,743 mH	4,12 mH	63,67 %
Läuferstreureaktanz $L_{\sigma 2}$	6,743 mH	5,8 mH	16,26 %
Hauptreaktanz L_h	109,81 mH	125,7 mH	12,64 %
Ständerreaktanz	116,55 mH	129,8 mH	10,21 %
Läuferreaktanz	116,55 mH	131,5 mH	11,37 %

Wie zu erkennen ist, stimmt der messtechnisch ermittelte Ständerwiderstand beinahe mit der Angabe im Datenblatt überein, während alle anderen Werte eine relative Abweichung von mehr als 10 % aufweisen. Besonders die ermittelte Ständerstreureaktanz ist deutlich größer als sie laut Datenblatt sein sollte. Diese Abweichungen können sowohl das Resultat von Messungenauigkeiten sein, als auch durch Näherungsfehler des oben beschriebenen Messverfahrens zustande kommen (insbesondere der gemachten Vereinfachung für die Streureaktanzen).

Auch muss beachtet werden, dass laut mündlicher Aussage von Prof. Dr.-Ing Röther, die hier genutzte Asynchronmaschine schon vor Beginn dieser Arbeit aufgrund von Problemen an den Wicklungen zur Reparatur eingeschickt werden musste. Inwiefern die gemachten Arbeiten Einfluss auf die Maschinenparameter hatten, kann nicht gesagt werden.

3.4 Änderungen am Versuchsstand

In diesem Abschnitt werden die Unterschiede zwischen den beiden Versuchsständen näher erläutert. Dabei wird zunächst auf die geänderten Hardwarekomponenten eingegangen und im Anschluss die gemachten Softwareänderungen geschildert.

3.4.1 Spannungsversorgung

Im Schaltschrank der Asynchronmaschine werden insgesamt vier verschiedene Versorgungsgleichspannungen für die unterschiedlichen Bauteile wie etwa Lüfter, Umrichter, Schütze, Messwandler usw. benötigt. Die benötigten Spannungspegel belaufen sich dabei auf 5 V, ± 15 V sowie 24 V.

Spannungsversorgung 5 VDC

Die erwartete Stromaufnahme für die 5 V Verbraucher ist in Tabelle 3-7 aufgelistet.

Tabelle 3-7: Verbraucherübersicht 5 VDC

Verbraucher	Anzahl	Strombedarf [mA]	Strom gesamt [mA]
Optokoppler 5V/300V	3	15	45
Pegelwandler, $V_{DD(A)}$	4	50	200
Drehgeber	1	150	150
Summe			395

Die oben angegebenen Werte entstammen den jeweiligen Datenblättern für die eingesetzten Optokoppler vom Typ PLC-OPT- 5DC/300DC/1 (Phoenix Contact) [19] und den Drehimpulsgeber der Firma Siemens (1XP8001-2) [20].

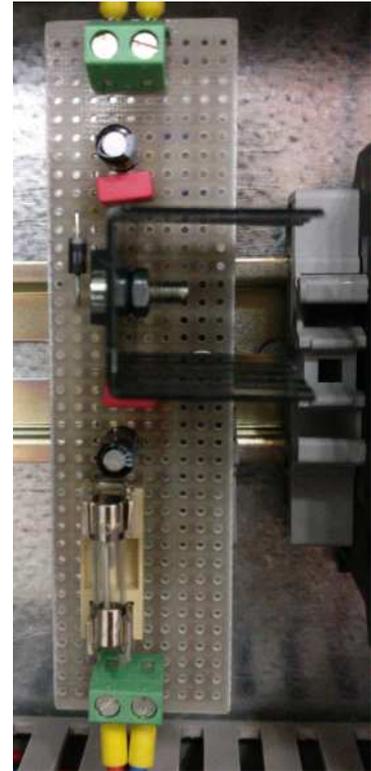
Für die Pegelwandler wurde ein Strombedarf von 50 mA angenommen. Dieser Strom genügt eigentlich für den kombinierten Strombedarf beider Versorgungsspannungen [21] ($V_{DD(A)}$ und $V_{DD(B)}$), wodurch die tatsächliche Stromaufnahme aus dem 5 V Kreis geringer ausfällt.

Im Gegensatz zum zuvor verwendeten dSPACE-System stellt die MicroLabBox keine explizite 5 V Spannungsversorgung für externe Verbraucher zur Verfügung.

Um die Spannungsversorgung herzustellen kommt ein Festspannungsregler vom Typ 7805 zum Einsatz. Dieser wandelt die 15 VDC Ausgangsspannung eines weiteren Netzteils in eine 5 Volt Gleichspannung um. Der Spannungsregler befindet sich auf einer selbst erstellten Platine (vgl. Abb. 3-13), auf der sich neben dem eigentlichen Regler noch die vom Datenblatt geforderten Elektrolytkondensatoren befinden. Diese dienen der Stabilisierung der Ausgangsspannung sowie der Filterung von niederfrequenten Störungen. [22] Des Weiteren ist den Elektrolytkondensatoren sowohl auf der Eingangs- als auch auf

der Ausgangseite noch jeweils ein Folienkondensator parallel geschaltet, welche durch ihren niedrigen Innenwiderstand zur Filterung von hochfrequenten Störungen genutzt werden. Zusätzlich ist noch eine Rückfluss-Diode als Schutzbeschaltung sowie ein Sicherungseinsatz auf der Ausgangsseite vorhanden, um im Falle eines Kurzschlusses im Ausgangskreis den Regler nicht zu überlasten und die angeschlossenen 5 V Verbraucher zu schützen.

Der eingesetzte Festspannungsregler kann zwar prinzipiell einen Ausgangstrom von 1 A dauerhaft liefern [22], was mehr als das doppelte des benötigten Stromes darstellt, es muss aber überprüft werden ob der Temperaturanstieg aufgrund der auftretenden Verlustleistung einen zusätzlichen Kühlkörper erforderlich macht.



Dazu muss eine Wärmewiderstandsberechnung [23] durchgeführt werden. Hierzu bedarf es folgender Angaben:

- Die im Regler umgesetzte Verlustleistung P_V
- Die maximal zulässige Sperrschichttemperatur des Spannungsregler T_J
- Die zu erwartende Umgebungstemperatur T_A
- Den Wärmewiderstand zwischen Sperrschicht und Gehäuse $R_{\Theta JC}$
- Den Wärmewiderstand zwischen Sperrschicht und Umgebung $R_{\Theta JA}$

Die Werte für $T_J = 125 \text{ °C} = 398,15 \text{ K}$, $R_{\Theta JC} = 5 \text{ K/W}$ und $R_{\Theta JA} = 50 \text{ K/W}$ können dem Datenblatt [22] entnommen werden. Die in einem linearen Spannungsregler umgesetzte Verlustleistung berechnet sich folgendermaßen:

$$P_V = (U_{Ein} - U_{Aus}) \cdot I_{Aus} \quad (3-26)$$

Nach Tabelle 3-7 wird ein Strom von etwas weniger als 0,4 A benötigt, um alle Verbraucher zu versorgen. Die Eingangsspannung liegt bei 15 VDC. Daraus folgt:

$$P_V = (15 \text{ V} - 5 \text{ V}) \cdot 0,4 \text{ A} = 4 \text{ W} \quad (3-27)$$

Die Temperaturdifferenz ΔT zwischen der maximalen Sperrschichttemperatur T_J und der Umgebungstemperatur T_A ergibt die maximal zulässige Erwärmung des Reglers, die aufgrund der Verlustleistung zustande kommen darf. Als Umgebungstemperatur wird ein

Wert von 40 °C (313,15 K) gewählt, weil der im Schaltschrank verbaute Temperaturfühler so eingestellt ist, dass der Lüfter einer Temperaturerhöhung auf über 40 °C entgegenwirkt.

Daraus folgt:

$$\Delta T = T_J - T_A = 398,15 \text{ K} - 313,15 \text{ K} = 85 \text{ K} \quad (3-28)$$

Der maximal erlaubte Wärmewiderstand R_{Θ} kann mithilfe von P_V und ΔT berechnet werden.

$$R_{\Theta} = \frac{\Delta T}{P_V} = \frac{85 \text{ K}}{4 \text{ W}} = 21,25 \text{ K/W} \quad (3-29)$$

Der maximal erlaubte Wärmewiderstand ist also kleiner als der Wärmewiderstand zwischen Sperrschicht und Umgebung $R_{\Theta JA} = 50 \text{ K/W}$. Das bedeutet, dass ohne einen zusätzlichen Kühlkörper die Temperatur innerhalb des Spannungsreglers auf unzulässig hohe Werte ansteigen würde, was die Verwendung eines Kühlkörpers unabdingbar macht.

Um einen geeigneten Kühlkörper auswählen zu können muss erst der maximal zulässige Wärmewiderstand von diesem berechnet werden.

$$R_{\Theta S(\max)} = R_{\Theta} - R_{\Theta JC} - R_{\Theta CS} \quad (3-30)$$

Der Ausdruck $R_{\Theta CS}$ beschreibt den Wärmewiderstand zwischen Gehäuse und Kühlkörper (Case to sink) und wurde mit 0,5 K/W angenommen (unter Berücksichtigung der verwendeten Wärmeleitpaste).

$$R_{\Theta S(\max)} = 21,25 \text{ K/W} - 5 \text{ K/W} - 0,5 \text{ K/W} = 15,75 \text{ K/W} \quad (3-31)$$

Es muss also ein Kühlkörper genutzt werden, der einen Wärmewiderstand von unter 15,75 K/W besitzt, um die Temperatur des Spannungsreglers auf akzeptablem Niveau zu halten. Hierbei gilt jedoch, je geringer der Wärmewiderstand ist desto geringer fällt die Betriebstemperatur des Reglers aus. Dies wirkt sich positiv auf die zu erwartende Lebensdauer des Spannungsreglers aus.

Unter Berücksichtigung von weiteren Faktoren wie Bauform, Kosten und Verfügbarkeit wurde ein entsprechender Kühlkörper der Firma AAVID THERMALLOY ausgewählt, der mit 6,4 K/W [24] die geforderten Bedingungen erfüllt.

Zur Überprüfung der obigen Berechnungen und um sicherzustellen, dass der Spannungsregler im Betrieb nicht überhitzt, wurde die Erwärmung unter Last gemessen. Die höchste gemessene Temperatur lag bei 58,5 °C (vgl. Abb. 3-14).

Bei einer Umgebungstemperatur von 21,3 °C ergibt sich eine zu erwartende Temperatur von:

$$R_{\Theta_{Ges}} = R_{\Theta_S} + R_{\Theta_{JC}} + R_{\Theta_{CS}} = 11,9 \text{ K/W} \quad (3-32)$$

$$T = T_A + (P_V \cdot R_{\Theta_{Ges}}) = 68,9 \text{ °C} \quad (3-33)$$

Die tatsächliche Temperatur ist also geringer als die erwartete Temperatur. Dies kommt dadurch zu Stande, dass für die Verlustleistung ein Strom von 0,4 A angesetzt wurde, welcher den aus den Datenblättern ermittelten maximalen Strombedarf entspricht. Der tatsächliche Strombedarf ist jedoch im realen Betrieb geringer, wodurch auch die Verlustleistung geringer ausfällt und damit ebenso die Erwärmung.



Abb. 3-14: Temperatur
Festspannungsregler

Spannungsversorgung ±15 und 24 VDC

Für die Versorgung mit ±15 V und 24 V Gleichspannung kommen wie beim alten Versuchsstand Netzteile vom Typ MINI POWER der Firma Phoenix Contact zum Einsatz. Diese lassen sich auf Hutschienen montieren und stellen mit einem Ausgangsnennstrom von jeweils $I_N = 2A$ [25] [26] ausreichend Ausgangsleistung für die angeschlossenen Verbraucher zur Verfügung (vgl. Stromabschätzung in den Tabelle 3-8 und Tabelle 3-9)

Tabelle 3-8: Verbraucherübersicht 24 VDC

Verbraucher	Anzahl	Strombedarf [mA]	Strom gesamt [mA]
Lüfter (Schaltschrank)	1	209	209
Lüfter (Umrichter)	4	110	440
Steuerschütz	3	167	501
Optokoppler 24 V/TTL ¹	6	3,4	20,4
Summe			1170,4

Die Verbrauchsströme in obiger Tabelle entstammen den jeweiligen Datenblättern der Hersteller [13] [27] [28] [29]. Dabei wurden der Strombedarf der Steuerschütze aus ihrer Halteleistung (4 W) und die Stromaufnahme des Schaltschranklüfters aus seiner aufgenommen Leistung von 5 W berechnet.

Tabelle 3-9: Verbraucherübersicht ±15 VDC

Verbraucher	Anzahl	Strombedarf [mA]	Strom gesamt [mA]
Stromwandler	7	26,5	185,5
Spannungswandler	3	32	96
IGBT-Treiber (Umrichter)	6	45	270
Power Supply (Umrichter)	2	280	560
IGBT-Treiber (Bremschopper)	0,5	450	225
Pegelwandler, $V_{DD(B)}$	4	50	200
Spannungsregler 5V	1	395	395
Summe			1931,5

Der maximal benötigte Strom für die ±15 VDC Spannungskreise berechnet sich nach der in Tabelle 3-9 gemachten Abschätzung zu 1931,5 mA und liegt somit unter dem Nennstrom des Netzteils von $I_N = 2A$. Dabei ist zu beachten, dass der Strombedarf noch nicht auf die einzelnen +15 VDC bzw. -15 VDC Verbraucher aufgeteilt ist, was den tatsächlichen Bedarf nochmals reduziert. Zudem ist das Netzteil in der Lage, durch die sogenannte

¹ Transistor-Transistor-Logik, Schaltungstechnik für logische Schaltungen, Standardmäßig mit 5 VDC Versorgungsspannung

POWER BOOST Funktion dauerhaft einen Strom von bis zu 2,3 A zu liefern, solange die Netzteiltemperatur bei unter 40 °C liegt [25].

Die eingesetzten Stromwandler vom Typ LA 55-P und LAH 25-NP der Firma LEM haben beide laut ihrer Datenblätter [30] [31] eine Stromaufnahme von 10 mA plus der Sekundärstromstärke. Diese wurde zu 16,5 mA angenommen, welches einem gemessenen Strom von 16,5 A entspricht und damit dem 1,5-fachen Nennstrom der ASM [10] entspricht. Daraus folgt ein Strombedarf von 26,5 mA.

Die Spannungswandler benötigen einen Betriebsstrom von 32 mA. Den von dSPACE benötigten Strom zur Auswertung der analogen Signale kann man aufgrund der hochohmigen Innenwiderstände der MicroLabBox vernachlässigen.

Die IGBT Treiberplatinen benötigen pro Halbbrücke einen Strom von 45 mA [32], wobei pro Umrichter jeweils drei Halbbrücken verbaut sind. Das zum Umrichter gehörende Power-Supply-Modul verfügt über eine Stromaufnahme von 280 mA. [33]

Der Bremschopper hat laut Datenblatt [34] einen Strombedarf von 450 mA. Da aber nur ein IGBT der Halbbrücke genutzt wird halbiert sich dieser Strombedarf auf 225 mA.

Für die Pegelwandler wurde wie zuvor bei der Abschätzung des 5 VDC Kreises ein Strombedarf von 50 mA angenommen. Dabei handelt es sich wieder um den kombinierten Strom von Primär- und Sekundärseite, weswegen die eigentliche Stromaufnahme geringer ausfällt.

Die Stromaufnahme für den 5 V-Spannungsregler ergibt sich aus dem gesamten Strombedarf der Tabelle 3-7.

3.4.2 Lüfter

Der zuvor eingesetzter Lüfter (ebm-papst 4650N) ist ein 230 VAC Lüfter, der einen Volumenstrom von 160 m³/h erzeugt. [35] Die vier im Umrichter verbauten Lüfter erfordern jedoch jeweils einen Volumenstrom von 42,5 m³/h [13], was zusammen einem benötigten Volumenstrom von 170 m³/h entspricht. Daher kommt ein neuer Lüfter zum Einsatz, der den nötigen Volumenstrom bereitstellen kann. Gewählt wurde ein Axiallüfter des Typs 4414 FG der Firma ebm-papst [29]. Ein weiterer Vorteil des neuen Lüfters liegt in seiner Nennspannung von 24 VDC, die in den sogenannten Kleinspannungsbereich fällt (vgl. DIN VDE 0100). Spannungen von unter 60 VDC gelten im Normalfall als nicht

lebensbedrohlich. Im Vergleich zum Anschluss eines 230 VAC Lüfters wird somit eine potenzielle Gefahrenquelle vermieden.

Der Lüfter wird über einen Rittal Temperaturregler (SK 3110.000) gesteuert, der so eingestellt und angeschlossen ist, dass er bei einem zu großen Temperaturanstieg im Innenraum des Schaltschranks diesen wieder herunterkühlt.



Abb. 3-15: Rittal Temperaturregler [36]

3.4.3 MicroLabBox

Als Hardwareplattform für die Realisierung der Regelung kommt die MicroLabBox der Firma dSPACE zum Einsatz. Die prinzipielle Entscheidung für die Nutzung eines dSPACE-System wurde bereits im Rahmen einer Vorarbeit [37] getroffen. Die Entscheidung zum Umstieg sowie die Beschaffung der MicroLabBox anstatt der bisher genutzten PX10-Box mit integrierter AC Motor Control Solution (ACMC-System) erfolgte bereits im Vorfeld dieser Arbeit durch Mitarbeiter des Labors für elektrische Antriebe und Leistungselektronik der HAW. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Thesis nur auf die Unterschiede der beiden Systeme sowie auf die daraus resultierenden nötigen Anpassungen der Hard- und Software eingegangen.

Die PX10 ist eine Erweiterungsbox die dazu dient, in Verbindung mit einem Host-PC ein dSPACE-System aufzubauen. Dafür können bis zu zehn verschiedene Boards (exemplarisch sei hier das DS5202 FPGA-Board des ACMC-Systems zu nennen) verwendet werden, die die unterschiedlichsten Zwecke erfüllen können. [38] Dies kann

z. B. die Bereitstellung von digitalen oder analogen Ein- und Ausgängen, die Anschlussmöglichkeit für Drehgeber oder die Generierung von PWM-Signalen (Pulsweitenmodulation) sein. Es lässt sich also für differente Anwendungsfälle eine entsprechende Konfiguration aus verschiedenen Boards aufbauen.

Im Gegensatz dazu ist die MicroLabBox ein All-in-one-Entwicklungssystem, welches zwar in drei unterschiedlichen Varianten vertrieben wird, diese sich aber lediglich in der Art und Position der I/O²-Anschlüsse unterscheiden. [39]



MicroLabBox, front panel variant

Abb. 3-16: MicroLabBox [39]

Die hier zum Einsatz kommende Variante mit Front Panel stellt die I/O-Kontakte über mehrere Sub-D-Anschlüsse auf der Vorderseite zur Verfügung (vgl. Abb. 3-16), was einen leichten Zugriff über entsprechende Steckerverbindungen ermöglicht.

Zu den von der MicroLabBox bereitgestellten Anschlussmöglichkeiten gehören unter anderem:

- Achtundvierzig bidirektionale digitale Kanäle (2.5/3.3/5 V) für den Anschluss von digitalen I/Os, bis zu sechs Encodern, zwei Hall-Sensoren, Bereitstellung von jeweils zwei EnDat- bzw. SSI-Schnittstellen und die Generierung oder Auswertung von PWM-Signalen
- zwei Resolver Schnittstellen
- Acht 14 Bit und vierundzwanzig 16 Bit analoge Eingänge (-10 bis 10V)
- Sechzehn 16 Bit analoge Ausgänge (-10 bis 10 V, ± 8 mA)
- Zwei Versorgungsausgänge (1x 12V/250 mA, 1x 2...20V/200 mA) für den Anschluss externer Sensoren

² I/O = Input/Output (deutsch. Ein- und Ausgänge)

Damit gibt es genug Anschlussmöglichkeiten für den Windenergie-Versuchsstand.

Zur Nutzung der MicroLabBox werden neben der eigentlichen Hardware noch verschiedene Softwarepakete benötigt, die wiederum entsprechende Softwarelizenzen erfordern. Die minimal erforderliche Softwarekonfiguration [39] beinhaltet:

- GNU C Compiler für MicroLabBox: Eine spezielle Version des GNU C Compiler³ der zum Kompilieren einer Anwendung für die MicroLabBox benötigt wird.
- Real-Time Interface (RTI): erweitert den Simulink Coder™ zur Verwendung von Simulink Modellen auf der MiroLabBox.

Daneben werden für die Laboranlage noch folgende zusätzliche Softwarepakete benötigt:

- RTI Electric Motor Control Blockset: erweitert RTI um zusätzliche I/O-Funktionen, die zur Steuerung und Regelung von Elektromotoren erforderlich sind.
- ControlDesk: stellt die Möglichkeit einer HMI-Programmierung (Human Machine Interface/Mensch Maschinen Schnittstelle) her. Das HMI kann aus verschiedenen bereits vorhandenen Instrumenten erstellt werden. Ermöglicht außerdem den Zugriff auf Variablen und Parameter der programmierten Simulink Anwendung während der Laufzeit. Zusätzlich kann über die ControlDesk Software die dSPACE-Hardware konfiguriert und die erstellten Echtzeit-Anwendungen auf diese übertragen werden.

Weiter Informationen zu den einzelnen Hard- und Softwarekomponenten sowie eine Installations- und Lizenzierungsanleitung für die dSPACE-Software können aus dem Anhang entnommen werden.

Matlab und Simulink

Wie bereits oben erwähnt findet die Programmerstellung für das dSPACE-System mit Matlab/Simulink statt und wird anschließend mithilfe des Real-Time-Interfaces für die verwendete Hardware übersetzt und auf diese geladen. Dabei muss auf die Kompatibilität der unterschiedlichen dSPACE-Release- und Matlab-Versionen geachtet werden. Hierbei orientieren sich die Bezeichnungen der dSPACE-Releases an den Bezeichnungen der

³ C Compiler, der ursprünglich für das GNU Betriebssystem entwickelt wurde

unterschiedlichen Matlab-Versionen. Der hier zum Einsatz kommende dSPACE Release 2017-B ist dabei kompatibel mit der entsprechenden Matlab-Version R2017b sowie älteren Versionen bis einschließlich R2016a. [40]

Weitere Informationen bezüglich der Kompatibilität unterschiedlicher Versionen finden sich auf der Herstellerwebsite. [41]

Nach der erfolgreichen Installation der dSPACE-Software muss nach dem Start von Matlab lediglich die zum verwendeten Prozessorboard (hier DS1202 [39]) dazugehörige RTI Version ausgewählt werden.

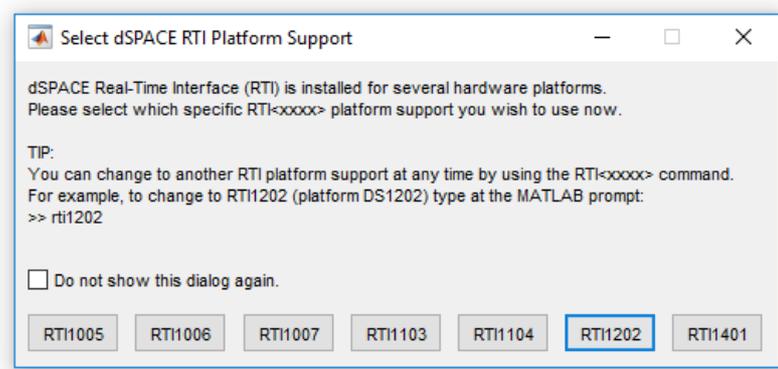


Abb. 3-17: Auswahl der RTI-Version

Nach erfolgreicher Initialisierung werden im Anschluss die installierten Softwarekomponenten im Matlab Command Window angezeigt und es kann mit der Programmerstellung begonnen werden.

```

=====
Configuring dSPACE Software for MATLAB(R) 9.3.0.713579 (R2017b) ...

RTI                Real-Time Interface to Simulink (RTI1202)  7.9      02-Nov-2017  okay
RTI-MP             RTI for Multiprocessor Systems                        7.9      02-Nov-2017  okay
RTIGLBS            RTI Gigalink Blockset                               2.4      02-Nov-2017  okay
RTICAN             RTI CAN Blockset                                     3.4.5    02-Nov-2017  okay
RTICANMM           RTI CAN MultiMessage Blockset                       4.6      02-Nov-2017  okay
RTILINMM           RTI LIN MultiMessage Blockset                       2.9      02-Nov-2017  okay
RTIRPCU            RTI RPCU Blockset                                    2.2.3    02-Nov-2017  okay
RTIBYPASS          RTI Bypass Blockset                                  3.9      02-Nov-2017  okay
RTIFRCONF          RTI FlexRay(TM) Configuration Blockset              4.0      02-Nov-2017  okay
RTIETHXCP          RTI XCP on Ethernet Blockset                        1.2.10   02-Nov-2017  okay
RTIETHERNETUDP    RTI Ethernet (UDP) Blockset                         1.4.3    02-Nov-2017  okay
RTIFFGA            RTI FPGA Programming Blockset                       3.4      02-Nov-2017  okay
MDBS               MotionDesk Blockset                                  2.5.2    02-Nov-2017  okay
RTIEMC             RTI Electric Motor Control Blockset                 1.4.1    02-Nov-2017  okay
RTIETHERNET        RTI Ethernet Blockset                               1.2.3    02-Nov-2017  okay
RTIUSBFlightRec    RTI USB Flight Recorder Blockset                   1.2.2    02-Nov-2017  okay
RTIWATCHDOG        RTI Watchdog Blockset                              2.1.1    02-Nov-2017  okay
DSMLCON24          dSPACE MATLAB Connection 2.4 (win64)               2.4      01-Jun-2012  okay
=====

*** RTI Platform Support RTI1202 activated.
>>

```

Abb. 3-18: dSPACE Konfiguration in Matlab

3.4.4 Sicherungskonzept Schaltschrank

Das bisherige Sicherungskonzept im Schaltschrank weist für den Einsatz als doppelt gespeister Asynchrongenerator Verbesserungspotenzial auf. Bei dem alten Versuchsstand ist der Umrichter über die Vorladewiderstände direkt am eingesetzten Transformator angeschlossen, der nur primärseitig durch die Verwendung von trägen Sicherungseinsätzen geschützt wird. Die Abb. 3-19 verdeutlicht dies.

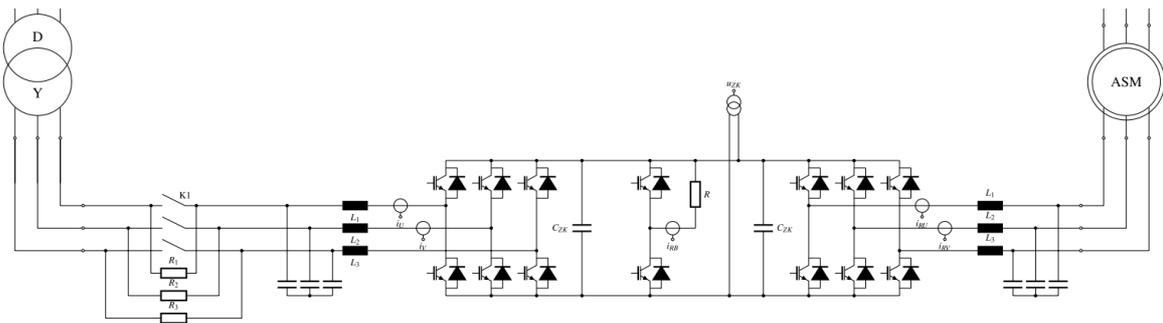
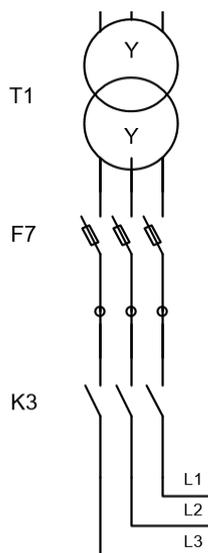


Abb. 3-19: Auszug Schaltplan DG-ASM alt [42]

Zur Erhöhung des Anlagenschutzes und zur Absicherung des Umrichters wurde die Sekundärseite des Transformators mit zusätzlichen Sicherungen erweitert. Dafür kommen Sicherungseinsätze der Betriebsklasse gRL zum Einsatz. Diese setzen sich aus den Betriebsklassen gR (Ganzbereichs-Halbleiterschutz) und gL (Ganzbereich-Leitungsschutz) zusammen. Dies resultiert in einem ultraflinken Verhalten, welches für den Betrieb am Umrichter von Vorteil ist.



Zusätzlich wurde zwischen Sicherung und Umrichter ein Schütz (K3) geschaltet (vgl. Abb. links), was es ermöglicht den Umrichter bewusst ans Versorgungsnetz zu zuschalten bzw. diesen vom Netz zu trennen. Dadurch wird die Sicherheit weiter erhöht, weil nun eine Kurzschlussüberwachung des Zwischenkreises realisiert werden kann. Die genaue Funktionsweise dieser Überwachung wird in Abschnitt 3.4.8 erläutert.

Abb. 3-20: neues Sicherungskonzept

3.4.5 Systemportierung (MicroLabBox)

Die für den neuen Versuchsstand eingesetzte MicroLabBox unterscheidet sich in Art und Anzahl der zur Verfügung stehen I/O-Schnittstellen vom bisher eingesetzten ACMC-System. Aus diesem Grund müssen auch die Verbindungen zwischen der MicroLabBox und der Sensorik sowie Aktorik des Versuchsstandes angepasst werden. Dazu kommt das neu hinzugefügte Umrichterschütz, dessen Steuer- (OP-ST-ULS) und Rückmeldesignal (OP-HK-ULS) ebenfalls an das dSPACE-System angebunden werden müssen.

Nachfolgend ist das bisher genutzte Platinenkonzept aufgezeigt:

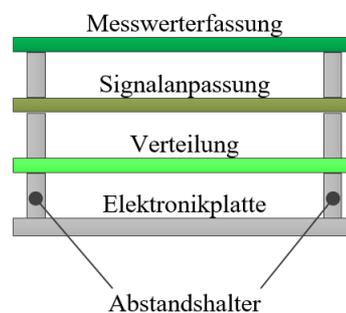


Abb. 3-21: Platinenkonzept [43]

Das Konzept besteht aus drei verschiedenen Platinen, die über Flachbandkabel miteinander verbunden sind.

- die obere Platine ist für die Messwerterfassung zuständig
- die mittlere Platine dient der Pegelanpassung (TTL ↔ 15V)
- die untere Platine verteilt die Signale zwischen der MicroLabBox und dem Versuchsstand

Für die Systemportierung ergeben sich dabei folgende Möglichkeiten.

1. Die Ergänzung der bestehenden Platinenlayouts um die beiden Signale OP-ST-ULS und OP-HK-ULS und ansonsten die so weit wie mögliche Beibehaltung des bestehenden Konzeptes.
2. Neuauslegung der Platinen Signalanpassung und Verteilung unter Berücksichtigung des Anschlusslayouts der MicroLabBox und Verfügbarer Pegelumsetzer.

3. Die komplette Neuentwicklung aller drei Platinen und Korrektur der Signalläufe. Bei dem aktuellen Konzept werden die Netzspannungen U_{12} und U_{23} nicht über die Platine Messwerterfassung erfasst, sondern sind an der Platine Verteilung angeschlossen. Um den Platzmangel auf der Platine Verteilung zu reduzieren soll die Anbindung der Signale von und nach dSPACE über alle 3 Platinen erfolgen.

Nachfolgend erfolgt eine Gegenüberstellung und Bewertung der obigen drei Konzepte.

Tabelle 3-10: Gegenüberstellung der Konzepte für die Systemportierung

Bezeichnung	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3
Geschätzter Aufwand	+	-	--
Kosten	+	-	--
Wiederverwendbarkeit	+	0	--

– sehr schlecht; - schlecht; 0 tolerabel; + gut; ++ sehr gut

Wie aus Tabelle 3-10 ersichtlich ist, ergeben sich beim ersten Konzept der niedrigste Aufwand und dadurch auch die geringsten Kosten. Dies ist dadurch bedingt, dass bei einer größtmöglichen Beibehaltung des bestehenden Platinenlayouts die Entwicklungsarbeit für die notwendigen Anpassungen geringer ausfällt, als eine komplette Neuentwicklung. Darüber hinaus ist der Testaufwand bei diesem Konzept am geringsten, da die Platinen im alten Versuchsstand bereits ihre Funktionstüchtigkeit unter Beweis gestellt haben. Ebenfalls ist hier die Wiederverwendbarkeit am größten. Darunter ist die Möglichkeit zu verstehen, eine Platine auch zwischen den beiden Laborstände untereinander auszutauschen, um im Falle eines Defektes schnell Ersatzmaterial zur Verfügung zu haben, ohne eine große Anzahl unterschiedlicher Ersatzmaterialien lagern zu müssen. Aus diesem Grund wurde sich für das erste Konzept entschieden.

Daraus resultiert allerdings eine nötige Anpassung der Platinen Signalanpassung und Verteilung, welche im Folgenden näher ausgeführt wird.

Platine Verteilung

Abbildung 3-22 zeigt den schematischen Aufbau der Platine Verteilung, wie sie im Zusammenhang mit dem APMC-System genutzt wird.

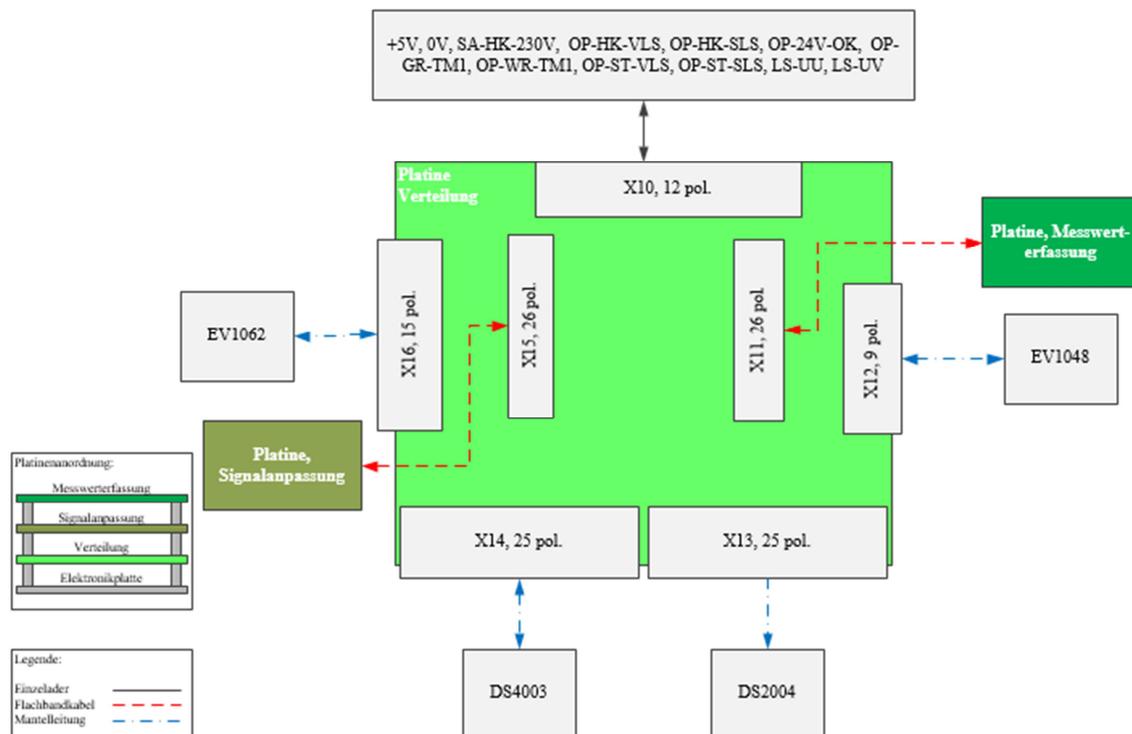


Abb. 3-22: Schematische Darstellung der Platine Verteilung für das ACMC-System [14]

Die unterschiedlichen dSPACE-Karten sind hierbei über verschiedenpolige Sub-D Verbindungen (X12 – X16) mit der Platine Verteilung verbunden. Über die Steckverbindung X12 ist hierbei der Drehgeber an das dSPACE-System angeschlossen, analog dazu stellt X13 die Verbindung der analogen-, X14 der digitalen- und X16 die PWM-Signalverbindung zwischen dSPACE und dem Versuchsstand her. Jeweils ein 26-poliges Flachbandkabel verbindet die Platine Verteilung mit der Messwert-erfassung und der Signalanpassung.

Für die Umsetzung mit der Mikrolabbox werden die Signale folgendermaßen an die Schnittstellen der Box (Digital/Analog IO A oder B) angebunden.⁴

Digital I/O A:

Der Sicherungsautomat 230 V OK (SA-HK-230V), 24 V Versorgung hergestellt (OP-24V-OK), Ansteuersignal Vorlade-, Stator- und Umrichterschütz (OP-ST-VLS, OP-ST-SLS, OP-ST-ULS), die Hilfskontakte von Vorlade-, Stator- und Umrichterschütz (OP-HK-VLS, OP-HK-SLS, OP-HK-ULS), Übertemperatursignale des NWR's und

⁴ In runden Klammern sind die Signalbezeichnungen

MWR's (OP-GR-TM1, OP-WR-TM1), das Ansteuer- und Fehlersignal des Bremschoppers (BR-IGBT, BR-NERROR) sowie die Phasenfehlersignale des NWR's und MWR's (GR-Error-U, GR-Error-V, GR-Error-W, WR-Error-U, WR-Error-V, WR-Error-W)

Digital I/O B:

Mit dieser Schnittstelle sind die Drehzahlgebersignale (DG-PHI0, DG-PHI0~, DG-PHI90, DG-PHI90~, DG-IDX, DG-IDX~) sowie die PWM-Ansteuersignale des NWR's (GR-PWM-A+, GR-PWM-A-, GR-PWM-B+, GR-PWM-B-, GR-PWM-C+, GR-PWM-C-) und MWR's (WR-PWM-A+, WR-PWM-A-, WR-PWM-B+, WR-PWM-B-, WR-PWM-C+, WR-PWM-C-) verbunden.

Analog I/O A:

Die analogen Signale beinhalten die Netzspannungen (LS-UU, LS-UV), die ASM-Temperatur (ASM-Temp), die Temperatur des Bremschoppers (BR-Temp), die Zwischenkreisspannung (ZK-U), den Bremschopperstrom (BR-IRB) sowie die Phasenströme des NWR's (GR-IU, GR-IV), MWR's (WR-IU, WR-IV) und des Netzes. (LS-IU, LS-IV)

Die Schnittstelle Analog I/O B ist mit dem Schaltschrank der Antriebsmaschine verbunden, worauf im Abschnitt 3.4.8 näher eingegangen wird. Die genaue Stecker- und Anschlussbelegung von der MicroLabBox und den Platinen kann dem Anhang entnommen werden.

Für die Unterbringung der neuen Signale des Umrichterschützes wurden freie Anschlüsse der Steckverbindung X14 genutzt. Dadurch muss auf der Platine nur die Klemmleiste X10 um zwei weitere Kontakte ergänzt und entsprechende Leiterbahnverbindungen zwischen X10 und X14 hergestellt werden. Weil die Anschlussbelegung der Platine ansonsten gleich bleiben kann, kann die neue Platine Verteilung auch mit dem alten ACMC-System eingesetzt werden, indem die Umrichterschützkontakte einfach frei bleiben.

Die neue Darstellung der Platine Verteilung ergibt sich damit:

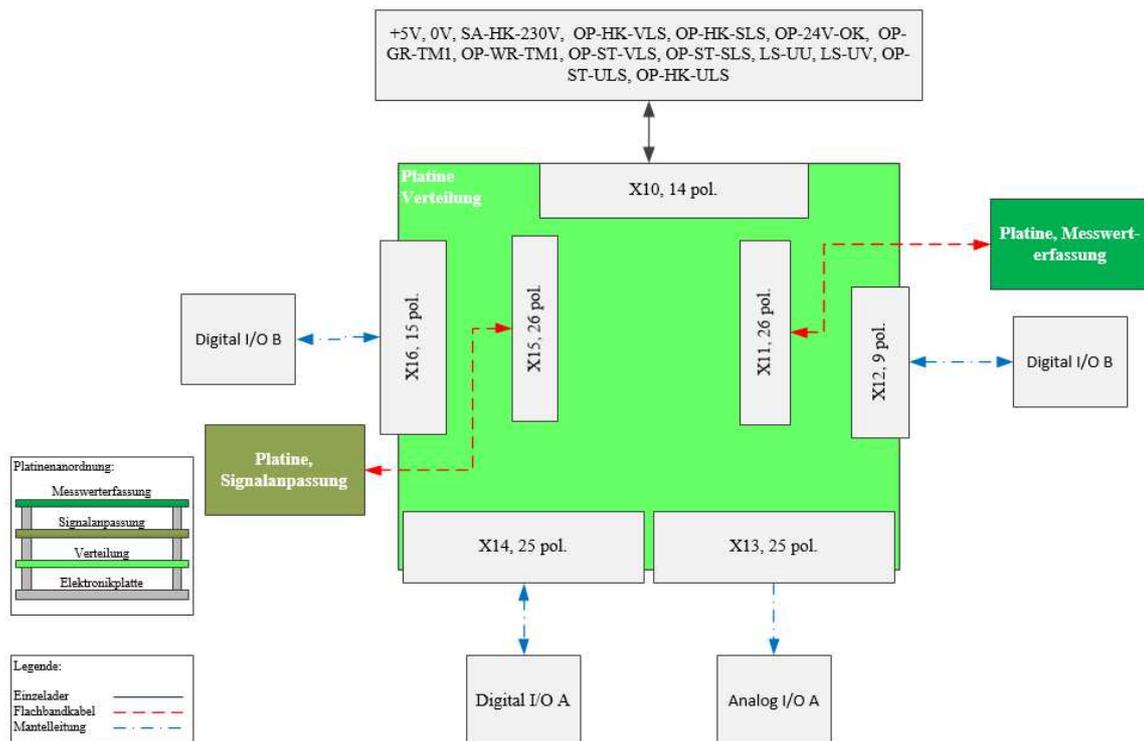


Abb. 3-23: Schematische Darstellung der Platine Verteilung für die MicroLabBox

Platine Signalanpassung

Bei der Platine Signalanpassung besteht das Problem, dass der bisher eingesetzte Pegelwandler vom Typ HEF4104BP nicht mehr hergestellt wird, wodurch – wenn überhaupt – nur Restbestände dieses Pegelwandlers erworben werden können. Dadurch muss ein neuer Pegelwandler für die Signalanpassung installiert werden. Um das bisherige Platinenlayout beibehalten zu können wurde sich für den Pegelwandler HEF4104BT der Firma Nexperia entschieden. Dieser Pegelwandler unterscheidet sich von den bisher genutzten Pegelwandlern nur in seiner Bauform. Anstatt eines DIP16-Gehäuses wird der neue Wandler in SO16-Bauform gefertigt. Weil sich der neue Wandler aufgrund seiner kleineren Bauform nicht direkt auf der Platine Signalanpassung verlöten lässt, kommt ein entsprechender IC⁵-Sockel der Firma Winslow zum Einsatz. Dieser ermöglicht den Einbau eines IC's in SO-Bauform an einen für DIL-Gehäuse vorgesehenen Anschluss.

⁵ IC = Integrated circuit (Integrierter Schaltkreis)

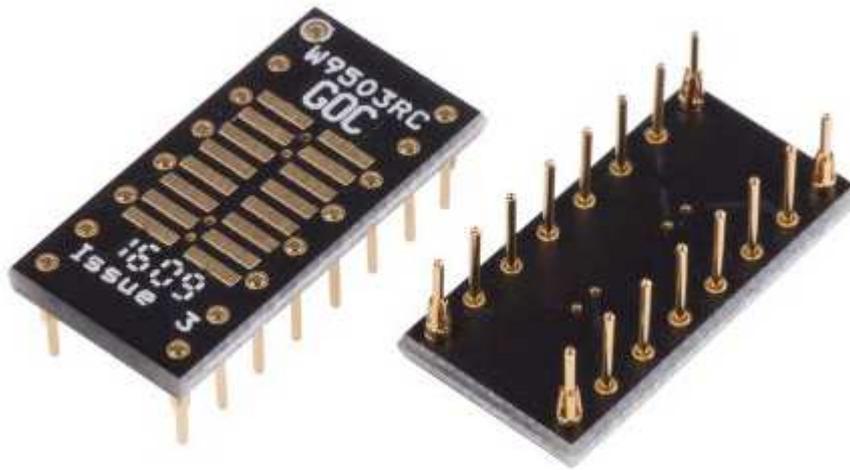


Abb. 3-24: IC-Sockel der Firma Winslow [44]

3.4.6 Softwarekorrektur Antriebsseite

Wie bereits im Abschnitt 3.1 kurz angesprochen kommt auf der Antriebsseite zur Steuerung der Gleichstrommaschine ein Stromrichter zum Einsatz. Dabei handelt es sich um einen Siemens Sinamics DC-Master D420/30 MREQ-GEG6V62.

Während des Betriebes zeigte sich, dass es sowohl beim alten als auch beim neuen Versuchsstand zu sporadischen Fehlern kam. Diese traten immer direkt beim Anfahren aus dem Stillstand auf und resultierten in einer Abschaltung der GM, was wiederum bedeutete, dass keine Versuche mit dem Windenergieversuchsstand möglich waren. Nach Sichtung des Diagnosespeichers stellte sich heraus, dass es sich hierbei um den Fehler F60043 handelte. In den meisten Fällen bedeutet dies, dass der Feldstrom der GM für die aktuelle Drehzahl zu hoch und eine Feldschwächung durchzuführen ist. Weil der bereits integrierte Feldschwächeregler (vgl. [8]) – mit Ausnahme des Anlaufes aus dem Stillstand – wie gewünscht arbeitet, wurde zusätzlich die Feldstromreduzierung (Expertenliste, Parameter p50272) aktiviert. Diese verringert den Feldstrom des Motors, um für die aktuelle Drehzahl die Motorspannung auf einen zulässigen Wert abzusenken. Dadurch konnte obiger Fehler behoben und ein Abschalten des Motors vermieden werden.

845	<input type="checkbox"/> p50267[0]	C	Ct: Feldstromregler Kp Faktor Signalquelle	100%		Betriebsbereit	2
846	<input type="checkbox"/> p50269		Feldstromsollwert einfrieren Betriebsart	[2] Bei jeder Störung einf...		Betrieb	2
847	<input type="checkbox"/> p50272		Feldstromreduzierung Aktivierung	[1] Warnung und Feldred...		Betriebsbereit	2
848	<input type="checkbox"/> p50273[0]	D	EMK-Regler Vorsteuerung Aktivierung	[1] Aktiviert		Betriebsbereit	2
849	<input type="checkbox"/> p50274[0]	D	EMK-Regler I-Anteil Aktivierung	[1] Aktiviert		Betriebsbereit	2

Abb. 3-25: Parameteränderung GM

Ein Nachteil dieses Lösungsansatzes wäre, dass durch die Zeitkonstante des Feldstromabbaus eine Verzögerungszeit bis zum Umschalten der Momentenrichtung entsteht. Hochdynamische Wechsel der Momentenrichtung sind also nicht mehr möglich. Da diese aber bei der WEA sowieso nicht auftreten und die Reduzierung des Feldstromes auch nur während des Anlaufens der GM benötigt wird, kann diese Variante problemlos durchgeführt werden. [45]

Nach Aktivierung der Feldstromreduzierung ist Fehler F60043 nicht mehr aufgetreten und die Zuverlässigkeit der Maschine ist deutlich verbessert.

3.4.7 Genereller Programmaufbau

Die zur Steuerung des Versuchsstandes erstellten Programme lassen sich jeweils in zwei Teile gliedern. Eine in ControlDesk erstellte Benutzeroberfläche, über die die jeweiligen Versuche gesteuert werden, und ein dazugehöriges Matlab/Simulink-Programm, das auf die MicroLabBox geladen wird und für die Regelung des Versuchsstandes zuständig ist. Für jedes Generatorkonzept sind die Programme bereits vorkompiliert, sodass der Bediener nur den gewünschten Versuch auswählen muss.

Nach Auswahl und Laden des gewünschten Programmes kann der Versuchsstand automatisch angefahren werden, d. h. die GM und ASM werden auf die gewünschte Drehzahl hochgefahren, die benötigten Schütze geschaltet und – falls erforderlich – der Umrichter eingeschaltet, ohne dass Bediener eingriffe nötig sind. Dennoch ist auch ein Handbetrieb realisiert, mit dem die verschiedenen Funktionen des Versuchsstandes auch einzeln gesteuert werden können.

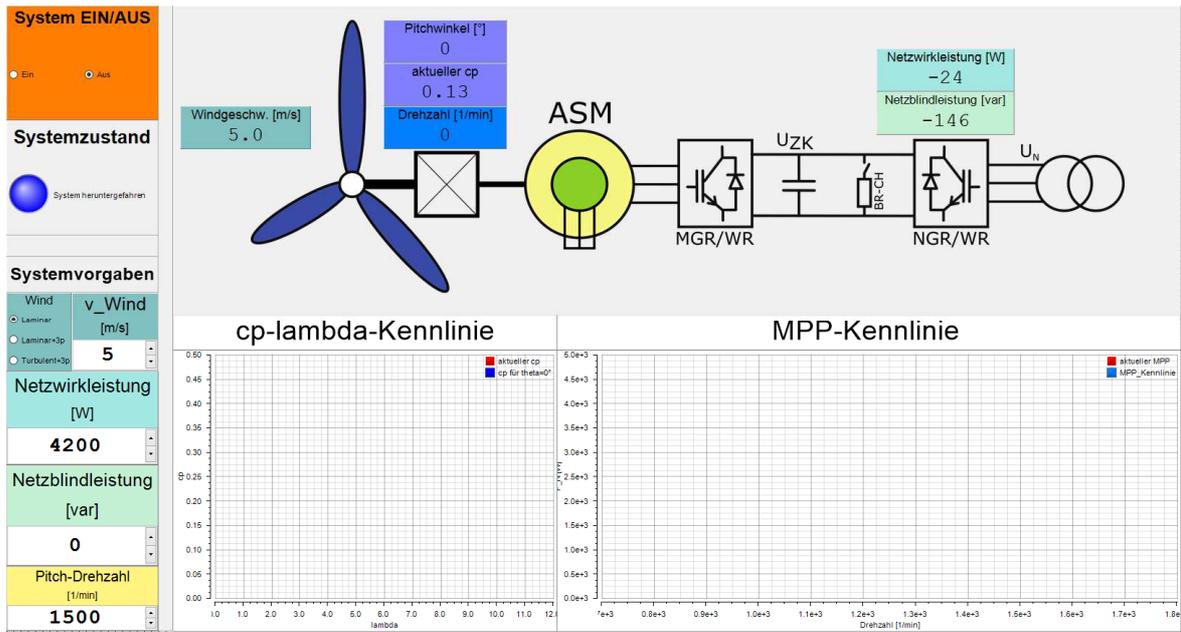


Abb. 3-26: Benutzeroberfläche ControlDesk

Die hinterlegten Simulinkprogramme sind dabei nach dem gleichem Schema aufgebaut und unterscheiden sich nur in ihrer jeweiligen Implementierung. Beispielhaft ist nachfolgend das Programm für den Vollumrichter-Versuch dargestellt.

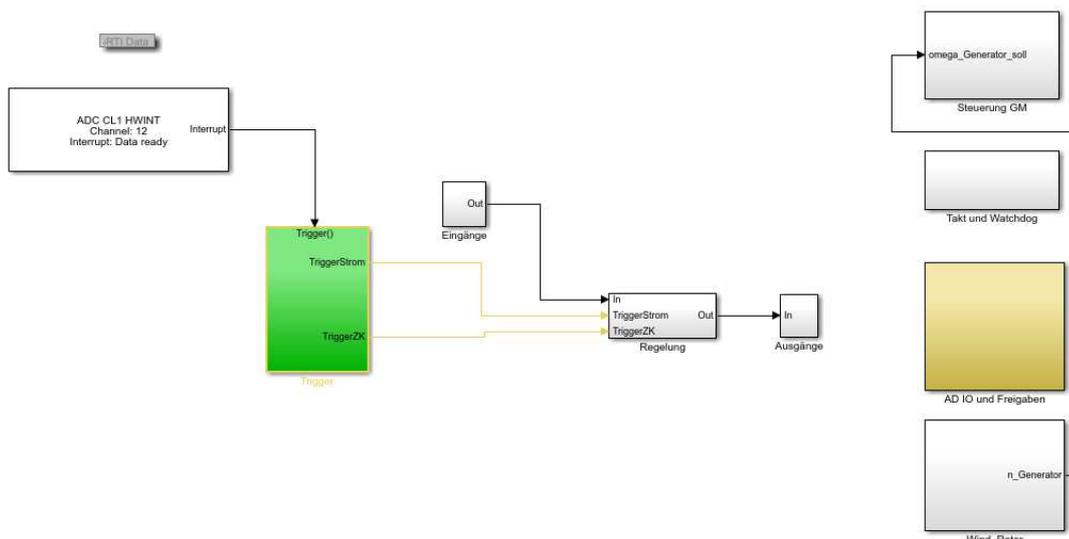


Abb. 3-27: Simulink ASG mit Vollumrichter

Das Programm teilt sich in folgende Subsysteme auf:

- Trigger
- Eingänge
- Ausgänge
- Regelung
- Steuerung GM
- Takt und Watchdog
- AD IO und Freigaben
- Wind_Rotor

Die Subsysteme *Ein-* und *Ausgänge* dienen, wie der Name schon sagt, der Zusammenführung der für die Regelung erforderlichen Eingänge (z. B. Sollwertvorgaben und Freigabesignale) und Ausgängen (z. B. Istwerte für Drehzahl und Drehmoment). In dem System *Regelung* sind die jeweiligen Implementierungen für Leistung-, Fluss-, Zwischenkreis- und Stromregelung sowie die Messwerterfassung realisiert. Das System *Trigger* erzeugt die Softwaretrigger für die einzelnen Regelungsaufgaben. *Steuerung GM* umfasst die Softwareschnittstelle zur Antriebsseite und übermittelt die erforderlichen Drehzahl- bzw. Drehmoment-Sollwerte der Antriebsmaschine an den dazugehörigen Stromrichter. *Takt und Watchdog* erzeugt die Triggersignale für die Analog/Digital Wandler, deren eingelesenen Messwerte wiederum in *AD IO und Freigaben* verarbeitet werden. Zusätzlich ist hier die Steuerung des Versuchsstandes für Hand- und Automatikbetrieb sowie die Überwachung und ggf. Erzeugung von Freigabesignalen für die Regelung implementiert. Das letzte System *Wind_Rotor* enthält jene Programmteile, die für die Simulation einer Windenergieanlage notwendig sind, wie beispielsweise die Simulation der Windverhältnisse, die Modelbildung einer Windkraftanlage, die Pitch-Regelung sowie ein MPP-Tracking (Maximum Power Point Tracking).

3.4.8 Anpassungen in Simulink

Für den neuen Versuchsstand ergeben sich gegenüber dem alten Versuchsstand einige Softwaretechnische Änderungen. Diese Änderungen sind nötig aufgrund von

- Upgrade von Simulink Version 2013b nach 2017b

- Nutzung der MicroLabBox mit RTI Electric Motor Control Blockset anstatt des APMC-Systems
- verschiedenen Schnittstellen zwischen den Schaltschränken der GM und ASM

Dabei soll aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht auf jede einzelne Softwareanpassung eingegangen werden. Änderungen, die lediglich wegen des Versionsupgrades bzw. des neu eingesetzten Blockset notwendig sind, sich jedoch funktional nicht vom alten System unterscheiden (z. B. die neuen Simulinkblöcke zum Einlesen/Ausgeben von digitalen I/Os), werden nicht näher betrachtet.

Schnittstelle zur Antriebsseite

Das in der Vorarbeit [8] entwickelte Gleichstrommaschinen-Antriebssystem weist in einigen Punkten Unterschiede zu dem System auf, welches im alten Versuchsstand eingesetzt wird. Unter anderem hat sich die bereitgestellte Schnittstelle zwischen dem Stromrichter der GM und der dSPACE MicroLabBox geändert. Die neue Schnittstellenbelegung ist in Tabelle 3-11 dargestellt.

Tabelle 3-11: Schnittstelle zwischen MicroLabBox und GM-Stromrichter

MicroLabBox I/O-Anschluss	MicroLabBox Pin	MicroLabBox Funktion	GM Schaltschrank Anschluss	Stromrichter Funktion
Digital I/O A	37	Digital Output 29	X7:1	Reglerfreigabe
Digital I/O A	36	Digital Output 30	X7:2	Reglerwahl 1
Digital I/O A	35	Digital Output 31	X7:3	Reglerwahl 2
Digital I/O A	34	Digital Output 32	X7:4	Stop
Digital I/O A	18	GND	X7:6	Masse
Analog I/O B	49	Analog Output 1	X7:7	Hauptsollwert
Analog I/O B	16	Analog Output 1 ~	X7:8	Hauptsollwert ~
Analog I/O B	32	Analog Output 2	X7:9	Strombegrenzung
Analog I/O B	48	Analog Output 2 ~	X7:10	Strombegrenzung ~

Neben der reinen Pin-Belegung habe sich bei den Analogwerten auch die vom Stromrichter erwarteten Spannungswerte (-10V bis +10V) geändert. Deswegen haben sich

auch die Skalierungsfaktoren für die Digital/Analog-Wandlung im Subsystem *Steuerung GM* gewandelt.

Triggeregenerierung

In dem alten System mit der PX10-Erweiterungsbox befinden sich die Analog/Digital-Wandler auf einer separaten Erweiterungskarte (DS2004). Zum Starten der Wandlung wird ein externes (PWM-)Triggersignale verwendet, welches von einer weiteren Karte (EV1048) generiert wird, die über eine zusätzliche Einzeladerverbindung an die DS2004 angeschlossen ist. Die Fertigmeldung der A/D-Wandlung dient wiederum als Trigger für das Subsystem *Regelung*.

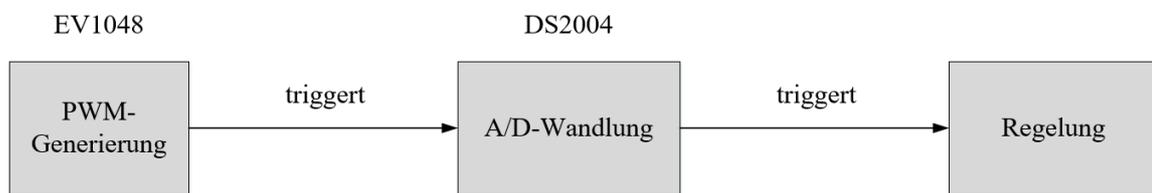


Abb. 3-28: Aufrufreihenfolge

Eine solche Signalverkettung mit externen Triggerleitungen ist für ein All-in-one-System wie die MicroLabBox weder notwendig noch zweckdienlich. Stattdessen kommt eine sogenannte Trigger line zum Einsatz. Diese können so eingestellt werden, dass sie auf das Auftreffen bestimmte Ereignisse warten (z. B. eine fallende bzw. steigende Flanke an einem Eingang). Beim Eintreten des Ereignisses wird dann ein Triggersignal ausgelöst, auf das anderen dSPACE-Blöcke reagieren können. Um das gleiche Verhalten wie beim alten Versuchsstand zu erzeugen, reicht es also, im Programm ein gleichartiges PWM-Signal zu erzeugen und dieses als Auslösekriterium für eine Trigger line zu parametrieren. Die A/D-Wandlung wird wiederum über dieselbe Trigger line angesteuert. Auf eine entsprechende hardwareseitige Verdrahtung kann somit verzichtet werden.

Umrichtersteuerung

Im Gegensatz zum APMC-System verfügt das eingesetzte RTI Electric Motor Control Blockset über keinen vorgefertigten Programmblock zur Ansteuerung einer B6-Drehstrombrücke. Der Umrichter besteht jedoch aus zwei solcher B6-Brücken (jeweils eine im NWR und MWR), die je nach Betriebsart (Vollumrichter oder doppelt gespeist)

bzw. Betriebspunkt entsprechend angesteuert werden müssen. Dies wird über jeweils drei Multi Channel PWM Blöcke realisiert.

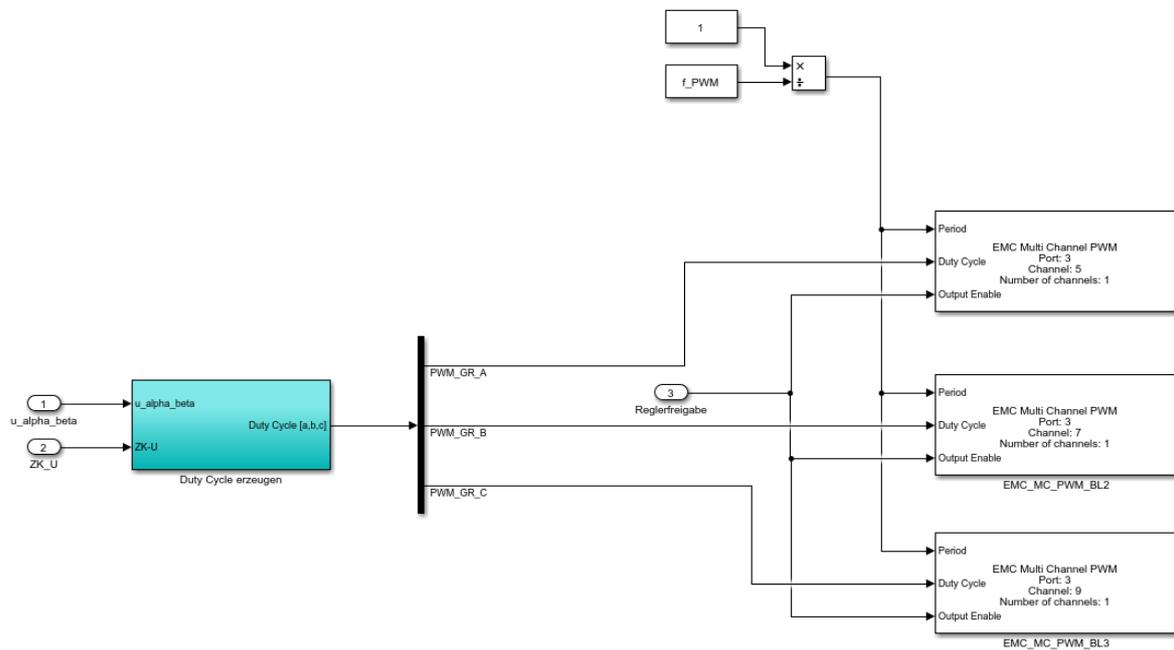


Abb. 3-29: Simulinkmodell Ansteuerung B6-Brücke

Jeder Block steuert eine der drei Halbbrücken des NWRs/MWRs, indem die oberen IGBTs (Englisch insulated-gate bipolar transistor) jeder Halbbrücke durch ein zuvor erzeugtes PWM-Signal geschaltet werden, während der dazugehörige untere IGBT durch das invertierte PWM-Signal gesteuert wird. Die PWM-Signale selbst werden in Abhängigkeit der aktuellen Zwischenkreisspannung und der vorliegenden Regelaufgabe erzeugt.

Aus Sicherheitsgründen – vor allem zur Vermeidung von Kurzschlüssen – ist die sogenannte Totzeit, d. h. die Zeit, in der beide IGBTs einer Halbbrücke ausgeschaltet sind, zwischen den Steuerimpulsen der IGBTs ein wichtiger Faktor. Diese lässt sich an den PWM Blöcken einstellen und wurde mithilfe eines Oszilloskops überprüft (vgl. Abb. 3-30).

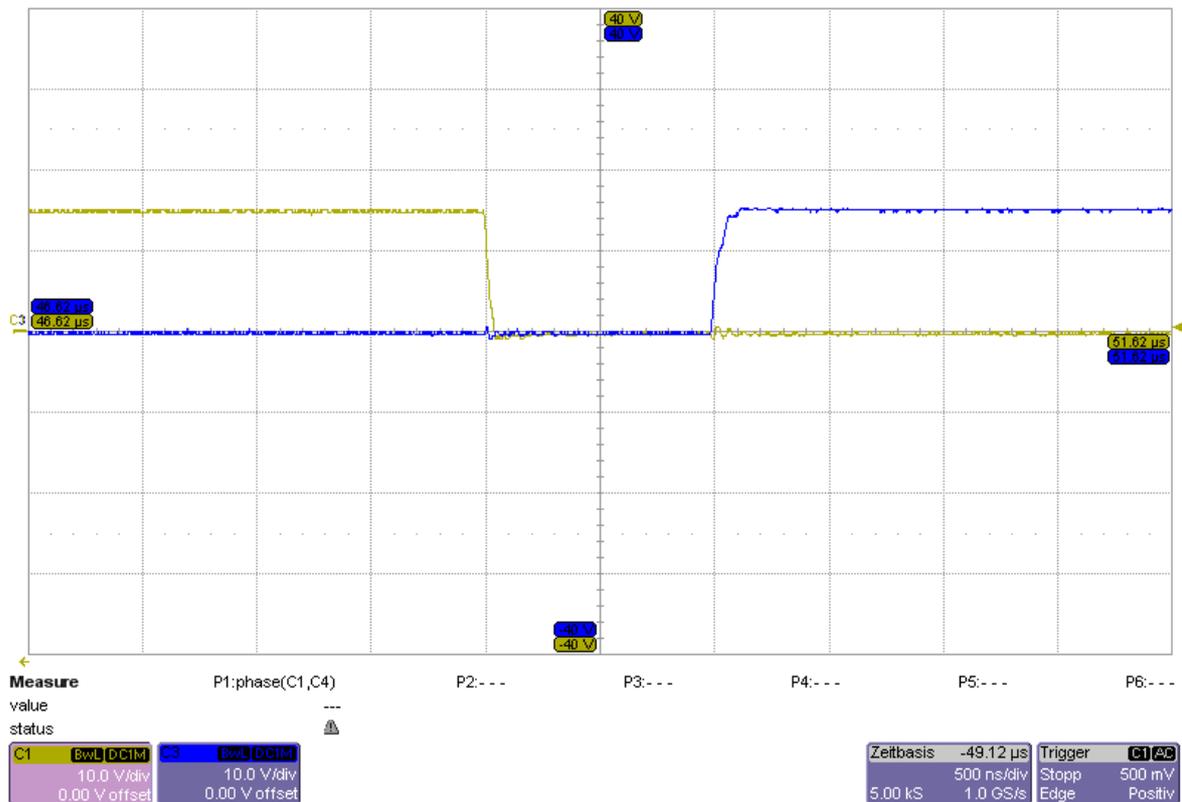


Abb. 3-30: Totzeit

Wie zu erkennen ist, wird die eingestellte Totzeit von 1 µs zwischen den Ansteuersignalen eingehalten. Mit der entsprechenden Ansteuerung aller drei Halbbrücken einer B6-Brückenschaltung und der einstellbaren Totzeit kann die Funktion des Umrichters hergestellt werden.

Umrichterschütz

Wie bereits im Abschnitt 3.4.4 erläutert, wurde das Sicherheitskonzept des doppelt gespeisten Asynchrongenerators um ein zusätzliches Schütz erweitert, welches eine Überwachung der Zwischenkreisaufladung ermöglicht.

Die Aufladung des Zwischenkreises bei dem DG-ASG demonstriert Abb. 3-31. Hierbei zeigt sich, dass die Zwischenkreisspannung nach rund 150 ms einen Wert von 130 V erreicht, der die Einschaltchwelle für das neue Umrichterschütz darstellt. Aufgrund des Schließverzuges des Schützes schließt sich dieses nach rund 190 ms. Da die vorhandenen Vorladewiderstände dafür ausgelegt sind, einen Kurzschluss im Zwischenkreis bei direktem Netzanschluss (ohne Spannungsabsetzung durch den Transformator) bis zu 200 ms zu überstehen [14], kann davon ausgegangen werden, dass sie auch beim DG-ASG

einen Kurzschluss für diese Zeitspanne aushalten. Der Zwischenkreis ist im Normalfall nach 200 ms aufgeladen. Deshalb wird die Zwischenkreisüberwachung so eingestellt, dass nach dieser Zeit das Umrichterschütz öffnet, wenn bis dahin der Zwischenkreis doch nicht aufgeladen sein sollte.

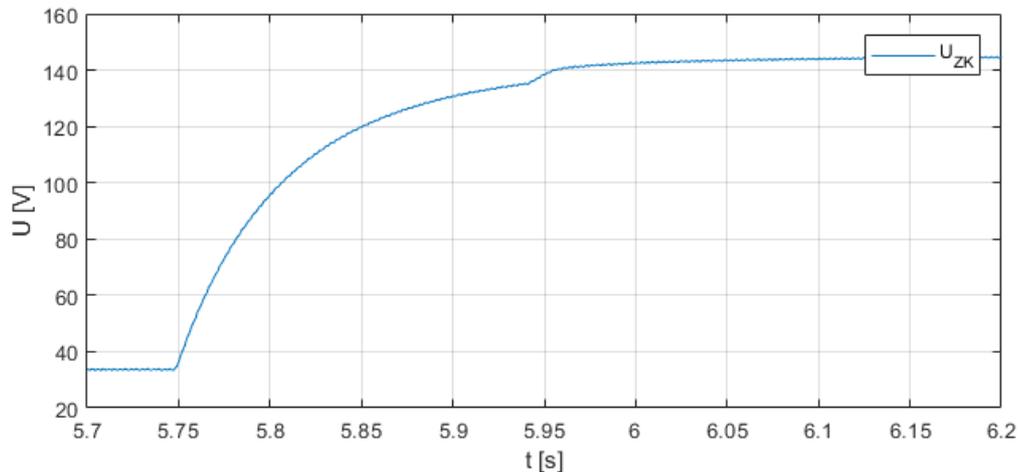


Abb. 3-31: Aufladung der Zwischenkreiskondensatoren

Parameterfehler Windsimulation

Ein Fehler in der von Herrn Bothe [46] erstellten Windsimulation musste behoben werden, weil dieser zur Abschaltung des Versuchsstandes führte. Der Fehler entstand während des Betriebs mit Vollumrichter (Programm *ASM_Drehzahl*) beim Versuch, die Windsimulation von laminaren auf turbulente Windverhältnisse umzustellen. Er resultierte aus einer falschen Initialisierung der Variable für die Windgeschwindigkeit (v_W) in dem zum Simulinkprogramm dazugehörigen Matlab Skript *Wind_Sim_Param_Drehzahl*. Diese ist in diesem Fall mit null initialisiert worden, was im späteren Verlauf der Simulation zu einem undefinierten Zustand (Division durch null) und daraus folgend einen NaN-Fehler (Englisch, Not a Number) führte. Aus diesem Grund funktionieren die nachgeschalteten Regelkreise nicht korrekt, deshalb kam es zu unsinnigen Sollwertvorgaben und schließlich zur Abschaltung.

Die einfachste Möglichkeit dies zu umgehen, liegt in der Anpassung des Initialwertes auf einen Wert > 0 m/s (gewählt 4 m/s). Weil turbulente Windverhältnisse bei völliger Windstille sowieso nicht vorkommen, wird dadurch die Simulation auch nicht eingeschränkt.

3.4.9 Änderungen ControlDesk

Das in ControlDesk erstellte Human-Machine-Interface (HMI) dient zur Steuerung des Versuchsstandes. Aus diesem Grund ist ein Zugriff auf alle wichtigen Variablen und Parameter der Anlage notwendig. Um zu verhindern, dass Eingaben getätigt werden können, die den Versuchsstand zu stark belasten, wurden Softwareendlagen konfiguriert. Diese blockieren (unbeabsichtigte) Fehleingaben und erlauben nur das Anfahren von Arbeitspunkten (Drehzahl, Leistungssollwerte usw.), die die Studierenden der HAW bei ihren Versuchen auch anfahren sollen.

Eine weitere Änderung im HMI ist die neue Fehlerauswertung. Im bisherigen Versuchsstand ist nur eine einfache Fehlererkennung programmiert, die nur zwischen allgemeinen Fehlern, Auslösen der Kurzschlussüberwachung oder Fehler im Umrichter unterscheidet. Zur genaueren Fehlererkennung wurde für alle Generatorsysteme eine neue Fehlerermittlung implementiert, die verschiedene Probleme automatisch erfasst und dies dem Bediener über eine entsprechende Meldung anzeigt. Die von der Anlage automatisch entdeckten Fehler sind:

- Versorgungsspannung 24 VDC oder 230 VAC nicht vorhanden
- Phasenfehler (U,V,W) im NWR bzw. MWR
- Übertemperatur im NWR/MWR, ASM oder Bremschopper
- Vorlade-, Stator- oder Umrichterschütz nicht geschlossen
- Zwischenkreis nicht aufgeladen
- Zwischenkreisspannung unterhalb der zulässigen Grenzwerte
- Zwischenkreisspannung oberhalb der zulässigen Grenzwerte
- Erlaubter Drehzahlbereich verletzt

Die genauen Grenzwerte unterscheiden sich je nach Generatorprinzip und liegen dem sich im Anhang befindenden Programmen bei.

4 Inbetriebnahme und Tests

In diesem Kapitel werden die bei der Inbetriebnahme des Prüfstandes durchgeführten Tests von wichtigen Einzelkomponenten wie Drehzahlgeber und Bremschopper sowie die am Schaltschrank durchgeführten Prüfungen beschrieben.

4.1 Sicherheitsmessungen

Bevor eine elektrische Anlage in Betrieb genommen werden darf, müssen gewisse Sicherheitsprüfungen und Messungen durchgeführt werden. Dadurch soll sichergestellt werden, dass die Anlage nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik hergestellt ist. Der im Labor aufgebaute Prüfstand muss dabei gemäß der europäischen Norm EN-60204-1 (VDE 0113-1) „Sicherheit von Maschinen – Elektrische Ausrüstung von Maschinen“ geprüft werden.

Im Verlaufe dieser Arbeit wurden deswegen folgende Prüfungen durchgeführt:

- Messung der durchgehenden Verbindung des Schutzleitersystems
- Isolationswiderstandsprüfung
- Prüfung auf Schutz gegen Restspannung

Die Ergebnisse der einzelnen Prüfungen wurden unter Angabe der verwendeten Messgeräte, den entsprechenden Angaben für die Prüfgrundlage (Norm, Abschnitt) und den erzielten Messergebnissen in einem Protokoll festgehalten, welches sich im Anhang zu dieser Arbeit befindet. Während der Prüfungen konnte festgestellt werden, dass die Bedingungen der europäischen Norm erfüllt werden und die Anlage in Betrieb genommen werden kann.

4.2 Drehzahlgeber

Als Drehzahlgeber kommt ein Drehimpulsgeber 1XP8001-2 der Firma Siemens zum Einsatz. Um seine Funktion zu überprüfen, wurde der Geber mit der Welle der Arbeitsmaschine verbunden und an das dSPACE-System angeschlossen. Danach wurde das Drehgebersignal bei verschiedenen Drehzahlen überprüft.

4.2.1 Versuchsaufbau

Die Anbindung des Drehzahlgebers erfolgt über die Platine Messwerterfassung, die über die Platine Verteilung mit der MicroLabBox verbunden ist. Der Anschluss des Gebers ist dabei über die Schnittstelle Digital I/O B hergestellt.

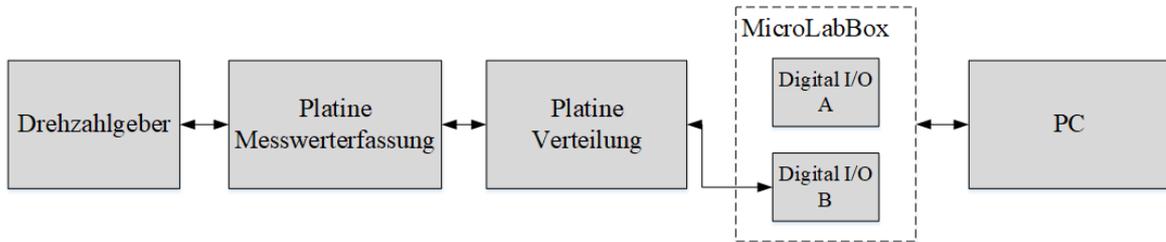


Abb. 4-1: Drehgeber Anschluss

Die nachfolgende Abbildung zeigt das zum Auslesen des Drehzahlgebers verwendete Simulinkmodell.

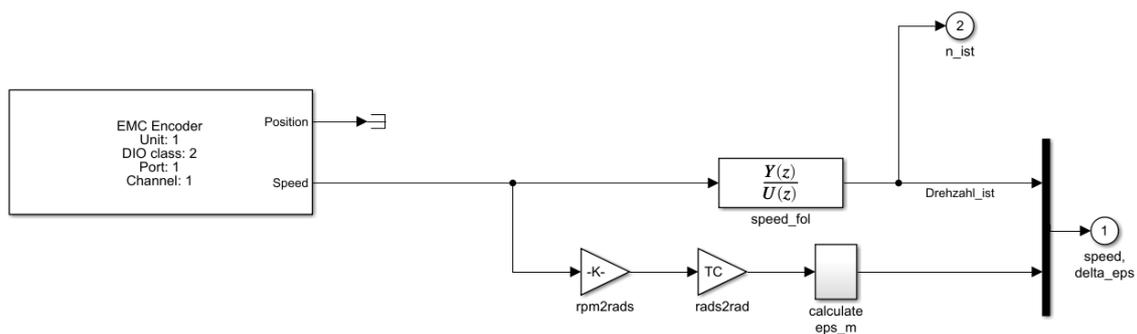


Abb. 4-2: Drehgeber Simulinkmodell

Das Modell besteht aus dem Block EMC_Encoder, welcher die Drehgebersignale intern auswertet und je nach Parametrierung die aktuelle Position und Geschwindigkeit der Welle entweder als absolute Größen ($0-360^\circ$ und Drehzahl in min^{-1}) oder mit der aktuellen Anzahl an Inkrementen ausgibt. Daraufhin erfolgt noch eine Glättung mit einem PT_1 -Filter (speed_fol).

4.2.2 Ergebnisse

Zum Einstellen der unterschiedlichen Drehzahlen wurde die bereits vorhandene Drehzahlregelung der Gleichstrommaschine genutzt, wie sie in der Vorgängerarbeit [8] beschrieben ist.

Die mit der MicroLabBox aufgezeichneten Messergebnisse sind in der Abbildung 4-3 aufgeführt. Gemessen wurde mit einer Abtastzeit von 1 ms. Es wird ersichtlich, dass über den gesamten Drehzahlbereich keine größeren Messabweichungen vorhanden sind. Die Überschwinger am Anfang eines Sollwertsprunges sind dabei typisch für den in der Vorarbeit [8] eingesetzten PI-Regler.

Im untersten Diagramm der Abb. 4-3 lässt sich jedoch erkennen, dass auch bei einer konstant eingestellten Drehzahl es trotz Filterung noch zu kleineren Messungenauigkeiten kommt.

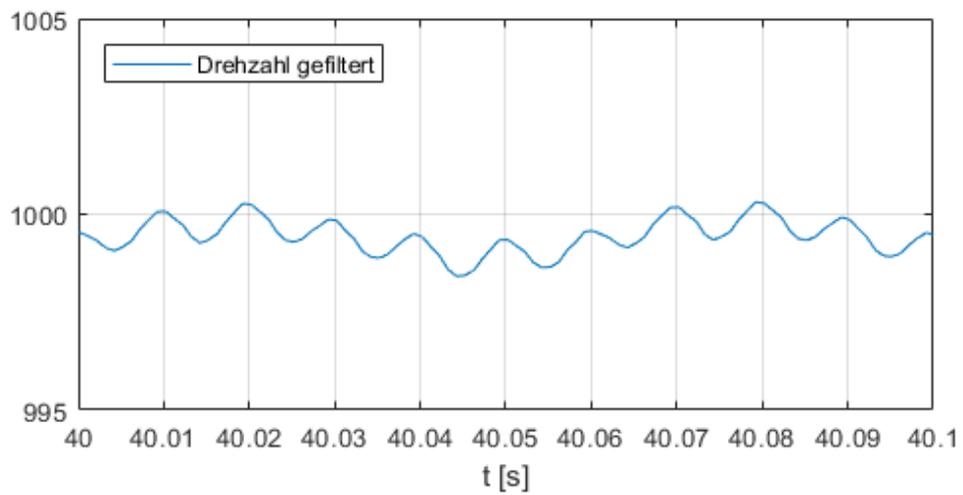
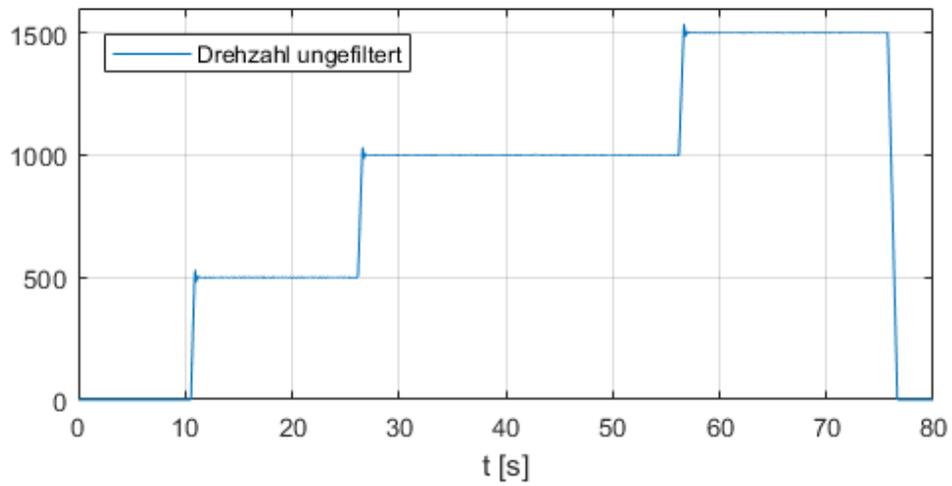
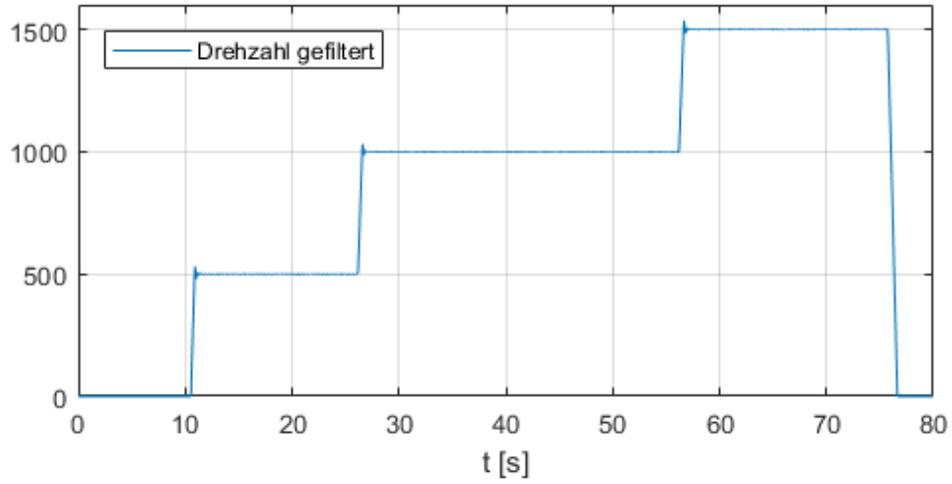


Abb. 4-3: Messergebnisse Drehzahlgeber

4.3 Bremschopper

Vor der Inbetriebnahme des Gesamtsystems muss der Bremschopper auf seine ordnungsgemäße Funktion überprüft werden. Dieser dient dazu, eventuelle Überspannungen im Zwischenkreis mithilfe eines Bremswiderstandes abzubauen um Beschädigungen an der Anlage zu Vermeiden.

4.3.1 Versuchsaufbau

Die Funktion des Bremschoppers lässt sich untersuchen, indem an den Umrichter-Zwischenkreis ein Labornetzteil angeschlossen wird, welches unterschiedliche Zwischenkreisspannungen simuliert.

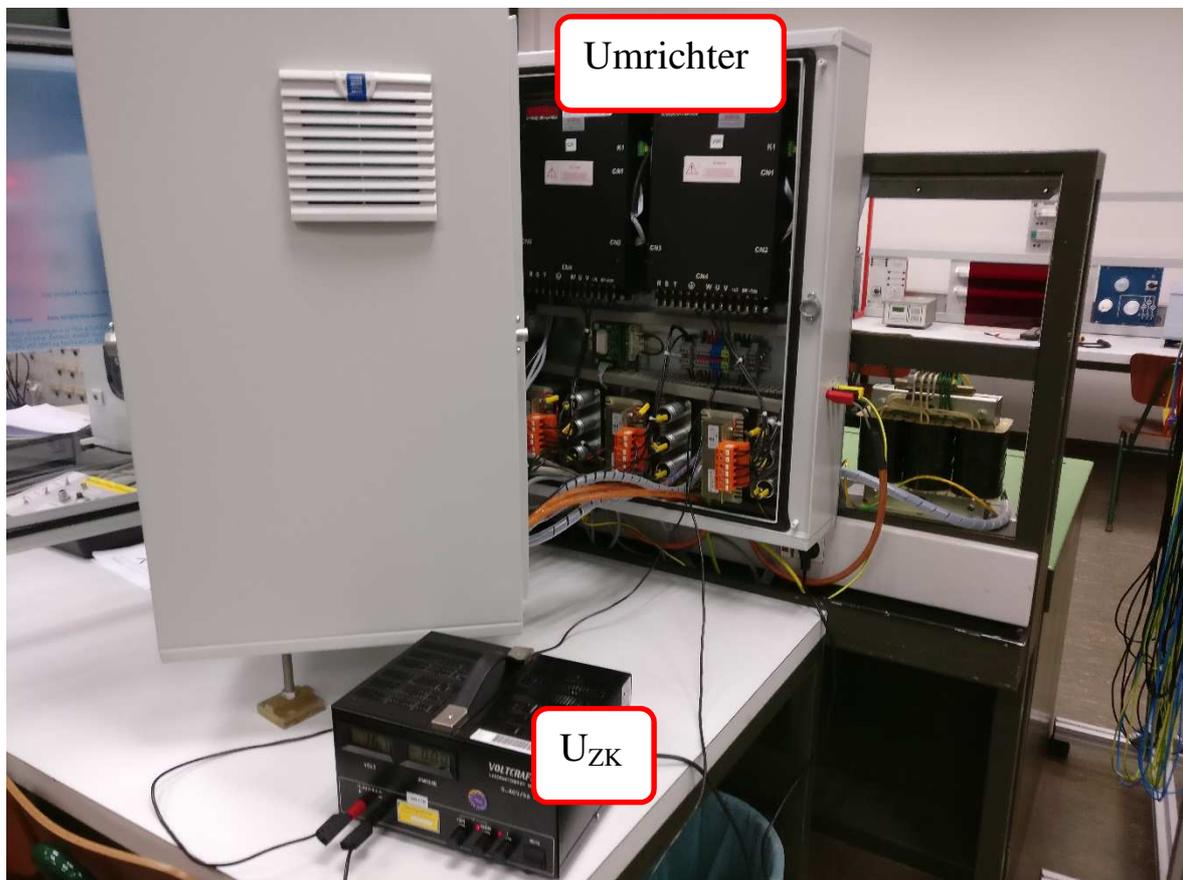


Abb. 4-4: Bremschopper Testaufbau

Die Signalübertragung zur MicroLabBox verläuft ähnlich wie beim Drehzahlgeber über die Platinen Signalanpassung und Verteilung.

Das dazugehörige Simulinkmodell ist nachfolgend abgebildet. Es erfasst die aktuelle Zwischenkreisspannung U_{ZK} , die Betriebsspannung U_B , Die am Bremswiderstand

anliegende Spannung U_{BR} und den dazugehörigen Strom I_{RB} . Zusätzlich wird von der IGBT Treiberplatine auch der digitale Fehlerausgang nERROR und die Temperatur erfasst.

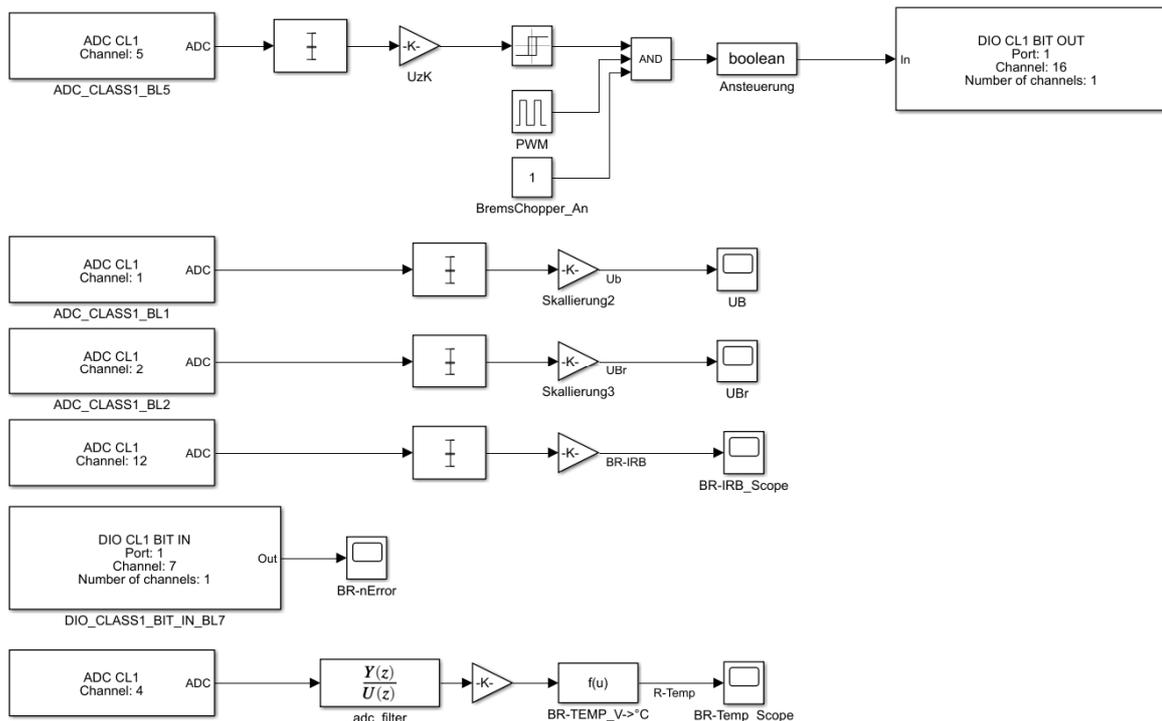


Abb. 4-5: Simulinkmodell Bremschopper Test

4.3.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse des Bremschoppertests sind in Abb. 4-6 dargestellt. Als Einschaltswelle wurde eine Zwischenkreisspannung von 30 V gewählt und diese dann manuell über das Labornetzteil eingestellt. Anhand des zeitlichen Verläufe der Zwischenkreisspannung U_{ZK} und dem Strom- und Spannungsverlauf I_{BR} und U_{BR} am Bremswiderstand lässt sich erkennen, dass nach Erreichen der Einschaltswelle der Bremschopper mit PWM-Signalen U_{BR} beaufschlagt wird. Dabei liegt dann die volle Zwischenkreisspannung am Bremswiderstand an.

Fällt die Betriebsspannung U_B unter 13,5 V registriert der IGBT-Treiber eine Unterspannung und stellt den nERROR-Ausgang auf High-Zustand, welcher durch eine logische „1“ repräsentiert wird. In diesem Falle kann der IGBT-Treiber nicht mehr schalten, weshalb am Bremswiderstand keine Spannung mehr anliegt. Nachdem die Betriebsspannung wieder einen Wert von $U_B > 13,5V$ angenommen hat können die Ansteuersignale wieder durchgeschaltet werden und der Fehlerausgang geht wieder auf den Low-Zustand zurück (logisch „0“).

Wird die Zwischenkreisspannung unter die Ausgangsschwelle von 25 V gesenkt wird der Bremschopper ausgeschaltet.

Die Ergebnisse zeigen, dass die ordnungsgemäße Funktion des Bremschoppers gegeben ist.

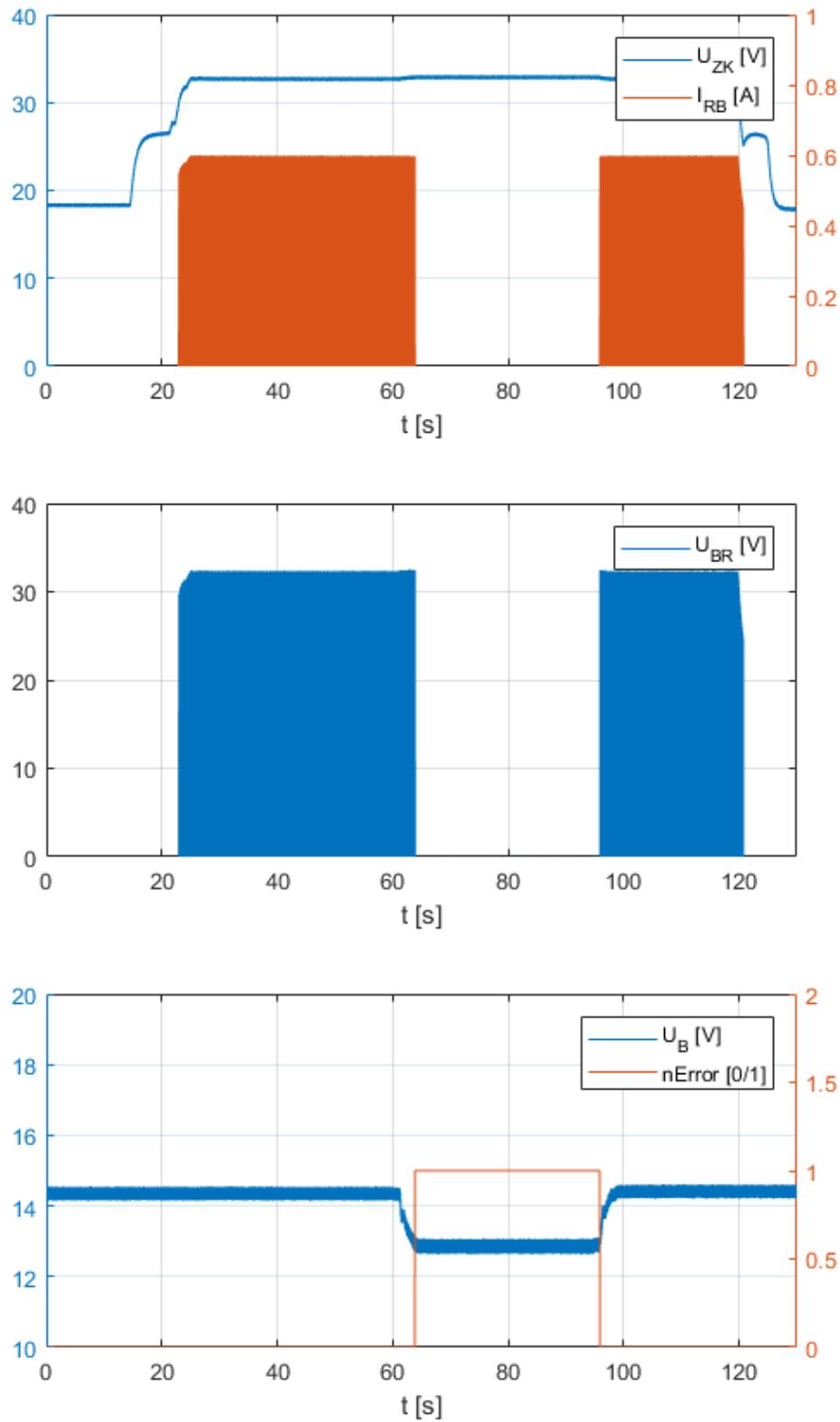


Abb. 4-6: Messergebnisse Bremschoppertest

5 Vergleich der Versuchsstände

Abschließend soll der neu aufgebaute Versuchsstand (WEA 2) mit dem bereits vorhandenen (WEA 1) verglichen werden. Dazu wurden bei beiden Anlagen unterschiedliche Arbeitspunkte angefahren, um die sich dann einstellenden Leistungskennwerte aufzunehmen. Zur Messung wurden zum einen die interne Sensorik der Versuchsstände genutzt (dSPACE), zum anderen ein WT500 Leistungsanalysator der Firma Yokokawa und ein GEN3i-Datenrekorder der Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH.

Die in diesem Kapitel dargestellten Diagramme sind, wenn nicht anders angegeben bzw. nicht zutreffend, in Erzeugerbepfeilung dargestellt. Das bedeutet, positive Leistungen werden von der Asynchronmaschine ins Versorgungsnetz eingespeist, während negative Leistungen dem Netz entnommen werden.

5.1 ASG direkt am Netz

Um die Genauigkeit der nachfolgenden Messungen zu erhöhen, wurde beim Versuch mit direkt am Versorgungsnetz angeschlossenem Generator der Drehstromtransformator abgeklemmt. Dieser wird nur bei der doppelt gespeisten Asynchronmaschine benötigt und würde bei der ASG am Netz nur im Leerlauf betrieben werden. Die hierbei durch den Transformator aufgenommene Wirk- und Blindleistung würde jedoch von den Messinstrumenten der Versuchsstände miterfasst werden, was zu Abweichungen zwischen der gemessenen und der eigentlich eingespeisten bzw. aufgenommenen Leistung führt.

Für die nachfolgenden Messungen wurde im ControlDesk Projekt die maximale ins Versorgungsnetz einzuspeisende Wirkleistung auf 4200 W begrenzt.

5.1.1 Wirk- und Blindleistung

Das Verhalten der Versuchsstände bezüglich der auf- und abgegebenen Wirk- sowie Blindleistungen ist in den nachfolgenden Abbildungen 5-1 bis 5-6 dargelegt.

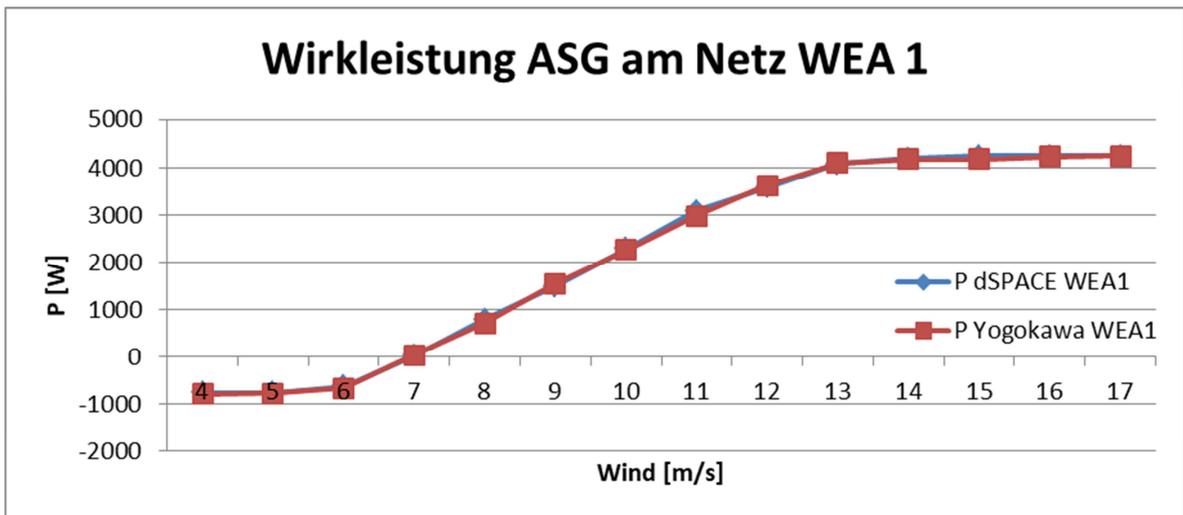


Abb. 5-1: Wirkleistung ASG am Netz WEA 1

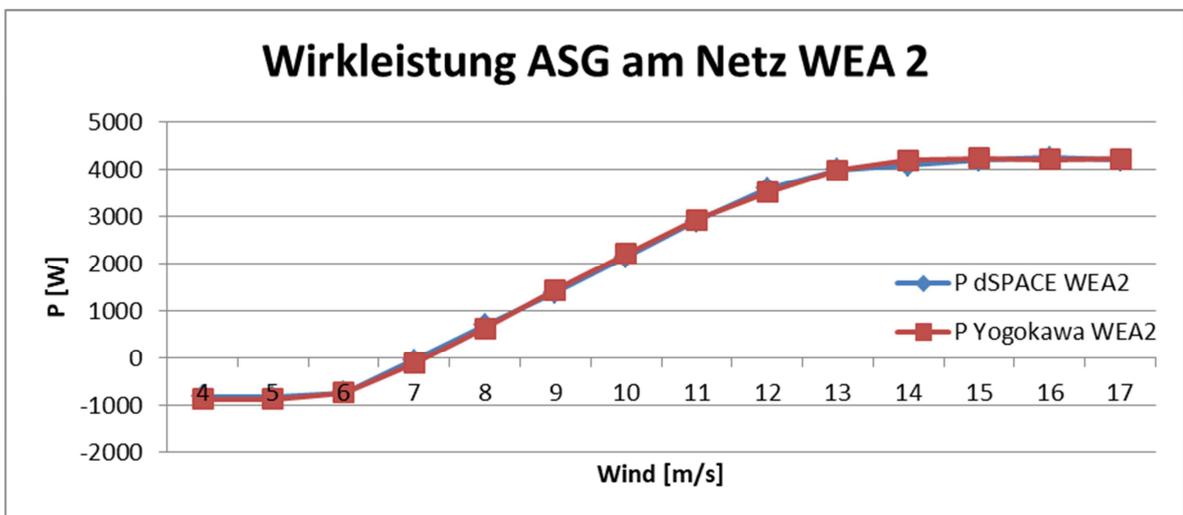


Abb. 5-2: Wirkleistung ASG am Netz WEA 2

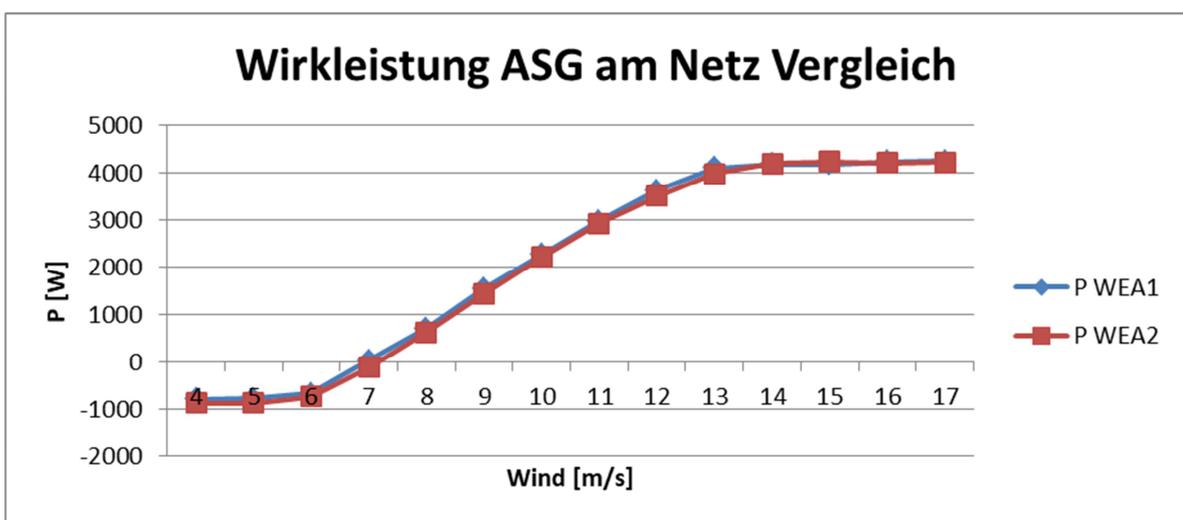


Abb. 5-3: Vergleich der Wirkleistungen ASG am Netz WEA 1 und WEA 2

Es ist deutlich zu erkennen, dass bei beiden Anlagen die intern von dSPACE aufgenommenen Wirkleistungen mit dem zur Gegenmessung genutzten Yokokawa Leistungsmesser übereinstimmen. Zusätzlich ist aus Abb. 5-3 ersichtlich, dass sich bei beiden Versuchsständen für unterschiedliche Windgeschwindigkeiten jeweils die gleichen Arbeitspunkte einstellen. Hierbei wird bei Windgeschwindigkeiten von etwas mehr als 13 m/s die zuvor eingestellte Begrenzung von 4200 W erreicht und danach gehalten.

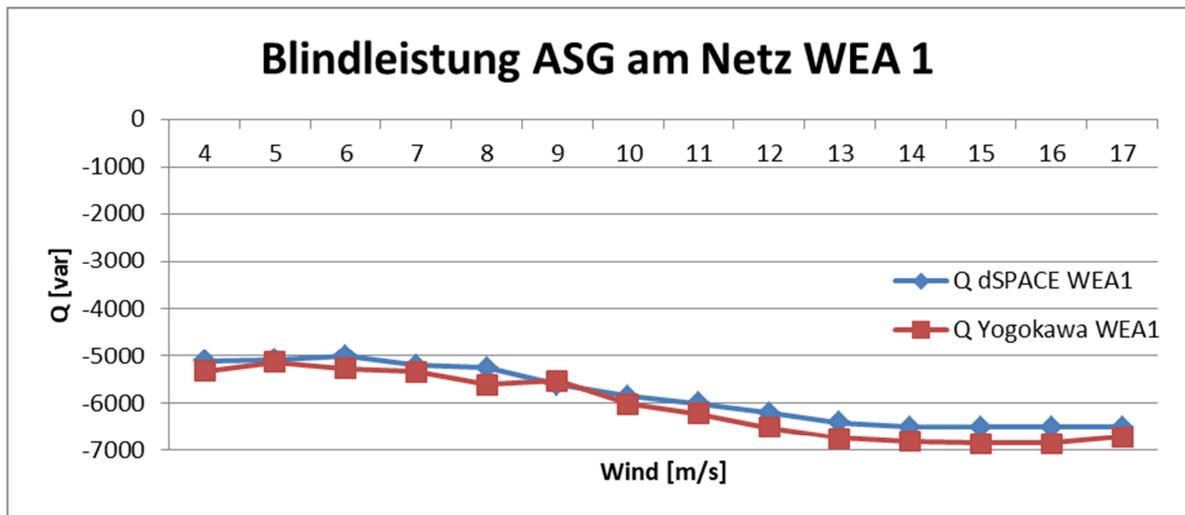


Abb. 5-4: Blindleistung ASG am Netz WEA 1

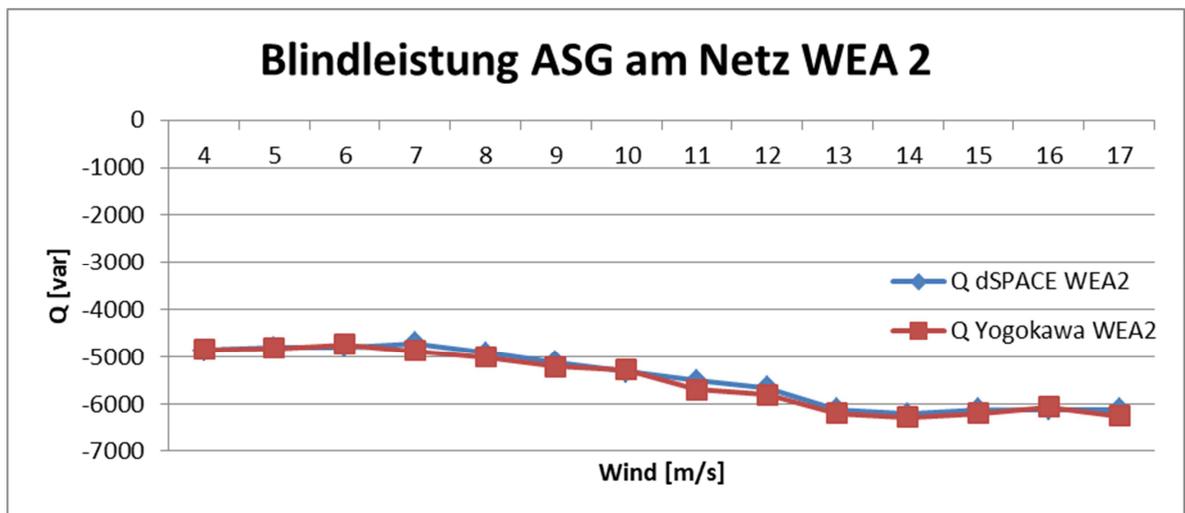


Abb. 5-5: Blindleistung ASG am Netz WEA 2

Für die Blindleistungsmessung ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei der Wirkleistung. Die vom neuen Versuchsstand gemessene Blindleistung ist beinahe identisch mit der extern gemessenen Blindleistung. Im Gegensatz dazu kommt es beim alten Versuchsstand an den meisten Messpunkten zu kleinen Abweichungen zwischen den Messreihen, wobei beachtet

werden muss, dass die gemessenen Leistungen während des Versuches durchaus um einige 100 var schwanken, was ein genaues Ablesen erschwert.

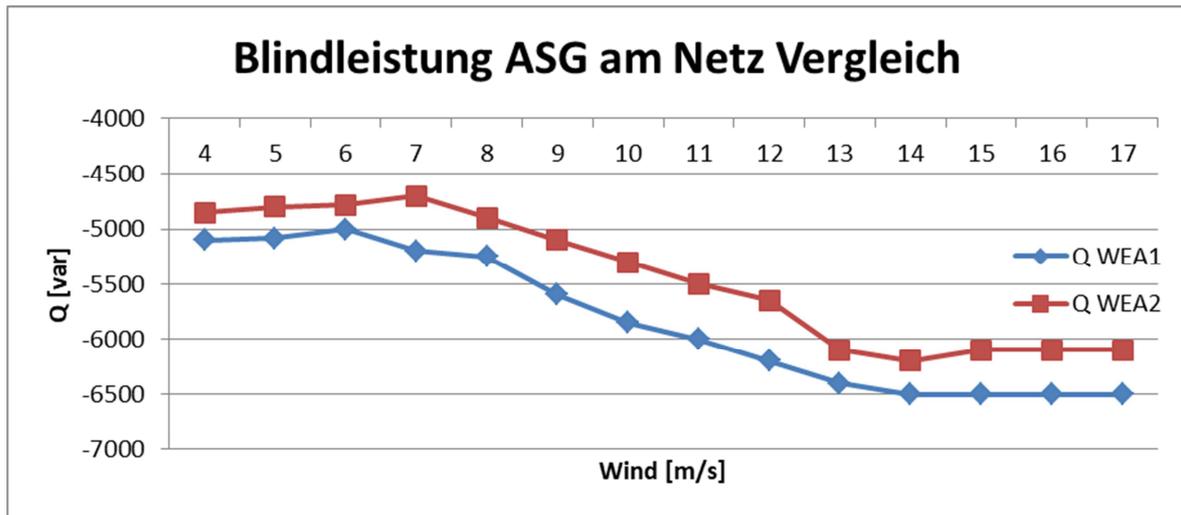


Abb. 5-6: Vergleich der Blindleistungen ASG am Netz WEA 1 und WEA 2

Der direkte Vergleich zeigt, dass der neue Versuchsstand über den gesamten Arbeitsbereich weniger Blindleistung aufnimmt. Die Leistungsdifferenz bleibt dabei relativ konstant und ist bei einer Windgeschwindigkeit von 10 m/s mit ca. 550 var am größten.

5.1.2 Drehzahl, Drehmoment und Pitch-Winkel

In diesem Abschnitt werden die Versuchsstände in Bezug auf die sich einstellenden Drehzahlen, Drehmomente und Pitch-Winkel während des Versuches des Asynchrongenerators direkt am Netz verglichen.

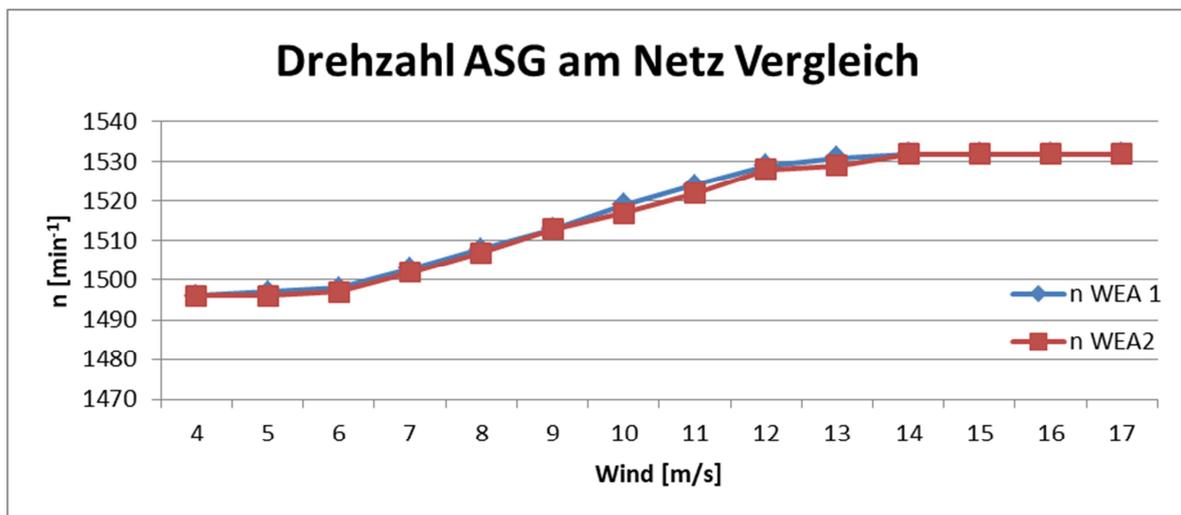


Abb. 5-7: Vergleich der Drehzahlen ASG am Netz WEA 1 und WEA 2

Wie in Abb. 5-7 dargestellt, weisen beide Variante praktisch dasselbe Drehzahlverhalten auf. Die maximale Abweichung beträgt lediglich 2 min^{-1} , was bei Drehzahlen von $1496\text{-}1532 \text{ min}^{-1}$ vernachlässigt werden kann.

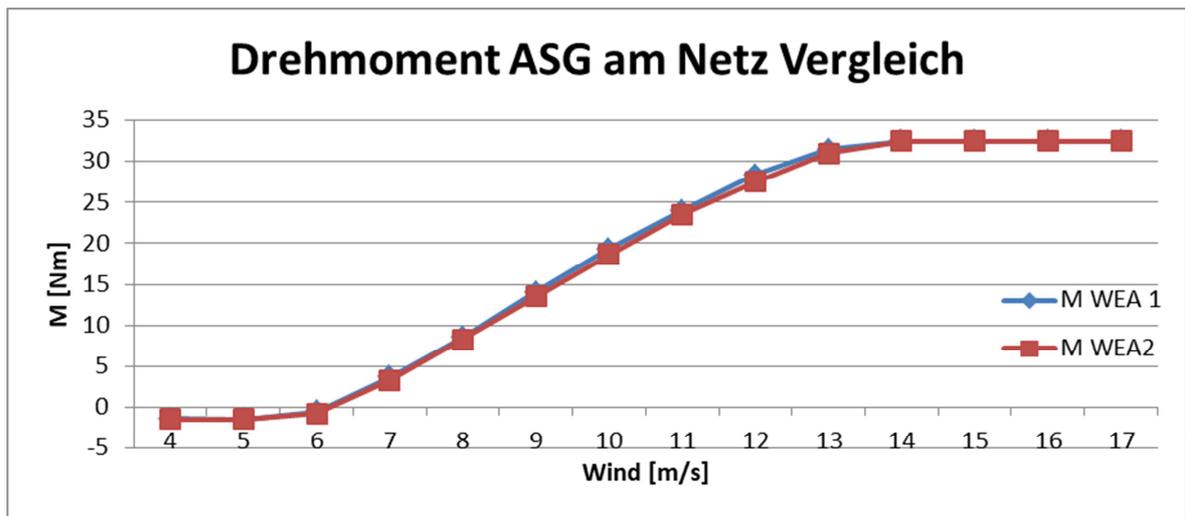


Abb. 5-8: Vergleich der Drehmomente ASG am Netz WEA 1 und WEA 2

Parallel zur Drehzahl ergibt sich bei den Drehmomenten ein ähnliches Verhalten. Dies ist auch nicht anders zu erwarten, weil aufgrund der Beziehung zwischen Leistung, Drehzahl und Drehmoment

$$P = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \quad (5-1)$$

sich bei, wie zuvor ermittelt, gleichen Leistungen und Drehzahlen auch dieselben Drehmomente einstellen müssen.

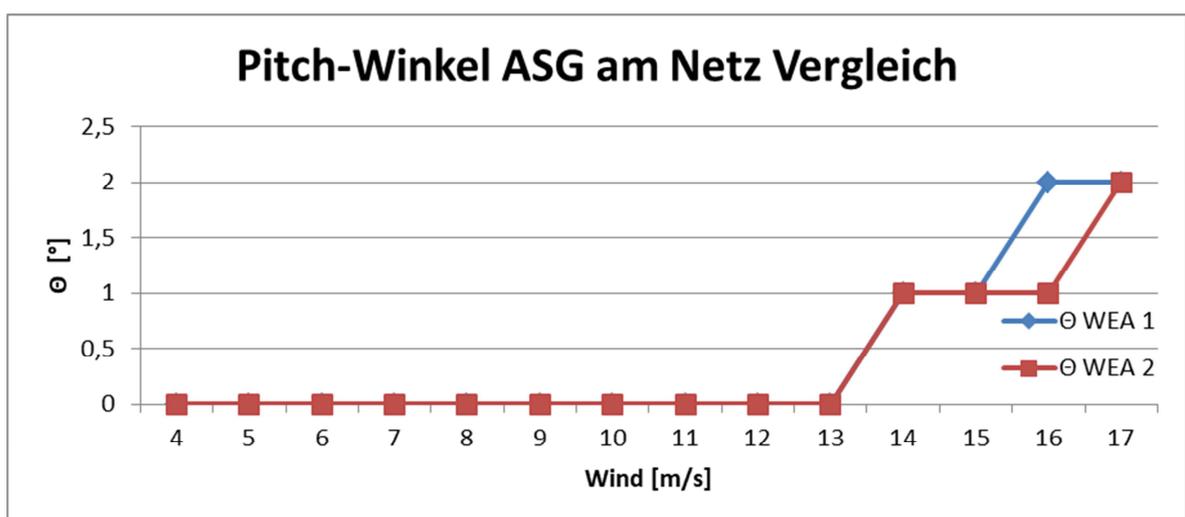


Abb. 5-9: Vergleich der Pitch-Winkel ASG am Netz WEA 1 und WEA 2

Auch die Pitch-Winkeln weisen einen ähnlichen Verlauf auf. Solange die maximale Wirkleistung von 4200 W nicht erreicht ist, muss auch der Pitch-Regler nichts unternehmen. Ab einer Windgeschwindigkeit von 14 m/s beginnen beide Regler gegenzusteuern, was sich mit den Generatorleistungen aus Abb. 5-3 deckt.

5.2 ASG mit Vollumrichter

Auch der Versuch mit Vollumrichter wurde zur Verbesserung der Messgenauigkeit mit abgeklemmtem Transformator durchgeführt.

Für die folgenden Messreihen wurde die maximale Wirkleistung wieder auf 4200 W und die Blindleistung auf 0 var begrenzt. Die eingestellte Pitch-Drehzahl betrug 1650 min^{-1} .

5.2.1 Wirk- und Blindleistung

Die nachfolgenden Abbildungen stellen die ins Versorgungsnetz eingespeisten Leistungen dar.

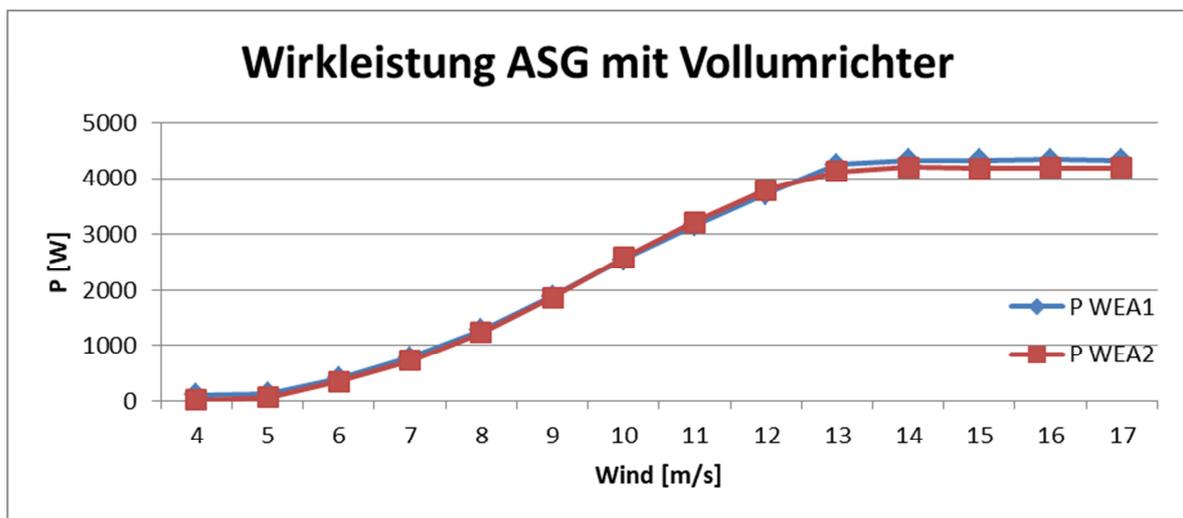


Abb. 5-10: Vergleich der Wirkleistungen ASG mit Vollumrichter

Die Wirkleistung weist einen recht gleichmäßiger Anstieg für beide Versuchsstände auf. Jedoch ist auffällig, dass bei der alten Anlage die maximale Wirkleistung mit rund 4340 W (vgl. Messwerttabellen im Anhang) den zuvor eingestellten Grenzwert von 4200 W übersteigt. Die neue Anlage kann diesen Grenzwert einhalten. Vergleicht man das Regelverhalten der Pitch-Regelung aus Abb. 5-15 wird erkennbar, dass der neue

Versuchsstand früher anfängt dem Leistungsanstieg entgegen zu regeln, wodurch der Sollwert eingehalten werden kann.

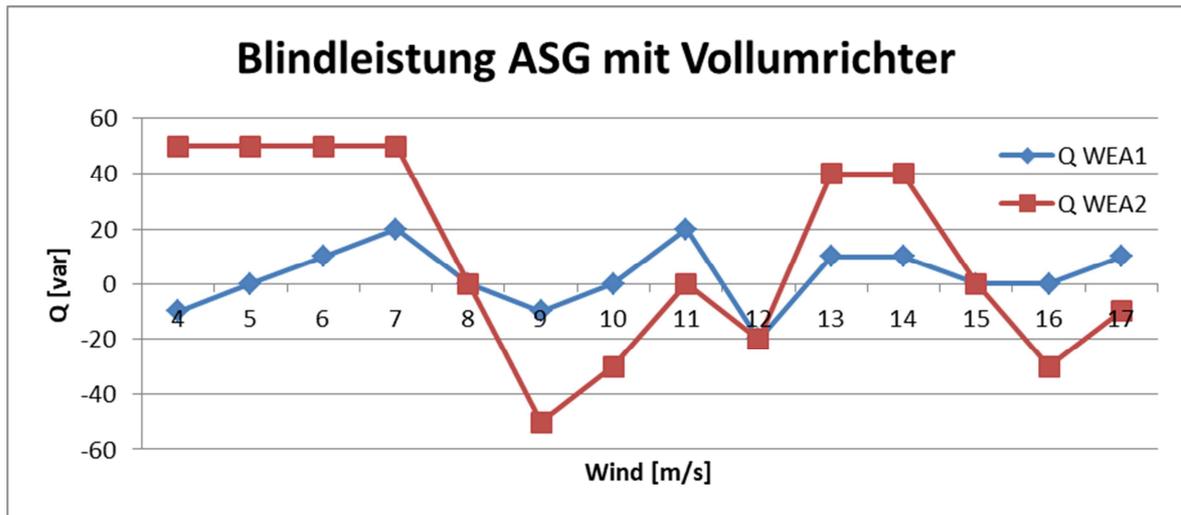


Abb. 5-11: Vergleich der Blindleistungen ASG mit Vollumrichter

Der Vergleich der Blindleistungen ist in Abb. 5-11 dargestellt. Wie zuvor beschrieben sollte während des Versuches die Blindleistung so geregelt werden, dass weder welche ins Netz abgegeben noch aus diesem aufgenommen wird. Prinzipiell funktioniert diese Regelung zwar bei beiden Anlagen, jedoch sind hier die Schwankungen bei der neuen Anlage größer. Damit ergibt sich für den neuen Versuchsstand mit Vollumrichter eine bessere Wirkleistungsregelung, während die Blindleistungsregelung beim ersten Versuchsstand besser funktioniert.

5.2.2 Drehzahl, Drehmoment, Pitch-Winkel und Leistungsbeiwert

Die aufgenommenen Drehzahlen und Drehmomente sind in den beiden nachfolgenden Abbildungen 5-12 und 5-13 abgebildet. Wie schon zuvor bei der ASG am Netz sind nur geringe Unterschiede zwischen den beiden Generatoren vorhanden. Auch bei den Leistungsfaktoren (c_p) in Abb. 5-14 treten keine großen Differenzen auf. Der Leistungsfaktor beschreibt das Verhältnis zwischen der dem Wind entnommenen Leistung und der im Wind vorhandenen Leistung.

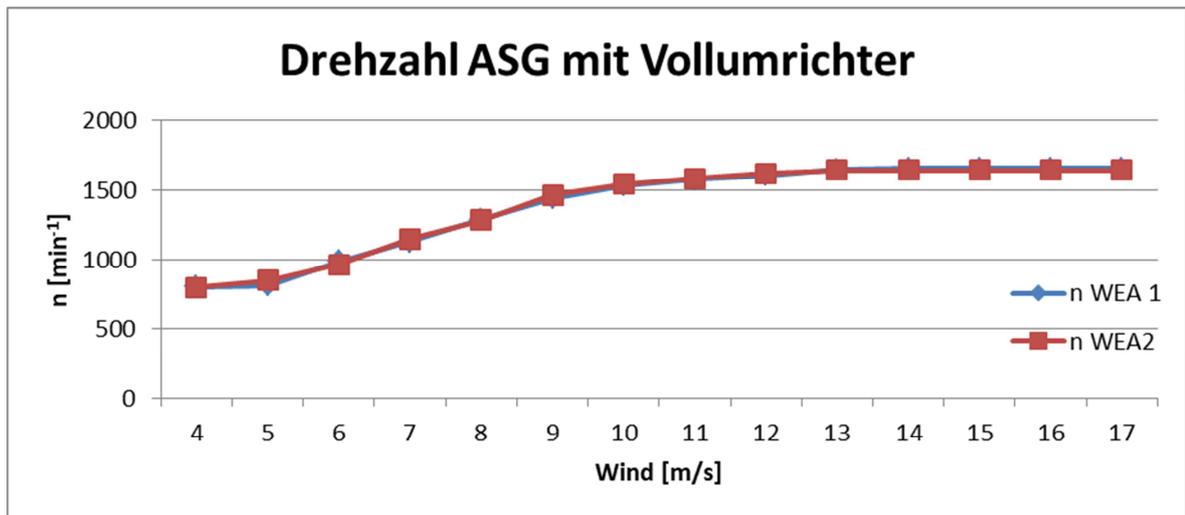


Abb. 5-12: Vergleich der Drehzahlen ASG mit Vollumrichter

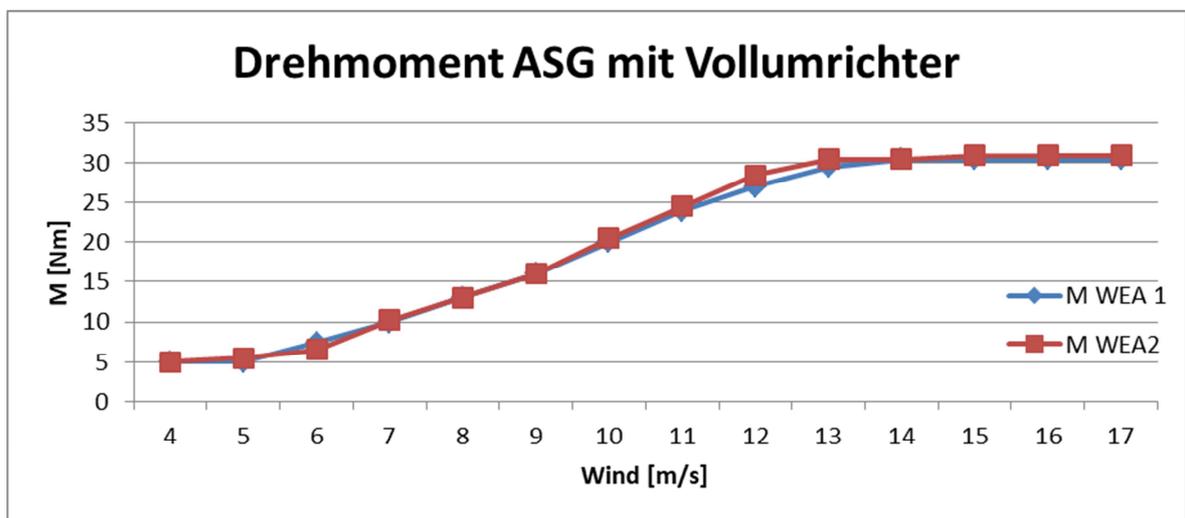


Abb. 5-13: Vergleich der Drehmomente ASG mit Vollumrichter

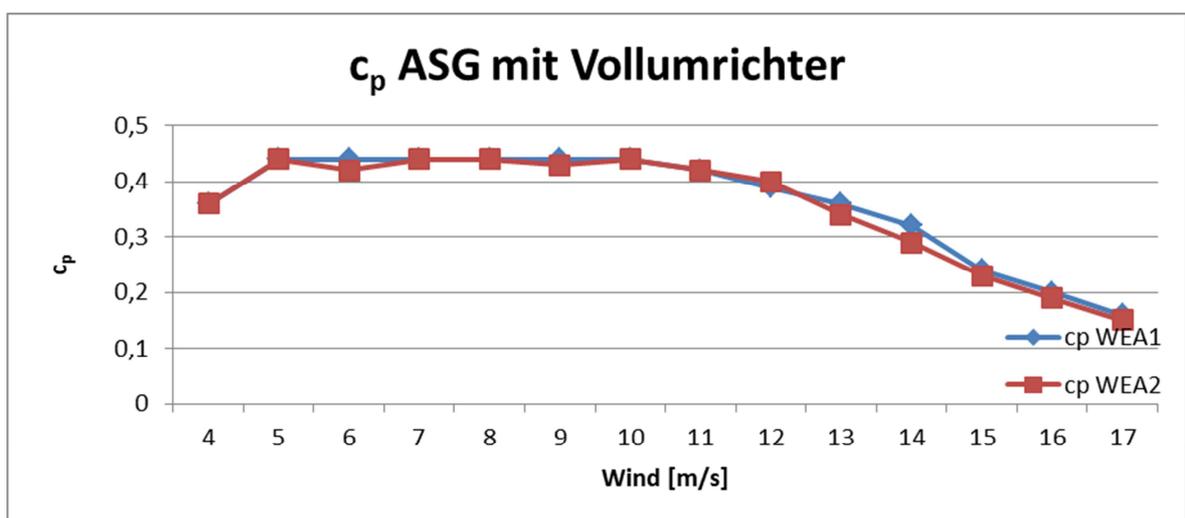


Abb. 5-14: Vergleich des Leistungsfaktors ASG mit Vollumrichter

Beim Pitch-Winkel zeigt sich das bereits im Abschnitt 5.2.1 beschriebene Verhalten. Ab einer Windgeschwindigkeit von 13 m/s beginnt die neue Anlage die Wirkleistung über die Pitch-Regelung zu begrenzen, während die alte Anlage erst später die Leistung begrenzt, was zu der oben erwähnten Überschreitung des maximalen Leistungswertes führt.

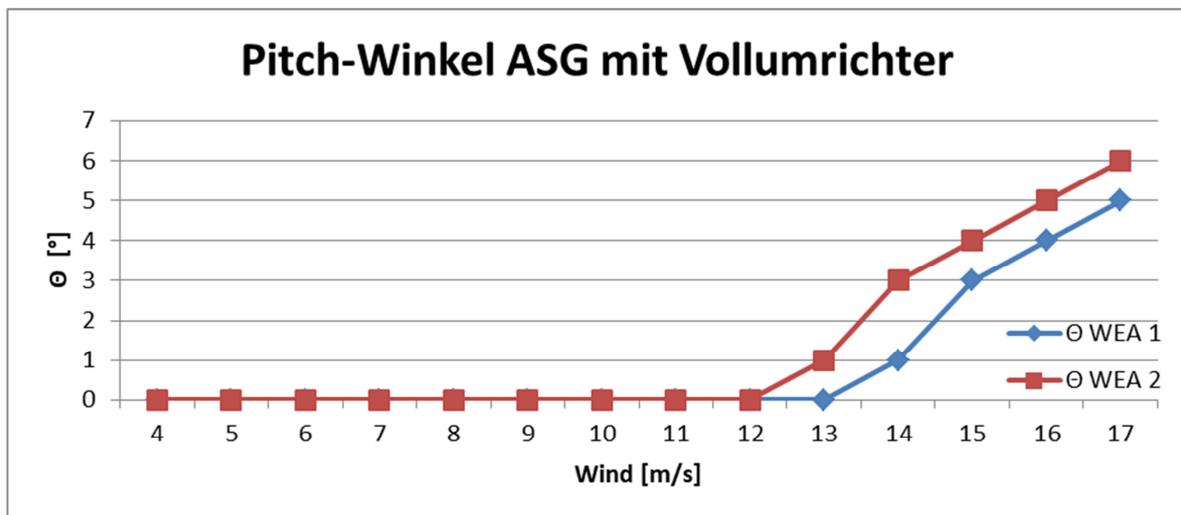


Abb. 5-15: Vergleich der Pitch-Winkel ASG mit Vollumrichter

5.2.3 Drehmomentkennlinien der WEA

Abschließend sind auf den nächsten beiden Seiten für den Versuch mit Vollumrichter die Drehmomentkennlinien für unterschiedliche Windgeschwindigkeiten wiedergegeben. Vor allem fällt auf, dass für Windgeschwindigkeiten zwischen 10–14 m/s und einer Drehzahl von 1550 min^{-1} es bei der WEA 1 zu einem Einbruch des Drehmoments kommt, welcher mit der neuen Anlage nicht mehr auftritt.

Daneben ist das Drehmoment in den unterschiedlichen Arbeitspunkten bei der WEA 2 jeweils um ca. 0,5–3,5 Nm höher, was sich auch in dem erreichten maximalen Drehmomenten (WEA 1 = 33 Nm, WEA 2 = 36,4 Nm, vgl. Messwerttabelle im Anhang) widerspiegelt. Nach Gleichung 5-1 resultiert daraus eine höhere erreichbare Wirkleistung des neuen Versuchsstandes.

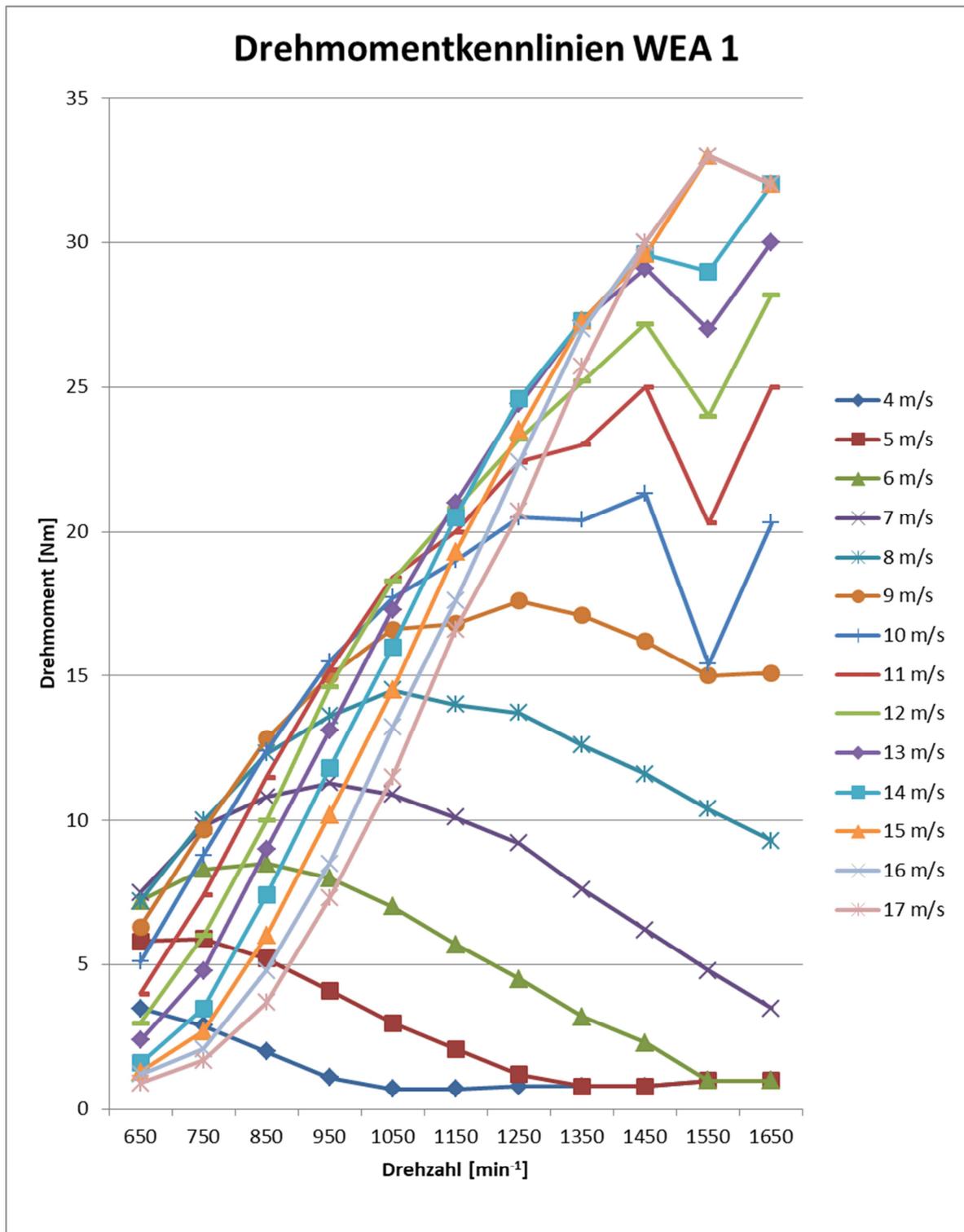


Abb. 5-16: Drehmomentkennlinien WEA 1 ASG mit Vollumrichter

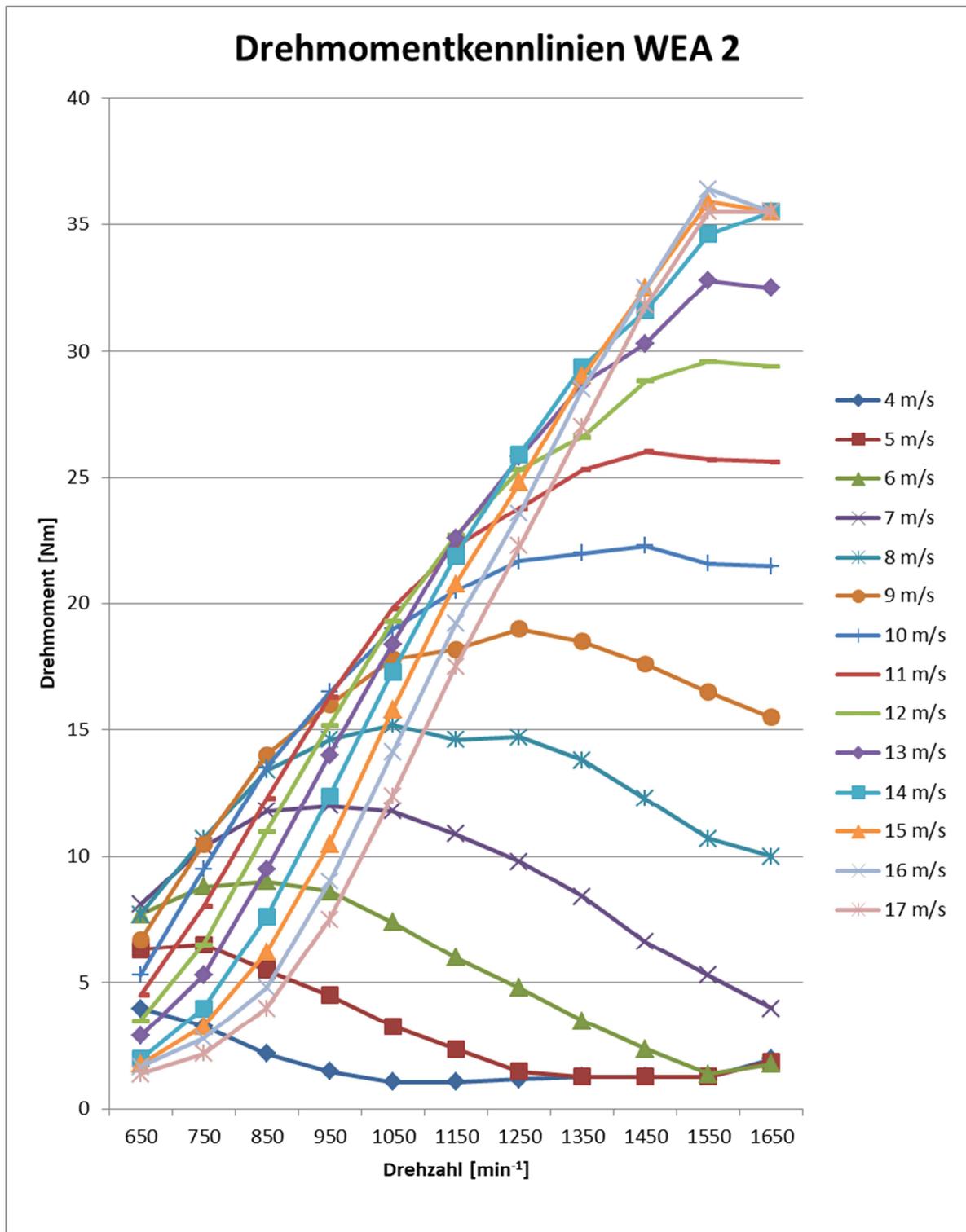


Abb. 5-17: Drehmomentkennlinien WEA 2 ASG mit Vollumrichter

5.3 DG-ASG mit Teilumrichter

Für das letzte behandelte Generatorkonzept, den DG-ASG mit Teilumrichter, wurden analog zu den bereits beschriebenen Versuchen folgende Maximal- bzw. Sollwerte festgelegt:

- $P_{\text{Max}} = 4200 \text{ W}$
- $Q_{\text{Soll}} = -5000 \text{ var}$
- $n_{\text{Pitch}} = 1650 \text{ min}^{-1}$

5.3.1 Wirk- und Blindleistung

Wie beim Asynchrongenerator direkt am Netz bzw. Generator mit Vollumrichter, weist auch die doppelt gespeiste Maschine von Beginn an nur sehr kleine Unterschiede in den Leistungswerten auf.

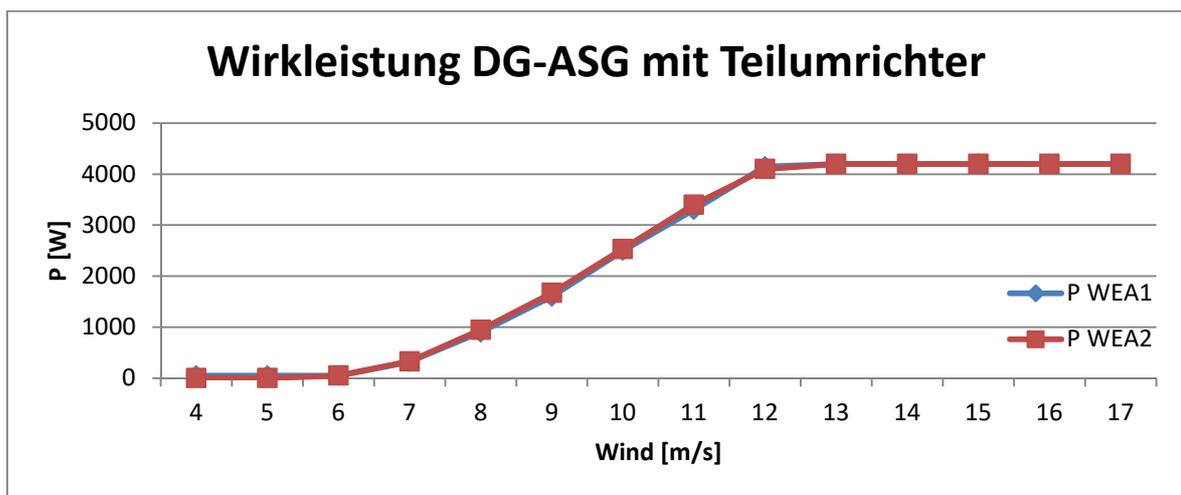


Abb. 5-18: Vergleich der Wirkleistungen DG-ASG mit Teilumrichter

Wie aus obiger Abbildung ersichtlich wird, speisen beide Versuchsstände über den gesamten Bereich nahezu dieselbe Wirkleistung ins Netz ein.

Die Abbildungen 5-19 und 5-20 machen dabei deutlich, dass die Leistung sowohl im Stator- als auch im Rotorkreis über einen großen Bereich nahezu identisch ist. Die Ausnahme hiervon bildet der Rotorkreis, der zu Beginn eine geringere Leistungsaufnahme bei der WEA 1 aufweist. Dies wird in der Gesamtbilanz aber durch eine etwas höhere Einspeiseleistung des Statorkreises des neuen Versuchsstandes teilweise ausgeglichen.

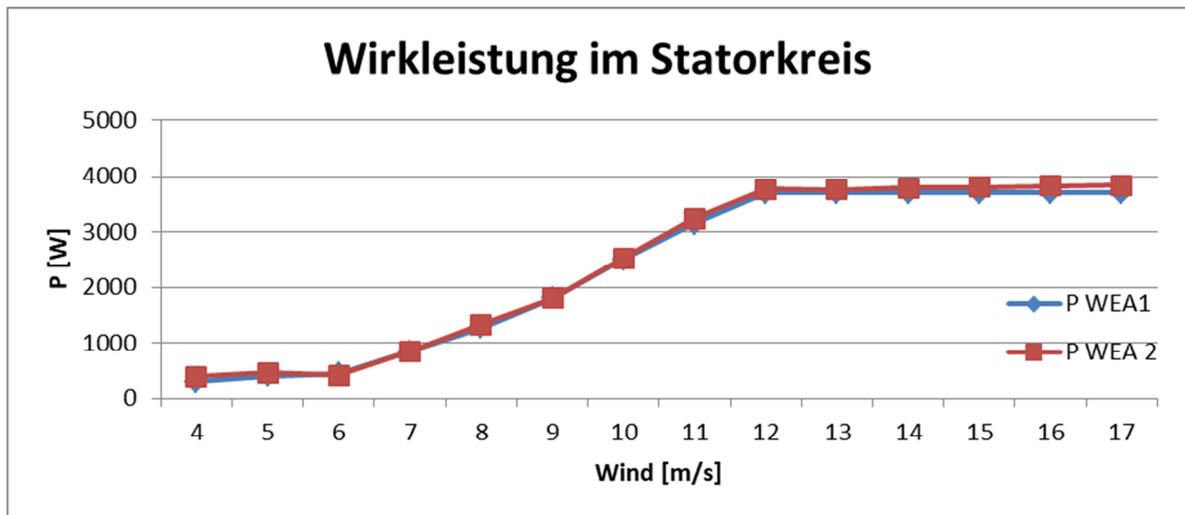


Abb. 5-19: Vergleich der Wirkleistungen im Statorkreis

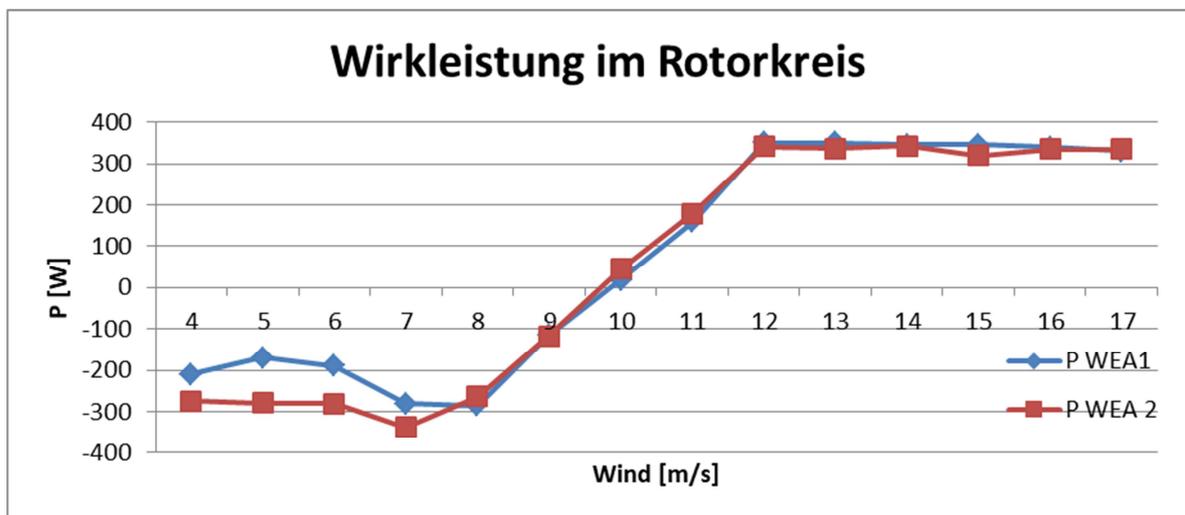


Abb. 5-20: Vergleich der Wirkleistungen im Rotorkreis

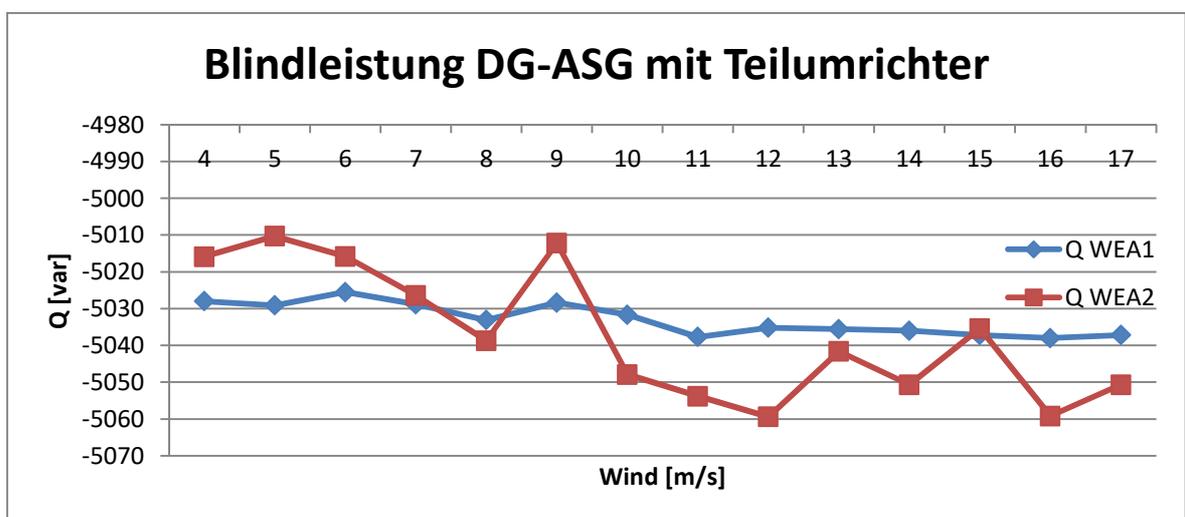


Abb. 5-21: Vergleich der Blindleistungen DG-ASG mit Teilumrichter

Die ermittelten Blindleistungen des DG-ASG sind in Abb. 5-21 wiedergegeben. Es ergibt sich ein ähnliches Bild wie zuvor beim Vollumrichter. Der eingestellte Sollwert von -5000 var wird zwar von beiden Anlagen leicht überschritten, jedoch sind auch hier die Schwankungen im neuen Versuchsstand größer, während im anderen Versuchsstand eine relativ konstante Abweichung zwischen 30 bis 40 var vorliegt. Dies lässt eher eine systematische Messabweichung anstatt einer ungenauen Regelung vermuten, welche sich leicht durch eine entsprechende Anpassung in der Leistungsberechnung der WEA 1 korrigieren ließe.

5.3.2 Drehzahl, Drehmoment, Pitch-Winkel und Leistungsbeiwert

Die folgenden Abbildungen 5-22 bis 5-25 präsentieren Verläufe, wie sie aufgrund der Wirkleistungsverläufe aus Abschnitt 5.3.1 zu erwarten sind. Die nahezu identischen Wirkleistungen der Versuchsstände spiegeln sich sowohl in gleichen Drehzahlen des Generators als auch in denselben Drehmomenten wieder. Lediglich die Pitch-Regelung der WEA 1 greift ein wenig früher ein, um die Begrenzung von 4200 W einzuhalten.

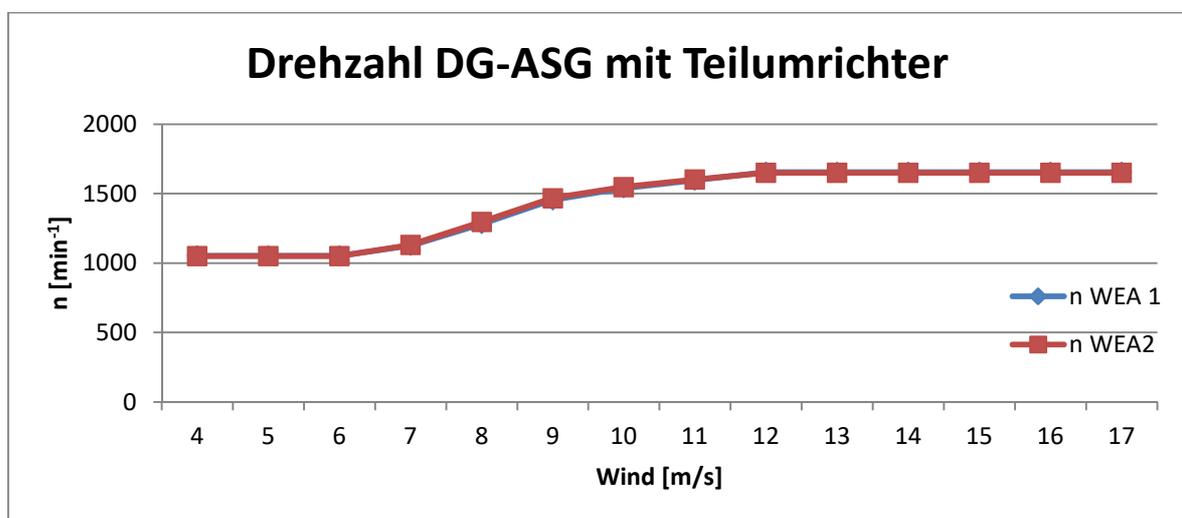


Abb. 5-22: Vergleich der Drehzahlen DG-ASG mit Teilumrichter

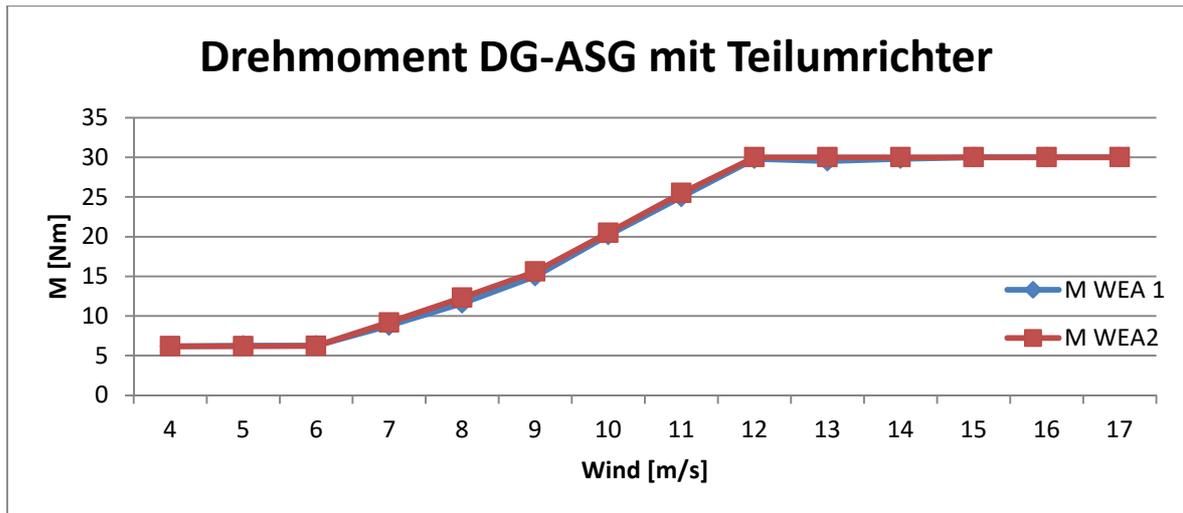


Abb. 5-23: Vergleich der Drehmomente DG-ASG mit Teilumrichter

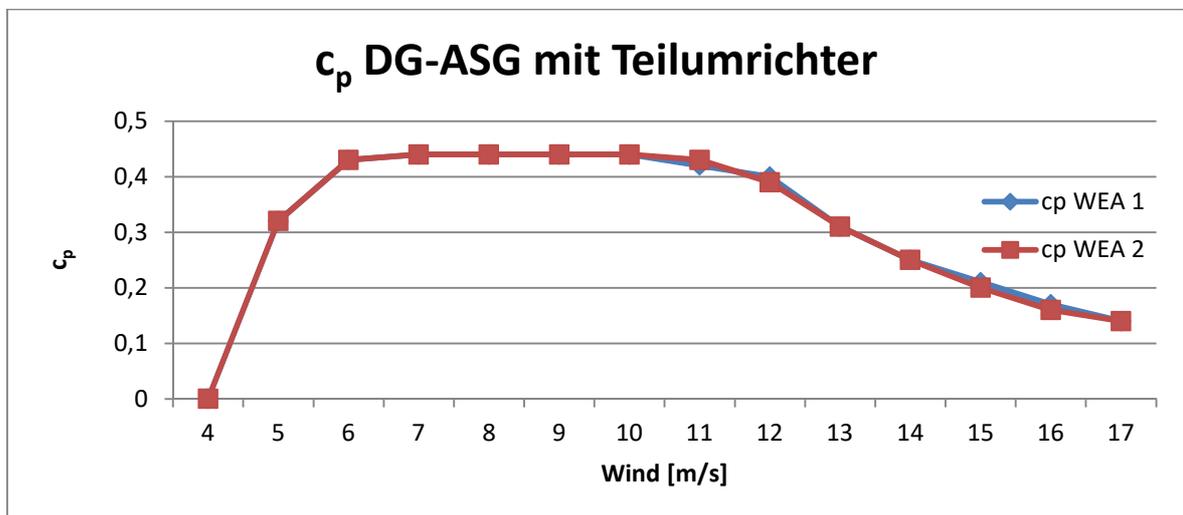


Abb. 5-24: Vergleich der Leistungsbeiwerte DG-ASG mit Teilumrichter

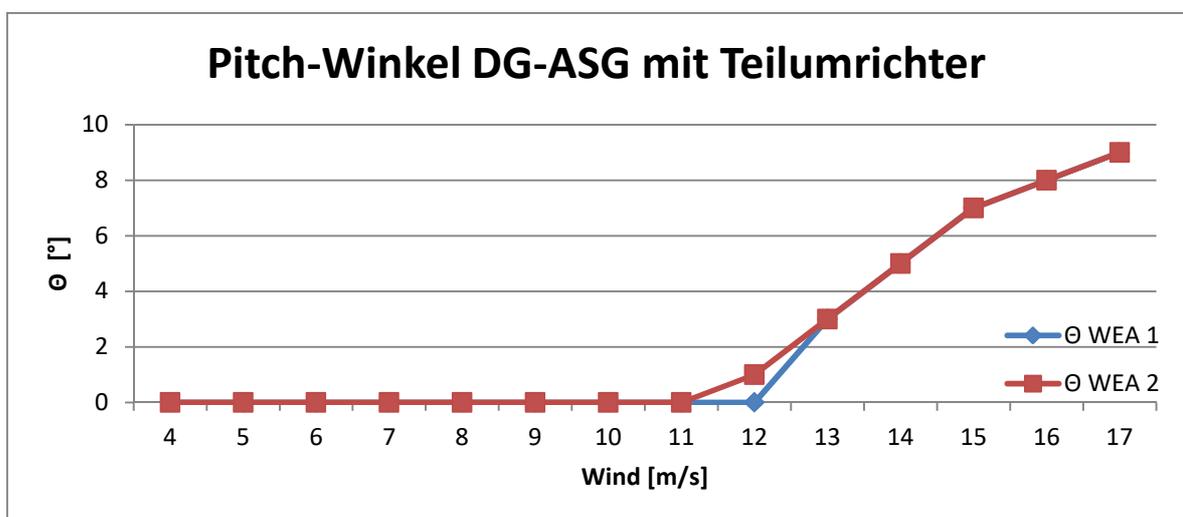


Abb. 5-25: Vergleich der Pitch-Winkel DG-ASG mit Teilumrichter

5.4 Ergebnisse

Die aus Kapitel 5 bisher bekannten Ergebnisse veranschaulichen, dass der während dieser Arbeit entwickelte Versuchsstand für eine Windenergieanlage die Leistungswerte der bisher genutzten Anlage nicht nur erreicht, sondern auch übertrifft. Für die ersten beiden Generatorkonzepte – ASG am Netz und ASG mit Vollumrichter – sind die Unterschiede vergleichsweise gering mit leichtem Vorteil für die Neuanlage bezüglich der Blindleistungsaufnahme und der Regelung der Wirkleistung. Beim DG-ASG zeigt sich ein nahezu identischer Betrieb der beiden Anlagen.

Lediglich bei der Blindleistungsregelung müssen Abstriche im Vergleich zur Altanlage gemacht werden. Die Regelung funktioniert prinzipiell auch beim neuen Versuchsstand, zeigt im direkten Vergleich aber eine höhere Schwankung zwischen Soll- und Istwert auf, als die erste Windenergieanlage.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die im Abschnitt 1.1 definierte Aufgabe, einen zweiten Laborversuchsstand für eine Windenergieanlage im Labor für elektrische Energietechnik der HAW aufzubauen, konnte erfolgreich umgesetzt werden. Der während dieser Arbeit entwickelte Laborversuchsstand zur Simulation einer Windenergieanlage ist voll funktionsfähig und erfüllt die gestellten Anforderungen.

Dafür wurde zunächst der alte Laborversuchsstand analysiert und die bereits vorhandenen Komponenten gegebenenfalls ausgetauscht. Zusätzlich erforderliches Material wurde beschafft um einen Schaltschrank aufzubauen, der die benötigten Komponenten zur Steuerung und Regelung des Versuchsstandes enthält.

Die obligatorischen Schnittstellen zwischen dem Schaltschrank und der verwendeten MicroLabBox sind über drei Platinen realisiert, über die alle für die Regelung nötigen Messwerte durch entsprechende Sensoren eingelesen und die notwendigen Stellsignale für die Aktorik und Umrichter ausgegeben werden.

Nach dem Aufbau im Labor wurden die vorgeschriebenen Sicherheitsmessungen am Schaltschrank durchgeführt, wodurch nach Bestehen der Prüfungen im weiteren Verlauf die Inbetriebnahme vorgenommen werden konnte. Dazu wurden zunächst einzelne Teilkomponenten, wie etwa Drehzahlgeber und Bremschopper, in Betrieb genommen. Nach erfolgreicher Inbetriebnahme der Einzelkomponenten wurde dann das Gesamtsystem mit allen drei geforderten Generatorkonzepten (ASG direkt am Netz, ASG mit Vollumrichter und DG-ASG mit Teilumrichter) in Betrieb genommen.

Zum Abschluss wurde der neue Versuchsstand mit den bereits vorhandenen verglichen. Daraus resultierte, dass die Leistungskennwerte insbesondere die ins Netz eingespeiste Leistung für beide Anlagen nahezu identisch sind. Der Versuchsstand ist somit für seine Aufgabe geeignet, den Studierenden der HAW das typische Verhalten von Windenergieanlagen anhand verschiedener Generatorkonzepte praktisch vorzuführen.

Für die Zukunft lassen sich noch weitere Verbesserungen am Versuchsstand umsetzen. So sollte über Konzepte zur Verbesserung der Blindleistungskompensation nachgedacht werden. Insbesondere beim ASG mit direkter Netzkopplung wird im Moment die gesamte von der Asynchronmaschine benötigte Blindleistung aus dem Netz bezogen. Da nicht kompensierte Blindleistungen das Versorgungsnetz zusätzlich belasten, werden diese in

realen Anlagen oftmals mehr oder weniger vollständig kompensiert, was auch hier den Realitätsgrad der Anlage verbessern würde.

Darüber hinaus könnte über eine möglichst genaue Parameteridentifikation der eingesetzten Asynchronmaschine nachgedacht werden. Die in dieser Arbeit durchgeführte Identifikation stellte in einigen Punkten eine praktikable Näherung dar und zeigte dabei auch ein besseres Regelverhalten auf, als die Regelung mit Parametern aus dem Maschinenendatenblatt. Für eine weitere Verbesserung des Regelverhaltens wäre es somit von Vorteil, die wahren Parameter der Maschine so exakt wie möglich zu bestimmen.

7 Literaturverzeichnis

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), „Erneuerbare Energien in Zahlen - Nationale und internationale Entwicklung im Jahr 2017,“ Zarbock GmbH & Co. KG, Berlin, 2018.
- [2] Bundesverband WindEnergie, „Windenergie in Deutschland - Zahlen und Fakten,“ [Online]. Available: <https://www.wind-energie.de/themen/zahlen-und-fakten/deutschland/>. [Zugriff am 21 Januar 2019].
- [3] S. Heier, Windkraftanlagen - Systemauslegung, Netzintegration und Regelung, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018.
- [4] E. Hau, Windkraftanlagen, Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2008.
- [5] E. Bolte, Elektrische Maschinen, Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2012.
- [6] J. Specovius, Grundkurs Leistungselektronik, Berlin: Vieweg + Teubner, 2010.
- [7] Siemens, SINAMICS Projektierungshandbuch – Juli 2017, Berlin und München, 2017.
- [8] J. A. Lobisch, „Aufbau, Optimierung und Simulation eines Gleichstrommaschinen-Antriebssystems für den Versuchsstand Windenergie-Netzeinspeisung,“ Hamburg, 2016.
- [9] Rittal GmbH & Co. KG, „System-Handbuch 35“.
- [10] VEM motors GmbH, „Datenblatt SPER 132 MX4 SW TPM HW,“ Wernigerode, 2010.
- [11] A. Kremser, Elektrische Maschinen und Antriebe - Grundlagen, Motoren und Anwendungen, Nürnberg: Teubner Verlag, 2008.
- [12] VEM motors GmbH, „Datenblatt SPER 132 MX4 SW TPM Ersatzschaltbild,“ 2011.

- [13] Semikron, „Datenblatt- SEMIKRON_SKS_11F_B6CI_07_V12,“ 2008.
- [14] S. Zeneli, „Steuerung und Regelung für eine Windenergie-Netzeinspeisung mit vollumrichter-gespeistem Asynchron-generator,“ Hamburg, 2014.
- [15] Tauscher Transformatorenfabrik GmbH, „Datenblatt - Schaltplan Sinusfilter,“ 2010.
- [16] Tauscher Transformatorenfabrik GmbH, „Datenblatt - Sinusfilter, Motorfilter, dreiphasig,“ Freyung, 2005.
- [17] R. Fischer, Elektrische Maschinen, München: Carl Hanser Verlag, 2011.
- [18] E. Spring, Elektrische Maschinen - Eine Einführung, Berlin: Springer Verlag, 2006.
- [19] Phoenix Contact, „Datenblatt - PLC-OPT- 5DC/300DC/1 - 2900381,“ 2019.
- [20] Siemens, „Drehimpulsgeber- 1XP8001-1, 1XP8001-2,“ 2006.
- [21] NXP, „Datenblatt - HEF4104B,“ 2011.
- [22] Taiwan Semiconductors, „Data sheet - TS7800 Series“.
- [23] U. Tietze, C. Schenk und E. Gamm, Halbleiter-Schaltungstechnik, Heidelberg: Springer Verlag, 2010.
- [24] AAVID THERMALLOY, „Datenblatt - Kühlkörper 504222B00000G“.
- [25] Phoenix Contact, „Datenblatt - MINI-PS-100-240AC/10-15DC/2 - 2938756,“ 2013.
- [26] Phoenix Contact, „Datenblatt - MINI-PS-100-240AC/24DC/2 - 2938730,“ 2013.
- [27] Phoenix Contact, „Datenblatt - PLC-OPT- 24DCTTL,“ 2014.
- [28] Siemens, „Data sheet 3RT2017-1BB41,“ 2015.
- [29] ebm-papst St. Georgen GmbH & Co. KG, „DC axial compact fan - Nominal data - Type 4414 FG,“ St. Georgen .
- [30] LEM, „Datenblatt - Stromwandler LA 55-P“.

- [31] LEM, „Datenblatt - Stromwandler LAH 25-NP“.
- [32] Semikron, „Datenblatt - SKHI 20 opA“.
- [33] Semikron, „Datenblatt - Power Supply SKHI PS2“.
- [34] Semikron, „Datenblatt IGBT Treiberplatine SKYPER 32 R,“ 2007.
- [35] ebm-papst St. Georgen GmbH & Co. KG, „Datenblatt - AC-Axiallüfter 4650N,“ St.Georgen, 2016.
- [36] Rittal GmbH & Co. KG, „Thermostat Schaltschrank-Innentemperaturregler - 3110.000,“ [Online]. Available: <https://www.rittal.com/de-de/product/show/variantdetail.action?productID=3110000>. [Zugriff am 5 Januar 2019].
- [37] B. Hahn, „Entwurf einer Windenergie-Netzeinspeisung mit Umrichter gespeistem Asynchrongenerator und dSPACE Regelsystem,“ Hamburg, 2011.
- [38] dSpace GmbH, „Expansion Boxes for PHS Hardware,“ Paderborn, 2018.
- [39] dSpace GmbH, „MicroLabBox Product information,“ 2018.
- [40] dSpace GmbH, „dSPACE Release 2017-B,“ [Online]. Available: <https://www.dspace.com/de/gmb/home/products/releases/relarchive/dspace-release-2017-b.cfm>. [Zugriff am 6 Januar 2019].
- [41] dSpace GmbH, „Roadmap of dSPACE Releases,“ [Online]. Available: <https://www.dspace.com/de/gmb/home/products/releases.cfm>. [Zugriff am 6 Januar 2019].
- [42] F. Büssis, „Steuerung und Regelung einer Windenergie-Netzeinspeisung mit doppelt gespeistem Asynchrongenerator,“ Hamburg, 2015.
- [43] D. Weiß, „Entwurf und Aufbau eines Prüfstandes für Windenergie-Netzeinspeisung mit doppelt gespeistem Asynchrongenerator,“ Hamburg, 2012.
- [44] RS Components GmbH, „Winslow IC-Sockel-Adapter gerade Durchsteckmontage,“ [Online]. Available: <https://de.rs-online.com/web/p/ic-sockel-adapter/1582907/>.

[Zugriff am 7 Januar 2019].

[45] Siemens, „FAQ für SINAMICS DCM,“ 2014.

[46] D. Bothe, „Dynamische Simulation einer Windenergieanlage und Implementierung zusammen mit einem Human-Machine-Interface in einem Laborversuchsstand,“ Hamburg, 2016.

8 Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
ACMC	AC Motor Control Solution
ASG	Asynchrongenerator
ASM	Asynchronmaschine
DG-ASG	Doppelt gespeister Asynchrongenerator
DIN	Deutsche Institut für Normung
DS-ASM	Drehstrom-Asynchronmaschine
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EMV	elektromagnetische Verträglichkeit
GM	Gleichstrommaschine
HAW	Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg
HMI	Human Machine Interface
IGBT	Insulated-gate bipolar transistor
I/O	Input/Output
MWR	Maschinenseitiger Gleich- und Wechselrichter
MPP-Tracking	Maximum Power Point Tracking
NaN	Not a Number
NWR	Netzseitiger Gleich- und Wechselrichter
PWM	Pulsweitenmodulation
RTI	Real-Time Interface
TTL	Transistor-Transistor-Logik
U-Umrichter	Spannungszwischenkreisumrichter
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik
WEA	Windenergieanlage

9 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1: Stromerzeugung durch erneuerbare Energien 2017 (in Prozent) [1]	1
Abb. 1-2: Installierte Windleistung in Deutschland [2]	2
Abb. 2-1: Wirkungskette einer WEA [3].....	4
Abb. 2-2: Asynchrongenerator mit direkter Netzkopplung [4]	7
Abb. 2-3: ASG mit Vollumrichter nach [4].....	7
Abb. 2-4: DG-ASG mit Teilumrichter	8
Abb. 2-5: Umrichter Typen [6].....	9
Abb. 2-6: U-Umrichter	10
Abb. 2-7: EMV Kopplungspfade	11
Abb. 3-1: Maschinentisch.....	14
Abb. 3-2: Versuchsstand	14
Abb. 3-3: Blockdiagramm Versuchsstand.....	16
Abb. 3-4: Schaltschrank Zeichnung [9] und Laboraufbau	17
Abb. 3-5: Grundplatte.....	18
Abb. 3-6: Elektronikplatte	19
Abb. 3-7: Stecktafel.....	20
Abb. 3-8: Anschlüsse Netz- und Bremswiderstand.....	21
Abb. 3-9: Einphasiges Ersatzschaltbild der ASM [17].....	24
Abb. 3-10: Ersatzschaltbild ASM Leerlaufversuch (vgl. Abb. 3-9).....	25
Abb. 3-11: Eisen- und Reibungsverluste.....	26
Abb. 3-12: Ersatzschaltbild ASM Kurzschlussversuch [18].....	28
Abb. 3-13: Platine 5 VDC Spannungsregler	32
Abb. 3-14: Temperatur Festspannungsregler	34
Abb. 3-15: Rittal Temperaturregler [36]	37
Abb. 3-16: MicroLabBox [39]	38
Abb. 3-17: Auswahl der RTI-Version	40
Abb. 3-18: dSPACE Konfiguration in Matlab	40
Abb. 3-19: Auszug Schaltplan DG-ASM alt [42]	41
Abb. 3-20: neues Sicherheitskonzept	41
Abb. 3-21: Platinenkonzept [43]	42
Abb. 3-22: Schematische Darstellung der Platine Verteilung für das ACMC-System [14]44	
Abb. 3-23: Schematische Darstellung der Platine Verteilung für die MicroLabBox.....	46

Abb. 3-24: IC-Sockel der Firma Winslow [44].....	47
Abb. 3-25: Parameteränderung GM	47
Abb. 3-26: Benutzeroberfläche ControlDesk	49
Abb. 3-27: Simulink ASG mit Vollumrichter	49
Abb. 3-28: Aufrufreihenfolge.....	52
Abb. 3-29: Simulinkmodell Ansteuerung B6-Brücke	53
Abb. 3-30: Totzeit	54
Abb. 3-31: Aufladung der Zwischenkreiskondensatoren	55
Abb. 4-1: Drehgeber Anschluss.....	58
Abb. 4-2: Drehgeber Simulinkmodell	58
Abb. 4-3: Messergebnisse Drehzahlgeber	60
Abb. 4-4: Bremschopper Testaufbau.....	61
Abb. 4-5: Simulinkmodell Bremschopper Test.....	62
Abb. 4-6: Messergebnisse Bremschoppertest.....	64
Abb. 5-1: Wirkleistung ASG am Netz WEA 1	66
Abb. 5-2: Wirkleistung ASG am Netz WEA 2	66
Abb. 5-3: Vergleich der Wirkleistungen ASG am Netz WEA 1 und WEA 2.....	66
Abb. 5-4: Blindleistung ASG am Netz WEA 1.....	67
Abb. 5-5: Blindleistung ASG am Netz WEA 2.....	67
Abb. 5-6: Vergleich der Blindleistungen ASG am Netz WEA 1 und WEA 2.....	68
Abb. 5-7: Vergleich der Drehzahlen ASG am Netz WEA 1 und WEA 2.....	68
Abb. 5-8: Vergleich der Drehmomente ASG am Netz WEA 1 und WEA 2	69
Abb. 5-9: Vergleich der Pitch-Winkel ASG am Netz WEA 1 und WEA 2.....	69
Abb. 5-10: Vergleich der Wirkleistungen ASG mit Vollumrichter	70
Abb. 5-11: Vergleich der Blindleistungen ASG mit Vollumrichter.....	71
Abb. 5-12: Vergleich der Drehzahlen ASG mit Vollumrichter.....	72
Abb. 5-13: Vergleich der Drehmomente ASG mit Vollumrichter	72
Abb. 5-14: Vergleich des Leistungsfaktors ASG mit Vollumrichter	72
Abb. 5-15: Vergleich der Pitch-Winkel ASG mit Vollumrichter.....	73
Abb. 5-16: Drehmomentkennlinien WEA 1 ASG mit Vollumrichter.....	74
Abb. 5-17: Drehmomentkennlinien WEA 2 ASG mit Vollumrichter.....	75
Abb. 5-18: Vergleich der Wirkleistungen DG-ASG mit Teilumrichter.....	76
Abb. 5-19: Vergleich der Wirkleistungen im Statorkreis.....	77
Abb. 5-20: Vergleich der Wirkleistungen im Rotorkreis	77

Abb. 5-21: Vergleich der Blindleistungen DG-ASG mit Teilumrichter	77
Abb. 5-22: Vergleich der Drehzahlen DG-ASG mit Teilumrichter	78
Abb. 5-23: Vergleich der Drehmomente DG-ASG mit Teilumrichter.....	79
Abb. 5-24: Vergleich der Leistungsbeiwerte DG-ASG mit Teilumrichter	79
Abb. 5-25: Vergleich der Pitch-Winkel DG-ASG mit Teilumrichter	79

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Nenndaten SPER 132 MX4 SW TPM HW [10].....	22
Tabelle 3-2: Statorseitig bezogene Parameter der ASM [12].....	22
Tabelle 3-3: Kennwerte Sinusfilter [15] [16]	23
Tabelle 3-4: Messreihe Leerlaufversuch	25
Tabelle 3-5: Messreihe Kurzschlussversuch	28
Tabelle 3-6: Parametervergleich zwischen Datenblattwerten und gemessenen Werten	30
Tabelle 3-7: Verbraucherübersicht 5 VDC.....	31
Tabelle 3-8: Verbraucherübersicht 24 VDC.....	35
Tabelle 3-9: Verbraucherübersicht ± 15 VDC	35
Tabelle 3-10: Gegenüberstellung der Konzepte für die Systemportierung	43
Tabelle 3-11: Schnittstelle zwischen MicroLabBox und GM-Stromrichter	51

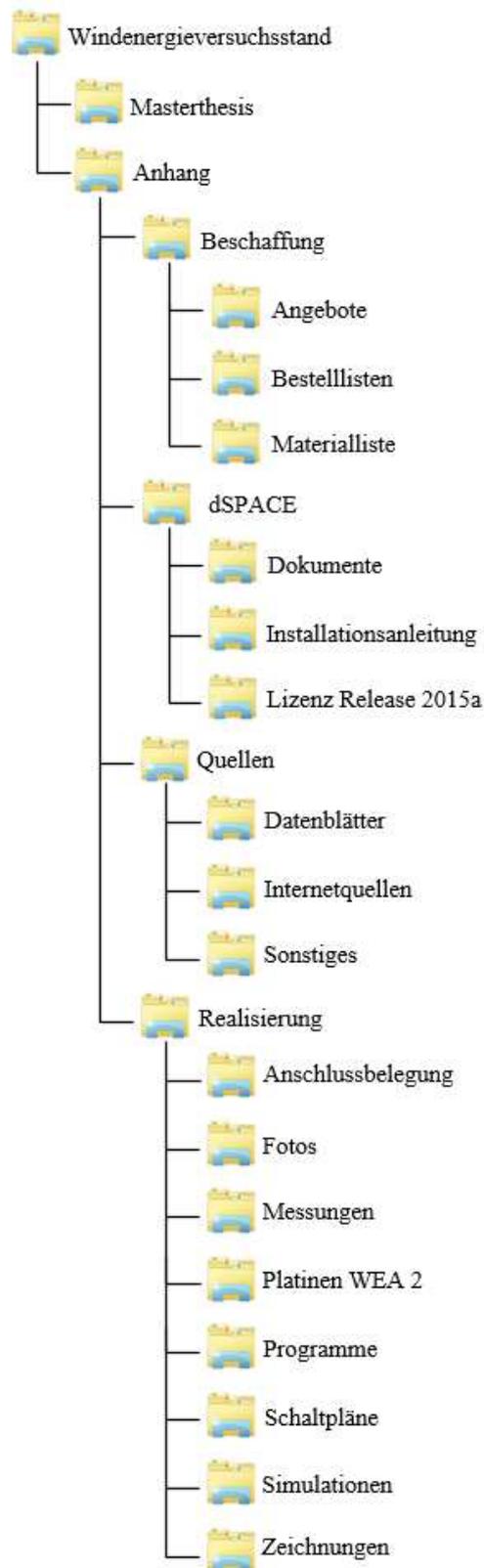
11 Verwendete Formelzeichen

ΔW	zugeführten Energie
ω_N	Nennkreisfrequenz
c_p	Leistungsbeiwert
$\cos(\phi)$	Leistungsfaktor
$\cos(\phi)_{Nenn}$	Nennleistungsfaktor
C_{ZK}	Zwischenkreiskapazität
f_n	Nennfrequenz
f_{Netz}	Netzfrequenz (50 Hz)
I_0	Eisen- und Magnetisierungsstrom
I_1	Ständerstrom einer Phase
I_2	Läuferstrom
I_{FE}	Eisenstrom
i_s	Strangstrom
I_K	Kurzschlussstrom
I_{Nenn}	Nennstrom
I_μ	Magnetisierungsstrom
L_f	Filterinduktivität
L_g	Netzseitiger Induktivität
M	Drehmoment
M_B	Beschleunigungsmoment
M_L	mechanischen Lastmoment
n	Drehzahl
n_{Nenn}	Nenndrehzahl
n_0	Synchrondrehzahl
p	Polpaarzahl
P	elektrische Leistung
P_0	Leerlaufleistung
$P_{I,CU}$	Kupferverlustleistung
$P_{FE+Reib}$	Eisen- und Reibverlustleistung
P_K	Kurzschlussleistung
P_{Nenn}	Nennleistung
P_v	Verlustleistung

R_l	Ständerwiderstand
$R_1(T_{20})$	Ständerwiderstand bei 20°C
R_2'	Läuferwiderstand
R_f	Filterwiderstand
R_{FE}	Eisenwiderstand
R_g	netzseitiger Widerstand
R_θ	maximal erlaubter Wärmewiderstand
$R_{\theta CS}$	Wärmewiderstand zwischen Gehäuse und Kühlkörper
$R_{\theta JA}$	Wärmewiderstand zwischen Sperrschicht und Umgebung
$R_{\theta JC}$	Wärmewiderstand zwischen Sperrschicht und Gehäuse
$R_{\theta S}$	Wärmewiderstand Kühlkörper
s	Schlupf
T_A	Umgebungstemperatur
T_J	Sperrschichttemperatur
\underline{U}_l	Ständerspannung
U_{l2}	Außenleiterspannung
U_K	Kurzschlussspannung
U_{Nenn}	Nennspannung
\underline{U}_q	induzierte Hauptfeldspannung
U_{ZK}	Zwischenkreisspannung
$X_{\sigma 1}$	Ständerstreureaktanz
$X_{\sigma 2}'$	Läuferstreureaktanz
X_h	Hauptreaktanz
Z_K	Leitungsimpedanz

12 Anhang

Auf der beiliegenden CD finden sich neben dieser schriftlichen Arbeit weitere wichtige Dokumente. Die Verzeichnisstruktur der DVD ist in der folgenden Grafik dargestellt.



13 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.

Ort und Datum

Unterschrift