



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorthesis

Marco Zahel

Leistungsfluss- und Wirkungsgradanalysen an
Asynchrongenerator-Systemen für den
Versuchsstand Windenergie-Netzeinspeisung

Marco Zahel

Leistungsfluss- und Wirkungsgradanalysen an
Asynchrongenerator-Systemen für den
Versuchsstand Windenergie-Netzeinspeisung

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

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

Marco Zahel

Thema der Bachelorthesis

Leistungsfluss- und Wirkungsgradanalysen an Asynchrongenerator-Systemen für den Versuchsstand Windenergie-Netzeinspeisung

Stichworte

Windenergieanlage, Asynchronmaschine, Leistungsmessung, Wirkungsgrad, Leistungsfluss, Umrichter

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit befasst sich mit der Leistungsbilanz verschiedener Asynchrongenerator-Systeme am Versuchsstand „Windenergie-Netzeinspeisung“ im Labor für Antriebe und Leistungselektronik an der HAW Hamburg. Im Rahmen dieser Arbeit werden ausführliche Wirkungsgrad- und Leistungsflussanalysen an einer Asynchronmaschine durchgeführt, die direkt am Netz, über einen Vollumrichter oder doppelt gespeist betrieben wird. Die verschiedenen Betriebsarten werden gegenübergestellt sowie in einen praktischen Kontext gesetzt.

Marco Zahel

Title of the paper

Load flow and efficiency analysis of induction generator systems of the test bench for a wind power grid feed-in

Keywords

Wind turbine, induction machine, power measurement, efficiency factor, load flow, converter

Abstract

This thesis concentrates on the load flow of different induction generator systems of the test bench for a wind power grid feed-in at the HAW Hamburg. Part of this thesis is a detailed efficiency and load flow analysis of an induction machine that is either feeding directly into the grid, is powered by a full power converter or is operating doubly fed. The different generator systems are compared to each other and are put into practical context.

Danksagung

An dieser Stelle sei all jenen gedankt, die die Durchführung dieser Arbeit ermöglicht und erleichtert haben.

Allen voran danke ich Prof. Michael Röther - nicht nur für den Themenvorschlag für diese Arbeit, sondern vielmehr für die Betreuung und Teilnahme während der Durchführung, sowie die hervorragende Vorlesung „Leistungselektronik und Antriebe“ im 6. Semester, in der er die theoretischen Kenntnisse für diese Arbeit vermittelte.

Ein weiterer Dank geht an Dominik Bothe, der mir als Ansprechpartner im Labor in jeglichen Belangen stets mit Rat und Tat zur Seite stand. Im Doppelpack mit Max Gayer blieb so während diverser Diskussionen kaum eine Frage offen.

Ein weiteres Dankeschön gilt Herrn Holger Müller von der Firma HBM, dessen gute Beratung und Besuche sehr beim Umgang mit dem neuen Messgerät halfen und den Start mehr als erleichterten.

Auch danke ich Prof. Gustav Vaupel für die Übernahme der Zweitprüfung für diese Arbeit.

Zuletzt verbleibt ein riesiges Dankeschön an meine Familie und meine Freunde, die mich mit Verständnis, Geduld und gutem Zureden in schwierigen Zeiten des Studiums motiviert und aufgebaut haben.

I Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| II Abbildungsverzeichnis | 3 |
| III Tabellenverzeichnis | 5 |
| IV Benutzte Abkürzungen | 6 |
| V Verwendete Formelzeichen | 7 |
| 1 Einleitung | 9 |
| 2 Gängige elektrische Generatorsysteme einer WEA..... | 10 |
| 2.1 Grundlagen der Energiewandlung | 10 |
| 2.1.1 Entnahme mechanischer Leistung aus dem Wind..... | 10 |
| 2.1.2 Energiewandlung innerhalb der WEA..... | 11 |
| 2.2 Kriterien für ein elektrisches Generatorsystem..... | 13 |
| 2.3 Generatorarten einer WEA..... | 15 |
| 2.3.1 Synchrongeneratoren..... | 15 |
| 2.3.2 Asynchrongeneratoren..... | 16 |
| 2.3.3 Vergleich der verschiedenen Generatorsysteme | 18 |
| 3 Die Asynchronmaschine..... | 19 |
| 3.1 Mathematische Beschreibung und Ersatzschaltbild | 19 |
| 3.1.1 Vollständiges, elektrisches Ersatzschaltbild mit idealer ASM..... | 19 |
| 3.1.2 Statorseitiges Ersatzschaltbild der ASM | 21 |
| 3.2 Leistungsflüsse und Verluste | 23 |
| 3.2.1 Leistungsfluss der ASM mit kurzgeschlossenem Rotor | 23 |
| 3.2.2 Leistungsfluss der DGASM..... | 26 |
| 3.3 Betriebsverhalten einer DGASM..... | 27 |
| 3.3.1 Wahl der Rotordrehzahl | 27 |
| 3.3.2 DGASM im über- und untersynchronen Betrieb | 28 |
| 3.3.3 Erregung der Rotorwicklung..... | 29 |
| 4 Der Versuchsstand Windenergie-Netzeinspeisung | 30 |
| 4.1 Allgemeiner Aufbau des Versuchsstands | 30 |
| 4.2 Versuchsaufbau der vorhandenen Generatorsysteme | 34 |
| 4.2.1 Direkte Netzkopplung..... | 34 |

| | |
|---|------------|
| 4.2.2 Vollumrichter | 35 |
| 4.2.3 Doppelt gespeiste Asynchronmaschine..... | 36 |
| 4.3 Vorhandene Messstellen und -geräte | 37 |
| 4.4 Transientenrecorder HBM Gen3i | 38 |
| 4.4.1 Leistungsbegriffe und -berechnung im Drei-Phasen-Wechselstromnetz | 38 |
| 4.4.2 Die Aron-Schaltung..... | 39 |
| 4.4.3 Anforderungen an ein geeignetes Messsystem | 40 |
| 4.4.4 Hindernisse bei Messungen mit dem vorhandenen Yokogawa WT500 | 41 |
| 4.4.5 Technologie und Einsatzmöglichkeiten des HBM Gen3i..... | 43 |
| 4.4.5.1 Die Plattform | 44 |
| 4.4.5.2 Vorhandene Analogeingangskarten | 46 |
| 4.4.5.3 Datenerfassungssoftware Perception | 47 |
| 4.4.6 Inbetriebnahme und Einrichtung..... | 50 |
| 5 Messungen und Auswertung | 53 |
| 5.1 Bestimmung der Ersatzparameter der ASM | 53 |
| 5.1.1 Bestimmung des Wicklungswiderstands | 53 |
| 5.1.2 Leerlaufversuch | 54 |
| 5.1.3 Kurzschlussversuch..... | 57 |
| 5.1.4 Zusammenfassung der Messungen | 61 |
| 5.2 Leistungsmessungen und Wirkungsgradanalysen | 62 |
| 5.2.2 Belastungsversuch an der ASM | 63 |
| 5.2.3 Vollumrichter | 64 |
| 5.2.4 Doppelt gespeiste Asynchronmaschine..... | 68 |
| 5.2.4.1 Leistungsflussanalyse DGASM | 68 |
| 5.2.4.2 Wirkungsgradanalyse DGASM mit Transformator | 71 |
| 5.2.4.3 Wirkungsgradanalyse DGASM ohne Transformator | 74 |
| 5.3 Vergleich der vermessenen Generatorsysteme..... | 77 |
| 5.4 Anwendung der Erkenntnisse auf die Realität | 78 |
| 6 Fazit | 79 |
| VI Simulationsergebnisse..... | 82 |
| VII Messergebnisse..... | 88 |
| VIII Literaturverzeichnis..... | 101 |
| IX Weiterer Anhang..... | 103 |

II Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Vereinfachtes Schema der Energiewandlung innerhalb der WEA | 12 |
| Abbildung 2: Schnittzeichnung der Synchronmaschine mit Erregerwicklung am Rotor [9 S. 361] | 15 |
| Abbildung 3: Prinzipieller Aufbau einer Asynchronmaschine [12] | 16 |
| Abbildung 4: Vollständiges, einphasiges ESB einer Asynchronmaschine mit idealer ASM [12 S. 29] ... | 20 |
| Abbildung 5: Vollständiges einphasiges, statorseitiges ESB der ASM | 21 |
| Abbildung 6: Leistungsbilanz eines Asynchrongenerators ohne äußere Beschaltung [8 S. 315] | 24 |
| Abbildung 7: Leistungsbilanz eines doppelt gespeisten Asynchrongenerators | 26 |
| Abbildung 8: Vereinfachter Leistungsfluss der DGASM im über- und untersynchronen Betrieb [5 S. 21] | 28 |
| Abbildung 9: Maschinentisch des Versuchsstands „Windenergie-Netzeinspeisung“ | 31 |
| Abbildung 10: Umrichterschaltschrank der ASM mit Stecktafel des Versuchsstands „Windenergie- Netzeinspeisung“ | 32 |
| Abbildung 11: Versuchsstand Windenergie-Netzeinspeisung | 33 |
| Abbildung 12: Verschaltung der ASM für die Betriebsart „Direkte Netzkopplung“ [13 S. 36] | 34 |
| Abbildung 13: Verdrahtung der Stecktafel für die Betriebsart „Direkte Netzkopplung“ | 34 |
| Abbildung 14: Verschaltung der ASM für den Betrieb mit Vollumrichter [13 S. 37] | 35 |
| Abbildung 15: Verdrahtung der Stecktafel für den Betrieb mit Vollumrichter | 35 |
| Abbildung 16: Verschaltung für den doppelt gespeisten Betrieb [13 S. 37] | 36 |
| Abbildung 17: Verdrahtung als Stecktafel für den doppelt gespeisten Betrieb | 36 |
| Abbildung 18 Leistungsmessung mit der Aron-Schaltung [14 S. 168] | 39 |
| Abbildung 19: Messergebnis des Yokogawa WT500 bei $n=1495\text{min}^{-1}$ | 43 |
| Abbildung 20: Blockschaltbild des tragbaren Gen3i Rekorders [16 S. 78] | 45 |
| Abbildung 21: Messgerät Gen3i mit zwei Analogeingangskarten | 46 |
| Abbildung 22: Arbeitsblatt eDrive Konfiguration der Software Perception | 48 |
| Abbildung 23: Arbeitsblatt Sensor-Datenbank der Software Perception | 49 |
| Abbildung 24: Einphasiges ESB der ASM im Leerlauf | 54 |
| Abbildung 25: Identifikation der Reibungs- und der Eisenverluste | 56 |
| Abbildung 26: Einphasiges ESB der ASM im Stillstand | 58 |
| Abbildung 27: Linearisierung des Kurzschlussstroms $I_{1k}=f(U_{1k})$ | 59 |
| Abbildung 28: Linearisierung der Kurzschlussleistung $P_{1k}=f(I_{1k}^2)$ | 60 |
| Abbildung 29: Typenschild der ASM am Versuchsstand "Windenergie-Netzeinspeisung" | 62 |
| Abbildung 30: Ermittlung des Maschinenwirkungsgrads mithilfe des Belastungsversuchs | 63 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 31: Wirkungsgradkennlinienfeld im Vollumrichterbetrieb | 65 |
| Abbildung 32: Schwingung des Drehmomentsignals an der Sättigungsgrenze mit $T=10\text{ms}$ | 67 |
| Abbildung 33: Leistungsflussmessung an der DGASM bei variiertes Drehzahl | 69 |
| Abbildung 34: Wirkungsgradkennlinienfeld DGASM mit Transformator | 72 |
| Abbildung 35: Wirkungsgradkennlinienfeld DGASM ohne Transformator | 75 |
| Abbildung 36: Simulationsergebnisse Wirkungsgrad im Vollumrichterbetrieb | 85 |
| Abbildung 37: Simulationsergebnisse Wirkungsgrad der DGASM mit Transformator..... | 86 |
| Abbildung 38: Simulationsergebnisse Wirkungsgrad der DGASM ohne Transformator | 87 |

III Tabellenverzeichnis

| | |
|---|-----|
| Tabelle 1: Vergleich verschiedener Generatorsysteme nach Drehzahlbereich, Wirkungsgrad und Kosten | 18 |
| Tabelle 2: Belegungsplan Gen3i für die Leistungsflussmessung an der ASM..... | 52 |
| Tabelle 3: Belegungsplan Gen3i für die Leistungsflussmessung am gesamten Generatorsystem | 52 |
| Tabelle 4: Übersicht der bestimmten Ersatzparameter der ASM | 61 |
| Tabelle 5: Umrichterverluste bei Betrieb mit und ohne Transformator | 76 |
| Tabelle 6 Zusammenfassung der Wirkungsgradanalyse der vermessenen Generatorsysteme | 77 |
| Tabelle 7: Simulationsergebnisse für den Vollumrichterbetrieb..... | 82 |
| Tabelle 8: Simulationsergebnisse für die DGASM mit Transformator..... | 83 |
| Tabelle 9: Simulationsergebnisse für die DGASM ohne Transformator..... | 84 |
| Tabelle 10: Ohmsche Widerstände der Ständerwicklungen bei Raumtemperatur..... | 88 |
| Tabelle 11: Messergebnisse des Leerlaufversuchs..... | 88 |
| Tabelle 12: Messergebnisse des Kurzschlussversuchs | 89 |
| Tabelle 13: Messergebnisse des Belastungsversuchs | 89 |
| Tabelle 14: Ergebnisse der Wirkungsgradmessung im Vollumrichterbetrieb $n=1350\text{min}^{-1}$ | 90 |
| Tabelle 15: Ergebnisse der Wirkungsgradmessung im Vollumrichterbetrieb bei $n=1450\text{min}^{-1}$ | 90 |
| Tabelle 16: Ergebnisse der Wirkungsgradmessung im Vollumrichterbetrieb bei $n=1500\text{min}^{-1}$ | 91 |
| Tabelle 17: Ergebnisse der Wirkungsgradmessung im Vollumrichterbetrieb bei $n=1600\text{min}^{-1}$ | 91 |
| Tabelle 18: Messergebnisse der Leistungsflussuntersuchung an der DGASM | 92 |
| Tabelle 19: Ergebnisse der Wirkungsgradmessung an der DGASM mit Trafo für $n=1350\text{min}^{-1}$ | 93 |
| Tabelle 20: Ergebnisse der Wirkungsgradmessung an der DGASM mit Trafo für $n=1450\text{min}^{-1}$ | 94 |
| Tabelle 21: Ergebnisse der Wirkungsgradmessung an der DGASM mit Trafo für $n=1490\text{min}^{-1}$ | 95 |
| Tabelle 22: Ergebnisse der Leistungsflussmessung an der DGASM mit Trafo für $n=1600\text{min}^{-1}$ | 96 |
| Tabelle 23: Ergebnisse der Wirkungsgradmessung an der DGASM ohne Trafo für $n=1350\text{min}^{-1}$ | 97 |
| Tabelle 24: Ergebnisse der Wirkungsgradmessung an der DGASM ohne Trafo für $n=1450\text{min}^{-1}$ | 98 |
| Tabelle 25: Ergebnisse der Wirkungsgradmessung an der DGASM ohne Trafo für $n=1490\text{min}^{-1}$ | 99 |
| Tabelle 26: Ergebnisse der Wirkungsgradmessung an der DGASM ohne Trafo für $n=1600\text{min}^{-1}$ | 100 |

IV Benutzte Abkürzungen

| | |
|-------|-------------------------------------|
| ASM | Asynchronmaschine |
| DGASM | Doppelt gespeiste Asynchronmaschine |
| DSP | Digitaler Signalprozessor |
| EEG | Erneuerbare-Energien-Gesetz |
| ESB | Ersatzschaltbild |
| EVU | Energieversorgungsunternehmen |
| FFT | Fast Fourier Transformation |
| GM | Gleichstrommaschine |
| HMI | Human-Machine-Interface |
| SM | Synchronmaschine |
| WEA | Windenergieanlage |

V Verwendete Formelzeichen

| | | |
|----------------|--------------------------------------|--------------------------|
| ξ | Wicklungsfaktor | |
| Ω | Rotordrehzahl der ASM | <i>in s⁻¹</i> |
| Ω_0 | Leerlaufdrehzahl des Rotors | <i>in s⁻¹</i> |
| I_{10} | Leerlaufstrom der Phase L1 | <i>in A</i> |
| I_1^i | Statorstrom der idealen ASM | <i>in A</i> |
| I_{1k} | Kurzschlussstrom der Phase L1 | <i>in A</i> |
| I_2^i | Rotorstrom der idealen ASM | <i>in A</i> |
| I_{m1} | Magnetisierungsstrom (statorbezogen) | <i>in A</i> |
| L | Induktivität | <i>in H</i> |
| L_{h1} | Hauptinduktivität der Statorwicklung | <i>in H</i> |
| $L_{\sigma 1}$ | Streuinduktivität der Statorwicklung | <i>in H</i> |
| $L_{\sigma 2}$ | Streuinduktivität der Rotorwicklung | <i>in H</i> |
| M | Drehmoment | <i>in Nm</i> |
| M_R | Reibungsdrehmoment | <i>in Nm</i> |
| M_i | Inneres Drehoment | <i>in Nm</i> |
| N | Windungszahl | |
| P_{10} | Leerlaufleistung der Phase L1 | <i>in W</i> |
| P_{1k} | Kurzschlussleistung der Phase L1 | <i>in W</i> |
| P_{Cu1} | Kupferverluste im Stator | <i>in W</i> |
| P_{Cu2} | Kupferverluste im Rotor | <i>in W</i> |
| P_{Fe} | Eisenverluste | <i>in W</i> |
| P_R | Reibungsverluste | <i>in W</i> |
| P_{RZ2} | Verluste an den Schleifringkontakten | <i>in W</i> |
| P_{V2} | Kombinierte ohmsche Rotorverluste | <i>in W</i> |
| P_{el2} | Elektrische Rotorwirkleistung | <i>in W</i> |
| P_i | Luftspaltleistung | <i>in W</i> |
| P_{mech} | Abgegebene mech. Leistung | <i>in W</i> |
| Q_1 | Stator-Blindleistung | <i>in var</i> |
| Q_2 | Rotor-Blindleistung | <i>in var</i> |

| | | |
|-----------------|---|---------------------------------------|
| Q_{ASM} | Blindleistungsbedarf der ASM | <i>in var</i> |
| R | Widerstand | <i>in Ω</i> |
| R_1 | Ohmscher Widerstand der Statorwicklung | <i>in Ω</i> |
| R_2 | Ohmscher Widerstand der Rotorwicklung | <i>in Ω</i> |
| R_{2Z} | Zusatzwiderstand der Rotorseite | <i>in Ω</i> |
| R_{2g} | Zusammengefasster ohmscher Widerstand der Rotorseite | <i>in Ω</i> |
| \underline{S} | Komplexe Scheinleistung | <i>in VA</i> |
| U_{10} | Leerlaufstrangspannung L1-N | <i>in V</i> |
| U_{1k} | Kurzschlussstrangspannung L1-N | <i>in V</i> |
| U_{h1} | Statorseitige Hauptfeldspannung | <i>in V</i> |
| U_{h2} | Rotorseitige Hauptfeldspannung | <i>in V</i> |
| X_{1k} | Gesamtblindwiderstand im Kurzschluss | <i>in Ω</i> |
| c_{MR} | WEA Rotor-Drehmomentenbeiwert | |
| c_{MR} | Drehmomentenbeiwert | |
| c_P | WEA Anlagen-Leistungsbeiwert | |
| c_{PR} | WEA Rotor-Leistungsbeiwert | |
| f | Frequenz | <i>in Hz</i> |
| n | Drehzahl | <i>in s^{-1}</i> |
| n_0 | Leerlaufdrehzahl | <i>in s^{-1}</i> |
| p | Polpaarzahl | |
| $p(t)$ | Momentanleistung | <i>in VA</i> |
| s | Schlupf | |
| η | Wirkungsgrad | |
| η_{ASM} | Wirkungsgrad der ASM | |
| η_{ges} | Wirkungsgrad des gesamten Systems | |
| ρ | Luftdichte | <i>in $\frac{kg}{m^3}$</i> |

1 Einleitung

Seit dem Einsetzen der Energiewende im späten 20. Jahrhundert, gewinnt das Thema erneuerbare Energien stetig an Bedeutung und ist aus unserer heutigen Einspeiselandschaft nicht mehr wegzudenken. Mit Einführung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (kurz: EEG) im Jahr 2000 begann der verstärkte Ausbau der Einspeiseleistungen aus erneuerbaren Energien. Im Jahr 2015 betrug der Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch rund 30 Prozent [1]. Dieser Anteil soll bis zum Jahr 2035 auf 55 bis 60 Prozent gesteigert werden [2 S. 6, §1]. Ziel des EEG ist es jedoch nicht nur, den Anteil der erneuerbaren Energien zu steigern, sondern im gleichen Zuge ein stabiles Versorgungsnetz nicht zu vernachlässigen. Daraus erwächst die Forderung an den Anlagenbetreiber, eine geeignete Fernsteuerung und -überwachung seiner Anlagen zu gewährleisten [2 S. 12, §9]. Diese Forderung und das Bestreben, den eingespeisten Energieertrag zu maximieren, machen eine leistungsorientierte Regelung von Windkraftanlagen (kurz: WEA) unabdinglich.

Stromerzeugung aus Windkraft nimmt dabei noch vor Biomasse und Photovoltaik den größten Anteil der Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Energien ein [1]. Gerade in Norddeutschland ist Windkraft als Energieträger besonders verbreitet [3]. Auch die HAW Hamburg beschäftigt sich in ihrer Lehrveranstaltung „Regenerative Energien“ ausgiebig mit dem hochaktuellen Thema Windenergie. Im Laborversuch „Windenergie-Netzeinspeisung“ wird dabei eine WEA nachgebildet. Der Versuchsstand besteht aus zwei geregelten elektrischen Maschinen. Der durch Wind in Bewegung versetzte Rotor der WEA wird durch eine Gleichstrommaschine (kurz: GM) nachgebildet, die eine Asynchronmaschine (kurz: ASM) – den Generator – antreibt. Die ASM kann in unterschiedlichen Betriebsarten betrieben werden und speist Energie ins Netz ein [4].

Diese Arbeit befasst sich mit der messtechnischen Untersuchung der Leistungsflüsse und Wirkungsgrade der ASM in allen Betriebsarten. Zunächst werden die Grundlagen zur Energiewandlung in einer WEA beleuchtet und ein Überblick über die in der Praxis gängigen Generatorsysteme geschaffen. Anschließend werden die theoretischen Grundlagen hinter der Wirkungsweise einer ASM und deren Verluste mathematisch betrachtet. Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt dabei auf der doppelt gespeisten Asynchronmaschine (kurz: DGASM). Die dargestellten Zusammenhänge werden messtechnisch am Versuchsstand untersucht und die Ergebnisse mit der Theorie verglichen. Für die messtechnische

Untersuchung des Leistungsflusses in der Maschine ist ein geeignetes Messkonzept zu finden, das die korrekte Erfassung der Messwerte trotz sehr niedriger Frequenzen im Rotorkreis gewährleistet [5 S. 88]. Außerdem werden die Wirkungsgrade der unterschiedlichen Generatorsysteme analysiert. Abschließend werden die Erkenntnisse und Ergebnisse dieser Arbeit rückblickend betrachtet und sowohl in den praktischen Kontext Windenergie gesetzt als auch hinsichtlich der Eignung des Versuchsstands und den durchgeführten Messungen für Lehrveranstaltungen der HAW Hamburg bewertet.

2 Gängige elektrische Generatorsysteme einer WEA

2.1 Grundlagen der Energiewandlung

2.1.1 Entnahme mechanischer Leistung aus dem Wind

Um zu verstehen, welche elektrischen Generatorsysteme sich zum Einsatz in WEA eignen, ist es vonnöten, die Energiewandlungskette in ihrer Gesamtheit zu betrachten. Die WEA fungiert dabei als Energiewandler, der die kinetische Energie aus dem Wind zunächst in mechanische Energie, dann in elektrische Energie wandelt [6 S. 79].

Die kinetische Energie einer Luftmasse bestimmt sich nach:

$$E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.1-1)$$

Bestimmt man nun die durch die Rotorfläche A strömende Energiemenge, ergibt sich für die Leistung des Windes:

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho v_{wind}^3 A \quad \rho: \text{Luftdichte} \quad (2.1-2)$$

Ziel einer WEA ist es, einen möglichst großen Anteil dieser Leistung als mechanische Leistung und später als elektrische Leistung nutzbar zu machen. Die dem Wind entzogene mechanische Leistung bestimmt sich über den Anlagen-Leistungsbeiwert c_p . Die vollständige Herleitung findet sich in [6 S. 80ff], ist an dieser Stelle aber nicht von Bedeutung.

$$P_{mech} = c_p \cdot P_{wind} = c_p \cdot \frac{1}{2} \rho v_{wind}^3 A \quad (2.1-3)$$

$$\text{mit } c_{P,theor max} = 0,593 \quad (2.1-4)$$

Der Anlagen-Leistungsbeiwert c_P wird wiederum maßgeblich beeinflusst durch den Rotor-Leistungsbeiwert c_{PR} :

$$c_{PR} = \lambda c_{MR} \quad (2.1-5)$$

$$\text{mit } \lambda = \frac{\text{Umfangsgeschwindigkeit der Blattspitze}}{\text{Windgeschwindigkeit}} \quad (2.1-6)$$

Aus (2.1-6) leitet sich eine aerodynamisch optimale Drehzahl des Rotors ab. Die Menge der vom Rotor wandelbare Leistung ist also abhängig von 2 Faktoren:

- der Windgeschwindigkeit w_{wind} im Verhältnis zur Drehgeschwindigkeit des Rotors,
- sowie des Drehmomentenbeiwerts c_{MR} .

Um dem Wind stets die maximale Leistung zu entziehen ist es also notwendig, die Drehgeschwindigkeit der Rotorblätter an die Windgeschwindigkeit anpassen zu können. Hier bieten sich mehrere Alternativen. So gibt es in vielen WEA die Möglichkeit, die Aerodynamik der Rotorblätter zu verändern, um so den wirkenden Auftrieb zu manipulieren. Am Üblichsten ist dabei den Auftrieb über die Verstellung der Rotorblattwinkel zu regeln [6 S. 104ff]. Der Einsatz von Getrieben oder Generatorsystemen mit veränderlicher Drehzahl bietet weitere Möglichkeiten zur Anpassung der Drehzahl einer WEA.

2.1.2 Energiewandlung innerhalb der WEA

Die Wandlung der kinetischen Energie des Windes zur mechanischen Energie an der Welle des Rotors ist lediglich der erste Schritt in der Kette bis hin zur Einspeisung elektrischer Leistung ins Versorgungsnetz. Die nachfolgende Abbildung 1 verdeutlicht die weitere Energiewandlung innerhalb der WEA.

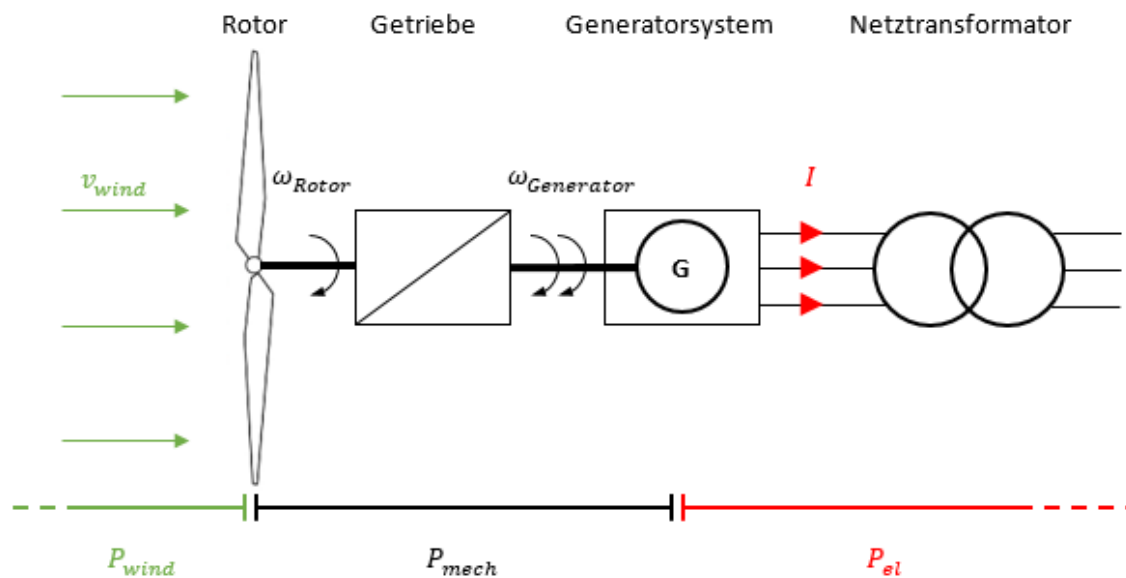


Abbildung 1: Vereinfachtes Schema der Energiewandlung innerhalb der WEA

Durch das eingesetzte Getriebe wird die niedrige Drehzahl der Rotorwelle auf den für elektrische Antriebe üblichen höheren Drehzahlbereich übersetzt. Hinsichtlich des Getriebes gibt es in der Windenergiebranche derzeit zwei verschiedene Philosophien. Die eine unterstützt den Einsatz von Getrieben und damit von kleineren Generatorbauformen, nimmt dafür aber den erhöhten Wartungsaufwand eines Getriebes in Kauf. Die andere verzichtet gänzlich auf den Einsatz von Getrieben, um die Ausfallwahrscheinlichkeit mechanischer Bauelemente zu minimieren, erkaufte sich diesen Vorteil aber mit wesentlich größeren und damit auch kostenintensiveren Generatoren [7 S. 16f]. Grund für die Anfälligkeit von Getrieben in WEA sind die großen dynamischen Belastungen, die während des Betriebes auf das Getriebe wirken [6 S. 319].

Über das Getriebe ist der Rotor der WEA mit der Generatorwelle verbunden. Das gesamte Generatorsystem besteht in der Regel aus einem elektrischen Antrieb und der für die Regelung notwendigen Umrichtertechnologie. Hier wird die mechanische Energie in nutzbare elektrische Energie gewandelt. Eingespeist wird dann meist über einen Transformator direkt in das Mittelspannungsnetz [8 S. 325].

2.2 Kriterien für ein elektrisches Generatorsystem¹

Aus den Kapiteln 2.1.1 und 2.1.2 lassen sich Kriterien ableiten, die das Generatorsystem erfüllen muss, um eine effiziente und problemlose Einspeisung zu gewährleisten. Weitere Punkte ergeben sich aus der Überlegung zur Motivation der Anlagenbetreiber und zu allgemeingültigen Einspeisevoraussetzungen.

- **Variable Drehzahl trotz Netzankeplung:** Das Generatorsystem ist netzseitig direkt mit dem frequenzstarreren 50-Hz-Netz verbunden. Die Einspeisefrequenz des Generators ist somit fix und kann nicht verändert werden. Dennoch ist eine variable Drehzahl der Generatorwelle unerlässlich, um bei sich ändernden Windverhältnissen nicht nur die eingespeiste Leistung maximieren oder variieren zu können, sondern auch um im Bedarfsfall die auftretende mechanische Belastung zu verringern. Eine gewisse Drehzahlvarianz ist dabei bereits durch einstellbare Rotorblattwinkel als auch durch ein in Stufen einstellbares Getriebe zu erreichen. Ebenfalls macht ein polumschaltbarer Generator eine weitere diskrete Veränderung der Drehzahl möglich. Erst durch den Einsatz eines Frequenzumrichters ist jedoch das stetige Einstellen der Drehzahl innerhalb eines Drehzahlbereichs gewährleistet. In welchem Maße die Drehzahl verändert werden kann ist ein entscheidendes Kriterium für die Beurteilung der Praktikabilität des gesamten Generatorsystems.
- **Regelbarkeit des Systems:** Eine veränderbare Drehzahl geht mit der Anforderung einher, diese Drehzahl auch gezielt verändern zu können. Doch nicht allein die Regelung der Drehzahl, auch die Regelung des Drehmoments und der elektrischen Größen stellen ein zentrales Kriterium an das Generatorsystem dar.
- **Wirkungsgrad:** Jede WEA wird in erster Linie errichtet, um einen Maximalbetrag an Leistung zu erzeugen und einzuspeisen. Das bedeutet für das Generatorsystem ebenso wie für alle restlichen Elemente einer WEA, den Wirkungsgrad hoch zu halten. Der Wirkungsgrad des Systems ist zu maximieren.
- **Qualität der Einspeisung:** Natürlich ist nicht nur die Menge der eingespeisten Leistung entscheidend. Um trotz eines hohen Anteils an Einspeiseleistung aus Windenergie die Netzqualität nicht zu gefährden, muss darauf geachtet werden, Netzzrückwirkungen bei

¹ Im Folgenden vgl. [6 S. 364ff.]

der Einspeisung zu minimieren. Der Blindleistungsbedarf des Generatorsystems ist dafür so klein wie möglich zu halten. Energieversorgungsunternehmen (kurz: EVU) berechnen hohe Kosten für den Bezug von Blindleistung, daher ist es für den Betreiber der Anlage erstrebenswert, keine oder nur wenig Blindleistung zu beziehen. Weiterhin muss der eingespeiste Strom möglichst frei von Oberschwingungen sein. Die Forderung nach einer sauberen Sinusschwingung bezieht sich dabei vor allem auf den Frequenzrichter, da vom Antrieb selbst nur ein sehr geringer Oberschwingungsanteil ausgeht. Für jede neu errichtete WEA ist in Deutschland eine Prüfung der Netzverträglichkeit üblich.

- **Wirtschaftlichkeit und Verfügbarkeit:** Die Wirtschaftlichkeit ist in dieser Aufzählung zwar als letztes genannt, ist aber eines der wichtigsten Kriterien für die Auswahl eines geeigneten Generatorsystems. Sämtliche bereits genannten Punkte sind Faktoren, die auf die Wirtschaftlichkeit einer WEA Einfluss nehmen. Investitionskosten für die Generortechnologie sind gegen den zu erwartenden Ertrag abzuwägen. Gleichmaßen müssen auch Erwartungen hinsichtlich der Wartungsintervalle und der Verfügbarkeit der WEA Teil dieser Betrachtung sein. Zwar sind Wartungskosten und -aufwand verhältnismäßig gering, jedoch kann eine etwaige Stillsetzung der WEA aufgrund defekter Bauteile zu erheblichen Ertragsausfällen führen. Gerade im Offshore-Bereich ist die Anlagenverfügbarkeit aufgrund des erhöhten Logistikaufwands und der damit verbundenen langen Reaktionszeiten ein wichtiges Kriterium.

Die optimale WEA besitzt also einen frei einstellbaren Drehzahlbereich, wobei sämtliche mechanischen und elektrischen Größen präzise regelbar und die Verluste nahezu Null sind. Dabei wird Wirkleistung als reine 50-Hz-Sinusschwingung ins Netz eingespeist. Das Generatorsystem ist kostengünstig und wartungsfrei.

In der Realität lässt sich solch ein optimales System allerdings nicht verwirklichen, vielmehr müssen bei dem Entwurf eines Generatorkonzeptes die obigen Merkmale gegeneinander abgewogen werden. Je nach Standort, der dort herrschenden Wetter- und Anschlussbedingungen und Leistungsvolumen der WEA variiert die Gewichtung einzelner Kriterien.

2.3 Generatorarten einer WEA

2.3.1 Synchrongeneratoren

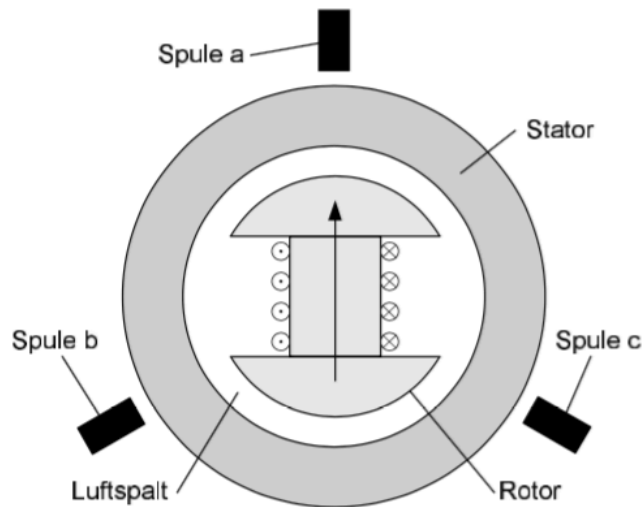


Abbildung 2: Schnittzeichnung der Synchronmaschine mit Erregerwicklung am Rotor [9 S. 361]

Eine häufig eingesetzte Antriebsart für Generatoren in WEA ist die Synchronmaschine (kurz: SM). Abbildung 2 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer SM. Der Rotor der SM, wird über Schleifringkontakte mit einer Gleichspannung erregt. Die drei Statorwicklungen sind um den Rotor angeordnet. Durch eine angelegte Wechselspannung wird nun in den Statorwicklungen ein Drehfeld erzeugt. Aus der Erregung des Rotors und des dadurch bedingten Magnetfeldes resultiert eine Drehung des Rotors synchron zur Drehzahl des Drehfeldes. [6 S. 354f]. Für die Drehzahl einer SM gilt:

$$n = \frac{f}{p} \quad (2.3-1)$$

SM gibt es in Ausführungen mit einigen wenigen Polpaaren (Vollpolmaschinen), jedoch auch mit sehr hohen Polpaarzahlen (Schenkelpolmaschinen z.B. mit $p = 40$). Aus einer höheren Polpaarzahl ergeben sich zwingendermaßen auch größere Abmessungen der Maschine.

Aufgrund des synchronen Verhaltens der SM am starren Netz kann eine SM nicht von selbst anlaufen. Vor dem Zuschalten einer SM auf das Netz ist eine Synchronisation erforderlich. Dabei wird die Maschine von einem externen Antrieb beschleunigt und die induzierte Spannung mit der Netzspannung verglichen. Sind diese in Frequenz, Betrag und Phasenlage identisch, so kann die Zuschaltung erfolgen. Der Vergleich der elektrischen Größen erfolgt

dabei über ein Synchronoskop oder über eine vollautomatische Synchronisierungseinrichtung. Eine weitere Lösung der Anlaufproblematik der SM besteht darin, die Drehzahl der SM im asynchronen Betrieb über einen sogenannten Anlaufkäfig hochzufahren [10 S. 581f].

Zur Regelung der SM im Generatorbetrieb können Gleichrichter eingesetzt, die die Erregerwicklung der Synchronmaschine speisen. Über die Veränderung der Erregung kann so der die eingespeiste Leistung reguliert werden. Über die Über- bzw. Untererregung des Rotors kann der Blindleistungsbedarf der Maschine angepasst werden – eine übererregte Synchronmaschine kann so auch als Kondensator wirken und induktive Blindleistung ins Netz einspeisen [10 S. 514f].

Für den Einsatz in einer WEA gibt es verschiedenste Betriebsarten der SM. In der Anwendung wird oft von der hohen Polpaarzahl einer Schenkelpolmaschine Gebrauch gemacht, sodass die SM in getriebelosen WEA direkt an der Rotorwelle betrieben wird. Dabei wird die SM entweder elektrisch erregt, oder ist als permanenterregte SM ausgeführt. Die am weitesten verbreitete Betriebsart der SM ist jedoch der Betrieb mit Vollumrichter unter Einsatz eines Getriebes. Die gute Regelbarkeit der SM bleibt erhalten, in gleichem Maße eliminiert der Umrichter das problematische synchrone Verhalten bei direkter Netzkopplung [11 S. 437ff].

2.3.2 Asynchrongeneratoren

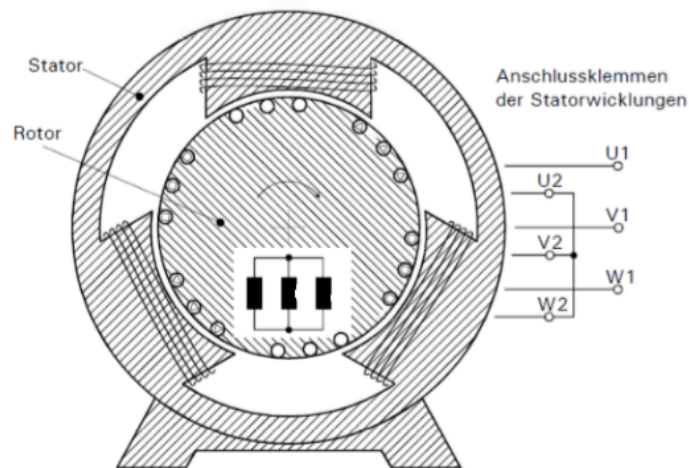


Abbildung 3: Prinzipieller Aufbau einer Asynchronmaschine [12]

Die zweite in WEA eingesetzte Antriebstechnologie stellen Asynchrongeneratoren dar. Abbildung 3 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Asynchronmaschine. Identisch zur SM wird bei einer ASM ebenfalls in den drei Statorwicklungen ein rotierendes Ständerdrehfeld erzeugt. Es wird allerdings auf eine Erregung des Rotors verzichtet. Stattdessen sind die

Rotorwicklungen an beiden Enden kurzgeschlossen. Das rotierende Ständerdrehfeld induziert in den Rotorwicklungen eine Spannung, es beginnt ein Strom zu fließen. Aus der Wechselwirkung zwischen Rotormagnetfeld und Ständerdrehfeld wird das Drehmoment gebildet. Das Drehmoment ist dabei proportional zum Schlupf s . Bei exakt synchroner Drehzahl, also bei nicht vorhandenem Schlupf, wird kein Drehmoment gebildet. Als Folge rotiert der Rotor der ASM immer leicht versetzt, also asynchron, zum Stator drehfeld [10 S. 404f]. Die Drehzahl der ASM ist gegeben durch:

$$n = n_0(1 - s) \quad (2.3-2)$$

$$\text{mit } n_0 = \frac{f}{p} \quad (2.3-3)$$

Zusätzlich zur Bauart mit beidseitig kurzgeschlossenem Rotor, können die Anschlüsse der Rotorwicklungen über Schleifringkontakte nach außen geführt werden. Vorteil dabei ist, dass der Rotor mit Widerständen beschaltet, oder aber mit einer angelegten Spannung erregt werden kann, um so die elektrischen Eigenschaften des Rotors zu verändern. [6 S. 358].

Wird die ASM als Generator einer WEA eingesetzt, so wird sie in unterschiedlichen Betriebsarten betrieben. Zwar kann die ASM direkt ans Netz gekoppelt werden (z.B. im „dänischen Konzept“), jedoch werden aus den in Kapitel 2.2 genannten Gründen Umrichter eingesetzt. Dabei wird vorwiegend zwischen zwei Betriebsarten mit Umrichter unterschieden:

- **ASM mit Vollumrichter.** Hier wird der Umrichter vor den Stator geschaltet, um die Drehzahl des Generators zu variieren. Der Einsatz einer ASM mit Vollumrichter in einer WEA ist eher unüblich, es wird stattdessen auf eine wesentlich besser regelbare SM zurückgegriffen. Es gibt jedoch auch Anwendungsbeispiele für die ASM mit Vollumrichter, die dank kostengünstiger Anschaffung, robuster Bauweise und heutiger moderner Umrichtertechnologie durchaus auch mit Vollumrichter eine Alternative darstellt [11 S. 438]
- **ASM mit Teilumrichter, sogenannte doppelt gespeiste ASM (kurz: DGASM):** Bei der DGASM wird über den Umrichter eine Spannung variabler Frequenz in den Rotor eingespeist. Dadurch wird nicht nur die Drehzahl, sondern je nach Erregung auch die Blindleistungsaufnahme der ASM verändert. Die doppelt gespeiste Asynchronmaschine ist die am weitesten verbreitete Betriebsart der ASM und wird in einer Vielzahl an WEA eingesetzt [11 S. 449ff].

Die detaillierte Beschreibung der Betriebsarten folgt im Kapitel 3. An dieser Stelle wurden sie nur erwähnt, um den folgenden Vergleich der Generatorsysteme zu ermöglichen.

2.3.3 Vergleich der verschiedenen Generatorsysteme

Die Auswahl eines Generatorsystems für eine WEA kommt ohne einen Vergleich der unterschiedlichen Konzepte nicht aus. Gleichzeitig gestaltet sich ein direkter Vergleich der vorgestellten Konzepte ohne ausführliche Betrachtung der Gegebenheiten und Umstände vor Ort schwierig. Dennoch lassen sich die einzelnen Generatortypen und -betriebsarten untereinander grob in Wirkungsgrad, Drehzahlbereich und Kostenfaktor unterscheiden. In [11 S. 455] wird dieser Vergleich für die oben genannten Generatorsysteme wie folgt dargestellt:

| System | Drehzahlbereich | erreichbarer Wirkungsgrad | Kostenfaktor |
|--|-----------------|---------------------------|--------------|
| - ASM mit direkter Netzkopplung | 100 ± 0,5% | 0,965 | 100% |
| - DGASM | 100 ± 50% | 0,955 | 160-180% |
| - SM mit Vollumrichter | 100 ± 50% | 0,95 | 240-260% |
| - Direkt angetriebene SM mit Vollumrichter, permanent erregt | 100 ± 50% | 0,96 | 400-460% |
| - Direkt angetriebene SM mit Vollumrichter, elektr. erregt | 100 ± 50% | 0,94 | 500-600% |

Tabelle 1: Vergleich verschiedener Generatorsysteme nach Drehzahlbereich, Wirkungsgrad und Kosten

Zunächst bedarf diese Übersicht einiger Erklärungen. Der Wirkungsgrad bezieht sich lediglich auf das Generatorsystem, nicht aber auf das Zusammenspiel von Wind und Generator. Die Kostenangaben umfassen den Antrieb und die zugehörige Umrichter- und Schaltanlagentechnologie, die für das entsprechende Generatorsystem benötigt wird. Die angegebenen Werte beziehen sich außerdem auf einen Leistungsbereich von 1 bis 5 MW. Für einen niedrigeren Leistungsbereich lassen sich die angegebenen Wirkungsgrade nicht erreichen, der tatsächliche Wirkungsgrad ist dort niedriger [11 S. 455].

Der Einsatz eines Generatorsystems mit Umrichter ist dabei immer kostenaufwändiger als ein System ohne Umrichter, gleiches gilt für die Nennleistung des Umrichters. Je geringer die Leistung ist, die über den Umrichter geführt wird, desto geringer auch die Kosten. SM sind

grundsätzlich mit höheren Kosten verbunden - mit geringerer Drehzahl nehmen diese immens zu. Das liegt zu großem Teil an der größeren Bauform der niedrig drehenden SM – dabei lassen sich permanent erregte SM kompakter und damit günstiger bauen als elektrisch erregte SM. Der Wirkungsgrad der weit verbreiteten Generatorsysteme ist ähnlich, jedoch ergeben sich Unterschiede, wenn man den Wirkungsgrad im Zusammenhang mit der Regelung der Maschine bei dynamischen Windverhältnissen und somit schwankenden Drehzahlen betrachtet. Bei Einsatz eines Umrichters sind Umrichterverluste unumgänglich, jedoch rentiert sich der Einsatz eines drehzahlvariablen Generatorsystems bei WEA in der Regel.

3 Die Asynchronmaschine²

3.1 Mathematische Beschreibung und Ersatzschaltbild

Die Beschreibung der ASM wurde bereits in Kapitel 2.3.2 angerissen, soll im Folgenden jedoch noch einmal ausführlich beleuchtet werden. Der mathematischen Beschreibung der Maschine und dem Aufstellen der Ersatzschaltbilder (kurz: ESB) geht jedoch eine Vereinfachung voraus, die für alle nachfolgenden Betrachtungen gilt: Die theoretische ASM ist vollständig symmetrisch, sowohl bezogen auf die mechanischen Komponenten (Wicklungsanordnung, mechanische Belastung) als auch auf die elektrischen Größen (Wicklungsimpedanzen, Ströme und Spannungen). Aus dieser Annahme ergibt sich, dass es genügt, eine Wicklungsgruppe der Maschine zu beschreiben, um Rückschlüsse auf sämtliche anderen Wicklungsgruppen zu ziehen.

3.1.1 Vollständiges, elektrisches Ersatzschaltbild mit idealer ASM

Betrachtet man das elektrische ESB einer ASM, so sieht es vollständig und ohne Vereinfachungen wie auf der folgenden Seite in Abbildung 4 aus.

² Im Folgenden vgl. [10] und [12]

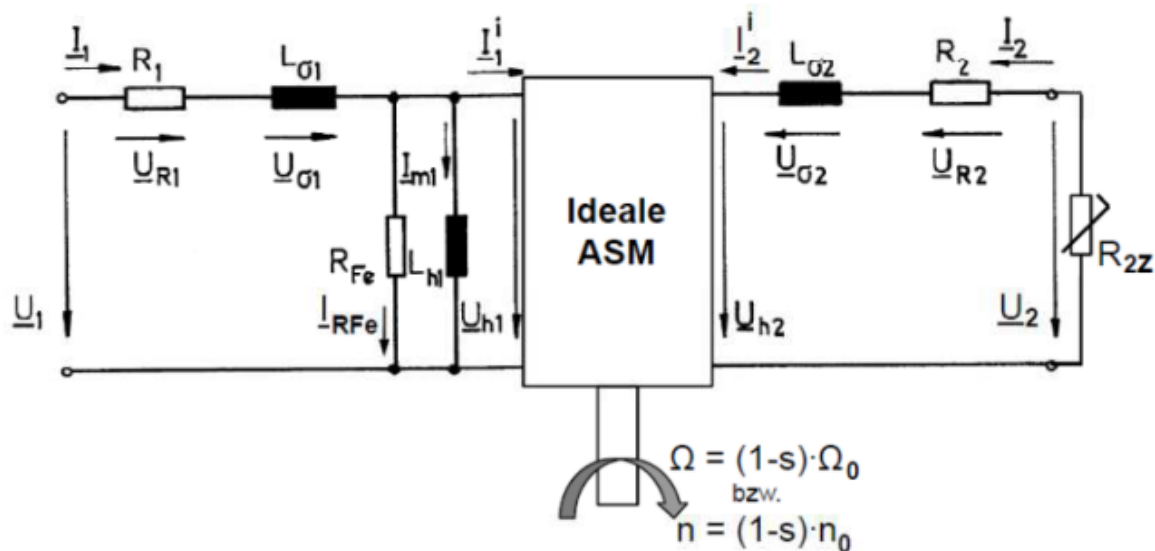


Abbildung 4: Vollständiges, einphasiges ESB einer Asynchronmaschine mit idealer ASM [12 S. 29]

Für das Verständnis der ASM ist es unabdinglich, die in Abbildung 4 aufgeführten Widerstände und Induktivitäten zu identifizieren. Der Index 1 beschreibt dabei stets Größen der Stator-, der Index 2 Größen der Rotorseite.

R_1, R_2 beschreiben den ohmschen Widerstand der Hauptwicklungen von Stator und Rotor.

$L_{\sigma 1}, L_{\sigma 2}$ beschreiben die Streuinduktivitäten der Rotor- und Statorwicklung. Durch die Streuinduktivitäten wird diejenige Induktivität beschrieben, die durch den magnetischen Streufluss gebildet wird.

L_{h1} ist die Hauptinduktivität der Statorwicklung.

I_{m1} ist der Magnetisierungsstrom der Asynchronmaschine durch die Hauptinduktivität. Dieser Strom kennzeichnet den notwendigen Strom, um das magnetische Drehfeld innerhalb der Maschine aufzubauen.

R_{Fe} berücksichtigt die Eisenverluste von Stator und Rotor. Diese Verluste entstehen zum Teil durch die sich ständig ändernden magnetischen Flüsse und der damit verbundenen Hystereseverluste im Stator sowie im Rotor. Ein weiterer Anteil der Eisenverluste wird durch die Wirbelstromverluste eingenommen.

R_{2z} ist der Läuferzusatzwiderstand. Bei Motoren mit Schleifringläufern wird hier der Übergangswiderstand der Schleifringe berücksichtigt. Bei Käfigläufermotoren ohne zusätzliche Schleifringkontakte entfällt dieser Widerstand.

Für die **ideale ASM** gelten 2 wichtige Betriebspunkte. Ohne äußere Belastung ist auch kein inneres Drehmoment vorhanden ($M_i = 0$). Die Maschine dreht sich dabei mit absolut synchroner Frequenz ($s = 0$). Im Stillstand hingegen dreht die Maschine nicht ($s = 1$), während die Frequenz der Rotorspannung identisch ist mit der Frequenz der Statorspannung ($f_1 = f_2$). Zu jedem Zeitpunkt ist die Rotorleistung gleich der Statorleistung, es sind keinerlei Kupfer-, Eisen- oder Reibungsverluste vorhanden.

3.1.2 Statorseitiges Ersatzschaltbild der ASM

Das vollständige Ersatzschaltbild beschreibt die ASM zwar ausreichend, bietet aber nur wenig Möglichkeiten zur ganzheitlichen mathematischen Betrachtung der Maschine. Ziel im nächsten Schritt ist es, die Maschine sowohl stator- als auch rotorseitig in Einem beschreibbar zu machen, indem die Trennung zwischen Stator- und Rotorseite aufgehoben wird. Dazu wird die Maschine statorseitig betrachtet, sämtliche Größen der Rotorseite werden auf die Statorseite transformiert. Es ergibt sich nach Transformation der Rotorgrößen das ständerseitige ESB wie in Abbildung 5.

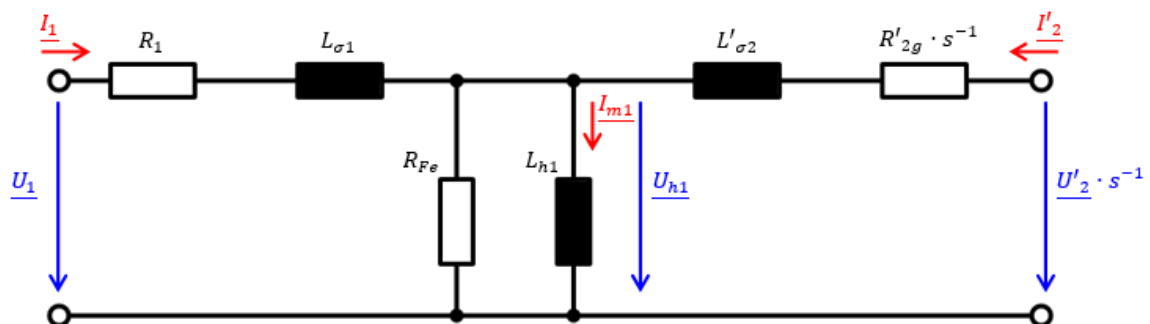


Abbildung 5: Vollständiges einphasiges, statorseitiges ESB der ASM

Die Umrechnung der Rotorgrößen auf die Statorseite erfolgt hierbei durch Verrechnung mit einem Übersetzungsfaktor \ddot{u} . Dieser Übersetzungsfaktor ergibt sich aus zweierlei Größen.

- N_1, N_2 : Der Windungszahl der Ständer- und Läuferwicklung.
- ξ_1, ξ_2 : Dem Wicklungsfaktor der Ständer- und Läuferwicklung. Der Wicklungsfaktor ist eine Größe, die sich aus der Anordnung und Verteilung der Leiter in einem Wicklungsstrang ergibt. Durch eben diese Verteilung der Leiter über den gesamten Luftspalt reduziert sich die Grundschwingung der magnetischen Induktion im Vergleich zur der Induktion, wenn die Wicklung nur über einer einzigen fixen Winkellage

angeordnet wäre. Um welchen Faktor sich die magnetische Induktion im Luftspalt unterscheidet, wird durch den Wicklungsfaktor ξ beschrieben.

Für den Übersetzungsfaktor \ddot{u} gilt:

$$\ddot{u} = \frac{N_1 \cdot \xi_1}{N_2 \cdot \xi_2} \quad (3.1-1)$$

Der Übersetzungsfaktor beschreibt, um welchen Faktor sich Statorspannung U_1 und die induzierte Rotorspannung $U_{2,k}$, wenn sich dieser im Stillstand befindet, unterscheiden. Es gilt also ebenfalls:

$$\ddot{u} = \frac{U_1}{U_{2,k}} \quad (3.1-2)$$

Durch Anwendung des Übersetzungsfaktors auf die rotorseitigen Größen ergeben sich folgende transformierte Größen:

$L'_{\sigma 2}$: Die übersetzte Streuinduktivität der Läuferwicklung. Es gilt:

$$L'_{\sigma 2} = L_{\sigma 2} \cdot \ddot{u}^2 \quad (3.1-3)$$

R'_{2g} : Der übersetzte ohmsche Widerstand der Läuferwicklung. Dabei werden der Hauptwiderstand R_2 und der Zusatzwiderstand R_{2Z} zusammengefasst. Es gilt:

$$R'_{2g} = (R_2 + R_{2Z}) \cdot \ddot{u}^2 \quad (3.1-4)$$

Anhand des ESB in Abbildung 5 lässt sich die ASM mathematisch beschreiben. Dazu werden komplexe Raumzeiger gebraucht. Wendet man die Kirchhoffsche Maschenregel an, so ergeben sich folgende Zusammenhänge:

$$\underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + j\omega_1 L_{1\sigma} \underline{I}_1 + j\omega_1 L_{1h} \underline{I}_{m1} \quad (3.1-5)$$

$$\underline{U}'_2 \cdot s^{-1} = R'_{2g} s^{-1} \cdot \underline{I}'_2 + j\omega_1 L'_{2\sigma} \underline{I}'_2 + j\omega_1 L_{1h} \underline{I}_{m1} \quad (3.1-6)$$

$$\text{mit } \underline{I}'_2 = \underline{I}_2 \cdot \ddot{u}^{-1} \quad (3.1-7)$$

$$\text{und } \underline{U}'_2 = \underline{U}_2 \cdot \ddot{u} \quad (3.1-8)$$

$$(\text{unter Berücksichtigung von } \omega_2 = s \cdot \omega_1) \quad (3.1-9)$$

3.2 Leistungsflüsse und Verluste

In diesem Abschnitt sollen nun die Verluste der ASM und der Leistungsfluss innerhalb der ASM beleuchtet werden. Das umfasst sowohl elektrische Verluste, als auch die mechanischen Verluste innerhalb der Maschine. Grundsätzlich ist bei Leistungsflüssen zu beachten, mit welchem Zählpfeilsystem gearbeitet wird, also welches Vorzeichen die verschiedenen Leistungen erhalten.

Im Verbraucherzählpfeilsystem wird die Maschine als Verbraucher bzw. Motor betrachtet. Aufgenommene elektrische Leistung erhält dabei ein positives, abgegebene Leistung ein negatives Vorzeichen. Treibt die Maschine die mechanische Welle an, so erhält die mechanische Leistung ein positives Vorzeichen. Strom und Spannung werden in eine Richtung gemessen.

Im Erzeugerzählpfeilsystem wird die Maschine als Generator betrachtet, aufgenommene elektrische Leistung erhält ein negatives Vorzeichen, während abgegebene Leistung mit einem positiven Vorzeichen versehen wird. Wird die Welle der Maschine angetrieben, so erhält die mechanische Leistung ein positives Vorzeichen. Strom und Spannung werden in entgegengesetzte Richtungen gemessen.

Sofern ein Zählpfeilsystem konsequent beibehalten wird, ist es einerlei, welches System verwendet wird. Es muss lediglich bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden, um Missverständnisse zu vermeiden. Im Rahmen dieser Arbeit wird ausschließlich mit dem Verbraucherzählpfeilsystem gearbeitet.

3.2.1 Leistungsfluss der ASM mit kurzgeschlossenem Rotor

Die auf der folgenden Seite in Abbildung 6 aufgestellte Leistungsbilanz gilt für die ASM, wenn dem Rotor keine zusätzliche elektrische Leistung zugeführt wird, die Rotoranschlüsse also kurzgeschlossen werden. Ebenso ist hier nur die Maschine ohne äußere Beschaltung aufgeführt, ein nachgeschalteter Umrichter mit eigenen Verlusten wurde also nicht berücksichtigt.

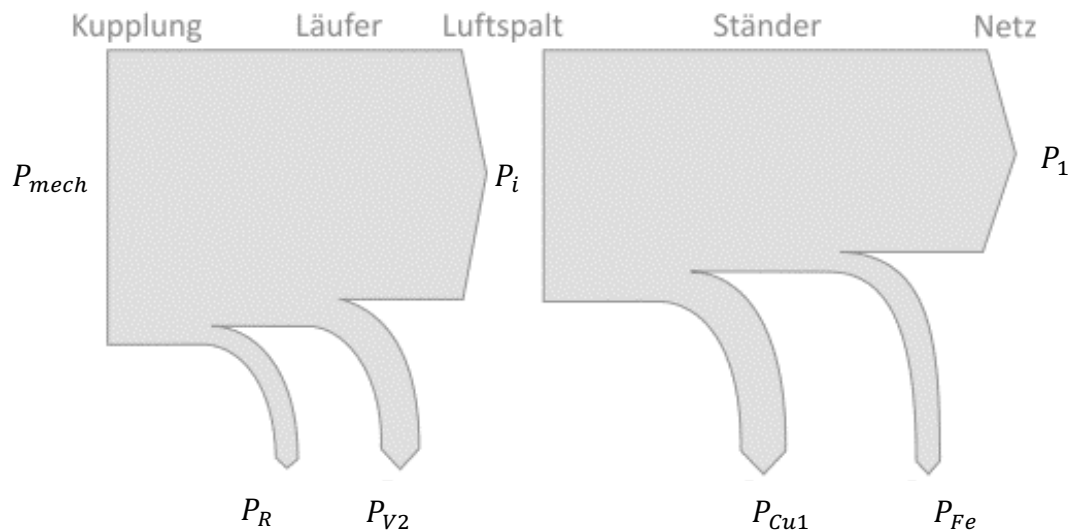


Abbildung 6: Leistungsbilanz eines Asynchrongenerators ohne äußere Beschaltung [8 S. 315]

Für die Leistungsbilanz wurde die ASM als Generator betrachtet.

P_{mech} : Ist die aufgenommene mechanische Leistung am Rotor der Maschine. Für die aufgenommene ergibt sich aus dem Drehmoment M und der Rotordrehzahl Ω .

$$P_{mech} = M \cdot \Omega \quad (3.2-1)$$

P_R : Sind die Reibungsverluste, bestehend aus der mechanischen Reibung und der Luftreibung des Rotors. Sie ergeben sich aus dem Reibungsmoment M_R und der Rotordrehzahl Ω .

$$P_R = M_R \cdot \Omega \quad (3.2-2)$$

P_{V2} : Sind die ohmschen Verluste im Rotor, verursacht durch die Erwärmung der Rotorwicklungen (P_{Cu2}) und der Schleifringkontakte (P_{RZ2}). Diese Verluste hängen direkt mit dem ohmschen Widerstand der Rotorseite R_{2g} zusammen.

$$P_{V2} = P_{Cu2} + P_{RZ2} = 3 \cdot I_2^2 \cdot R_{2g} \quad (3.2-3)$$

P_{V2} bezeichnet in diesem Zusammenhang ebenfalls die elektrische Wirkleistung des Rotors. Es gilt weiterhin:

$$P_{V2} = s \cdot P_i \quad (3.2-4)$$

P_i : Ist die Luftspaltleistung oder auch innere Leistung der Maschine. Betrachtet man das vollständige Ersatzschaltbild Abbildung 4 in Kapitel 3.1.1, so ist die Luftspaltleistung P_i die Leistung, die von der idealen ASM – keine Reibung, ohne träge Massen – aufgenommen wird.

Dies ist auch die Leistung, die vom Rotor auf den Stator übertragen wird. Es gilt:

$$P_i = 3 \cdot I_1^i U_{h1} \cos(\varphi_i) = 3 \cdot I_2^i U_{h2} \cos(\varphi_i) \quad (3.2-5)$$

wobei I_1^i und I_2^i Stator- bzw. Rotorstrom der idealen ASM sind und U_{h1} und U_{h2} die stator- bzw. rotorseitige Hauptfeldspannung.

Die Luftspaltleistung P_i ergibt sich außerdem aus dem inneren Drehmoment M_i und der idealen Leerlaufdrehzahl des Rotors Ω_0 .

$$P_i = M_i \cdot \Omega_0 \quad (3.2-6)$$

$$\text{mit } \Omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p} \quad (3.2-7)$$

Unter Berücksichtigung des Zusammenhangs (3.2-4) gilt außerdem:

$$P_i = P_{mech} + P_R + P_{V2} = P_{mech} + P_R + sP_i \quad (3.2-8)$$

$$P_i = \frac{P_{mech} + P_R}{1 - s} \quad (3.2-9)$$

P_{Cu1} : Beschreibt die Kupferverluste in der Statorwicklung, die durch die Erwärmung der Ständerwicklung entstehen. Es gilt:

$$P_{Cu1} = 3 \cdot I_1^2 R_1 \quad (3.2-10)$$

P_{Fe} : Sind die Eisenverluste im Ständer. Die Eisenverluste berechnen sich wie folgt:

$$P_{Fe} = 3 \cdot \frac{U_{h1}^2}{R_{Fe}} \quad (3.2-11)$$

P_1 : Ist die an den Anschlussklemmen des Motors abgegebene elektrische Leistung. Sie berechnet sich nach:

$$P_1 = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos(\varphi) \quad (3.2-12)$$

Ist die Maschine direkt ans Netz gekoppelt, so ist P_1 die ins Netz abgegebene Leistung. Wird zwischen Netz und Maschine noch ein Umrichter geschaltet, so sind bei der Ermittlung der Netzleistung die Umrichterverluste ebenfalls zu berücksichtigen:

$$P_{Netz} = P_1 - P_{V,Umrichter} \quad (3.2-13)$$

3.2.2 Leistungsfluss der DGASM

Wird die ASM nun mit zusätzlicher Speisung des Rotors betrieben, also als DGASM, so ändert sich auch die Leistungsbilanz. Zwar ist der in Abbildung 6 aufgezeigte Leistungsfluss mit allen mathematischen Berechnungen weiterhin gültig, sollte aber um die Rotorbeschaltung erweitert werden, um Missverständnisse bei der Betrachtung zu vermeiden.

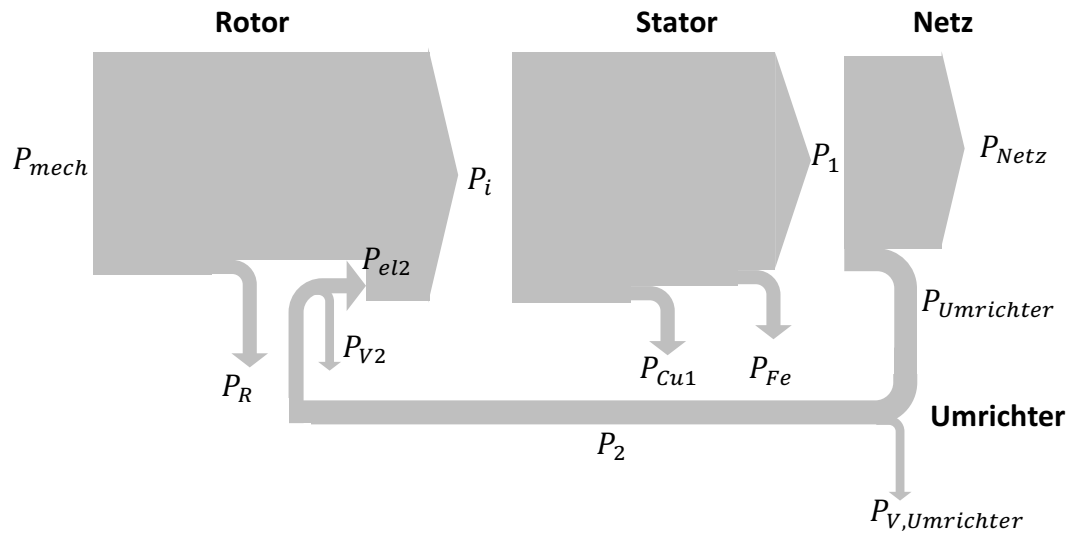


Abbildung 7: Leistungsbilanz eines doppelt gespeisten Asynchrongenerators

Das vorherige Sankey-Diagramm wurde um den Umrichter und die Speisung des Rotors erweitert. Es wurde der Fall angenommen, dass der Rotor mit zusätzlicher Wirkleistung aus dem Netz gespeist wird. Ebenso möglich ist es, dass dem Rotor Wirkleistung entzogen wird. Im doppelt gespeisten Betrieb müssen neue Leistungen und Verluste berücksichtigt werden.

$P_{V,Umrichter}$: Ist die Verlustleistung des Umrichters. Die Verlustleistung des Umrichters berechnet sich aus der Differenz von Umrichtereingangsleistung $P_{Umrichter}$ und Rotorwirkleistung P_2 an den Rotorklemmen der Asynchronmaschine.

$$P_{V,Umrichter} = P_{Umrichter} - P_2 \quad (3.2-14)$$

P_{el2} : Ist die elektrische Wirkleistung des Rotors. Sie berechnet sich analog zu (3.2-4), jedoch muss im doppelt gespeisten Betrieb die Richtung der Leistung mit einbezogen werden:

$$P_{el2} = -s \cdot P_i \quad (3.2-15)$$

Aus diesem Zusammenhang lassen sich wichtige Schlüsse für die Leistungsflüsse der DGASM ziehen. Eine ausführliche Betrachtung hierzu folgt im nachfolgenden Kapitel 3.3.

3.3 Betriebsverhalten einer DGASM

Anhand des Leistungsflussdiagrammes in Abbildung 7 und den dazugehörigen mathematischen Betrachtungen lassen die wichtigen Betriebsarten und deren Charakteristika einer DGASM ableiten. Im Voraus sind bereits einige grundlegende Eigenschaften der DGASM festzuhalten:

- Die DGASM verfügt nicht nur eine Speisung des Stators, sondern zusätzlich noch über eine Speisung des Rotors. Das ermöglicht es, dem Rotor zusätzliche Wirk- und auch Blindleistung zu- und abzuführen.
- Der Rotor ist nicht direkt ans Netz gekoppelt, sondern wird über einen Umrichter gespeist. Die Rotorspannung ist also in der Frequenz variabel. Das erlaubt die Einstellung der Rotordrehzahl in einem bestimmten Frequenzbereich.
- Der Stator ist weiterhin direkt ans starre Netz gekoppelt. Statorspannung und -frequenz lassen sich also nicht verändern.

3.3.1 Wahl der Rotordrehzahl

Wie bereits in Kapitel 2.3.2 beschrieben, ergibt sich die Drehzahl einer Asynchronmaschine wie folgt:

$$n = n_0(1 - s) \quad (3.3-1)$$

Der Schlupf wiederum ergibt sich aus der Differenz von Stator- und Rotorfrequenz:

$$s = \frac{f_2}{f_1} = \frac{\omega_2}{\omega_1} \quad (3.3-2)$$

Durch die Wahl der Ausgangsfrequenz des Umrichters lässt sich nun die Drehzahl der Maschine einstellen:

$$n = \frac{f_1}{p} \cdot \left(1 - \frac{f_2}{f_1}\right) = \frac{f_1 - f_2}{p} \quad (3.3-3)$$

Begrenzt wird die Einstellung der Maschinendrehzahl durch die maximal zulässige elektrische Leistung der Rotorwicklung. Aus dem Zusammenhang (3.2-15) wird deutlich:

$$P_{el2} \sim s \quad (3.3-4)$$

Mit steigendem Schlupf steigt also auch die elektrische Leistung des Rotors. Eine Einstellung der Drehzahl ist also nur im Rahmen der zulässigen Nennbelastung des Rotors möglich. In der Regel beträgt der maximal mögliche Schlupf in etwa ein Drittel, also 33%.

3.3.2 DGASM im über- und untersynchronen Betrieb

Beim Betrieb einer DGASM wird zwischen zwei unterschiedlichen Drehzahlbereichen unterschieden, dem übersynchronen und dem untersynchronen Betrieb.

- Im **untersynchronen** Betrieb liegt die Drehzahl der Maschine unterhalb der Synchronfrequenz n_0 . Die Maschine wird also mit positivem Schlupf s betrieben. Aus (3.2-15) folgt:

$$P_{el2} = s \cdot P_i > 0; \text{ mit } s > 0 \quad (3.3-5)$$

Betrachtet man nun das Sankey-Diagramm in Abbildung 7, so wird dem Rotor zusätzliche Wirkleistung über den Umrichter zugeführt.

- Im **übersynchronen** Betrieb liegt die Drehzahl der Maschine überhalb der Synchronfrequenz n_0 . Die Maschine wird also mit negativem Schlupf s betrieben. Hier gilt analog:

$$P_{el2} = s \cdot P_i < 0; \text{ mit } s < 0 \quad (3.3-6)$$

Hier wird überschüssige Wirkleistung aus dem Rotor über den Umrichter ins Netz gespeist.

Unter Vernachlässigung der Reibungs- und Eisenverluste, lassen sich die vereinfachten Leistungsflüsse der Maschine im über- und untersynchronen Betrieb wie folgt abbilden:

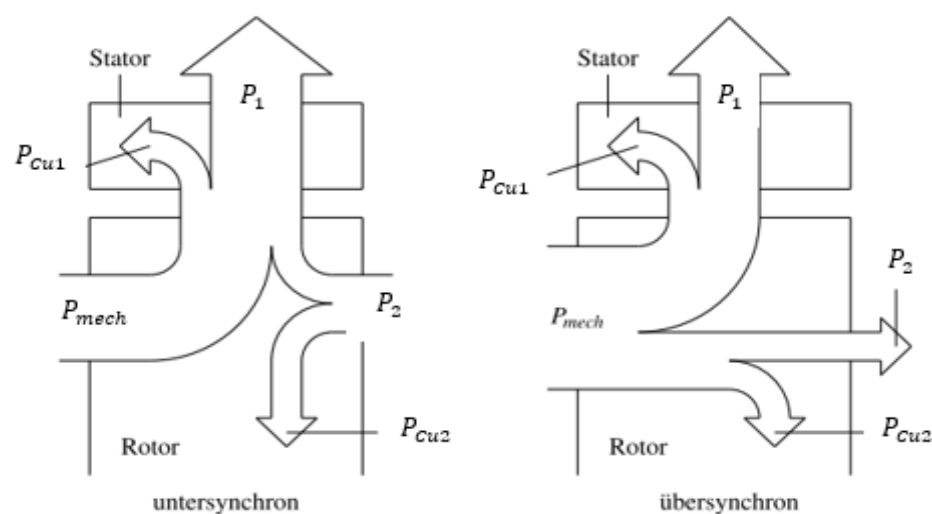


Abbildung 8: Vereinfachter Leistungsfluss der DGASM im über- und untersynchronen Betrieb [5 S. 21]

3.3.3 Erregung der Rotorwicklung

Für die Magnetisierung der Wicklungen und damit verbunden Bildung des nötigen Drehfeldes, benötigt eine ASM einen nicht unerheblichen Teil an induktiver Blindleistung Q_{ASM} , der im Normalfall – das heißt im Betrieb mit kurzgeschlossenem Rotor – aus dem Netz bezogen wird. Bei Vernachlässigung der Streuinduktivitäten lässt sich festhalten:

$$Q_{ASM} = U_1 \cdot I_1 \cdot \sin(\varphi_1) \approx 3 \cdot I_{m1}^2 \cdot \omega_1 L_{h1} \quad (3.3-7)$$

Bei einer DGASM hingegen besteht die Möglichkeit, die Blindleistung sowohl im Stator als auch im Rotor bereitzustellen. Es gilt mit Berücksichtigung des ESB in Abbildung 5:

$$\underline{I_{m1}} = \underline{I_1} + \underline{I'_2} \quad (3.3-8)$$

Der gesamte Blindleistungsbedarf der ASM wird gedeckt durch die zugeführte Blindleistung im Stator Q_1 und die zugeführte Blindleistung im Rotor Q_2 .

$$Q_{ASM} = Q_1 + Q_2 \quad (3.3-9)$$

Eine nicht fremderregte ASM ($Q_2 = 0$) benötigt auch im generatorischen Betrieb induktive Blindleistung aus dem Netz. Bei gleichbleibender Belastung der Maschine bleibt auch der Blindstrombedarf der Maschine konstant. Wird der Rotor nun über den Umrichter erregt, ihm also induktive Blindleistung zugeführt, so nimmt der Blindleistungsbedarf des Stators entsprechend ab. Der Umrichter im Rotorkreis ermöglicht es hierbei, die benötigte Blindleistung in den Rotor zu speisen. Es wird zwischen drei verschiedenen erregten Maschinen unterschieden.

- Für die nicht erregte oder **untererregte** Maschine gilt:

$$Q_1 > 0 \rightarrow \sin(\varphi) > 0 \quad (3.3-10)$$

Die Maschine bezieht die induktive Blindleistung im Stator direkt aus dem Netz, da die Erregung im Rotorkreis nicht ausreicht, um den gesamten Blindleistungsbedarf der Maschine zu decken. Netzseitig wirkt die ASM als induktiver Verbraucher.

- Für die **richtig erregte** Maschine gilt:

$$Q_1 = 0 \rightarrow \sin(\varphi) = 0 \quad (3.3-11)$$

Die Rotorwicklung ist exakt so erregt, dass der Blindleistungsbedarf der Maschine gedeckt ist. Die ASM speist rein ohmsche Wirkleistung ins Netz ein oder wirkt als rein ohmscher Verbraucher.

- Für die **übererregte** Maschine gilt:

$$Q_1 < 0 \rightarrow \sin(\varphi) < 0 \quad (3.3-12)$$

Die Maschine wird rotorseitig stärker erregt als Blindleistungsbedarf der ASM besteht. Überschüssige induktive Blindleistung wird ins Netz eingespeist. Netzseitig wirkt die ASM als kapazitiver Verbraucher.

Durch die Regelung des Rotor-Blindstroms über den Umrichter kann so die eingespeiste Blindleistung variiert werden. Der Einstellbereich ist hierbei ebenso durch die zulässige Nennbelastung der Rotorwicklung begrenzt.

4 Der Versuchsstand Windenergie-Netzeinspeisung

4.1 Allgemeiner Aufbau des Versuchsstands

Bei dem Versuchsstand, der in dieser Bachelorarbeit behandelt wird, handelt es sich um den Versuchsstand für den Laborversuch „Windenergie-Netzeinspeisung“. Ziel dieses Versuchs ist es, die Energieerzeugung und -einspeisung einer WEA nachzubilden und den Studenten anhand praktischer Messungen näher zu bringen. Herzstück dieses Versuchsstands ist eine Asynchronmaschine, die als Generator betrieben wird. Angetrieben wird die ASM durch eine Gleichstrommaschine. Die Wellen beider Maschinen sind starr miteinander gekoppelt.

Abbildung 9 auf der folgenden Seite zeigt die beiden gekoppelten Maschinen.

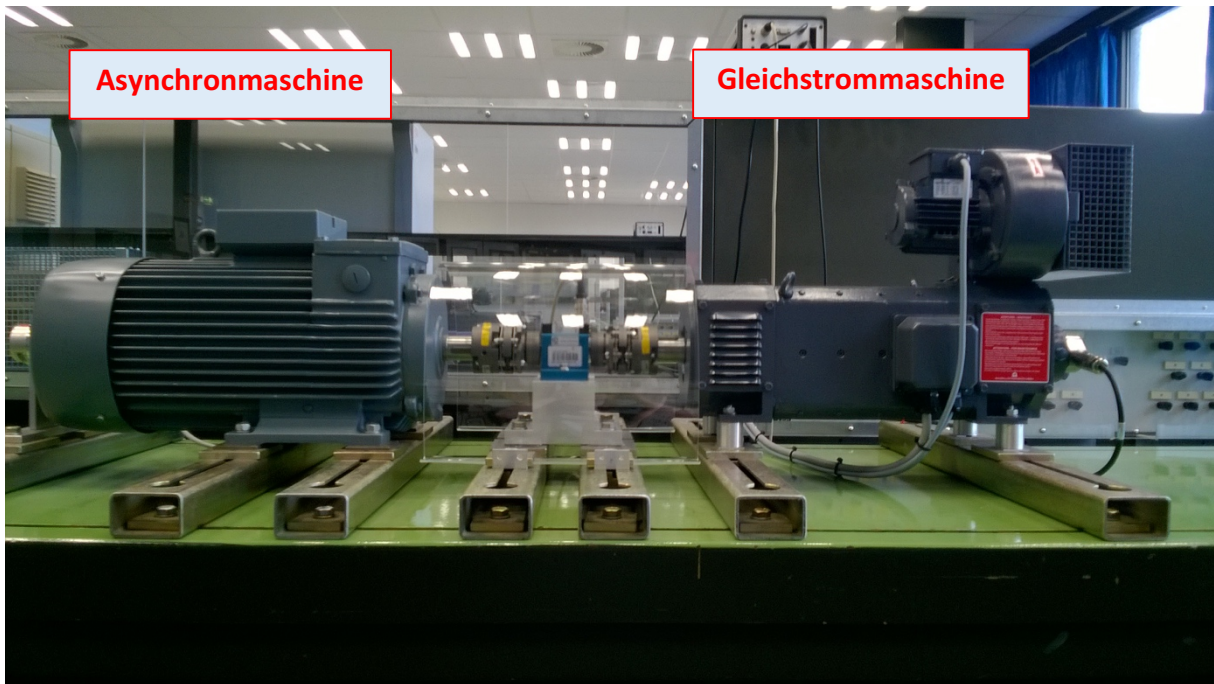


Abbildung 9: Maschinentisch des Versuchsstands „Windenergie-Netzeinspeisung“

Die GM wird über einen Stromrichter betrieben, der Drehmoment und Drehzahl der Maschine regelt. So wird das Drehmoment des Rotors einer WEA, der ein Drehmoment auf den Rotor des Generators ausübt, nachgebildet. Die GM treibt die Welle der ASM an. Die ASM ist wiederum über einen Steuerschrank mit dem Versorgungsnetz verbunden. Der Steuerschrank ist mit sämtlichen Bauteilen ausgestattet, die für die Regelung der ASM benötigt werden. Die ASM ist dabei mit Schleifringläufern ausgeführt. Somit sind nicht nur die Statorwicklungen, sondern auch die Rotorwicklungen für eine äußere Beschaltung zugänglich. Die Front des Steuerschranks ist mit einer Stecktafel mit Blindschaltbild versehen. Das hat den Vorteil, dass Messstellen einfach erreichbar sind, birgt aber auch die Möglichkeit, durch Umstecken der Verbindungsleitungen an der Front, die Verschaltung der ASM anzupassen und so zwischen den unterschiedlichen Generatorsystemen zu wechseln.



Abbildung 10: Umrichterschaltschrank der ASM mit Stecktafel des Versuchsstands „Windenergie-Netzeinspeisung“

Die Ansteuerung des Umrichters geschieht über eine PC-Schnittstelle. Das eingesetzte Interface von der Firma dSPACE ermöglicht es mit der zugehörigen Software in Echtzeit Berechnungen auf Matlab/Simulink-Basis durchzuführen und daraufhin die Ansteuersignale auszugeben. Das dSPACE-System ist vollständig in die Anlage integriert, sodass der Versuchsstand nach dem Anschalten der Schränke und dem Herstellen der notwendigen Steckverbindungen komplett über das Human-Machine-Interface (kurz: HMI) am PC am Arbeitsplatz gesteuert und geregelt werden kann. Dabei können eingespeiste Blind- und Wirkleistung mithilfe der Leistungsregelung, oder das wirkende Drehmoment mithilfe der Belastungsregelung geregelt werden.

Auf der nachfolgenden Seite in Abbildung 11 ist der gesamte Versuchsstand „Windenergie-Netzeinspeisung“ abgebildet und die wichtigen Komponenten wurden beschriftet.



Abbildung 11: Versuchsstand Windenergie-Netzinspeisung

4.2 Versuchsaufbau der vorhandenen Generatorsysteme

Wie bereits im Kapitel 4.1 beschrieben, lässt sich durch einfaches Umstecken an der Frontplatte des Umrichterschrankes der ASM die Verschaltung an das gewünschte Generatorsystem anpassen. Dabei stehen drei verschiedene Generatorsysteme zur Verfügung, deren Aufbau und Verschaltung nachfolgend beschrieben wird.

4.2.1 Direkte Netzkopplung

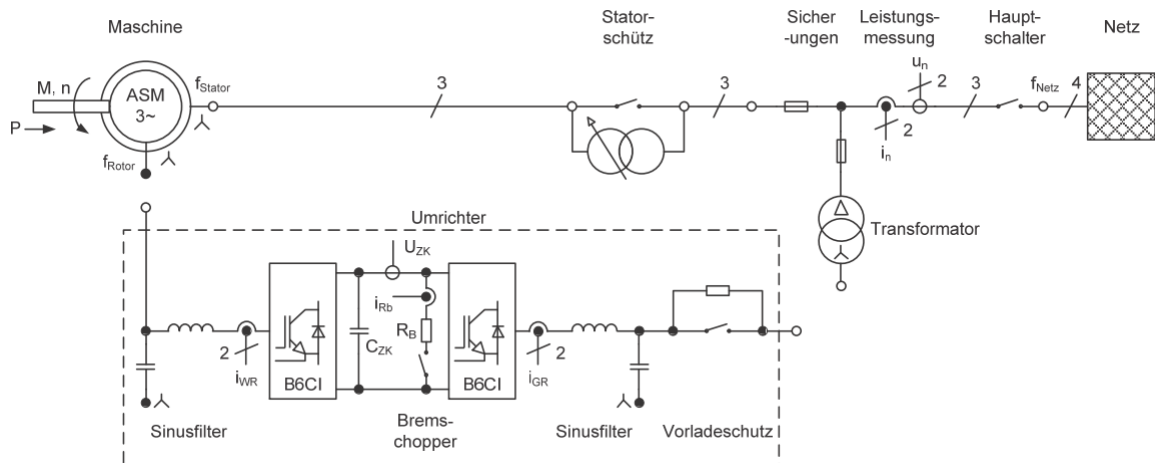


Abbildung 12: Verschaltung der ASM für die Betriebsart „Direkte Netzkopplung“ [13 S. 36]

Bei der direkten Netzkopplung wird die Asynchronmaschine statorseitig direkt mit dem Netz verbunden. Der Umrichter wird in dieser Betriebsart nicht angeschlossen, der Rotor der Maschine kurzgeschlossen. Über das Statorschütz wird die ASM mit dem Netz gekoppelt und speist dann unregelt ins Netz ein. Die Stecktafel wird dabei wie folgt verdrahtet:

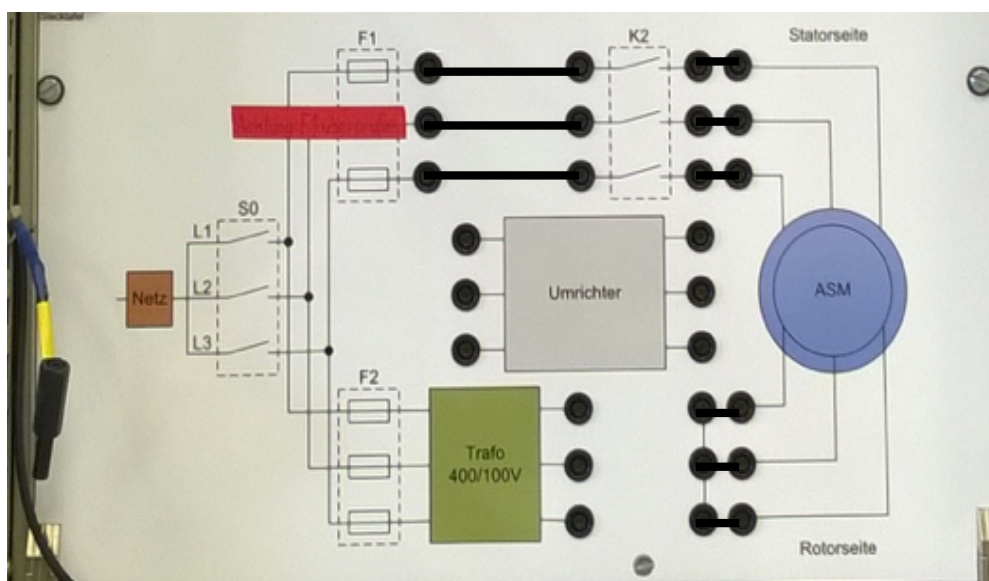


Abbildung 13: Verdrahtung der Stecktafel für die Betriebsart „Direkte Netzkopplung“

4.2.2 Vollumrichter

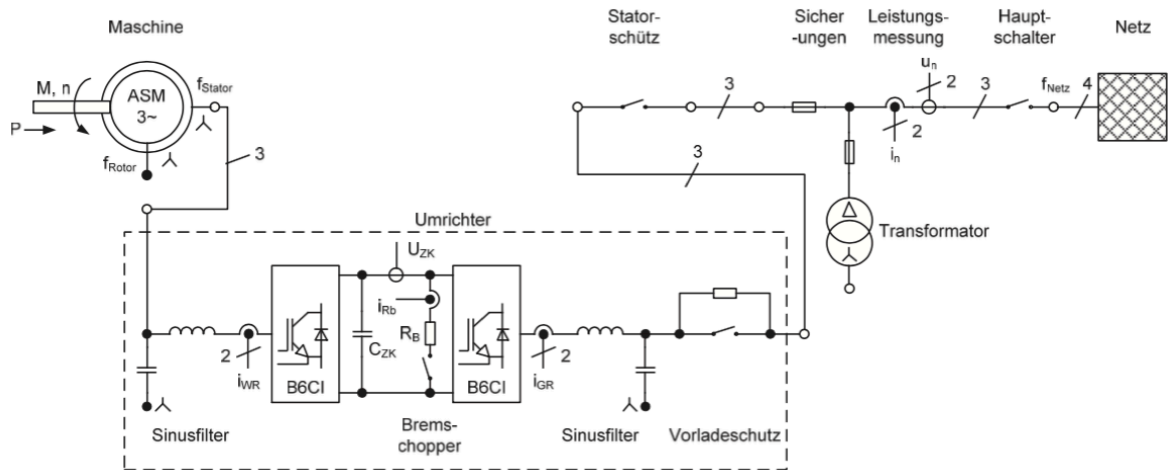


Abbildung 14: Verschaltung der ASM für den Betrieb mit Vollumrichter [13 S. 37]

Beim Betrieb mit Vollumrichter wird der Umrichter zwischen Stator und Netz geschaltet. Der Umrichter besteht aus zwei B6-IGBT-Brücken und einem Gleichspannungszwischenkreis. Der Eingangsumrichter wirkt dabei als Gleichrichter und erzeugt aus der Netzwechselspannung eine Gleichspannung für den Zwischenkreis. Der Ausgangsumrichter wiederum wirkt als Wechselrichter und erzeugt die variable Statorwechselspannung für die Maschine. Die Sinusfilter am Ein- und Ausgang des Stromrichters begrenzen die Oberwelligkeit der Netz- und Statorströme.

Um die Maschine mit Vollumrichter zu betreiben, muss die Stecktafel wie folgt verdrahtet werden:

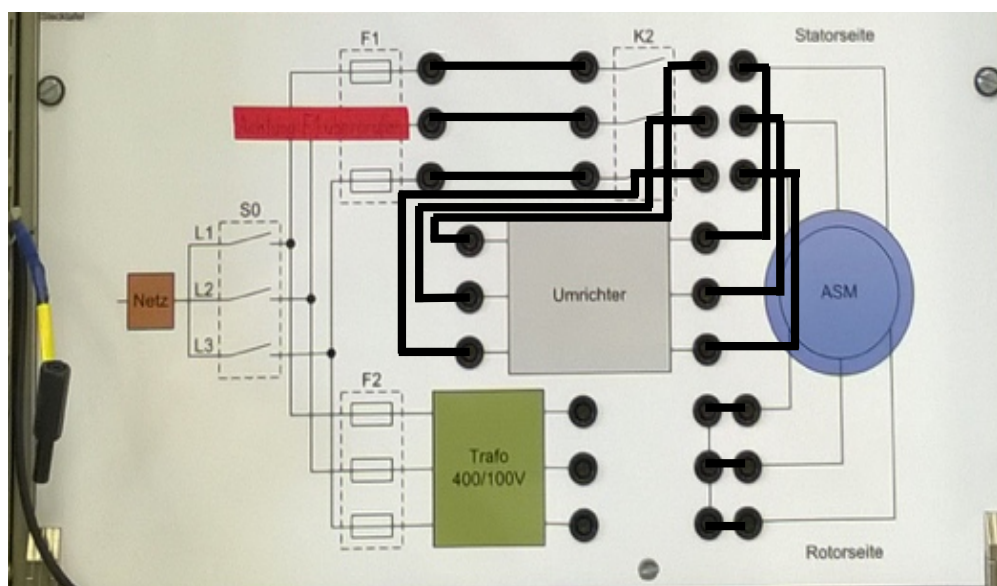


Abbildung 15: Verdrahtung der Stecktafel für den Betrieb mit Vollumrichter

4.2.3 Doppelt gespeiste Asynchronmaschine

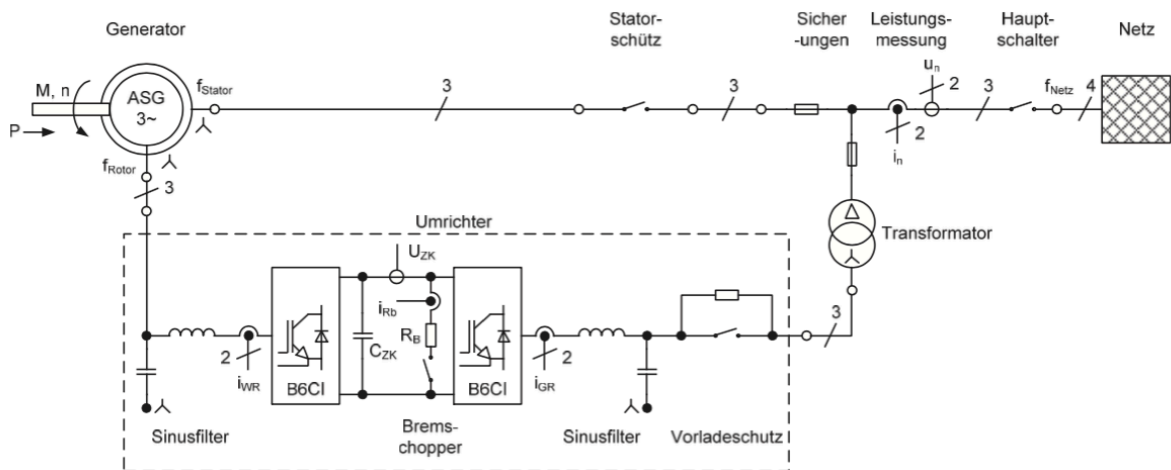


Abbildung 16: Verschaltung für den doppelt gespeisten Betrieb [13 S. 37]

Für den Betrieb mit Teilumrichter, also den Betrieb der ASM als DGASM, wird der Umrichter in den Rotorkreis geschaltet. Da die Nenn-Rotorspannung wesentlich geringer ist als die Nenn-Statorspannung, wird hier zusätzlich ein Transformator im Rotorkreis eingesetzt, um die Eingangsspannung des Umrichters und somit die Zwischenkreisspannung zu verringern. Der verringerte Spannungshub des Ausgangswechselrichters reduziert so die Überschwingungsanteile des Rotorstroms [5 S. 24]. Inwieweit der Transformator dem Betrieb der DGASM tatsächlich dienlich ist, wird in Kapitel 5.2.4.3 näher untersucht werden. Der Stator hingegen wird über das Statorschütz direkt mit dem Netz gekoppelt.

Um die Maschine als DGASM zu betreiben, wird die Stecktafel entsprechend verdrahtet:

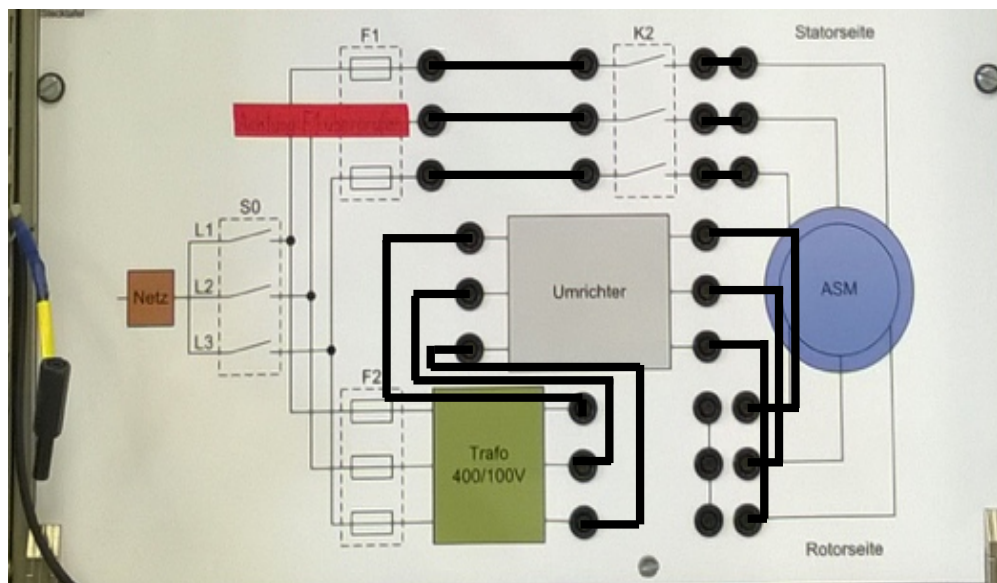


Abbildung 17: Verdrahtung als Stecktafel für den doppelt gespeisten Betrieb

4.3 Vorhandene Messstellen und -geräte

Am Versuchsstand „Windenergie-Netzeinspeisung“ gibt es verschiedene Möglichkeiten, Leistungen zu messen und aufzuzeichnen. Da in dieser Arbeit lediglich der Leistungsfluss der ASM behandelt werden soll, wird auf die Möglichkeiten zur Messung an der GM nicht eingegangen.

Innerhalb des Steuerschranks der ASM selbst sind bereits einige Messstellen vorgesehen. So werden Rotor- und Statorgrößen mit Spannungs- und Stromwandlern erfasst, um die Regelung zu ermöglichen [5 S. 100]. Weiterhin ist die Maschine mit einem Inkremental-Drehzahlgeber ausgestattet, der Rotordrehzahl und -winkellage erfasst. Diese Messstellen sind von außerhalb des Steuerschranks aber nicht zugänglich und werden primär für die Regelung mithilfe des dSPACE-Systems genutzt. Für eine Leistungsflussanalyse an der Maschine, die mit externen Messgeräten durchgeführt wird, bieten sich diese Messstellen daher nur bedingt an. Ziel muss es also sein, von außen zugängliche Messstellen zu wählen und für die Messung zu nutzen.

Gegeben sind diese Messstellen durch den Aufbau des Schaltschranks mit der in Kapitel 4.1 beschriebenen Stecktafel an der Front des Steuerschranks der ASM. Die Kontakte der Stecktafel sind mit den für Messgeräte gängigen 4-mm-Bananensteckern anzuschließen, können also ohne zusätzlichen Aufwand direkt für eine Messung genutzt werden.

Gleichzeitig gilt es zusätzlich, die mechanischen Größen Drehmoment und Drehzahl zu erfassen. Dies geschieht über die Drehmomentmesswelle *DR-2112* zusammen mit der dazugehörigen Zwei-Kanal-Digitalanzeige *DD-2002* der Firma Lorenz Messtechnik. Die Drehmomentmesswelle *DR-2112* verfügt über einen Inkrementaldrehgeber zur Messung der Drehzahl und einen Dehnungsmessstreifen zur Messung des Drehmoments. Die Signale werden vom Anzeigemodul *DD-2002* verarbeitet und über zwei LED-Anzeigen an der Front angezeigt. Gleichzeitig werden Drehmoment und Drehzahl als analoge Spannungssignale über rückseitige BNC-Buchsen ausgegeben.

Für die Leistungsmessung standen im Labor bisher zwei Leistungsanalytoren *WT500* der Firma Yokogawa zur Verfügung, die Spezifikationen und der Funktionsumfang dieser Geräte werden in Kapitel 4.4.4 näher beleuchtet. Weiterhin stehen im Labor die üblichen Multimeter und Oszilloskope zur Verfügung, die für die Leistungsmessung aufgrund der Anforderungen an Genauigkeit und einfache Bedienbarkeit keine Anwendung finden. Im Rahmen dieser

Bachelorarbeit wurde ein weiteres Leistungsmessgerät angeschafft, mit dem die Vermessung des Leistungsflusses der Maschine durchgeführt wurde. Der Transientenrecorder *Gen3i* der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM). Die Hintergründe zur Leistungsmessung und Anschaffung werden im nachfolgenden Kapitel 4.4 ausführlich beschrieben.

4.4 Transientenrecorder HBM *Gen3i*

4.4.1 Leistungsbegriffe und -berechnung im Drei-Phasen-Wechselstromnetz³

Elektrische Leistung ist definiert als die in einer Zeitspanne umgesetzte elektrische Energie, sie wird üblicherweise in der Einheit Watt angegeben.

$$[P] = W \text{ mit } 1 W = 1 \frac{J}{s} \quad (4.4-1)$$

In einem Gleichstromkreis ist die Leistung das Produkt aus Spannung und Strom.

$$P = U \cdot I \quad (4.4-2)$$

In einem Wechselstromkreis ist dieser einfache Zusammenhang nicht gegeben. Durch transiente Effekte wird hier nicht nur an den ohmschen Widerständen Leistung umgesetzt, es kommen auch induktive und kapazitive Elemente zum Tragen. Die gesamte Leistung in einem Wechselstromkreis muss daher unterteilt werden in die Wirkleistung P , die tatsächlich nutzbare elektrische Energie, und die Blindleistung Q , die nicht nutzbare elektrische Energie. Die resultierende Größe bezeichnet man als komplexe Scheinleistung \underline{S} . Multipliziert man die Momentanwerte von Strom und Spannung, so erhält man die Momentanleistung $p(t)$.

$$\underline{S} = P + jQ \quad (4.4-3)$$

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad (4.4-4)$$

Der Betrag der Scheinleistung lässt sich dabei aus den Effektivwerten von Strom und Spannung berechnen.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = U_{RMS} \cdot I_{RMS} \quad (4.4-5)$$

Eine reine Messung der Effektivwerte zur Bestimmung der Wirkleistung reicht also nicht aus. Die Wirkleistung kann entweder mithilfe der Phasenverschiebung zwischen Strom und

³ im Folgenden vgl. [14 S. 155ff]

Spannung φ bestimmt werden, oder aber durch Bestimmung des arithmetischen Mittels der Momentanleistung. Es gilt:

$$P = \operatorname{Re}\{\underline{S}\} = U_{RMS} \cdot I_{RMS} \cdot \cos(\varphi) \quad (4.4-6)$$

$$P = \overline{p(t)} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p(t) dt \quad (4.4-7)$$

Die Scheinleistung kann ebenfalls mithilfe der Phasenverschiebung, oder aber nach Zusammenhang (4.4-5) berechnet werden.

$$Q = \operatorname{Im}\{\underline{S}\} = U_{RMS} \cdot I_{RMS} \cdot \sin(\varphi) \quad (4.4-8)$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (4.4-9)$$

Wird nun ein dreiphasiges Wechselstromsystem analysiert, so ergibt sich die Gesamtleistung des Systems aus der Summe der Einzelleistungen.

$$S_{GESAMT} = S_{L1} + S_{L2} + S_{L3} \quad (4.4-10)$$

$$P_{GESAMT} = P_{L1} + P_{L2} + P_{L3} \quad (4.4-11)$$

$$Q_{GESAMT} = Q_{L1} + Q_{L2} + Q_{L3} \quad (4.4-12)$$

4.4.2 Die Aron-Schaltung

Eine spezielle Schaltung für die Leistungsbestimmung in Dreileitersystemen ist die sogenannte Aron-Schaltung. Bei der Aron-Schaltung werden nur 2 Ströme und 2 Spannungen gemessen, mit denen dann die gesamte aufgenommene Leistung berechnet werden kann.

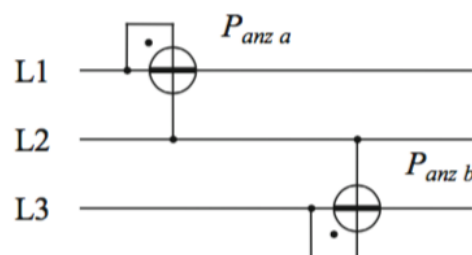


Abbildung 18 Leistungsmessung mit der Aron-Schaltung [14 S. 168]

Die Aron-Schaltung basiert auf der Anwendung der Kirchhoffschen Knotenpunktregel, die besagt, dass die Summe aller ein- und abfließenden Ströme an einem Knoten immer Null ergibt.

$$0 = i_1 + i_2 + i_3 \quad (4.4-13)$$

Wie in Abbildung 18 abgebildet, werden bei der Aron-Schaltung die Ströme i_1 und i_3 , sowie die Leiterspannungen u_{12} und u_{32} gemessen. Dabei gilt:

$$u_{12} = u_{1N} - u_{2N} \quad (4.4-14)$$

$$u_{32} = u_{3N} - u_{2N} \quad (4.4-15)$$

Unter Anwendung der obigen Zusammenhänge folgt nun für die Momentanleistung p :

$$p_{ges} = u_{1N}i_1 + u_{2N}i_2 + u_{3N}i_3 \quad (4.4-16)$$

$$p_{ges} = (u_{12} + u_{2N})i_1 + u_{2N}i_2 + (u_{2N} + u_{32})i_3 \quad (4.4-17)$$

$$p_{ges} = u_{12}i_1 + u_{2N}(i_1 + i_2 + i_3) + u_{32}i_3 \quad (4.4-18)$$

$$p_{ges} = u_{12}i_1 + u_{32}i_3 \quad (4.4-19)$$

Mithilfe der gleichen Vorgehensweise kann die Scheinleistung bestimmt werden.

$$S_{ges} = U_{12}I_1 + U_{32}I_3 \quad (4.4-20)$$

Die Wirkleistung lässt sich gemäß (4.4-7) berechnen, die Blindleistung gemäß (4.4-9).

Diese Zusammenhänge gelten für jedes symmetrische oder unsymmetrische dreiphasige System, sofern der Sternpunkt nicht mit dem Nullleiter verbunden ist. Ist ein Nullleiter mit dem Sternpunkt verbunden, so muss die Last symmetrisch sein, da sonst der Zusammenhang (4.4-13) nicht gilt. Die Aron-Schaltung ist eine Leistungsmessungsschaltung, mit der sich die Gesamtleistung eines dreiphasigen Systems bestimmen lässt, nicht aber die Einzelleistungen jeder Phase.

4.4.3 Anforderungen an ein geeignetes Messsystem

Aus den vorherigen Zusammenhängen ergeben sich drei zentrale Kriterien, die ein Messsystem für die ausreichend genaue Bestimmung von Wirkleistungen eines dreiphasigen Systems erfüllen muss.

Ausreichende Anzahl an Messkanälen: Das erste Kriterium ist das wohl offensichtlichste, ist aber dennoch meist ein limitierender Faktor. Strom und Spannung müssen dreiphasig erfasst werden. Um jeden Wert einzeln zu erfassen werden 3 Spannungs- und 3 Stromkanäle benötigt. Die Anzahl von 6 Kanälen pro gemessener dreiphasiger Leistung kann durch den Einsatz einer Aron-Schaltung auf 4 Kanäle reduziert werden. Dabei geht allerdings die Information über die Einzelleistungen verloren.

Zeitsynchrone Erfassung der einzelnen Kanäle: Nicht nur die Anzahl der Messkanäle ist entscheidend für die Leistungsbestimmung, sondern auch deren zeitsynchrone Erfassung. Da für die Leistungsberechnung Momentanwerte bzw. Phasenverschiebungen miteinander verrechnet werden, müssen sämtliche Kanäle zeitsynchron abgetastet werden, da sonst Phasenverschiebungen auftreten, die die bestimmten Werte verzerren und Ergebnisse verfälschen.

Korrekte Bestimmung der Nulldurchgänge: Sowohl für die Bestimmung der Scheinleistung als auch für die Bestimmung der Wirkleistung werden RMS-Werte bzw. arithmetische Mittelwerte verwendet. Zur korrekten Mittelung dieser muss wiederum die Periodendauer des Signals korrekt erfasst werden. Hier ist die korrekte Detektion der Nulldurchgänge unerlässlich. Erkennt das Messsystem diese nicht oder nicht richtig, so haben die gemessenen Werte keinerlei Aussage über die tatsächlichen Verhältnisse. Wenn nicht nur im starren 50-Hz-Netz, sondern in einem System mit variabler Frequenz gemessen, so muss die Flankendetektion des Messgeräts im gewünschten Frequenzbereich möglichst fehlerfrei arbeiten.

4.4.4 Hindernisse bei Messungen mit dem vorhandenen Yokogawa WT500

Wie bereits in Kapitel 4.3 erwähnt, standen für die Leistungsmessungen am Versuchsstand zuvor zwei Leistungsanalytoren des Typs *Yokogawa WT500* zur Verfügung. Diese Geräte waren für die bis dato ausgeführten Messungen ausreichend. Für die Vermessung des Leistungsflusses innerhalb einer DGASM stoßen die Geräte allerdings an Ihre Grenzen.

Die Leistungsmessgeräte verfügen jeweils über 3 analoge Spannungseingänge und 3 analoge Stromeingänge. Mit dem *WT500* lässt sich ein dreiphasiges Wechselstromsystem vermessen und hinsichtlich Wirk- und Blindleistungen analysieren. Das Gerät arbeitet bei Gleichspannung und in einem Frequenzbereich von 0,5 Hz bis 100 kHz. Die Messungen der zwei einzelnen Geräte können dabei durch ein gemeinsames Trigger-Signal synchronisiert werden. Die

gemessenen Werte können dann entweder abgelesen werden oder als Bild- oder Datendatei auf ein USB-Speichermedium exportiert werden [15].

Ziel dieser Arbeit ist es, nicht nur die gesamte Leistungsaufnahme der ASM in Summe zu ermitteln, sondern Stator- und Rotorleistungen gesondert zu betrachten. Dabei wird die ASM nicht nur im Nennbetrieb, sondern bei variabler Drehzahl betrieben. Aus Kapitel 3.3 wissen wir, dass die Rotorfrequenz das Schlupffache der Statorfrequenz beträgt. Will man Messungen nahe des synchronen Punkts durchführen, so wird die Rotorfrequenz sehr klein, bleibt aber stets eine Wechselgröße. Aus der unteren Nennfrequenz der Wechselstrommessung des *WT500*, lässt sich nun der minimale Schlupf berechnen, bei dem das Gerät noch einzusetzen ist. Die Statorfrequenz beträgt im doppelt gespeisten Betrieb stets 50 Hz.

$$s_{min} = \frac{f_{Messgerät,min}}{f_{Stator}} = \frac{0,5 \text{ Hz}}{50 \text{ Hz}} = 0,01 \quad (4.4-21)$$

Beträgt der Schlupf weniger als 1%, so liegt die Rotorfrequenz außerhalb des Frequenznennbereichs des *WT500*. Das Gerät arbeitet also nicht mehr korrekt für Drehzahlen im Bereich von:

$$1485 \text{ min}^{-1} \leq n \leq 1515 \text{ min}^{-1} \quad (4.4-22)$$

Der Frequenzbereich um die Synchrondrehzahl von 1500 min^{-1} ist allerdings für die Leistungsflussanalyse besonders interessant, weil er den Übergang zwischen unter- und übersynchronen Betrieb darstellt, also die Rotorleistungsflüsse sich mit Unter- bzw. Überschreiten des synchronen Punkts umkehren.

Die Grenzen des *WT500* werden auch in der Praxis offenbart. Wird bei größerem Schlupf gemessen, so wird die bestimmte Rotorfrequenz korrekt angezeigt. Bei geringem Schlupf hingegen wird statt des Zahlenwertes für die Frequenz eine Fehlermeldung „ERROR“ ausgegeben. Gleichzeitig schwanken die gemessenen RMS- und Leistungswerte signifikant.

Normal Mode Uover: ■ ■ ■ Scaling: ■ LineFilt: ■ NULL: ■ YOKOGAWA ◆
 Iover: ■ ■ ■ Average: ■ FreqFilt: ■ CF: 3
 SET : change items

| | Element1 | | Element2 | | Element3 | | Σ (3P4W) |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | U1 | U2 | U3 | U4 | U5 | U6 | |
| | 60V Auto | 60V Auto | 60V Auto | 60V Auto | 60V Auto | 60V Auto | |
| | I1 | I2 | I3 | I4 | I5 | I6 | |
| | 5A Auto | 5A Auto | 5A Auto | 5A Auto | 5A Auto | 5A Auto | |
| Urms [V] | 42.000 | 35.557 | 35.446 | | | | 37.667 |
| Irms [A] | 0.5169 | 3.5401 | 3.9951 | | | | 2.6841 |
| P [W] | 0.21 | 18.69 | 22.05 | | | | 40.95 |
| S [VA] | 21.71 | 125.88 | 141.61 | | | | 289.20 |
| Q [var] | 21.71 | -124.48 | 139.88 | | | | 37.11 |
| λ [] | 0.0097 | 0.1485 | 0.1557 | | | | 0.1416 |
| φ [°] | G89.44 | D81.46 | G81.04 | | | | 81.86 |
| fU [Hz] | 12.169 | 14.140 | 12.289 | | | | |
| fI [Hz] | Error | Error | Error | | | | |

Integ:Reset Time -----:---:---

Update 30(1sec) 2016/07/27 12:37:36

Abbildung 19: Messergebnis des Yokogawa WT500 bei $n=1495\text{min}^{-1}$

Das *Yokogawa WT500* ist daher für die im Rahmen dieser Arbeit durchzuführenden Messungen nur mit Einschränkungen geeignet, nicht alle nötigen Messszenarien lassen sich mit dem Gerät durchführen. Deshalb wird das *WT500* nicht für die Leistungsmessungen am Vollumrichter und der DGASM verwendet. Aufgrund der Lieferzeit des besser geeigneten Geräts, wurden die Messungen zur Bestimmung der Ersatzparameter und der Belastungsversuch noch mit dem *WT500* durchgeführt.

4.4.5 Technologie und Einsatzmöglichkeiten des *HBM Gen3i*⁴

Stattdessen wurde das neue Messgerät *HBM Gen3i* angeschafft. Das *Gen3i* ist Teil der Produktserie Genesis der Firma HBM. Das *HBM Gen3i* ist anders als das *Yokogawa WT500* kein Leistungsanalysator per se, sondern ist als Transientenrecorder vielfältig einsetzbar. Als Transientenrecorder ist das *Gen3i* in der Lage, große Mengen an Messdaten mit hoher Abtastrate aufzunehmen und zu speichern. Das macht eine nachträgliche Verarbeitung und Visualisierung der aufgenommenen Messung möglich. Gleichzeitig ist das *Gen3i* speziell für die Leistungsanalyse an elektrischen Maschinen entworfen worden.

⁴ Im Folgenden vgl. Handbücher [16] und [17]

4.4.5.1 Die Plattform

Herzstück des Geräts sind 3 Schnittstellen-Slots, die mit verschiedenen Datenerfassungskarten bestückt werden können. Jede Eingangskarte beinhaltet dabei einen Analog-Digital-Wandler und einen digitalen Signalprozessor (kurz: DSP) zur Implementierung von Funktionen zur Filterung, intelligenten Triggerung und Datenerfassungsverwaltung. Das im Rahmen dieser Arbeit angeschaffte Gerät wurde mit zwei Analogeingangskarten mit jeweils 6 analogen Spannungseingängen ausgestattet. Ein dritter Slot bleibt unbenutzt und kann bei Bedarf nachgerüstet werden. Das System verfügt weiterhin über eine digitale Schnittstelle zur Verarbeitung von TTL-Signalen sowie über Schnittstellen zur Synchronisation und Kommunikation mit weiteren Geräten.

Verarbeitet werden die Messdaten von der hauseigenen Datenerfassungssoftware Perception, die auf einem integrierten voll funktionstüchtigen Windows-PC läuft. Die Datenspeicherung erfolgt auf einer SSD-Festplatte, um schnellstmögliche Speicherraten zu gewährleisten. Bedient wird das Gerät entweder über den integrierten Touchscreen oder aber über gängige Peripherie, die an diverse USB Ports angeschlossen werden kann. Über die Netzwerkkarte kann das System kabelgebunden über die RJ45-Buchsen oder kabellos über WIFI in ein Netzwerk eingebunden werden.

Auf der nachfolgenden Seite ist der Aufbau des *Gen3i* in Abbildung 20 übersichtlich dargestellt.

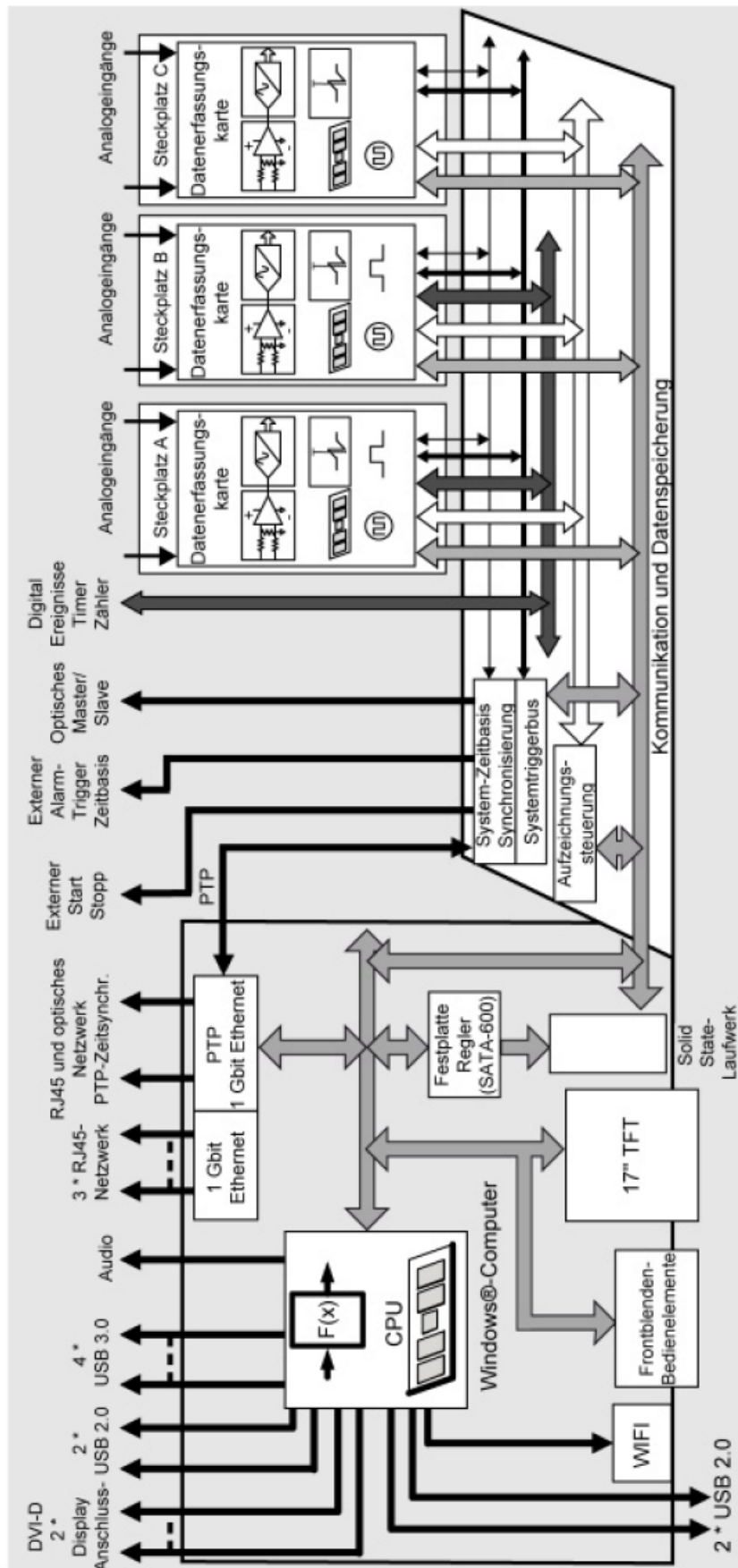


Abbildung 20: Blockschaltbild des tragbaren Gen3i Rekorders [16 S. 78]

4.4.5.2 Vorhandene Analogeingangskarten

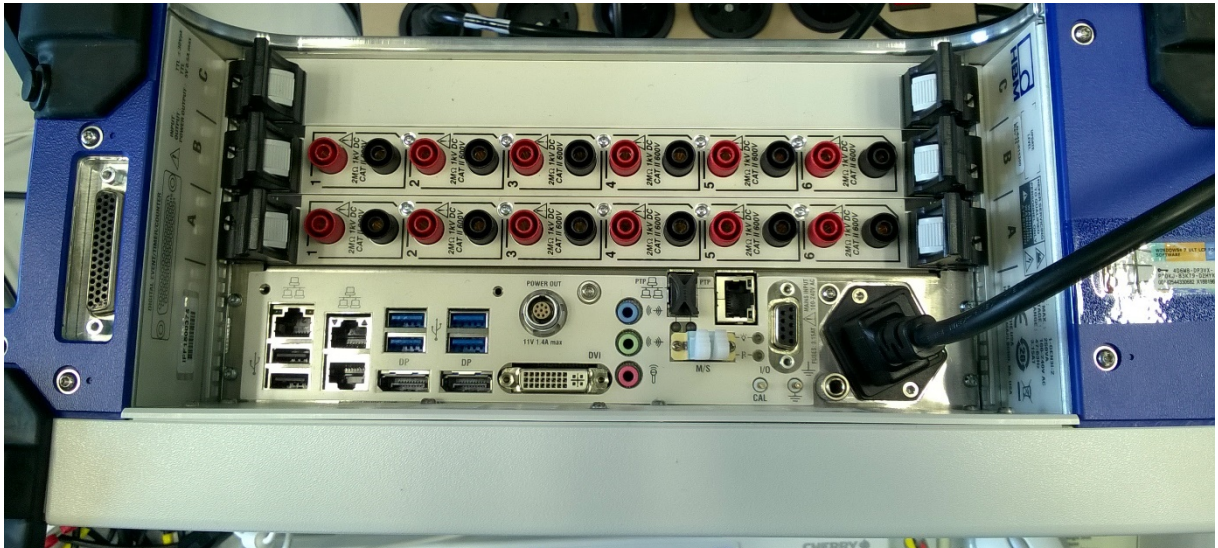


Abbildung 21: Messgerät Gen3i mit zwei Analogeingangskarten

Die beiden verbauten Analogeingangskarten des Geräts sind zwei isolierte 1-kV-Eingangskarten GN610. Eine Karte dieses Typs besitzt 6 analoge, differentielle Spannungskanäle. Die 600V RMS CAT II Isolierung ermöglicht es, das Gerät direkt an Eingangsspannungen von ± 20 mV bis ± 1 kV Amplitude anzuschließen. Das Eingangssignal kann mit analogen Eingangsverstärkern und analogen Anti-Aliasing-Filtern und weiteren vom Benutzer selbst definierbaren digitalen Filtern aufbereitet werden. Die AD-Umsetzung erfolgt durch einen 18-Bit-AD-Konverter mit einer Samplerate von bis zu 2 MS/s.

Mithilfe der frei programmierbaren integrierten DSP lassen sich weitere Echtzeitberechnungen durchführen. Programmiert werden diese Echtzeitberechnungen in der Perception-Umgebung. Der derzeitige Versionsstand dieser Software unterstützt nur einfache Berechnungen, z.B. Multiplikation oder Effektivwertberechnung. Zukünftige Versionen werden allerdings weit komplexere Echtzeitberechnungen unterstützen, wie z.B. eine dq0-Transformation.

Jede der Eingangskarten arbeitet eigenständig und kann durch das Slot-System jederzeit ausgewechselt werden („Plug & Play“).

4.4.5.3 Datenerfassungssoftware Perception

Die vorinstallierte Software *Perception* stellt die zentrale Bediensoftware des *Gen3i* dar. Sie übernimmt automatisiert die vollständige Steuerung und Konfiguration des Geräts und der Eingangskarten anhand der Eingaben des Benutzers. *Perception* wird geräteübergreifend eingesetzt, erkennt aber eigenständig, welche Hardware zur Verfügung steht, sodass hier keine weitere Konfiguration nötig ist.

Perception ermöglicht unter anderem die Aufzeichnung und Speicherverwaltung von Messdaten, Echtzeit- sowie beliebige nachträgliche Berechnungen und die Anzeige von Messinstrumenten, Wertetabellen und Oszilloskopbildern. Auch die Erfassungsmodi können mithilfe von *Perception* frei gesteuert werden: Fortlaufende Messungen über einen langen Zeitraum sind ebenso möglich wie getriggerte Einzelmessungen.

Um alle Einstellmöglichkeiten übersichtlich zu halten, funktioniert die Software auf der Basis von sogenannten Arbeitsblättern, die je nach Anwendungsbedarf in die Messumgebung geladen werden. Mithilfe dieser Arbeitsblätter können entweder mit automatisierten Prozessen einfache Konfigurationen erstellt, oder aber in einer tieferen Ebene selbstständig gewählt werden. Jede erstellte Messkonfiguration kann dabei in ihrem derzeitigen Zustand gespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt erneut ins Programm geladen werden.

Im Folgenden werden nun die wichtigsten Arbeitsblätter knapp beschrieben. Den gesamten Funktionsumfang zu erläutern würde an dieser Stelle den Rahmen sprengen, deshalb sei für weiterführende Informationen auf das Handbuch [17] verwiesen.

eDrive-Konfiguration: Dieses Arbeitsblatt erlaubt eine automatisierte Hardwarekonfiguration nach vorgegebenen Schemata mithilfe einer übersichtlichen Benutzeroberfläche. Die *eDrive*-Umgebung ist dabei optimiert für den Antriebsstrang eines Fahrzeugs, es lassen sich jedoch Messungen in zwei beliebigen Wechselstromsystemen einrichten, sowie die mechanischen Sensoren an der Maschine über die digitale Schnittstelle einbinden. Anschließend können die eingesetzten Sensoren, die Abtastrate und Filter ausgewählt werden.

Wurden die gewünschten Einstellungen getroffen, können Formeln und Graphen erzeugt werden, um die wichtigsten elektrischen Größen zu berechnen und darzustellen.

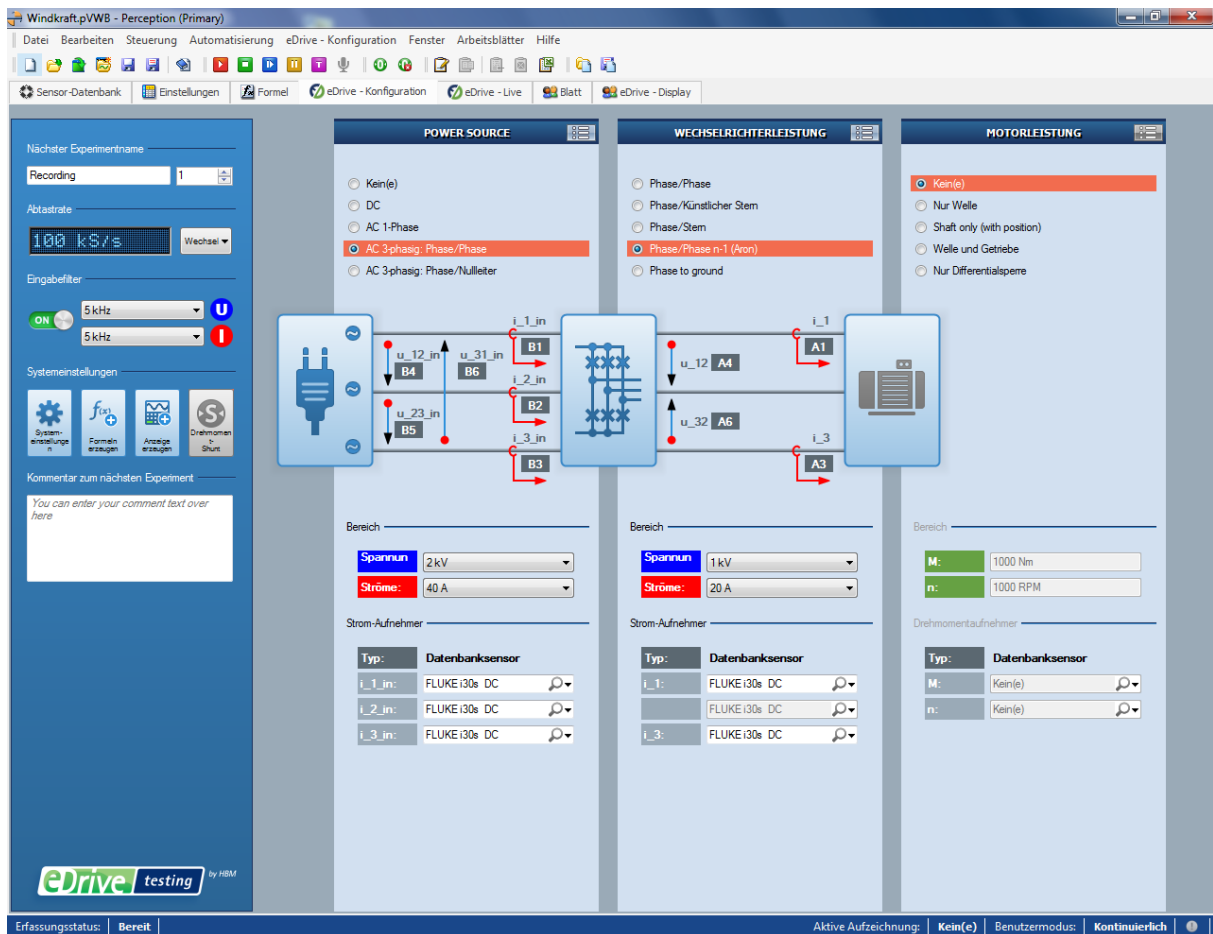


Abbildung 22: Arbeitsblatt eDrive Konfiguration der Software Perception

eDrive-Live: Hier werden Echtzeitmessanzeigen für Strom-, Spannungs- und Leistungswerte angezeigt. Es können weitere Echtzeitmessgeräte und -graphen abgebildet werden. Ebenso die Live-Anzeige des Signalspektrums mithilfe einer Fast-Fourier-Transformation (kurz: FFT) möglich.

Formeln: Formeln werden auf die gemessenen Werte angewandt und es können beliebige Variablen berechnet werden. Die Berechnung erfolgt nicht in Echtzeit, sondern geschieht nachträglich zur Messung, sodass in den Formeln berechnete Werte um einige Sekunden zeitverzögert ermittelt werden. Die Eingabe der Variablen, der Formeln und der zugehörigen Einheiten wird über das Arbeitsblatt *Formeln* auf Textebene getätigt. Der mitgelieferte Formelassistent greift dabei auf eine Formeldatenbank zu, mit deren Hilfe komplexere Berechnungen durch einfache Funktionsaufrufe durchgeführt werden können.

Sensor-Datenbank: Das Arbeitsblatt *Sensor-Datenbank* gibt Zugriff auf die Datenbank, in der vorgefertigte Sensoren einzusehen sind und eigene benutzerdefinierte Sensoren angelegt und verwaltet werden können. Die Sensoren decken dabei eine große Bandbreite an möglichen

Sensoren ab. So können Stromzangen, Spannungstastköpfe, Drehmomentsensoren, Messbrücken und weitere Sensoren angelegt werden, die dann für die direkte Umrechnung der Eingangssignale verwendet werden.

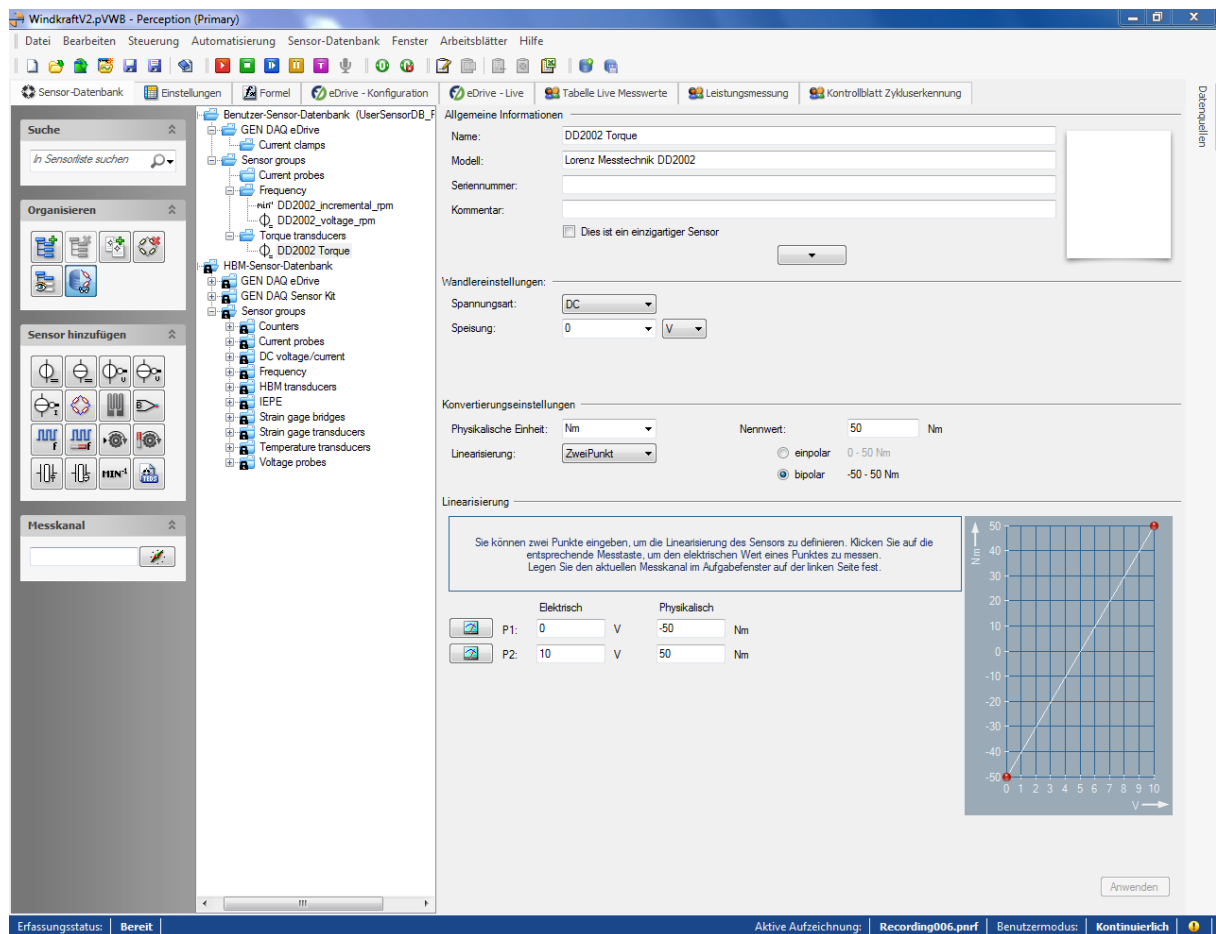


Abbildung 23: Arbeitsblatt Sensor-Datenbank der Software Perception

Einstellungen: Zuletzt sei das Arbeitsblatt *Einstellungen* erwähnt. Dieses Arbeitsblatt bietet dem Benutzer die Möglichkeit das Messsystem frei und ohne anwendungsspezifische Vorgaben zu parametrieren. Hier können alle Einstellungen zur Signalerfassung und -aufbereitung sowie zum gewünschten Aufnahmemodus – Single Sweep, Multi Sweep, kontinuierliche Messwerterfassung – getroffen werden. Das Arbeitsblatt *Einstellungen* ist sehr umfangreich und verzichtet auf Schaubilder wie in der *eDrive-Konfiguration*, geht in seiner Tiefe der Einstellmöglichkeiten aber sehr viel weiter als die automatisierte Konfiguration über die *eDrive-Oberfläche*.

4.4.6 Inbetriebnahme und Einrichtung

Für die Messungen in dieser Bachelorarbeit wurde eine eigene Messumgebung erstellt, die als *Virtual Workbench* „Windkraft.pVWB“ jederzeit geladen und verwendet werden kann. Folgende Messaufgaben sollte diese Messumgebung erfüllen können:

- Messung der elektrischen Stator- oder Netzleistung
- Messung der elektrischen Rotorleistung
- Messung der mechanischen Leistung der Welle

Zur Bestimmung der mechanischen Leistung müssen das Drehmoment und die Drehzahl gemessen werden. Dazu werden die analogen BNC-Ausgänge der Drehmomentmesswelle *DD-2002* genutzt. Diese Anschlüsse lassen sich ohne große Umstände an jedem Versuchsstand einfach mit einem Adapter auf die 4mm-Bananenbuchsen legen. Nachteil dieser Lösung ist die geringe Taktung dieser Signale. Während das Drehmomentsignal alle $\tau_M = 5 \text{ ms}$ aktualisiert wird, wird das Drehzahlsignal nur alle $\tau_n = 10 \text{ ms}$ aktualisiert. Diese Signale rühren von der Mittelungsdauer der digitalen Anzeigen her, die mit diesen Werten bereits auf den kleinstmöglichen Wert eingestellt ist. Da bei der Leistungsflussanalyse allerdings nur stationäre Betriebspunkte betrachtet werden, fällt dieser Umstand nicht allzu schwer ins Gewicht. Sollen für spätere Anwendungen auch dynamische Vorgänge betrachtet werden, so kann auf das ungefilterte Sensorsignal am 15-poligen SUB-D-Anschluss an der Rückseite des Geräts abgegriffen werden.

Es werden also analoge Eingangskanäle für die Messung der Rotor- und Stator- bzw. Netzgrößen benötigt und weitere zwei Kanäle für die Messung von Drehmoment- und Drehzahlsignal. Da am Messgerät nur 12 Analogeingänge zur Verfügung stehen, wird im Statorkreis an allen drei Leitern gemessen und im Rotorkreis auf die Aron-Schaltung zurückgegriffen, um die zwei noch benötigten Eingänge einzusparen. Zu beachten ist hierbei, dass die automatisierte Formelerstellung der *eDrive-Konfiguration* der Leistungsberechnung für die Aron-Schaltung die Annahme zugrunde legt, dass die vermessene Maschine vollständig symmetrisch ist und sich kein Potential am Sternpunkt aufbaut. Messungen zeigen, dass der Rotorkreis zwar annähernd, aber nicht vollständig symmetrisch ist. Da die Rotorleistung möglichst genau bestimmt werden soll und zudem die Einzelleistungen jeder Phase für die Betrachtung nicht relevant sind, darf nicht vergessen werden, die Leistungsberechnung abzuändern. Anhand dieser Überlegungen kann nun die Messumgebung erstellt werden.

Zunächst müssen die eingesetzten Sensoren in die *Sensor-Datenbank* eingepflegt werden. Die eingesetzten Stromzangen vom Typ *Fluke i30s DC* sind bereits in der Standard-Bibliothek enthalten, es müssen also lediglich die Sensoren *DD2002_voltage_torque* für das Drehmoment und *DD2002_voltage_rpm* für die Drehzahl erstellt werden. Die für die Linearisierung der Sensoren notwendigen Messpunkte werden mithilfe des Messgeräts selbst ausgemessen. Sind alle benutzten Sensoren vorhanden, kann nun die Messumgebung konfiguriert werden.

Die erste Anlaufstelle dafür ist das Arbeitsblatt *eDrive-Konfiguration*. Das erste Dreileitersystem wird mithilfe aller drei Leiterströme und drei Phase-Phase-Spannungen vermessen. Am zweiten Dreileitersystem wird mit der Aron-Schaltung gemessen. Die Eingänge für Drehmoment und Drehzahl lassen sich hier nicht belegen. Als Eingangsfiler wird ein 5-kHz-Tiefpass gewählt, da dies die Frequenz darstellt, mit der auch die IGBTs angesteuert werden. Das Signal wird mit 25 kS/s mit der kleinstmöglichen Sample-Rate abgetastet, um Rechenzeiten bei der Erstellung der nachträglichen Berechnungen möglichst kurz zu halten. Dann wird mithilfe der Funktion *Formeln erzeugen* das Grundgerüst an Formeln erstellt.

Im nächsten Schritt werden jedoch die übrigen zwei Eingänge im Arbeitsblatt *Einstellungen* belegt und ihnen die zuvor angelegten Sensoren für Drehmoment und Drehzahl zugeordnet. Zuletzt müssen die *Formeln* aufgerufen und dort die nachträglichen Berechnungen angepasst werden. Aufgrund des vorherigen Aufrufs der Funktion *Formeln erzeugen* ist der Großteil der Formeln hier bereits hinterlegt. Angepasst werden muss die Berechnung der Aron-Schaltung gemäß Kapitel 4.4.2. Es werden zudem Berechnungen für die mechanische Leistung, die Verlustleistung und den Wirkungsgrad eingepflegt.

Die Konfiguration der Perception-Software ist damit abgeschlossen und die Messungen können gestartet werden. Um die Messung jedoch umgehend auswerten zu können, werden vor Start der ersten Messung bereits die nötigen Graphen und Wertetabellen erstellt. Dafür werden im Projekt vier neue Reiter angelegt:

- *Tabelle Live Messwerte* ist eine Wertetabelle mit den in Echtzeit berechneten Effektivwerten aller Eingangskanäle.
- *Leistungsfluss ASM* stellt sämtliche relevante Leistungen sowie den berechneten Wirkungsgrad der ASM dar. Da es sich hierbei um nachträglich berechnete Werte

handelt, ist diese Ansicht kein Live-Display und wird erst nach einiger Verzögerung zur Live-Messung aktualisiert.

- *Leistungsfluss Gesamt* stellt sämtliche relevante Leistungen sowie den berechneten Wirkungsgrad des gesamten Generatorsystems bis hin zum Netz dar. Auf die Leistungsmessung im Rotorkreis muss hier aufgrund fehlender Eingangskanäle verzichtet werden. Auch dieses Fenster arbeitet mit nachträglich berechneten Größen.
- *Kontrollblatt Zykluserkennung* dient zur Überprüfung der Korrektheit der Zykluserkennung. Es werden der Rotorstrom und die Zykluserkennung übereinander geplottet, sodass eine etwaige fehlerhafte Zykluserkennung vom Benutzer leicht zu erkennen ist.

Die erstellte *Virtual Workbench* kann nun für alle durchgeführten Versuche verwendet werden, ohne dass die Software angepasst werden muss. Zwei unterschiedliche Messaufbauten werden unterstützt. Nach Anschluss der Messsignale gemäß unten stehenden Belegungsplänen und Abgleich der Stromzangen, können über die Buttons zur Aufnahmesteuerung *Start/Pause/Stop* nun Messdaten aufgezeichnet werden.

Variante a: Leistungsflussmessung an der ASM

| Eingangskarte | Kanal 1 | Kanal 2 | Kanal 3 | Kanal 4 | Kanal 5 | Kanal 6 |
|------------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| A – Rotor/mech. | $i_{1,Rotor}$ | u_{rpm} | $i_{3,Rotor}$ | $u_{12,Rotor}$ | u_{torque} | $u_{32,Rotor}$ |
| B – Stator | $i_{1,Stator}$ | $i_{2,Stator}$ | $i_{3,Stator}$ | $u_{12,Stator}$ | $u_{23,Stator}$ | $u_{31,Stator}$ |

Tabelle 2: Belegungsplan Gen3i für die Leistungsflussmessung an der ASM

Variante b: Leistungsflussmessung am gesamten Generatorsystem

| Eingangskarte | Kanal 1 | Kanal 2 | Kanal 3 | Kanal 4 | Kanal 5 | Kanal 6 |
|-------------------------|----------------|--------------|----------------|-----------------|---------------|-----------------|
| A – Stator/mech. | $i_{1,Stator}$ | u_{rpm} | $i_{3,Stator}$ | $u_{12,Stator}$ | u_{torque} | $u_{32,Stator}$ |
| B – Netz | $i_{1,Netz}$ | $i_{2,Netz}$ | $i_{3,Netz}$ | $u_{12,Netz}$ | $u_{23,Netz}$ | $u_{31,Netz}$ |

Tabelle 3: Belegungsplan Gen3i für die Leistungsflussmessung am gesamten Generatorsystem

5 Messungen und Auswertung

In diesem Kapitel werden diverse Messungen durchgeführt, deren Ergebnisse in Graphen zusammengefasst werden. Um die Lesbarkeit dieser Arbeit zu wahren sind die gemessenen Rohdaten im Kapitel VII aufgeführt. Im Text wird auf die entsprechende Tabelle verwiesen. Ein Vergleich der in diesem Kapitel aufgenommenen Messwerte mit den Ergebnissen der bestehenden Matlab-Simulationen ist wenig hilfreich, da die in den Simulationen ermittelten Wirkungsgrade wesentlich zu hoch ausfallen. Bei Simulation an der ASM ohne Regelung ergeben sich bereits Wirkungsgrade von über $\eta_{ASM,Simulation} = 0,9$, was nur wenig mit der Realität übereinstimmt. Auf einen direkten Vergleich wird deshalb verzichtet. Der Vollständigkeit halber sind die Simulationsergebnisse dennoch im Anhang in Kapitel VI aufgeführt.

5.1 Bestimmung der Ersatzparameter der ASM

5.1.1 Bestimmung des Wicklungswiderstands

Zu allererst soll der ohmsche Wicklungswiderstand der Ständerwicklung gemessen werden. Dazu wird der Anschlusskasten der Maschine geöffnet und die ASM von den externen Anschlüssen getrennt. Anschließend wird an allen drei Wicklungen U, V und W einzeln der Widerstand gemessen. Da diese Widerstände sehr klein sind, fallen Übergangswiderstände umso stärker ins Gewicht. Daher wurde in einem zweiten Messschritt der direkte Übergangswiderstand zwischen den benutzten Messspitzen bestimmt und bereits in die Messung mit einbezogen.⁵

Die identischen Wicklungswiderstände geben Aufschluss über die Symmetrie der Maschine. Die bei Raumtemperatur gemessenen Widerstände müssen nun noch umgerechnet werden, um die Ständerwiderstände bei Betriebstemperatur zu ermitteln. Als Betriebstemperatur der Wicklung wird eine Temperatur von $T = 75^{\circ}C$ angenommen. Das deckt sich mit dem vom Maschinenhersteller VEM durchgeführten Erwärmungslauf, dessen Ergebnisse im Prüfprotokoll der vermessenen Maschine zu finden sind.

⁵ Messergebnisse siehe Tabelle 10, S.80

$$R_1(T = 75 \text{ }^\circ\text{C}) = R_{1,T_0} \cdot (1 + \alpha_{Cu}(T - T_0)) \quad (5.1-1)$$

$$\text{mit } R_{1,T_0} = 0,78 \text{ } \Omega; \alpha_{Cu} = 3,93 \cdot 10^{-3}; T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C} \quad (5.1-2)$$

$$R_1 = 0,95 \text{ } \Omega \quad (5.1-3)$$

5.1.2 Leerlaufversuch

Um die Statorparameter der ASM zu bestimmen wird die Maschine im Leerlauf, also ohne Belastung bei annähernder Leerlaufdrehzahl, vermessen.

$$n = n_0 = 1500 \text{ min}^{-1} \Rightarrow s = 0 \quad (5.1-4)$$

Betrachtet man das einphasige ESB der ASM Abbildung 5, so ergibt sich für den Rotorwiderstand:

$$\frac{R'_{2g}}{s} \rightarrow \infty \text{ mit } s \rightarrow 0 \quad (5.1-5)$$

Die Rotorseite hat somit im Leerlauf nahezu keinen Einfluss auf die elektrischen Größen.

Die Streuinduktivität der Statorseite wird im Leerlauf vernachlässigt, da gilt:

$$L_{\sigma 1} \ll L_{h1} \quad (5.1-6)$$

Die Maschine ist im Stern geschaltet, weshalb die Spannung über einer Wicklung die Strangspannung ist.

$$U_{10} = U_{1N,0} \quad (5.1-7)$$

Werden alle oben angeführten Punkte und Zusammenhänge berücksichtigt, so lässt sich für den Leerlauf ein weiter vereinfachtes ESB aufstellen:

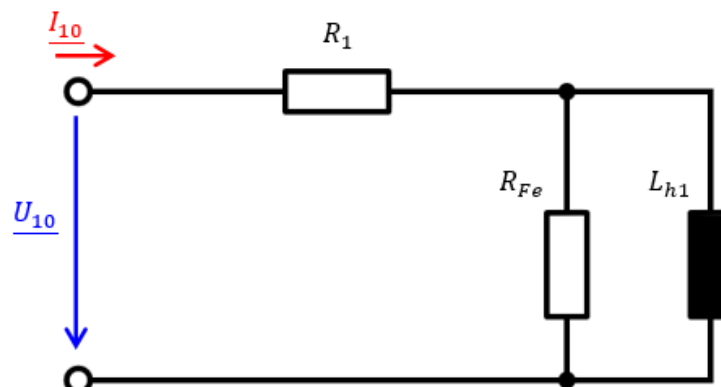


Abbildung 24: Einphasiges ESB der ASM im Leerlauf

Die Leerlaufmessung wird dabei analog zur Aufgabenstellung [18] des Laborpraktikums zur ASM durchgeführt. Die Maschine wird zunächst ohne Belastung bei Nennspannung betrieben. Die Spannung wird dann mithilfe eines stufenlos einstellbaren Transformator schrittweise verringert, bis der Schlupf etwa 20% des Nennschlupfs beträgt. Dabei werden die Leerlaufstrangspannung U_{10} , der Leerlaufstrom I_{10} und die Leerlaufleistung P_{10} der Phase L1 gemessen.⁶

Hierbei zu beachten ist, dass sämtliche Leistungen nur für eine Phase betrachtet werden. Die Maschine wird als symmetrisch angenommen, sodass die Gesamtleistung durch die Verdreifachung der Einzelleistungen bestimmt werden kann.

Die Verlustleistung am ohmschen Wicklungswiderstand wird berechnet nach:

$$P_{Cu1} = I_{10} \cdot R_1 \quad (5.1-8)$$

Die restliche verlorene Wirkleistung an der Maschine entfällt auf die Reibungs- und die Eisenverluste.

$$P_{Fe} + P_R = P_{10} - P_{Cu1} \quad (5.1-9)$$

Um die Verluste getrennt voneinander zu ermitteln, wird in Abbildung 25 die Leistung als Funktion der quadrierten Strangspannung aufgetragen. Anschließend werden die Messdaten durch eine Gerade interpoliert.

⁶ Messergebnisse siehe Tabelle 11, S. 79

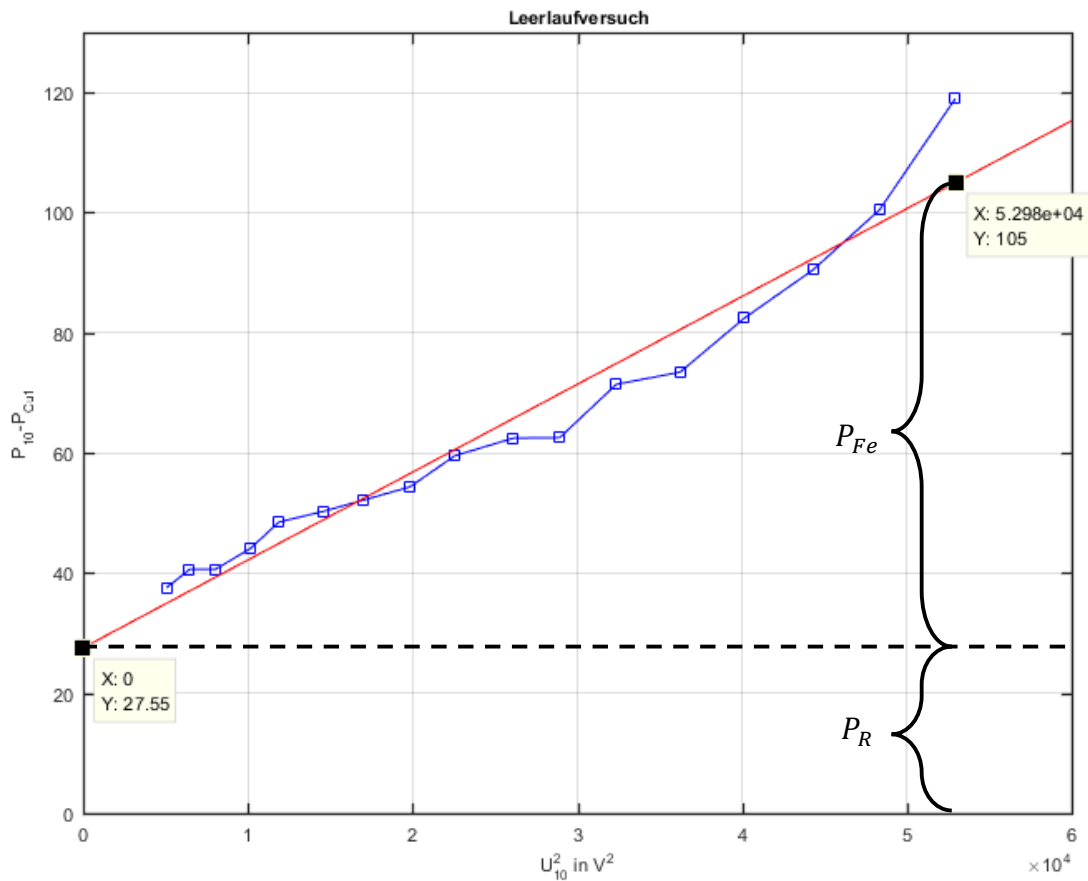


Abbildung 25: Identifikation der Reibungs- und der Eisenverluste

■ Messdaten $P_{10} - P_{Cu1} = f(U_{10}^2)$

■ Interpolierte Gerade $P'_{Fe,R} = 1,46 \frac{mW}{V^2} \cdot U_{10}^2 + 27,55 W$

Am Schnittpunkt der interpolierten Gerade mit der y-Achse lassen sich die Reibungsverluste P_R ablesen.

$$P_R = 27,55 W \Rightarrow P_{R,ges} = 3 \cdot P_R = 82,65 W \quad (5.1-10)$$

Nun werden die Eisenverluste der Maschine bei Nennspannung ermittelt.

$$P'_{Fe,R} = 104,88 W \text{ mit } U_{10} = 230 V \quad (5.1-11)$$

$$P_{Fe} = 104,88 W - 27,55 W = 77,33 W \quad (5.1-12)$$

Für den Eisenwiderstand R_{Fe} ergibt sich:

$$R_{Fe} = \frac{U_{h1}^2}{P_{Fe}} \quad (5.1-13)$$

$$\text{mit } U_{h1} = U_{10} - U_{R1} = U_{10} - I_{10}R_1 = 223,83 \text{ V} \quad (5.1-14)$$

$$R_{Fe} = 647,87 \Omega \quad (5.1-15)$$

Ausgehend von den Eisenverlusten können nun auch Impedanz und Induktivität der Hauptwicklung berechnet werden.

$$X_{1h} = \frac{U_{h1}}{I_{m1}} \quad (5.1-16)$$

$$\text{mit } I_{m1} = \sqrt{(I_{10}^2 - I_{Fe}^2)} \text{ und } I_{Fe} = \frac{U_{h1}}{R_{Fe}} \quad (5.1-17)$$

$$X_{1h} = 34,5 \Omega \Rightarrow L_{h1} = \frac{X_{1h}}{\omega} = 109,81 \text{ mH} \quad (5.1-18)$$

5.1.3 Kurzschlussversuch

Um die Rotorparameter zu bestimmen, wird die Maschine im Stillstand vermessen.

$$n = 0 \text{ min}^{-1} \Rightarrow s = 1 \quad (5.1-19)$$

Dadurch ergibt sich für den ohmschen Gesamtwiderstand des Rotors:

$$\frac{R'_{2g}}{s} = R'_{2g} \quad (5.1-20)$$

Für die Größenverhältnisse der Ersatzparameter aus dem ESB in Abbildung 5 folgt im Stillstand damit:

$$L_{h1} \gg L_{\sigma 1}, L_{\sigma 2} \quad (5.1-21)$$

$$R_{Fe} \gg R_1, R'_{2g} \quad (5.1-22)$$

Die Hauptinduktivität und der Eisenwiderstand fallen während des Stillstands elektrisch kaum ins Gewicht, da sie im Vergleich zu den anderen Ersatzparametern beinahe als Unterbrechungen wirken. Sie werden für den Kurzschlussversuch vernachlässigt. Für den Stillstand lässt sich ein weiter vereinfachtes ESB aufstellen.

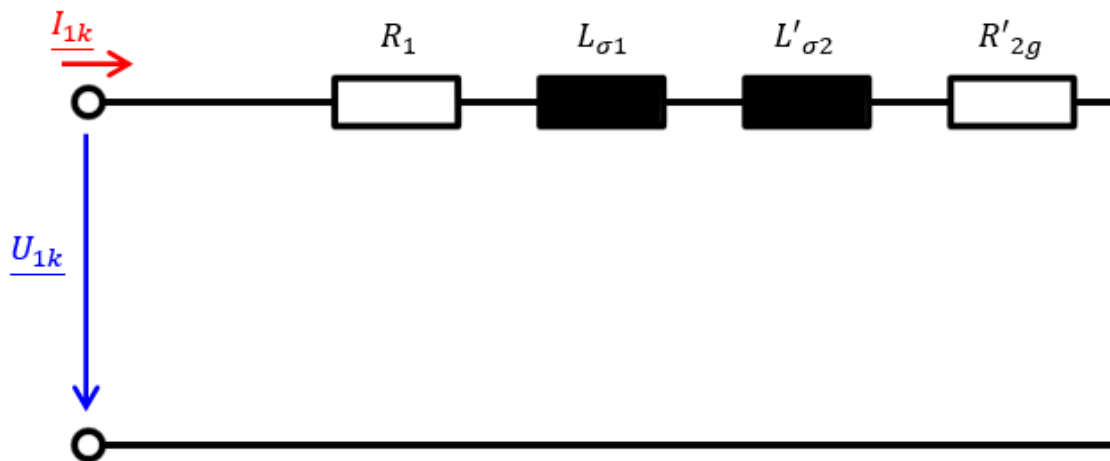


Abbildung 26: Einphasiges ESB der ASM im Stillstand

Auch der Kurzschlussversuch wird nach [18] durchgeführt. Zunächst wird der minimale Ständerstrom ermittelt, bei dem die ASM nicht mehr selbstständig anläuft. Anschließend wird ausgehend von diesem Strom die Ständerspannung erhöht, bis der Strom etwa das 1,2-fache des Nennstroms beträgt. Es werden Kurzschlussstrangspannung U_{1k} , Kurzschlussleiterstrom I_{1k} und Kurzschlussleistung P_{1k} des Leiters L1 gemessen.⁷

Da im Stillstand bei Nennspannung sehr hohe Ströme fließen und so die Wicklungen beschädigt würden, werden die Messdaten zunächst aufgetragen und dann linear interpoliert. Anhand der Ausgleichsgerade können dann Kurzschlussstrom I_{1k230} und Kurzschlussleistung P_{1k230} bei Nennspannung ermittelt werden.

Zunächst wird in Abbildung 27 die Kurzschlussleistung als Funktion des Kurzschlussstroms aufgetragen und die Steigung der Ausgleichsgeraden durch den Ursprung ermittelt.

⁷ Messergebnisse siehe Tabelle 12, S.80

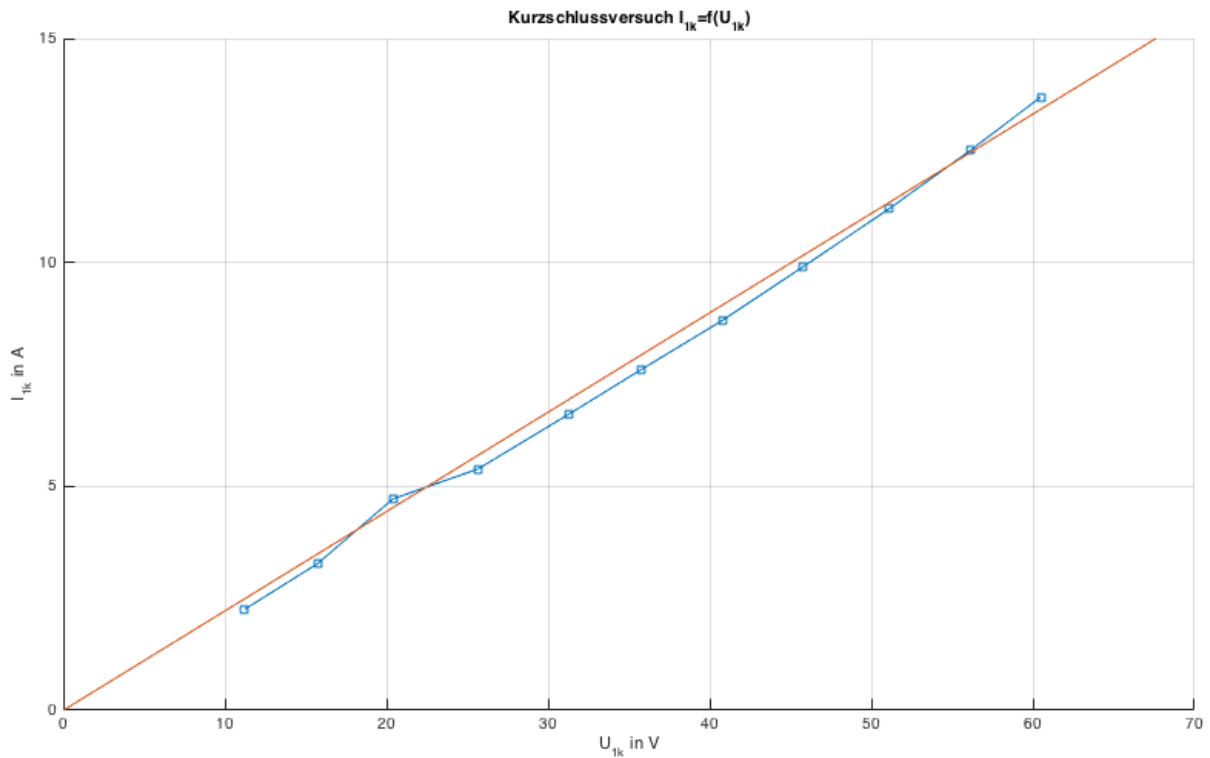


Abbildung 27: Linearisierung des Kurzschlussstroms $I_{1k}=f(U_{1k})$

■ Messdaten $I_{1k} = f(U_{1k})$

■ Interpolierte Gerade $I_{1k} = 221.87 \frac{mA}{V} \cdot U_{1k}$

Für den Kurzschlussstrom bei Nennspannung ergibt sich damit:

$$I_{1k230} = 221.87 \frac{mA}{V} \cdot 230 V = 51,029 A \quad (5.1-23)$$

Im nächsten Schritt wird mithilfe des gleichen Verfahrens in Abbildung 28 die Kurzschlussleistung als Funktion des quadrierten Kurzschlussstroms linearisiert.

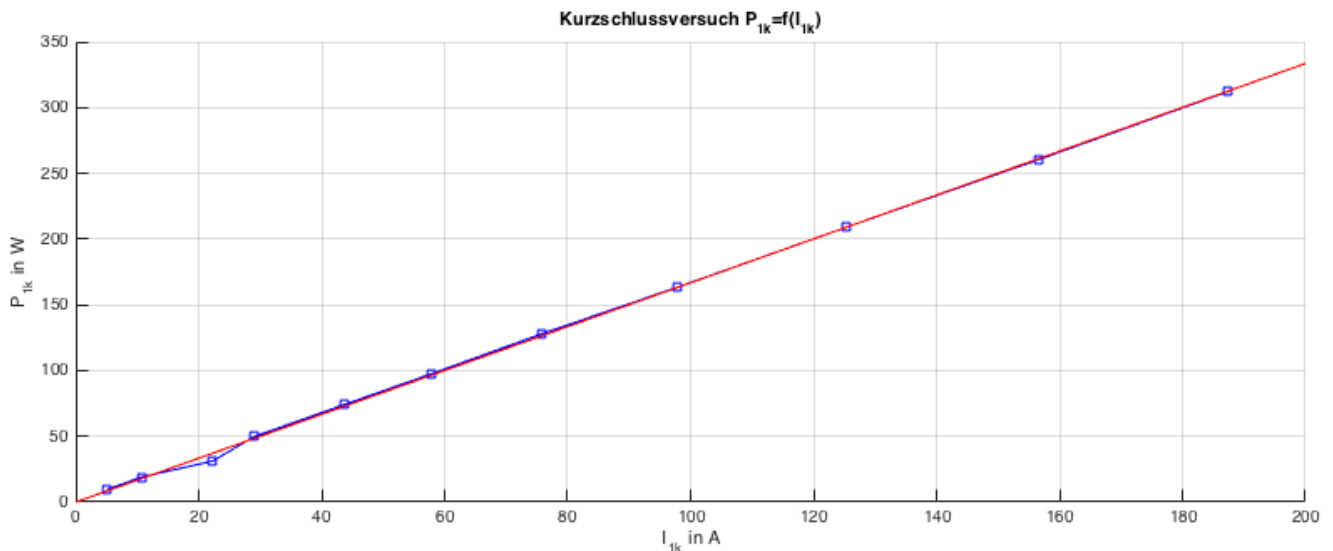


Abbildung 28: Linearisierung der Kurzschlussleistung $P_{1k} = f(I_{1k}^2)$

■ Messdaten $P_{1k} = f(I_{1k}^2)$

■ Interpolierte Gerade $P'_{1k} = 1,668 \frac{W}{A^2} \cdot I_{1k}^2$

Anhand der Linearisierung und des Ergebnisses für I_{1k230} (5.1-23) kann die Kurzschlussleistung bei Nennspannung berechnet werden:

$$P_{1k230} = 1,668 \frac{W}{A^2} \cdot (51,029 A)^2 = 4342,37 kW \quad (5.1-24)$$

Nun lassen sich die noch unbekanntenen Ersatzparameter des ESB Abbildung 26 bestimmen.

Für den rotorseitigen Gesamtwiderstand R'_{2g} gilt:

$$R'_{2g} = \frac{P_{1k230}}{I_{1k230}^2} - R_1 = 0,7186 \Omega \quad (5.1-25)$$

Weiterhin lässt sich der Gesamtblindwiderstand X_{1k} berechnen.

$$X_{1k} = X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2} = \sqrt{Z_{1k}^2 - (R'_{2g} + R_1)^2} \quad (5.1-26)$$

$$\text{mit } Z_{1k} = \frac{230 V}{I_{1k230}} \quad (5.1-27)$$

$$X_{1k} = 4.1874 \Omega \quad (5.1-28)$$

Es kann angenommen werden, dass die Streuinduktivitäten in etwa gleich groß sind. Damit ergibt sich:

$$X_{\sigma 1} = X'_{\sigma 2} = \frac{1}{2} \cdot X_{1k} = 2.0937 \Omega \quad (5.1-29)$$

$$L_{\sigma 1} = L'_{\sigma 2} = \frac{X_{\sigma 1}}{\omega} = 6,6645 \text{mH} \quad (5.1-30)$$

5.1.4 Zusammenfassung der Messungen

| Ersatzparameter | Ermittelte Werte | In [19] bestimmte Werte | Werte aus dem Datenblatt |
|-----------------|------------------|-------------------------|--------------------------|
| R_1 | 0,95 Ω | 1,00 Ω | 1,0446 Ω |
| R_{Fe} | 647,87 Ω | 555 Ω | - |
| R'_{2g} | 0,72 Ω | 0,67 Ω | 0,757 Ω |
| L_{h1} | 109,81 mH | 108,2 mH | 125,7 mH |
| $L_{\sigma 1}$ | 6,66 mH | 6,58 mH | 4,12 mH |
| $L'_{\sigma 2}$ | 6,66 mH | 6,58 mH | 5,79 mH |

Tabelle 4: Übersicht der bestimmten Ersatzparameter der ASM

Verglichen mit den Werten aus dem Datenblatt zeigen die hier bestimmten Ersatzparameter leichte Abweichungen. Im Prüfprotokoll sind jedoch keine Hinweise darauf vermerkt, wie diese Daten bestimmt wurden, weswegen sich die Angaben des Herstellers nur schwer nachvollziehen lassen. Vergleicht man die in dieser Arbeit bestimmten Ersatzparametern mit der in der Vorgängerarbeit [19] bestimmten Werten, so sind diese sehr ähnlich. Die Abweichungen liegen alle im Rahmen der üblichen Messabweichungen. Bemerkenswert ist jedoch, dass die in [19] bestimmten Leerlaufverluste sehr viel höher ausfielen als die hier gemessenen.

$$P_R = 3 \cdot 27,55 \text{ W} = 82,65 \text{ W} \ll P_{R,Vorgänger} = 210,12 \text{ W} \quad (5.1-31)$$

$$P_{Fe} = 3 \cdot 77,33 \text{ W} = 231,99 \text{ W} < P_{Fe,Vorgänger} = 272 \text{ W} \quad (5.1-32)$$

Während die Eisenverluste um etwa 15% abweichen, ist vor allem die Abweichung der Reibungsverluste von etwa 60% nicht mehr durch generelle Messungenauigkeiten zu erklären.

Eine mögliche Erklärung liegt in der benötigten Einlaufzeit der fettgeschmierten Wälzlager innerhalb der Maschine. Während dieser Einlaufzeit befindet sich noch überschüssiges Fett in den Lagern, das je nach überschüssiger Schmiermittelmenge die Lagerreibung und die Reibungsverluste erheblich erhöhen kann [20 S. 160].

Bei der Vermessung der neuen, baugleichen ASM für den geplanten zweiten Versuchsstand ließe sich diese Vermutung überprüfen, indem an der Maschine nach einiger Laufzeit erneut die Reibungsverluste bestimmt würden.

5.2 Leistungsmessungen und Wirkungsgradanalysen

In diesem Abschnitt wird die ASM und der Versuchsstand nun auf Wirkungsgrad und Leistungsfluss untersucht. Um die gemessenen Wirkungsgrade einordnen zu können, wird im Voraus der theoretische Nennwirkungsgrad der ASM laut Motortypenschild berechnet.

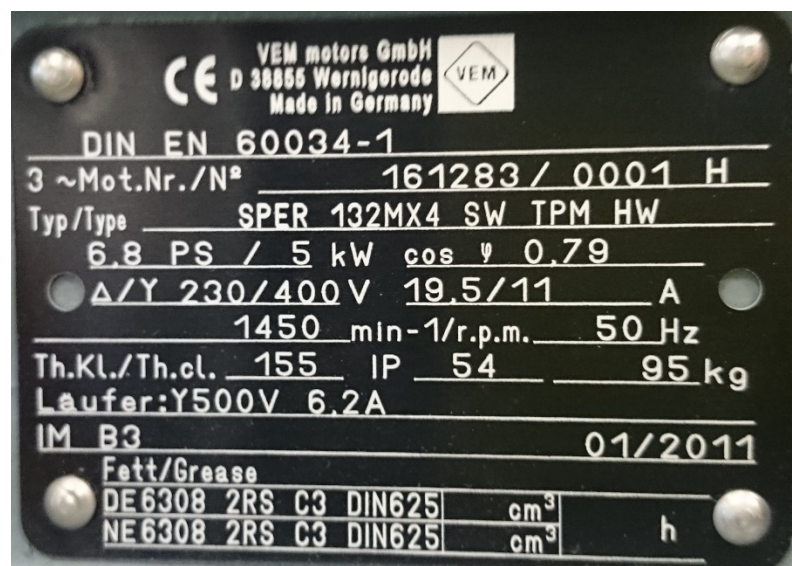


Abbildung 29: Typenschild der ASM am Versuchsstand "Windenergie-Netzeinspeisung"

Die Maschine ist im Stern verschaltet. Im Nennbetrieb der Maschine gelten folgende Angaben:

$$P_{mech} = 5 \text{ kW}; U_1 = 400 \text{ V}; I_1 = 11 \text{ A}; \cos \varphi = 0,79 \quad (5.2-1)$$

Der Nennwirkungsgrad der Maschine berechnet sich nach:

$$\eta_{Nenn} = \frac{P_{mech}}{\sqrt{3} \cdot U_1 I_1 \cos \varphi} = 0,83 \quad (5.2-2)$$

5.2.2 Belastungsversuch an der ASM

Die Maschine wird direkt am Netz betrieben und mit der Gleichstrommaschine zunehmend belastet, bis sie im Nennmoment fährt. Es werden die elektrische Wirkleistung P_1 , sowie das Drehmoment M und die Drehzahl n gemessen, aus denen die mechanische Leistung berechnet wird.⁸

Der Wirkungsgrad der Maschine wird berechnet und dann als Funktion der mechanischen Leistung bezogen auf die Nennleistung der Maschine aufgetragen.

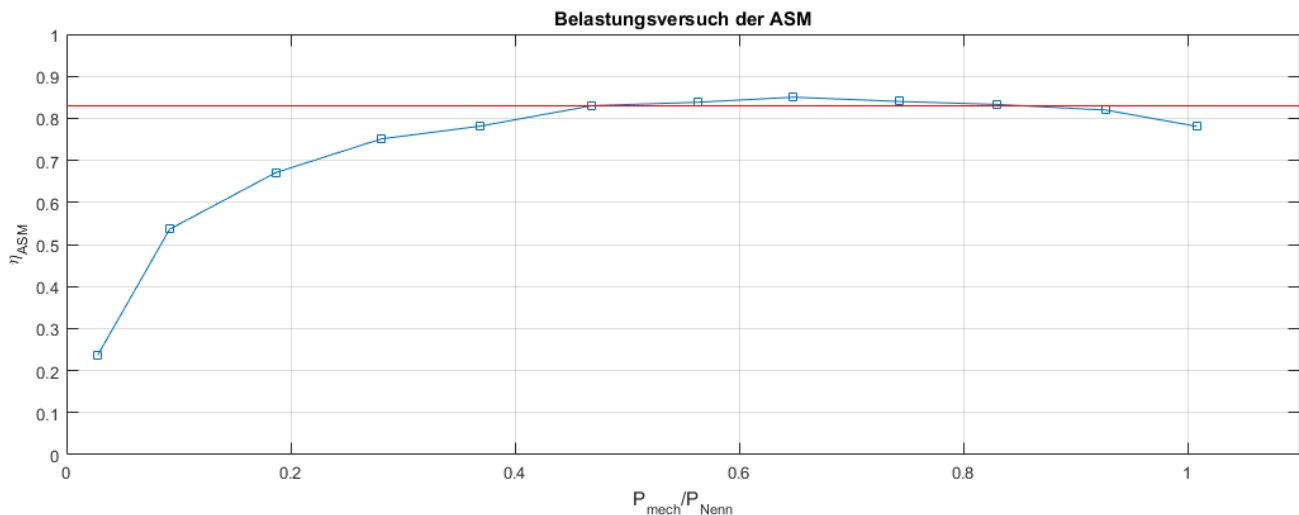


Abbildung 30: Ermittlung des Maschinenwirkungsgrads mithilfe des Belastungsversuchs

- Messdaten $\eta_{ASM} = f(P_{mech})$
- Nennwirkungsgrad $\eta_{Nenn} = 0,83$

Der gemessene Wirkungsgrad der Maschine stimmt mit dem Nennwirkungsgrad der Maschine (5.2-2) überein. Mit stärkerer Belastung der Maschine nähert sich der Wirkungsgrad dem Nennwirkungsgrad an. Grundsätzlich lässt sich sagen, dass die Maschine etwa bei halber mechanischen Nennbelastung ($P_{mech} \geq 0,5 \cdot P_{Nenn}$) den Nennwirkungsgrad erreicht. Eine weitere Steigerung der Belastung führt nicht zu einer Steigerung des Wirkungsgrades. Im Gegenteil: Mit steigender Belastung geht ein größerer Schlupf und damit höhere Rotorverluste einher. Ein dauerhafter Betrieb der Maschine weit über Nennbelastung ist auch aufgrund der insgesamt höheren Wärmeentwicklung nicht zu empfehlen. Die Maschine könnte Schaden nehmen, in jedem Fall sinkt ihre erwartete Lebensdauer.

⁸ Messergebnisse siehe Tabelle 13, S.80

Im niedrigeren Belastungsbereich ($P_{mech} < 0,4 \cdot P_{Nenn}$) fällt der Wirkungsgrad stark ab. Je näher die Maschine dem Leerlauf ist, desto mehr überwiegen die annähernd konstanten Eisen- und Reibungsverluste die tatsächlich umgesetzte Leistung der Maschine.

Zu bemerken ist, dass der Wirkungsgrad bezogen auf die Netzleistung keine weiteren Einbußen verzeichnet, da die Maschine direkt mit dem Netz verbunden ist.

$$\eta_{ges} = \eta_{ASM} \approx 0,83 \quad (5.2-3)$$

Ein Nachteil ist, dass sich die Drehzahl der direkt am Netz betriebenen Maschine nicht fix einstellen lässt. Mit zunehmender Belastung nimmt die Drehzahl der Maschine ab. Wird die Maschine als Generator betrieben, nimmt die Drehzahl mit stärkerem negativem Drehmoment stetig zu. Das schlägt sich negativ auf den Gesamtwirkungsgrad einer Windkraftanlage nieder, da die Drehzahl der Maschine nicht an die Windverhältnisse angepasst werden kann. Die Regelbarkeit des Systems auf der elektrischen Seite ist in keiner Weise gegeben. Weder eine Regelung der eingespeisten Leistung, noch eine Regelung der Drehzahl ist möglich.

5.2.3 Vollumrichter

Der Wirkungsgrad des Systems beim Betrieb der ASM mit Vollumrichter werden untersucht. Dazu wird die ASM mit fest eingestellter Drehzahl betrieben, während die eingespeiste Leistung variiert wird. Mit dem *Gen3i* werden dabei die Statorleistung, die mechanische Leistung und die Netzleistung am Netzanschlusspunkt des Schaltschranks, also inklusive der Schaltschrankverluste, gemessen. Im Anschluss an die Messung werden die gemessenen Datenpunkte für jeden Arbeitspunkt gemittelt, um Messabweichungen zu reduzieren. Dieses Vorgehen wird für verschiedene Drehzahlen wiederholt.⁹

Es werden dann Maschinenwirkungsgrad und Gesamtwirkungsgrad des Generatorsystems in Abhängigkeit der Belastung bezogen auf die Nennbelastung der Maschine aufgetragen.

Auf der folgenden Seite ist das Wirkungsgradkennlinienfeld der ASM mit Vollumrichter in Abbildung 31 dargestellt.

⁹ Messergebnisse siehe Tabelle 14, S.81; Tabelle 15, S. 86; Tabelle 16, S. 87; Tabelle 17, S.87

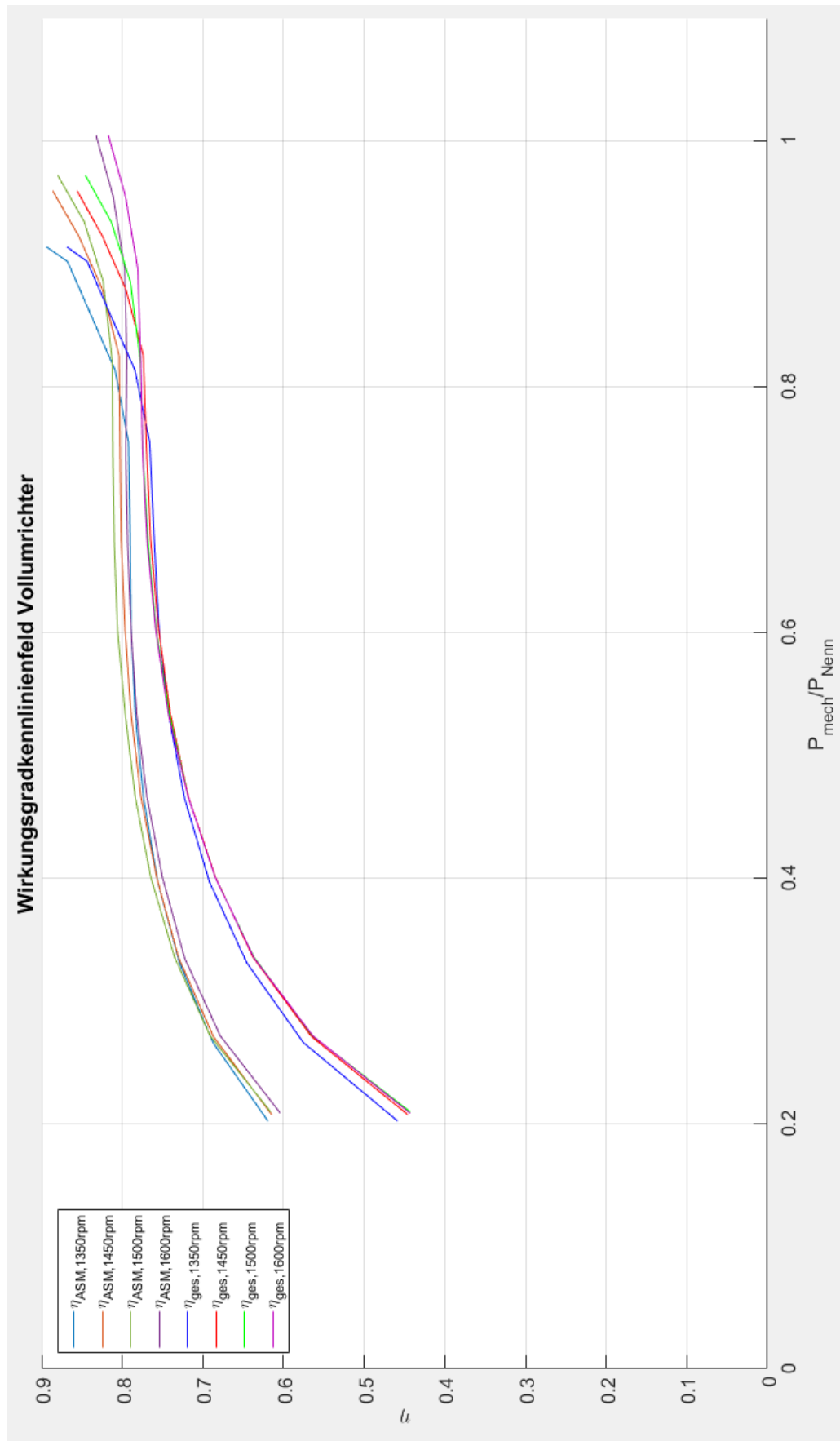


Abbildung 31: Wirkungsgradkennlinienfeld im Vollumrichterbetrieb

Der Wirkungsgradverlauf der ASM bleibt im Vollumrichterbetrieb im Wesentlichen unverändert. Jedoch erreicht die Maschine erst bei etwas höherer Belastung ($P_{mech} \geq 0,7 \cdot P_{Nenn}$) ihren maximalen Wirkungsgrad von $\eta_{ASM} \approx 0,80$. Dieser Wirkungsgrad liegt zudem niedriger als der Nennwirkungsgrad der Maschine. Verglichen mit der reinen Sinusspannung, die bei der direkten Netzkopplung am Stator anliegt, ist die Spannung am Frequenzumrichter überschwingungsbehaftet. Dadurch erhöhen sich die Eisenverluste innerhalb der Maschine. Die spannungsabhängigen und damit annähernd konstanten Eisenverluste machen sich dabei gerade im niedrigen Leistungsbereich bemerkbar.

Bei niedriger Belastung sind die Statorströme zu stark verrauscht, sodass die Nulldurchgänge des Stroms nicht mehr korrekt bestimmt werden können. Für diesen Arbeitsbereich der Maschine konnten deshalb keine verwertbaren Ergebnisse aufgenommen werden.

Der Gesamtwirkungsgrad des Generatorsystems liegt wesentlich niedriger als der Maschinenwirkungsgrad. Bedingt durch die hohe Leistung, die über den Umrichter fließt, entstehen unvermeidlich hohe Umrichterverluste. Je dichter die Maschinendrehzahl dabei an der Synchrondrehzahl von $n_0 = 1500 \text{ min}^{-1}$ liegt, desto höher ist ihr Wirkungsgrad.

Für den Gesamtwirkungsgrad im Vollumrichterbetrieb ließ sich ermitteln:

$$\eta_{ges} \approx 0,77 \quad (5.2-4)$$

Betrachtet man den Wirkungsgrad um die Nennbelastung, so ist ein starker Anstieg des Wirkungsgrads zu verzeichnen. Dieser Anstieg gab Anlass, die Einzelleistungen genauer zu betrachten, da ein Wirkungsgrad der Maschine weit über dem zuvor bestimmten Nennwirkungsgrad nicht erklärbar ist. Bei der Untersuchung des Drehmoments, das zur Bestimmung der mechanischen Leistung verwendet wird, fiel auf, dass es ab einem Drehmoment von etwa 30 Nm nicht mehr linear ansteigt, sondern abflacht. Wie bereits in Kapitel 4.4.6 erwähnt, wird zur Erfassung der Drehzahl das bereits gemittelte Signal der digitalen Anzeige DD2002 verwendet. Bei Messungen am Rohsignal des Drehmomentsensors, das an der Rückseite der Anzeige am 15-poligen SUB-D-Stecker zugänglich ist, zeigte sich, dass das Signal mit einer starken, nicht drehzahlabhängigen Sinusschwingung mit $f = 100 \text{ Hz}$ behaftet ist. Bei hohen Drehmomenten führt diese Sinusschwingung dazu, dass das Ausgangssignal der Drehmomentmesswelle, das bedingt durch die Versorgungsspannung auf

$\pm 6 \text{ V}$ begrenzt ist, in die Sättigung geht. Eine Mittelwertbildung über dieses Signal führt dann zu einem verfälschten Ergebnis, genauer zu einem zu niedrig bestimmten Drehmoment. Die Amplitude eben dieser Sinusschwingung ist dabei während des Vollumrichterbetriebs wesentlich höher als während der restlichen Betriebsarten, weshalb dieses Phänomen erst bei der Untersuchung des Vollumrichterbetriebs auffiel. Weitere Messungen am Versuchstand zeigten, dass die Schwingung in sämtlichen geregelten und auch ungeregelten Betriebsarten vorhanden ist. Während der Durchführungszeit dieser Arbeit konnte die Ursache der Schwingung jedoch nicht identifiziert werden. Durchgeführte Testmessungen zeigten, dass die Mittelung des Drehmomentsignals plausible Ergebnisse liefert, sofern die Schwingung die Sättigungsgrenze der Drehmomentmesswelle nicht überschreitet. Im Vollumrichterbetrieb ist das jedoch der Fall, weshalb die Messergebnisse für den oberen Lastbereich ihre Aussagekraft verlieren. Für den Teillastbereich sowie die anderen im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen sind die Messergebnisse allerdings weiterhin zu verwenden.

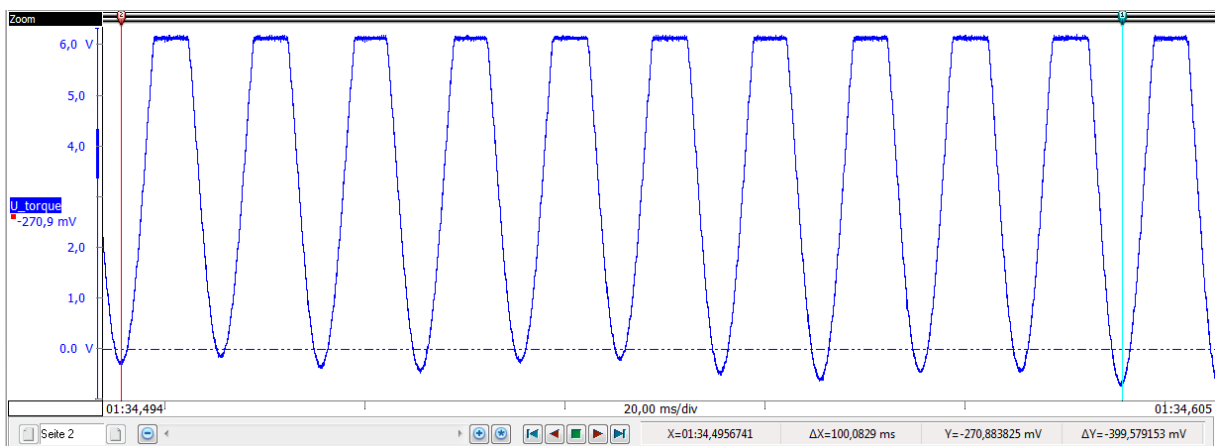


Abbildung 32: Schwingung des Drehmomentsignals an der Sättigungsgrenze mit $T=10\text{ms}$

5.2.4 Doppelt gespeiste Asynchronmaschine

5.2.4.1 Leistungsflussanalyse DGASM

Zuerst werden die Leistungsflüsse innerhalb der DGASM untersucht. Dazu wird der Versuchsstand auf eine feste eingespeiste Leistung, in diesem Fall $P_{Netz} = -3000 W$, geregelt, während die Drehzahl variiert wird. Stator-, Rotor- und mechanische Leistung werden gemessen.¹⁰

Die gemessenen Leistungen werden abhängig vom Schlupf aufgetragen. Gleichzeitig werden die theoretischen Vergleichswerte für die Rotorleistung und die eingestellte Netzleistung in das Diagramm eingetragen. Die ideale Theorie betrachtet dabei die Maschine ohne Verluste.

$$P_{ASM,ideal} = const. = 3000 W \quad (5.2-5)$$

$$P_{mech,ideal} = P_{ASM,ideal} \cdot 0,83^{-1} \quad (5.2-6)$$

$$P_{Rotor,ideal} = -s \cdot P_{mech,ideal} \quad (5.2-7)$$

$$P_{Stator,ideal} = P_{ASM,ideal} - P_{Rotor,ideal} \quad (5.2-8)$$

Auf der folgenden Seite in Abbildung 33 werden die Messergebnisse graphisch übersichtlich dargestellt.

¹⁰ Messergebnisse siehe Tabelle 18, S. 83

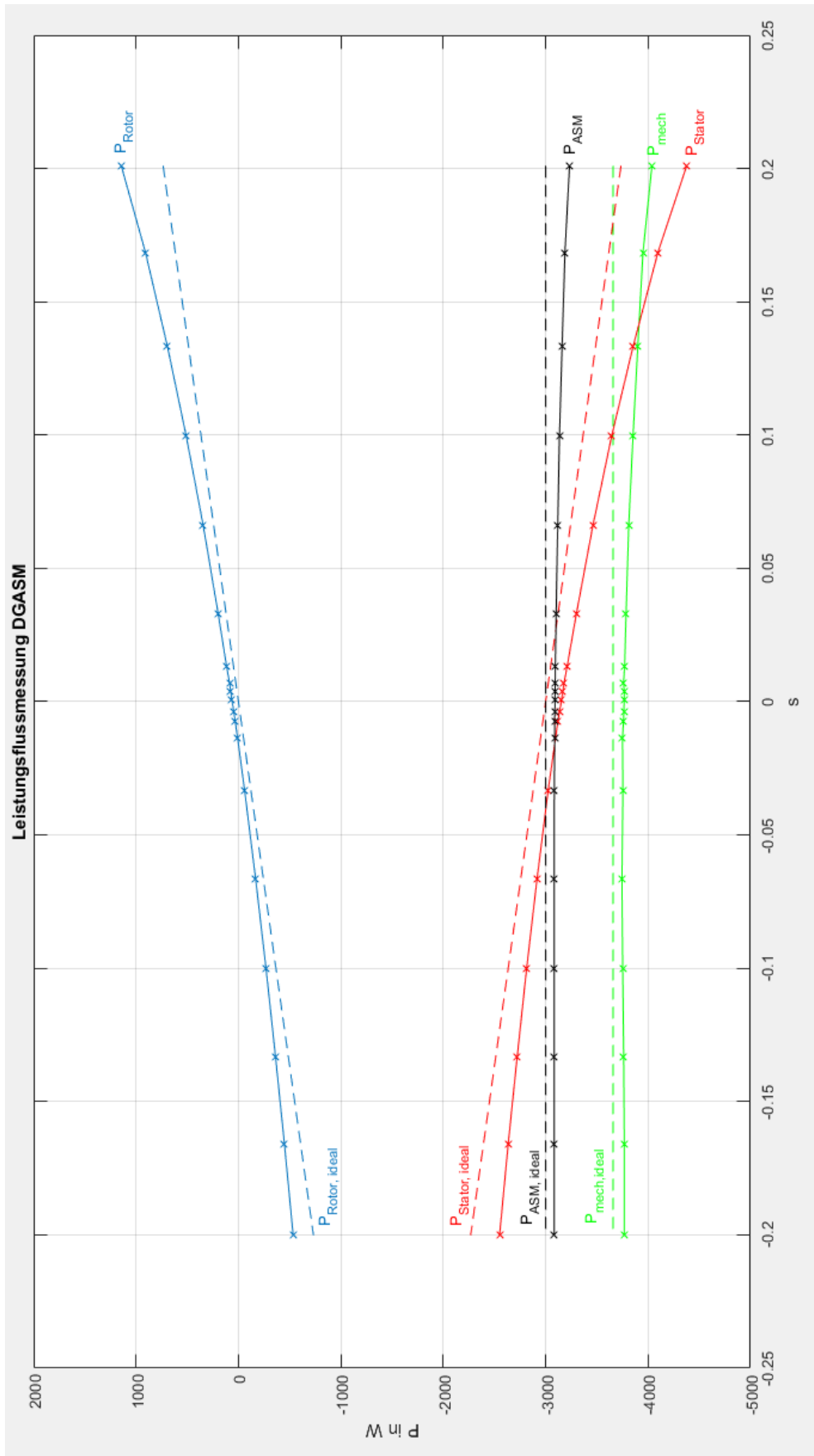


Abbildung 33: Leistungflussmessung an der DGASM bei variierter Drehzahl

Im untersynchronen Betrieb, das heißt bei positivem Schlupf, nimmt der Rotor Leistung auf. Mit abnehmendem Schlupf nimmt auch die Rotorleistung ab, bis der Rotor im übersynchronen Betrieb, das heißt bei negativem Schlupf, Wirkleistung abgibt. Die Summe von Stator- und Rotorleistung entspricht in etwa der konstanten Netzleistung. Bedingt durch zusätzliche Umrichterverluste zwischen Netz und ASM liegt die reine Maschinenleistung etwas höher als 3000 W . Die mechanische Leistung der Maschine ist ebenfalls konstant und liegt um den Faktor $0,82^{-1}$ höher als die Summe von Stator- und Rotorleistung, was dem Maschinenwirkungsgrad entspricht. Diese Beobachtungen stimmen mit der Theorie überein, jedoch gibt es Abweichungen zur idealen Theorie, die einer Erklärung bedürfen.

Die gemessene Rotorleistung ist am synchronen Punkt ($s = 0$) nicht Null, sondern beträgt etwa $P_{Rotor} \approx 60\text{ W}$. Betrachtet man die Leistungsbilanz für die DGASM, Abbildung 7, und den Zusammenhang (3.2-15), so wird klar, warum.

Für die gemessene Rotorleistung P_2 gilt:

$$P_2 = P_{V2} + P_{el2} \quad (5.2-9)$$

$$\text{mit } P_{el2} = 0 \text{ wenn } s = 0 \quad (5.2-10)$$

Am synchronen Punkt ist die nutzbare Rotorleistung P_{el2} zwar Null, jedoch ist der Rotorstrom nicht Null. Die gemessene Leistung am synchronen Punkt entfällt damit vollständig auf die noch vorhandenen Kupferverluste im Rotor. Die Kupferverluste sind dabei stets positiv. Die gemessene Rotorleistung wird erst bei höherem Schlupf Null, nämlich wenn gilt:

$$-sP_{mech} = P_{V2} \quad (5.2-11)$$

Im Zusammenhang damit steht eine weitere Eigenschaft der gemessenen Rotorleistung: die Rotorleistung ist nicht punktsymmetrisch zum synchronen Punkt. Bei positivem Schlupf ist der Betrag der gemessenen Rotorleistung P_2 höher als die Leistung bei gleichem negativem Schlupf. Hier ist Zusammenhang (5.2-9) gemeinsam mit den Vorzeichen der Leistungen zu beachten.

$$\text{Wenn } s > 0 \Rightarrow P_{el2} > 0; P_{V2} > 0 \text{ folgt } |P_2| = |P_{el2}| + |P_{V2}| \quad (5.2-12)$$

$$\text{Wenn } s < 0 \Rightarrow P_{el2} < 0; P_{V2} > 0 \text{ folgt } |P_2| = |P_{el2}| - |P_{V2}| \quad (5.2-13)$$

$$\text{bei Generatorbetrieb } P_{mech} < 0 \quad (5.2-14)$$

5.2.4.2 Wirkungsgradanalyse DGASM mit Transformator

Es wird der Wirkungsgrad des Generatorsystems analysiert, wenn die ASM als DGASM betrieben wird und der Umrichter mit herabgesetzter Spannung, also hinter dem Transformator arbeitet. Dazu werden mit dem *Gen3i* zwei verschiedene Messungen durchgeführt. In der ersten Messung wird lediglich die ASM untersucht. Das bedeutet es werden zu stationären Arbeitspunkten Stator-, Rotor- und mechanische Leistung gemessen. In einem zweiten Messdurchgang wird dann zu den gleichen stationären Arbeitspunkten die Netzleistung am externen Anschlusspunkt des Schaltschranks, also inklusive der Verlustleistung des Schaltschranks, gemessen. An jedem Arbeitspunkt wird einige Sekunden gemessen und die aufgenommenen Messwerte dann über den gesamten Zeitraum gemittelt, um möglichst vergleichbare Werte für beide Messdurchläufe zu schaffen. In der Praxis zeigt sich, dass die Ergebnisse sehr gut reproduzierbar sind, sofern identische Arbeitspunkte verwendet werden. Die Messung wird für verschiedene Drehzahlen wiederholt.¹¹

Die Wirkungsgrade werden dann sowohl für die ASM als auch den gesamten Versuchsstand berechnet und in Abhängigkeit der Belastung dargestellt. Das Wirkungsgradkennlinienfeld ist auf der folgenden Seite in Abbildung 34 abgebildet.

¹¹ Messergebnisse siehe Tabelle 19, S. 83; Tabelle 20, S. 84; Tabelle 21, S. 85; Tabelle 22, S.88

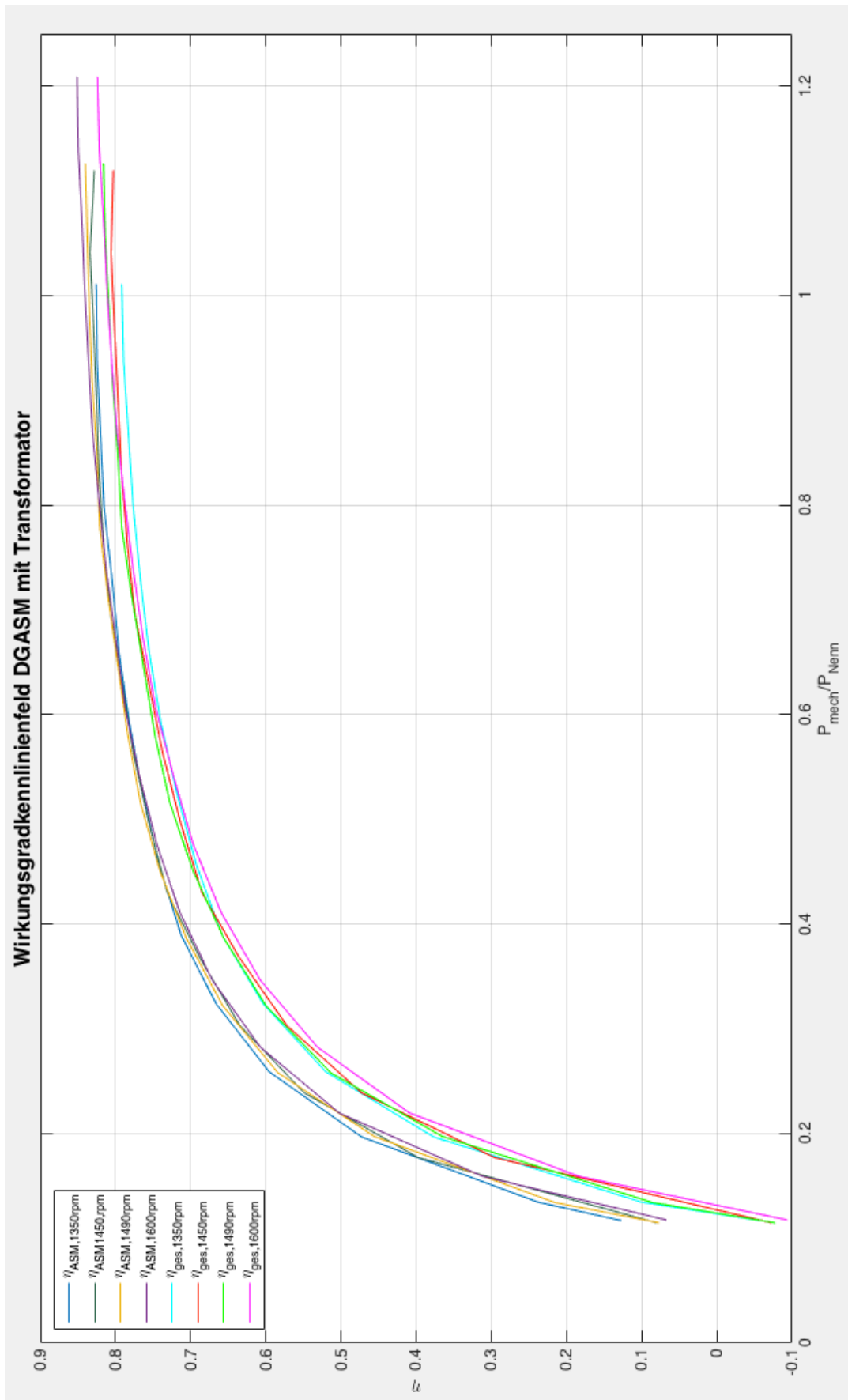


Abbildung 34: Wirkungsgradkennlinienfeld DGASM mit Transformator

Der Wirkungsgrad der ASM nähert sich mit steigender Belastung dem Nennwirkungsgrad an. Jedoch wird der Nennwirkungsgrad auch im doppelt gespeisten Betrieb erst bei höherer Belastung als bei Betrieb mit kurzgeschlossenem Rotor erreicht. Die Speisung des Rotors über den Umrichter führt aufgrund des erhöhten Oberschwingungsanteils zu höheren Eisenverlusten. Der Gesamtwirkungsgrad fällt aufgrund der zusätzlichen Umrichter-, Transformator und Schaltschrankverluste zwar geringer aus, zeigt jedoch den gleichen Verlauf.

Bereits bei Durchführung der Messung fiel auf, dass nicht mit jeder Drehzahl die gleiche maximale Leistung gefahren werden kann. Die Regelung ist so eingestellt, dass sie nicht zulässt, dass Rotor oder Stator über den zugelassenen elektrischen Nennwerten betrieben werden. Der Nennstrom des Rotors ist hierbei die limitierende Größe. Je größer der Schlupf, desto mehr Leistung fließt über den Rotor und desto größer auch die Rotorströme. Ist der maximale Rotorstrom von $6,2\text{ A}$ erreicht, regelt das System ab und die eingespeiste Leistung kann nicht weiter gesteigert werden. Gleichzeitig bedeutet ein höherer Rotorstrom auch gesteigerte Verluste des Umrichters, der auf der Statorseite nicht vorhanden ist. Der Gesamtwirkungsgrad bei höherem Schlupf liegt jedoch nur marginal niedriger als bei hohen Frequenzen, da die Umrichterverluste wegen der verhältnismäßig geringen Rotorleistung nicht allzu hoch ausfallen.

Der höchste Wirkungsgrad der DGASM wird im übersynchronen Bereich erreicht, während dem sowohl über den Rotor als auch den Stator Leistung eingespeist wird. Dadurch sinkt die Statorleistung und mit ihr gleichsam die Statorverluste.

Für den Wirkungsgrad des betrachteten Generatorsystems lässt sich im Mittel und bei ausreichend hoher Belastung für den doppelt gespeisten Betrieb mit Transformator festhalten:

$$\eta_{ges} \approx 0,8 \quad (5.2-15)$$

5.2.4.3 Wirkungsgradanalyse DGASM ohne Transformator

Der Versuchsstand wurde in [5] so konzipiert, dass die Eingangsspannung des Umrichters im Rotorkreis durch einen Transformator herabgesetzt wurde, sodass der Umrichter mit einer geringeren Zwischenkreisspannung arbeitet. An dieser Stelle soll untersucht werden, ob und inwieweit der Transformator die Generatoreigenschaften der DGASM und des gesamten Generatorsystems positiv beeinflusst. Ausgangspunkt für die Zweifel sind zwei offensichtliche Nachteile des Einsatzes eines zusätzlichen Transformators. Ein weiteres Gerät führt zu erhöhtem Kosten- und Platzaufwand, die eingespart werden könnten, würde der Transformator weggelassen. Weiterhin wird die Spannung niemals verlustfrei transformiert. Untersucht werden muss daher, ob die Vorteile des Transformators, nämlich die niedrigere Zwischenkreisspannung des Umrichters, die zusätzlichen Verluste des Transformators aufwiegen.

Um Aufschluss darüber zu erhalten, werden die Wirkungsgradkennlinienfelder der DGASM mit und ohne Transformator miteinander verglichen. Im Rahmen einer zeitgleich durchgeführten Masterarbeit wurde daher die Regelung der DGASM angepasst, um einen Betrieb ohne Transformator zu ermöglichen und im Vorfeld durch Simulationen eine mögliche Beschädigung der ASM auszuschließen. Hardwareseitig wird der Rotorkreis statt der gesonderten Speisung lediglich über die Absicherung des Statorkreises mitbetrieben. Da diese im Vollumrichterbetrieb ebenfalls die gesamte Leistung der ASM führt, führt das Anhängen des Rotorkreises nicht zur Auslösung der Sicherung.

Die Messungen werden identisch zu Kapitel 5.2.4.2 durchgeführt, um sie möglichst vergleichbar zu machen.¹²

Auf der folgenden Seite in Abbildung 35 sind die Wirkungsgrade der DGASM ohne Transformator dargestellt.

¹² Messergebnisse siehe Tabelle 23, S. 87; Tabelle 24, S. 88; Tabelle 25, S. 89; Tabelle 26, S.90

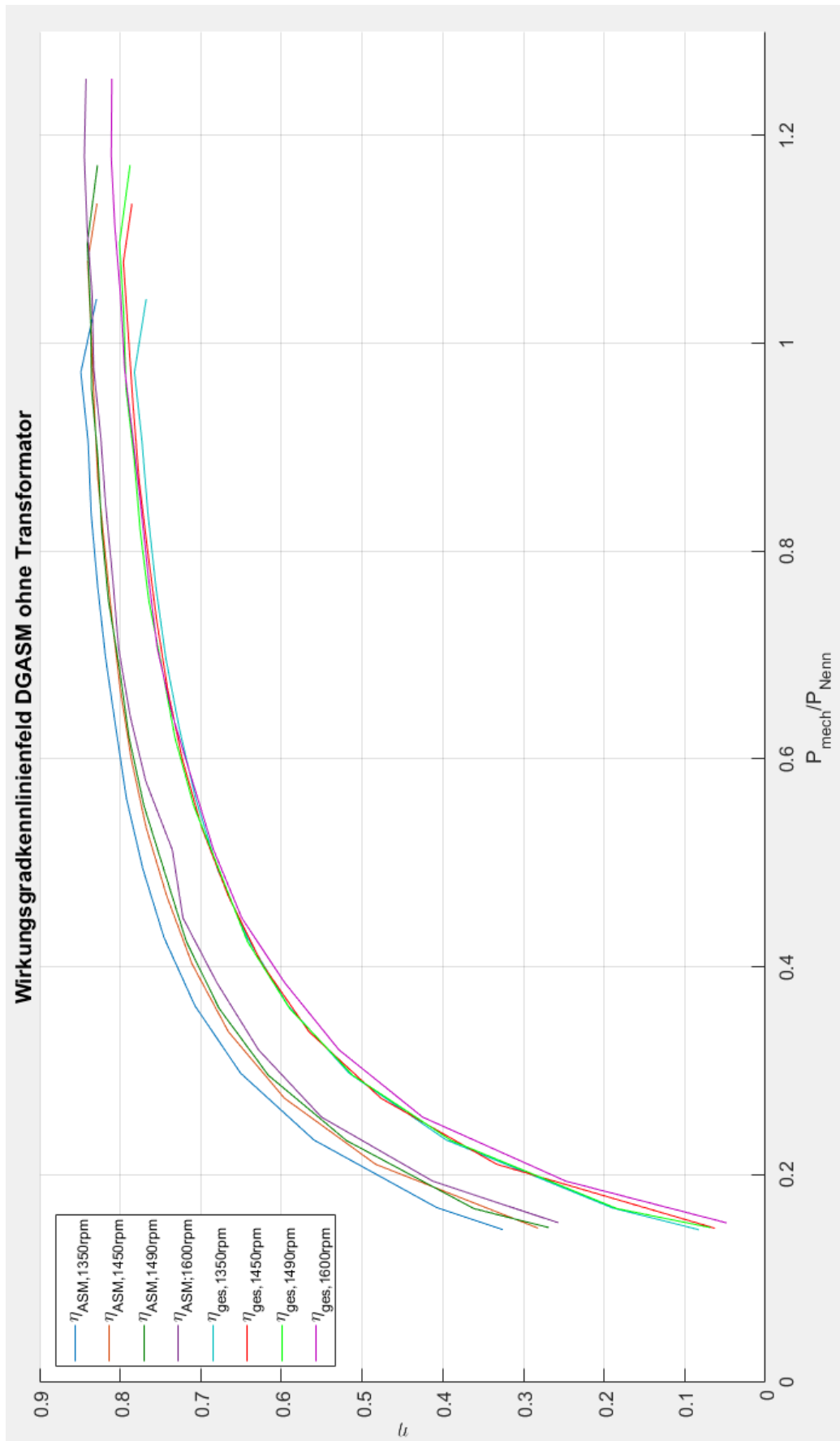


Abbildung 35: Wirkungsgradkennlinienfeld DGASM ohne Transformator

Der grundsätzliche Verlauf der beiden Wirkungsgradkennlinienfelder ist ähnlich, jedoch fällt im direkten Vergleich auf, dass der Wirkungsgrad der DGASM ohne Transformator tatsächlich niedriger ist, als der Wirkungsgrad der DGASM mit Transformator. Der Wirkungsgrad der Asynchronmaschine ist dabei nahezu identisch. Das widerspricht der Annahme in [5], dass bei höherer Zwischenkreisspannung die Oberschwingungsverluste steigen würden. Mehr Oberschwingungen hätten ein Ansteigen der Eisenverluste innerhalb der ASM zufolge. Dies würde sich wiederum bereits negativ auf den Wirkungsgrad der ASM auswirken.

Stattdessen lassen sich Einbußen des Gesamtwirkungsgrades bei Betrieb ohne Transformator feststellen. Ohne Transformator gilt für die Netzleistung:

$$P_{Netz} = P_{ASM} - P_{V,Umrichter} - P_{V,Schaltsschrank} \quad (5.2-16)$$

Die Vermutung liegt nahe, dass die höhere Zwischenkreisspannung zu einem Anstieg der Umrichterverluste führt. Um diese Vermutung zu bestätigen werden die Umrichterverluste an einem festen Arbeitspunkt mit und ohne Transformator gemessen und verglichen.

| Betriebsart | Umrichterverluste $P_{V,Umrichter}$ |
|--------------------------|---|
| DGASM mit Transformator | $381,581 \text{ W} - 339,133 \text{ W} = 42,398 \text{ W}$ |
| DGASM ohne Transformator | $462,389 \text{ W} - 305,127 \text{ W} = 157,262 \text{ W}$ |

Eingestellter Arbeitspunkt: $P_{Soll} = -2000 \text{ W}$; $n_{SOLL} = 1350 \text{ min}^{-1}$

Tabelle 5: Umrichterverluste bei Betrieb mit und ohne Transformator

Die höheren Umrichterverluste führen zu einem Wirkungsgradverlust, der die Verluste eines Transformators überwiegt. Der Gesamtwirkungsgradverlust gegenüber dem Betrieb mit Transformator beträgt dabei etwa 1-2 %.

Für den Gesamtwirkungsgrad der DGASM ohne Transformator festhalten lässt sich festhalten:

$$\eta_{ges} \approx 0,79 \quad (5.2-17)$$

5.3 Vergleich der vermessenen Generatorsysteme

Zunächst lassen sich die verschiedenen Generatorsysteme hinsichtlich ihres Wirkungsgrades gegenüberstellen. Dazu wurden die Ergebnisse der zuvor durchgeführten Messungen zusammengefasst:

| Betriebsart | Gesamtwirkungsgrad η_{ges} |
|--------------------------|---------------------------------|
| Direkte Netzeinspeisung | 0,83 |
| ASM mit Vollumrichter | 0,77 |
| DGASM mit Transformator | 0,80 |
| DGASM ohne Transformator | 0,79 |

Tabelle 6 Zusammenfassung der Wirkungsgradanalyse der vermessenen Generatorsysteme

Vergleicht man die Generatorsysteme, so stellt man fest, dass der Wirkungsgrad einer direkt mit dem Netz gekoppelten ASM am höchsten ist. Hier fallen außer den Maschinenverlusten keine weiteren Verluste an. Mit der DGASM lässt sich weiterhin ein besserer Wirkungsgrad erzielen als beim Einsatz eines Vollumrichters. Ebenso wie bei der grundsätzlichen Betrachtung der gängigen Generatorsysteme in Kapitel 2.3.3 gilt der bestimmte Wirkungsgrad lediglich für den Wirkungsgrad des Generatorsystems, nicht aber des Zusammenspiels zwischen Generator und Antrieb bei variablen Drehzahlen und Belastungen. Die alleinige Betrachtung der Wirkungsgrade reicht deshalb nicht aus.

Der auf den ersten Blick sehr gute Wirkungsgrad der direkten Netzeinspeisung wird relativiert durch die fehlenden Möglichkeiten zur Regelung der Maschine. Das System fährt dabei stets mit einer Drehzahl nahe der Synchrondrehzahl. Abhängig von der Belastung sinkt die Drehzahl ab, es kann also zudem keine feste Drehzahl eingestellt werden. Der Betrieb mit Vollumrichter bietet die beste Regelbarkeit. Die Drehzahl kann nahezu frei gewählt werden und wird lediglich von der steigenden Wärmeentwicklung innerhalb der ASM bei geringen Drehzahlen begrenzt. Da jedoch die gesamte Leistung über den Umrichter ins Netz gespeist wird, fallen die Umrichterverluste sehr hoch aus, sodass der Wirkungsgrad darunter leidet. Den Mittelweg zwischen Regelbarkeit und Wirkungsgrad stellt die DGASM dar. Die Einspeisung der Leistung erfolgt im doppelt gespeisten Betrieb noch mit einem guten Wirkungsgrad. Gleichzeitig lässt sich die Drehzahl der ASM etwa im Bereich von $s = \pm 30\%$ einstellen, bis die Rotorströme den Betriebsbereich begrenzen. Soll der Wirkungsgrad der DGASM voll ausgeschöpft werden, so

ist zu empfehlen, die Zwischenkreisspannung des Rotorumrichters über einen Transformator im Rotorkreis abzusenken.

5.4 Anwendung der Erkenntnisse auf die Realität

In diesem Abschnitt soll nun geklärt werden, inwiefern die gewonnenen Erkenntnisse für den realen Einsatz der vermessenen Betriebsarten der ASM als Generatorsystem in einer WEA anzuwenden sind. Welches das optimale Konzept für jeden Standort einer WEA ist, muss im Einzelfall entschieden werden und lässt sich nicht pauschalisieren. Grundsätzlich ist es Ziel mit einem möglichst hohen Wirkungsgrad, aber auch entsprechend des Leistungsbedarfs eines Netzes einzuspeisen.

Der Einsatz einer ASM in direkter Netzkopplung bietet sich vor allem an Standorten mit vorhersehbaren, konstanten Windverhältnissen an, da die Drehzahl der Maschine nicht geregelt werden kann. Die Maschine besitzt nur eine optimale Windgeschwindigkeit, bei der sehr effektiv eingespeist werden kann. Abseits dieser Drehzahl sinkt der Wirkungsgrad der WEA. Der Wirkungsgradverlauf zeigt aber auch, dass die direkt gespeiste Maschine selbst im Teillastbereich noch sehr lange bei Nenndrehmoment fährt. Dabei darf nicht vergessen werden, dass nicht nur auf der elektrischen, sondern auch auf der mechanischen Seite Möglichkeiten zur Regelung der Drehzahl bestehen. Insgesamt ist die direkte Netzkopplung eine sehr einfache und ohne großen Kostenaufwand zu realisierende Generatorvariante.

Trotz alledem ist der Einsatz eines Umrichters meist eine lohnenswerte Investition. Eine ASM mit Vollumrichter zu betreiben scheint allerdings hinsichtlich der Ergebnisse der Wirkungsgraduntersuchung nur wenig rentabel. Zwar kann die Drehzahl in der Theorie beliebig verändert werden, allerdings vernachlässigt diese Betrachtung die Tatsache, dass bei niedrigen Drehzahlen die Wärmeentwicklung in der ASM stark ansteigt, da der Lüfter ebenfalls langsamer dreht. Der Einsatz von Fremdlüftern würde den ohnehin bereits niedrigen Wirkungsgrad weiter senken. Die Notwendigkeit, den Umrichter für den Hochlauf und Synchronisierung der Maschine am Netz zu nutzen, ist bei der ASM nicht gegeben, da die Maschine selbstständig anlaufen oder die Drehzahl nachführen kann. In der Praxis wird statt der ASM häufiger eine SM mit Vollumrichter eingesetzt. Sie weist einen höheren Wirkungsgrad als die ASM auf und die Nachteile des synchronen Betriebs werden durch den Umrichter ausgeglichen. Gleichzeitig lässt sich die eingespeiste Blindleistung einer SM besser regeln.

Wird eine ASM eingesetzt, so ist der doppelt gespeiste Betrieb die Betriebsart, die die Eigenschaften der ASM am effektivsten ausnutzt. Die Umrichterverluste fallen durch den kleiner dimensionierten Umrichter geringer aus, weshalb die DGASM einen höheren Wirkungsgrad aufweist als die Vollumrichtermaschine. Zudem bedeutet ein leistungsschwächerer Umrichter auch immer einen Kostenvorteil. Zwar kann die DGASM nicht im vollen Drehzahlbereich gefahren werden, trotzdem kann die Drehzahl in nicht unerheblichem Maße an die Windverhältnisse angepasst werden.

Ganz gleich welches Generatorsystem eingesetzt wird, es ist unabdinglich die ASM passend für die Windverhältnisse am Standort der WEA auszulegen. Eine für zu geringe Leistungen ausgelegte Maschine muss bei zu starkem Wind die eingespeiste Leistung reduzieren oder aber komplett vom Netz getrennt werden, um die ASM nicht zu beschädigen. Eine für zu große Leistungen ausgelegte Maschine wird bei seichtem Wind mit einem sehr geringen Wirkungsgrad arbeiten. Eine Schätzung oder eine Analyse der Windverhältnisse vor Ort und eine darauf basierende Dimensionierung der ASM deshalb unbedingt vonnöten.

6 Fazit

Ziel dieser Arbeit war die Untersuchung der am Versuchsstand „Windenergie-Netzeinspeisung“ vorhandenen Generatorkonzepte hinsichtlich Wirkungsgrad und Leistungsfluss.

Die Analyse der DGASM, die von den am Versuchsstand vorhandenen Generatorkonzepte die am häufigsten eingesetzte Technologie darstellt und damit in den Fokus der Betrachtungen rückt, gestaltete sich schwierig aufgrund der auftretenden niedrigen Frequenzen im Rotorkreis. Um eine Analyse dieser Maschine dennoch zu ermöglichen, wurde die Anschaffung eines Transientenrekorders der Firma HBM getätigt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde sich mit dem neuen Gerät auseinandergesetzt, es in Betrieb genommen und eine Messkonfiguration in Form einer *Virtual Workbench* erstellt, die auch für nachfolgende Leistungsmessungen an der Maschine eingesetzt werden kann.

Am Beginn der Messungen stand die erneute Vermessung der Ersatzparameter der ASM. Die Ergebnisse stimmten überwiegend mit den Ergebnissen der vorhergegangenen Messungen aus [19] überein, jedoch wichen die bestimmten Reibungsverluste stark voneinander ab.

Die durchgeführten Wirkungsgradanalysen und der anschließende Vergleich der Betriebsarten der Maschine führten zu der Schlussfolgerung, dass die ASM in direkter Netzkopplung zwar den höchsten Wirkungsgrad aufweist, jedoch im Zusammenspiel in einer WEA nur begrenzte Anwendungsmöglichkeiten findet. Bessere Ergebnisse lassen sich hier durch den Einsatz von Umrichtern erzielen. Die ASM mit Vollumrichter stellt zwar am Labor-Versuchsstand eine sinnvolle Betriebsart dar, hält in der Realität aber dem Vergleich mit den Vorteilen einer SM nicht stand. Ein Betrieb der ASM als DGASM stellt sich als effektivste Betriebsart heraus, die sowohl einen guten Wirkungsgrad als auch gute Regelbarkeit in sich vereint.

Die genauere Betrachtung der doppelt gespeisten Maschine ergab, dass der Einsatz eines Transformators zur Senkung der Zwischenkreisspannung durchaus seine Berechtigung hat, da der Wirkungsgrad gegenüber dem Betrieb ohne Transformator noch etwas gesteigert werden kann. Die Untersuchung des Leistungsflusses der DGASM ergab ein schlüssiges Bild über die Leistungsverteilung innerhalb der Maschine, das nur geringe verlustbedingte Abweichungen zur Theorie zeigt. Der Einsatz der vorhandenen Matlab-Simulation bietet sich dabei nicht zur quantitativen Bewertung der gemessenen Ergebnisse an. Der Wirkungsgrad des in der Simulation verwendeten Maschinenmodells ist wesentlich zu hoch.

Die Wirkungsgradmessungen an der Maschine im Vollumrichterbetrieb offenbarten jedoch, dass trotz der sonst sehr gut funktionierenden Regelung noch weiterhin Probleme am Versuchsstand bestehen. Die Ursache für eine Schwingung auf dem Signal des Drehmomentsensors wurde noch nicht ermittelt, sodass Messungen bei hohen Belastungen im Vollumrichterbetrieb zu verfälschten Ergebnissen führen. Die Drehmomentproblematik besteht sowohl am bereits vorhandenen Versuchsstand, als auch beim noch nicht vollendeten, neuen Versuchsstand.

Übergeordnetes Ziel aller Bachelor- und Masterarbeiten am Versuchsstand „Windenergie-Netzeinspeisung“ ist es, im Endergebnis einen funktionstüchtigen Versuchsstand für Studenten der HAW Hamburg zu realisieren. Zwar sind noch immer nicht alle Probleme beseitigt, jedoch befindet sich ein Großteil des Versuchsstands bereits in betriebsfertigen Zustand, sodass ein Großteil der Leistungsmessungen durchgeführt werden konnten sowie sinnvolle und richtige Ergebnisse lieferten. Die Durchführung von Leistungsfluss- und Wirkungsgradmessungen im Rahmen eines Laborversuchs ist durchaus denkbar. Dank der

guten Bedienfreundlichkeit des Transientenrekorders *Gen3i* ist es nach Aufruf der erstellten Messkonfiguration möglich, ohne weitere Anpassungen Messungen am Versuchsstand durchzuführen. Die Analyse der Messungen könnte direkt am Gerät anhand bereits vorgefertigter Anzeigen geschehen und Messergebnisse mittels Exportfunktion und USB-Schnittstellen auf externe Datenträger gespeichert werden.

Das neue Messgerät birgt aufgrund der umfangreichen Konfigurationsmöglichkeiten das Potential, für weitere wissenschaftliche Arbeiten an diesem und anderen Versuchsständen eingesetzt zu werden. Durch Aktualisierung der Bediensoftware *Perception* auf einen weiterentwickelten Versionsstand, kann der Funktionsumfang des Geräts noch weiter gesteigert werden.

VI Simulationsergebnisse

Tabelle 7: Simulationsergebnisse für den Vollumrichterbetrieb

| P_{mech} in W | P_{Stator} in W | P_{Netz} in W |
|-----------------------------|-------------------|-----------------|
| $n = 1400 \text{ min}^{-1}$ | | |
| -4000 | -4567 | -4074 |
| -3500 | -3956 | -3555 |
| -3000 | -3364 | -3061 |
| -2000 | -2227 | -2051 |
| -1000 | -1149 | -1046 |
| -500 | -629 | -544,4 |
| -100 | -222,3 | -144,1 |
| 0 | -121 | -44,08 |
| $n = 1500 \text{ min}^{-1}$ | | |
| -4000 | -4500 | -4071 |
| -3500 | -3907 | -3563 |
| -3000 | -3328 | -3059 |
| -2000 | -2215 | -2051 |
| -1000 | -1146 | -1046 |
| -500 | -628,1 | -544,5 |
| -100 | -222,4 | -143,7 |
| 0 | -121,8 | -43,95 |
| $n = 1600 \text{ min}^{-1}$ | | |
| -4000 | -4483 | -4069 |
| -3500 | -3891 | -3562 |
| -3000 | -3314 | -3057 |
| -2000 | -2200 | -2049 |
| -1000 | -1134 | -1044 |
| -500 | -617,3 | -543,5 |
| -100 | -211,3 | -143,1 |
| 0 | -121 | -44,09 |

Tabelle 8: Simulationsergebnisse für die DGASM mit Transformator

| P_{mech} in W | P_{Stator} in W | P_{Netz} in W |
|-----------------------------|-------------------|-----------------|
| $n = 1300 \text{ min}^{-1}$ | | |
| -4000 | -4500 | -4923 |
| -3500 | -3931 | -4301 |
| -3000 | -3372 | -3685 |
| -2000 | -2283 | -2473 |
| -1000 | -1229 | -1283 |
| -500 | -714,7 | -696,8 |
| -100 | -309,2 | -231,6 |
| 0 | -208,8 | -115,7 |
| $n = 1400 \text{ min}^{-1}$ | | |
| -4000 | -4449 | -4521 |
| -3500 | -3893 | -3953 |
| -3000 | -3345 | -3391 |
| -2000 | -2271 | -2278 |
| -1000 | -1226 | -1180 |
| -500 | -714,5 | -637,8 |
| -100 | -309,8 | -206,3 |
| 0 | -209,4 | -98,9 |
| $n = 1600 \text{ min}^{-1}$ | | |
| -4000 | -4387 | -3897 |
| -3500 | -3846 | -3411 |
| -3000 | -3310 | -2927 |
| -2000 | -2255 | -1955 |
| -1000 | -1222 | -1014 |
| -500 | -712,8 | -541,5 |
| -100 | -309,4 | -164,8 |
| 0 | -209 | -70,6 |

Tabelle 9: Simulationsergebnisse für die DGASM ohne Transformator

| P_{mech} in W | P_{Stator} in W | P_{Netz} in W |
|-----------------------------|-------------------|-----------------|
| $n = 1300 \text{ min}^{-1}$ | | |
| -4000 | -4494 | -4895 |
| -3500 | -3949 | -4298 |
| -3000 | -3393 | -3684 |
| -2000 | -2306 | -2474 |
| -1000 | -1252 | -1287 |
| -500 | -739,3 | -701,4 |
| -100 | -334,6 | -237,4 |
| 0 | -234 | -121,3 |
| $n = 1400 \text{ min}^{-1}$ | | |
| -4000 | -4471 | -4521 |
| -3500 | -3954 | -3956 |
| -3000 | -3369 | -3392 |
| -2000 | -2296 | -2280 |
| -1000 | -1252 | -1184 |
| -500 | -740,3 | -641,8 |
| -100 | -334,4 | -210,6 |
| 0 | -234 | -103,5 |
| $n = 1600 \text{ min}^{-1}$ | | |
| -4000 | -4412 | -3897 |
| -3500 | -3870 | -3411 |
| -3000 | -3334 | -2928 |
| -2000 | -2281 | -1968 |
| -1000 | -1249 | -1016 |
| -500 | -737,3 | -542,8 |
| -100 | -335,3 | -165,8 |
| 0 | -233,7 | -71,19 |

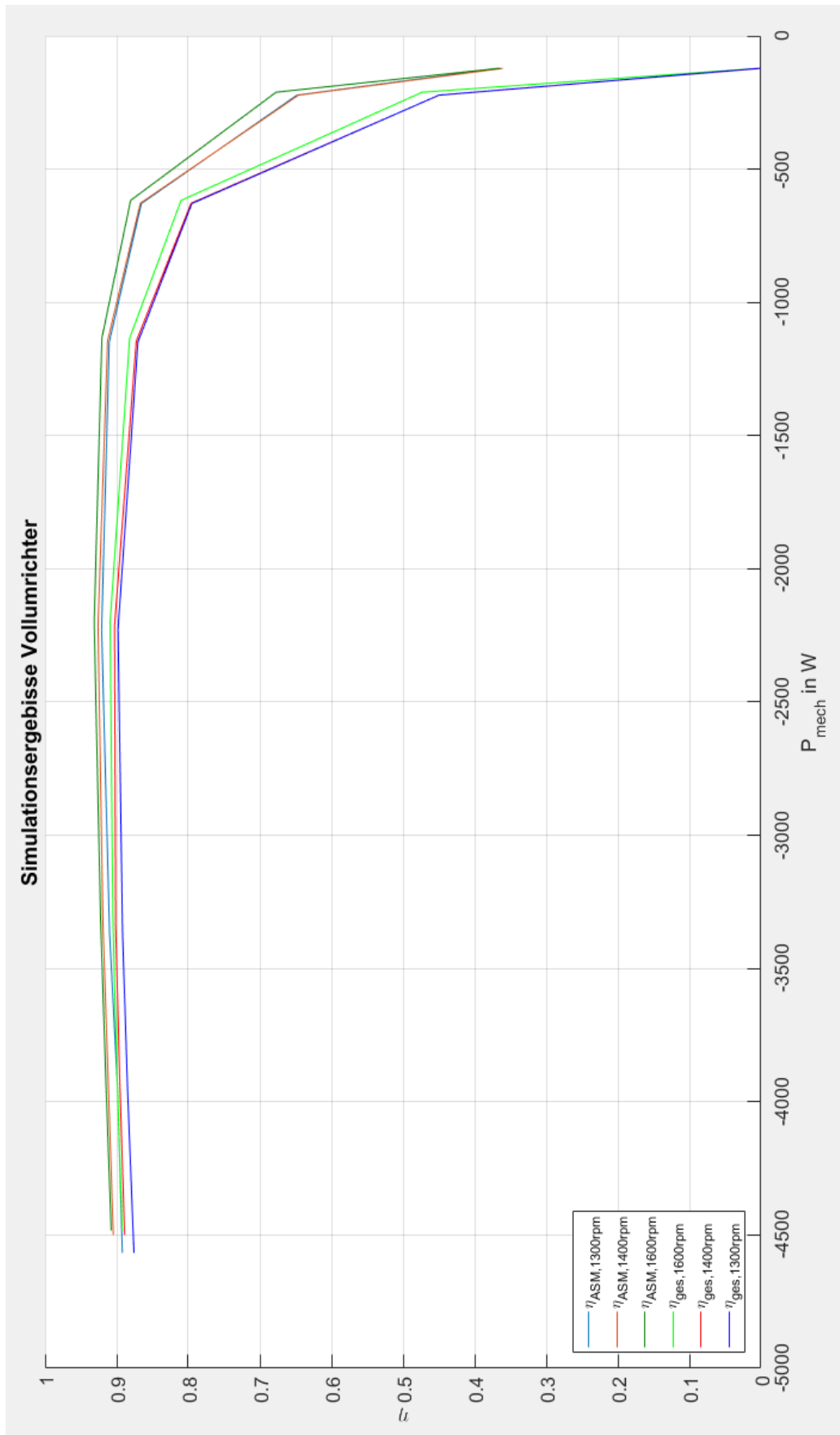


Abbildung 36: Simulationsergebnisse Wirkungsgrad im Vollumrichterbetrieb

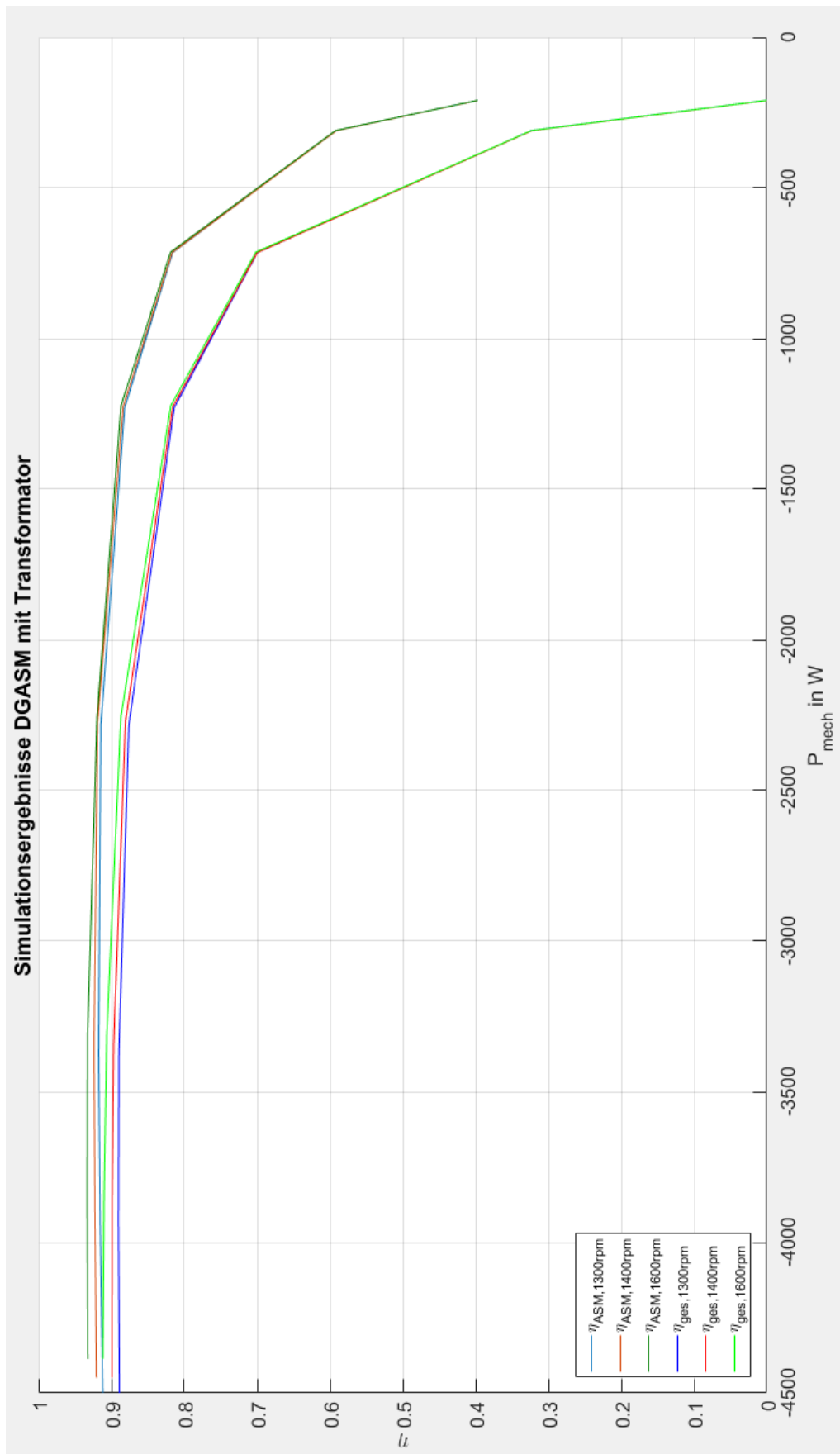


Abbildung 37: Simulationsergebnisse Wirkungsgrad der DGASM mit Transformator

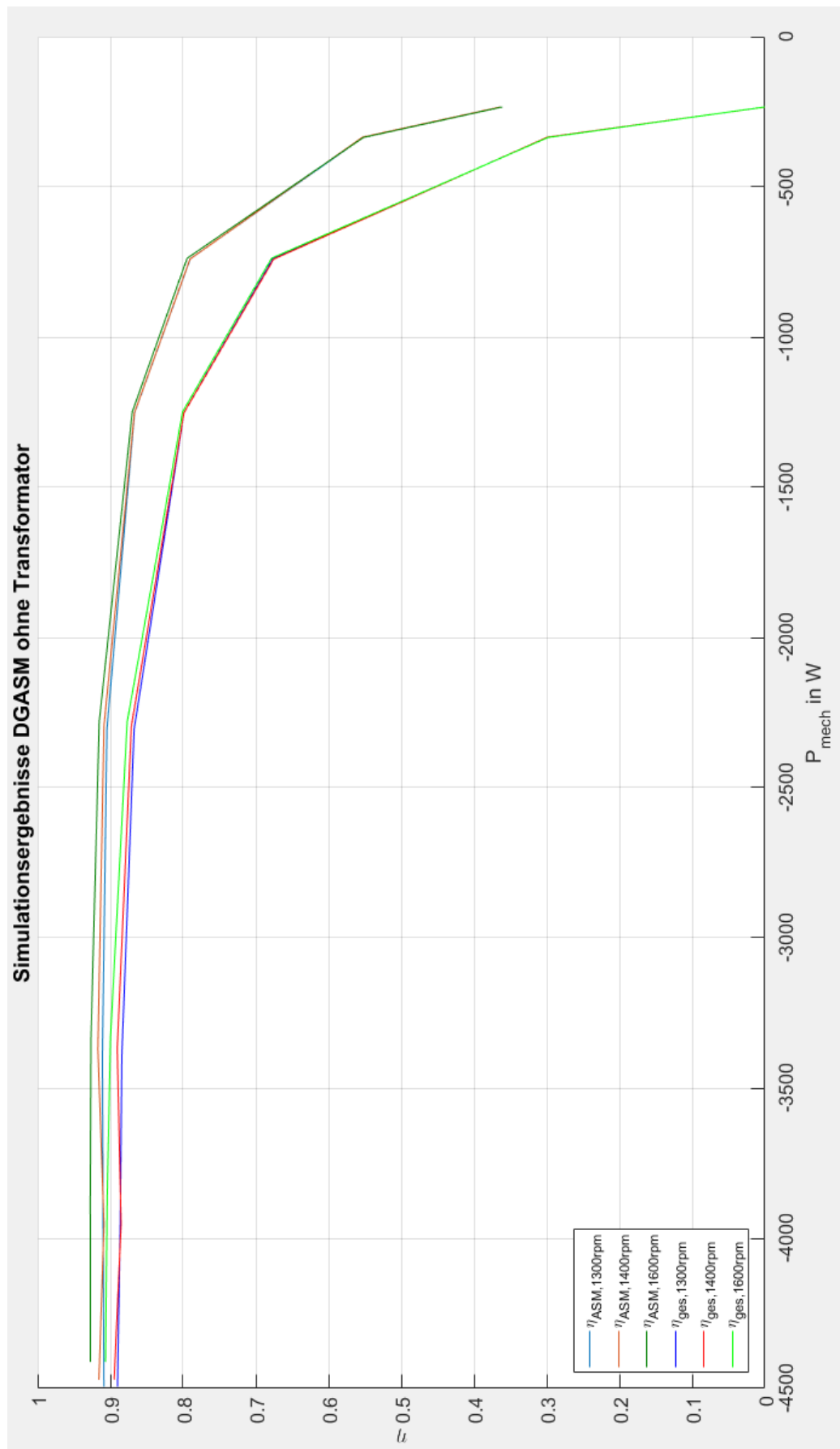


Abbildung 38: Simulationsergebnisse Wirkungsgrad der DGASM ohne Transformator

VII Messergebnisse

Tabelle 10: Ohmsche Widerstände der Ständerwicklungen bei Raumtemperatur

| Wicklung | Gemessener Widerstand in Ω |
|----------|-----------------------------------|
| U | 0,78 |
| V | 0,78 |
| W | 0,78 |

(exkl. Übergangswiderstand $R_{\text{Übergang}} = 0,14 \Omega$)

Tabelle 11: Messergebnisse des Leerlaufversuchs

| U_{10} in V | I_{10} in A | P_{10} in W | P_{Cu1} in W |
|---------------|---------------|---------------|----------------|
| 230,06 | 6,50 | 159,00 | 40,06 |
| 219,86 | 5,56 | 129,80 | 29,34 |
| 210,45 | 4,90 | 113,20 | 22,75 |
| 200,33 | 4,38 | 100,60 | 18,16 |
| 190,34 | 3,97 | 88,40 | 14,96 |
| 179,90 | 3,68 | 84,30 | 12,88 |
| 170,07 | 3,41 | 73,60 | 11,06 |
| 161,63 | 3,17 | 72,00 | 9,53 |
| 150,24 | 2,82 | 67,10 | 7,56 |
| 140,84 | 2,76 | 61,60 | 7,25 |
| 130,58 | 2,56 | 58,40 | 6,22 |
| 120,69 | 2,21 | 54,90 | 4,64 |
| 108,97 | 2,08 | 52,60 | 4,12 |
| 100,80 | 2,20 | 48,70 | 4,60 |
| 89,58 | 1,77 | 43,60 | 2,99 |
| 80,40 | 1,65 | 43,20 | 2,59 |
| 71,14 | 1,47 | 39,62 | 2,06 |

Tabelle 12: Messergebnisse des Kurzschlussversuchs

| U_{1k} in V | I_{1k} in A | P_{1k} in W |
|---------------|---------------|---------------|
| 11,231 | 2,257 | 9,620 |
| 15,729 | 3,273 | 19,000 |
| 20,403 | 4,721 | 31,210 |
| 25,661 | 5,388 | 49,790 |
| 31,243 | 6,603 | 74,000 |
| 35,739 | 7,602 | 97,430 |
| 40,771 | 8,702 | 127,830 |
| 45,722 | 9,889 | 163,260 |
| 51,093 | 11,195 | 209,000 |
| 56,166 | 12,511 | 260,300 |
| 60,486 | 13,691 | 312,300 |

Tabelle 13: Messergebnisse des Belastungsversuchs

| P_1 in W | M in Nm | n in min^{-1} | P_{mech} in W |
|------------|-----------|--------------------------|------------------------|
| 589,70 | 0,89 | 1499 | 139,71 |
| 857,70 | 2,94 | 1494 | 459,97 |
| 1390,70 | 5,98 | 1490 | 933,07 |
| 1868,70 | 9,02 | 1486 | 1403,63 |
| 2360,80 | 11,88 | 1483 | 1844,96 |
| 2822,70 | 15,12 | 1480 | 2343,38 |
| 3357,00 | 18,18 | 1478 | 2813,82 |
| 3812,50 | 21,03 | 1472 | 3241,72 |
| 4419,60 | 24,12 | 1470 | 3712,99 |
| 4981,70 | 27,05 | 1465 | 4149,86 |
| 5654,10 | 30,31 | 1460 | 4634,12 |
| 6453,60 | 33,05 | 1456 | 5039,20 |

Tabelle 14: Ergebnisse der Wirkungsgradmessung im Vollumrichterbetrieb $n=1350\text{min}^{-1}$

| P_{mech} in W | P_{Stator} in W | P_{Netz} in W |
|-----------------|-------------------|-----------------|
| -4569 | -4084,00 | -3969 |
| -4509 | -3913,00 | -3803 |
| -4291 | -3599,00 | -3495 |
| -4068 | -3291,00 | -3191 |
| -3773 | -2989,00 | -2890 |
| -3398 | -2685,00 | -2585 |
| -3025 | -2387,00 | -2283 |
| -2666 | -2090,00 | -1980 |
| -2322 | -1796,00 | -1678 |
| -1983 | -1499,00 | -1372 |
| -1654 | -1206,00 | -1068 |
| -1329 | -913,86 | -764,89 |
| -1009 | -624,89 | -462,62 |

Tabelle 15: Ergebnisse der Wirkungsgradmessung im Vollumrichterbetrieb bei $n=1450\text{min}^{-1}$

| P_{mech} in W | P_{Stator} in W | P_{Netz} in W |
|-----------------|-------------------|-----------------|
| -4797 | -4251 | -4106 |
| -4612 | -3938 | -3803 |
| -4396 | -3625 | -3497 |
| -4125 | -3316 | -3192 |
| -3752 | -3012 | -2889 |
| -3378 | -2707 | -2584 |
| -3019 | -2405 | -2280 |
| -2671 | -2108 | -1978 |
| -2331 | -1811 | -1674 |
| -2004 | -1518 | -1372 |
| -1677 | -1225 | -1070 |
| -1354 | -930,41 | -765,80 |
| -1036 | -637,07 | -462,33 |

Tabelle 16: Ergebnisse der Wirkungsgradmessung im Vollumrichterbetrieb bei $n=1500\text{min}^{-1}$

| P_{mech} in W | P_{Stator} in W | P_{Netz} in W |
|------------------------|--------------------------|------------------------|
| -4860 | -4277 | -4110 |
| -4671 | -3957 | -3801 |
| -4427 | -3646 | -3497 |
| -4104 | -3334 | -3191 |
| -3728 | -3026 | -2887 |
| -3361 | -2722 | -2581 |
| -3008 | -2424 | -2280 |
| -2665 | -2122 | -1976 |
| -2327 | -1824 | -1671 |
| -2000 | -1529 | -1369 |
| -1677 | -1233 | -1068 |
| -1357 | -938,1 | -765,9 |
| -1047 | -645,1 | -464,0 |

Tabelle 17: Ergebnisse der Wirkungsgradmessung im Vollumrichterbetrieb bei $n=1600\text{min}^{-1}$

| P_{mech} in W | P_{Stator} in W | P_{Netz} in W |
|------------------------|--------------------------|------------------------|
| -5022 | -4180 | -4104 |
| -4774 | -3873 | -3800 |
| -4478 | -3568 | -3496 |
| -4110 | -3265 | -3194 |
| -3724 | -2963 | -2885 |
| -3359 | -2665 | -2583 |
| -3005 | -2371 | -2279 |
| -2660 | -2080 | -1975 |
| -2328 | -1791 | -1672 |
| -2001 | -1501 | -1370 |
| -1674 | -1210 | -1066 |
| -1356 | -920,03 | -764,26 |
| -1041 | -628,70 | -461,25 |

Tabelle 18: Messergebnisse der Leistungsflussuntersuchung an der DGASM

| n in min^{-1} | P_{mech} in W | P_{Stator} in W | P_{Rotor} in W |
|--------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------------|
| 1198,48 | -4038 | -4377 | 1144,00 |
| 1247,32 | -3950 | -4096 | 907,60 |
| 1299,84 | -3900 | -3855 | 694,58 |
| 1350,44 | -3853 | -3645 | 510,37 |
| 1401,01 | -3811 | -3461 | 343,51 |
| 1450,81 | -3785 | -3299 | 196,89 |
| 1480,45 | -3771 | -3209 | 114,94 |
| 1489,46 | -3760 | -3179 | 86,03 |
| 1494,39 | -3768 | -3168 | 75,73 |
| 1498,66 | -3767 | -3156 | 65,39 |
| 1505,56 | -3764 | -3136 | 45,79 |
| 1510,84 | -3760 | -3120 | 32,32 |
| 1520,22 | -3750 | -3097 | 8,67 |
| 1550,08 | -3754 | -3024 | -60,55 |
| 1600,13 | -3745 | -2915 | -168,60 |
| 1650,19 | -3752 | -2814 | -269,47 |
| 1699,73 | -3762 | -2722 | -361,76 |
| 1748,91 | -3768 | -2634 | -449,17 |
| 1800,22 | -3767 | -2550 | -534,32 |

Tabelle 19: Ergebnisse der Wirkungsgradmessung an der DGASM
mit Trafo für $n=1350 \text{ min}^{-1}$

| P_{mech} in W | P_{Stator} in W | P_{Rotor} in W | P_{Netz} in W |
|-----------------|-------------------|------------------|-----------------|
| -5055 | -4867 | 692,90 | 4002 |
| -4689 | -4509 | 642,50 | -3701 |
| -3989 | -3776 | 523,55 | -3097 |
| -3642 | -3412 | 481,84 | -2793 |
| -3298 | -3052 | 428,53 | -2491 |
| -2960 | -2693 | 379,67 | -2189 |
| -2624 | -2336 | 331,41 | -1885 |
| -2285 | -1980 | 284,17 | -1583 |
| -1945 | -1622 | 236,05 | -1280 |
| -1619 | -1271 | 192,56 | -977,122 |
| -1295 | -922,47 | 151,10 | -673,975 |
| -983,93 | -578,56 | 113,45 | -370,79 |
| -672,04 | -235,58 | 75,89 | -67,05 |
| -584,11 | -139,47 | 65,46 | 33,74 |

Tabelle 20: Ergebnisse der Wirkungsgradmessung an der DGASM
mit Trafo für $n=1450\text{min}^{-1}$

| P_{mech} in W | P_{Stator} in W | P_{Rotor} in W | P_{Netz} in W |
|-----------------|-------------------|------------------|-----------------|
| -5598 | -4962 | 326,11 | -4495 |
| -5206 | -4649 | 307,51 | -4196 |
| -4858 | -4309 | 280,35 | -3894 |
| -4508 | -3972 | 250,89 | -3592 |
| -4152 | -3635 | 222,50 | -3288 |
| -3808 | -3305 | 198,59 | -2986 |
| -3471 | -2975 | 175,64 | -2686 |
| -3151 | -2649 | 155,65 | -2382 |
| -2817 | -2322 | 135,00 | -2077 |
| -2487 | -1995 | 114,87 | -1775 |
| -2150 | -1667 | 94,94 | -1473 |
| -1842 | -1348 | 79,92 | -1171 |
| -1516 | -1025 | 62,71 | -867,47 |
| -1194 | -702,81 | 47,38 | -564,43 |
| -885,28 | -385,63 | 33,82 | -261,94 |
| -574,21 | -66,97 | 20,69 | 41,57 |

Tabelle 21: Ergebnisse der Wirkungsgradmessung an der DGASM
mit Trafo für $n=1490 \text{ min}^{-1}$

| P_{mech} in W | P_{Stator} in W | P_{Rotor} in W | P_{Netz} in W |
|-----------------|-------------------|------------------|-----------------|
| -5631 | -4904 | 173,02 | -4595 |
| -5283 | -4586 | 160,37 | -4299 |
| -4935 | -4263 | 143,31 | -3991 |
| -4589 | -3941 | 126,87 | -3689 |
| -4251 | -3618 | 111,50 | -3389 |
| -3894 | -3293 | 95,43 | -3083 |
| -3571 | -2977 | 83,29 | -2781 |
| -3245 | -2659 | 71,53 | -2478 |
| -2909 | -2340 | 59,53 | -2176 |
| -2576 | -2023 | 47,98 | -1874 |
| -2253 | -1708 | 38,81 | -1570 |
| -1933 | -1395 | 30,58 | -1268 |
| -1610 | -1081 | 22,72 | -965,68 |
| -1290 | -769,71 | 16,38 | -662,68 |
| -985,99 | -461,80 | 12,30 | -360,28 |
| -670,33 | -151,35 | 7,13 | -57,27 |
| -573,90 | -50,58 | 6,49 | 44,44 |

Tabelle 22: Ergebnisse der Leistungsflussmessung an der DGASM
mit Trafo für $n=1600\text{min}^{-1}$

| P_{mech} in W | P_{Stator} in W | P_{Rotor} in W | P_{Netz} in W |
|-----------------|-------------------|------------------|-----------------|
| -6044 | -4935 | -209,25 | -4980 |
| -5694 | -4634 | -203,11 | -4678 |
| -5363 | -4330 | -200,44 | -4376 |
| -5023 | -4028 | -195,86 | -4075 |
| -4686 | -3729 | -188,05 | -3773 |
| -4347 | -3433 | -177,83 | -3469 |
| -4020 | -3137 | -167,54 | -3167 |
| -3690 | -2840 | -157,52 | -2865 |
| -3365 | -2544 | -147,70 | -2569 |
| -3030 | -2249 | -135,98 | -2262 |
| -2707 | -1956 | -123,51 | -1957 |
| -2381 | -1664 | -110,07 | -1659 |
| -2056 | -1373 | -95,78 | -1356 |
| -1733 | -1083 | -80,52 | -1053 |
| -1412 | -792,67 | -64,84 | -750,21 |
| -1098 | -503,21 | -48,56 | -448,84 |
| -795,82 | -216,35 | -31,93 | -146,21 |
| -587,14 | -24,34 | -15,00 | 55,03 |

Tabelle 23: Ergebnisse der Wirkungsgradmessung an der DGASM
ohne Trafo für $n=1350 \text{ min}^{-1}$

| P_{mech} in W | P_{Stator} in W | P_{Rotor} in W | P_{Netz} in W |
|-----------------|-------------------|------------------|-----------------|
| -5213 | -4967 | 643,68 | -4002 |
| -4860 | -4733 | 607,76 | -3802 |
| -4528 | -4366 | 563,41 | -3500 |
| -4175 | -3999 | 509,01 | -3196 |
| -3828 | -3629 | 459,86 | -2893 |
| -3484 | -3265 | 414,99 | -2590 |
| -3147 | -2904 | 369,63 | -2287 |
| -2810 | -2551 | 324,74 | -1985 |
| -2471 | -2189 | 281,66 | -1679 |
| -2140 | -1834 | 238,41 | -1375 |
| -1813 | -1481 | 198,49 | -1073 |
| -1488 | -1129 | 160,78 | -768,04 |
| -1167 | -777,72 | 124,40 | -461,87 |
| -840,92 | -429,41 | 87,00 | -160,14 |
| -735,34 | -313,55 | 74,08 | -60,93 |

Tabelle 24: Ergebnisse der Wirkungsgradmessung an der DGASM
ohne Trafo für $n=1450\text{min}^{-1}$

| P_{mech} in W | P_{Stator} in W | P_{Rotor} in W | P_{Netz} in W |
|-----------------|-------------------|------------------|-----------------|
| -5672 | -5001 | 299,68 | -4455 |
| -5392 | -4822 | 290,84 | -4292 |
| -5050 | -4490 | 268,80 | -3990 |
| -4699 | -4152 | 241,85 | -3684 |
| -4351 | -3820 | 218,20 | -3380 |
| -4015 | -3485 | 196,05 | -3077 |
| -3674 | -3151 | 174,75 | -2774 |
| -3333 | -2820 | 153,77 | -2470 |
| -3001 | -2493 | 133,23 | -2170 |
| -2670 | -2165 | 114,86 | -1866 |
| -2343 | -1837 | 97,32 | -1561 |
| -2014 | -1512 | 80,21 | -1257 |
| -1688 | -1189 | 64,97 | -955,40 |
| -1368 | -867,22 | 51,31 | -652,22 |
| -1050 | -545,86 | 38,39 | -349,79 |
| -742,35 | -735,77 | 26,66 | -46,49 |

Tabelle 25: Ergebnisse der Wirkungsgradmessung an der DGASM
ohne Trafo für $n=1490 \text{ min}^{-1}$

| P_{mech} in W | P_{Stator} in W | P_{Rotor} in W | P_{Netz} in W |
|-----------------|-------------------|------------------|-----------------|
| -5857 | -5011 | 160,43 | -4614 |
| -5479 | -4766 | 159,41 | -4388 |
| -5142 | -4445 | 142,64 | -4091 |
| -4782 | -4121 | 125,91 | -3791 |
| -4447 | -3792 | 111,44 | -3481 |
| -4103 | -3473 | 96,51 | -3181 |
| -3764 | -3151 | 84,87 | -2878 |
| -3440 | -2831 | 75,02 | -2574 |
| -3102 | -2509 | 61,70 | -2271 |
| -2775 | -2191 | 52,69 | -1967 |
| -2123 | -1560 | 35,38 | -1364 |
| -1800 | -1247 | 27,65 | -1062 |
| -1478 | -932,21 | 21,40 | -756,35 |
| -1164 | -620,64 | 16,08 | -453,39 |
| -836,87 | -312,17 | 9,65 | -154,20 |
| -745,49 | -206,68 | 6,32 | -50,83 |

Tabelle 26: Ergebnisse der Wirkungsgradmessung an der DGASM
ohne Trafo für $n=1600\text{min}^{-1}$

| P_{mech} in W | P_{Stator} in W | P_{Rotor} in W | P_{Netz} in W |
|-----------------|-------------------|------------------|-----------------|
| -6273 | -5075 | -209,29 | -5083 |
| -5898 | -4785 | -195,88 | -4784 |
| -5558 | -4485 | -189,55 | -4483 |
| -5230 | -4184 | -181,94 | -4182 |
| -4875 | -3885 | -174,63 | -3873 |
| -4554 | -3586 | -167,35 | -3573 |
| -4214 | -3288 | -158,67 | -3263 |
| -3879 | -2991 | -149,09 | -2968 |
| -3533 | -2695 | -138,37 | -2664 |
| -3210 | -2401 | -127,97 | -2360 |
| -2895 | -2108 | -116,68 | -2057 |
| -2563 | -1780 | -104,86 | -1754 |
| -2235 | -1522 | -92,09 | -1451 |
| -1925 | -1231 | -78,68 | -1148 |
| -1601 | -941,05 | -65,33 | -846,75 |
| -1277 | -651,55 | -51,37 | -542,82 |
| -968,90 | -363,04 | -36,60 | -239,82 |
| -768,16 | -170,97 | -26,09 | -37,02 |

VIII Literaturverzeichnis

- [1]. **BMWi**. Bruttostromerzeugung in Deutschland 2015. *Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)*. [Online] 2016. [Zitat vom: 13. 05 2016.]
<http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/B/bruttostromerzeugung-in-deutschland,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>.
- [2]. **EEG**. *Gesetz für den Ausbau Erneuerbarer Energien - Nicht amtliche Lesefassung des EEG in der ab 01. August 2014 geltenden Fassung*. 2014.
- [3]. **Handelsblatt**. Nutzung der Photovoltaik und Windenergie. [Online] 2013. [Zitat vom: 13. 05 2016.]
<http://www.handelsblatt.com/infografiken/infografik-nutzung-der-photovoltaik-und-windenergie/7961036.html>.
- [4]. **Hahn, Benjamin**. *Bachelorthesis. Entwurf einer Windenergie-Netzeinspeisung mit Umrichter gespeisten Asynchrongenerator und dSPACE Regelsystem*. 2011.
- [5]. **Büsis, Fabian**. *Masterthesis. Steuerung und Regelung einer Windenergie-Netzeinspeisung mit doppelt gespeistem Asynchrongenerator*. 2015.
- [6]. **Hau, Erich**. *Windkraftanlagen. Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit*. 4., vollständig neu bearbeitete. s.l. : Springer Verlag, 2008.
- [7]. **BMWi**. Innovation durch Forschung. Erneuerbare Energien und Energieeffizienz: Projekte und Ergebnisse der Forschungsförderung 2014. *Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)*. [Online] 2015. [Zitat vom: 13. 05 2016.]
<http://bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/innovation-durch-forschung,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>.
- [8]. **Quaschnig, Volker**. *Regenerative Energiesysteme. Theorie - Berechnung - Simulation*. 9., aktualisierte und erweiterte. s.l. : Carl Hanser Verlag München, 2015.
- [9]. **Schröder, Dierk**. *Elektrische Antriebe - Grundlagen*. 5., erweiterte. s.l. : Springer Vieweg Verlag, 2013.
- [10]. **Müller, Germar und Ponick, Bernd**. *Grundlagen elektrischer Maschinen*. 10. s.l. : WILEY-VCH Verlag, 2014.
- [11]. **Hau, Erich**. *Windkraftanlagen. Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit*. 5., neu bearbeitete. s.l. : Springer Vieweg Verlag, 2014.

- [12]. **Röther, Michael.** *Antriebe und Leistungselektronik. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg: Department Informations- und Elektrotechnik (Veranst.), 2012. – Skriptum zur Vorlesung.* 2015.
- [13]. **Weiß, Dimitri.** *Masterthesis. Entwurf und Aufbau eines Prüfstandes für Windenergie-Netzeinspeisung mit doppelt gespeistem Asynchrongenerator.* 2012.
- [14]. **Mühl, Thomas.** *Einführung in die Elektrische Messtechnik. Grundlagen, Messverfahren, Anwendungen.* 4. s.l. : Springer Vieweg, 2014.
- [15]. **Yokogawa Meters & Instruments Corporation.** *WT500 Power Analyzer.* 2008.
- [16]. **HBM.** *Benutzerhandbuch. Tragbarer Datenrekorder Gen3i.* 2014.
- [17]. —. *Benutzerhandbuch. Datenerfassungssoftware Perception Version 6.50.* 2014.
- [18]. **HAW Hamburg.** *Aufgabenstellung GEP4 - Drehstromasynchronmaschine.* s.l. : Labor für elektr. Antriebe und Leistungselektronik, 2011.
- [19]. **Zeneli, Shaban.** *Masterthesis. Steuerung und Regelung für eine Windenergie-Netzeinspeisung mit vollumrichter gespeistem Asynchrongenerator.* 2014.
- [20]. **Schlecht, Berthold.** *Maschinenelemente, Band 2. Getriebe - Verzahnungen - Lagerungen.* München : Pearson Deutschland GmbH, 2009.

IX Weiterer Anhang

Der weitere Anhang ist angefügt auf CD und einzusehen bei Prof. Dr.-Ing. Michael Röther.

Er enthält:

- Datenblätter und Betriebsanleitungen für die in der Arbeit erwähnten Geräte und Maschinen,
- sämtliche mithilfe von Matlab erstellten Graphen (.fig) sowie Rohdaten der Messungen (.mat),
- die in Matlab/Simulink verwendeten Simulationsmodelle (.slx) und Skripte (.m),
- die in der Arbeit in der Software Perception erstellen Messkonfigurationen (.pVWB) sowie ein Ausdruck der implementierten Formeln zur Berechnung (.pdf),
- und Internet-Verknüpfungen zu den in dieser Arbeit benutzten Internetquellen.

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, Datum

Unterschrift