

# ENTWICKLUNG EINES REKONFIGURIERBAREN BATTERIEMODULS

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik  
Technische Universität München

**Christian Hanzl**

Januar 2016

# Sperrvermerk

Hier steh der Sperrvermerk.

# Eidesstattliche Erklärung

Hier steht die eidesstattliche Erklärung.

# Abstract

Hier steht die Zusammenfassung

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Betrieb des doppeltgespeisten Asynchrongenerators</b>	<b>3</b>
1	Theoretische Grundlagen . . . . .	3
2	Einfluss der mechanischen Drehzahl auf die Generatorspannung . . . . .	8
3	Einfluss unterschiedlicher Frequenzen des Rotorstroms . . . . .	10
4	Einfluss des Rotorstroms . . . . .	12
5	Netzsynchronisation des DFIG . . . . .	15
6	Wirkleistungssteuerung . . . . .	17
6.1	Leistungssteuerung im untersynchronen Betrieb . . . . .	17
6.2	Leistungssteuerung im übersynchronen Betrieb . . . . .	20
6.3	Leistungsverteilung . . . . .	24
7	Blindleistungssteuerung . . . . .	26
7.1	Blindleistungssteuerung des Generators . . . . .	26
7.2	Blindleistungssteuerung des Inverters . . . . .	30
<b>3</b>	<b>Betrieb einer Windkraftanlage</b>	<b>34</b>
1	Theoretische Grundlagen . . . . .	34
2	Manuelle Leistungssteuerung . . . . .	36
3	Automatische Betriebsführung . . . . .	38
4	Einfluss des Pitchwinkels auf die Leistung . . . . .	40
5	Dynamisches Verhalten . . . . .	42
<b>4</b>	<b>Diskussion</b>	<b>44</b>

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Der Ständer einer Asynchronmaschine mit den drei um $120^\circ$ versetzten Wicklungen U, V und W . . . . .	3
2.2	Drei Ströme, die zeitlich um $120^\circ$ verschoben sind . . . . .	4
2.3	Die Ströme und magnetischen Felder im Ständer zum Zeitpunkt $t_1$ . . . . .	5
2.4	Die Ströme und magnetischen Felder im Ständer zum Zeitpunkt $t_2$ . . . . .	5
2.5	Magnetische Flussdichte des Läufers (blaue Kurve), in der Mitte die Läuferstäbe mit den in ihnen induzierten Strömen und unten die durch die Stöme im Läufer entstehende magnetische Flussdichte des Läufers (grüne Kurve) . .	6
2.6	Die Magnetischen Felder am Ort $x_0$ mit fortlaufender Zeit Grüne Kurve: Läufermagnetfeld Blaue Kurve: Ständermagnetfeld Rote Kurve: Resultierendes Magnetfeld . . . . .	7
2.7	Aufbau- und Verdrahtungsplan für die Versuche am doppelgespeisten Asynchrongenerator [1, S. 24] . . . . .	8
2.8	Das Instrument DFIG Steuerung [1, S. 26] . . . . .	8
2.9	Vom Generator erzeugte Statorspannung [1, S. 26] . . . . .	11
2.10	Induzierte Statorspannung bei verschiedenen Rotorströmen. Hellblaue Kurve: $f_{\text{Rot}} = 10$ Hz Dunkelblaue Kurve: $f_{\text{Rot}} = 0$ Hz [1, S. 27] . . . . .	13
2.11	Induzierte Statorspannung bei Variation der mechanischen Drehzahl für verschiedene Rotorströme. Gelbe Kurve: $I_{\text{Rot}} = 1$ A Rote Kurve: $I_{\text{Rot}} = 2$ A Blaue Kurve: $I_{\text{Rot}} = 3$ A [1, S. 28] . . . . .	14
2.12	Das Instrument Synchronisierer [1, S. 29] . . . . .	15
2.13	Generatorspannung untersynchronisiert [1, S. 30] . . . . .	16
2.14	Generatorspannung synchronisiert [1, S. 30] . . . . .	16
2.15	Das Instrument Leistungssteuerung [1, S. 32] . . . . .	17
2.16	Wirkleistungsabgabe an das Netz (blau) und Wirkleistungsabgabe des LSC (grün) bei steigender Wirkleistungserzeugung des Stators im untersynchronen Betrieb [1, S. 33] . . . . .	19
2.17	Wirkleistungsabgabe an das Netz (gelb) und Wirkleistungsabgabe des LSC (rot) bei steigender mechanischer Drehzahl. Blau dargestellt ist die konstant gehaltene Statorleistung [1, S. 33] . . . . .	19
2.18	Wirkleistungsabgabe an das Netz (blau) und Wirkleistungsaufnahme des LSC (grün) bei steigender Wirkleistungserzeugung des Stators im übersynchronen Betrieb [1, S. 35] . . . . .	22
2.19	Wirkleistungsabgabe an das Netz (blau) und Wirkleistungsaufnahme des LSC (grün) bei steigender mechanischer Drehzahl im übersynchronen Betrieb [1, S. 35] . . . . .	22

2.20	Berechnete Leistungsaufnahme des Rotors (blau) und gemessene Leistungsaufnahme des LSC(rot) [1, S. 37] . . . . .	25
2.21	Berechnete Leistungsaufnahme des Rotors (blau) und gemessene Leistungsaufnahme des LSC(rot) bei elimination der Verluste [1, S. 37] . . . . .	25
2.22	Verdrahtungsplan für die Blindleistungssteuerung [1, S. 39] . . . . .	26
2.23	Erzeugte Blindleistung bei Variation der Rotorströme [1, S. 39] . . . . .	27
2.24	Drehmoment bei Variation der Wirk- und Blindleistungserzeugung [1, S. 40] . . . . .	28
2.25	Vektoren von Strom und Spannung bei einer Wirkleistungserzeugung von 300 W [1, S. 41] . . . . .	28
2.26	Vektoren von Strom und Spannung bei einer Blindleistungserzeugung von +300 VAr [1, S. 41] . . . . .	29
2.27	Vektoren von Strom und Spannung bei einer Blindleistungserzeugung von +300 VAr [1, S. 41] . . . . .	29
2.28	Spannungs- und Stromvektor bei reiner Wirkleistungsaufnahme des LSC [1, S. 42] . . . . .	30
2.29	Spannung $U_{L1L3}$ (grün) und Strom $I_{L1}$ (orange) über der Zeit bei reiner Wirkleistung [1, S. 43] . . . . .	31
2.30	Spannung $U_{L1L3}$ (grün) und Strom $I_{L1}$ (orange) schließen einen Winkel von $30^\circ$ ein . . . . .	31
2.31	Spannungs- $U_{LSC}$ und Stromvektor $I_{LSC}$ bei +200 VAr [1, S. 42] . . . . .	32
2.32	Spannung $U_{L1L3}$ (grün) und Strom $I_{L1}$ (orange) bei +200 VAr [1, S. 44] . . . . .	32
2.33	Spannungs- $U_{LSC}$ und Stromvektor $I_{LSC}$ bei -200 VAr [1, S. 42] . . . . .	32
2.34	Spannung $U_{L1L3}$ (grün) und Strom $I_{L1}$ (orange) bei -200 VAr [1, S. 44] . . . . .	33
3.1	Leistungsbeiwert einer Windkraftanlage [1, S. 52] . . . . .	34
3.2	Leistungskennlinie einer Windkraftanlage [1, S. 56] . . . . .	35
3.3	Leerlaufdrehzahl des Generators bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten [1, S. 55] . . . . .	37
3.4	Maximal einspeisbare Leistung bei Variation der Windgeschwindigkeit [1, S. 56] . . . . .	37
3.5	Maximal einspeisbare Leistung für verschiedene Windgeschwindigkeiten bei automatischer Betriebsführung [1, S. 57] . . . . .	39
3.6	Erzeugte Leistung bei Variation der Windgeschwindigkeit mit Pitchwinkel als Parameter [1, S. 59] . . . . .	41
3.7	Erzeugte Leistung, Pitchwinkel und Drehzahl bei automatischer Pitchregelung [1, S. 60] . . . . .	41
3.8	Hinterlegtes Windprofil [1, S. 61] . . . . .	42
3.9	Hinterlegtes Windprofil mit einer maximalen Geschwindigkeit von $12 \frac{m}{s}$ . Rosa dargestellt ist die Drehzahl, blau die erzeugte Leistung und gelb der Pitchwinkel [1, S. 61] . . . . .	43
3.10	Hinterlegtes Windprofil mit einer maximalen Geschwindigkeit von $12 \frac{m}{s}$ . Rosa dargestellt ist die Drehzahl, blau die erzeugte Leistung und gelb der Pitchwinkel [1, S. 62] . . . . .	43

# Tabellenverzeichnis

2.1	Frequenz der Generatorspannung in Abhängigkeit der der mechanischen Drehzahl . . . . .	9
2.2	Einfluss der Rotordrehzahl . . . . .	10
2.3	Statorspannung bei variablem Rotorstrom und Rotorfrequenz als Parameter . . . . .	12
2.4	Statorspannung bei variabler mechanischer Drehzahl und Rotorstrom als Parameter . . . . .	12
2.5	Leistungsaufnahme LSC und Netz bei statorseitiger Leistungsabgabe von 0 W im untersynchronen Betrieb . . . . .	18
2.6	Leistungsaufnahme LSC und Netz bei Variation der statorseitigen Leistungsabgabe im untersynchronen Betrieb . . . . .	18
2.7	Leistungsaufnahme LSC und Netz bei Variation der mechanischen Drehzahl und konstanter statorseitiger Leistungsabgabe im untersynchronen Betrieb . . . . .	18
2.8	Leistungsaufnahme LSC und Netz bei statorseitiger Leistungsvorgabe von 0 W im übersynchronen Betrieb . . . . .	21
2.9	Leistungsaufnahme LSC und Netz bei Variation der statorseitigen Leistungsabgabe im übersynchronen Betrieb . . . . .	21
2.10	Leistungsaufnahme LSC und Netz bei Variation der mechanischen Drehzahl und konstanter statorseitiger Leistungsabgabe im übersynchronen Betrieb . . . . .	21
2.11	Leistungsaufnahme LSC und berechnete Leistungsaufnahme des LSC bei Variation der mechanischen Drehzahl und konstanter statorseitiger Leistungsabgabe . . . . .	24
2.12	Rotorströme bei Variation der Blindleistungsabgabe für verschiedene Drehzahlen . . . . .	27
2.13	Mechanisches Drehmoment bei Variation der Blindleistungs- und Wirkleistungsabgabe . . . . .	27
3.1	Leerlaufdrehzahl bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten . . . . .	36
3.2	Drehzahl und Leistungserzeugung bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten . . . . .	36
3.3	Drehzahl und Leistungserzeugung für verschiedenen Windgeschwindigkeiten bei automatischer Betriebsführung . . . . .	38
3.4	Windgeschwindigkeiten für verschiedene Betriebspunkte . . . . .	38
3.5	Leistungserzeugung bei Variation der Windgeschwindigkeit und des Pitchwinkels . . . . .	40
3.6	Messergebnisse bei automatischer Pitchregelung . . . . .	40



# 1 Einleitung

Die Energie des Windes ist eine der ersten Energieformen, die der Mensch sich zu Nutze machte. Erstmals wurde die Energie des Windes vor mehr als 5000 Jahren für den Betrieb von Schiffsegeln verwendet. Vor etwa 1300 Jahren hatten die Menschen in dem heutigen Iran die Windenergie erstmals zum Mahlen von Getreide mittels Windmühlen genutzt. Von da an hat sich die Technologie der Getreidemühlen über die Turmwindmühle hin zur Blockwindmühle stetig weiterentwickelt und hat mit der Holländer-Mühle ihren Höhepunkt erreicht. [1, S. 7]

Moderne Windkraftanlagen erreichen durch die aerodynamisch geformten Flügel wesentlich höhere Wirkungsgrade. Zum Antrieb der Rotorflächen bedient man sich des Auftriebsprinzips. Durch spezielle Formung der Rotorflächen entsteht über dem Rotor ein Unterdruck und unter dem Rotor ein Überdruck, sodass der Flügel nach oben gezogen wird. Die Entwicklung der Windturbine hat dabei noch keineswegs ihr Ende gefunden.

Heute werden Windräder für viele Anwendungen eingesetzt, beispielsweise für Bewässerungsanlagen und Sägewerke. Die größte Verwendung hat die Windkraftanlage jedoch in der Erzeugung von elektrischer Energie. So wurde 2013 in Deutschland ca. 8 % der Stromerzeugung durch Windenergie abgedeckt. [1, S. 11]

Windkrafträder werden sowohl an Land (Onshore) als auch auf See (Offshore) eingesetzt. Der Vorteil bei Anlagen auf See sind höhere Windgeschwindigkeiten bei gleich bleibender Bauhöhe. Außerdem sind dort Windflauten weniger häufig. Die durch die Rotorflächen erzeugte Drehbewegung wird mittels eines Generators in elektrischen Drehstrom umgewandelt und ins Netz eingespeist. Oft wird zwischen Rotor und Generator noch ein Getriebe eingesetzt um eine höhere Umdrehungsgeschwindigkeit zu erreichen. Als Generator kann ein Asynchrongenerator oder Synchrongenerator verwendet werden, wobei der Trend hin zu Synchrongeneratoren geht.

Die vorliegende Versuchsausarbeitung beschäftigt sich mit dem Betrieb eines doppeltgespeisten Asynchrongenerators sowie dem Betrieb einer Windkraftanlage als Ganzes, bei der ein doppeltgespeister Asynchrongenerator eingesetzt wird. Es wird der Einfluss verschiedener Windgeschwindigkeiten und also Folge dessen verschiedene mechanischer Drehzahlen untersucht. Ebenso wird der Einfluss des Rotorstroms und der Pitchwinkel auf die erzeugte Leistung untersucht. [2]

## 2 Betrieb des doppeltgespeisten Asynchrongenerators

Bei dem doppeltgespeisten Asynchrongenerator, auch double fed induction generator genannt (kurz DFIG), handelt es sich um eine Asynchronmaschine, bei der mit Hilfe von Schleifkontakten der Läufer nach Außen geführt ist. Der Generator kann somit am Ständer und am Läufer angeschlossen werden, daher auch sein Name. Auf diese Weise kann direkt auf den Strom und damit auf das magnetische Geschehen im Läufer Einfluss genommen werden.

Bevor auf die durchgeführten Versuche und deren Interpretation eingegangen wird, soll zuerst das Grundprinzip einer Asynchronmaschine mit kurzgeschlossenem Käfigläufer erklärt werden.

### 1 Theoretische Grundlagen

Eine Asynchronmaschine mit einer Polpaarzahl von 1 hat im Ständer drei Wicklungen U, V und W, die räumlich um  $120^\circ$  zueinander versetzt sind, siehe Abbildung 2.1. Bei höherer Polpaarzahl sind die  $120^\circ$  durch die Polpaarzahl zu teilen um auf die tatsächliche räumliche Versetzung zu kommen.

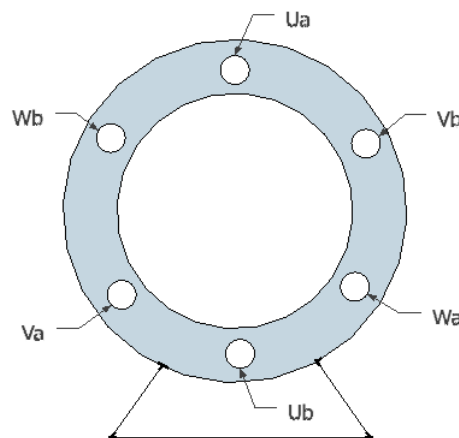


Abbildung 2.1: Der Ständer einer Asynchronmaschine mit den drei um  $120^\circ$  versetzten Wicklungen U, V und W

Jede Wicklung hat dabei einen Ein- und einen Ausgang. Der Eingang wird mit dem Index a gekennzeichnet ( $U_a$ ,  $V_a$ ,  $W_a$ ), Ausgänge mit b ( $U_b$ ,  $V_b$ ,  $W_b$ ). Diese Wicklungen werden nun mit drei Strömen bzw. Spannungen gespeist, die eine zeitliche Verschiebung von jeweils  $120^\circ$  zueinander haben, siehe Abbildung 2.2. Fließt in einer Wicklung ein positiver Strom, so wird dies mit einem Kreuz am Eingang und mit einem Punkt am Ausgang der Wicklung gekennzeichnet. Umgekehrt wird der Eingang mit einem Punkt und der Ausgang mit einem Kreuz versehen, wenn der Strom in der Wicklung negativ ist.

Werden die Wicklungen nun bestromt, entsteht ein magnetisches Feld. Mit Hilfe der Rechten-Hand-Regel ist zu erkennen, dass jede Wicklung ein magnetisches Feld erzeugt, dass sich sinusförmig im Betrag ändert. Die Überlagerung der drei magnetischen Felder der Phasen U, V und W ergeben in Summe ein magnetisches Feld, welches sich mit konstanter Geschwindigkeit dreht und dessen Betrag konstant ist.

Für die zwei Zeitpunkte  $t_1$  und  $t_2$  soll die Richtung des magnetischen Feldes hergeleitet werden. Es ist zu sagen, dass die Pfeile in die Richtung zeigen, in der die magnetischen Felder zu dem gerade betrachteten Zeitpunkt ihr positives Maximum haben.

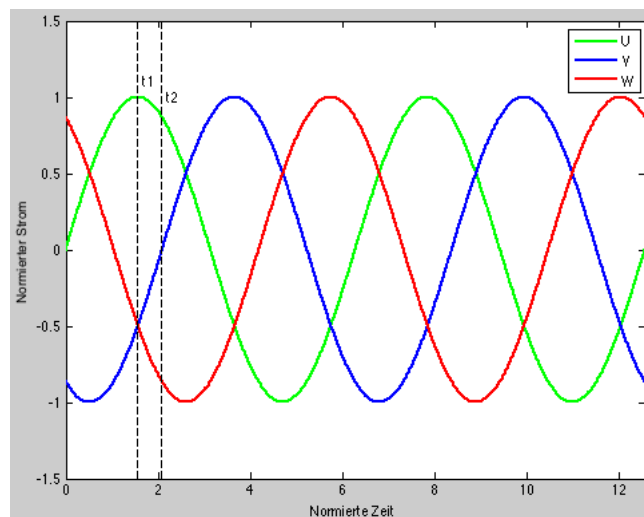


Abbildung 2.2: Drei Ströme, die zeitlich um  $120^\circ$  verschoben sind

Zum Zeitpunkt  $t_1$  hat die Phase U einen positiven Strom mit der Amplitude  $+1$ , Phase V und W einen Strom mit der Amplitude  $-\frac{1}{2}$ . Trägt man nach obiger Notation die Richtungen der Ströme in den Wicklungen ein und mit Hilfe der Rechten-Hand-Regel das magnetische Feld, erhält man für jede Wicklung einen Raumzeiger in Richtung des magnetischen Feldes, siehe Abbildung 2.3. Durch Superposition der magnetischen Felder erhält man einen resultierenden Raumzeiger der mit schwarz eingezeichnet ist.

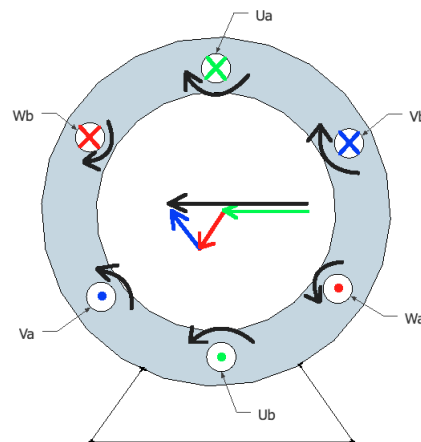


Abbildung 2.3: Die Ströme und magnetischen Felder im Ständer zum Zeitpunkt  $t_1$

Zum Zeitpunkt  $t_2$  hat die Phase U den Strom  $+\frac{\sqrt{3}}{2}$ , Phase V ist 0 und Phase W ist  $+\frac{\sqrt{3}}{2}$ . In die Wicklung vom Ständer werden wieder die Ströme eingezeichnet und das sich ergebende magnetische Feld, siehe Abbildung 2.4. Es ist ersichtlich, dass sich der schwarze Zeiger vom Zeitpunkt  $t_1$  zu  $t_2$  um einen gewissen Winkel weitergedreht hat, die Länge des Zeigers jedoch gleich geblieben ist. Bei Anregung mit einem zeitlich sinusförmigen Strom dreht sich also das magnetische Feld des Ständers sich mit einer konstanten Winkelgeschwindigkeit. Der Betrag des Feldes ist jedoch konstant.

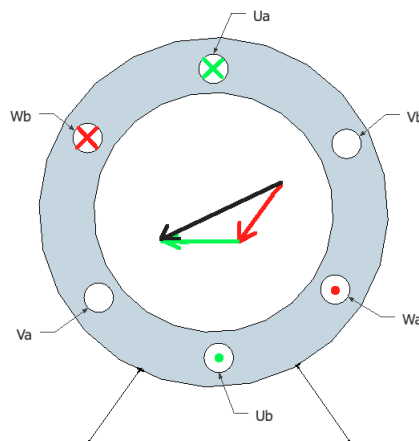


Abbildung 2.4: Die Ströme und magnetischen Felder im Ständer zum Zeitpunkt  $t_2$

Stellt man sich nun vor, man würde den Ständer abrollen und bei gestoppter Zeit die magnetische Flussdichte entlang des Ständers messen, so würde diese eine komplette Sinusschwingung durchlaufen. In Abbildung 2.5 ist oben blau dargestellt die magnetische Flussdichte entlang des Ständers (ein kompletter Umlauf des Ständers entspricht  $360^\circ$ ). Lässt man die

Zeit nun weiterlaufen, dreht sich wie oben beschrieben das magnetische Feld mit einer konstanten Winkelgeschwindigkeit weiter. Bei gedanklich abgerollten Ständer bewegt sich das magnetische Feld mit einer konstanten Geschwindigkeit  $v$  nach rechts, abhängig von der Netzfrequenz des Ständerstromes. In der Mitte von Abbildung 2.5 sind die Leiterstäbe des Läufers dargestellt. Bei Asynchrongeneratoren bewegen sich diese mit einer zusätzlichen Geschwindigkeit  $dv$  nach rechts. Mit der Drei-Finger-Regel (rechte Hand) kann die Richtung des induzierten Stromes in den Leiterstäben bestimmt werden. Die Elektronen werden auf Grund der Drehbewegung des Läufers nach rechts bewegt (Daumen zeigt nach rechts). Falls das magnetische Feld des Ständers nach oben zeigt (Zeigefinger zeigt nach oben) ist dadurch die Lorentzkraft und damit der Strom aus der Blattebene heraus gerichtet, was mit einem Punkt im Leiter gekennzeichnet wird. Wenn das magnetische Feld nach unten gerichtet ist (Zeigefinger zeigt nach unten), zeigt die Lorentzkraft und damit der Strom in die Blattebene hinein, was mit einem Kreuz im Leiter resultiert.

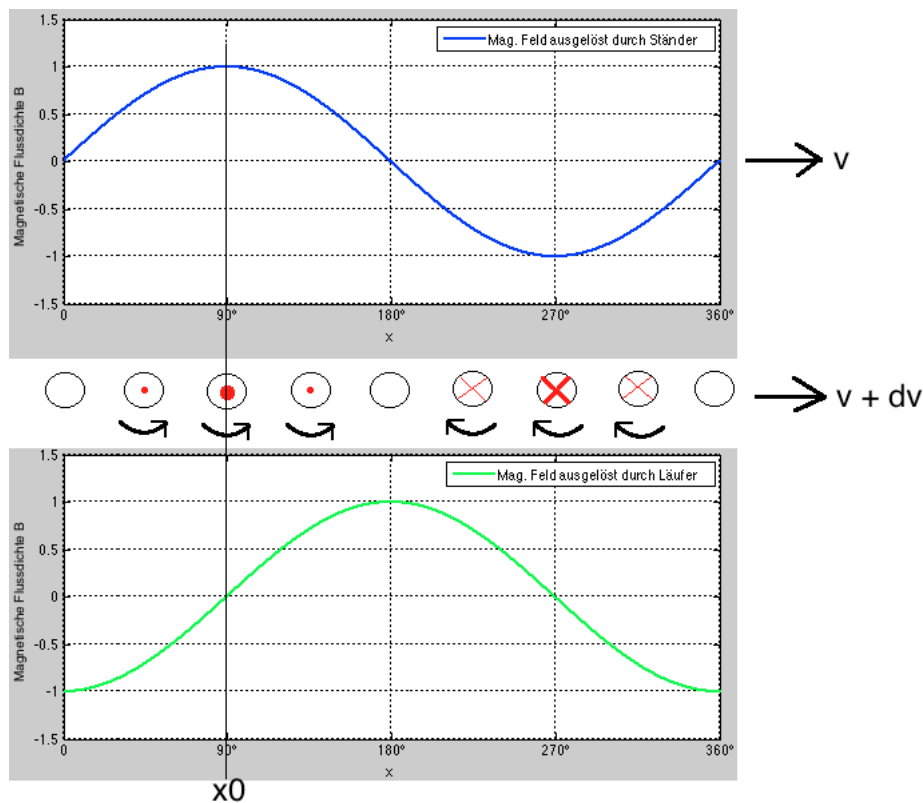


Abbildung 2.5: Magnetische Flussdichte des Läufers (blaue Kurve), in der Mitte die Läuferstäbe mit den in ihnen induzierten Strömen und unten die durch die Ströme im Läufer entstehende magnetische Flussdichte des Läufers (grüne Kurve)

Die in den Leiterstäben fließenden Ströme erzeugen nun ihrerseits wieder ein magnetisches Feld (Läufermagnetfeld), siehe grüne Kurve in Abbildung 2.5. Ständermagnetfeld und Läufermagnetfeld überlagern sich und bilden ein resultierendes Magnetfeld  $B_{\text{res}}$ . An dieser Stelle

sei noch einmal darauf hingewiesen, dass Läufermagnetfeld, Ständermagnetfeld als auch das resultierende Magnetfeld eine komplette Schwingung entlang des Umfangs der Maschine zu jedem Zeitpunkt bilden. Die Geschwindigkeit des Läufermagnetfeldes, mit der sich dieses in der Maschine dreht, ist dabei gleich der Geschwindigkeit  $v$ . Es bewegt sich nicht mit der Geschwindigkeit der Leiterstäbe ( $v + dv$ ). Die zusätzliche Geschwindigkeit  $dv$  der Leiterstäbe hat lediglich Einfluss auf die Größe des in den Leiterstäben induzierten Stromes und damit auf die Größe des Läufermagnetfeldes. Ist  $dv$  groß, so ist auch das Läufermagnetfeld groß.

An der Stelle  $x_0$  in Abbildung 2.5 wird nun die magnetische Flussdichte mit fortlaufender Zeit betrachtet. Ständermagnetfeld bildet über der Zeit einen Sinus, Läufermagnetfeld einen Cosinus, siehe Abbildung 2.6. Rot dargestellt ist das resultierende Magnetfeld, welches durch Addition des Ständer- und Läufermagnetfeldes entstehen.

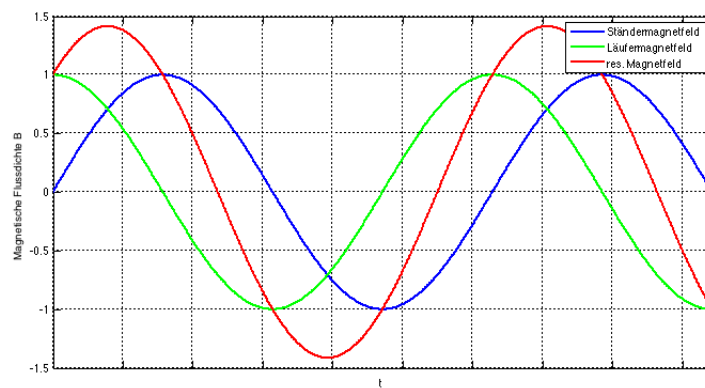


Abbildung 2.6: Die Magnetischen Felder am Ort  $x_0$  mit fortlaufender Zeit

Grüne Kurve: Läufermagnetfeld

Blaue Kurve: Ständermagnetfeld

Rote Kurve: Resultierendes Magnetfeld

Damit maximale Wirkleistung vom Generator erzeugt wird, müsste das resultierende Magnetfeld dem Ständermagnetfeld um  $90^\circ$  voraus eilen.

Das Ständermagnetfeld wird durch den Strom in den Ständerwicklungen hervorgerufen. Dieser Strom eilt der Ständerspannung um  $90^\circ$  nach, was reinem induktiven Verhalten entspricht. Um reine Wirkleistung zu erzeugen, muss der Strom also um  $90^\circ$  nach vorne geschoben werden.

Dies kann durch ein Verschieben des resultierenden magnetischen Feldes nach vorne um  $90^\circ$  gegenüber dem Ständermagnetfeld erreicht werden. Die rote Kurve muss also die gleiche Phasenlage wie die grüne Kurve haben. Dies kann nur durch ein fehlendes Ständermagnetfeld oder durch ein unendlich großes Läufermagnetfeld erreicht werden. Beide Optionen sind in der Realität nicht erreichbar, sodass sich ein Asynchrongenerator zwangsläufig immer induktiv verhält.

## 2 Einfluss der mechanischen Drehzahl auf die Generatorspannung

### Versuchsaufbau

Die Schaltung wird entsprechend dem Aufbau- und Verdrahtungsplan in Abbildung 2.7 verdrahtet. Für alle weiteren Versuche des doppelgespeisten Asynchrongenerators bleibt die Verdrahtung unverändert, weshalb in den nachfolgenden Kapitel der Versuchsaufbau nicht erneut beschrieben wird.

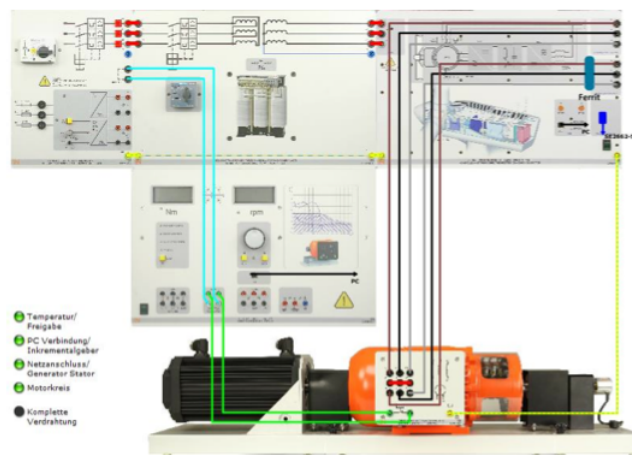


Abbildung 2.7: Aufbau- und Verdrahtungsplan für die Versuche am doppelgespeisten Asynchrongenerator [1, S. 24]

Die USB-Schnittstelle des Servo-Maschinenprüfstandes wird mit dem PC verbunden und der Modus SPEED CONTROL wird gewählt. Außerdem wird am PC das Instrument DFIG-Control geöffnet, siehe Abbildung 2.8.

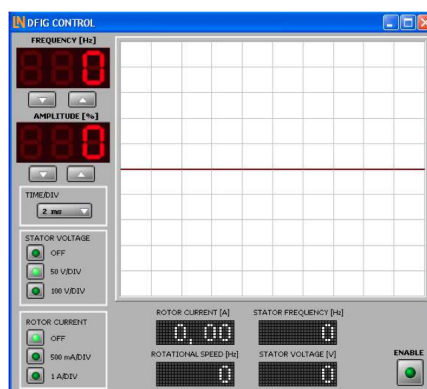


Abbildung 2.8: Das Instrument DFIG Steuerung [1, S. 26]

### Versuchsbeschreibung

Über das Instrument DFIG Control wird die Amplitude des Statorstroms in Prozent  $\frac{I}{I_N}$  vorgegeben, welche von dem Asynchrongenerator erzeugt werden soll. Außerdem wird die Frequenz des Rotorstroms eingestellt.

In diesem Versuch wird die Amplitude auf 40% und die Frequenz des Rotorstroms auf 0 Hz eingestellt. Anschließend wird der Asynchrongenerator am Rotor mit einer mechanischen Drehzahl von  $1200 \frac{1}{min}$  angetrieben. Gemessen wird die Frequenz der Generatorspannung an der Statorseite. Diese Messung wird für eine mechanische Drehzahl von  $1300 \frac{1}{min}$  und  $1400 \frac{1}{min}$  wiederholt.

### Messung

Die gemessenen Frequenzen der Generatorspannung für verschiedene mechanische Drehzahlen sind in Tabelle 2.1 zu sehen.

Tabelle 2.1: Frequenz der Generatorspannung in Abhängigkeit der der mechanischen Drehzahl

Mechanische Drehzahl	Frequenz der Statorspannung
$1200 \frac{1}{min}$	40 Hz
$1300 \frac{1}{min}$	44 Hz
$1400 \frac{1}{min}$	47 Hz

### Diskussion

Bei der Umrechnung der mechanischen Drehzahlen aus Tabelle 2.1 von der Einheit  $\frac{1}{min}$  auf  $\frac{1}{s}$  (Hz) ist zu erkennen, dass die mechanische Drehzahl des Rotors gerade der Frequenz der induzierten Generatorspannung entspricht. Der Asynchrongenerator verhält sich bei Erregung mit einem Gleichstrom also wie ein Synchrongenerator.



### 3 Einfluss unterschiedlicher Frequenzen des Rotorstroms

#### Versuchsbeschreibung

Am Instrument DFIG Control wird die Amplitude wieder auf 40% und die Frequenz des Rotorstroms auf 0 Hz eingestellt. Die mechanische Drehzahl wird zuerst auf  $1200 \frac{1}{min}$  eingestellt. Nun ist die Frequenz des Rotorstromes so einzustellen, dass die Frequenz der Statorspannung auf 50 Hz ansteigt. Diese Messungen sind mit einer mechanischen Drehzahl von  $1300 \frac{1}{min}$  und  $1400 \frac{1}{min}$  zu wiederholen und die Frequenz des Rotorstroms wird notiert.

#### Messung

In Tabelle 2.2 sind die notwendigen Frequenzen des Rotorstroms dargestellt, um für die verschiedenen mechanischen Drehzahlen eine Statorspannung mit einer Frequenz von 50 Hz zu erzeugen.

Tabelle 2.2: Einfluss der Rotordrehzahl

Mechanische Drehzahl	Frequenz des Rotorstroms
$1200 \frac{1}{min}$	10 Hz
$1300 \frac{1}{min}$	7 Hz
$1400 \frac{1}{min}$	3 Hz

## Diskussion

Aus den Messungen in Tabelle 2.2 ist zu erkennen, dass die Statorfrequenz  $f_S$  durch Addition von Rotorfrequenz  $f_{\text{Rot}}$  und mechanischer Drehzahl  $f_m$  entsteht, siehe Gleichung 3.1. Korrekterweise ist zu sagen, dass die Frequenz des Rotormagnetfeldes  $f_{\text{Magnetfeld,Rotor}}$  die Summe von mechanischer Rotordrehzahl und Rotorfrequenz des Stroms ist. Die Frequenz der in den Ständer induzierten Spannung ist lediglich abhängig von der Frequenz des Rotormagnetfeldes.

$$f_S = f_{\text{Magnetfeld,Rotor}} = f_{\text{Rot}} + f_m \quad (2.1)$$

Folglich lässt sich bei variabler mechanischer Drehzahl, durch passende Änderung der Rotorfrequenz, die Statorfrequenz konstant halten. Es ist auch möglich, die Statorfrequenz bei konstanter mechanischer Drehzahl über die Rotorfrequenz zu ändern.

Stellt man Amplitude und Frequenz des Rotorstroms nun so ein, dass die Statorspannung 300V und Statorfrequenz 50 Hz beträgt, könnte theoretisch, bei richtiger Phasenlage, der Versuchsaufbau zum Netz zugeschaltet werden und Energie eingespeist werden. Die 300 V müssen deshalb eingestellt werden, da zwischen Netz und Generator ein Koppeltransformator geschaltet ist, der sekundärseitig 3 x 300 V und primärseitig 3 x 400 V Nennspannung hat. Die erzeugte Statorspannung ist in Abbildung 2.9 zu sehen.

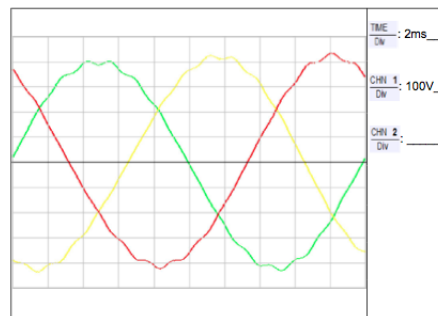


Abbildung 2.9: Vom Generator erzeugte Statorspannung [1, S. 26]

## 4 Einfluss des Rotorstroms

### Versuchsbeschreibung

Nun soll der Einfluss des Rotorstroms  $I_{\text{Rot}}$  und dessen Frequenz  $f_{\text{Rot}}$  auf die Statorspannung  $U_S$  untersucht werden. Die USB-Schnittstelle ist weiterhin mit dem PC verbunden und das Instrument DFIG-Control ist geöffnet. Am Maschinenprüfstand wird der Modus SPEED CONTROL gewählt und eine Drehzahl von  $1200 \frac{1}{\text{min}}$  eingestellt. Die Frequenz des Rotorstroms wird auf 0 Hz gestellt und für verschiedene Stromamplituden des Rotorstromes die Statorspannung gemessen. Diese Messungen werden für 10 Hz wiederholt.

Anschließend soll der Einfluss der mechanischen Drehzahl des Rotors  $f_m$  auf die Statorspannung  $U_S$  bei verschiedenen Rotorströmen  $I_{\text{Rot}}$  untersucht werden. Die Frequenz des Rotorstroms wird auf 0 Hz bei einer Amplitude von zunächst 1 A gestellt. Die mechanische Drehzahl wird von  $1200 \frac{1}{\text{min}}$  in Schritten auf  $1450 \frac{1}{\text{min}}$  erhöht und die Statorspannung gemessen. Diese Messung wird für die Rotorströme 2 A und 3 A wiederholt.

### Messung

Die Messergebnisse der Statorspannung  $U_S$  bei Variation des Rotorstroms  $I_{\text{Rot}}$  mit der Rotorfrequenz  $f_{\text{Rot}}$  als Parameter sind in Tabelle 2.3 zu sehen.

Tabelle 2.3: Statorspannung bei variablem Rotorstrom und Rotorfrequenz als Parameter

$f_{\text{Rot}}$ [Hz]	$I_{\text{Rot}}$ [A]	0.5	1	1.5	2	2.5	3
0	$U_S$ [V]	46	106	152	208	235	270
10	$U_S$ [V]	58	132	190	250	300	330

In Tabelle 2.4 sind die Messungen der Statorspannung  $U_S$  bei Variation der mechanischen Drehzahl  $f_m$  mit Rotorstrom  $I_{\text{Rot}}$  als Parameter gelistet.

Tabelle 2.4: Statorspannung bei variabler mechanischer Drehzahl und Rotorstrom als Parameter

$I_{\text{Rot}}$ [A]	$f_m$ [ $\frac{1}{\text{min}}$ ]	1200	1250	1300	1350	1400	1450
1	$U_S$ [V]	110	115	120	125	130	137
2	$U_S$ [V]	197	205	215	225	235	242
3	$U_S$ [V]	270	280	290	300	310	320

### Diskussion

Die Messergebnisse in Tabelle 2.3 mit variablem Rotorstrom und der Rotorfrequenz als Parameter zeigen, dass die induzierte Statorspannung mit steigendem Rotorstrom zunächst linear steigt, siehe Abbildung 2.10. Erst ab ca. 2 A flacht die Kurve langsam ab. Dies liegt an der Sättigung des Eisens in der Maschine. Weiterhin steigt die Statorspannung bei Erhöhung der Rotorfrequenz. Hellblau dargestellt ist die Statorspannung bei einer Rotorfrequenz von 10 Hz. Die dunkelblaue Kurve beschreibt die Statorspannung bei einer Rotorfrequenz von 0 Hz.

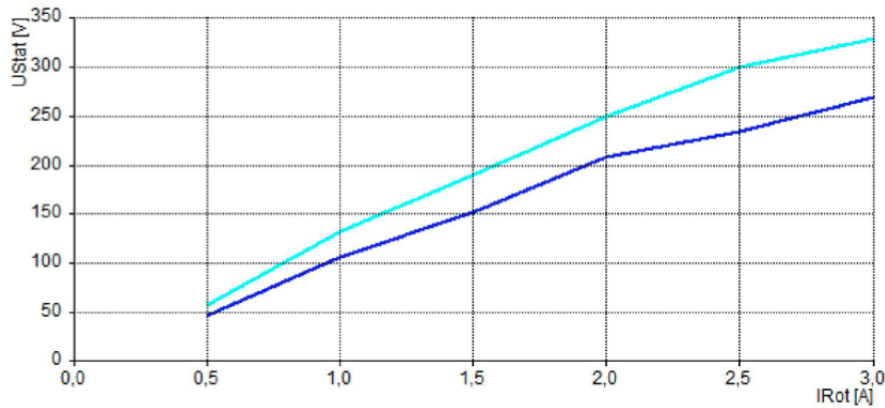


Abbildung 2.10: Induzierte Statorspannung bei verschiedenen Rotorströmen.

Hellblaue Kurve:  $f_{\text{Rot}} = 10 \text{ Hz}$

Dunkelblaue Kurve:  $f_{\text{Rot}} = 0 \text{ Hz}$  [1, S. 27]

Die Erhöhung der induzierten Statorspannung  $U_S$  bei steigendem Rotorstrom  $I_{\text{Rot}}$  und konstanter Frequenz des Rotorstroms  $f_{\text{Rot}}$  ist wie folgt zu erklären:

Das durch den Rotorstrom erzeugte magnetische Feld wird mit steigendem Rotorstrom stärker, seine Amplitude wird größer. Soll das magnetische Feld bei gleicher Frequenz eine volle Schwingung absolvieren, muss die Änderung beziehungsweise die Steigung stärker ausfallen. Bei Betrachtung der induzierten Spannung in differentieller Form, verhält sich diese nach Gleichung 3.2.  $\Phi$  ist dabei das Magnetische Feld. Bei einer größeren Steigung steigt folglich die induzierte Spannung  $U_{\text{ind}}$ .

$$U_{\text{ind}} = -\frac{d\phi}{dt} \quad (2.2)$$

Falls nun zusätzlich die Frequenz des Rotorstroms  $f_{\text{Rot}}$  erhöht wird, steigt die Frequenz des Rotormagnetfeldes  $f_{\text{Magnetfeld,Rotor}}$ . Das Rotormagnetfeld hat eine höhere Geschwindigkeit, es gibt über der Zeit gesehen eine stärkere Änderung und die induzierte Spannung steigt.

In Abbildung 2.11 ist die Statorspannung  $U_S$  bei Variation der mechanischen Drehzahl  $f_m$  abgebildet. Die gemessene Spannung in Tabelle 2.4 steigt linear mit der Drehzahl. Dies liegt

an der erhöhten Geschwindigkeit des magnetischen Feldes, welches sich um den Rotor dreht. Die größere Geschwindigkeit bedeutet eine größere Änderung des magnetischen Feldes und die induzierte Statorspannung steigt wie schon oben beschrieben.

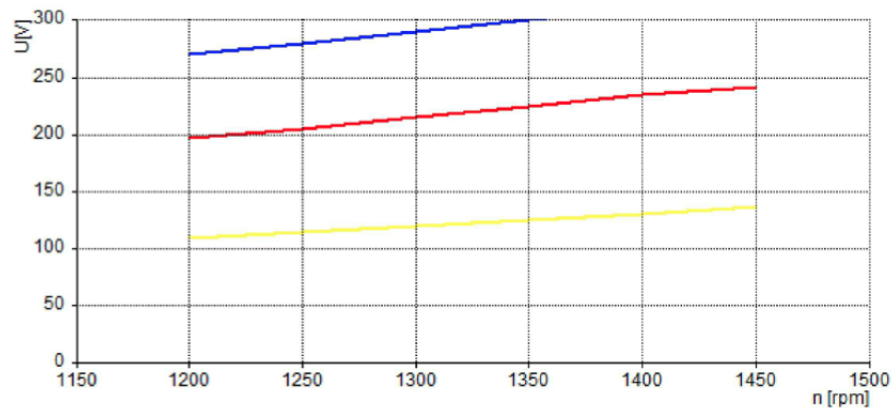


Abbildung 2.11: Induzierte Statorspannung bei Variation der mechanischen Drehzahl für verschiedene Rotorströme.

Gelbe Kurve:  $I_{\text{Rot}} = 1 \text{ A}$

Rote Kurve:  $I_{\text{Rot}} = 2 \text{ A}$

Blaue Kurve:  $I_{\text{Rot}} = 3 \text{ A}$  [1, S. 28]

Die Differenz der Statorspannung zwischen Blauer und Roter Kurve ist jedoch weniger als zwischen Roter und Gelber Kurve, obwohl die Differenz der Rotorströme in beiden Fällen 1 A beträgt. Die Erklärung liegt wieder in der Sättigung des Eisens.

## 5 Netzsynchrisation des DFIG

### Versuchsbeschreibung

Um einen Generator ans Netz zu schalten, müssen folgende Kriterien erfüllt sein:

- Frequenz Netz = Frequenz Generator
- Spannung Netz = Spannung Generator
- Phasenlage Netz = Phasenlagen Generator

Ist einer der Punkte nicht erfüllt, kommt es zu Ausgleichsströmen zwischen Generator und Netz. Diese Ausgleichströme können so groß werden, dass Anlagenteile zerstört werden.

Für diesen Teilversuch wird das Instrument SYNCHRONISIERER (USB-Schnittstelle ist weiterhin mit dem PC verbunden) geöffnet, siehe Abbildung 2.12.

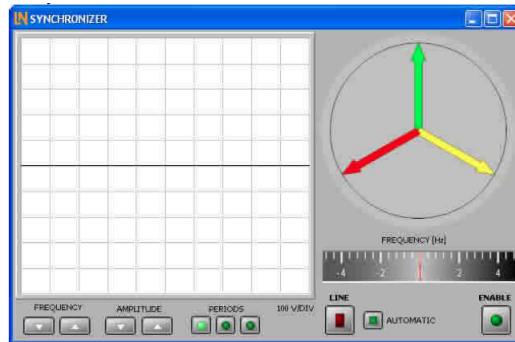


Abbildung 2.12: Das Instrument Synchronisierer [1, S. 29]

Am Maschinenprüfstand wird der Modus SPEED CONTROL gewählt und eine Drehzahl von  $1200 \frac{1}{min}$  eingestellt. Im Instrument wird die Amplitude soweit erhöht, bis die Statorspannung etwa 80% der Netzspannung beträgt. Anschließend wird die Generatorfrequenz so weit erhöht, bis sie mit der Netzfrequenz übereinstimmt. Durch variieren der Amplitude und der Frequenz des Rotorstroms wird die Generatorspannung so angepasst, dass alle Kriterien für das Zuschalten ans Netz erfüllt sind. Passt die Phasenlage von Netz und Generator nicht überein, so kann durch eine kleine Veränderung in der Frequenz des Generators die Phasenlage des Generators verschoben werden werden. Das Synchronisieren des Generators wird mit einer mechanischen Drehzahl von  $1300 \frac{1}{min}$  und  $1400 \frac{1}{min}$  wiederholt.

### Messung

In Abbildung 2.13 ist die Generatorspannung in ihrer Amplitude unter der Netzspannung und eine Phasenverschiebung von ca.  $90^\circ$ . Es kann also nicht zugeschaltet werden.

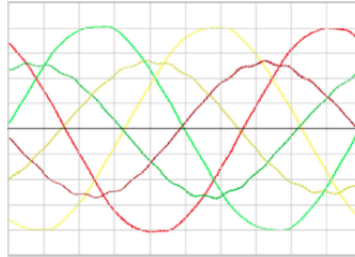


Abbildung 2.13: Generatorspannung untersynchronisiert [1, S. 30]

In Abbildung 2.14 hingegen ist die Spannung in Phase, hat die gleiche Frequenz und die gleiche Amplitude.

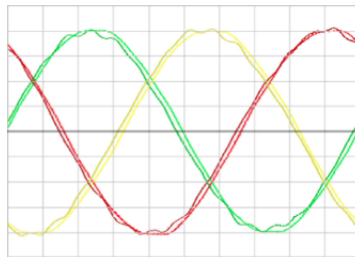


Abbildung 2.14: Generatorspannung synchronisiert [1, S. 30]

### Diskussion

Die Statorspannung des Generators hat in Abbildung 2.14 eine gewisse Welligkeit, sie ist kein idealer Sinus. Diese Welligkeit entsteht durch den Wechselrichter, der den Rotorstrom bereitstellt. Durch erhöhen der Schaltfrequenz des Wechselrichters kann die Welligkeit verringert werden. Dies bringt jedoch den Nachteil mit sich, dass der Wechselrichter mehr Schaltverluste erzeugt. Eine andere Möglichkeit, die Welligkeit zu reduzieren, ist die drei Phasen zur Rotoransteuerung um einen Ferrit zu wickeln. Dadurch wird der Strom geglättet. Eine kleine Restwelligkeit bleibt jedoch immer.

Das Synchronisieren wurde am Ende mit dem Automatik Modus wiederholt, ohne dabei ans Netz zu schalten. Währenddessen wurde die mechanische Generator Drehzahl zwischen  $1200 \frac{1}{min}$  und  $1400 \frac{1}{min}$  variiert. Die Automatik hat in diesem Fall die Generatorspannung, -Frequenz und -Phasenlage so geregelt, dass sie synchron mit dem Netz waren.

## 6 Wirkleistungssteuerung

### 6.1 Leistungssteuerung im untersynchronen Betrieb

#### Versuchsbeschreibung

Das Instrument LEISTUNGSSTEUERUNG wird geöffnet und der Modus STATOR POWER ausgewählt, siehe Abbildung 2.15, die USB-Schnittstelle ist weiterhin mit dem PC verbunden.

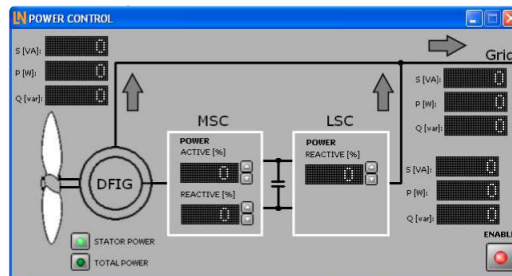


Abbildung 2.15: Das Instrument Leistungssteuerung [1, S. 32]

Am Maschinenprüfstand wird der Modus SPEED CONTROL gewählt und eine Drehzahl von  $1200 \frac{1}{min}$  eingestellt. Durch betätigen des Enable Button wird der Generator automatisch mit dem Netz synchronisiert und zugeschaltet.

Zuerst wird eine Leistungsabgabe von 0 W am Stator eingestellt und die vom Line-Sided-Converter - kurz LSC - (Netzseitiger Umrichter) aufgenommene Leistung, die für die Erregung des Generators notwendig ist, gemessen. Im Anschluss wird die Drehzahl langsam auf  $1500 \frac{1}{min}$  erhöht und die Wirkleistungsaufnahme des LSC beobachtet.

Im zweiten Teilversuch wird eine Drehzahl von  $1300 \frac{1}{min}$  gewählt und am Motor-Sided-Converter - kurz MSC - (Motorseitiger Umrichter) die Erregung so eingestellt, dass sich statorseitig die vorgegebenen Leistungen einstellen. Gemessen wird dabei die Leistungsaufnahme des LSC und des Netzes.

Im dritten Teilversuch wird wieder eine Drehzahl von  $1200 \frac{1}{min}$  gewählt und der MSC so eingestellt, dass statorseitig 400 W Wirkleistung erzeugt werden. Anschließend wird die Drehzahl des Generators erhöht und durch manuelles Nachregeln des MSC die erzeugte Wirkleistung auf 400 W konstant gehalten. Gemessen wird wieder die vom LSC und vom Netz aufgenommene Leistung.



## Messung

Die Messergebnisse der Leistungsaufnahme des LSC bei statorseitiger Leistungsabgabe von 0 W sind in Tabelle 2.5 dargestellt.

Tabelle 2.5: Leistungsaufnahme LSC und Netz bei statorseitiger Leistungsabgabe von 0 W im untersynchronen Betrieb

Wirkleistungs LSC	-75 W
Wirkleistung Netz	-75 W

In Tabelle 2.6 sind die Leistungsaufnahmen des LSC und Netzes bei Variation der statorseitigen Leistungsabgabe zu sehen.

Tabelle 2.6: Leistungsaufnahme LSC und Netz bei Variation der statorseitigen Leistungsabgabe im untersynchronen Betrieb

Statorleistung	P [W]	0	50	100	150	200	300	400	500
Netz	P [W]	-75	-31	7	50	90	168	236	302
LSC	P [W]	-75	-80	-88	-100	-110	-135	-163	-193

In Tabelle 2.7 sind die Leistungsaufnahmen des LSC und Netzes bei Variation der mechanischen Drehzahl bei konstanter statorseitiger Leistungsabgabe zu sehen.

Tabelle 2.7: Leistungsaufnahme LSC und Netz bei Variation der mechanischen Drehzahl und konstanter statorseitiger Leistungsabgabe im untersynchronen Betrieb

mech. Drehzahl	$n \left[ \frac{1}{min} \right]$	1200	1250	1300	1350	1400	1450
Netz	P [W]	203	220	236	250	266	283
LSC	P [W]	-194	-178	-163	-147	-132	-116
Statorleistung	P [W]	400	400	400	400	400	400

## Diskussion

Aus den Messergebnissen in Tabelle 2.5 des ersten Teilversuchs ist erkennbar, dass der LSC reine Wirkleistung aus dem Netz aufnimmt. Diese wird für die Erregung verwendet. Eine Veränderung der mechanischen Drehzahl auf  $1500 \frac{1}{min}$  hat dabei keinen Einfluss auf die aufgenommene Erregerleistung. Der MSC regelt die Erregung so, dass Statorspannung, -Frequenz und Phasenlage identisch mit dem Netz sind.

Aus den Messungen in Tabelle 2.6 des zweiten Teilversuchs ist erkennbar, dass bei steigender Wirkleistungserzeugung des Stators auch die Wirkleistungsaufnahme zur Erregung des Rotors steigt, siehe in Abbildung 2.16 grüne Kurve. Es ist deutlich zu sehen, dass der Zusammenhang linear ist. Die Erklärung ist, dass der Rotorstrom steigen muss, damit die magnetische Flussdichte und damit das magnetische Feld stärker werden. Folglich steigt die

induzierte Spannung im Stator und es fließt mehr Strom aus dem Stator in das Netz. Die ans Netz abgegebene Leistung (blaue Kurve) ist die Differenz zwischen der vom Generator erzeugten Leistung an der Statorseite und der benötigten Leistung zur Erregung des Rotors.

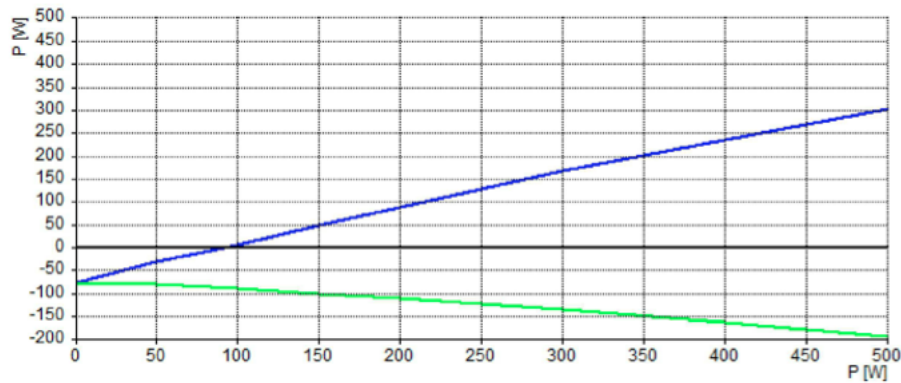


Abbildung 2.16: Wirkleistungsabgabe an das Netz (blau) und Wirkleistungsabgabe des LSC (grün) bei steigender Wirkleistungserzeugung des Stators im unsynchronen Betrieb [1, S. 33]

Die Messungen des dritten Teilversuchs sind in Abbildung 2.17 dargestellt. Steigt bei konstanter Leistungsabgabe des Stators die mechanische Drehzahl des Rotors, nimmt der LSC weniger Leistung aus dem Netz auf, siehe rote Kurve.

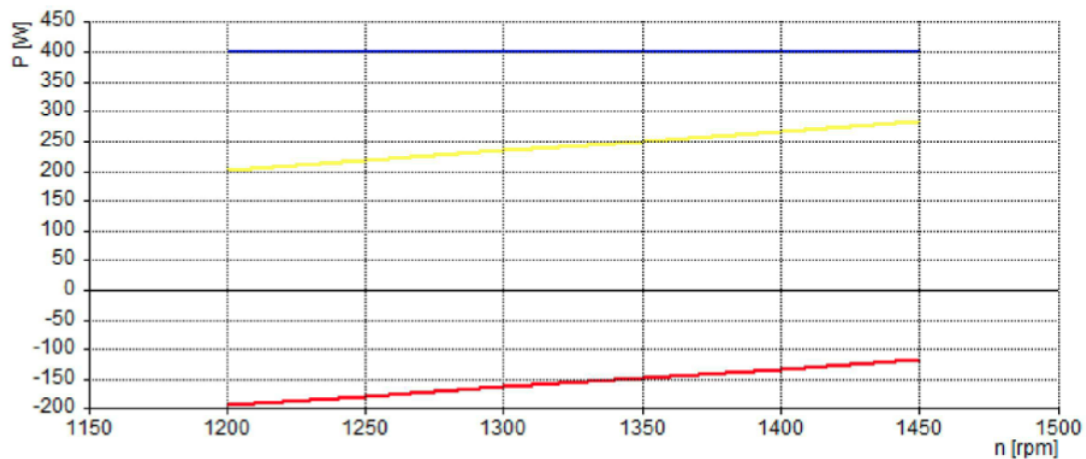


Abbildung 2.17: Wirkleistungsabgabe an das Netz (gelb) und Wirkleistungsabgabe des LSC (rot) bei steigender mechanischer Drehzahl. Blau dargestellt ist die konstant gehaltene Statorleistung [1, S. 33]

Erklärt kann dies wie folgt werden:

Durch die schnellere Drehzahl erhöht sich die Geschwindigkeit des magnetischen Feldes

und die in den Stator induzierte Spannung steigt. Folglich würde mehr Leistung vom Stator erzeugt werden. Um die Leistung aber konstant zu halten muss der vom MSC gelieferte Rotorstrom verringert werden. Dies resultiert in einer geringeren Leistungsaufnahme des LSC. Als Folge steigt auch die in das Netz eingespeiste Wirkleistung (gelbe Kurve).

Zusammenfassend kann man für den untersynchronen Betrieb sagen:

- Mit steigender Drehzahl sinkt die Leistungsaufnahme des LSC. Sie wird aber nie null erreichen, solange der Generator untersynchron betrieben wird.
- Die Generatorleistung lässt sich unabhängig von der Drehzahl einstellen.
- Die an das Netz abgegebene Leistung kann auch negativ werden. Es wird dann Leistung vom Netz bezogen.

## 6.2 Leistungssteuerung im übersynchronen Betrieb

### Versuchsbeschreibung

Die Einstellungen für die Leistungssteuerung im übersynchronen Betrieb sind die gleichen wie im untersynchronen Betrieb. Es wird wieder eine Drehzahl von  $1200 \frac{1}{min}$  eingestellt und der Generator mittels dem Button Enable automatisch mit dem Netz synchronisiert und zugeschaltet. Nachdem der Generator untersynchron mit dem Netz synchronisiert wurde, kann die mechanische Drehzahl soweit erhöht werden, dass er im übersynchron Betrieb läuft. Das bedeutet, ein Generator kann nicht übersynchron mit dem Netz synchronisiert werden. Zuletzt wird die mechanische Drehzahl auf  $1900 \frac{1}{min}$  erhöht.

Im ersten Teilversuch wird die Leistungsaufnahme des LSC und des Netzes bei einer statorseitigen Leistungsabgabe von 0 W gemessen.

Im zweiten Teilversuch wird die Leistungsabgabe an der Statorseite entsprechend den Werten in der Tabelle variiert und die Leistungsaufnahme des LSC und die Leistungsabgabe an das Netz gemessen.

Im dritten Teilversuch wird die abgegebene Generatorleistung am Stator konstant auf 500 W gehalten und die Drehzahl zunächst auf  $1650 \frac{1}{min}$  eingestellt. Anschließend wird die mechanische Drehzahl schrittweise erhöht und die Leistungsaufnahme des LSC und die Leistungsabgabe an das Netz gemessen.

## Messung

Die Leistungsabgabe des LSC und des Netzes bei keiner Leistungsabgabe an Statorseite ist in Tabelle 2.8 zu sehen.

Tabelle 2.8: Leistungsaufnahme LSC und Netz bei statorseitiger Leistungsvorgabe von 0 W im übersynchronen Betrieb

Wirkleistung LSC	-69 W
Wirkleistung Netz	-69 W

In Tabelle 2.9 sind die gemessenen Werte für die Leistungsabgabe des LSC und des Netzes bei einer Variation der Leistungsabgabe des Stators zu sehen.

Tabelle 2.9: Leistungsaufnahme LSC und Netz bei Variation der statorseitigen Leistungsabgabe im übersynchronen Betrieb

Statorleistung	P [W]	0	50	100	150	200	300	400	500
Netz	P [W]	-69	-9	48	116	174	287	409	528
LSC	P [W]	-69	-58	-46	-34	-25	-8	9	28

In Tabelle 2.10 sind die gemessenen Werte für die Leistungsabgabe des LSC und des Netzes bei Variation der mechanischen Drehzahl zu sehen.

Tabelle 2.10: Leistungsaufnahme LSC und Netz bei Variation der mechanischen Drehzahl und konstanter statorseitiger Leistungsabgabe im übersynchronen Betrieb

mech. Drehzahl	$n \left[ \frac{1}{min} \right]$	1650	1700	1750	1800	1850	1900
Netz	P [W]	444	459	477	492	510	528
LSC	P [W]	-60	-42	-26	-9	7	24
Statorleistung	P [W]	503	503	503	503	503	503

## Diskussion

Aus den Messungen in Tabelle 2.8 des ersten Teilversuchs ist zu sehen, dass der LSC, wie schon im untersynchronen Betrieb, Leistung benötigt um den Rotor zu erregen. Die Erregung sorgt dafür, dass am Stator Nennspannung erzeugt wird und somit keine Leistung mit dem Netz ausgetauscht wird.

An den Messungen des zweiten Teilversuchs in Tabelle 2.9 ist erkennbar, dass bei steigender Wirkleistungserzeugung des Stators, die Wirkleistungsaufnahme des LSC zur Erregung des Rotors sinkt, sie wird sogar negativ. Damit steigt die ans Netz gelieferte Leistung, siehe Abbildung 2.18.

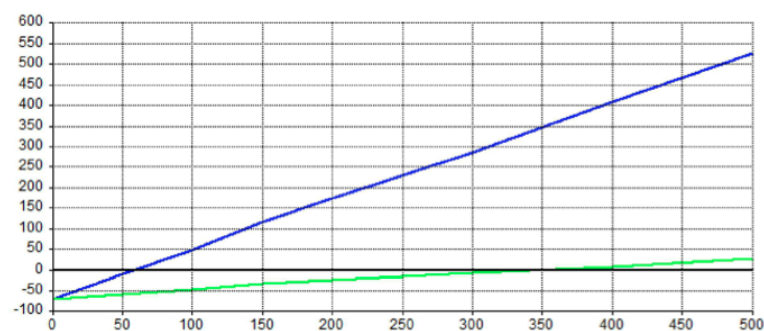


Abbildung 2.18: Wirkleistungsabgabe an das Netz (blau) und Wirkleistungsaufnahme des LSC (grün) bei steigender Wirkleistungserzeugung des Stators im übersynchronen Betrieb [1, S. 35]

Die Messergebnisse des dritten Teilversuchs in Tabelle 2.10 sind in Abbildung 2.19 dargestellt. Bei steigender Drehzahl sinkt die vom LSC aufgenommene Wirkleistung (grüne Kurve). Folglich steigt auch die ans Netz abgegebene Wirkleistung (blaue Kurve). Erklärt kann dies durch die größere Geschwindigkeit der Leiterstäbe im Rotor werden.

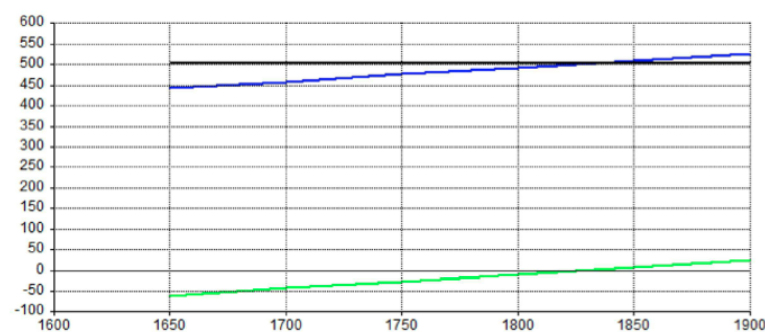


Abbildung 2.19: Wirkleistungsabgabe an das Netz (blau) und Wirkleistungsaufnahme des LSC (grün) bei steigender mechanischer Drehzahl im übersynchronen Betrieb [1, S. 35]

Es wird mehr Strom in die Leiterstäbe induziert und als Folge dessen das Läufermagnetfeld

stärker. Das resultierende Magnetfeld wird ebenfalls stärker und die in den Ständer induzierte Spannung steigt, es wird mehr Leistung vom Stator erzeugt. Um die Leistung jedoch konstant zu halten muss die Erregung verringert werden, wodurch der LSC weniger Leistung aufnimmt.

Im Kapitel 3 wurde behauptet, dass die Statorfrequenz  $f_s$  die Summe von Rotorfrequenz  $f_{\text{Rot}}$  und mechanischer Drehzahl  $f_m$  sei, siehe Gleichung 3.1. Im übersynchronen Betrieb würde dies eine negative Rotorfrequenz als Folge haben, was es jedoch unmöglich ist. In der Realität spricht man von einem Magnetfeld, das sich nun in die entgegen gesetzte Richtung dreht. Die Frequenz des Rotorstroms ist die betragliche Differenz von Statorfrequenz und mechanischer Drehzahl, mit dem Unterschied dass dieser in die andere Richtung fließt.

Zusammenfassend kann man für den übersynchronen Betrieb sagen:

- Mit steigender Drehzahl sinkt die Leistungsaufnahme des LSC. Sie kann sogar negativ werden, es wird dann Leistung vom LSC erzeugt.
- Die Generatorleistung lässt sich unabhängig von der Drehzahl einstellen.
- Die an das Netz abgegebene Leistung kann auch negativ werden. Es wird dann Leistung vom Netz bezogen.

## 6.3 Leistungsverteilung

### Versuchsbeschreibung

Die Einstellungen sind die gleichen wie in Kapitel 6.1. Es wird eine Drehzahl von  $1200 \frac{1}{min}$  eingestellt und der MSC so eingestellt, dass der Stator 400 W Wirkleistung abgibt. Anschließend werden die Drehzahlen entsprechend der Tabelle eingestellt und die vom LSC aufgenommene Wirkleistung gemessen. Mit der Gleichung 2.3 kann die theoretisch aufgenommene Wirkleistung des LSC berechnet werden.

$$P_R = -s * P_S \quad (2.3)$$

Die theoretischen Werte werden mit den gemessenen Werten verglichen. Der Buchstabe s ist dabei der Schlupf und gibt die Differenz zwischen Statorfrequenz und mechanischer Drehzahl bezogen auf die Statorfrequenz an, siehe Gleichung 2.4.

$$s = \frac{f_S - f_m}{f_S} = \frac{n_S - n_m}{n_S} \quad (2.4)$$

### Messung

Die gemessenen Werte für die Leistungsaufnahme des LSC bei verschiedenen Drehzahlen sind in Tabelle 2.11 zu sehen.

Tabelle 2.11: Leistungsaufnahme LSC und berechnete Leistungsaufnahme des LSC bei Variation der mechanischen Drehzahl und konstanter statorseitiger Leistungsabgabe

mech. Drehzahl	n [ $\frac{1}{min}$ ]	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900
s		0.20	0.15	0.07	0.00	-0.07	-0.15	-0.20	-0.27
P <sub>Rot</sub> (berechnet)	P [W]	-80	-60	-28	0	28	60	80	108
LSC	P [W]	-194	-164	-132	-100	-70	-45	-19	10

## Diskussion

Die grafische Darstellung der berechneten und gemessenen Werte aus Tabelle 2.11 ist in Abbildung 2.20 zu sehen.

Die berechnete Leistungsaufnahme des Rotors ist so zu verstehen, dass im untersynchronen Betrieb ( $s > 0$ ) Leistung vom Rotor aufgenommen wird um das Läufermagnetfeld so zu gestalten, dass an Statorseite Leistung erzeugt wird. Im übersynchronen Betrieb ( $s < 0$ ) muss Leistung aus dem Läufer genommen werden damit die statorseitige Leistung konstant gehalten wird. Für eine genauere Erläuterung siehe Kapitel 6.1 und Kapitel 6.2.

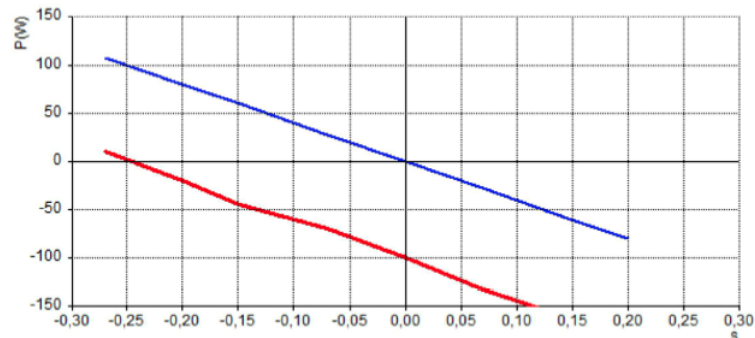


Abbildung 2.20: Berechnete Leistungsaufnahme des Rotors (blau) und gemessene Leistungsaufnahme des LSC(rot) [1, S. 37]

Die Abweichung der gemessenen Leistungsaufnahme (rot) entsteht durch Verluste des Systems. Die setzen sich zusammen aus den Schaltverlusten in der Ansteuereinheit des Generators. Sie sind nicht konstant, sondern hängen von der Schaltfrequenz der Umrichter und den verwendeten Technologie ab.

Würde angenommen werden, die Leistungsaufnahme des LSC bei synchroner Drehzahl sei 0 W, verschöbe sich die rote Kurve um 100 W nach oben, siehe Abbildung 2.21. Die berechneten Werte stimmen nun in guter Näherung mit den gemessenen Werten überein.

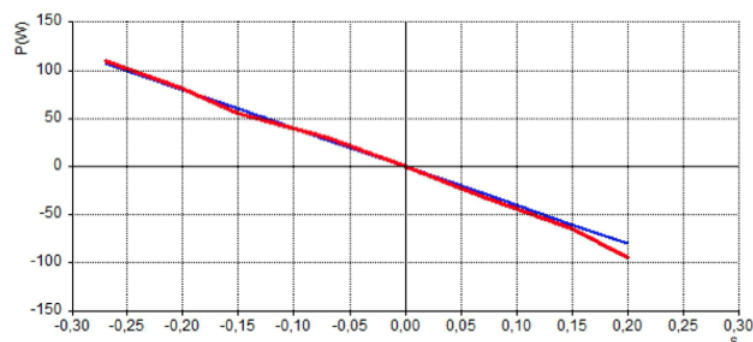


Abbildung 2.21: Berechnete Leistungsaufnahme des Rotors (blau) und gemessene Leistungsaufnahme des LSC(rot) bei elimination der Verluste [1, S. 37]



## 7 Blindleistungssteuerung

### Versuchsaufbau

Der bisherige Versuchsaufbau wird für die weiteren Versuche um ein Amperemeter im Rotorstromkreis erweitert, siehe Abbildung 2.22.

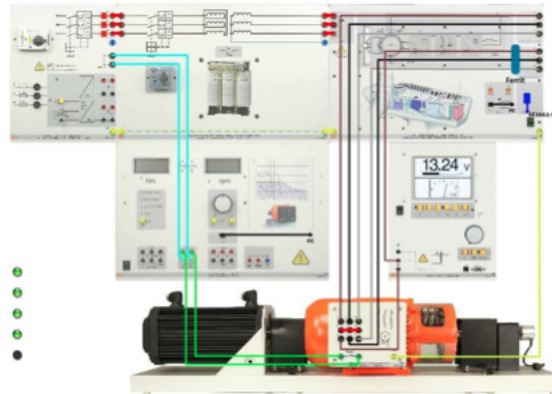


Abbildung 2.22: Verdrahtungsplan für die Blindleistungssteuerung [1, S. 39]

### 7.1 Blindleistungssteuerung des Generators

#### Versuchsbeschreibung

Es wird das Instrument LEISTUNGSSTEUERUNG geöffnet und der Modus STATOR POWER gewählt (die USB-Schnittstelle ist mit dem PC verbunden). Am Maschinenprüfstand wird der Modus SPEED CONTROL gewählt und der Generator wird unsynchron mit dem Netz synchronisiert und zugeschaltet. Der MSC wird so eingestellt, dass der Generator keine Wirkleistung an das Netz liefert.

Im ersten Teilversuch wird für eine Drehzahl von  $1400 \frac{1}{min}$  die Blindleistungsabgabe des Generators variiert und die Rotorströme gemessen. Die Messung wird für eine Drehzahl von  $1900 \frac{1}{min}$  wiederholt.

Im zweiten Teilversuch wird für die Drehzahl  $1400 \frac{1}{min}$  die Blindleistungsabgabe variiert und das Drehmoment bei einer Wirkleistungsabgabe von 0 W gemessen. Die Messung wird wiederholt, wobei die Blindleistungsabgabe auf 0 VAR gesetzt wird und die Wirkleistungsabgabe des Stators variiert wird.

Im dritten Teilversuch wird zusätzlich das Instrument VEKTORANSICHT geöffnet. Es werden die Zeiger von Strom und Spannung in der d/q - Ebene beobachtet, während die Wirkleistung auf 300 W gehoben wird. Dieser Vorgang wird für eine Blindleistungserzeugung von  $\pm 300$  VAR wiederholt.

## Messung

Die gemessenen Rotorströme bei Variation der Blindleistungsabgabe des ersten Teilversuchs sind in Tabelle 2.12 zu sehen.

Tabelle 2.12: Rotorströme bei Variation der Blindleistungsabgabe für verschiedene Drehzahlen

	Q [VAr]	-300	-200	-100	0	100	200	300
n = 1400 $\frac{1}{min}$	I <sub>Rot</sub> [A]	0.6	1.1	1.7	2.3	3.0	3.6	4.2
n = 1900 $\frac{1}{min}$	I <sub>Rot</sub> [A]	0.6	1.1	1.7	2.3	3.0	3.6	4.2

Die Messergebnisse des zweiten Teilversuchs sind in Tabelle 2.13 zu sehen.

Tabelle 2.13: Mechanisches Drehmoment bei Variation der Blindleistungs- und Wirkleistungsabgabe

Q [VAr]	-300	-200	-100	0	100	200	300
M [Nm]	-0.5	-0.5	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6
P [W]				0	100	200	300
M [Nm]				-0.6	-1.3	-2.0	-2.8

## Diskussion

In Abbildung 2.23 sind die Messergebnisse aus Tabelle 2.12 des ersten Teilversuchs grafisch dargestellt. Es ist zu erkennen, dass durch variieren der Amplitude des Rotorstroms die Höhe der erzeugten Blindleistung beeinflusst wird. Die mechanische Drehzahl hat keinen Einfluss auf die Blindleistungserzeugung. Der DFIG kann also im gesamten Betriebsbereich induktiven Blindstrom aufnehmen oder abgeben. Bei Übererregung steigt der Rotorstrom, der Generator liefert Blindleistung ins Netz. Er verhält sich kapazitiv. Bei Untererregung sinkt der Strom im Rotor und der Generator nimmt an Statorseite Blindstrom auf. Er verhält sich induktiv.

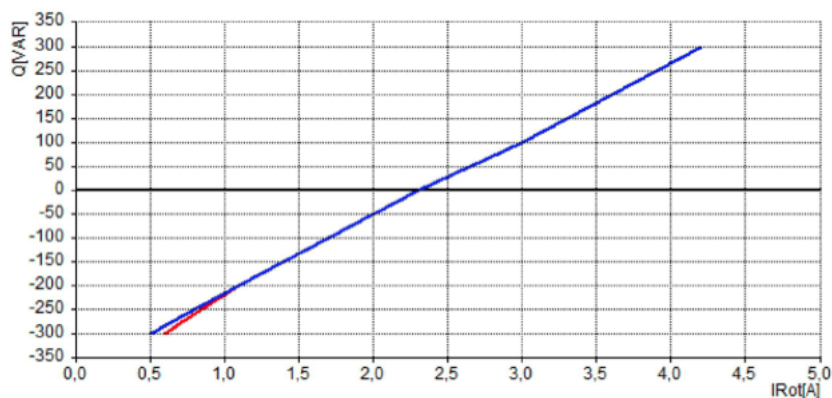


Abbildung 2.23: Erzeugte Blindleistung bei Variation der Rotorströme [1, S. 39]

In der Praxis würde man den doppeltgespeisten Asynchrongenerator übererregt betreiben, um den Blindleistungsbedarf des Netzes zu decken.

Aus den Messergebnissen des zweiten Teilversuchs in Tabelle 2.13 ist zu erkennen, dass eine Variation der Blindleistungserzeugung keinen Einfluss auf das Drehmoment hat, siehe Abbildung 2.24. Eine Änderung der Wirkleistung bedeutet jedoch, bei konstanter Drehzahl, eine proportionale Änderung des Drehmomentes. Es ist aber darauf hinzuweisen, dass die Abgabe von Blindleistung die mögliche Wirkleistungsabgabe verringert, da andernfalls der Generator überlastet wird.

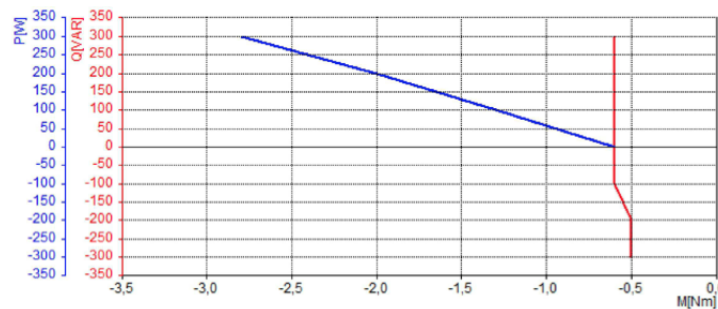


Abbildung 2.24: Drehmoment bei Variation der Wirk- und Blindleistungserzeugung [1, S. 40]

Die Ergebnisse des dritten Teilversuchs werden in der  $d/q$  - Ebene interpretiert. Die  $d$ -Achse ist die reelle Achse, die  $q$ -Achse die imaginäre. In Abbildung 2.25 sind die Vektoren von Statorstrom  $I_s$  und Statorspannung  $U_s$  bei reiner Wirkleistungserzeugung von 300 W zu sehen. Wie zu erwarten liegen beide Zeiger auf der  $d$ -Achse bei Wirkleistungserzeugung.

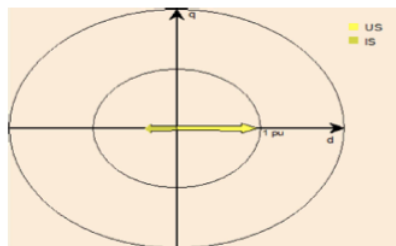


Abbildung 2.25: Vektoren von Strom und Spannung bei einer Wirkleistungserzeugung von 300 W [1, S. 41]

Bei Erzeugung von positiver Blindleistung ( $+300 \text{ VAr}$ ) verhält sich der Generator kapazitiv, er liefert Blindleistung ans Netz. Folglich muss der Statorstrom der Statorspannung um  $90^\circ$  voreilen, was er in Abbildung 2.26 auch tut.

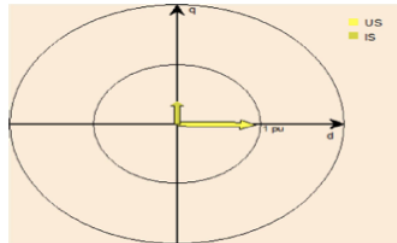


Abbildung 2.26: Vektoren von Strom und Spannung bei einer Blindleistungserzeugung von  $+300 \text{ VAr}$  [1, S. 41]

Erzeugt der Generator negative Blindleistung ( $-300 \text{ VAr}$ ) nimmt er Blindleistung auf, er verhält sich induktiv. Dies bedeutet, der Statorstrom eilt der Statorspannung um  $90^\circ$  nach, siehe Abbildung 2.27.

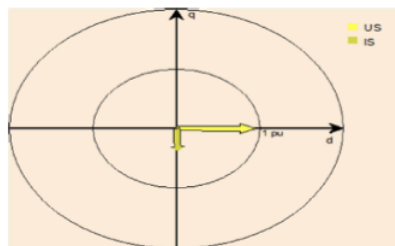


Abbildung 2.27: Vektoren von Strom und Spannung bei einer Blindleistungserzeugung von  $-300 \text{ VAr}$  [1, S. 41]

Bei einer gemischten Belastung würde der Stromvektor zwischen der d- und q-Achse liegen. Die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung läge zwischen  $-90^\circ$  und  $+90^\circ$ .

## 7.2 Blindleistungssteuerung des Inverters

Durch geschickte Ansteuerung des LSC lässt sich die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung beeinflussen, sodass der LSC mit dem Netz induktive oder kapazitive Blindleistung austauschen kann.

### Versuchsbeschreibung

Das Instrument LEISTUNGSSTEUERUNG wird geöffnet und der Modus STATOR POWER ausgewählt (die USB-Schnittstelle ist mit dem PC verbunden). Am Maschinenprüfstand wird der Modus SPEED CONTROL gewählt und der Generator wird mit einer Drehzahl von  $1400 \frac{1}{min}$  unsynchron mit dem Netz synchronisiert und zugeschaltet. Die Statorseite nimmt weder Leistung auf noch erzeugt sie welche. Außerdem wird das Instrument VEKTORANSICHT geöffnet.

Am LSC werden die Betriebszustände  $\pm 200$  VAR Blindleistung sowie reine Wirkleistungsaufnahme eingestellt. Beobachtet werden für die verschiedenen Betriebszustände die Vektoren von Strom  $I_{LSC}$  und Spannung  $U_{LSC}$  des LSC. Außerdem werden mit dem Oszilloskop für alle Betriebsfälle die Spannung  $U_{LL3}$  und der Strom  $I_{L1}$  beobachtet.

### Diskussion

Für reine Wirkleistungsaufnahme bei einer Drehzahl von  $1400 \frac{1}{min}$  nimmt der LSC die Leistung zur Erregung des Rotors auf, die notwendig ist, damit am Stator Nennspannung induziert wird und somit weder Leistung bezogen noch erzeugt wird. Die Vektoren von Spannung und Strom des LSC sind daher in Phase und liegen auf der d-Achse, siehe Abbildung 2.28.

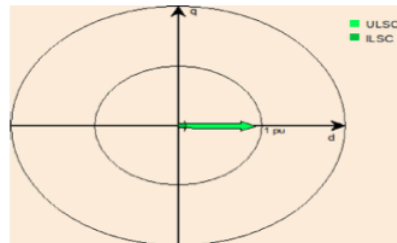


Abbildung 2.28: Spannungs- und Stromvektor bei reiner Wirkleistungsaufnahme des LSC [1, S. 42]

Beobachtet man die Spannung  $U_{L1L3}$  und den Strom  $I_{L1}$  mit dem Oszilloskop erhält man Abbildung 2.29. Es fällt auf, dass eine Phasenverschiebung von ca.  $30^\circ$  zwischen Spannung und Strom existiert, obwohl reine Wirkleistung bezogen wird. Die Erklärung ist, dass nicht Leiter-Erd-Spannung gemessen wird, sondern Leiter-Leiter-Spannung  $U_{L1L3}$ . Die entsprechenden Stranggrößen liegen in Phase.

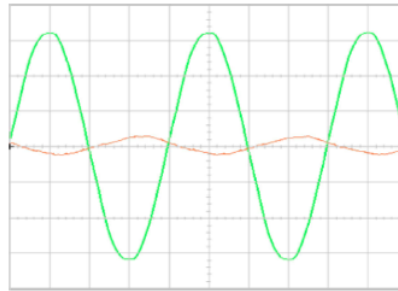


Abbildung 2.29: Spannung  $U_{L1L3}$  (grün) und Strom  $I_{L1}$  (orange) über der Zeit bei reiner Wirkleistung [1, S. 43]

In Abbildung 2.30 sind die verschiedenen Spannungs- und Stromzeiger zu sehen. Spannung  $U_{L1L3}$  und Strom  $I_{L1}$  schließen den Winkel  $\Phi$  ein. Dieser beträgt  $30^\circ$ .

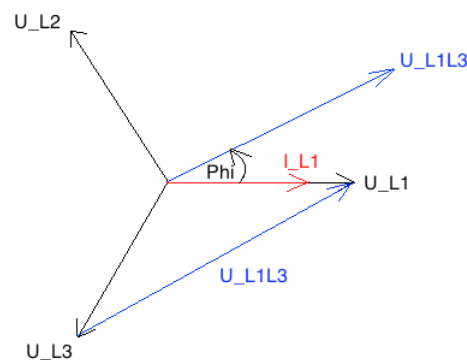


Abbildung 2.30: Spannung  $U_{L1L3}$  (grün) und Strom  $I_{L1}$  (orange) schließen einen Winkel von  $30^\circ$  ein

Falls nun 200 VAr Blindleistung vom LSC in das Netz eingespeist wird, liefert dieser Blindstrom ans Netz, er verhält sich kapazitiv. Daher eilt der Strom der Spannung in Abbildung 2.31 um ca.  $70^\circ$  vor. Der geringe Realanteil im Stromzeiger entsteht durch den Strombezug des Rotors um zu gewährleisten, dass an Statorseite die Nennspannung induziert wird und dort kein Leistungsaustausch mit dem Netz erfolgt.

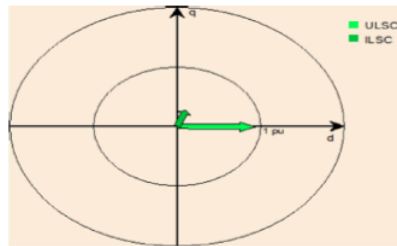


Abbildung 2.31: Spannungs-  $U_{LSC}$  und Stromvektor  $I_{LSC}$  bei +200 VAr [1, S. 42]

In Abbildung 2.32 sind Spannung  $U_{L1L3}$  und Strom  $I_{L1}$  erneut über der Zeit dargestellt. Die Phasenverschiebung ist nun allerdings größer.

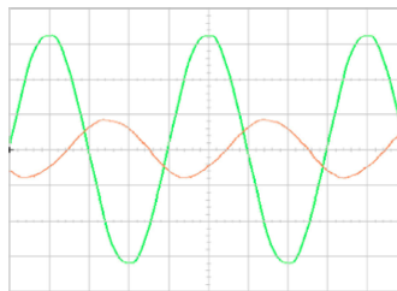


Abbildung 2.32: Spannung  $U_{L1L3}$  (grün) und Strom  $I_{L1}$  (orange) bei +200 VAr [1, S. 44]

Wird vom LSC -200 VAr Blindleistung in das Netz gespeist, bezieht dieser Blindstrom und er verhält sich induktiv. Folglich muss der Strom der Spannung nacheilen, siehe Abbildung 2.33.

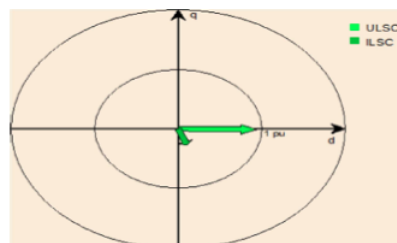


Abbildung 2.33: Spannungs-  $U_{LSC}$  und Stromvektor  $I_{LSC}$  bei -200 VAr [1, S. 42]

Bei der Betrachtung von  $U_{L1L3}$  und  $I_{L1}$  am Oszilloskop ist erkennbar, dass der Strom der Spannung nun stärker nacheilt, siehe Abbildung 2.34.

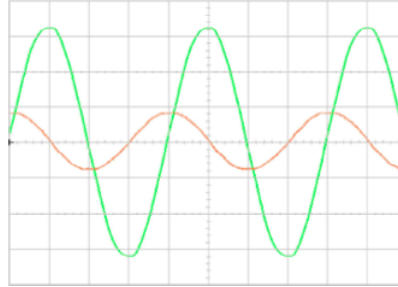


Abbildung 2.34: Spannung  $U_{L1L3}$  (grün) und Strom  $I_{L1}$  (orange) bei -200 VAr [1, S. 44]



# 3 Betrieb einer Windkraftanlage

Um die in den Versuchen geführten Diskussionen nachvollziehen zu können, werden zuerst einige Grundlagen zum Betrieb einer Windkraftanlage erläutert.

## 1 Theoretische Grundlagen

Eine Windkraftanlage nutzt die im Wind steckende Leistung, welche sich mit Gleichung 3.1 berechnen lässt. Von besonderer Bedeutung dabei ist, dass die Leistung kubisch mit der Windgeschwindigkeit  $v$  wächst.  $A$  ist die vom Rotor überstrichene Fläche und  $\rho$  die Dichte der Luft.

$$P_{\text{Wind}} = 0.5 * A * \rho * v^3 \quad (3.1)$$

Windkraftanlagen dürfen jedoch nur einen Teil dieser Energie umwandeln. Würde die komplette Geschwindigkeit des Windes in elektrische Energie umgewandelt werden, so würde hinter den Rotorflächen die Luft sich anfangen zu stauen. Welchen Anteil des Leistungsgeltes des ungebremsten Windes in nutzbare Leistung umgewandelt werden kann gibt der Leistungsbeiwert  $c_p$  an. Er berechnet sich nach Formel 3.2.

$$c_p = \frac{P_{\text{Nutz}}}{P_{\text{Wind}}} \quad (3.2)$$

In Abbildung 3.1 ist der Leistungsbeiwert über dem Verhältnis  $\frac{v_2}{v_1}$  dargestellt.



Abbildung 3.1: Leistungsbeiwert einer Windkraftanlage [1, S. 52]

Wenn die Windgeschwindigkeit hinter dem Rotor ( $v_2$ ) noch  $\frac{1}{3}$  der Geschwindigkeit vor dem Rotor ( $v_1$ ) hat, ist der Leistungsbeiwert in seinem theoretischen Maximum von 0.59 und es

wird maximale Nutzleistung von der WKA erzeugt.

Der Leistungsbeiwert  $c_p$  ist außerdem noch vom Pitchwinkel und der Schnelllaufzahl  $\lambda$  abhängig.

### Leistungskennlinie

Um aus einer Windkraftanlage bei Betrieb unterhalb der Generatornennleistung die maximale Leistungsausbeute zu erzielen, muss die Anlage möglichst nahe der optimalen Schnelllaufzahl  $\lambda$  betrieben werden. Dazu muss die Rotordrehzahl der Windgeschwindigkeit proportional nachgeführt werden. Der Pitchwinkel wird auf  $0^\circ$  gehalten.

Zur Regelung wird eine in der Drehzahl abhängige Regelcharakteristik verwendet, siehe Abbildung 3.2. Rot dargestellt sind die Leistungskennlinien von Winden mit verschiedenen Geschwindigkeiten. Die grüne Kurve gibt den theoretischen Verlauf der Steuerkennlinie wieder, die abgefahren werden würde, wenn maximale Leistung aus dem Wind geholt werden soll. Da die WKA aber eine Begrenzung  $n_{\text{Nom.}}$  der Drehzahl hat wird anstelle der grünen die blaue Kurve ab gewissen Windgeschwindigkeiten abgefahren und zur Regelung verwendet.

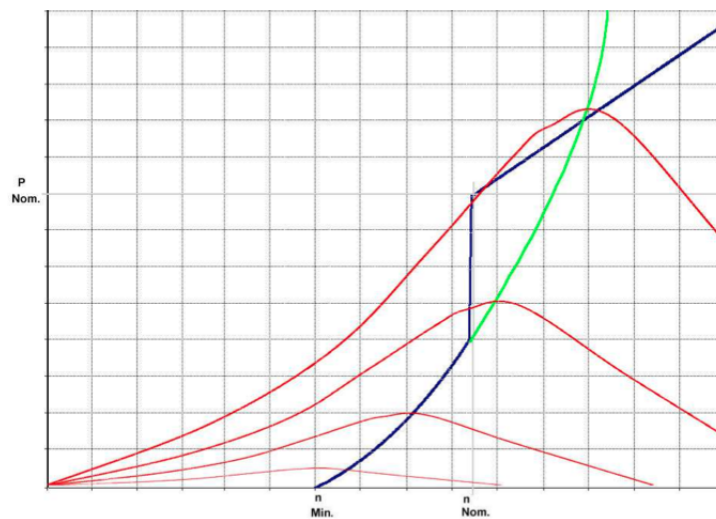


Abbildung 3.2: Leistungskennlinie einer Windkraftanlage [1, S. 56]

Die Leistungserzeugung wird auf  $P_{\text{Nom.}}$  begrenzt, da andernfalls der Generator überlastet wird. Die Begrenzung wird durch ein Ändern des Pitchwinkels erreicht.

## 2 Manuelle Leistungssteuerung

### Versuchsbeschreibung

Es wird das Instrument KONTROLLZENTRUM geöffnet (die USB-Schnittstelle ist mit dem PC verbunden) und der Modus STATOR POWER ausgewählt. Der Button DRIVE wird betätigt und die Windgeschwindigkeit wird schrittweise erhöht.

Im ersten Teilversuch läuft der Generator leer, er ist nicht ans Netz geschaltet. Gemessen wird die Leerlaufdrehzahl des Generators.

Im zweiten Teilversuch ist der Generator mit dem Netz gekoppelt und die vorherigen Messungen werden wiederholt. Zusätzlich wird die maximal ins Netz einspeisbare Leistung gemessen.

### Messung

In Tabelle 3.1 sind die gemessenen Leerlaufdrehzahlen des Generators für verschiedenen Windgeschwindigkeiten zu sehen.

Tabelle 3.1: Leerlaufdrehzahl bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten

$v \left[ \frac{m}{s} \right]$	0	3	3.5	4	5	6	7
$n \left[ \frac{1}{min} \right]$	0	0	830	1000	1380	1740	2100

Die Ergebnisse des zweiten Teilversuchs sind in Tabelle 3.2 eingetragen.

Tabelle 3.2: Drehzahl und Leistungserzeugung bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten

$v \left[ \frac{m}{s} \right]$	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	10.0
$n \left[ \frac{1}{min} \right]$	1030	1140	1240	1350	1450	1550	1675	1730	1830	2000
$P_{tot} [W]$	-37	-14	19	60	100	155	205	272	345	540

## Diskussion

Aus den Messergebnissen in Tabelle 3.1 zum ersten Teilversuch ist erkennbar, dass erst ab einer genügend hohen Windgeschwindigkeit der Generator anfängt sich zu drehen. Ab einer Windgeschwindigkeit von  $3.5 \frac{m}{s}$  steigt die Leerlaufdrehzahl linear mit der Geschwindigkeit, siehe Abbildung 3.3.

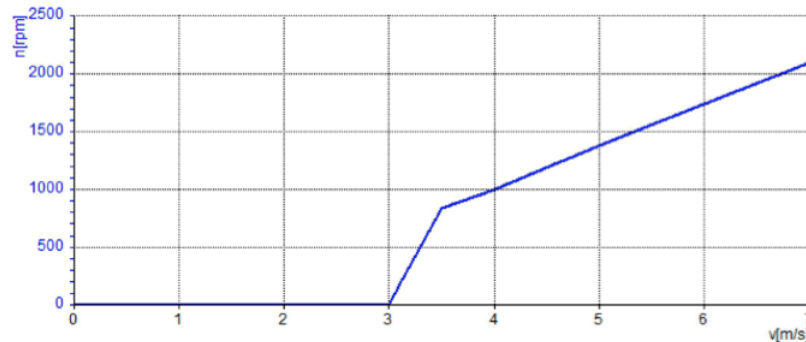


Abbildung 3.3: Leerlaufdrehzahl des Generators bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten [1, S. 55]

Ist der Generator an das Netz geschaltet, liefert bzw. nimmt der Generator abhängig von der Drehzahl Leistung ab oder auf. Ist die Drehzahl zu gering, so wird viel Strom vom Rotor zur Erregung benötigt. Der dafür notwendige Rotorstrom kann sogar mehr sein als der vom Stator erzeugte, sodass der Generator in Summe Leistung aus dem Netz bezieht anstatt welche zu liefern. Die totale, ins Netz eingespeiste Leistung aus Tabelle 3.2 steigt dabei kubisch mit der Windgeschwindigkeit, siehe Abbildung 3.4. Dies ist nachvollziehbar, da die im Wind steckende Energie kubisch mit der Windgeschwindigkeit steigt. Die Drehzahl des Generators steigt weiter linear mit der Windgeschwindigkeit.

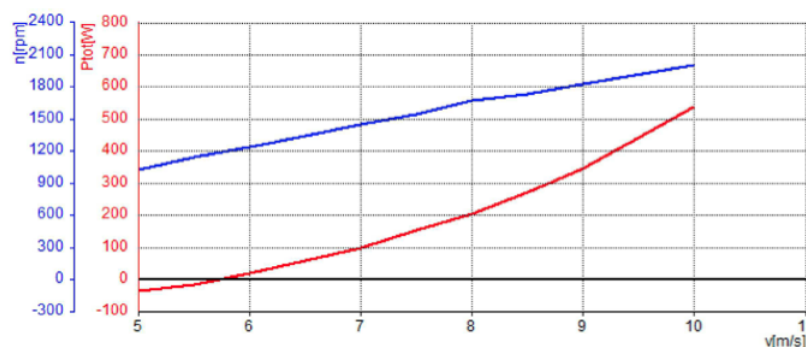


Abbildung 3.4: Maximal einspeisbare Leistung bei Variation der Windgeschwindigkeit [1, S. 56]

### 3 Automatische Betriebsführung

#### Versuchsbeschreibung

Das Instrument KONTROLLZENTRUM ist geöffnet (die USB-Schnittstelle ist mit dem PC verbunden) und der Modus POWER CHAR ist ausgewählt. Der Button DRIVE wird betätigt und die Windgeschwindigkeit erhöht, bis der Generator im Drehzahlbereich von  $1000 \frac{1}{min}$  bis  $1400 \frac{1}{min}$  arbeitet. Anschließend wird der Generator durch betätigen des Button DFIG automatisch an das Netz geschaltet.

Gemessen wird die Drehzahl und die ins Netz gespeiste Leistung bei Variation der Windgeschwindigkeit. Außerdem werden die Windgeschwindigkeiten bestimmt, bei denen

- der Generator anfängt, Leistung in das Netz zu speisen (Anlauf).
- der Generator in den übersynchronen Betrieb übergeht.
- der Generator Nennleistung von 800 W ins Netz einspeist.

#### Messung

In Tabelle 3.3 sind die Messergebnisse eingetragen.

Tabelle 3.3: Drehzahl und Leistungserzeugung für verschiedenen Windgeschwindigkeiten bei automatischer Betriebsführung

$v [\frac{m}{s}]$	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	11.5
$n [\frac{1}{min}]$	1058	1250	1440	1635	1832	1895	1900	1900
$P_{tot} [W]$	-38	16	100	204	340	520	680	740

In Tabelle 3.4 sind die ermittelten Windgeschwindigkeiten für Betriebspunkte von Interesse zu sehen.

Tabelle 3.4: Windgeschwindigkeiten für verschiedene Betriebspunkte

	$v [\frac{m}{s}]$
Anlauf	5.8
Übergang in übersynchronen Betrieb	9.3
Nennbetriebspunkt	12

## Diskussion

Wie erwartet steigt die Drehzahl in Tabelle 3.3 zunächst linear mit der Windgeschwindigkeit. Ab ca.  $10 \frac{m}{s}$  wird die Drehzahl konstant gehalten. Die eingespeiste Leistung verhält sich wie in Abbildung 3.2 in Kapitel 1 dargestellt. Anfangs ist diese wieder negativ, da zu viel Leistung zur Erregung notwendig ist.

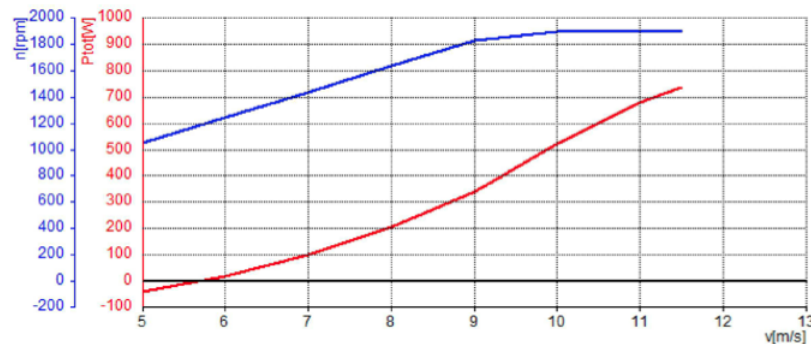


Abbildung 3.5: Maximal einspeisbare Leistung für verschiedene Windgeschwindigkeiten bei automatischer Betriebsführung [1, S. 57]

Der Generator erzeugt für den Großteil der Kurve die maximale elektrische Leistung. Erst im oberen Bereich der Kennlinie arbeitet die Windkraftanlage nicht mehr im Leistungsmaximum. Dies liegt an der Wahl der Drehzahl im Volllastbereich. Diese ist geringer als durch das Optimum der  $c_p$ -Kennlinie vorgegeben wird. Dies ermöglicht jedoch eine bessere Ausnutzung im Teillastbereich.

Die in Tabelle 3.4 eingetragene Windgeschwindigkeit für den Anlauf ist nun etwas höher als die Windgeschwindigkeit, die bei Leerlauf benötigt wird. Dies ist plausibel, da der Generator an das Netz angeschlossen ist und Leerlauf alleine keine Leistung erzeugt. Die Geschwindigkeit, ab der der Generator in den übersynchronen Betrieb wechselt passt näherungsweise mit der Geschwindigkeit bei Leerlauf überein. Ab einer Windgeschwindigkeit von  $12 \frac{m}{s}$  ist der Generator im Nennbetriebspunkt.

## 4 Einfluss des Pitchwinkels auf die Leistung

### Versuchsbeschreibung

Das Instrument KONTROLLZENTRUM ist geöffnet (die USB-Schnittstelle ist mit dem PC verbunden) und der Modus POWER CHAR ist ausgewählt. Der Button DRIVE wird betätigt und die Windgeschwindigkeit erhöht, bis der Generator im Drehzahlbereich von  $1000 \frac{1}{min}$  bis  $1400 \frac{1}{min}$  arbeitet. Anschließend wird der Generator durch betätigen des Button DFIG automatisch an das Netz geschaltet.

Im ersten Teilversuch wird die eingespeiste Leistung bei Variation der Windgeschwindigkeit und des Pitchwinkels gemessen.

Im zweiten Teilversuch wird der Modus auf AUTOMATIC gewechselt. Der Pitchwinkel wird jetzt über einen integrierten Regler automatisch gestellt. Für verschiedene Windgeschwindigkeiten wird der sich ergebende Pitchwinkel, die erzeugte Leistung und die sich einstellende Drehzahl gemessen.

### Messung

In Tabelle 3.5 sind die gemessenen Leistungen eingetragen.

Tabelle 3.5: Leistungserzeugung bei Variation der Windgeschwindigkeit und des Pitchwinkels

Pitchwinkel	$v \left[ \frac{m}{s} \right]$	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0
0 °	$P_{tot} [W]$	-40	18	100	200	340	512	670	800
5 °	$P_{tot} [W]$	-50	-5	68	155	270	420	580	712
10 °	$P_{tot} [W]$	-60	-25	40	110	210	330	480	617
15 °	$P_{tot} [W]$	-70	-35	12	72	160	255	377	505

In Tabelle 3.6 sind die Messergebnisse bei automatischer Pitchregelung zu sehen.

Tabelle 3.6: Messergebnisse bei automatischer Pitchregelung

$v \left[ \frac{m}{s} \right]$	6	8	10	12	14	16	18	20	22
Pitch [°]	0	0	0	0	11	19	24	28	31
$P_{tot} [W]$	13	190	500	770	790	795	795	795	795
$n \left[ \frac{1}{min} \right]$	1230	1615	1900	1900	1905	1905	1905	1905	1905

## Diskussion

Die Messergebnisse in Tabelle 3.5 des ersten Teilversuchs zeigen, wie schon im vorherigen Kapitel, dass bei steigender Windgeschwindigkeit die erzeugte Leistung steigt. Erhöht man den Pitchwinkel, sinkt die erzeugte Leistung, siehe Abbildung 3.6. Der Zusammenhang zwischen Pitchwinkel und Leistungsreduktion ist dabei linear. Ein Drehen der Rotorblätter (pitchen) im Teillastbereich ist in erster Linie nicht sinnvoll, da nicht die maximal mögliche Leistung in das Netz gespeist wird. Im Falle einer Störung des Generators könnte eine WKA aber mit reduzierter Geschwindigkeit weiterlaufen.

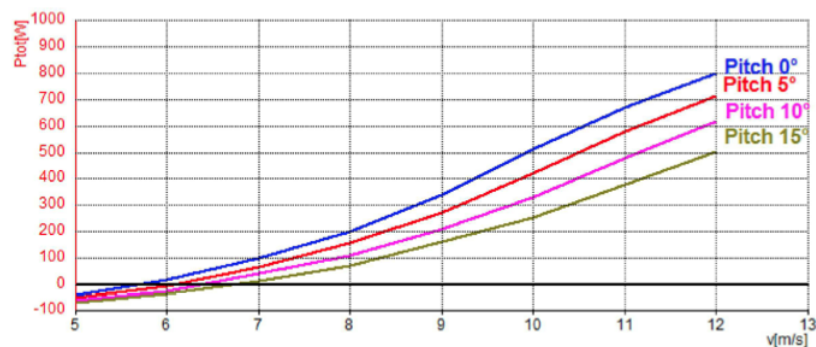


Abbildung 3.6: Erzeugte Leistung bei Variation der Windgeschwindigkeit mit Pitchwinkel als Parameter [1, S. 59]

Bei Einsatz der automatischen Pitchregelung im zweiten Teilversuch ändert sich an den Messergebnissen in Tabelle 3.6 im Teillastbereich nichts. Der Pitchwinkel bleibt bei 0°. Im Volllastbereich regelt der Pitchregler die Drehzahl (rosa Kurve) und somit die Generatorleistung (rote Kurve) auf ihre Nennwerte, siehe Abbildung 3.7.

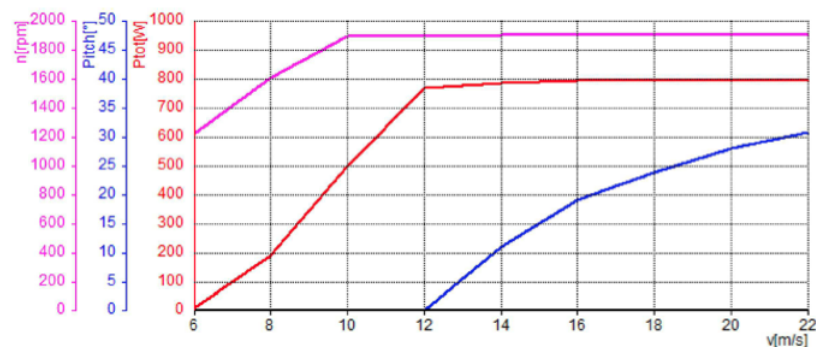


Abbildung 3.7: Erzeugte Leistung, Pitchwinkel und Drehzahl bei automatischer Pitchregelung [1, S. 60]



## 5 Dynamisches Verhalten

### Versuchsbeschreibung

Das Instrument KONTROLLZENTRUM ist geöffnet (die USB-Schnittstelle ist mit dem PC verbunden) und der Modus POWER CHAR ist ausgewählt. Für den Pitchwinkel wird der Modus AUTOMATIC gewählt. Der Button DRIVE wird betätigt und die Windgeschwindigkeit erhöht, bis der Generator im Drehzahlbereich von  $1000 \frac{1}{min}$  bis  $1400 \frac{1}{min}$  arbeitet. Anschließend wird der Generator durch betätigen des Button DFIG automatisch an das Netz geschaltet.

Im ersten Teilversuch wird ein Windprofil mit einer maximalen Windgeschwindigkeit von  $12 \frac{m}{s}$  hinterlegt, siehe Abbildung 3.8. Beobachtet wird die Windgeschwindigkeit, die Gesamtwirkleistungserzeugung, die Drehzahl und der Pitchwinkel.

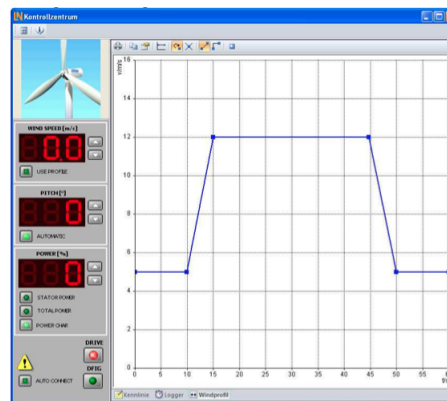


Abbildung 3.8: Hinterlegtes Windprofil [1, S. 61]

Im zweiten Teilversuch wird nochmal obiges Windprofil verwendet, mit dem Unterschied, dass die maximale Windgeschwindigkeit jetzt  $18 \frac{m}{s}$  beträgt.

## Diskussion

Bei einem Wind mit einer Geschwindigkeit von  $12 \frac{m}{s}$  ist der Generator an der Grenze zwischen Teillastbereich und Volllastbereich. Der Generator wird mit Nenndrehzahl und Nennleistung betrieben. Kurzzeitig schaltet sich sogar die Pitchregelung ein um einen Pitchwinkel von ca  $1^\circ$  einzustellen und überschüssige Leistung wegzuregeln, siehe gelbe Kurve in Abbildung 3.9.

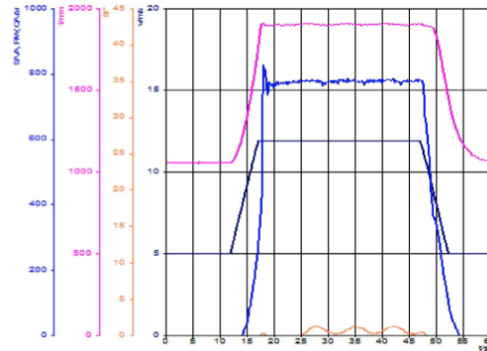


Abbildung 3.9: Hinterlegtes Windprofil mit einer maximalen Geschwindigkeit von  $12 \frac{m}{s}$ . Rosa dargestellt ist die Drehzahl, blau die erzeugte Leistung und gelb der Pitchwinkel [1, S. 61]

Bei einer schnellen Änderung der Windgeschwindigkeit auf  $18 \frac{m}{s}$  steigt die Drehzahl über die Nenndrehzahl und somit auch die erzeugte Wirkleistung über die Nennleistung. Als Folge muss die Pitchregelung den Pitchwinkel erhöhen. In Abbildung 3.10 steigt der Pitchwinkel auf ca.  $28^\circ$ . Eine Windböe kann also dazu führen, dass der Generator kurzfristig über Nennleistung betrieben wird. Falls dies geschieht muss der Pitchregler möglichst schnell eingreifen und die Pitchwinkel verstellen. Im Teillastbereich hat die Pitchregelung keinen Einfluss. Der Pitchwinkel ist  $0^\circ$ .

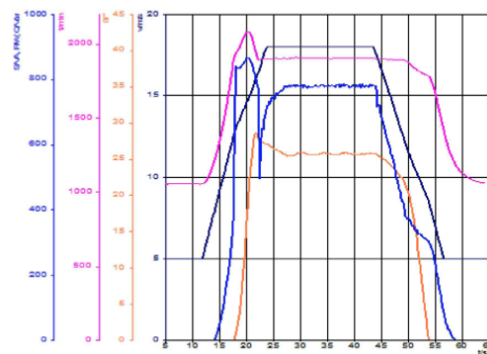


Abbildung 3.10: Hinterlegtes Windprofil mit einer maximalen Geschwindigkeit von  $12 \frac{m}{s}$ . Rosa dargestellt ist die Drehzahl, blau die erzeugte Leistung und gelb der Pitchwinkel [1, S. 62]

## 4 Diskussion

Die Versuche am doppeltgespeisten Asynchrongenerator haben gezeigt, dass durch eine entsprechende Regelung des Rotorstroms der Generator eine Spannung erzeugt, die in Höhe und Frequenz variiert werden kann. Von besonderem Interesse war dabei, dass sowohl im untersynchronen als auch im übersynchronen Betrieb Wirkleistung in das Netz gespeist werden kann. Dabei ist reine Wirkleistungsabgabe, reine Blindleistungsabgabe sowie gemischte Wirk/Blindleistungsabgabe möglich.

Die Versuche zum Betrieb einer Windkraftanlage zeigten, dass die erzeugte Leistung und die mechanische Drehzahl wesentlich von der Windgeschwindigkeit abhängen. Über den Pitchwinkel der Rotorblätter kann ebenfalls Einfluss darauf genommen werden unter der Bedingung, dass mit steigendem Pitchwinkel die theoretisch maximal entnehmbare Energie aus dem Wind nicht voll ausgenutzt wird. Dies hat besonders bei hohen Windgeschwindigkeiten besondere Bedeutung.

# Literaturverzeichnis

- [1] PROF. DR. M. BURGMER, Ralf L. Christian Feltes F. Christian Feltes: *Erzeugung mittels Windkraftanlagen*, 2011
- [2] CI, S. ; LIN, N. ; WU, D.: Reconfigurable Battery Techniques and Systems: A Survey. In: *IEEE Access* 4 (2016), S. 1175–1189. <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2545338>. – DOI 10.1109/ACCESS.2016.2545338. – ISSN 2169–3536