



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN

Titel der Diplomarbeit

# **Simulationsmodell einer doppelt gespeisten Asynchronmaschine**

Verfasser: Mahfoud Alibrahim

Betreuer: Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Wolbank

E370 - Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe

Matr.Nr.: 1129848

Studienkennzahl: E 066 506

Studienrichtung: Masterstudium Energie- und Automatisierungstechnik

Wien, 2017

## **Erklärung**

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Arbeit gemäß dem Code of Conduct – Regeln zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis (in der aktuellen Fassung des jeweiligen Mitteilungsblattes der TU Wien), insbesondere ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel, angefertigt wurde. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet.

Die Arbeit wurde bisher weder im In– noch im Ausland in gleicher oder in ähnlicher Form in anderen Prüfungsverfahren vorgelegt.

Wien, 29.05.2017

Unterschrift: محفوض

Name: Mahfoud Alibrahim

## **Danksagung**

Ich möchte mich in erster Linie bei meinem Betreuer Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Wolbank bedanken, der mich mit viel Ermutigung und Engagement zum wissenschaftlichen Arbeiten unterstützt hat und stets für mich ansprechbar war.

Des Weiteren danke ich meiner lieben Ehefrau, da ohne ihre volle Unterstützung mein Studium nicht möglich gewesen wäre.

Meinen Eltern gilt mein aufrichtiger Dank für ihren unermüdlichen Rückhalt während meiner gesamten Ausbildung. Und meinen Schwestern danke ich dafür, dass sie mir auch in schwierigen Zeiten mit motivierenden Worten zur Seite standen.

Bei meiner Schwiegerfamilie bedanke ich mich dafür, dass sie mir eine starke Stütze während meines Studiums in Wien waren.

Schließlich gilt mein Dank meinen lieben Freunden für ihre Geduld und ihr Verständnis.

## **Abstract**

The aim of this master's thesis is to develop a simulation model of the double-fed induction machine (DFIM), for a better understanding of the machine behavior in different operation points.

At the beginning, the physical principles of the DFIM and its mathematical description in the space vector theory will be explained. Thereafter, the principle of field-oriented control and a general operation of the DFIM will be discussed. In the next step the implementation and verification of the simulation model, based on the machine equations, implemented in Matlab-Simulink will be described.

Furthermore, an instruction manual for carrying out the simulation will be provided. Another purpose of this thesis is to write a Matlab-program which presents the state variables at the end of the simulation, in the form of a phasor diagram and the active or rather reactive power flux in the form of a bar diagram.

Finally, the simulation will be performed on selected operation points and the results will be interpreted

## Kurzfassung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, ein Simulationsmodell der doppelt gespeisten Asynchronmaschine (DASM) zu erstellen, das zu einem besseren Verständnis des Maschinenverhaltens in den unterschiedlichsten Arbeitspunkten dienen soll.

Am Anfang werden die physikalischen Grundlagen der DASM und ihre mathematische Beschreibung in der Raumzeigertheorie erläutert. Anschließend wird auf das Prinzip der feldorientierten Regelung bzw. auf einen allgemeinen Betrieb der DASM eingegangen. Es wird dann beschrieben, wie das Simulationsmodell, ausgehend von den Maschinengleichungen, in Matlab-Simulink implementiert und danach überprüft wird. Außerdem wird eine Bedienungsanleitung zur Simulationsdurchführung angeführt. Eine weitere Aufgabe dieser Arbeit ist es, ein Matlab-Programm zu schreiben, das die Zustandsgrößen am Ende der Simulation in Form eines Zeigerdiagramms und den Wirk- bzw. Blindleistungsfluss in Form eines Bardiagramms präsentiert. Zum Schluss wird die Simulation in ausgewählten Betriebspunkten durchgeführt und die Ergebnisse werden interpretiert.

## Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1 Einleitung.....	13
1.2 Die doppelt gespeiste Asynchronmaschine – Einsatzgebiete und Vorteile .....	13
1.2 Zielsetzung.....	14
1.3 Gliederung.....	14
Kapitel 2 : Aufbau und Wirkungsweise der DASM .....	15
2.1 Aufbau der Asynchronmaschine .....	15
2.2 Prinzipielle Wirkungsweise der doppelt gespeisten Asynchronmaschine .....	16
Kapitel 3 : Mathematische Beschreibung der doppelt gespeisten Asynchronmaschine .....	18
3.1 Allgemeines .....	18
3.2 Bezogene Größen .....	18
3.3 Raumzeigerdarstellung.....	19
3.4 Koordinatentransformation .....	21
3.5 Gleichungen der DASM in Raumzeigerdarstellung .....	23
3.6 T-Ersatzschaltbild der DASM .....	23
3.7 Bestimmung der Maschinenparameter für das T-Ersatzschaltbild.....	25
3.8 Maschinengleichungen in einem allgemeinen Koordinatensystem .....	26
Kapitel 4 : Regelung der doppelt gespeisten Asynchronmaschine .....	28
4.1 Feldorientierte Regelung.....	28
4.2 Zielsetzung der Regelung .....	29
Kapitel 5 : Betrieb der doppelt gespeisten Asynchronmaschine am Netz .....	30
5.1 Rotorfrequenz und mechanische Drehzahl.....	30
5.2 Rotorspannung.....	31
5.3 Motor- und Generatorbetrieb der DASM.....	31
5.4 Leistungsfluss .....	32
5.4.1 Wirkleistungsbilanz .....	32
5.4.2 Blindleistungsbilanz.....	34
Kapitel 6 : Modellierung der doppelt gespeisten Asynchronmaschine in Matlab-Simulink .....	36
6.1 Allgemeines .....	36
6.2 Maschinengleichung im statorfesten Koordinatensystem.....	36
6.3 Erstellung eines DASM-Modell in Matlab-Simulink .....	36
6.4 Überprüfung des DASM-Modells .....	41
6.4.1 Allgemeines .....	41
6.4.2 Festgebremster Rotor-Versuch .....	42
6.4.3 Leerlauf-Versuch .....	45
6.5 Realisierung einer feldorientierten Regelung für die DASM in Simulink .....	46

6.5.1 Transformation der Regelgrößen in das statorspannungsfeste Koordinatensystem .....	46
6.5.1 Leistungsregler .....	47
6.5.2 Berechnung der Rotorspannung .....	49
6.6 Berechnung von Rotorwirk- bzw. Rotorblindleistung, Magnetisierungsleistung, mechanischer Leistung und Verluste der Maschine .....	51
6.7 Simulationsmodell der DASM.....	54
6.8 Analytische Verifikation des Simulationsmodells.....	56
Kapitel 7 : Bedienungsanleitung zur Simulationsdurchführung - Erstellung einer Matlab-Funktion zur besseren Darstellung der Simulationsergebnisse .....	61
7.1 Allgemeines .....	61
7.2 Starten der Simulation .....	61
7.3 Dynamische Simulation eines Betriebs in Simulink.....	63
7.4 Erstellung einer Matlab-Funktion zur Zeigerdiagramm- und Leistungsfluss-Darstellung.....	68
7.5 Simulationsdurchführung .....	72
Kapitel 8 : Simulationsergebnisse von unterschiedlichen Betriebspunkten .....	73
8.1 Simulation 1: DASM als Generator in einem übererregten Betrieb.....	73
8.2 Simulation 2: DASM als Generator in einem untererregten Betrieb .....	77
8.3 Simulation 3: DASM im Motorbetrieb.....	79
8.3 Simulation 4: DASM als Motor in einem untererregten Betrieb.....	83
Appendix A: Berechnung der Rotorspannung in einem transienten Vorgang.....	85
Appendix B: Die von Simulink im Simulationsmodell verwendeten Blöcke.....	87
Literaturverzeichnis .....	89

Abbildung 2-1 : Längsschnitt einer Asynchronmaschine mit Schleifringläufer (Quelle: Kleinrath 1975).....	15
Abbildung 2-2 : Darstellung der doppelt gespeisten Asynchronmaschine am starren Netz .....	16
Abbildung 2-3 : Rotor-Leerlaufspannung bei variabler Rotor-Drehzahl ( $f_s = \text{Konstant}$ ).....	17
Abbildung 3-1 : Raumzeigerdarstellung in der Maschinenebene .....	21
Abbildung 3-2 : Umrechnung einer komplexen Größe zwischen zwei Koordinatensystemen .....	22
Abbildung 3-3 : repräsentatives Ersatzschaltbild für die Maschinengleichung .....	24
Abbildung 3-4 : T-Ersatzschaltbild der doppelt gespeisten Asynchronmaschine .....	25
Abbildung 4-1 : Bildung des elektrischen Drehmoments in der feldorientierten Regelung .....	28
Abbildung 5-1 : Rotorfrequenz der DASM in einem untersynchronen (a) und einem übersynchronen (b) Betrieb .....	31
Abbildung 5-2 : Zeigerdiagramm in Motor- und Generatorbetrieb der DASM .....	32
Abbildung 5-3 : Wirkleistungsfluss der DASM in einem übersynchronen Generatorbetrieb .....	33
Abbildung 5-4 : Wirkleistungsfluss der DASM in einem untersynchronen Generatorbetrieb.....	34
Abbildung 6-1 : DASM-Modell als Blackbox in Matlab-Simulink .....	37
Abbildung 6-2 : Bildung des Statorspannungsraumzeigers .....	38
Abbildung 6-3 : Bezogener Spannungsraumzeiger mit 50 Hz .....	38
Abbildung 6-4 : Mögliche Implementierung der Statorgleichungen in Matlab-Simulink .....	39
Abbildung 6-5 : Mögliche Implementierung der Rotorgleichungen in Matlab-Simulink.....	40
Abbildung 6-6 : Mögliche Implementierung der Bewegungsgleichung in Matlab-Simulink.....	41
Abbildung 6-7 : Rotorspannungsbildung für den festgebremsten Rotor-Versuch .....	42
Abbildung 6-8 : Real und Imaginär-Teil der Stator- und Rotorspannung bei festgebremstem Rotor.....	43
Abbildung 6-9 : Real und Imaginär-Teil des Stator- und Rotorstrom bei festgebremstem Rotor.....	44
Abbildung 6-10 : Real und Imaginär-Teil von Stator- und Rotorstrom bei festgebremstem Rotor und kleinen Werten der Stator- und Rotorwiderstände .....	44
Abbildung 6-11 : Real und Imaginär-Teil von Statorspannung und Strom bei einem festgebremsten Rotor ...	45
Abbildung 6-12 : Real und Imaginär-Teil des Stator- und Rotorstroms im Leerlauf-Versuch .....	46
Abbildung 6-13 : Gewinnung des Statorspannung-Winkels aus dem Statorspannungsraumzeiger .....	46
Abbildung 6-14 : Transformation der Zustandsgrößen von $(\alpha, \beta)$ in das $(u, v)$ Koordinatensystem .....	47
Abbildung 6-15 : Realisierung eines PI-Reglers in Simulink.....	48
Abbildung 6-16 : Ist-Wirk- und Ist-Blindleistung Berechnung in Simulink .....	48
Abbildung 6-17 : Berechnung und Regelung der Rotorspannung in Simulink .....	50
Abbildung 6-18 : Berechnung der Wirk- und Blindleistung .....	51
Abbildung 6-19 : Umrechnung der Rotorblindleistung auf Statorseite .....	52
Abbildung 6-20 : Rotorspannungsberechnung für die Blindleistungsbestimmung im synchronen Betrieb .....	53
Abbildung 6-21: Berechnung der Wärme- und Streufeldverluste .....	54
Abbildung 6-22 : Das Simulation-Modell der DASM in Simulink .....	55
Abbildung 6-23 : Ist- und Soll- Wirk- bzw. Blindleistungen, statorseitig.....	57
Abbildung 6-24 : Rotorwirk- und Rotorblindleistung .....	57
Abbildung 6-25 : Statorstrom Real- und Imaginär-Teil in $(u, v)$ KOS.....	58
Abbildung 6-26 : Rotorstrom Real- und Imaginär-Teil in $(u, v)$ KOS .....	58
Abbildung 6-27 : Stator-bzw. Rotorspannung, Real- und Imaginär-Teil in $(\alpha, \beta)$ KOS ( $w_m = 0$ ) .....	59
Abbildung 6-28 : Stator-bzw. Rotorspannung, Real- und Imaginär-Teil in $(\alpha, \beta)$ KOS ( $w_m = 1$ ) .....	60
Abbildung 6-29 : Statorspannung bzw. Innere Spannung in $(\alpha, \beta)$ KOS ( $w_m = 1$ ) .....	60
Abbildung 7-1 : Matlab R2015b Command Fenster .....	61
Abbildung 7-2 : Konfigurations-Parameter des Simulationsmodells in Matlab .....	63
Abbildung 7-3 : Slider Gain als dynamische Eingabe in Simulink.....	63
Abbildung 7-4 : Slider von Dashboard in Simulink als dynamische Eingabe .....	64
Abbildung 7-5 : Erzeugung eines mit der Zeit veränderten Drehzahlsignals.....	65
Abbildung 7-6 : Raumzeigerbildung der Statorspannung für eine flexible Eingabe .....	65
Abbildung 7-7 : Dynamische Eingabe der Stator-Soll-Leistung mittels eines Sliders (oben) bzw. Anzeige der Änderung in Rotorleistung mittels eines Linear-Gauges (unten) .....	66
Abbildung 7-8 : Spur des Rotorspannungsraumzeigers im XY-Graph bei zunehmender Drehzahl.....	67
Abbildung 7-9 : Einstellung der To Workspace-Parameter zum Export von Simulationsdaten .....	69
Abbildung 8-1 : Zeigerdiagramm der DASM, Generator in übererregtem Betrieb, $w_m = 1$ .....	73

Abbildung 8-2 : Wirkleistungsfluss der DASM, Generator in übererregtem Betrieb, $w_m = 0$ .....	75
Abbildung 8-3 : Wirkleistungsfluss der DASM, Generator in übererregtem Betrieb, untersynchron .....	75
Abbildung 8-4 : Wirkleistungsfluss der DASM, Generator in übererregtem Betrieb, übersynchron .....	76
Abbildung 8-5 : Blindleistungsfluss der DASM, Generator in übererregtem Betrieb .....	76
Abbildung 8-6 : Zeigerdiagramm der DASM als Generator in untererregtem Betrieb, $w_m = 0.5$ .....	77
Abbildung 8-7 : Wirkleistungsfluss der DASM, Generator in untererregtem Betrieb, $w_m = 0.5$ .....	78
Abbildung 8-8 : Blindleistungsfluss der DASM, Generator in untererregtem Betrieb .....	79
Abbildung 8-9 : Anpassung des Reglers für den Motorbetrieb .....	80
Abbildung 8-10 : Zeigerdiagramm der DASM im Motorbetrieb, $w_m = 0.8$ .....	81
Abbildung 8-11 : Wirkleistungsfluss der DASM im Motorbetrieb, untersynchron, $q_s = 0 p.u.$ .....	82
Abbildung 8-12 : Wirkleistungsfluss der DASM im Motorbetrieb, übersynchron, $q_s = 0 p.u.$ .....	82
Abbildung 8-13 : Blindleistungsfluss der DASM im Motorbetrieb, $q_s = 0 p.u.$ .....	83
Abbildung 8-14 : Zeigerdiagramm der DASM als Motor in untererregtem Betrieb, $w_m = 1.1$ .....	84
Abbildung 8-15 : Blindleistungsfluss der DASM, Motor in übererregtem Betrieb .....	84
Tabelle 7-1 : Erzeugung eines mit der Zeit veränderten Signals. ....	65
Tabelle 7-2 : Die zur Matlab-Funktion exportierten Simulationsdaten mit entsprechenden Symbolen. ....	69

# Nomenklatur

## Abkürzungen

KOS	Koordinatensystem
ASM	Asynchronmaschine
DASM	doppelt gespeiste Asynchronmaschine
ASM-KSL	Asynchronmaschine mit Kurzschlussläufer
ASM-SRL	Asynchronmaschine mit Schleifringläufer
PI-Regler	proportional integral Regler

## Indizes und Operatoren

$s$	Stator
$r$	Rotor
$R$	auf Statorseite bezogene Rotorgrößen
$real$	reale Komponente
$imag$	imaginäre Komponente
$R, S, T$	Stranggrößen
$Re$	Real-Teil
$Im$	Imaginär-Teil
$\alpha, \beta$	Längs- und Querkomponente im statorfesten KOS
$d, q$	Längs- und Querkomponente im rotorfesten KOS
$u, v$	Längs- und Querkomponente im statorspannungsfesten KOS
$x, y$	Längs- und Querkomponente im flussfesten KOS
$Str$	Strang
$\underline{\xi}$	allgemeine Raumzeigergröße
$\frac{d}{d\tau}$	zeitliche Ableitung
$j$	imaginäre Einheit
$*$	Konjugierte
$Gen$	Generator
$Mot$	Motor
$Ind.$	induktiv

*Kap.* kapazitiv

## Symbole

	$P_s$	Stator-Wirkleistung
$P_r$		Rotor-Wirkleistung
$P_{mech}$		mechanische Leistung
$f_s$		Stator-Frequenz
$f_r$		Rotor-Frequenz
$n_m$		mechanische Drehzahl
$w_m$		mechanische Winkelgeschwindigkeit
$n_s$		Synchrondrehzahl
$s$		Schlupf
$U_{hr}$		in Rotorwicklung induzierte Spannung
$U_{Bs}$		Bezugsspannung des Stators (Spitzenwert der Nenn-Strangspannung)
$U_{Ns,Str,eff}$		Nenn- Strangspannung des Stators (Effektivwert)
$I_{Bs}$		Bezugsstrom des Stators (Spitzenwert des Nenn-Strangstroms)
$I_{Ns,Str,eff}$		Nenn- Strangstrom des Stators (Effektivwert)
$Z_{Bs}$		Bezugsimpedanz des Stators
$w_{B,elek}$		elektrische Bezugswinkelgeschwindigkeit
$f_n$		Netzfrequenz
$T_B$		Bezugszeit
$\psi_B$		Bezugsfluss
$P_B$		Bezugsleistung
$M_B$		Bezugsdrehmoment
$p$		pol paar Zahl
$w_{B,m}$		mechanische Bezugswinkelgeschwindigkeit
$U_{Br}$		Bezugsspannung des Rotors (Spitzenwert der Nenn-Strangspannung)
$I_{Br}$		Bezugsstrom des Rotors (Spitzenwert des Nenn-Strangstroms)
$U_{Nr,Str,eff}$		Nenn- Strangspannung des Rotors (Effektivwert)
$I_{Nr,Str,eff}$		Nenn- Strangstrom des Rotors (Effektivwert)
$\ddot{u}$		Übersetzungsverhältnis
$Z_{Br}$		Bezugsimpedanz des Rotors

$\tau$	bezogene Zeit
$t$	Zeit
$U_{s(t)}$	momentaner Wert der Statorspannung
$u_s$	bezogene Statorspannung
$U_{r(t)}$	momentaner Wert der Rotorspannung
$u_r$	bezogene Rotorspannung
$I_{s(t)}$	momentaner Wert des Statorstroms
$i_s$	bezogener Statorstrom
$I_{r(t)}$	momentaner Wert des Rotorstroms
$i_r$	bezogener Rotorstrom
$\psi_{s(t)}$	momentaner Wert des Statorflusses
$\Psi_s$	bezogener Statorfluss
$\psi_{r(t)}$	momentaner Wert des Rotorflusses
$\Psi_r$	bezogener Rotorfluss
$R_{s,Str}$	Strangwiderstand der Statorwicklung
$r_s$	bezogener Statorwiderstand
$R_{r,Str}$	Strangwiderstand der Rotorwicklung
$r_r$	bezogener Rotorwiderstand
$X_{s,Str}$	Strangreaktanz des Stators
$x_s$	bezogene Statorreaktanz
$X_{r,Str}$	Strangreaktanz des Rotors
$x_r$	bezogene Rotorreaktanz
$L_{s,Str}$	Stranginduktivität des Stators
$l_s$	bezogene Statorinduktivität
$l_r$	bezogene Rotorinduktivität
$x_{s\sigma}$	bezogen Streureaktanz des Stators
$x_{sh}$	bezogene Hauptinduktivität des Stators
$x_{r\sigma}$	bezogen Streureaktanz des Rotors
$x_{rh}$	bezogene Hauptinduktivität des Rotors
$x_m$	Magnetisierungsreaktanz
$N_s$	Windungszahl des Stators

$N_r$	Windungszahl des Rotors
$\xi_s$	Wicklungsfaktor des Stators
$\xi_r$	Wicklungsfaktor des Rotors
$u_R$	auf Statorseite bezogene Rotorspannung
$i_R$	auf Statorseite bezogener Rotorstrom
$r_R$	auf Statorseite bezogener Rotorwiderstand
$x_{\sigma R}$	auf Statorseite bezogene Rotorstreureaktanz
$\sigma$	Streukoeffizient
$w_k$	beliebige Winkelgeschwindigkeit
$m_{elek}$	bezogenes elektrisches Moment
$m_{last}$	bezogenes Lastmoment
$\tau_m$	mechanische Zeitkonstante
$p_m$	bezogene mechanische Leistung
$p_s$	bezogene Stator-Wirkleistung
$p_r$	bezogene Rotor-Wirkleistung
$p_{w\u00e4rme}$	W\u00e4rmeverluste
$q_s$	bezogene Stator-Blindleistung
$q_r$	bezogene Rotor-Blindleistung
$q_{mag}$	bezogene Magnetisierungsleistung
$q_{Streu}$	bezogene Streufeldleistung
$q_{r_s}$	auf Statorseite bezogene Rotorblindleistung
$u_h$	bezogen Hauptspannung (bezogene innere Spannung)
$i_m$	bezogener Magnetisierungsstrom
$p_{Ist}$	bezogene Ist-Wirkleistung
$q_{Ist}$	bezogene Ist-Blindleistung
$p_{s_{soll}}$	bezogene Soll-Wirkleistung
$q_{s_{soll}}$	bezogene Soll-Blindleistung

## Kapitel 1 Einleitung

### 1.2 Die doppelt gespeiste Asynchronmaschine – Einsatzgebiete und Vorteile

In der Industrie werden immer mehr elektrische Antriebe mit variablen Drehzahlen und mit zunehmend höheren Leistungen in der Ordnung von Megawatt benötigt. Die Asynchronmaschine (ASM) wird wegen ihrer Robustheit und ihrer einfachen Fertigung weitgehend eingesetzt. Die Drehzahl wird bei der ASM durch Änderung der Statorfrequenz über einen Umrichter ( $n = f/p$ ) variiert. Da der Umrichter auf die gesamte Leistung der Maschine ausgelegt werden muss, ist der Aufwand von Leistungselektronik und Mikroprozessoren bei großen Leistungen zu hoch, was den Betrieb mit kleinen Drehzahlschwankungen unwirtschaftlich macht. Eine kostengünstigere Alternative ist die Anwendung von einer Asynchronmaschine mit Schleifringläufer, indem der Stator direkt mit dem elektrischen Netz verbunden ist, während der Rotor durch einen Umrichter über das Netz oder über eine Spannungsquelle gespeist wird. Diese Anwendung der ASM wird als doppeltgespeiste Asynchronmaschine (DASM) bezeichnet. Der typische Leistungsfluss durch den Umrichter beträgt in diesem Fall etwa 30 % der gesamten Leistung der Maschine. Dadurch werden die Kosten der Leistungselektronik deutlich reduziert. Gleichzeitig wird ein höherer Wirkungsgrad der Umrichter erzielt.

Nicht nur in der Industrie, sondern auch bei der Energieerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen hat die Anwendung der doppelt gespeisten Asynchronmaschine an Bedeutung gewonnen. Vor allem in Windkraftanlagen ist die DASM weit verbreitet. Dies liegt daran, dass die Drehzahlschwankungen bei der doppelt gespeisten Asynchronmaschine etwa 30 % unter oder über der Synchrodrehzahl betragen können. Diese Schwankungen liegen bei der Asynchronmaschine mit Kurzschlussläufer (ASM-KSL) bei etwa 1 % und bei der Asynchronmaschine mit Schleifringläufer (ASM-SRL) bei etwa 10 % (wenn die Wärmeverluste im Rotorwiderstand im Kauf genommen werden) [1]. Ein weiterer Vorteil der DASM ist hier, dass sie (im Gegenteil zu der normalen ASM) sowohl induktiv als auch kapazitiv bezüglich dem Netz betrieben werden kann, was eine Regelung der Blindleistung ermöglicht. Auch im Vergleich zu den elektrisch- und permanentmagnet-erregten Synchronmaschinen hat die doppeltgespeiste Asynchronmaschine den Vorteil (neben der Kostenersparung beim Umrichter), dass sie kleinere Abmessungen für dieselbe Leistung hat. Die Synchronmaschinen in Windkraftanlagen werden nämlich mit hoher Polpaarzahl ausgelegt, was sich auf die Größe und das Gewicht der Maschine und somit auch auf die Kosten des Turms widerspiegelt. Aus den oben genannten Gründen ist die DASM für Windkraftanlagen sehr attraktiv.

Eine weitere Anwendung der doppelt gespeisten Asynchronmaschine findet sich in den Pumpspeicherkraftwerken. Hier geht der Trend vom Betrieb bei konstanter Drehzahl mit einer Vollpolsynchronmaschine (VPS) zu dem drehzahlgeregelten Betrieb mit doppelt gespeister Asynchronmaschine. Durch die mögliche Drehzahländerung der DASM (unter und über der Synchrodrehzahl) wird nämlich ein höherer Grad an Netzstabilität, eine bessere Regelung der Leistung im Pumpenbetrieb und ein höherer Wirkungsgrad im Turbinenbetrieb erreicht [2].

## 1.2 Zielsetzung

Die unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten der DASM in den verschiedenen Bereichen hat die Modellierung der doppelt gespeisten Asynchronmaschine zu einem interessanten Forschungsthema gemacht. Das Ziel dieser Diplomarbeit " Simulationsmodell einer doppelt gespeisten Asynchronmaschine" ist ein genaues Modell der DASM mit einer Regelung der Wirk- und Blindleistung in Matlab-Simulink zu erstellen. Dieses Modell soll es ermöglichen, das Verhalten der Maschine in verschiedenen Betriebspunkten zu simulieren.

Um die Ergebnisse der Simulation besser zu verstehen, werden die Zustandsgrößen (Ströme, Spannungen und Teilspannungen) am Ende der Simulation mit Hilfe einer selbsterstellten Matlab-Funktion in einem Zeigerdiagramm dargestellt. Auch der Fluss von Wirk- und Blindleistungen wird in Form eines Bardiagramms verdeutlicht. Diese Darstellung der Ergebnisse soll zusammen mit den in Simulink vorhandenen Blöcken zu einem besseren Verständnis des Maschinenverhaltens dienen.

## 1.3 Gliederung

In Kapitel 2 wird auf den Aufbau und die Wirkungsweise der doppelt gespeisten Asynchronmaschine eingegangen. Dabei wird die DASM als ein Spezialfall der Asynchronmaschine mit Schleifringläufer präsentiert.

In Kapitel 3 wird die mathematische Beschreibung der DASM in der Raumzeigerdarstellung erläutert. Anschließend wird beschrieben, wie sich das T-Ersatzschaltbild der DASM ergibt. Kapitel 4 geht kurz auf das Prinzip der feldorientierten Regelung ein. Dabei wird auch erklärt, wie die Rotorspannung in Bezug auf die statorseitig geforderte Wirk- bzw. Blindleistung geregelt wird.

In Kapitel 5 wird ein allgemeiner Betrieb der DASM betrachtet. Dabei wird der Zusammenhang zwischen der Stator- und Rotor-Frequenz bzw. der Leistungsfluss im Motor- und Generatorbetrieb erläutert.

In Kapitle 6 wird gezeigt, wie das Modell der DASM in Matlab-Simulink, ausgehend von den Maschinengleichungen im statorfesten Koordinatensystem, implementiert, überprüft, und dann mit einer Regelung erweitert wird. Anschließend wird das gesamte Simulationsmodell überprüft und verifiziert.

In Kapitel 7 wird zuerst eine Bedienungsanleitung zur Simulationsdurchführung angeführt. Dabei werden auch die in Simulink verfügbaren Eingabe- bzw. Anzeigemöglichkeiten gezeigt. Danach wird ein Matlab-Programm geschrieben, das die Simulationsergebnisse weiterbearbeitet, um die Zustandsgrößen in Form eines Zeigerdiagramms und die Leistungsflüsse in Form von Bardiagrammen darzustellen.

Zuletzt werden in Kapitel 8 ausgewählte Betriebspunkte simuliert und die Ergebnisse werden interpretiert.

## Kapitel 2 : Aufbau und Wirkungsweise der DASM

### 2.1 Aufbau der Asynchronmaschine

Die Asynchronmaschine ist aufgrund ihres einfacheren und robusten Aufbaus eine weitverbreitete Maschine. Sie wird entweder mit einem Kurzschlussläufer (KSL) oder mit einem Schleifringläufer (SRL) ausgeführt. In beiden Bautypen wird im Stator eine 2p-polige, drei-strängige, (im Allgemeinen  $m \Rightarrow 2$ ) symmetrische Drehstromwicklung eingelegt. In der Asynchronmaschine mit Kurzschlussläufer (ASM-KSL) werden Kurzschlussstäbe in den Rotornuten eingelegt, die über je einen Kurzschlussring frontseitig und rückseitig miteinander verbunden sind. In der Asynchronmaschine mit Schleifringläufer (ASM-SRL) wird im Rotor genauso wie im Stator eine symmetrische Drehstromwicklung angeordnet. Die Rotorstränge werden dann über isolierte Schleifringe auf der Welle angeschlossen (Abbildung 2-1) [3].

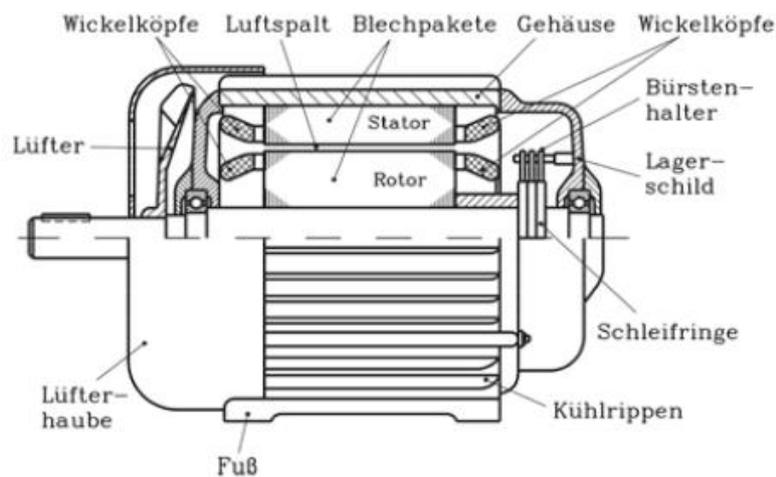


Abbildung 2-1 : Längsschnitt einer Asynchronmaschine mit Schleifringläufer (Quelle: Kleinrath 1975)

In der Asynchronmaschine werden die Rotorstränge entweder direkt oder durch einen zusätzlichen Widerstand (Anlasswiderstand) kurzgeschlossen. Der Anlasswiderstand wird im Rotorkreis zugeschaltet um die hohen Ströme beim Anlauf der Maschine zu reduzieren. Nach dem Erreichen der Betriebsdrehzahl wird der Anlasswiderstand wieder abgeschaltet, um den Wärmeverlust im Rotorkreis gering zu halten.

Eine weitere Möglichkeit um die Maschinenparameter zu beeinflussen, ist, externe Ströme über einen Umrichter in die in Stern-geschaltete Rotorwicklung einzuspeisen (z.B. mittels Schleifringen und Kohlebürsten). Die Statorwicklung wird in diesem Fall direkt mit dem Netz verbunden. Diese Anwendung wird als "doppelt gespeiste Asynchronmaschine (DASM)" bezeichnet (Abbildung 2-2).

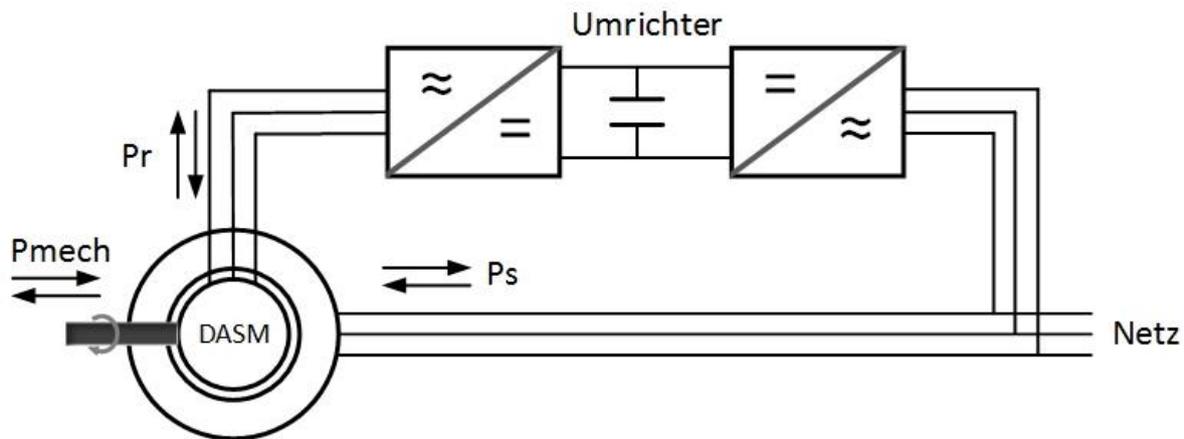


Abbildung 2-2 : Darstellung der doppelt gespeisten Asynchronmaschine am starren Netz

## 2.2 Prinzipielle Wirkungsweise der doppelt gespeisten Asynchronmaschine

**Anmerkung:** Für die Beschreibung der doppelt gespeisten Asynchronmaschine werden nur die Grundwellen des Stator- und Rotordrehfelds berücksichtigt. Der Einfluss von Oberwellen wird dabei vernachlässigt. Es werden auch zeitlich sinusförmige Verläufe der gespeisten Spannungen vorausgesetzt.

Wird die Statorwicklung mit einem symmetrischen Drehspannungssystem gespeist, so fließen in die Statorwicklung sinusförmige Ströme. Diese Ströme bilden im Luftspalt der Maschine ein magnetisches Drehfeld, das mit der synchronen Drehzahl ( $n_s = \frac{f_s}{p}$ ) rotiert. Der Flussanteil, der mit dem Rotor verkettet ist (Flussverkettung) rotiert ebenfalls mit der synchronen Drehzahl und induziert in der Rotorwicklung eine Spannung, solange er sich bezüglich dem Rotor zeitlich ändert (Induktionsgesetz). Die induzierte Spannung ist proportional zur Differenzwinkelgeschwindigkeit zwischen Stator und Rotor  $\Delta\omega = \omega_s - \omega_m$  und somit auch zum Schlupf ( $s = \frac{\Delta\omega}{\omega_s}$ ) [4]. In Abbildung 2-3 ist der Verlauf der induzierten Spannung bei geöffneten Rotorklemmen (Leerlauf) dargestellt.

Wird nun ausgehend vom Stillstand die Rotorwicklung kurzgeschlossen, so fließen, aufgrund der induzierten Spannung, Kurzschlussströme in die Rotorwicklung (solange  $s \neq 0$ ). Die Kurzschlussströme bilden ebenfalls ein magnetisches Drehfeld. Es entsteht im Luftspalt der Maschine ein resultierendes magnetisches Drehfeld, das sich aus der Überlagerung von Rotordrehfeld und Statorfeld ergibt. Gleichzeitig üben die im Rotor fließenden Kurzschlussströme gemeinsam mit der resultierenden magnetischen Flussdichte im Luftspalt eine elektromagnetische Kraftwirkung auf den Rotor (Lorentz-Kraft:  $F = I \cdot B \cdot L$ ) aus. Dadurch entsteht ein inneres Drehmoment, das versucht den Rotor zu beschleunigen, um die Differenzgeschwindigkeit zwischen Stator und Rotor zu verringern und somit der induzierten Spannung entgegenzuwirken. Der Rotor beschleunigt und versucht die Synchrondrehzahl zu erreichen. In Abbildung 2-3 sieht man, dass bei synchroner Drehzahl ( $n_m = n_s$ ,  $s = 0$ ) keine Spannung im Rotor induziert wird. Tatsächlich kann der Rotor ohne

externen Einfluss die Synchrondrehzahl nicht erreichen (aufgrund der Reibungs- und Wärmeverluste).

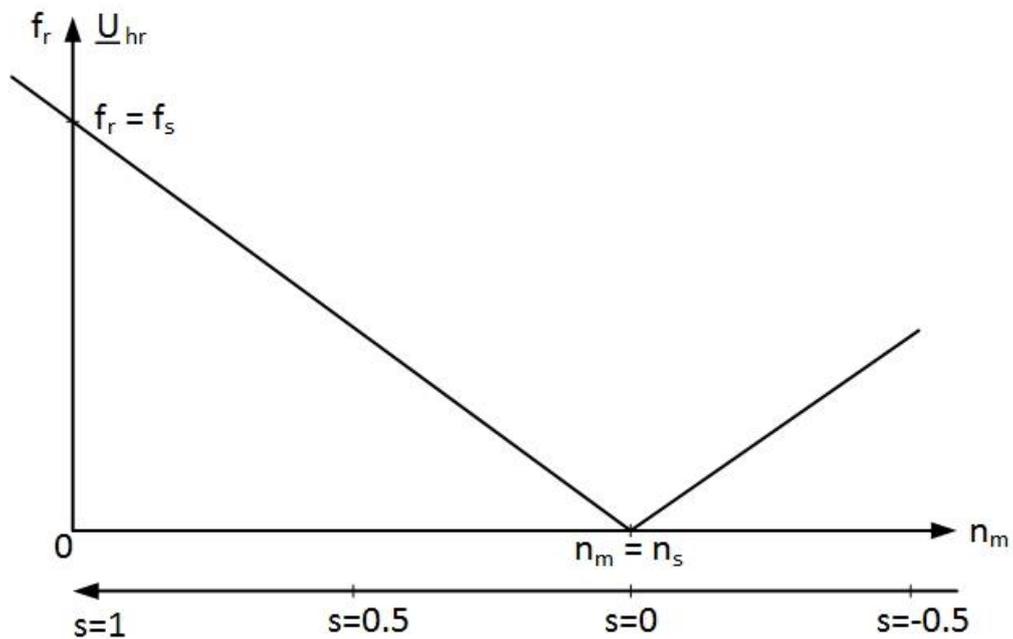


Abbildung 2-3 : Rotor-Leerlaufspannung bei variabler Rotor-Drehzahl ( $f_s = \text{Konstant}$ )

Bei der doppelt gespeisten Asynchronmaschine kann durch eine zusätzliche externe Spannungsquelle der Strom in der Rotorwicklung beeinflusst werden. Dadurch kann der resultierende Fluss oder die mechanische Drehzahl der Maschine gezielt verändert werden um einen bestimmten Betriebszustand der Maschine zu erreichen.

# Kapitel 3 : Mathematische Beschreibung der doppelt gespeisten Asynchronmaschine

## 3.1 Allgemeines

In diesem Kapitel werden die wichtigen Begriffe für die mathematische Beschreibung der doppelt gespeisten Asynchronmaschine erläutert. Für mehr Information siehe Referenzen.

## 3.2 Bezogene Größen

Die mathematischen Gleichungen von elektrischen Maschinen können entweder durch physikalische Originalgrößen oder durch normierte (bezogene) Größen ausgedrückt werden [5]. Hier bieten die normierten Größen den Vorteil, Maschinen mit unterschiedlichsten Leistungen zu vergleichen und die Zustandsgrößen als prozentuelle Werte der Bemessungsgrößen darzustellen.

Als Basis für die Normierung werden meistens die Scheitelwerte oder die Effektivwerte der Stranggrößen verwendet. Dabei ist es wichtig, dass die physikalischen Größen und Basisgrößen die gleiche Dimension haben. Bei der Wahl der Basisgrößen muss der Zusammenhang zwischen den Zustandsgrößen beziehungsweise das Übersetzungsverhältnis zwischen Stator und Rotor berücksichtigt werden. Für die Beschreibung der transienten Vorgänge werden in dieser Arbeit die Scheitelwerte der Nennstranggrößen als Basis für die Normierung ausgewählt (Gleichungen (1)):

$$\begin{aligned} U_{Bs} &= \sqrt{2} \cdot U_{Ns,Str,eff} & I_{Bs} &= \sqrt{2} \cdot I_{Ns,Str,eff} \\ Z_{Bs} &= \frac{U_{Ns,Str,eff}}{I_{Ns,Str,eff}} & w_{B,elek} &= 2 \cdot \pi \cdot f_n = 1 \\ T_B &= \frac{1}{w_{B,elek}} & \psi_B &= \frac{U_{Bs}}{w_{B,elek}} \\ P_B &= 3 \cdot U_{Ns,Str,eff} \cdot I_{Ns,Str,eff} & M_B &= \frac{3 \cdot U_{Ns,Str,eff} \cdot I_{Ns,Str,eff} \cdot p}{w_{B,elek}} \quad (1) \\ w_{B,m} &= \frac{w_{B,elek}}{p} & p: & \text{Polpaarzahl} \\ U_{Br} &= \frac{\sqrt{2} \cdot U_{Ns,Str,eff}}{\ddot{u}} & I_{Br} &= \ddot{u} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{Ns,Str,eff} \end{aligned}$$

$$Z_{Br} = \frac{U_{Br}}{\dot{i}^2 \cdot I_{Br}} \quad \text{mit:} \quad \dot{i} = \frac{N_s \cdot \xi_s}{N_r \cdot \xi_r}$$

Die bezogenen Größen werden durch Division der physikalischen Größen durch die Basisgrößen erhalten.

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{t}{T_B} = w_{B,elek} \cdot t = 2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot t \\ u_s &= \frac{U_s(t)}{U_{Bs}} & u_r &= \frac{U_r(t)}{U_{Br}} \\ i_s &= \frac{I_s(t)}{I_{Bs}} & i_r &= \frac{I_r(t)}{I_{Br}} \\ \psi_s &= \frac{\psi_s(t)}{\psi_B} & \psi_r &= \frac{\psi_r(t)}{\psi_B} \\ r_s &= \frac{R_{s,Str}}{Z_B} & r_r &= \frac{R_{r,Str}}{Z_B} \\ x_s &= \frac{X_{s,Str}}{Z_{Bs}} & x_r &= \frac{X_{r,Str}}{Z_{Br}} \\ l_s &= \frac{x_s}{w_{B,elek}} & l_r &= \frac{x_r}{w_{B,elek}} \end{aligned} \quad (2)$$

**Anmerkung:** Durch die Normierung nimmt die Synchronwinkelgeschwindigkeit den Wert Eins an, somit ergibt sich kein Unterschied zwischen bezogenen Induktivitäten und bezogenen Reaktanzen.

### 3.3 Raumzeigerdarstellung

Für die mathematische Beschreibung von elektrischen Maschinen in transienten Vorgängen eignet sich die Raumzeigertheorie hervorragend. Die Raumzeigerdefinition wurde von Kovacs 1959 [6] eingeführt. Es handelt sich um die Beschreibung von räumlich sinusförmigen Größen in der komplexen Ebene, ohne dabei ihre zeitlichen Verläufe zu beschränken. Bei der Anwendung der Raumzeigertheorie werden folgende Bedingungen vorausgesetzt:

- Symmetrischer Aufbau der Stator- und Rotorwicklung
- Räumlich sinusförmige Verteilung von elektrischen und magnetischen Größen

- Alle Induktivitäten und Widerstände werden als konstant angenommen
- Nur die Grundwelle der Durchflutung wird berücksichtigt, der Einfluss von Oberwellen wird vernachlässigt
- Stromverdrängung und Wirbelströme werden vernachlässigt

Werden die symmetrischen Drehstromwicklungen der Maschine mit zeitlich veränderlichen Strömen eingespeist, so wird im Luftspalt der Maschine eine zeitlich veränderliche, jedoch stets räumlich sinusförmige Durchflutung aufgebaut. Diese Durchflutung wird in der Raumzeigertheorie durch den Stromraumzeiger repräsentiert. Der Stromraumzeiger wird aus den augenblicklichen Werten der Strangströme gebildet, sodass er in die Richtung der maximalen Durchflutung zeigt und seine Länge ein Maß der Amplitude darstellt (Abbildung 3-1). Gleichung (3) zeigt, wie der Stromraumzeiger aus den drei augenblicklichen, bezogenen Strangstromwerten gewonnen wird:

$$\underline{i} = \frac{2}{3} \cdot (i_R + \underline{a} \cdot i_S + \underline{a}^2 \cdot i_T) = i_{real} + j \cdot i_{imag} \quad (3)$$

Mit: 
$$\underline{a} = e^{2\pi \cdot j/3} = -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}j, \quad \underline{a}^2 = e^{4\pi \cdot j/3} = -\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}j \quad (4)$$

**Anmerkung:** Bei der Bildung der Stromraumzeiger gehen die Informationen über das Nullsystem verloren.

Ähnlich werden die Spannungs- und Flussraumzeiger definiert:

$$\underline{u} = \frac{2}{3} \cdot (u_R + \underline{a} \cdot u_S + \underline{a}^2 \cdot u_T) = u_{real} + j \cdot u_{imag} \quad (5)$$

$$\underline{\psi} = \frac{2}{3} \cdot (\psi_R + \underline{a} \cdot \psi_S + \underline{a}^2 \cdot \psi_T) = \psi_{real} + j \cdot \psi_{imag} \quad (6)$$

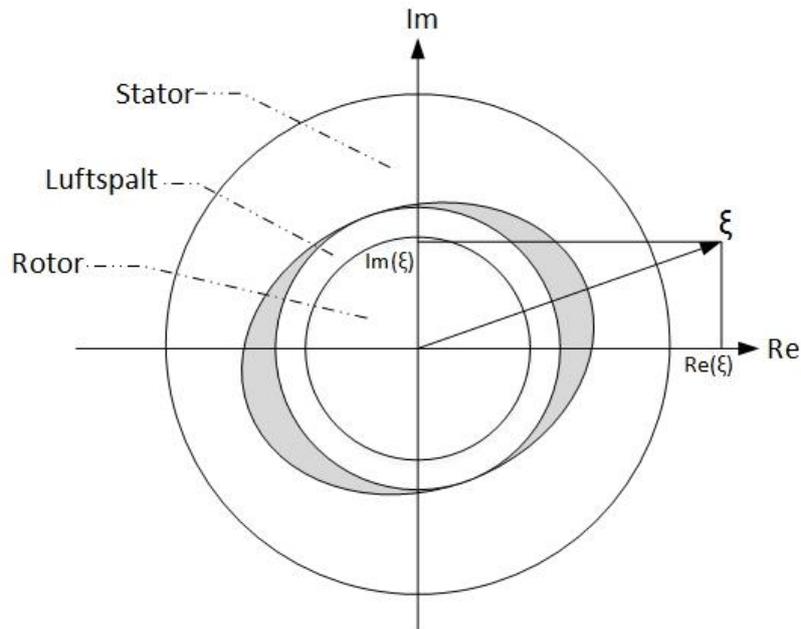


Abbildung 3-1 : Raumzeigerdarstellung in der Maschinenebene

Durch eine Umkehrtransformation können die Stranggrößen aus dem Raumzeiger zurückgewonnen werden. Gleichung (7).

$$\begin{aligned}
 i_R &= \operatorname{Re} \{ \underline{i} \} \\
 i_S &= \operatorname{Re} \{ \underline{a}^2 \cdot \underline{i} \} \\
 i_T &= \operatorname{Re} \{ \underline{a} \cdot \underline{i} \}
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

### 3.4 Koordinatentransformation

In den elektrischen Drehfeldmaschinen können je nach Anwendung verschiedene Koordinatensysteme verwendet werden. Die geeignete Wahl eines Koordinatensystems kann zu einer einfachen Rechnung oder zu einer besseren Darstellung der Maschinengleichungen führen. Die meist verwendeten Koordinatensysteme sind:

- Das statorfeste Koordinatensystem  $(\alpha, \beta)$ : die Achsen sind fix mit der Statorwicklung verbunden, sodass der Realteil dieses Koordinatensystems ( $\alpha$ ) mit der Strangspule ( $U$ ) identisch ist.
- Das rotorfeste Koordinatensystem  $(d, q)$ : die Achsen sind mit der Rotorwicklung verbunden, und rotiert daher mit der gleichen Geschwindigkeit (mechanische Winkelgeschwindigkeit) wie der Rotor.

- Das statorspannungsfeste Koordinatensystem ( $u, v$ ): die Achsen rotieren mit der Statorfrequenz, sodass der Statorspannungsraumzeiger immer in die Richtung der realen Achse ( $u$ ) zeigt.
- Das rotorflussfeste Koordinatensystem ( $x, y$ ): die Achsen sind mit dem Rotorflussraumzeiger verbunden, sodass dieser immer in die Richtung der realen Achse ( $x$ ) zeigt.

Eine Raumzeigergröße hat in allen Koordinatensystemen die gleiche Amplitude, nur ihr Winkel wird verdreht. Ist der Winkel zwischen zwei Koordinatensystemen bekannt, so kann der Raumzeiger von einem Koordinatensystem in das Zweite umgerechnet werden. Für eine allgemeine Größe in der komplexen Ebene lautet die Transformationsgleichung entsprechend der Darstellung in *Abbildung 3-2* wie folgt:

$$\underline{\xi} |_{KOS2} = \underline{\xi} |_{KOS1} \cdot e^{-j\gamma} \quad (8)$$

Umgekehrt gilt:

$$\underline{\xi} |_{KOS1} = \underline{\xi} |_{KOS2} \cdot e^{+j\gamma} \quad (9)$$

Die Zeitliche Ableitung einer Raumzeigergröße wird durch Differenzierung von Gleichung (8) mit der Anwendung der Produktregel erhalten.

$$\frac{d(\underline{\xi} |_{KOS2})}{d\tau} = \frac{d(\underline{\xi} |_{KOS1})}{d\tau} \cdot e^{-j\gamma} - j \cdot \frac{d\gamma}{d\tau} \cdot \underline{\xi} |_{KOS1} \cdot e^{-j\gamma} \quad (10)$$

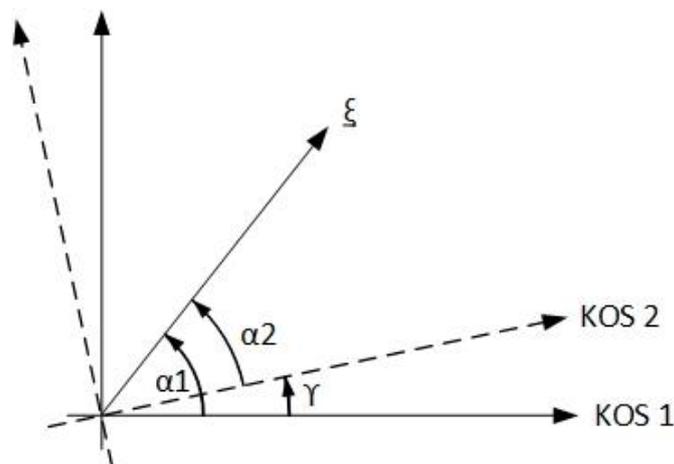


Abbildung 3-2 : Umrechnung einer komplexen Größe zwischen zwei Koordinatensystemen

### 3.5 Gleichungen der DASM in Raumzeigerdarstellung

Für die mathematische Beschreibung der DASM in Raumzeigerdarstellung werden die folgenden Gleichungen benötigt:

1. Zwei Gleichungen für Stator- und Rotorspannung
2. Zwei Gleichungen für Stator- und Rotorflussverkettung
3. Drehmoment Gleichung
4. Mechanische Gleichung

Die bezogene Raumzeigergleichung der Statorspannung wird aus den m-strängigen Gleichungen der Statorspannung mit der Anwendung der Raumzeigerdefinition gewonnen. Diese Gleichung lautet im statorfesten Koordinatensystem wie folgt:

$$\underline{u}_s = r_s \cdot \underline{i}_s + \frac{d\underline{\Psi}_s}{d\tau} \quad (11)$$

Ähnlich lautet die bezogene Raumzeigergleichung der Rotorspannung im rotorfesten Koordinatensystem wie folgt:

$$\underline{u}_r = r_r \cdot \underline{i}_r + \frac{d\underline{\Psi}_r}{d\tau} \quad (12)$$

Die bezogenen Gleichungen der Flussverkettung von Stator und Rotor ergeben sich wie folgt:

$$\underline{\Psi}_s = (x_{s\sigma} + x_{sh}) \cdot \underline{i}_s + x_{rh} \cdot \underline{i}_r \quad (13)$$

$$\underline{\Psi}_r = x_{sh} \cdot \underline{i}_s + (x_{r\sigma} + x_{rh}) \cdot \underline{i}_r \quad (14)$$

### 3.6 T-Ersatzschaltbild der DASM

Einsetzen der Rotorflussverkettungsgleichungen in den Spannungsgleichungen:

$$\underline{u}_s = r_s \cdot \underline{i}_s + \frac{d}{d\tau} \left( (x_{s\sigma} + x_{sh}) \cdot \underline{i}_s + x_{rh} \cdot \underline{i}_r \right) \quad (15)$$

$$\underline{u}_r = r_r \cdot \underline{i}_r + \frac{d}{d\tau} \left( x_{sh} \cdot \underline{i}_s + (x_{r\sigma} + x_{rh}) \cdot \underline{i}_r \right) \quad (16)$$

Diese Gleichungen können durch das Ersatzschaltbild in *Abbildung 3-3* dargestellt werden.

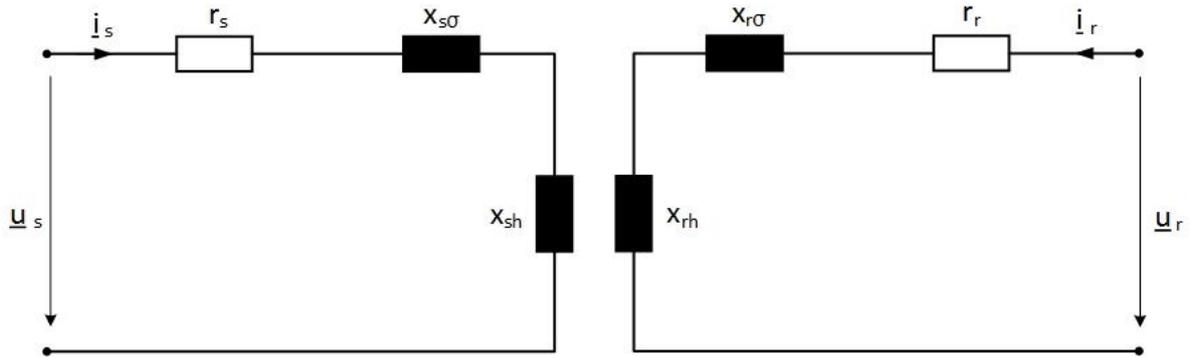


Abbildung 3-3 : repräsentatives Ersatzschaltbild für die Maschinengleichung

Um eine fiktive galvanische Verbindung zwischen dem Stator und dem Rotor zu erstellen, soll man den bezogenen Stator- und Rotorstrom in einem Knoten nach Kirschoff addieren und den resultierenden Strom in eine gemeinsame Induktivität schicken [4]. Dies wird erfüllt, indem die Hauptinduktivität des Rotors ( $x_{rh}$ ) durch die Hauptinduktivität des Stators ( $x_{sh}$ ) über das Übersetzungsverhältnis ersetzt wird [3]:

$$x_{sh} = \dot{u}^2 \cdot x_{rh} = xm \quad (17)$$

$$\dot{u} = \frac{N_s \cdot \xi_s}{N_r \cdot \xi_r}$$

**Anmerkung:** Von nun an wird die Selbstinduktivität des Stators ( $x_{sh}$ ) als Magnetisierungsinduktivität ( $xm$ ) bezeichnet.

Somit kann die Rotorspannungsgleichung wie folgt umgeschrieben werden:

$$\dot{u} \cdot \underline{u}_r = \dot{u}^2 \cdot r_r \cdot \frac{\dot{i}_r}{\dot{u}} + \frac{d}{d\tau} \left( x_m \cdot \underline{i}_s + (\dot{u}^2 \cdot x_{r\sigma} + \dot{u}^2 x_{rh}) \cdot \frac{\dot{i}_r}{\dot{u}} \right) \quad (18)$$

Mit:

$$\dot{u} \cdot \underline{u}_r = \underline{u}_R, \quad \dot{u}^2 \cdot r_r = r_R, \quad \frac{\dot{i}_r}{\dot{u}} = \underline{i}_R, \quad \dot{u}^2 \cdot x_{r\sigma} = x_{R\sigma}, \quad \dot{u}^2 \cdot x_{rh} = x_m \quad (19)$$

wird die auf die Statorseite umgerechnete Rotorspannungsgleichung erhalten:

$$\underline{u}_R = r_R \cdot \underline{i}_R + \frac{d}{d\tau} \left( x_m \cdot \underline{i}_s + (x_{R\sigma} + x_m) \cdot \underline{i}_R \right) \quad (20)$$

Mit dieser Umrechnung entsteht das T-Ersatzschaltbild der DASM (Abbildung 3-4).

**Anmerkung:** Es werden in dieser Arbeit die auf die Statorseite umgerechneten Rotorgrößen mit großem (R) bezeichnet, während die originalen Rotorgrößen mit kleinem (r) bezeichnet werden.

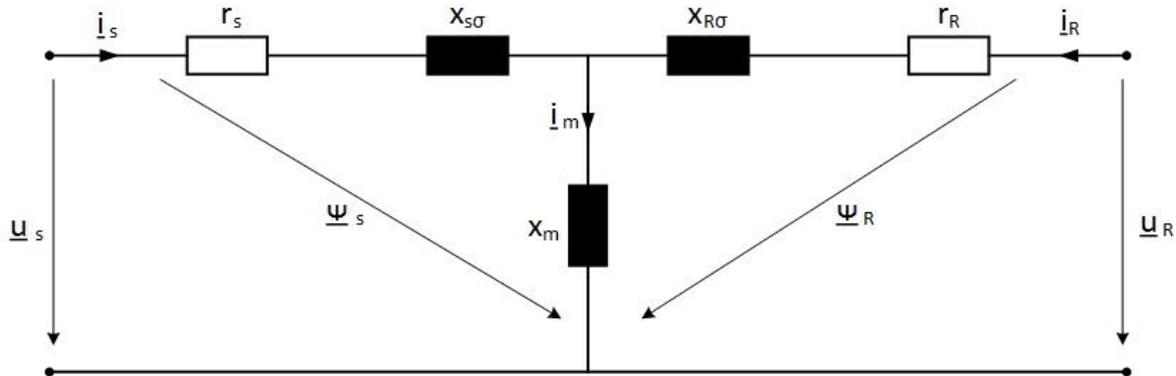


Abbildung 3-4 : T-Ersatzschaltbild der doppelt gespeisten Asynchronmaschine

### 3.7 Bestimmung der Maschinenparameter für das T-Ersatzschaltbild

Bei der Bestimmung der bezogenen Parameter wird von den Strang-Nenngrößen der Maschine ausgegangen. Es sollen dabei die folgenden Größen bekannt sein: Strang-Nennspannungen ( $U_{Ns,Str,eff}$ ,  $U_{Nr,Str,eff}$ ), Strang-Nennströme ( $I_{Ns,Str,eff}$ ,  $I_{Nr,Str,eff}$ ), Strangwiderstände ( $R_{s,Str}$ ,  $R_{r,Str}$ ), Stranginduktivität des Stators ( $L_{s,Str}$ ), Übersetzungsverhältnis ( $\dot{u}$ ) und Streufaktor ( $\sigma$ ).

Es werden zunächst die Basisgrößen für die Normierung ( $U_{Bs}$ ,  $U_{Br}$ ,  $I_{Bs}$ ,  $I_{Br}$ ,  $Z_{Bs}$ ,  $Z_{Br}$ ,  $w_{B,elek}$ ) entsprechend der Gleichung (2) berechnet. Dann werden die bezogenen Parameter des T-Ersatzschaltbilds wie folgt bestimmt:

$$\begin{aligned}
 r_s &= \frac{R_{s,Str}}{Z_{Bs}} & r_R &= \frac{R_{r,Str}}{Z_{Br}} \\
 x_s &= \frac{3}{2} \cdot \frac{L_{s,Str} \cdot w_{B,elek}}{Z_{Bs}} & x_m &= (1 - \sigma) \cdot x_s \\
 x_{s\sigma} &= \frac{\sigma}{2} \cdot x_s & x_{R\sigma} &= \frac{\sigma}{2} \cdot x_s \cdot \dot{u}
 \end{aligned} \tag{21}$$

Der Streufaktor ist dabei wie folgt definiert:

$$\sigma = 1 - \frac{x_m^2}{x_s \cdot x_R} \tag{22}$$

Mit:  $x_R = x_S$ :

$$\sigma = 1 - \frac{x_m^2}{x_s^2} \quad (23)$$

### 3.8 Maschinengleichungen in einem allgemeinen Koordinatensystem

Aus dem T-Ersatzschaltbild ergeben sich folgende Gleichungen:

$$\text{In statorfesten Koordinatensystem} \quad \underline{u}_S = r_S \cdot \underline{i}_S + \frac{d\underline{\Psi}_S}{d\tau} \quad (24)$$

$$\text{In rotorfesten Koordinatensystem} \quad \underline{u}_R = r_R \cdot \underline{i}_R + \frac{d\underline{\Psi}_R}{d\tau} \quad (25)$$

$$\text{In jedem Koordinatensystem} \quad \underline{\Psi}_S = (x_{S\sigma} + x_m) \cdot \underline{i}_S + x_m \cdot \underline{i}_R \quad (26)$$

$$\text{In jedem Koordinatensystem} \quad \underline{\Psi}_R = x_m \cdot \underline{i}_S + (x_{R\sigma} + x_m) \cdot \underline{i}_R \quad (27)$$

Nun müssen die Gleichungen in einem gemeinsamen Koordinatensystem geschrieben werden. Das kann ein statorfestes, rotorfestes, statorspannungsfestes oder beliebiges Koordinatensystem sein. Die Gleichungen von Flussverkettungen gelten in jedem beliebigen Koordinatensystem, da sie keine zeitliche Ableitung beinhalten. Die Spannungsgleichungen beinhalten eine zeitliche Ableitung. Deswegen werden sie je nach gewähltem Koordinatensystem unterschiedliche Transformationsterme erhalten.

Durch die Anwendung der Koordinatentransformation (Gleichung (8)) und ihrer zeitlichen Ableitung (Gleichung (10)) werden die Maschinengleichungen in ein allgemeines, mit beliebiger Winkelgeschwindigkeit ( $w_k$ ) rotierendes Koordinatensystem transformiert:

$$\underline{u}_S \cdot e^{j \cdot \gamma_K} = r_S \cdot \underline{i}_S \cdot e^{j \cdot \gamma_K} + e^{j \cdot \gamma_K} \cdot \frac{d\underline{\Psi}_S}{d\tau} + j \cdot \frac{d\gamma_K}{d\tau} \cdot \underline{\Psi}_S \cdot e^{j \cdot \gamma_K} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \underline{u}_R \cdot e^{j \cdot (\gamma_K - \gamma_M)} &= r_R \cdot \underline{i}_R \cdot e^{j \cdot (\gamma_K - \gamma_M)} + e^{j \cdot (\gamma_K - \gamma_M)} \cdot \frac{d\underline{\Psi}_R}{d\tau} \\ &+ j \cdot \left( \frac{d\gamma_K}{d\tau} - \frac{d\gamma_M}{d\tau} \right) \cdot \underline{\Psi}_S \cdot e^{j \cdot (\gamma_K - \gamma_M)} \end{aligned} \quad (29)$$

$$\underline{\Psi}_S \cdot e^{j \cdot \gamma_K} = (x_{S\sigma} + x_m) \cdot \underline{i}_S \cdot e^{j \cdot \gamma_K} + x_m \cdot \underline{i}_R \cdot e^{j \cdot \gamma_K} \quad (30)$$

$$\underline{\Psi}_R \cdot e^{j \cdot (\gamma_K - \gamma_M)} = x_m \cdot \underline{i}_S \cdot e^{j \cdot (\gamma_K - \gamma_M)} + (x_{R\sigma} + x_m) \cdot \underline{i}_R \cdot e^{j \cdot (\gamma_K - \gamma_M)} \quad (31)$$

Durch Division der Gleichungen (28), (30) durch den Term ( $e^{j \cdot \gamma_K}$ ) bzw. der Gleichungen (29), (31) durch den Term ( $e^{j \cdot (\gamma_K - \gamma_M)}$ ), und Einsetzen von:  $w_k = \frac{d\gamma_K}{d\tau}$  bzw.  $w_m = \frac{d\gamma_M}{d\tau}$  werden die Maschinengleichungen in einem allgemeinen Koordinatensystem erhalten:

$$\underline{u}_S = r_S \cdot \underline{i}_S + \frac{d\underline{\Psi}_S}{d\tau} + j \cdot w_k \cdot \underline{\Psi}_S \quad (32)$$

$$\underline{u}_R = r_R \cdot \underline{i}_R + \frac{d\underline{\Psi}_R}{d\tau} + j \cdot (w_k - w_m) \cdot \underline{\Psi}_R \quad (33)$$

$$\underline{\Psi}_S = (x_{S\sigma} + x_m) \cdot \underline{i}_S + x_m \cdot \underline{i}_R \quad (34)$$

$$\underline{\Psi}_R = x_m \cdot \underline{i}_S + (x_{R\sigma} + x_m) \cdot \underline{i}_R \quad (35)$$

Es fehlen noch die Drehmomentgleichung und die mechanische Gleichung. Das Drehmoment ergibt sich im Raumzeigerkalkül aus dem Produkt von der Konjugierten des Statorstroms und der Flussverkettung:

$$m_{elek} = -Im \{ \underline{i}_S^* \cdot \underline{\Psi}_S \} \quad (36)$$

Mit:  $\underline{i}_S^* = i_{Sreal} - j i_{Simag}$  ,  $\underline{\Psi}_S = \Psi_{Sreal} + j \Psi_{Simag}$  (37)

Wird:  $m_{elek} = i_{Simag} \cdot \Psi_{Sreal} - i_{Sreal} \cdot \Psi_{Simag}$  (38)

Durch die mechanische Gleichung wird eine Verbindung zwischen Drehmoment und mechanischer Drehzahl erstellt. Das Trägheitsmoment des Rotors wird bei der Normierung durch eine mechanische Anlaufzeitkonstante ( $\tau_m$ ) ersetzt. Die mechanische Gleichung lautet dann wie folgt:

$$\frac{d w_m}{d\tau} = \frac{1}{\tau_m} \cdot (m_{elek} - m_{last}) \quad (39)$$

Somit ist die Maschine mathematisch vollständig beschrieben.

## Kapitel 4 : Regelung der doppelt gespeisten Asynchronmaschine

### 4.1 Feldorientierte Regelung

Die feldorientierte Regelung ist ein weitverbreitetes Regelverfahren in der Antriebstechnik. Durch dieses Verfahren werden die kurzschlussartigen Ströme vermieden, die bei der Umrichter-Steuerung nach U/f-Kennlinie auftreten. Dadurch werden ein hochdynamischer Betrieb und eine höhere Stromüberlastbarkeit der Maschine ermöglicht.

Der Grundgedanke dahinter ist, den magnetischen Fluss und das Drehmoment unabhängig voneinander zu steuern. Der magnetische Fluss wird gemeinsam vom Stator- und Rotorstrom gebildet (*Abbildung 4-1*). Das Drehmoment ergibt sich dann aus dem gebildeten Flussraumzeiger und der dazu normal stehenden Stator-Stromkomponente [3] (Gleichung (42)).

$$m_{elek} = -Im \{ \underline{i}_s^* \cdot \underline{\Psi}_s \} = -Im \{ \underline{i}_s^* \cdot (\underline{\Psi}_m + x_{s\sigma} \cdot \underline{i}_s) \} \quad (40)$$

Mit:  $\underline{i}_s^* \cdot \underline{i}_s = |i_s|^2 \quad (41)$

Wird:  $m_{elek} = -Im \{ \underline{i}_s^* \cdot \underline{\Psi}_m \} \quad (42)$

In anderen Worten bedeutet das, dass die flussparallele Statorstromkomponente (Stromkomponente, die parallel zum Flussraumzeiger steht) für die Magnetisierung der Maschine verantwortlich ist, während die flussnormale Statorstromkomponente (Stromkomponente, die normal zum Flussraumzeiger steht) für den Aufbau des Drehmoments verantwortlich ist.

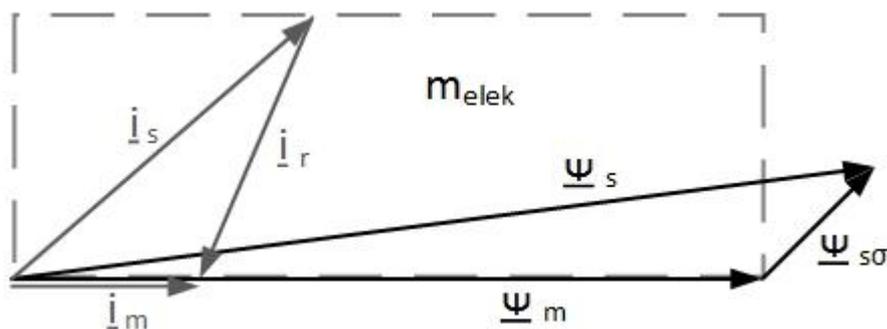


Abbildung 4-1 : Bildung des elektrischen Drehmoments in der feldorientierten Regelung

Die feldorientierte Regelung kann in verschiedenen Variationen realisiert werden, die sich je nach Wahl der Regelgröße und des Koordinatensystems voneinander unterscheiden. Für

einen dynamischen Betrieb wird die Regelung meistens im flussfesten Koordinatensystem implementiert.

Dadurch, dass sich das statorspannungsfeste Koordinatensystem nur um einen vernachlässigbaren Winkel vom statorflussfesten Koordinatensystem unterscheidet und, die DASM statorseitig direkt mit der Netzspannung verbunden ist, ist es sinnvoll, die Regelung in einem statorspannungsfesten Koordinatensystem durchzuführen. Denn somit können die Sollregelgrößen direkt vom Netz vorgegeben werden.

## 4.2 Zielsetzung der Regelung

Aus den oben genannten Gründen wird die Regelung in dieser Arbeit im statorspannungsfesten Koordinatensystem implementiert. Das Ziel der Regelung ist es, eine geforderte Wirk- beziehungsweise Blindleistung in Bezug auf das Netz zu erreichen.

Durch die Vorgabe von Wirk- bzw. Blindleistung wird eine indirekte feldorientierte Regelung in der DASM erfolgen. Die Statorspannung und Statorfrequenz werden dabei vom Netz vorgegeben. Wird daher eine bestimmte Wirk- bzw. Blindleistung vom Netz gefordert, so wird die Amplitude des Statorstroms und sein Winkel bezüglich der Statorspannung festgestellt. Nun müssen die Rotorgrößen so eingestellt werden, dass sie genau diesen Statorstrom aufbringen. Der Rotorstrom ergibt sich bei bekanntem Statorstrom direkt aus den Maschinengleichungen. Die Aufgabe der Regler ist es daher, jene Rotorspannung zu erzeugen, die bei vorgegebener Drehzahl die geforderte Wirk- bzw. Blindleistung erzielt.

## Kapitel 5 : Betrieb der doppelt gespeisten Asynchronmaschine am Netz

### 5.1 Rotorfrequenz und mechanische Drehzahl

Durch die direkte Verbindung der Statorwicklung mit dem Netz werden die Statorspannung und Statorfrequenz vom Netz vorgegeben. Rotorspannung und Rotorfrequenz können durch den Umrichter eingestellt werden. Somit kann z.B. der Schlupf variiert werden, um den Rotorstrom bei Anlauf der Maschine ohne zusätzliche Wärmeverluste zu reduzieren, oder, um das Drehmoment bei konstanter mechanischer Drehzahl zu erhöhen. Die Rotorfrequenz soll sich aus der Statorfrequenz und der mechanischen Drehzahl ergeben. Es gilt im Allgemeinen die folgende Beziehung:

$$f_s = p * n_m + f_r \quad (43)$$

Der Schlupf wird dabei wie folgt bestimmt:

$$s = \frac{n_s - n_m}{n_s} \quad (44)$$

wobei:

$$n_s = \frac{f_s}{p} \quad (45)$$

Bei Änderung der mechanischen Drehzahl soll die Rotorfrequenz so eingestellt werden, dass diese gemeinsam mit der Drehzahl die vom Netz vorgegebene Statorfrequenz ergibt (Gleichung (43)). Läuft die Maschine also untersynchron (d.h. mit einer mechanischen Drehzahl, die kleiner ist als die synchrone Drehzahl), so soll die Läuferwicklung mit einer positiven Frequenz eingespeist werden. Das bedeutet, die Rotorströme müssen eine Phasenfolge haben, bei der das Rotordrehfeld in die gleiche Richtung rotiert wie der Rotor. Abbildung 5-1 (a). Läuft die Maschine dagegen übersynchron (mit einer mechanischen Drehzahl, die größer ist als die Synchrodrehzahl), so soll die Rotorfrequenz einen negativen Wert aufweisen. Das bedeutet, dass sich die Phasenfolge der Rotorströme umdreht (z.B. werden zwei von den drei Rotorstränge getauscht). Das Rotordrehfeld rotiert somit in gegensinniger Richtung des Rotors, um die Statorfrequenz aufrecht zu erhalten (Abbildung 5-1 (b)). Dreht sich die mechanische Welle mit der synchronen Drehzahl ( $n_m = n_s$ ), so soll die Rotorfrequenz auf null eingestellt werden. Es fließt ein Gleichstrom in der Rotorwicklung und die DASM verhält sich wie eine Synchronmaschine.

**Beispiel:** Eine vier-polige doppelt gespeiste Asynchronmaschine wird in eine Windkraftanlage zur Erzeugung elektrischer Energie eingesetzt. Die Windturbine treibt die Maschine mit einer mechanischen Drehzahl von  $n_m = 1680$  1/min. Für eine Netzfrequenz von ( $f_s = 50$  Hz) sollen in der Rotorwicklung Ströme mit der Frequenz:

$$f_r = f_s - p * n_m = 50 - \frac{4}{2} * \frac{1680}{60} = -6 \text{ Hz}$$

eingespeist werden.

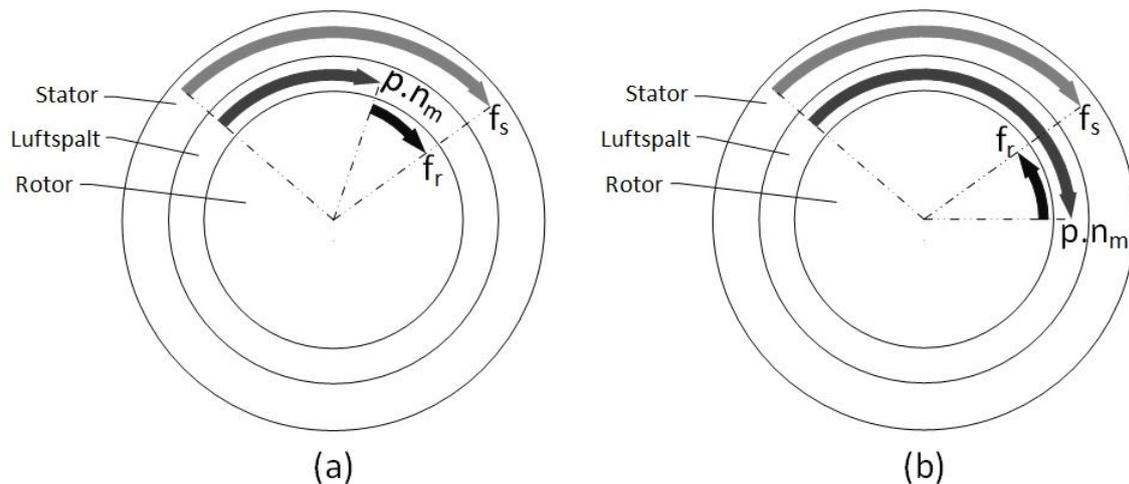


Abbildung 5-1 : Rotorfrequenz der DASM in einem untersynchronen (a) und einem übersynchronen (b) Betrieb

## 5.2 Rotorspannung

Da die Statorspannung bei der DASM vom Netz festgestellt wird, muss die Flussverkettung entsprechend der geforderten Wirk- und Blindleistung konstant gehalten werden. Daher muss die Amplitude der Rotorspannung proportional zu der mechanischen Drehwinkelgeschwindigkeit eingestellt werden. Ist die Maschine festgebremst ( $w_m = 0$ ) so weist die Rotorspannung einen Wert in ungefähr gleicher Höhe wie die Statorspannung auf. Die Maschine funktioniert dann wie ein Transformator. Wird nun die Drehzahl bei einer bestimmten Wirk- bzw. Blindleistung erhöht, so verringert sich die Rotorspannungsamplitude, um den Rotorfluss bei konstanter Leistung aufrecht zu erhalten. Der Rotorwiderstand bewirkt dabei eine Phasenverschiebung der Rotorspannung gegenüber der bei festgebremster Maschine eingestellten Rotorspannung. Diese Phasenverschiebung ist sowohl von der Drehzahl, als auch von der geforderten Wirk- bzw. Blindleistung abhängig. Die Rotorspannung erreicht bei der Synchrodrehzahl einen Wert nahezu null.

## 5.3 Motor- und Generatorbetrieb der DASM

Durch die Einspeisung der Rotorwicklung über einen Umrichter oder über eine Spannungsquelle, besteht die Möglichkeit, die Phasenlage zwischen Rotorspannung und Rotorstrom frei zu wählen. Dadurch kann der Statorstrom in Bezug auf die Statorspannung so verändert werden, dass die Maschine in allen vier Quadranten betrieben wird. Das heißt, die DASM kann ähnlich wie eine Synchronmaschine als Motor und Generator im

übererregten und untererregten Betrieb arbeiten. Abbildung 5-2 zeigt ein Zeigerdiagramm der DASM im Motor- und Generatorbetrieb.

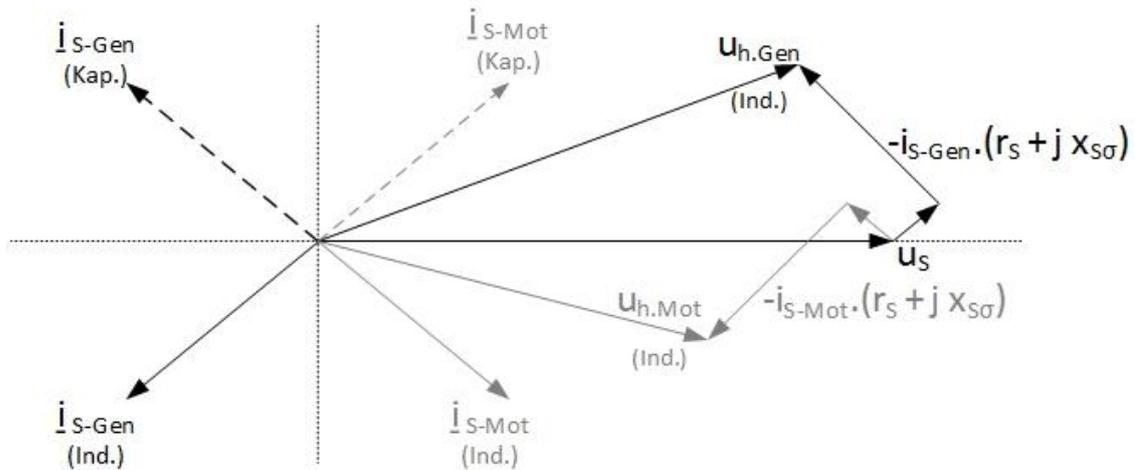


Abbildung 5-2 : Zeigerdiagramm in Motor- und Generatorbetrieb der DASM

## 5.4 Leistungsfluss

In der doppelt gespeisten Asynchronmaschine erfolgt ein Wirkleistungsfluss sowohl zwischen dem Stator und der mechanischen Welle, als auch zwischen dem Rotor und der mechanischen Welle. Es kommt auch zu einem direkten Leistungsaustausch zwischen dem Stator und dem Rotor. Darüber hinaus kann die DASM, im Gegensatz zu der normalen ASM nicht nur als Induktivität, sondern auch als Kondensator statorseitig bezüglich dem Netz wirken. Sie kann zum Beispiel als Motor arbeiten und gleichzeitig eine Blindleistung vom Stator ins Netz einspeisen, indem sie rotorseitig über den Umrichter magnetisiert.

### 5.4.1 Wirkleistungsbilanz

Die Beziehung zwischen Statorwirkleistung, Rotorwirkleistung und mechanischer Leistung erfüllt nach dem Abzug der Verluste, je nach dem Betrieb, die folgende Bilanz:

Generatorbetrieb:

$$\text{untersynchron} \quad p_m - p_s + p_r - p_{\text{wärme}} = 0 \quad (46)$$

$$\text{übersynchron} \quad p_m - p_s - p_r - p_{\text{wärme}} = 0 \quad (47)$$

Motorbetrieb:

$$\text{untersynchron} \quad p_s - p_r - p_m - p_{\text{wärme}} = 0 \quad (48)$$

$$\text{übersynchron} \quad p_s + p_r - p_m - p_{\text{wärme}} = 0 \quad (49)$$

Anmerkung: In den Gleichungen (46) bis (49) wird die vom Stator bzw. vom Rotor aufgenommene Wirkleistung mit Pluszeichen bezeichnet, während die vom Stator oder vom Rotor abgegebene Wirkleistung mit Minuszeichen bezeichnet wird.

Anmerkung: Die Größe des Wärmeverlustes ( $p_{\text{wärme}}$ ) kann im übersynchronen Generatorbetrieb (Gleichung (47)) und im untersynchronen Motorbetrieb (Gleichung (48)) die Wirkungsrichtung der Rotorwirkleistung ( $p_r$ ) beeinflussen.

Die Verluste setzen sich dabei aus Reibungs- und Wärmeverluste zusammen. In dieser Arbeit werden die Reibungsverluste vernachlässigt. Die Wärmeverluste können wie folgt bestimmt werden:

$$p_{\text{wärme}} = r_s \cdot \underline{i}_S^2 + r_R \cdot \underline{i}_R^2 \quad (50)$$

Die mechanische Leistung wird aus dem Drehmoment und der Drehzahl bestimmt:

$$p_m = m_{\text{elek}} \cdot n_m \quad (51)$$

Abbildung 5-3 und *Abbildung 5-4* veranschaulicht den Wirkleistungsfluss in einem übersynchronen und einem untersynchronen generatorischen Betrieb.

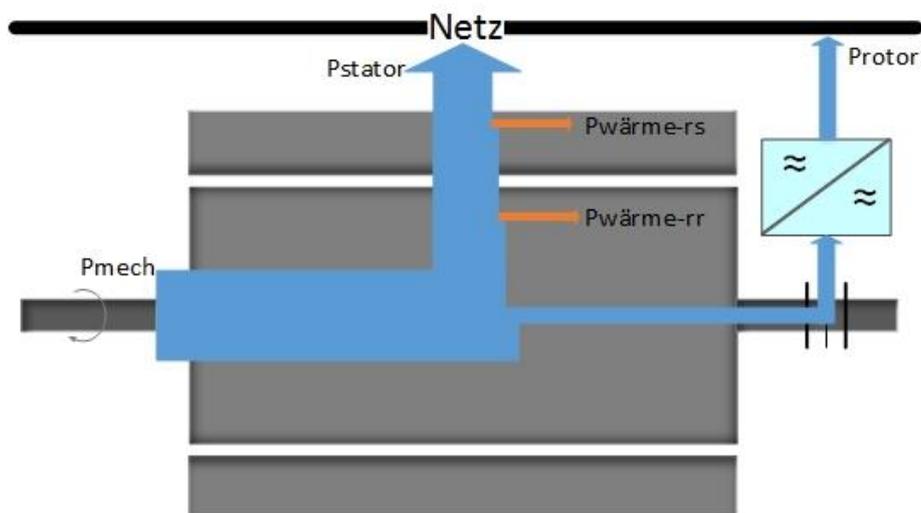


Abbildung 5-3 : Wirkleistungsfluss der DASM in einem übersynchronen Generatorbetrieb

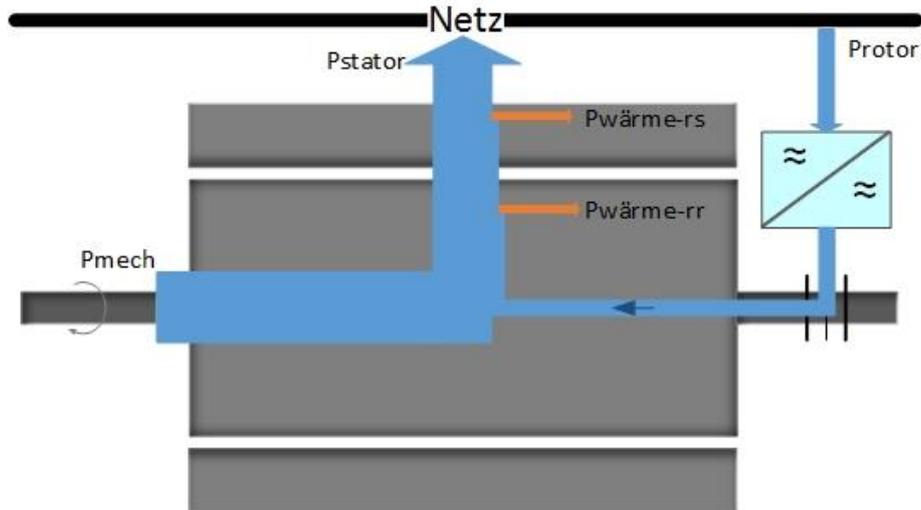


Abbildung 5-4 : Wirkleistungsfluss der DASM in einem untersynchronen Generatorbetrieb

#### 5.4.2 Blindleistungsbilanz

Wie jeder elektromagnetische Energiewandler hat die doppelt gespeiste Asynchronmaschine einen Bedarf an Blindleistung. Dieser Bedarf setzt sich aus dem Magnetisierungsbedarf und den Streufeldverlusten der Stator- und Rotorwicklung zusammen. Der Blindleistungsbedarf kann in der DASM sowohl statorseitig als auch rotorseitig gedeckt werden. Außerdem kann ein Blindleistungsaustausch zwischen Stator und Rotor erfolgen. Es ist in der DASM bemerkenswert, dass die Rotorblindleistung eine dem Schlupf proportional Größe ist. Das liegt daran, dass die Rotorspannung und der Rotorstrom mit der mechanischen Winkelgeschwindigkeit rotieren, während die Statorspannung und der Statorstrom mit der synchronen Drehzahl ( $n_s = \frac{f_s}{p}$ ) rotieren. Somit entsteht bei der Berechnung von Rotorblindleistung eine Abhängigkeit zum Schlupf ( $s = \frac{n_s - nm}{n_s}$ ). Aus diesem Grund ist es von großem Vorteil in der DASM, den Blindleistungsbedarf rotorseitig einzubringen. Dies gilt vor allem bei Drehzahlen, die rund um die Synchronendrehzahl liegen. Denn diese bedeutet einen geringeren Schlupfwert und somit wird der Blindleistungsbedarf um den Schlupfwert reduziert.

Für die Blindleistungsbilanz in bezogenen Größen gilt dann im Allgemeinen die folgende Beziehung:

$$q_s + \frac{q_r}{s} = q_{mag} + q_{Streu} \quad (52)$$

Durch das Dividieren der Rotorblindleistung durch den Schlupf wird die auf der Statorseite bezogene Rotorblindleistung erhalten. Diese wird in dieser Arbeit als  $q_{r_s}$  bezeichnet:

$$q_{r_s} = \frac{q_r}{s} \quad (53)$$

Anmerkung: Die Stator- und Rotorblindleistung werden in Gleichung (52) als positiv bezeichnet, wenn der Stator bzw. der Rotor eine Blindleistung vom Netz oder dem Umrichter aufnimmt (induktiv), und als negativ bezeichnet, wenn der Stator bzw. der Rotor eine Blindleistung ins Netz abgibt (kapazitiv).

$q_{Streu}$  : repräsentiert die Streufeldverluste in Stator- und Rotorwicklung. Diese können wie folgt bestimmt werden:

$$q_{Streu} = x_{s\sigma} \cdot \underline{i}_S^2 + x_{r\sigma} \cdot \underline{i}_R^2 \quad (54)$$

Die Magnetisierungsleistung ist nicht konstant, sondern ändert sich je nach Betriebspunkt. So bezieht die Maschine im Generatorbetrieb bei derselben Leistung mehr Magnetisierungsbedarf als im Motorbetrieb, weil die Amplitude der induzierten Spannung im Generatorbetrieb größer ist als im Motorbetrieb, wie Abbildung 5-2 zeigt.

$$q_{mag} = u_h \cdot i_m \quad (55)$$

Man sieht in der Gleichung (52) die Abhängigkeit der Rotorleistung vom Schlupf. Als Beispiel nehmen wir an, dass die Maschine für einen bestimmten Betriebspunkt einen Magnetisierungsbedarf von ( $q_m = 0.3 \text{ p.u}$ ) braucht, und dass die Streufeldverluste für diesen Betriebspunkt ( $q_{Streu} = 0.15 \text{ p.u}$ ) betragen. Nehmen wir weiter an, dass es keinen Blindleistungsaustausch zwischen Stator und Rotor gibt. Soll nun der Blindleistungsbedarf statorseitig gedeckt werden, so nimmt der Stator die folgende Blindleistung vom Netz auf:

$$q_s = 0.3 + 0.15 = 0.45 \text{ p.u}$$

Wird der Blindleistungsbedarf dagegen rotorseitig gedeckt, so nimmt der Rotor für einen Schlupfwert von  $s = 0.1$  (d.h.  $n_m = 0.9$ ) die folgende Blindleistung vom Netz auf:

$$q_r = s \cdot (0.3 + 0.15) = 0.1 \cdot 0.45 = 0.045 \text{ p.u}$$

## Kapitel 6 : Modellierung der doppelt gespeisten Asynchronmaschine in Matlab-Simulink

### 6.1 Allgemeines

Es wird in diesem Kapitel erklärt, wie und unter welchen Voraussetzungen das Modell für die DASM in Matlab-Simulink erstellt wurde. Für weitere Information über die Simulation von elektrischen Antrieben siehe [7] .

### 6.2 Maschinengleichung im statorfesten Koordinatensystem

Für die Simulation der DASM werden die Maschinengleichungen in einem statorfesten Koordinatensystem eingesetzt. Wird die Winkelgeschwindigkeit in den Gleichungen (24) bis (27) zu null gesetzt ( $w_k = 0$ ), so werden aus den Maschinengleichungen in einem allgemeinen Koordinatensystem die Maschinengleichungen im statorfesten Koordinatensystem ( $\alpha, \beta$ ) erhalten:

$$\underline{u}_s = r_s \cdot \underline{i}_s + \frac{d\underline{\Psi}_s}{d\tau} \quad (56)$$

$$\underline{u}_R = r_R \cdot \underline{i}_R + \frac{d\underline{\Psi}_R}{d\tau} - j \cdot w_m \cdot \underline{\Psi}_R \quad (57)$$

$$\underline{\Psi}_s = (x_{s\sigma} + x_m) \cdot \underline{i}_s + x_m \cdot \underline{i}_R \quad (58)$$

$$\underline{\Psi}_R = x_m \cdot \underline{i}_s + (x_{R\sigma} + x_m) \cdot \underline{i}_R \quad (59)$$

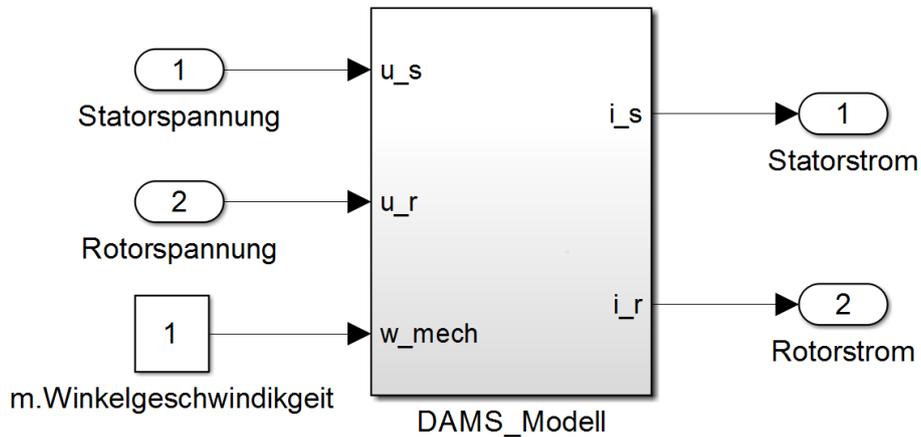
Mit der Drehmomentgleichung (38) und der mechanischen Gleichung (39) kann nun die DASM vollständig simuliert werden.

### 6.3 Erstellung eines DASM-Modell in Matlab-Simulink

Ausgehend von den Maschinengleichungen im statorfesten Koordinatensystem wird das Modell der DASM in Simulink erstellt. Die Statorspannung ist vom Netz vorgegeben und soll daher als Eingangsgröße für das Modell dienen. Die Rotorspannung soll nach der Regelung in die Maschine zurückgespeist werden. Daher dient diese auch als Eingangsgröße für das Modell. Das an der mechanischen Welle gekoppelte Drehmomentsystem wird in diesem Modell nicht berücksichtigt, sondern durch eine konstante Drehzahl ersetzt, die dann als weitere Eingangsgröße für das Modell eingesetzt wird. Der Stator- und Rotorstrom

repräsentieren die Ausgangsgrößen des Maschinenmodells. Sie werden aus den Maschinengleichungen bestimmt, und dann weiter für die Regelung beziehungsweise für die Berechnung der Rotorspannung eingesetzt.

Der Modellblock der DASM soll dann wie in *Abbildung 6-1* ausschauen:



*Abbildung 6-1 : DASM-Modell als Blackbox in Matlab-Simulink*

Nun sollen die Maschinengleichungen umgestaltet werden, so dass sie das obige Modell ergeben. Zuerst wird aus den drei Strangspannungen des Stators (R, S, T) ein Spannungsraumzeiger entsprechend Raumzeigerdefinition in Gleichung (5) gebildet. Die Strangspannungen können in Simulink mittels des Blocks *Sine Wave* realisiert werden. In den Block-Parametern wird die *Amplitude* der Strangspannungen auf 1 (für bezogene Nennspannung) und die *Frequenz* auf  $2 * \pi * 50 \text{ rad/sec}$  (für bezogene Netzfrequenz) gesetzt. Weiteres wird im Block des Strangs S eine zeitliche Verzögerung von  $-2 * \pi / 3 \text{ rad}$  unter *Phase* eingegeben, um eine Phasenverschiebung von  $\frac{2\pi}{3} \text{ rad}$  zwischen der Phase R und der Phase S zu verwirklichen. Ähnlich wird im Block des Strangs T eine zeitliche Verzögerung von  $-4 * \pi / 3 \text{ rad}$  unter *Phase* eingegeben, um eine Phasenverschiebung von  $\frac{4\pi}{3} \text{ rad}$  zwischen der Phase R und der Phase T zu verwirklichen.

Eine mögliche Realisierung zur Bildung des Spannungsraumzeigers in Simulink ist in *Abbildung 6-2* dargestellt.

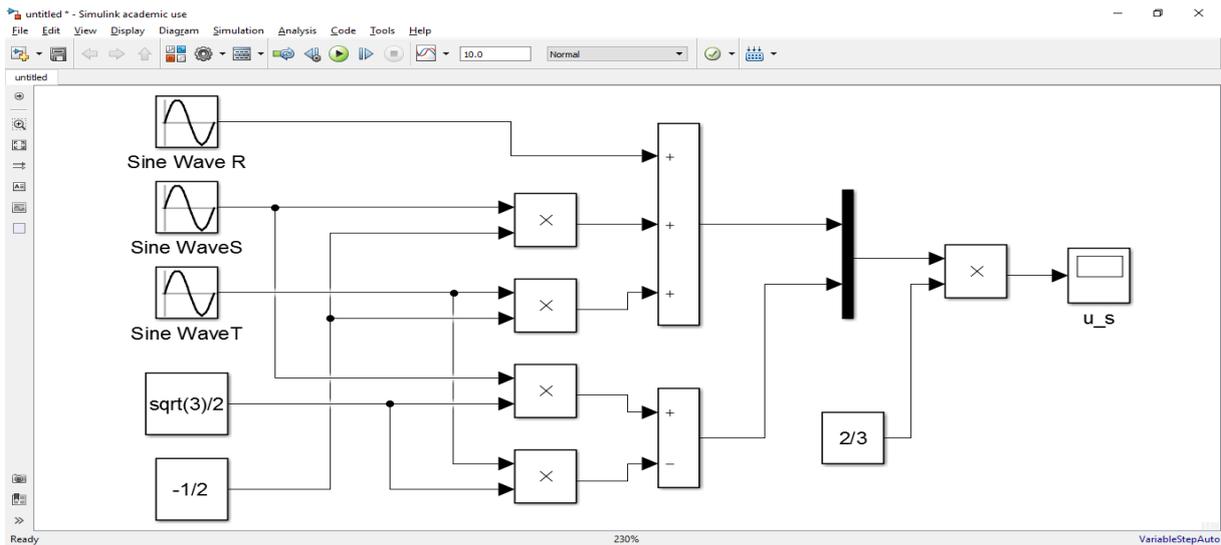


Abbildung 6-2 : Bildung des Statorspannungsraumzeigers

In Abbildung 6-3 ist der bezogene Statorspannungsraumzeiger mittels eines *Scope* dargestellt. Man sieht, dass dieser eine Periodendauer von  $T = 0.02 \text{ sec}$  hat, was einer Frequenz von  $f = \frac{1}{T} = 50 \text{ Hz}$  entspricht.

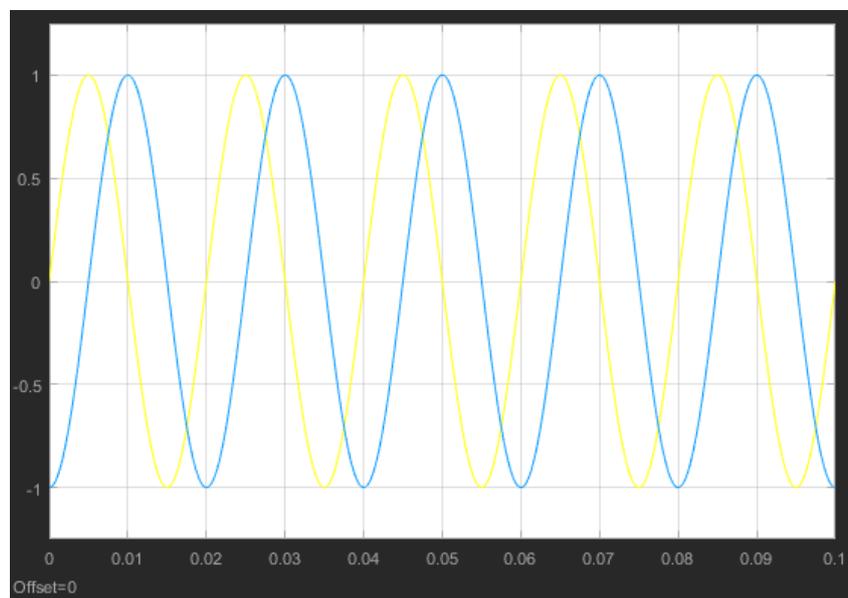


Abbildung 6-3 : Bezogener Spannungsraumzeiger mit 50 Hz

Ausgehend vom Statorspannungsraumzeiger wird der Statorfluss gerechnet. Aus den Gleichungen (56) wird:

$$\frac{d\underline{\Psi}_s}{d\tau} = \underline{u}_s - r_s \cdot \underline{i}_s \quad (60)$$

Diese Differenzialgleichung wird in Simulink durch die Verwendung vom Integrationsglied gelöst. Nun wird durch das Einsetzen von Gleichung (58) die folgende Beziehung erhalten:

$$\underline{\Psi}_s = \int (\underline{u}_s - r_s \cdot \underline{i}_s) d\tau = (x_{s\sigma} + x_m) \cdot \underline{i}_s + x_m \cdot \underline{i}_R \quad (61)$$

Aus dieser Gleichung kann der Statorstrom bestimmt werden:

$$\underline{i}_s = \frac{1}{(x_{s\sigma} + x_m)} \cdot \int (\underline{u}_s - r_s \cdot \underline{i}_s) d\tau - \frac{x_m}{(x_{s\sigma} + x_m)} \cdot \underline{i}_R \quad (62)$$

Der Rotorstrom wird aus den Rotorgleichungen bestimmt, und für die Berechnung vom Statorstrom rückgekoppelt.

Aus dem Statorfluss und dem Statorstrom wird das elektrische (innere) Moment der Maschine entsprechend Gleichung (38) bestimmt.

Statorgleichungen können in Simulink wie in Abbildung 6-4 realisiert werden.

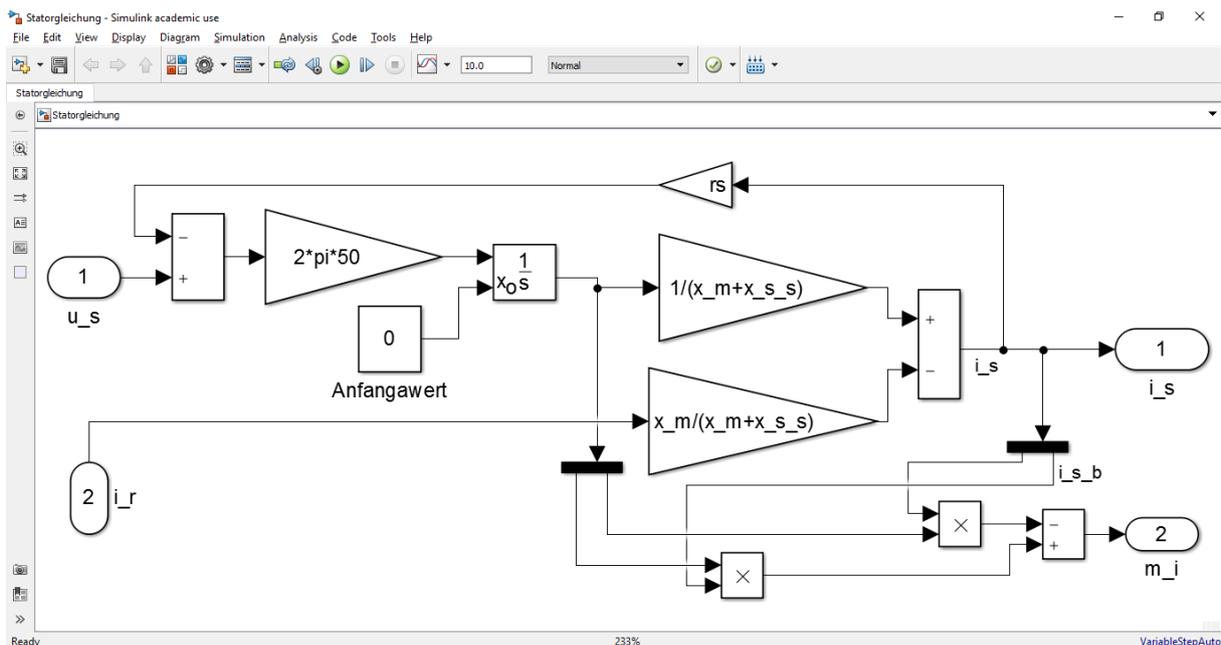


Abbildung 6-4 : Mögliche Implementierung der Statorgleichungen in Matlab-Simulink

Es fehlt noch die Berechnung des Rotorstroms. Unter der Annahme, dass die Rotorspannung und die mechanische Drehzahl als Eingänge für das Modell bekannt sind, kann der Rotorstrom aus der Rotorspannungsgleichung und der Rotorflussgleichung durch Rückkopplung des oben berechneten Statorstroms bestimmt werden.

Durch Umformen der Rotorspannungsgleichung (Gleichung(57)) wird die folgende Gleichung erhalten:

$$\underline{\Psi}_R = \int (\underline{u}_R - r_R \cdot \underline{i}_R + j \cdot \omega_m \cdot \underline{\Psi}_R) d\tau \quad (63)$$

Diese Gleichung ist eine Differenzialgleichung erster Ordnung und kann in Simulink mittels eines Integrationsterms und durch Rückkopplung der Ausgangsgröße (hier Rotorfluss) gelöst werden.

Nun kann der Rotorstrom aus der Rotorflussgleichung (Gleichung (59)) bestimmt werden:

$$\underline{i}_R = \frac{\underline{\Psi}_R - x_m \cdot \underline{i}_S}{x_{R\sigma} + x_m} \quad (64)$$

$$\underline{i}_R = \frac{1}{x_{R\sigma} + x_m} \cdot \int (\underline{u}_R - r_R \cdot \underline{i}_R + j \cdot \omega_m \cdot \underline{\Psi}_R) - \frac{x_m}{x_{R\sigma} + x_m} \cdot \underline{i}_S \quad (65)$$

Abbildung 6-5 zeigt eine mögliche Umsetzung der Rotorgleichungen in Simulink.

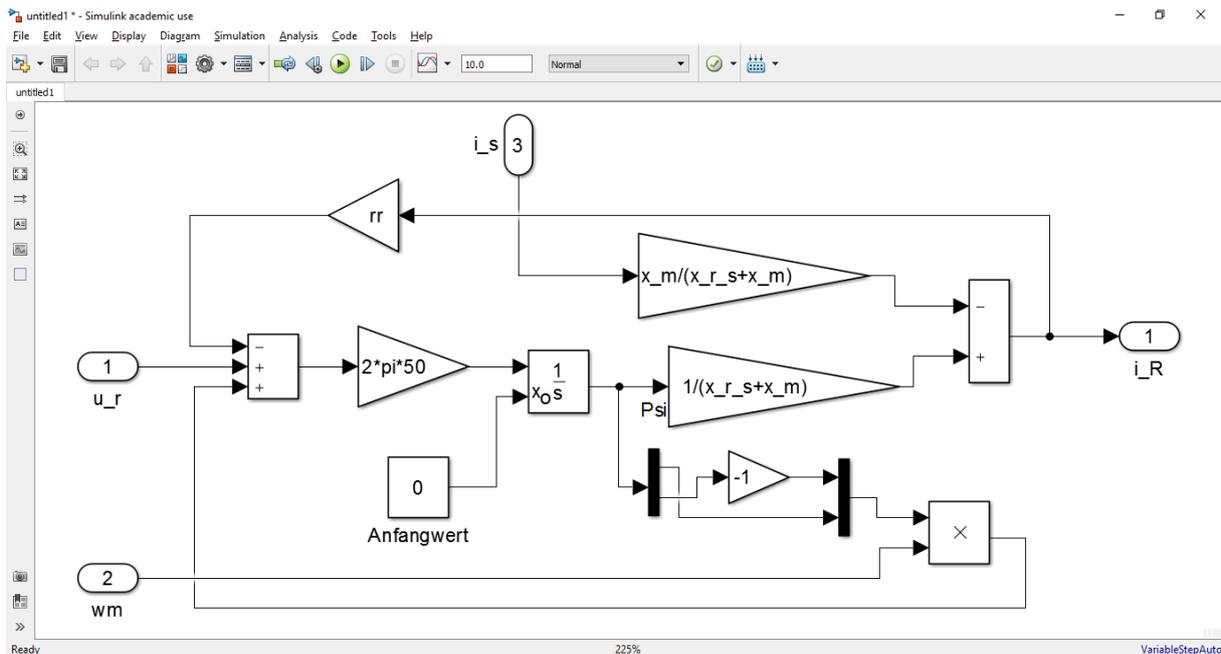


Abbildung 6-5 : Mögliche Implementierung der Rotorgleichungen in Matlab-Simulink

Der elektrische Teil der doppelt gespeisten Asynchronmaschine ist somit entsprechend dem T-Ersatzschaltbild in Abbildung 3.4 simuliert worden. Das an der Welle gekoppelte Lastmoment kann durch die mechanische Gleichung (39) berücksichtigt werden. Die mechanische Drehzahl ergibt sich dann durch die Integration über die mechanischen Zeitkonstante wie folgt:

$$w_m = \int \frac{1}{\tau_m} \cdot (m_{elek} - m_{last}) \quad (66)$$

Das mechanische System kann in Simulink wie in Abbildung 6-6 berücksichtigt werden.

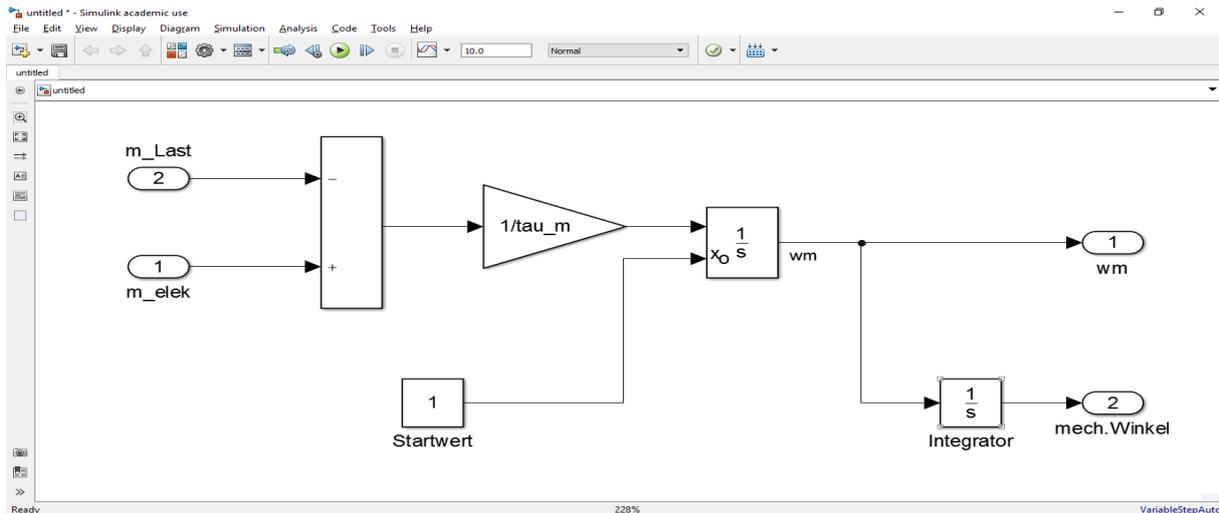


Abbildung 6-6 : Mögliche Implementierung der Bewegungsgleichung in Matlab-Simulink

Der mechanische Winkel wird durch eine neuerliche Integration der Zwischengröße erhalten. Dieser Winkel wird gebraucht, um die Zustandsgrößen der Maschine im rotorfesten Koordinatensystem zu transformieren.

Nun können alle Gleichungen in einer Blackbox entsprechend *Abbildung 6-1* zusammengefasst werden. Die Maschine wird somit durch ihre Eingänge und Ausgänge beschrieben.

## 6.4 Überprüfung des DASM-Modells

### 6.4.1 Allgemeines

Die Simulationsergebnisse werden am Ende der Simulation als zeitliche Verläufe der verschiedenen Zustandsgrößen dargestellt. Es ist daher schwierig zu beurteilen, ob diese Ergebnisse auch den tatsächlichen physikalischen Zustand der Maschine beschreiben. Um das erstellte Modell überprüfen zu können, werden hier zwei spezielle Versuche durchgeführt, die die Maschine in zwei Randfällen beschreiben. Dadurch ist es möglich, die Gültigkeit des Modells analytisch zu bewerten.

## 6.4.2 Festgebremster Rotor-Versuch

Für diesen Versuch wird Statorspannung mit einer Amplitude von 1 p.u (Nennspannung) eingesetzt. Die mechanische Drehzahl ist bei einer festgebremsten Maschine gleich Null und wird mit einer Konstante eingesetzt. Jetzt muss man sich überlegen welche Rotorspannung eingesetzt werden soll, um das physikalische Verhalten der Maschine bei diesem Versuch zu simulieren. Die Maschine funktioniert bei festgebremsten Rotor wie ein Transformator. Daher soll sich die Rotorspannung nur um einen gewissen Verlust von der Statorspannung unterscheiden. Wird daher die Statorspannung mit dem Verhältnis  $\left(\frac{x_m}{x_m+x_{s\sigma}}\right)$  multipliziert (Abbildung 6-7), so wird bei Vernachlässigung des Statorwiderstands die innere Spannung der Maschine erzeugt (Spannungsteiler-Regel). Wird nun die innere Spannung als Rotorspannung am Eingang des Modells eingesetzt, so sollte sich ein Rotorstrom ergeben, der einen Wert nahezu Null aufweist.

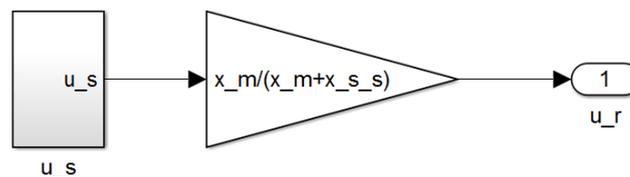


Abbildung 6-7 : Rotorspannungsbildung für den festgebremsten Rotor-Versuch

Die Parameter des T-Ersatzschaltbilds in Abbildung 3-4 wurden mit den folgenden Werten eingesetzt:

$$r_s = 0.0508 ; r_R = 0.0815 ; x_{s\sigma} = 0.1315 ; x_{r\sigma} = 0.3999 ; x_m = 3.0358$$

(Diese Parameter wurden aus den Daten einer ASM mit einem Schleifringläufer im Labor ermittelt).

Anmerkung: Die in diesem Beispiel angegebenen Reaktanzwerte sind tatsächliche Induktivitätswerte. Da aber in dieser Arbeit von einer konstanten Netzfrequenz ( $f_n = 50 \text{ Hz}$ ) ausgegangen wird, nimmt die bezogene Synchronwinkelgeschwindigkeit durch die Normierung den Wert Eins an ( $w_{elek} = 1$ ). Somit ergibt sich kein Unterschied zwischen bezogenen Induktivitäten und bezogenen Reaktanzen ( $x = w_{elek} * l = 1 * l$ ). Sollte aber die Netzfrequenz verändert werden, so nimmt die bezogene Synchronwinkelgeschwindigkeit einen Wert ungleich Eins an. In diesem Fall müssen alle Reaktanzen durch die Multiplikation von der bezogenen Synchronwinkelgeschwindigkeit mit der bezogenen Induktivität ( $w_{elek} * l$ ) ersetzt werden.

Am Ende der Simulation wurden die wichtigsten Ergebnisse in Abbildungen 6.8 bis 6.10 mittels eines Scope dargestellt und bewertet. Die Statorspannung (gelb, blau) und Rotorspannung (orange, grün) sind in Abbildung 6-8 dargestellt. Man sieht, dass die beiden Spannungen gleichphasig sind und dass sich die Rotorspannung nur um einen kleinen

Spannungsabfall von der Statorspannung unterscheidet (aufgrund der Streuinduktivität des Stators).

In Abbildung 6-9 sind Statorstrom (gelb, blau) und Rotorstrom (orange, grün) dargestellt. Man sieht, dass der Rotorstrom nicht gleich Null ist, sondern einen kleinen Betrag hat. Dies lässt sich dadurch begründen, dass der Statorwiderstand bei der Bildung der Rotorspannung vernachlässigt wurde. Man kann das zeigen, indem man einen kleineren Wert für den Statorwiderstand auswählt und das Ergebnis nochmal bewertet. Abbildung 6-10 zeigt das Simulationsergebnis bei  $r_s = 0.005$ . Ein Vergleich zwischen Abbildung 6-9 und Abbildung 6-10 lässt einfach erkennen, dass der Rotorstrombetrag bei einem kleineren Widerstandswert viel kleiner geworden ist.

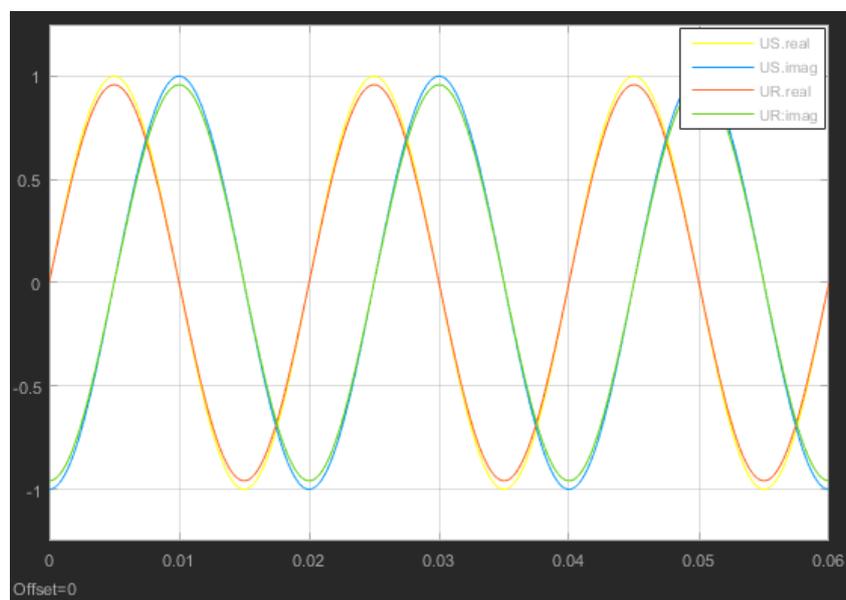


Abbildung 6-8 : Real und Imaginär-Teil der Stator- und Rotorspannung bei festgebremstem Rotor

**Anmerkung:** Es ist darauf zu achten, dass die Widerstände nicht beliebig klein ausgewählt werden können. Denn die elektrische Zeitkonstante des Rotors bzw. des Stators sind zum Rotor- bzw. Statorwiderstand umgekehrt proportional. Das heißt, bei einem verschwindend kleinen Widerstandswert nimmt die elektrische Zeitkonstante einen sehr großen Wert auf. Somit kann der eingeschwingene stationäre Zustand der Maschine nicht erreicht werden. Der Vergleich zwischen Abbildung 6-9 mit Abbildung 6-10 lässt auch erkennen, dass, je kleiner der Widerstandswert ausgewählt wird, umso mehr Zeit die Simulation benötigt, um einen stabilen Zustand der Maschine zu erreichen.

In Abbildung 6.9 sieht man, dass der Statorstrom einen Wert von etwa  $\approx \frac{1}{x_m} = 0.3$  beträgt. Dieser Strom wird benötigt, um die Maschine zu magnetisieren.

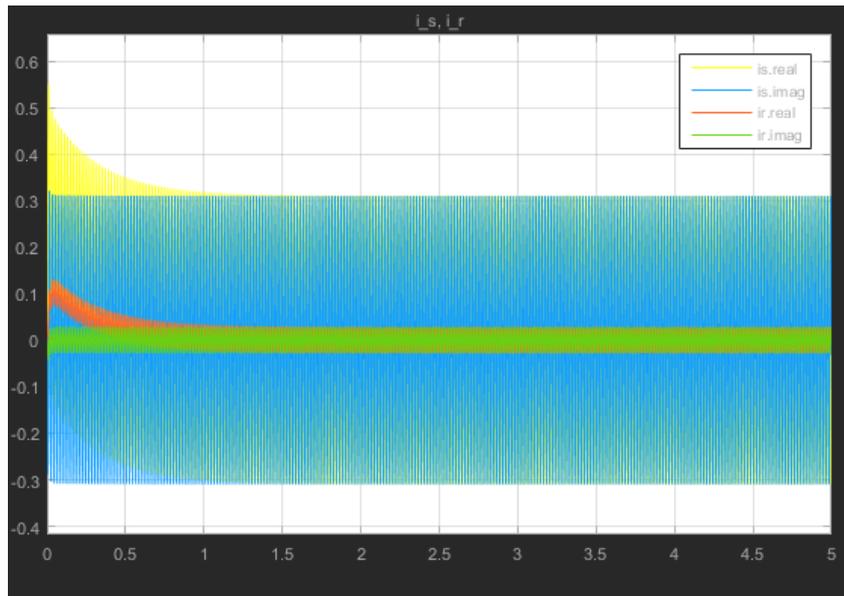


Abbildung 6-9 : Real und Imaginär-Teil des Stator- und Rotorstrom bei festgebremstem Rotor

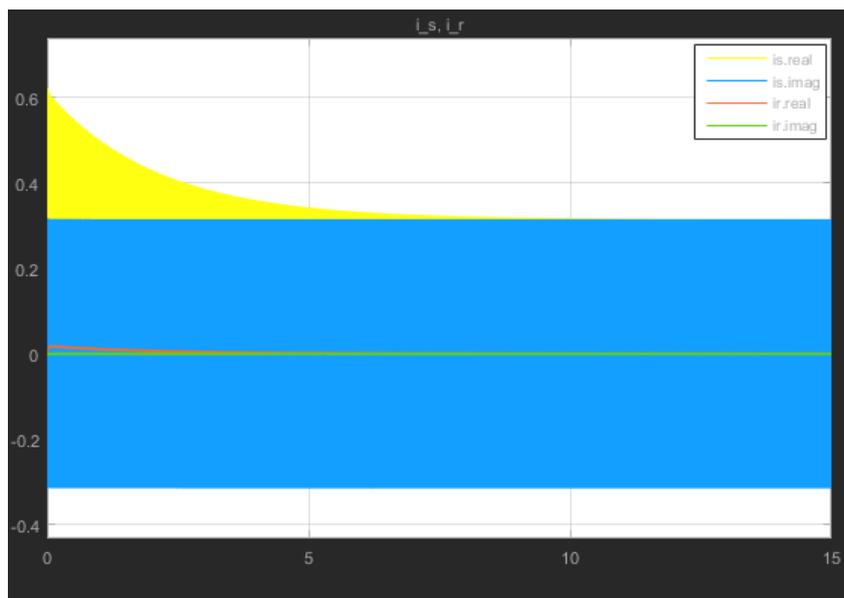


Abbildung 6-10 : Real und Imaginär-Teil von Stator- und Rotorstrom bei festgebremstem Rotor und kleinen Werten der Stator- und Rotorwiderstände

In Abbildung 6-11 sind die Statorspannung und der Statorstrom nach dem Erreichen des stabilen Zustands zusammen dargestellt. Man sieht, dass der reale Teil der Spannung und der imaginäre Teil des Stroms in der gleichen Simulationszeit ihren maximalen Wert erreichen. Das entspricht eine Phasenverschiebung von  $90^\circ$ . Das bedeutet, die Maschine nimmt in diesem Fall nur Blindleistung vom Netz auf, was zu erwarten ist.

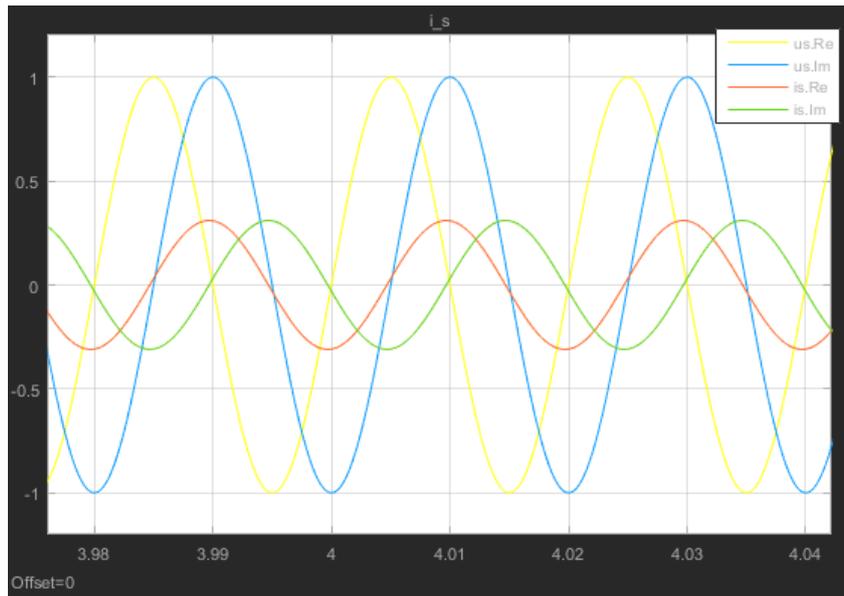


Abbildung 6-11 : Real und Imaginär-Teil von Statorspannung und Strom bei einem festgebremsten Rotor

#### 6.4.3 Leerlauf-Versuch

Für den Leerlauf-Versuch wird die DASM rotorseitig kurzgeschlossen. Dadurch funktioniert die Maschine wie eine normale ASM. Dies wird im Modell realisiert, indem die Rotorspannung mittels einer Konstante auf den Wert Null gesetzt wird. Die Drehzahl wird dagegen auf den Wert Eins gesetzt (synchrone Drehzahl). Die Amplitude der Statorspannung bleibt wie vorher auf Eins (Nennspannung). Die Parameter des T-Ersatzschaltbilds werden wie beim ersten Versuch ausgewählt.

In Abbildung 6-12 sind der Stator- und Rotorstrom dargestellt. Da bei der Bildung der Rotorspannung keine Widerstände vernachlässigt wurden, ergibt sich unabhängig von der Größe der Widerstände ein Rotorstrom gleich null. Die aufgenommene Wirkleistung im Leerlauf begrenzt sich auf einen sehr kleinen Wärmeverlust im Statorwiderstand. Da der Statorstrom für die Magnetisierung der Maschine zuständig ist, hat er eine Amplitude von etwa  $0.3 \text{ p.u.}$ . Der Winkel zwischen Statorstrom und Statorspannung beträgt daher etwa  $90^\circ$ . Um zu überprüfen, ob der Strombetrag im Leerlauf dem gewählten Parameter der Statorstreuinduktivität entspricht, wird zuerst ein kleinerer Wert für den Statorwiderstand (z.B.  $r_s = 0.005 \text{ p.u.}$ ) ausgewählt. Dann wird im DASM-Modell die Differenz  $|\underline{u}_s - j \cdot \omega_m \cdot \underline{\Psi}_r|$  bestimmt und durch den Strombetrag des Stators dividiert. Es zeigt sich, dass:

$$\left| \frac{\underline{u}_s - j \cdot \omega_m \cdot \underline{\Psi}_r}{\underline{i}_s} \right| = 0.131 = x_{s\sigma}$$

Die Simulationsergebnisse bei festgebremstem Rotor und leerlaufender Maschine sind plausibel. Nun kann das Maschinenmodell mit einer Regelung erweitert werden, um die Simulation in unterschiedlichen Arbeitspunkten der Maschine durchführen zu können.

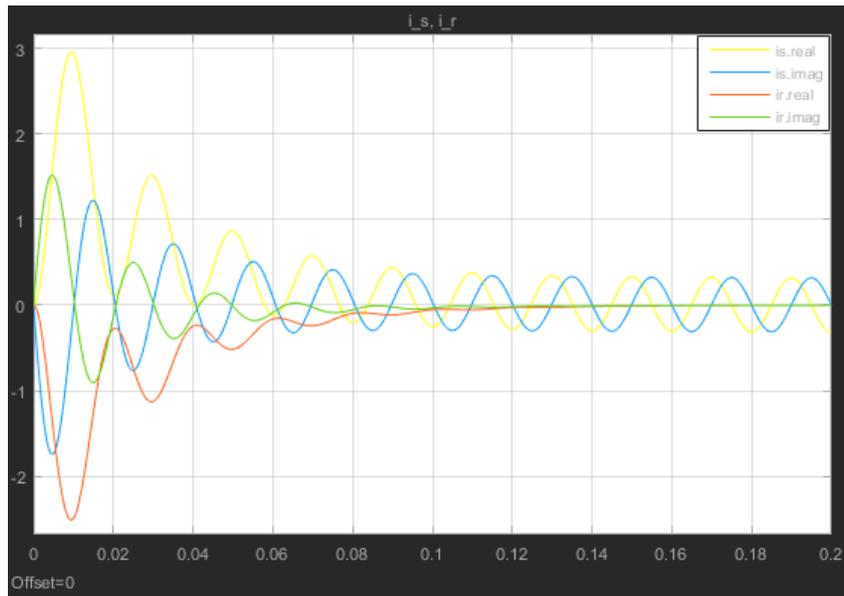


Abbildung 6-12 : Real und Imaginär-Teil des Stator- und Rotorstroms im Leerlauf-Versuch

## 6.5 Realisierung einer feldorientierten Regelung für die DASM in Simulink

### 6.5.1 Transformation der Regelgrößen in das statorspannungsfeste Koordinatensystem

Wie es im Kapitel 4 erwähnt wurde, wird die Regelung der DASM in einem statorspannungsfesten Koordinatensystem durchgeführt. Daher müssen zuerst alle Zustandsvariablen, die für die Regelung benötigt werden, in dieses Koordinatensystem transformiert werden. Bei der Transformation vom statorfesten Koordinatensystem ( $\alpha, \beta$ ) in das statorspannungsfeste Koordinatensystem ( $u, v$ ) wird der Winkel der Statorspannung ( $\gamma_u$ ) benötigt. Dieser wird aus dem bekannten Statorspannungsraumzeiger (=Netzspannungsraumzeiger) mittels des Blocks "Cartesian to Polar" gewonnen (Abbildung 6-13).

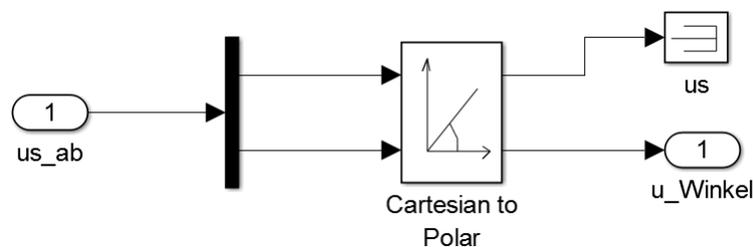
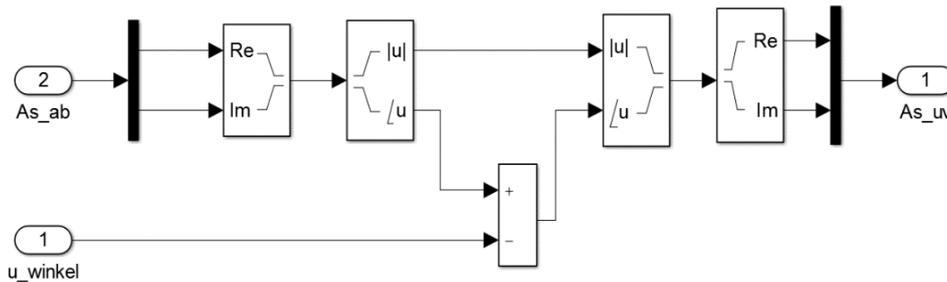


Abbildung 6-13 : Gewinnung des Statorspannung-Winkels aus dem Statorspannungsraumzeiger

**Anmerkung:** Die Addition eines Winkels bedeutet in der komplexen Ebene eine Multiplikation mit  $(e^{+j\gamma})$  während die Subtraktion eines Winkels eine Multiplikation mit

( $e^{-j\gamma}$ ) bedeutet. Erfolgt nun die Transformation vom statorfesten Koordinatensystem ( $\alpha, \beta$ ) in das statorspannungsfeste Koordinatensystem ( $u, v$ ) oder in das rotorfeste Koordinatensystem ( $d, q$ ), so muss der Winkel subtrahiert werden. Umgekehrt muss der Winkel addiert werden, wenn die Transformation vom ( $u, v$ ) oder vom ( $d, q$ ) Koordinatensystem in das ( $\alpha, \beta$ ) Koordinatensystem erfolgt.

Die Realisierung der Koordinatentransformation (Gleichung (8)) in Simulink erfolgt entsprechend *Abbildung 6-14*.



*Abbildung 6-14 : Transformation der Zustandsgrößen von ( $\alpha, \beta$ ) in das ( $u, v$ ) Koordinatensystem*

### 6.5.1 Leistungsregler

Die Regelung der Wirk- und Blindleistung wird in Simulink durch einen Leistungsregler und einen Block für die Berechnung der Rotorspannung realisiert.

Der Leistungsregler ist ein typischer PI-Regler. Als Eingangssignale werden die Differenz aus Soll- und Ist-Wirkleistung beziehungsweise aus Soll- und Ist-Blindleistung eingesetzt. Die Sollwirk- bzw. Sollblindleistung kann als Konstante oder Variable eingegeben werden. (z.B. *Ramp-Signal* oder *Slid-Gain*). Die Ist-Wirkleistung und Ist-Blindleistung werden aus den Maschinengleichungen bestimmt.

Der Regler in Simulink wird entsprechend *Abbildung 6-15* realisiert. Die Proportional- und Integralkomponente des Reglers werden je nach dem Betriebspunkt und der Größe der Statorspannung etwas grob eingestellt, sodass ein stabiler Zustand der Maschine in kurzer Zeit erreicht wird. Nach der Regelung wird das Regelsignal durch eine *Saturation* begrenzt. Die Integrationskomponente des Reglers wird bei der Überschreitung des Sollwerts durch einen sogenannten Anti-Wind-Up zurückgesetzt. Das Ausgangssignal des Reglers wird am Ende zur Berechnung der Rotorspannung miteinbezogen.

Die Berechnung der Ist-Wirk- bzw. Ist-Blindleistung erfolgt aus dem Produkt von Statorspannung und Statorstrom entsprechend der Gleichung (67) bzw. der Gleichung (68).

$$P_{Ist} = \text{Re} \{ \underline{i}_s^* \cdot \underline{u}_s \} = i_{s_{real}} \cdot u_{s_{real}} + i_{s_{imag}} \cdot u_{s_{imag}} \quad (67)$$

$$q_{Ist} = -\text{Im} \{ \underline{i}_s^* \cdot \underline{u}_s \} = i_{s_{imag}} \cdot u_{s_{real}} - i_{s_{real}} \cdot u_{s_{imag}} \quad (68)$$

Die Berechnung der Leistungen kann in Simulink wie in Abbildung 6-16 implementiert werden.

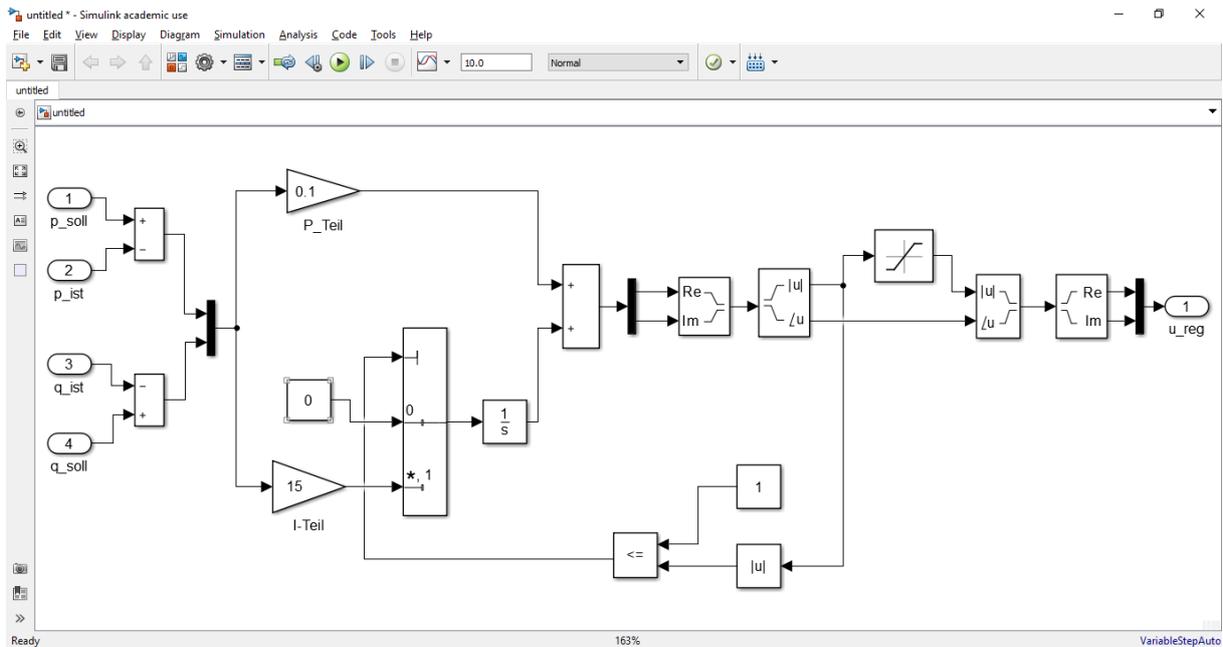


Abbildung 6-15 : Realisierung eines PI-Reglers in Simulink

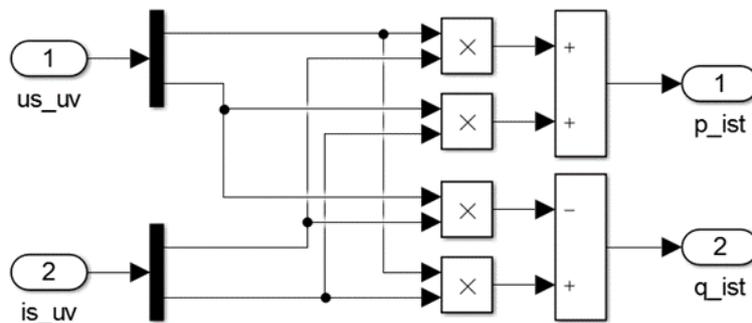


Abbildung 6-16 : Ist-Wirk- und Ist-Blindleistung Berechnung in Simulink

**Anmerkung:** Wenn eine positive Soll-Wirkleistung eingegeben wird, entspricht das, bei dieser Realisierung der Leistungsberechnung, einem Motorbetrieb der Maschine; wenn aber eine negative Soll-Wirkleistung eingegeben wird, entspricht das einem Generatorbetrieb der Maschine. Des Weiteren, wenn eine positive Soll-Blindleistung eingegeben wird, entspricht das, bei dieser Realisierung einem kapazitiven Betrieb der Maschine; und wenn aber eine

negative Soll-Blindleistung eingegeben wird, entspricht das einem induktiven Betrieb der Maschine.

## 6.5.2 Berechnung der Rotorspannung

Die Aufgabe der Rotorspannungsberechnung ist es, die Dynamik des Reglers zu erhöhen, um den stabilen Zustand des jeweiligen Arbeitspunktes in kurzer Zeit zu erreichen. Da die Regelung in einem statorspannungsfesten Koordinatensystem durchgeführt wird, müssen die Maschinengleichungen bei der Berechnung der Rotorspannung in dieses Koordinatensystem implementiert werden.

Aus der Rotorspannungsgleichung in einem allgemeinen Koordinatensystem (Gleichung (33)) wird die Rotorspannungsgleichung in einem statorspannungsfesten Koordinatensystem durch das Ersetzen von  $(w_k)$  mit  $(w_{elek})$  erhalten.

$$\underline{u}_R = r_R \cdot \underline{i}_R + \frac{d\underline{\Psi}_R}{d\tau} + j \cdot (w_{elek} - w_m) \cdot \underline{\Psi}_R \quad (69)$$

Die Berechnung der Rotorspannung wurde über zwei Rechnungsweisen durchgeführt: Erstens während dem transienten Betrieb und zweitens nach dem Erreichen des eingeschwungenen Zustands. Die Simulationsergebnisse haben ergeben, dass die beiden Rechnungsweisen die gleichen Endergebnisse liefern. Die transiente Berechnung der Rotorspannung erschwert jedoch die Gestaltung des Reglers (zweistufige Regler) und erhöht die benötigte Simulationszeit um einen stabilen Zustand zu erreichen. Aus diesem Grund wurde die Berechnung der Rotorspannung in dieser Arbeit ausgehend von einem stabilen Zustand implementiert. Die Berechnung der Rotorspannung bei einem transienten Betrieb wurde als Ergänzung im Appendix A hinzugefügt.

In einem stabilen Zustand ist die zeitliche Ableitung des Rotorflusses in einem statorspannungsfesten (synchronen) Koordinatensystem gleich null:

$$\frac{d\underline{\Psi}_R}{d\tau} = 0 \quad (70)$$

Die Rotorspannungsgleichung (69) wird somit wie folgt:

$$\underline{u}_R = r_R \cdot \underline{i}_R + j \cdot (w_{elek} - w_m) \cdot \underline{\Psi}_R \quad (71)$$

Die Rotorflussverkettungsgleichung bleibt unabhängig vom Koordinatensystem gleich:

$$\underline{\Psi}_R = x_m \cdot \underline{i}_S + (x_{R\sigma} + x_m) \cdot \underline{i}_R \quad (72)$$

Einsetzen in die Rotorspannungsgleichung (71):

$$\underline{u}_R = r_R \cdot \underline{i}_R + j \cdot (w_{elek} - w_m) \cdot (x_m \cdot \underline{i}_S + (x_{R\sigma} + x_m) \cdot \underline{i}_R) \quad (73)$$

Vereinfachung:

$$\underline{u}_R = r_R \cdot \underline{i}_R + j \cdot x_m \cdot (w_{elek} - w_m) \cdot \underline{i}_S + j \cdot (w_{elek} - w_m) \cdot (x_{R\sigma} + x_m) \cdot \underline{i}_R \quad (74)$$

Umformung:

$$\underline{u}_R = j \cdot x_m \cdot (w_{elek} - w_m) \cdot (\underline{i}_S + \underline{i}_R) + j \cdot x_{R\sigma} \cdot (w_{elek} - w_m) \cdot \underline{i}_R + r_R \cdot \underline{i}_R \quad (75)$$

Mit dieser Gleichung kann die Rotorspannung berechnet werden. Eine mögliche Realisierung in Simulink ist in Abbildung 6-17 dargestellt.

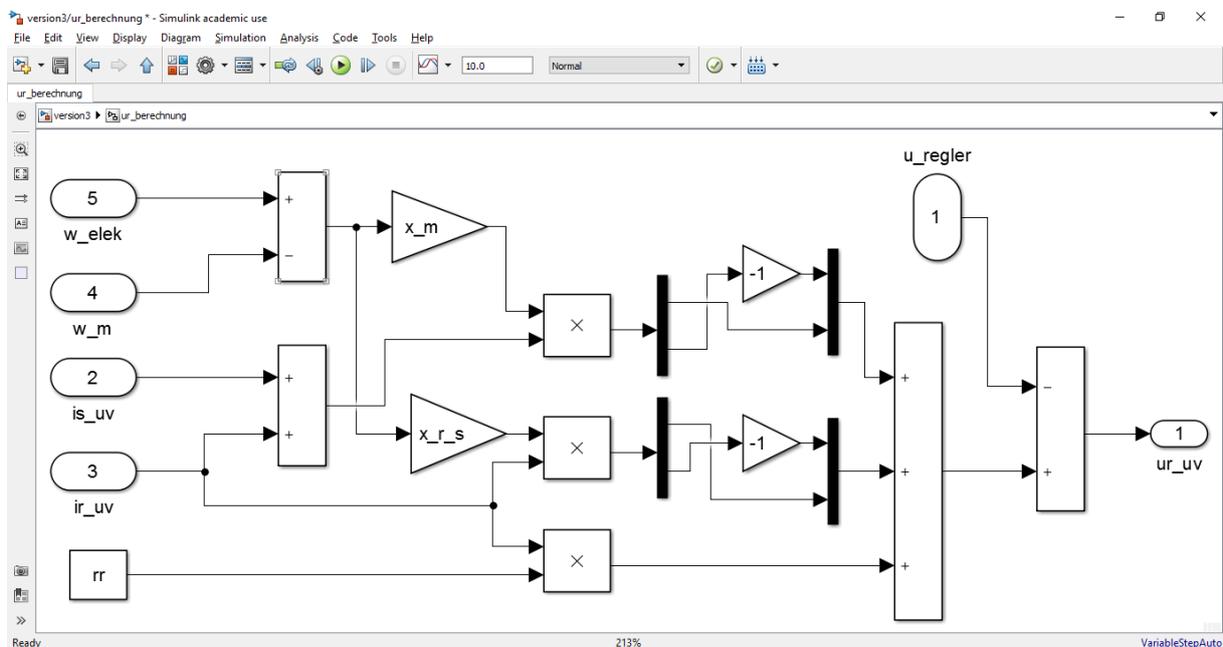


Abbildung 6-17 : Berechnung und Regelung der Rotorspannung in Simulink

Nach der Regelung wird die Rotorspannung in das statorfeste Koordinatensystem transformiert und in die Maschine zurückgespeist. Es ist dabei zu achten, dass der Statorspannungswinkel ( $\gamma_u$ ) bei der Transformation in das statorfeste Koordinatensystem addiert, und nicht wie in Abbildung 6-14 subtrahiert wird.

## 6.6 Berechnung von Rotorwirk- bzw. Rotorblindleistung, Magnetisierungsleistung, mechanischer Leistung und Verluste der Maschine

Um den Leistungsfluss der Maschine beobachten zu können, werden neben der schon gerechneten Statorwirk- bzw. Statorblindleistung auch die Rotorwirk- bzw. Rotorblindleistung, die mechanische Leistung, die Magnetisierungsleistung, und Wärme- bzw. Streufeldverluste der Maschine berechnet.

Die Berechnung der Rotorleistungen erfolgt unabhängig vom Koordinatensystem entsprechend der Gleichungen:

$$p_r = u_R \cdot i_R \cdot \cos(\varphi_{u_R} - \varphi_{i_R}) \quad (76)$$

$$q_r = u_R \cdot i_R \cdot \sin(\varphi_{u_R} - \varphi_{i_R}) \quad (77)$$

Diese Gleichungen können in Simulink wie in *Abbildung 6-18* realisiert werden.

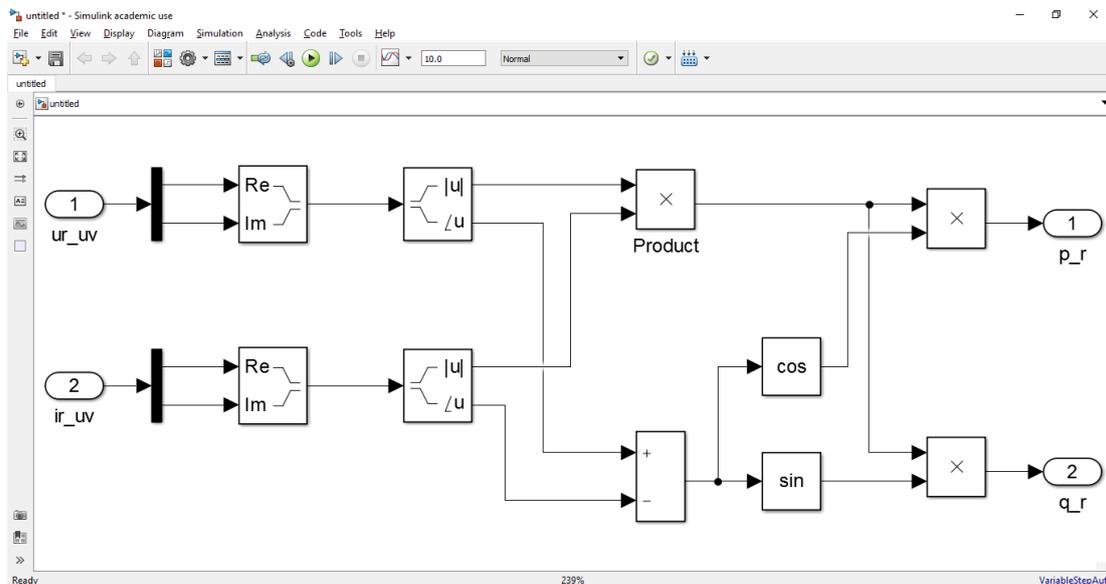
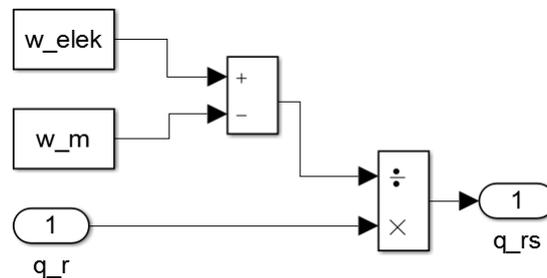


Abbildung 6-18 : Berechnung der Wirk- und Blindleistung

Diese Berechnung liefert die rotorseitige Wirk- und Blindleistung bezogen auf den Rotor. Um aber den Blindleistungsfluss zu verdeutlichen, soll die Rotorblindleistung auf die Statorseite umgerechnet werden. Wie es in Kapitel 5 erklärt wurde, ist die Rotorblindleistung in Bezug auf den Stator eine vom Schlupf abhängige Größe. Sie wird in Simulink wie folgt bestimmt:

$$q_{r-s} = \frac{q_r}{s} = \frac{q_r}{w_{elek} - w_m} \quad (78)$$

Die Realisierung von Gleichung (78) erfolgt in Simulink entsprechend *Abbildung 6-19*.



*Abbildung 6-19 : Umrechnung der Rotorblindleistung auf Statorseite*

Die Berechnung in Gleichung (78) gilt für alle Betriebspunkte außer für den Betrieb mit der synchronen Drehzahl. Bei der synchronen Drehzahl fließt ein Gleichstrom in den Rotor. Das heißt die Rotorspannung und der Rotorstrom werden gleichphasig und die Rotorblindleistung wird, entsprechend der Berechnung in Gleichung (77), gleich Null. Eigentlich bezieht der Rotor bei einem synchronen Betrieb und Magnetisierung von der Rotorseite keine Blindleistung. Doch es wird trotzdem durch die Rotation von Rotorspannung und Rotorstrom mit der synchronen Drehzahl eine Blindleistung in Bezug auf den Stator erzeugt. Um die auf die Statorseite bezogene Rotorblindleistung bei der Synchrondrehzahl annähernd zu berechnen, wird in dieser Arbeit vom T-Ersatzschaltbild in *Abbildung 3-4*, unter der Annahme, dass der Rotor festgebremst ist, ausgegangen. Die Berechnung erfolgt dann wie folgt:

$$\underline{u}_R = \underline{u}_s - \underline{i}_s \cdot (r_s + j \cdot x_{s\sigma}) + \underline{i}_R \cdot (r_R + j \cdot x_{R\sigma}) \quad (79)$$

Aus der in der Gleichung (79) berechneten Rotorspannung, zusammen mit dem Rotorstrom, wird in Simulink entsprechend *Abbildung 6-18* die auf die Statorseite bezogene Rotorblindleistung bei der Synchrondrehzahl bestimmt.

**Anmerkung:** Diese Berechnung in Gleichung (79) berücksichtigt keine Phasenverschiebung der Rotorspannung, die durch die Änderung der Drehzahl verursacht wird. Da diese Phasenverschiebung klein ist, sind die Ergebnisse annähernd richtig.

Die Realisierung von Gleichung (79) in Simulink ist in *Abbildung 6-20* dargestellt.

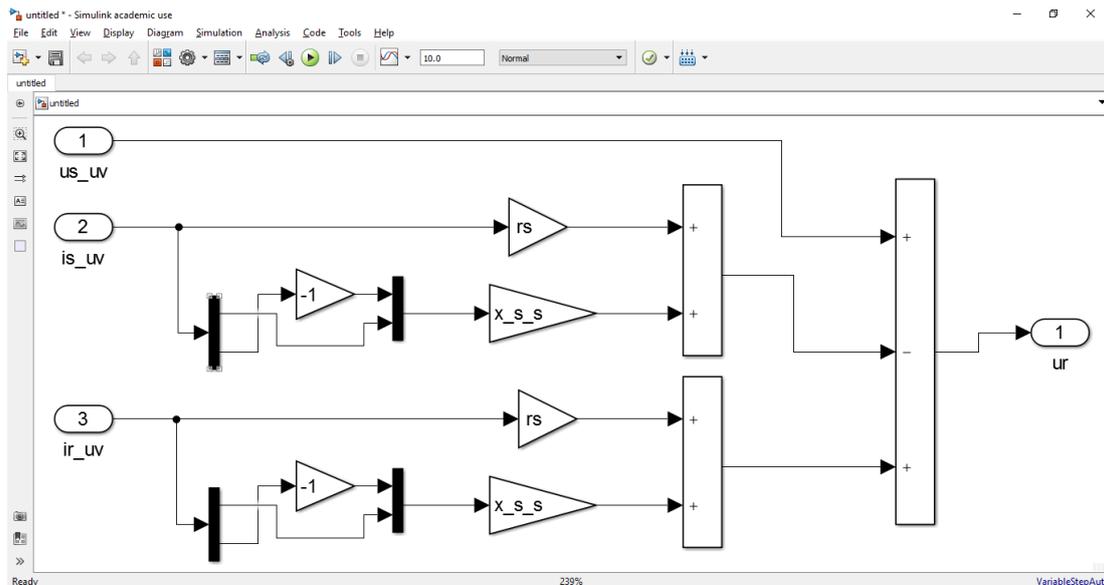


Abbildung 6-20 : Rotorspannungsberechnung für die Blindleistungsbestimmung im synchronen Betrieb

Die Magnetisierungsleistung ändert sich geringfügig je nach Betrieb. Sie kann aus dem Magnetisierungsstrom und der inneren Spannung ähnlich wie in Abbildung 6-18 gerechnet werden. Der Magnetisierungsstrom und die innere Spannung werden wie folgt bestimmt:

$$\underline{i}_m = \underline{i}_s + \underline{i}_R \quad (80)$$

$$\underline{u}_h = \underline{u}_s - \underline{i}_s \cdot (r_s + j \cdot x_{s\sigma}) \quad (81)$$

Die mechanische Leistung wird aus dem Produkt des inneren (elektrischen) Drehmoments mit der Drehzahl bestimmt (Gleichung (51)).

Die Wärmeverluste und Streufeldverluste von Stator und Rotor werden entsprechend Gleichung (50) bzw. Gleichung (54) bestimmt. Diese Gleichungen können in Simulink wie in Abbildung 6-21 realisiert werden.

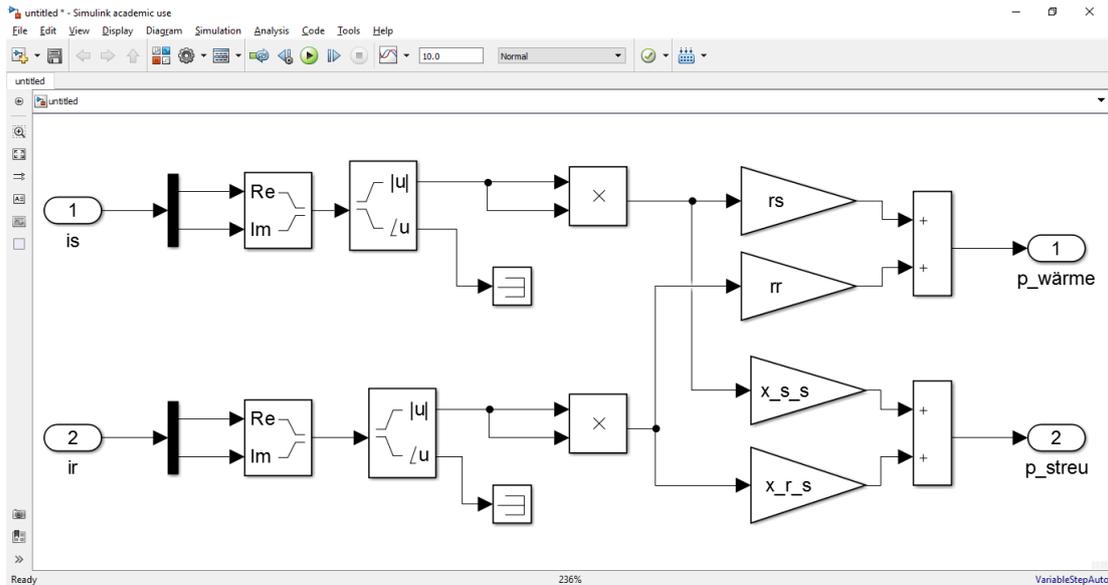


Abbildung 6-21: Berechnung der Wärme- und Streufeldverluste

## 6.7 Simulationsmodell der DASM

Soweit sind alle Blöcke, die für das Modell benötigt werden, erstellt worden. Jeder Block wird nun als Blackbox mit entsprechenden Eingängen und Ausgängen zusammengefasst. Durch die geeignete Verbindung zwischen den verschiedenen Blackboxes entsteht das erzielte Simulationsmodell der DASM. Abbildung 6-22.

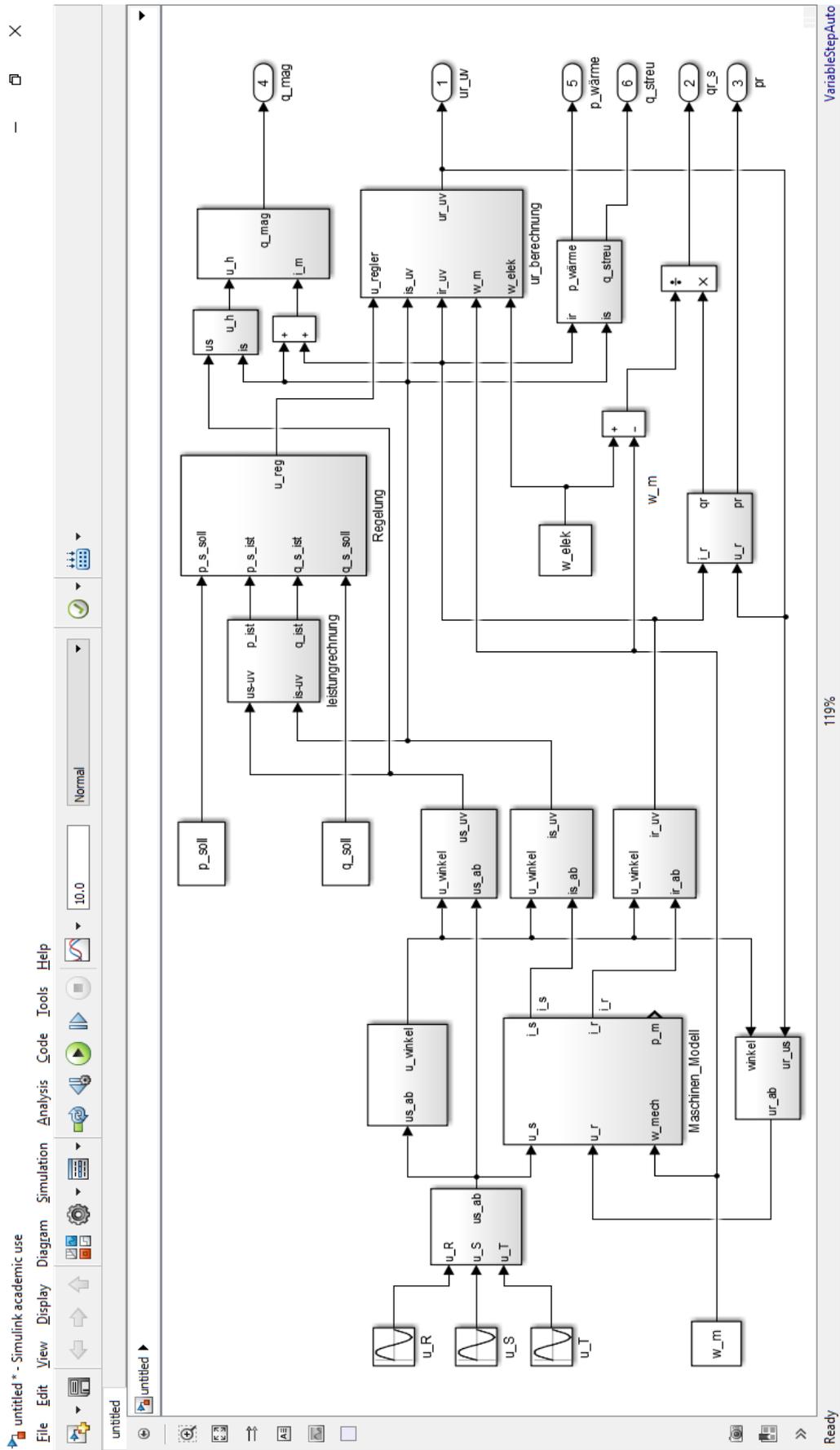


Abbildung 6-22 : Das Simulation-Modell der DASM in Simulink

## 6.8 Analytische Verifikation des Simulationsmodells

Bevor das Maschinenverhalten in unterschiedlichen Betriebspunkten simuliert wird, soll zuerst das gesamte Simulationsmodell analytisch überprüft und verifiziert werden. Dies wird durch die Bewertung der Simulationsergebnisse in zwei Grenzbetriebsfällen der Maschine erfolgen.

Es wird versucht, die Maschine bei einem stillstehenden Rotor und im Leerlauf zu simulieren. Dafür müssen zuerst die Soll-Wirkleistung und Soll-Blindleistung so eingegeben werden, dass der Soll-Wirkleistungswert genau den Wärmeverlust im Statorwiderstand deckt, während der Soll-Blindleistungswert genau den Magnetisierungsbedarf und den Stator-Streufeldverlust deckt. Wird danach die Drehzahl auf null gesetzt, so gelingt es, die DASM bei einem stillstehenden Rotor zu simulieren. Wird dagegen die Drehzahl auf eins gesetzt (synchrone Drehzahl), so gelingt es, die Maschine im Leerlauf zu simulieren.

Zunächst wird erklärt, wie die Werte von  $p_{s\text{soll}}$  und  $q_{s\text{soll}}$  in das Simulationsmodell eingestellt werden können, damit sie genau den Stator-Wärmeverlust bzw. den Magnetisierungsbedarf und den Streufeldverlust decken:

Bei denselben Parametern in Absatz 6.4 soll der Magnetisierungsbedarf einen Wert von etwa 0.3 p. u. betragen (wie es sich bei der Überprüfung des Maschinenmodells gezeigt hat). So wird dieser Wert zuerst als  $q_{s\text{soll}}$  eingegeben. Die Stator-Sollwirkleistung ( $p_{s\text{soll}}$ ) wird zuerst mit null eingegeben. Die Regler-Parameter werden dabei auf: P – Anteil = 0.2 , und I – Anteil = 1 eingestellt. Die Simulationszeit wird groß genug ausgewählt, damit ein eingeschwungener, stabiler Zustand erreicht wird. Die Simulation wird nun durchgeführt. Am Ende der Simulation werden die Werte von  $q_{\text{mag}}$  und  $q_{\text{streu}}$  von einem *Display* abgelesen, miteinander addiert und das Resultat als  $q_{s\text{soll}}$  für die nächste Simulation eingesetzt. Gleichzeitig wird der Wert von  $p_{\text{wärme}}$  abgelesen und als  $p_{s\text{soll}}$  für die nächste Simulation eingesetzt. In diesem Beispiel geschieht die Bilanz  $p_{s\text{soll}} = p_{\text{wärme}}$  bzw.  $q_{s\text{soll}} = q_{\text{mag}} + q_{\text{streu}}$  bei den Werten:  $p_{s\text{soll}} = 0.0047$  und  $q_{s\text{soll}} = -0.3156$ . Nun kann der Versuch mit stillstehendem Rotor ( $w_m = 0$ ) bzw. im Leerlauf ( $w_m = 1$ ) simuliert werden.

### Ergebnisse:

**1- ) Für  $w_m = 0$**  (stillstehender Rotor) sind die Simulationsergebnisse mittels *Scopes* in den Abbildungen 6.23, 6.24, 6.25, 6.26 und 6.27 dargestellt.

In Abbildung 6-23 sind die Soll-Wirkleistung (gelb) und Soll-Blindleistung (blau) bzw. die Ist-Wirkleistung (orange) und Ist-Blindleistung (grün) dargestellt. Man sieht wie die Ist-Wirkleistung bzw. Ist-Blindleistungen um ihre Sollwerte schwingen bis sie ihren Sollwerten bei einer Simulationszeit von etwa 0.3 sec auf Dauer entsprechen. Das heißt, die Aufgabe des Reglers ist richtig erfüllt.

In Abbildung 6-24 sind die Rotorwirkleistung (gelb) und Rotorblindleistung (blau) dargestellt. Diese schwingen auch am Anfang und erreichen den stabilen Zustand bei einer Simulationszeit von etwa 0.4 sec. Da der Magnetisierungsbedarf der Maschine und die Wärme- bzw. Streufeldverluste bei diesem Versuch statorseitig gedeckt wurden, weisen je

beide, Rotorwirkleistung und Rotorblindleistung einen Wert von Null auf. Das heißt es gibt keinen Leistungsaustausch zwischen Rotor und Netz, was bei einer leerlaufenden Maschine mit stillstehendem Rotor im geregelten Betrieb zu erwarten ist.

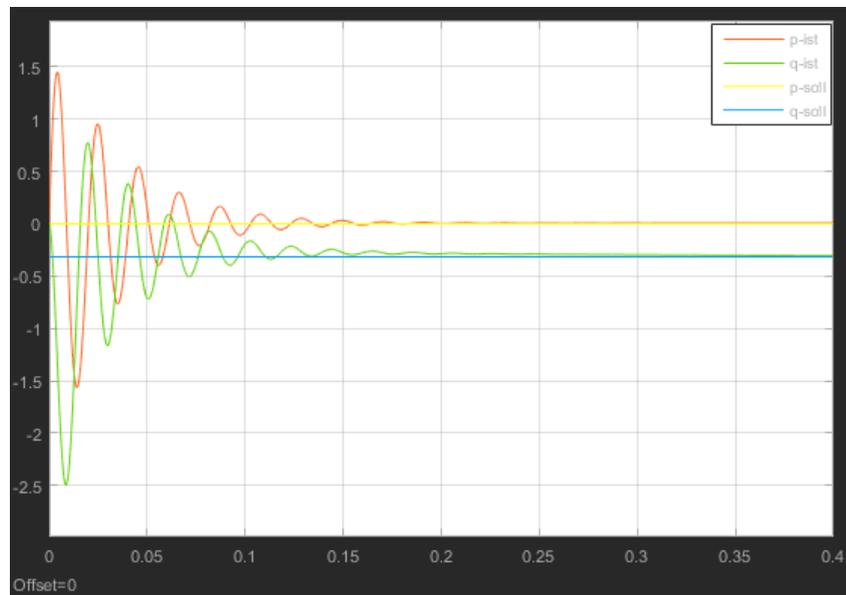


Abbildung 6-23 : Ist- und Soll- Wirk- bzw. Blindleistungen, statorseitig

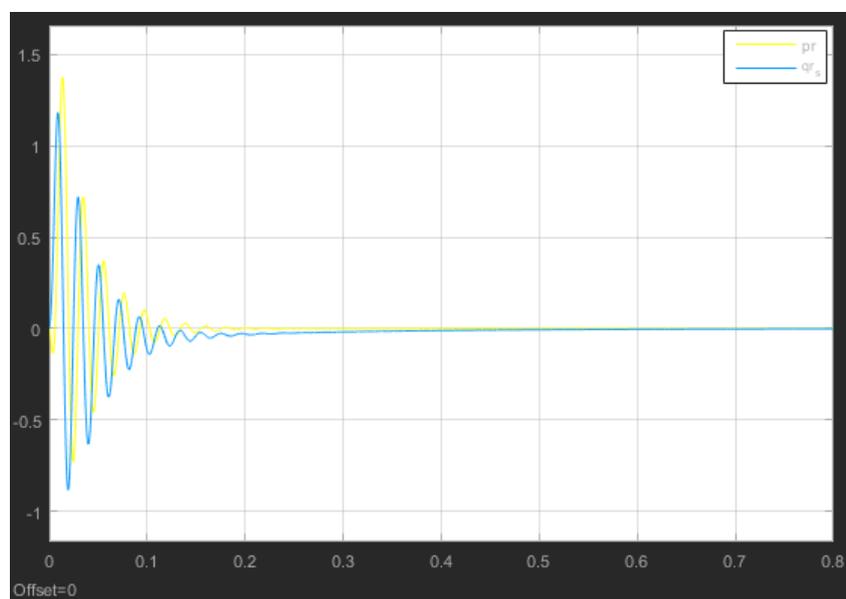
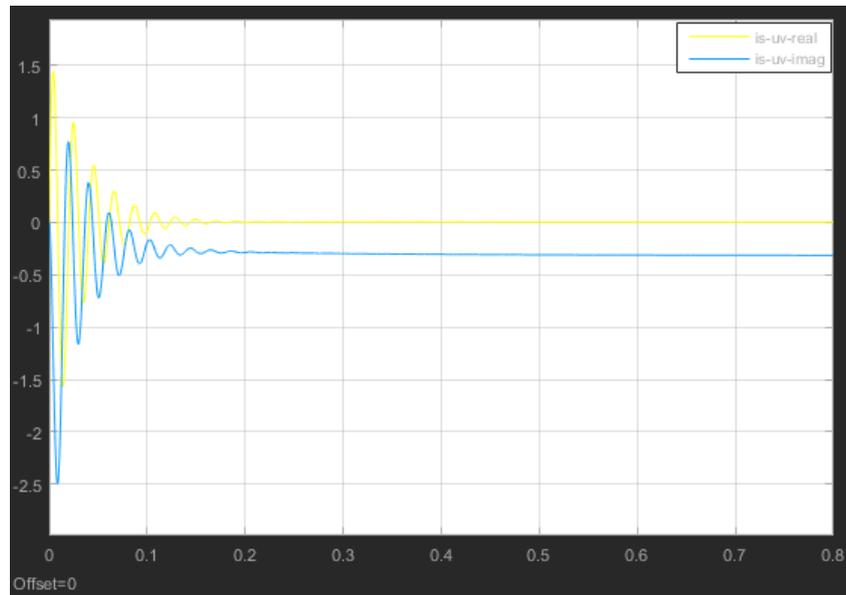


Abbildung 6-24 : Rotorwirk- und Rotorblindleistung

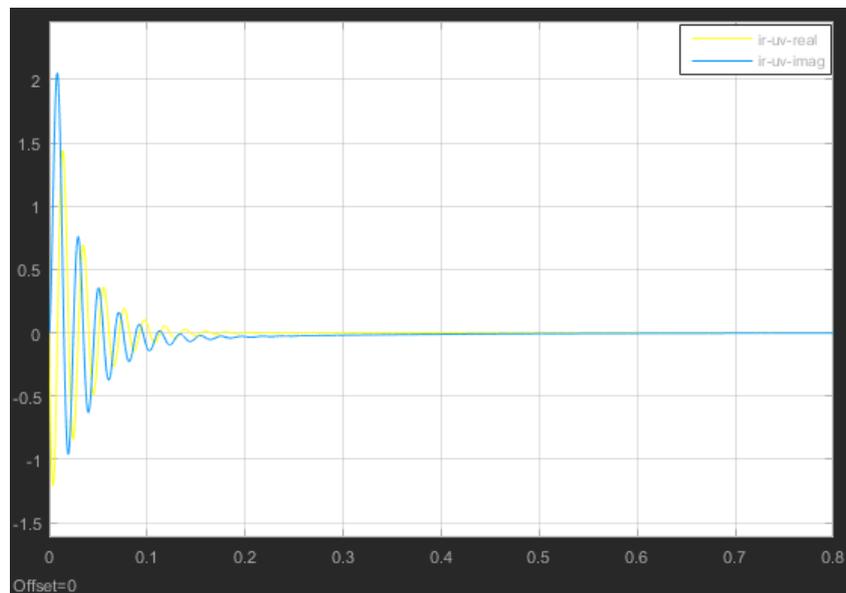
In Abbildung 6-25 ist der Statorstrom in statorspannungsfesten Koordinatensystem (Real-Teil gelb, Imaginär-Teil blau) dargestellt. Dieses Koordinatensystem rotiert mit der Netzfrequenz (50 Hz). Deswegen wird der zeitliche Verlauf der Zustandsgrößen nach dem Erreichen des stabilen Zustandes konstant und nicht sinusförmig. Der Real-Teil des Statorstroms ist ungefähr gleich null, weil dieser nur den sehr kleinen Wärmeverlust im Statorwiderstand

decken muss. Der Imaginär-Teil nimmt einen Wert von etwa 0.3 an, um den magnetischen Fluss im Luftspalt aufzubauen.

In *Abbildung 6-26* ist der Rotorstrom im statorspannungsfesten Koordinatensystem dargestellt. Nach dem Einschwingen nehmen beide Strom-Teile (Real-Teil gelb, Imaginär-Teil blau) den Wert Null an, was im Leerlauf zu erwarten ist.



*Abbildung 6-25* : Statorstrom Real- und Imaginär-Teil in (u, v) KOS



*Abbildung 6-26* : Rotorstrom Real- und Imaginär-Teil in (u, v) KOS

In *Abbildung 6-27* sind die Real- und Imaginär-Teile der Statorspannung (gelb bzw. blau) bzw. die Real- und Imaginär-Teile der Rotorspannung (orange bzw. grün) im statorfesten

Koordinatensystem dargestellt. Man sieht, dass beide Spannungen gleichphasig sind und dass die Rotorspannung ein wenig kleiner ist als die Statorspannung. Die Maschine funktioniert also wie ein Transformator, der einen gewissen Verlust hat.

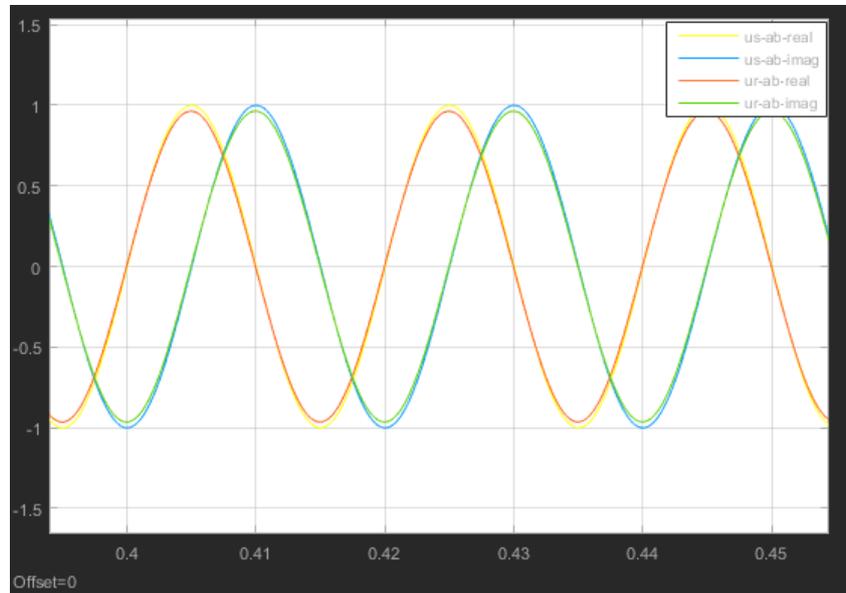


Abbildung 6-27 : Stator-bzw. Rotorspannung, Real- und Imaginär-Teil in  $(\alpha, \beta)$  KOS ( $w_m = 0$ )

**2-) Für  $w_m = w_{synchron} = 1$  (Leerlaufversuch)** werden die Ergebnisse nochmal angeschaut. Es zeigt sich, dass nur die Rotorspannung verändert wird, während die Stator- und Rotorleistungen bzw. Stator und Rotorströme erhalten bleiben.

Die Stator- und Rotorspannung sind im statorfesten Koordinatensystem bei der synchronen Drehzahl in Abbildung 6-28 dargestellt. Man sieht, dass die Rotorspannung für ( $w_m = 1$ ) gleich null wird. Die innere Spannung unterscheidet sich hier nur gering von der Statorspannung (Abbildung 6-29). Wenn man sich die mechanische Leistung mittels eines *Displays* anschaut, sieht man, dass diese gleich null ist. Die Maschine arbeitet also, entsprechend der Regelungswerte, wie eine normale ASM mit kurzgeschlossenem Rotor im Leerlauf und erzeugt dabei kein Drehmoment.

Die Ergebnisse der obigen Versuche sind plausibel und beschreiben den physikalischen Zustand der Maschine in den beiden ausgesuchten Grenzfällen. Das erweiterte Simulationsmodell ist somit verifiziert und kann für die Durchführung der Simulation in unterschiedlichen Betriebspunkten verwendet werden.

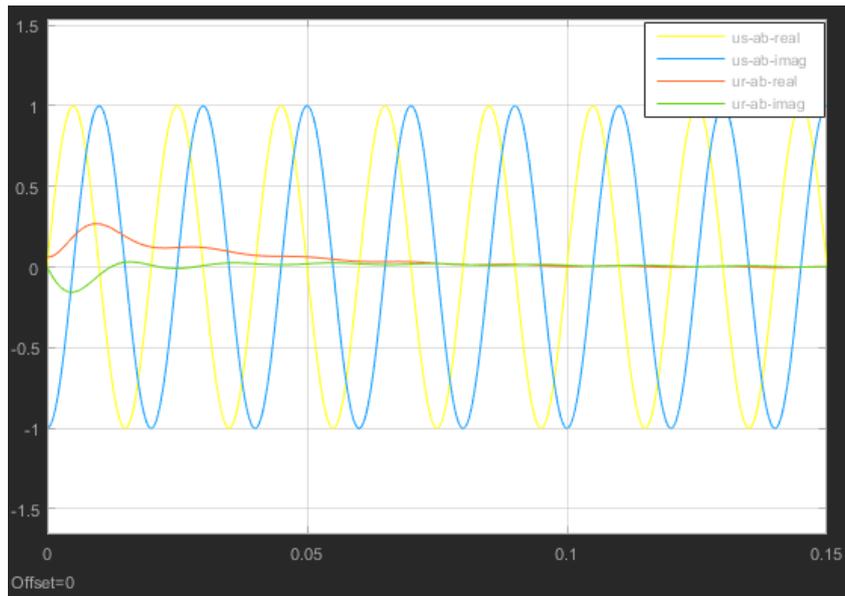


Abbildung 6-28 : Stator-bzw. Rotorspannung, Real- und Imaginär-Teil in  $(\alpha, \beta)$  KOS ( $w_m = 1$ )

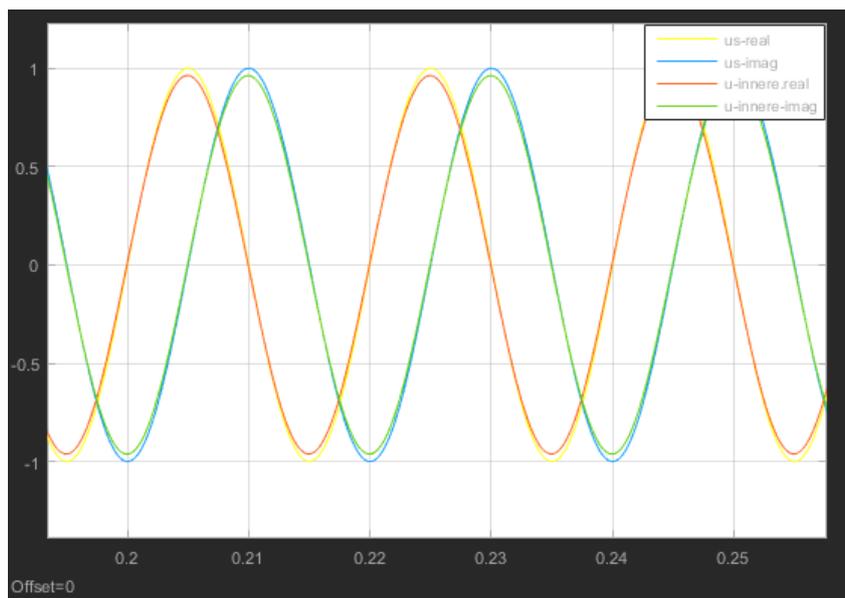


Abbildung 6-29 : Statorspannung bzw. Innere Spannung in  $(\alpha, \beta)$  KOS ( $w_m = 1$ )

# Kapitel 7 : Bedienungsanleitung zur Simulationsdurchführung - Erstellung einer Matlab-Funktion zur besseren Darstellung der Simulationsergebnisse

## 7.1 Allgemeines

In diesem Kapitel wird zuerst erklärt, wie die Simulation durchgeführt wird, wie die Eingangsgrößen des Simulationsmodells eingegeben und während der Simulation verändert werden können, und welche Möglichkeiten in Simulink zur Verfügung stehen, um die Ergebnisse zu präsentieren und ihre Änderung während der Simulation zu beobachten.

Danach wird eine Matlab-Funktion erstellt, mit dem Zweck die Zustandsgrößen am Ende der Simulation in einem Zeigerdiagramm darzustellen, und den Fluss von Wirk- und Blindleistung in Form eines Bardiagramms zu verdeutlichen. Dadurch soll eine klare Übersicht über das Verhalten der Maschine in dem jeweiligen Betriebspunkt gewährleistet werden.

## 7.2 Starten der Simulation

Für diese Arbeit wird *MATLAB R2015b - academice use* verwendet. Beim Starten von Matlab erscheint das Command Fenster. Durch Klicken auf die Schaltfläche *Simulink Library* oder durch das Schreiben von "simulink" im *Command Fenster* wird der *Simulink-Browser* geöffnet (Abbildung 7-1). Im *Open-Model* kann das Simulationsmodell in einem eigenen Fenster geladen werden.

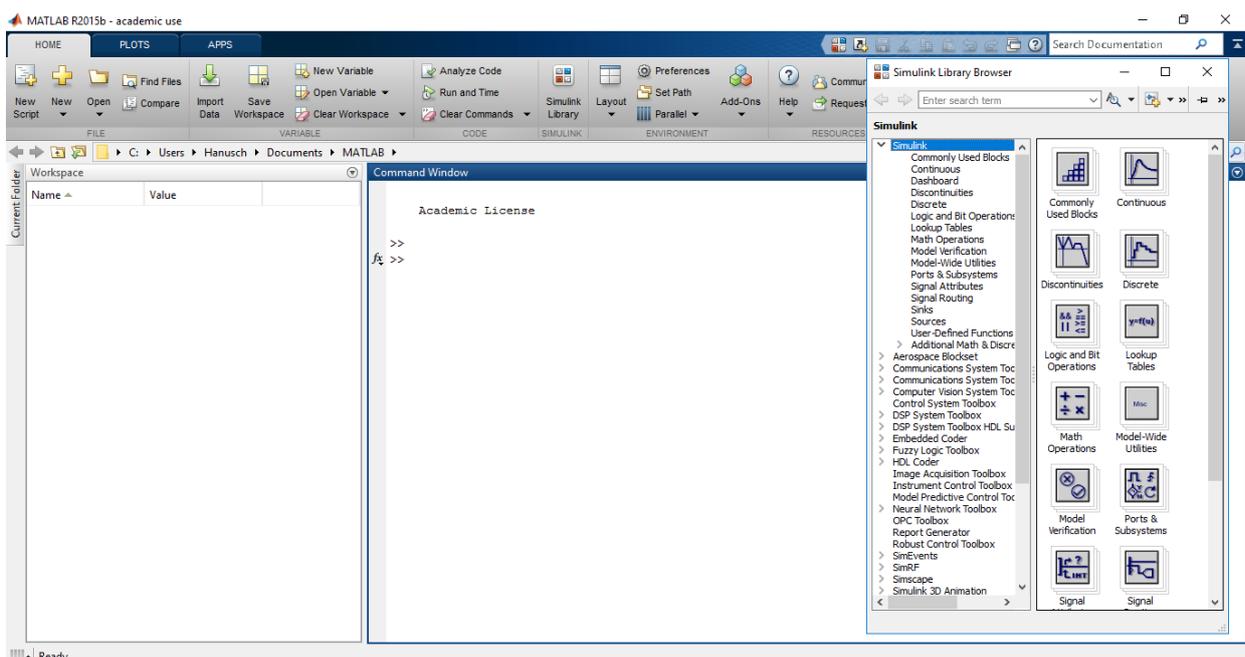


Abbildung 7-1 : Matlab R2015b Command Fenster

Bevor die Simulation durchgeführt werden kann, müssen die Werte von *Gains* und *Konstanten* im Simulationsmodell definiert werden. Dies kann durch eine manuelle Eingabe erfolgen. Eine flexiblere Alternative ist es, ein *Matlab-Script* zu schreiben, das die Maschinenparameter enthält bzw. ausrechnet. Hier muss darauf geachtet werden, dass die gleichen Symbole sowohl im Script als auch in den einzelnen Gains und Konstanten verwendet werden. Durch ein Matlab-Script kann man einfach unterschiedliche Werte für die Maschinenparameter ausprobieren.

Als Beispiel wurde in dieser Arbeit ein Matlab-Script geschrieben, das ausgehend von den echten Daten einer Asynchronmaschine die bezogenen Größen entsprechend Gleichungen (2) bestimmt, und dann die Maschinenparameter für das T-Ersatzschaltbild entsprechend Gleichungen (21) ausrechnet.

Das Matlab-Script wird wie folgt geschrieben:

```
% MASCHINENDATEN
f=50                                % Netzfrequenz (Hz)
PPZ=3                                % Polpaarzahl
R_s_Strang=508e-3                    % Strang-Statorwiderstand (Ohm)
R_r_Strang=268e-3                    % Strang-Rotorwiderstand (Ohm)
L_s_Strang=70e-3                     % Strang-Statorinduktivität (Vs/A)
L_r_Strang=62e-3                     % Strang-Rotorinduktivität (Vs/A)
sigma=0.0797                         % Streukoeffizient (1)
Tau_r_SR=78e-3                       % Rotorzeitkonstante für SR-Läufer (sec)
u=1.39                                % Übersetzungsverhältnis (1)

% BEZUGSGRÖßEN
W_Bezug_el=2*pi*f                    % Bezugswinkelgeschwindigkeit elektrisch
W_Bezug_mech=2*pi*f/PPZ              % Bezugswinkelgeschwindigkeit mechanisch

Is_Bezug=22*sqrt(2)                  % Bezugsstrom (A)
Ir_Bezug=25*sqrt(2)*u                % Bezugsstrom (Läufer in Stern, 25 A)
Us_Bezug=220*sqrt(2)                 % Bezugsspannung (V)
Ur_Bezug=(275/sqrt(3))*sqrt(2)/u     % Bezugsspannung (Läufer in Stern, 275 V)
Zs_Bezug=Us_Bezug/Is_Bezug           % Bezugswiderstand (Ohm)
Zr_Bezug=Ur_Bezug/Ir_Bezug           % Bezugsimpedanz (Ohm)

% BEZOGENE MASCHINENDATEN
rs=R_s_Strang/Zs_Bezug
rr=R_r_Strang/Zr_Bezug
xs=((3/2)*L_s_Strang)*W_Bezug_el/Zs_Bezug
tau_r=W_Bezug_el*Tau_r_SR

% Umrechnungen
x_m=(1-sigma)*xs                     % umgerechnete Hauptreaktanz
x_s_s=0.5*sigma*xs                   % primäre Streureaktanz
x_r_s=0.5*sigma*xs*u                 % umgerechnete sekundäre Streureaktanz
```

Das Script kann von *Open* im *Command Fenster* hochgeladen werden. Bei einem Klick auf *Run* in *Editor* wird das Script durchgeführt und die Maschinenparameter werden bestimmt. Die Simulation ist somit bereit zum Starten.

Die Genauigkeit der Simulation kann im Modell wie folgt erhöht werden: Von *Simulation* in *Toolbar* → *Model Configuration Parameters* öffnen. Es scheint das Fenster in Abbildung 7-2:

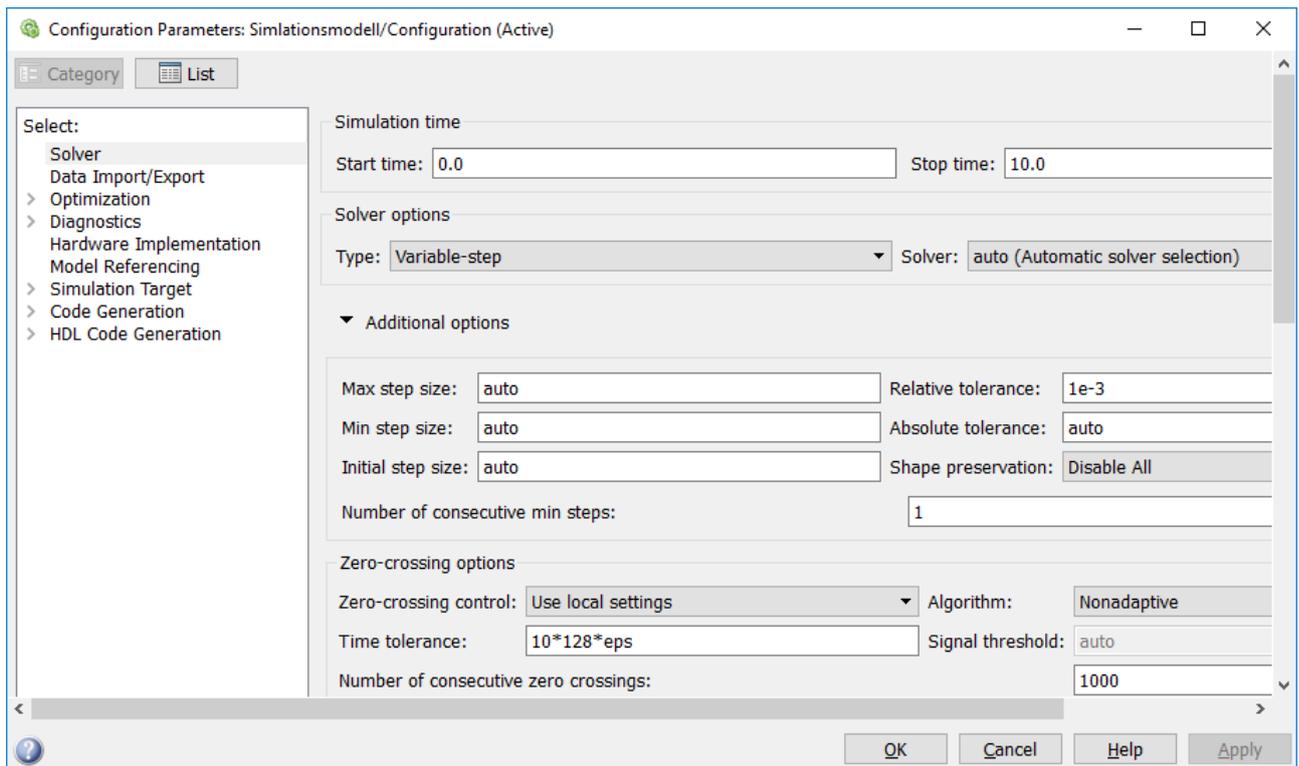


Abbildung 7-2 : Konfigurations-Parameter des Simulationsmodells in Matlab

In *Max step size* wird ein Wert von  $1e-4$  statt *auto* eingegeben. Als *Solver* kann man z.B. *ode45* auswählen. Durch diese Einstellung wird die Genauigkeit der Simulation erhöht. Die Simulation wird dadurch aber länger dauern.

### 7.3 Dynamische Simulation eines Betriebs in Simulink

In Simulink besteht die Möglichkeit, die Eingangsgrößen während der Simulation zu ändern, und den Einfluss dieser Änderung auf eine bestimmte Zustandsgröße zu beobachten. Für eine dynamische Eingabe verfügt Simulink über einige Elemente wie z.B. *Slider Gain* in *Math Operations*. Dieser kann mit anderen Signalen verbunden werden (z.B. mit einer *Konstante*). Abbildung 7-3 zeigt das Fenster von *Slider Gain*:

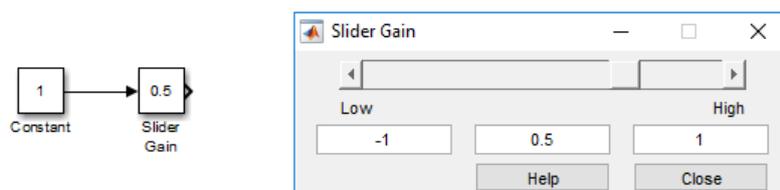


Abbildung 7-3 : Slider Gain als dynamische Eingabe in Simulink

Durch das Verschieben des Zeigers wird die Eingabe zwischen einem Minimum und einem Maximum geändert. Man kann auch direkt einen Wert in das mittlere Feld eingeben.

Eine weitere Möglichkeit für eine flexible Eingabe ist *Slider* von *Dashboard* (Abbildung 7-4). Hier wird ein Signal durch einen Doppelklick, dann *CONNECT* ausgewählt. Dieser Block braucht keine direkte Verbindung zum ausgewählten Signal. Um zum Beispiel den Wirkleistungssollwert mittels eines *Sliders* zu verändern, wird dieser zuerst durch eine *Constant* (von *Source*) mit dem Wert Eins festgelegt. Dann wird der *Slider* (von *Dashboard*) durch einen Doppelklick geöffnet; durch einen einfachen Klick auf den Wirkleistungssollwert (*Constant*) erscheint dieser im *Slider*-Fenster. Danach werden das Minimum und das Maximum der Sollwirkleistung eingestellt und *CONNECT* wird markiert. Nun kann der *Slider* während der Simulation geöffnet und der Wirkleistungssollwert durch das Verschieben des Zeigers geändert werden.

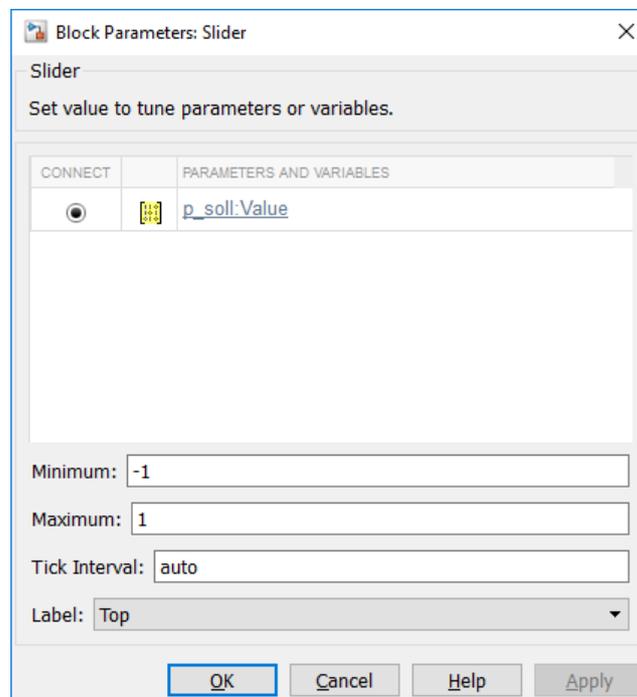


Abbildung 7-4 : *Slider* von *Dashboard* in *Simulink* als dynamische Eingabe

Eine weitere Möglichkeit um das Eingangssignal während der Simulation zu ändern, ist die Erzeugung eines Signals über eine Kombination von mehreren Step-Signalen. So kann man z.B. ein mit der Zeit verändertes Drehzahlssignal wie in Abbildung 7-5 erzeugen, indem man vier Step-Signale entsprechend der

Tabelle 7-1 einstellt und addiert. Das Drehzahlssignal nimmt in diesem Fall jede Sekunde Simulationszeiten an, mit den Werten: 0, 0.5, 0.9, 1, 1.1.

Tabelle 7-1 : Erzeugung eines mit der Zeit veränderten Signals.

Step	Step time	Initial value	Final value
Step 1	1	0	0.5
Step 2	2	0	0.4
Step 3	3	0	0.1
Step 4	4	0	0.1

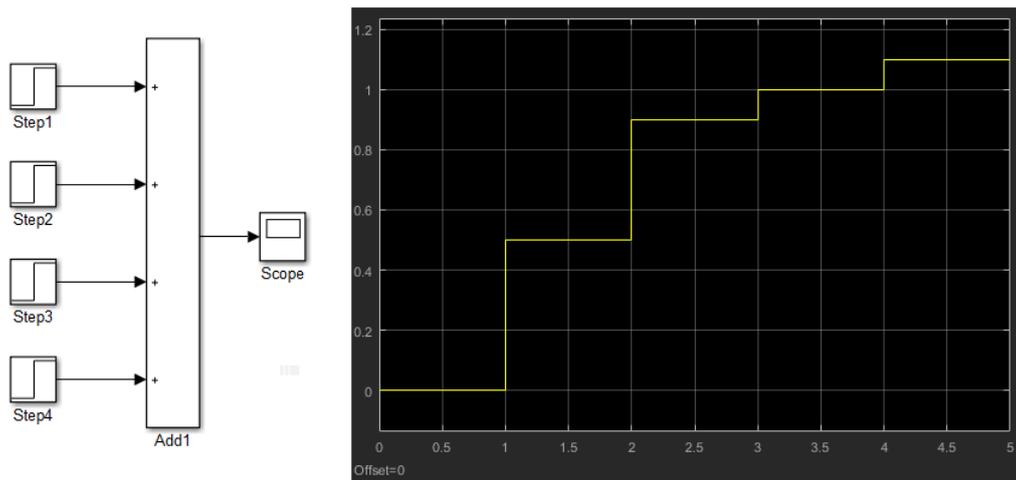


Abbildung 7-5 : Erzeugung eines mit der Zeit veränderten Drehzahlsignals

Wie schon erwähnt, werden die Soll-Wirkleistung, Soll-Blindleistung, Drehzahl und Statorspannung als Eingangssignale im Simulationsmodell eingesetzt. Der Statorspannungsraumzeiger wurde oben aus den drei Strangspannungen gebildet (Abbildung 6-2). Wenn aber die Amplitude oder die Frequenz der Statorspannung während der Simulation geändert werden soll, dann muss das in allen drei Stränge (*Sine Wave*) erfolgen, was unpraktisch ist. Eine flexiblere Methode für die Bildung vom Spannungsraumzeiger ist daher in Abbildung 7-6 dargestellt. Dadurch kann sowohl die Amplitude als auch die Frequenz der Statorspannung während der Simulation geändert werden.

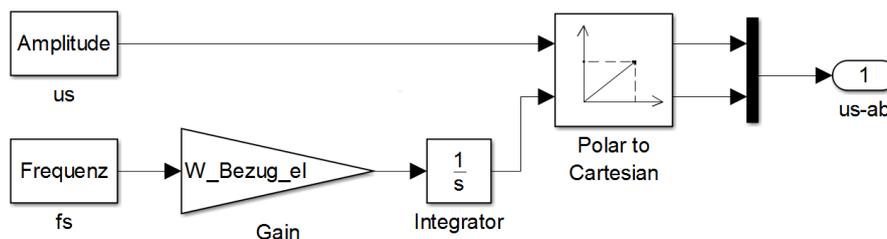


Abbildung 7-6 : Raumzeigerbildung der Statorspannung für eine flexible Eingabe

Als Anzeigenblöcke verfügt *Simulink* über die folgenden Elemente:

- *Scope* in *Sinks*: zeigt den zeitlichen Verlauf von einer oder mehreren Variablen an.
- *Display* in *Sinks*: gibt den Zahlenwert einer Größe an.
- *XY Graph* in *Sinks*: zeichnet die Daten im ersten Eingang gegen die Daten im zweiten Eingang. (Z.B. zeichnet die Spur einer komplexen Größe in der XY-Ebene).
- *Dashboard Scope* in *Daschboard*: zeigt die ausgewählten Signale in laufender Simulation in einer Bereichsanzeige an.
- *Gauge*, *Half Gauge*, *Quarter Gauge*, und *Linear Gauge* in *Dashboard*: sind Anzeigeblocke mit einem Zeiger und brauchen keine direkte Verbindung mit dem ausgewählten Signal.

Als Beispiel kann man die Stator- Soll- Wirkleistung mit einem *Slider* von *Dashboard* verändern und den Einfluss dieser Änderung auf die Rotorwirkleistung mittels eines *Linear Gauge* beobachten (Abbildung 7-7).

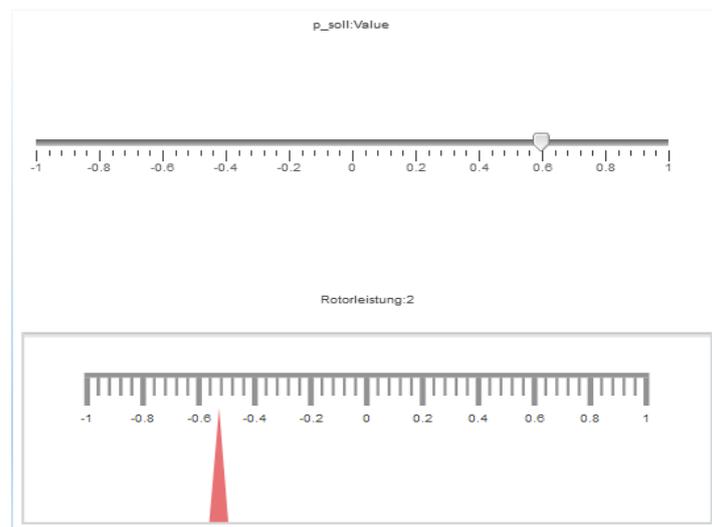


Abbildung 7-7 : Dynamische Eingabe der Stator-Soll-Leistung mittels eines Sliders (oben) bzw. Anzeige der Änderung in Rotorleistung mittels eines Linear-Gauges (unten)

Der *XY-Graph* kann auch im Simulationsmodell eingesetzt werden, um zu beobachten, wie sich eine Zustandsgröße bewegt, wenn eine der Eingangsgrößen während der Simulation geändert wird. Zum Beispiel kann durch einen *XY- Graph* beobachtet werden, wie sich die Rotorspannung ändert, wenn die Drehzahl entsprechend Abbildung 7-5 die folgenden Werte annimmt: 0, 0.5, 0.9, 1, 1.1 (Kombination von mehreren Step-Signalen). Das Ergebnis ist in *Abbildung 7-8* dargestellt, dabei werden die anderen Eingangsgrößen wie folgt eingegeben:  $p_{soll} = -0.5$ ;  $q_{soll} = -0.4$ ;  $us = 1$  ( $P - Regler = 0.2$ ;  $I - Regler = 1$ ).

Man kann sehen, wie sich die Rotorspannung im transienten Betrieb mit ungleichmäßigen Perioden dreht bis ein stabiler Zustand für  $w_m = 0$  erreicht wird, dann nimmt die Amplitude der Rotorspannung mit zunehmender Drehzahl ab, und erreicht bei  $w_m = 1$  einen Wert nahezu Null. Für  $w_m = 1.1$  geht die Spannung in die negative Richtung. Man kann auch

erkennen, dass die Änderung der Rotorspannung in X-Richtung viel größer als in Y-Richtung ist.

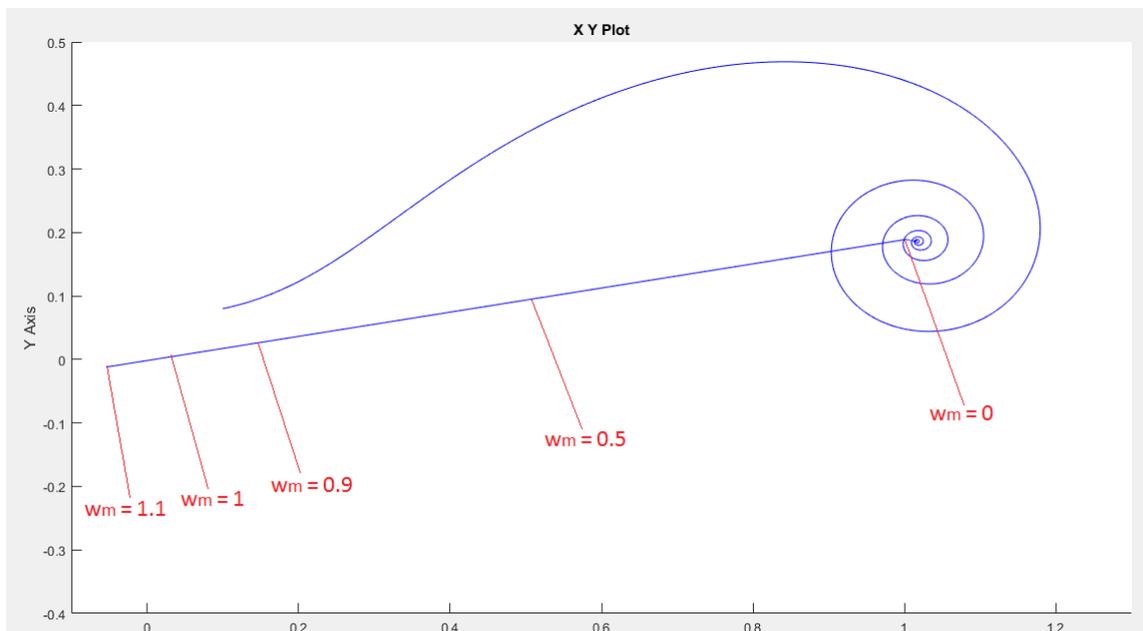


Abbildung 7-8 : Spur des Rotorspannungsraumveigers im XY-Graph bei zunehmender Drehzahl

Anmerkung: Die Anzeige einer Zustandsgröße mittels des *XY-Graphs* kann auf Grund der vielen angezeigten Datenpunkte unübersichtlich sein. Um dieses Problem zu lösen, kann eine kleine Änderung im Code der S-Funktion vom *XY-Graph* wie folgt gemacht werden:

Um die S-Funktion des *XY-Graphs* zu bearbeiten, wird die folgende Anweisung in *MATLAB Command Window* eingegeben:

```
edit sfunxy.m
```

Um nur einen Teil der Datenpunkte im *XY-Graph* anzuzeigen, geht man zur Linie Nummer 396 im Code:

```
new_line = feval(@()hg2sample.ScopeLineAnimator('maxNumVertices',50000));
```

Hier kann man die Zahl von `'maxNumVertices'` je nach Bedarf ändern. Zum Beispiel kann man 10 statt 50000 eingeben, um nur die letzten zehn Datenpunkte im *XY-Graph* anzuzeigen .

Man kann auch die Datenpunkte mit einem Marker versehen, indem man die Linie Nummer 238 im Code (`set(ud.XYLine, 'LineStyle', '-')`) wie folgt umschreibt:

```
(set(ud.XYLine, 'LineStyle', '-', 'Marker', '*').
```

## 7.4 Erstellung einer Matlab-Funktion zur Zeigerdiagramm- und Leistungsfluss-Darstellung

Um das Verhalten der elektrischen Maschine in einem bestimmten Betriebspunkt zu beschreiben, ist es üblich die physikalischen Größen der Maschine (Ströme, Spannungen und Teilspannungen) in diesem Betriebspunkt, in einem Zeigerdiagramm darzustellen. Eine Zeigerdiagramm-Darstellung ist durch die in Simulink verfügbare Blöcke nicht möglich. Daher werden die Simulationsdaten am Ende der Simulation in eine Matlab-Funktion exportiert, wo ein Programm in der Matlab-Skriptsprache geschrieben wird. Dieses Programm bearbeitet die Simulationsdaten um die Zustandsgrößen in Form eines Zeigerdiagramms darzustellen bzw. um den Wirk- bzw. Blindleistungsfluss der Maschine in Form von Bardiagrammen zu verdeutlichen.

Der Datenexport von Simulink erfolgt durch den Block: *To-Workspace*. Dieser Block ist in *Sink* zu finden. Bei Doppelklick auf *To-Workspace-Block* erscheint das Fenster in *Abbildung 7-9*.

Im Feld *Variable name* wird der Name (oder das Symbol) vom verbundenen Eingangssignal angegeben.

Im Feld *Sample time* wird der Zeitpunkt ausgewählt, in den die Daten exportiert werden sollen. Für die Darstellung von Zeigerdiagramm und Leistungsflüssen wird einen Zeitpunkt ausgewählt, bei dem der eingeschwungene, stabile Zustand des Betriebs schon erreicht wurde.

Im Feld *Save format* wird hier zweckmäßig *Array* ausgewählt. Es erscheint dann das Feld *"Save 2-D signals as"*. Hier wird: *"2-D Array-concatenate along first dimension"* ausgewählt. Ist das Eingangssignal ein Skalar so werden die Daten durch diese Einstellung in einer Matrix mit der Form  $\begin{pmatrix} 0 \\ x(t) \end{pmatrix}$  gespeichert. Ist das Eingangssignal ein Vektor so werden die Daten in einer Matrix- mit der Form  $\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ x(t) & y(t) \end{pmatrix}$  gespeichert.

Die Zustandsdaten, die für die Erstellung von Zeigerdiagramm und Leistungsfluss-Bardiagramme, benötigt werden, sind in Tabelle 7-2 gelistet. Sie werden mittels *To Workspace*-Blocks mit entsprechenden Symbolen vom Simulationsmodell in der Matlab-Funktion exportiert.

Anmerkung: Es ist hier wieder zu beachten, dass die verwendeten bezogenen Reaktanzwerte nur bei der Netzfrequenz  $f_n = 50 \text{ Hz}$  und somit bei einer bezogenen Winkelgeschwindigkeit von  $w_{elek} = 1$  gelten. Sollte eine andere Netzfrequenz eingesetzt werden, so müssen alle Reaktanzwerte durch das Produkt von der bezogenen Winkelgeschwindigkeit mit der bezogenen Induktivität ( $w_{elek} \cdot l$ ) ersetzt werden.

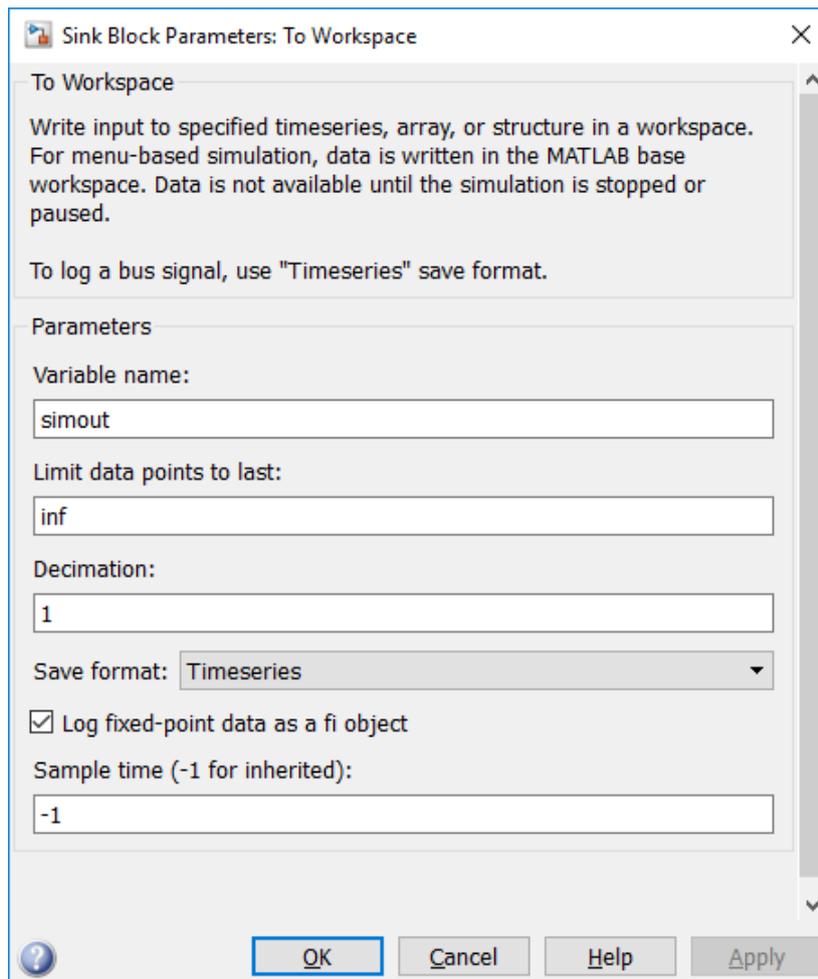


Abbildung 7-9 : Einstellung der To Workspace-Parameter zum Export von Simulationsdaten

Tabelle 7-2 : Die zur Matlab-Funktion exportierten Simulationsdaten mit entsprechenden Symbolen.

Zustandsdaten	Statorspannung		Statorstrom	Rotorspannung	Rotorstrom
Variable Name	us_uv		is_uv	ur_uv	ir_uv
Zustandsdaten	Innere Spannung		Magnetisierungs- strom	festgebremste Rotorspannung	Teilspannung ( $\underline{u}_s - r_s \cdot \underline{i}_s$ )
Variable Name	uh_uv		im_uv	ur_trafo	us_is_rs
Zustandsdaten	Teilspannung ( $\underline{u}_R - r_R \cdot \underline{i}_R$ )		Spannung-Abfall in $r_s$	Spannung-Abfall in $r_R$	Spannung- Abfall in $x_{s\sigma}$
Variable Name	ur_ir_rr		rs_is	rr_ir	j_xss_is
Zustandsdaten	Spannung-Abfall in $x_{R\sigma}$		Stator-Ist- Wirkleistung	Rotor- Wirkleistung	mechanische Leistung
Variable Name	j_xrs_ir		ps	pr	pm
Zustandsdaten	Wärme- verluste	Streufeld -Verluste	Magnetisierung- Leistung	Stator-Ist- Blindleistung	Rotor- Blindleistung
Variable Name	p-cu	q_streu	q_mag	qs	qr_s

**Anmerkung:** In den Leistungsfluss-Bardiagrammen werden manche Zustandsgrößen aus Darstellungszwecken mit einem Minus-Zeichen multipliziert bevor sie mit dem *To Workspace*-Block verbunden werden. Diese Größen sind: mechanische Leistung, Blindleistungen und die Wärme- bzw. Streufeld-Verluste.

Das Programm wird in der Matlab-Skriptsprache wie folgt geschrieben:

```
function MyDiagramm
% Starten der Simulation, Eingeben vom Modell_Name
a = sim('Simulation_Modell','SimulationMode','normal');
% Koordinaten Ursprung
x = [0];
y = [0];
% Aufrufen der Simulationsdaten
us = a.get('us_uv');
is = a.get('is_uv');
ir = a.get('ir_uv');
ur = a.get('ur_uv');
im = a.get('im_uv');
uh = a.get('uh_uv');
us_is_rs = a.get('us_is_rs');
uh_ir_rr = a.get('uh_ir_rr');
ur_trafo = a.get('ur_trafo');
rs_is = a.get('rs_is');
xss_is = a.get('j_xss_is');
rr_ir = a.get('rr_ir');
xrs_ir = a.get('j_xrs_ir');
ps = a.get('ps');
pr = a.get('pr');
pm = a.get('pm');
p_waerme = a.get('p_cu');
qs = a.get('qs');
qr_s = a.get('qr_s');
q_mag = a.get('q_mag');
q_streu = a.get('q_streu');
% Zeichnen von Raumzeigerdiagramm im statorspannungsfesten Koordinatensystem
figure()
scale =1;
q1 = quiver(x,y,us(2,1),us(2,2),scale); % Statorspannung
hold on
q2 = quiver(x,y,is(2,1),is(2,2),scale); % Statorstrom
hold on
q3 = quiver(x,y,ir(2,1),ir(2,2),scale); % Rotorstrom
hold on
q4 = quiver(x,y,ur(2,1),ur(2,2),scale); % Rotorspannung
hold on
q5 = quiver(x,y,uh(2,1),uh(2,2),scale); % Hauptspannung
hold on
q6 = quiver(x,y,im(2,1),im(2,2),scale); % Magnetisierungsstrom
hold on
q7 = quiver(x,y,ur_trafo(2,1),ur_trafo(2,2),scale);
hold on % stillstehende Rotorspannung

q8 = quiver(us(2,1),us(2,2),rs_is(2,1),rs_is(2,2),scale);
hold on % Spannungsabfall in Statorwiderstand
q9 = quiver(us_is_rs(2,1),us_is_rs(2,2),xss_is(2,1),xss_is(2,2),scale);
hold on % Spannungsabfall in Statorinduktivität

q10 = quiver(uh(2,1),uh(2,2),rr_ir(2,1),rr_ir(2,2),scale);
hold on % Spannungsabfall in Rotorwiderstand
q11 = quiver(uh_ir_rr(2,1),uh_ir_rr(2,2),xrs_ir(2,1),xrs_ir(2,2),scale);
```

```

hold on                                     % Spannungsabfall in Rotorinduktivität
q12 = quiver(ir(2,1),ir(2,2),is(2,1),is(2,2),scale); % Addition von Stator-
                                                % und Rotorstrom

% Eigenschaften der verschiedenen Pfeile
q1.Color = 'red';
q1.LineWidth = 1.5;
q1.DisplayName = 'u_s';
q2.Color = 'yellow';
q2.LineWidth = 1.5;
q2.DisplayName = 'i_s';
q3.Color = 'blue';
q3.LineWidth = 1.5;
q3.DisplayName = 'i_r';
q4.Color = 'green';
q4.LineWidth = 1.5;
q4.DisplayName = 'u_r';
q5.Color = 'black';
q5.LineWidth = 1.5;
q5.DisplayName = 'u_i_n_n_e_r';
q6.Color = 'magenta';
q6.LineWidth = 1.5;
q6.DisplayName = 'i_m';
q7.Color = 'cyan';
q7.LineWidth = 1;
q7.DisplayName = 'urTrafo';
q8.LineWidth = 0.3;
q8.DisplayName = 'rs*is';
q8.Annotation.LegendInformation.IconDisplayStyle = 'off';
q8.Color = 'black';
q8.LineStyle = '-';
q9.LineWidth = 0.3;
q9.DisplayName = 'xs*is';
q9.Annotation.LegendInformation.IconDisplayStyle = 'off';
q9.Color = 'black';
q9.LineStyle = '-';
q10.LineWidth = 0.3;
q10.DisplayName = 'off';
q10.Annotation.LegendInformation.IconDisplayStyle = 'off';
q10.Color = 'black';
q10.LineStyle = '-';
q11.LineWidth = 0.3;
q11.DisplayName = 'xr*ir';
q11.Annotation.LegendInformation.IconDisplayStyle = 'off';
q11.Color = 'black';
q11.LineStyle = '-';
q12.LineWidth = 1.5;
q12.DisplayName = 'i_s';
q12.Annotation.LegendInformation.IconDisplayStyle = 'off';
q12.Color = 'yellow';
q12.LineStyle = ':';

% Eigenschaften des erstellten Diagramms
title('Zeigersdiagramm in u,v KOS')
legend('show')
set(gca,'XLim',[-1.2 1.2])
set(gca,'XTick',[-1.2:0.2:1.2])
set(gca,'YLim',[-1 1])
set(gca,'YTick',[-1:0.2:1])
axis equal
ax = gca;
ax.XAxisLocation = 'origin';

```

```

ax.YAxisLocation = 'origin';
ax.Box = 'on';
grid on

% Erstellung eines Bardigramms für den Wirkleistungsfluss
figure()
bilanz = [ps(2) pr(2) pm(2) p_waerme(2); 0 0 0 0];
bilanzneg = bilanz;
bilanzneg(bilanzneg>0)=0;
bilanzpos = bilanz;
bilanzpos(bilanzpos<0)=0;
hold on
Hn=bar(bilanzneg, 'stacked');
Hn=bar(bilanzpos, 'stacked');
title('Wirkleistungsfluss')
AX=legend(Hn, {'p_s', 'p_r', 'p_m_e_c_h', 'Verluste'}, 'Location', 'Best', 'FontSize', 12);
set(gca, 'YTick', [-1.2:0.1:1.2]);
set(gca, 'xtick', []);
ax = gca;
ax.Box = 'on';

% Erstellung eines Bardigramms für den Blindleistungsfluss
figure()
bilanz = [qs(2) qr_s(2) q_mag(2) q_streu(2); 0 0 0 0];
bilanzneg = bilanz;
bilanzneg(bilanzneg>0)=0;
bilanzpos = bilanz;
bilanzpos(bilanzpos<0)=0;
hold on
Hn=bar(bilanzneg, 'stacked');
Hn=bar(bilanzpos, 'stacked');
title('Blindleistungsfluss')
colormap jet
AX=legend(Hn, {'q_s', 'q_r_s', 'q_m_a_g', 'q_s_t_r_e_u'}, 'Location', 'Best', 'FontSize', 12);
set(gca, 'YTick', [-2:0.1:2]);
set(gca, 'xtick', []);
ax = gca;
ax.Box = 'on';
end

```

## 7.5 Simulationsdurchführung

Die Eingangsgrößen (Statorspannung, Drehzahl, Soll-Wirk- und Soll-Blindleistung) werden zuerst je nach dem gewählten Betriebspunkt im DASM-Modells eingestellt. Danach wird das *Modell-Skript* durchgeführt um die Maschinenparameter auszurechnen. Anschließend wird die Simulation in der Matlab-Funktion (*Meine-Ergebnisse*) gestartet, indem man auf die Start-Taste (*Run*) im Editor klickt. Die Ergebnisse werden am Ende der Simulation in drei untereinanderliegenden Fenstern gezeigt. Sie zeigen das Zeigerdiagramm, das Bardigramm für Wirkleistungsfluss und das Bardigramm für Blindleistungsfluss.

## Kapitel 8 : Simulationsergebnisse von unterschiedlichen Betriebspunkten

### 8.1 Simulation 1: DASM als Generator in einem übererregten Betrieb

Für diese Simulation werden die Eingangsgrößen im Simulationsmodell wie folgt eingestellt:

$$u_s = 1 \text{ p.u.} \quad f_s = 50 \text{ Hz} \quad p_{s-soll} = -0.8 \text{ p.u.} \quad q_{s-soll} = 0.2 \text{ p.u.}$$

Die Simulation wird mit den folgenden Drehzahlwerten durchgeführt:

$$w_m = 0, \quad 0.9, \quad 1, \quad 1.15$$

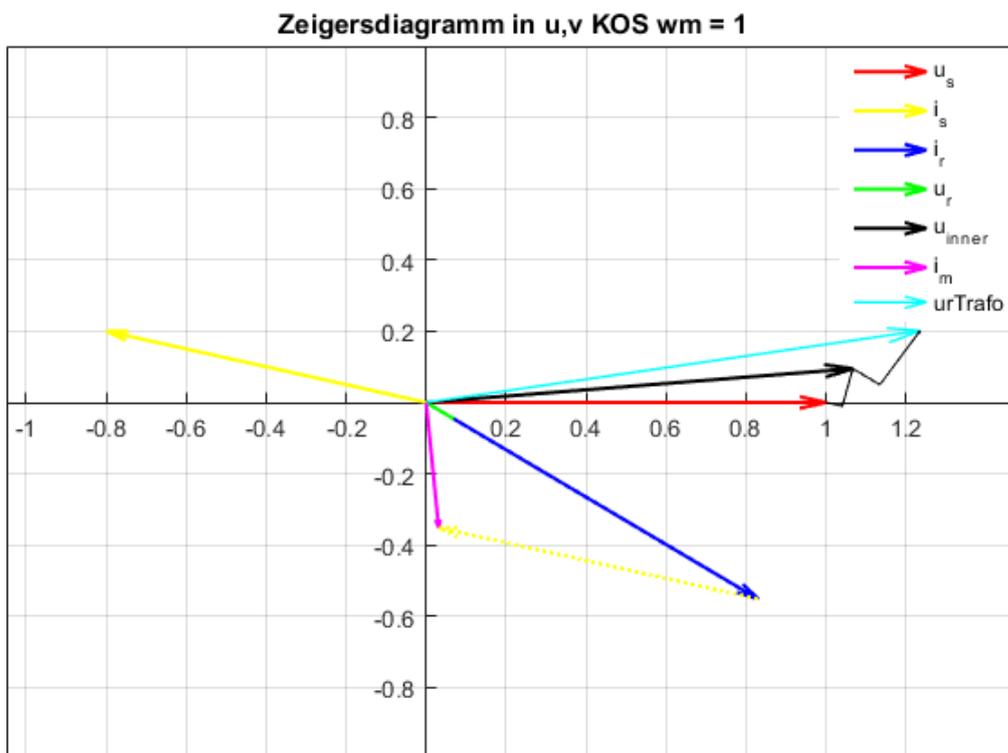


Abbildung 8-1 : Zeigerdiagramm der DASM, Generator in übererregtem Betrieb,  $w_m = 1$

In *Abbildung 8-1* wurden die Zustandsgrößen {Statorspannung (rot), Statorstrom (gelb), Rotorspannung (grün), Rotorstrom (blau), Magnetisierungsstrom (rosa), innere Spannung (schwarz), Spannungsabfälle in den Induktivitäten und Widerständen (dünnschwarz), und die bei festgebremster Maschine erzeugte Rotorspannung (türkis,  $u_{rTrafo}$  genannt)} in einem Zeigerdiagramm nach dem Erreichen des stabilen Zustands dargestellt. Da das Zeigerdiagramm in einem statorspannungsfesten Koordinatensystem erstellt wurde, liegt die Statorspannung immer auf der realen Achse. Der Statorstrom eilt der Statorspannung um  $166^\circ$  ( $\in \frac{\pi}{2} : \pi$ ) vor, was einen übererregten Generatorbetrieb der Maschine bedeutet. Der Rotorstrom ist in entgegengesetzter Richtung zum Statorstrom. Man sieht, dass die reale

Komponente des Rotorstroms ungefähr die gleiche Länge wie die reale Komponente des Statorstroms hat, während die imaginäre Komponente des Rotorstroms um etwa 0.3 größer ist, als die imaginäre Komponente des Statorstroms. Das liegt daran, dass der Magnetisierungsstrom im übererregten Betrieb über den Rotor fließt. Der Magnetisierungsstrom ergibt sich entsprechend Gleichung (80) aus der vektorielle Addition von Stator- und Rotorstrom. Die innere Spannung ist aufgrund des kapazitiven Statorstroms ein bisschen größer als die Statorspannung. Die Amplitude der Rotorspannung ist, wie schon erwähnt, zum Schlupf proportional und deswegen wird sie kleiner mit zunehmender Drehzahl. Die Rotorspannung dreht sich mit zunehmender Drehzahl von der Lage  $\underline{u}_R = \underline{u}_{r_{Trafo}}$  bei  $w_m = 0$  bis zum  $\underline{u}_R = r_s * \underline{i}_s$  bei  $w_m = 1$  (Gleichspannung). Man merkt, dass die Änderung des Rotorspannungswinkels klein ist bei kleinen Drehzahlwerten (großen Schlupfwerten). Diese Änderung wird aber groß bei Drehzahlwerten, die im Bereich der Synchronendrehzahl liegen.

Die Leistungsflüsse der DASM werden für diesen Betriebspunkt bei verschiedenen Drehzahlwerten in Form von Bardiagrammen dargestellt.

**Anmerkung 1:** In den Bardiagrammen wird die Leistung in der positiven Achse dargestellt wenn sie von der Maschine aufgenommen wird. Im Gegenteil wird die Leistung in der negativen Achse dargestellt wenn sie von der Maschine abgegeben oder in der Maschine verbraucht wird.

**Anmerkung 2:** Um die Blindleistungsbilanz zu verdeutlichen wurde die auf die Statorseite bezogene Rotorblindleistung ( $q_{r_s} = \frac{q_r}{s}$ ) und nicht die tatsächliche Rotorblindleistung ( $q_r$ ) in den Bardiagrammen verwendet. Eigentlich ist die Rotorblindleistung eine vom Schlupf abhängige Größe ( $q_r \sim s$ ), während die auf Statorseite bezogene Rotorblindleistung eine vom Schlupf unabhängig Größe ( $q_{r_s} = \frac{q_r}{s} = \text{Konstant}$ ) ist, sie hängt nur vom elektrischen Zustand der Maschine ab.

Abbildung 8-2 zeigt den Wirkleistungsfluss bei festgebremstem Rotor ( $w_m = 0$ ). Die mechanische Leistung ist daher gleich null. Die vom Stator geforderte Wirkleistung fließt vom Rotor zum Stator und dann zum Netz. Die ohmschen Verluste in Stator- und Rotorwiderständen werden ebenfalls rotorseitig gedeckt. Es gilt hier:  $p_r = p_s + \text{Verluste}$ .

In Abbildung 8-3 ist der Wirkleistungsfluss in einem untersynchronen generatorischen Betrieb bei  $w_m = 0.9$  dargestellt. Hier ist die zugeführte mechanische Leistung nicht groß genug, um die vom Stator geforderte Wirkleistung und die dabei entstehenden Verluste zu decken, deswegen wird die fehlende Leistung über den Rotor kompensiert.

Abbildung 8-4 zeigt den Wirkleistungsfluss in einem übersynchronen generatorischen Betrieb bei  $w_m = 1.15$ . Die zugeführte mechanische Leistung deckt die vom Stator geforderte Wirkleistung und die dabei entstehenden Wärmeverluste. Aufgrund der hohen Drehzahl bleibt ein Teil der mechanischen Leistung übrig. Der Leistungsüberschuß fließt über den Rotor ins Netz.

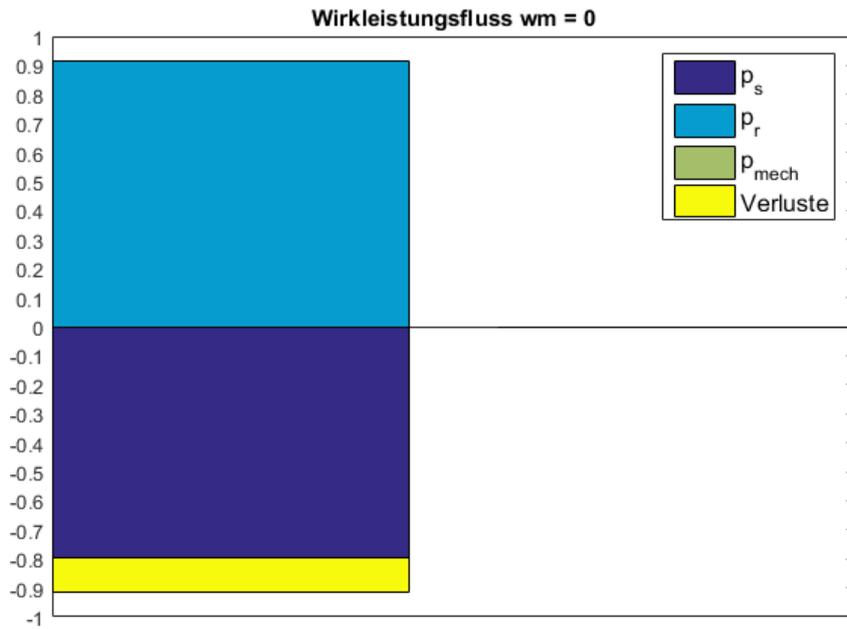


Abbildung 8-2 : Wirkleistungsfluss der DASM, Generator in übererregtem Betrieb,  $w_m = 0$

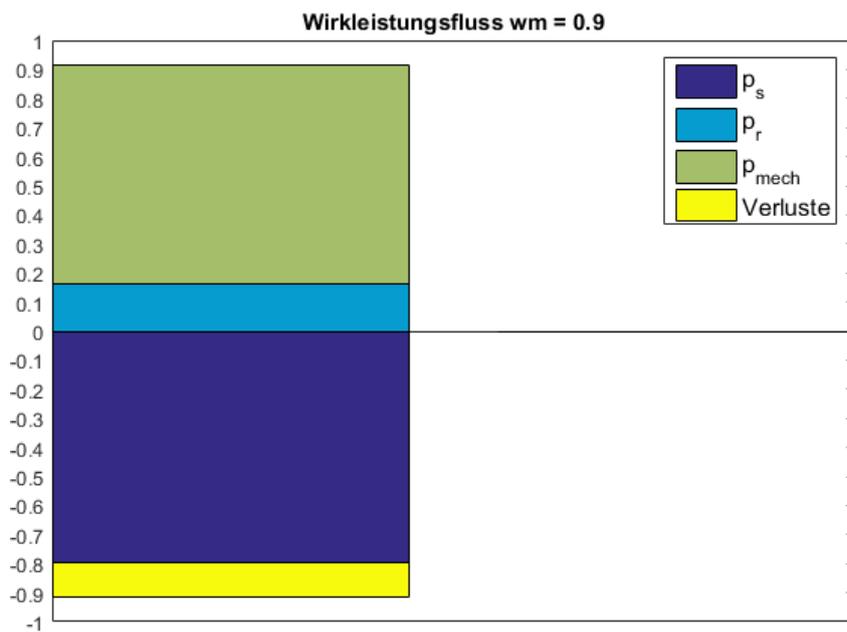


Abbildung 8-3 : Wirkleistungsfluss der DASM, Generator in übererregtem Betrieb, untersynchron

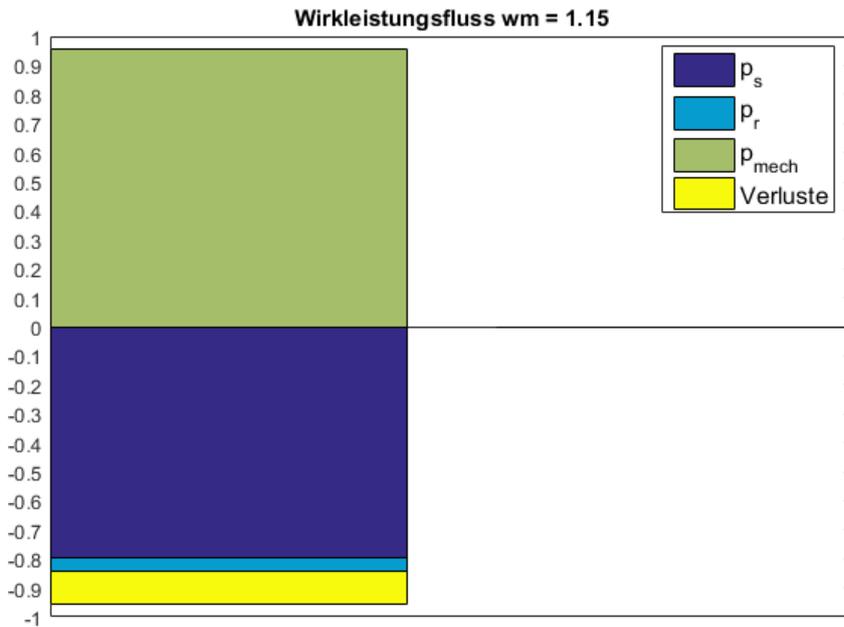


Abbildung 8-4 : Wirkleistungsfluss der DASM, Generator in übererregtem Betrieb, übersynchron

Abbildung 8-5 zeigt den Blindleistungsfluss für diesen Betriebspunkt.

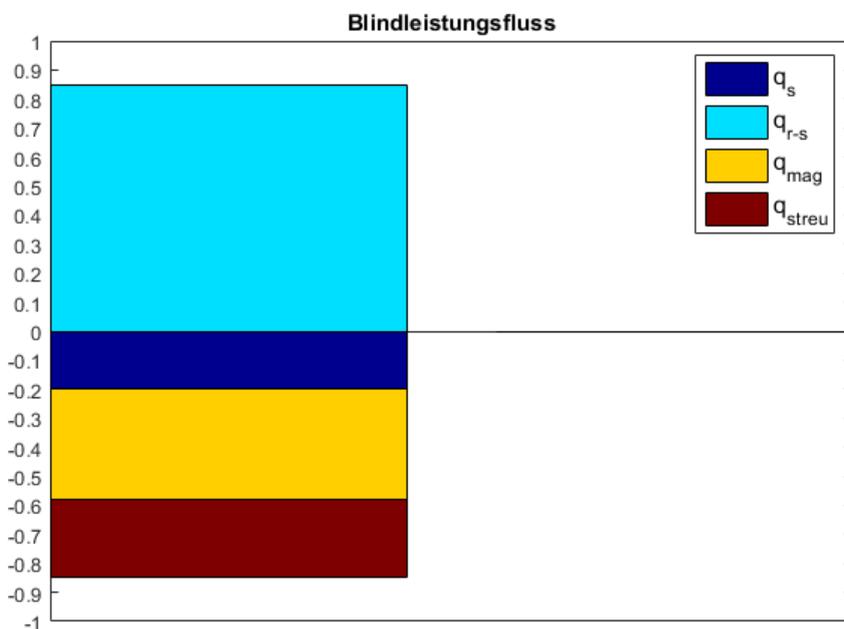


Abbildung 8-5 : Blindleistungsfluss der DASM, Generator in übererregtem Betrieb

Die Maschine wirkt statorseitig wie ein Kondensator und gibt eine Blindleistung vom Stator ins Netz ab. Die vom Stator abgegebene Blindleistung und die dazu benötigte Magnetisierungsleistung bzw. Streufeldleistung werden rotorseitig gedeckt. Die Rotorblindleistung beträgt bei  $w_m = 0.9$  ( $s = 0.1$ ) einen Wert von etwa 0.085 p.u. (der Wert der Rotorblindleistung kann mittels eines *Display-Blocks* in Simulink gelesen werden).

Die auf der Statorseite bezogene Rotorblindleistung beträgt in diesem Fall:  $q_{r_s} = \frac{q_r}{s} = \frac{0.085}{0.1} = 0.85 \text{ p.u.}$  Es gilt also:  $q_{r_s} = q_s + q_{mag} + q_{Streu}$ . Dieses Ergebnis zeigt deutlich, dass bei kleinen Schlupfwerten nur eine geringere Rotorblindleistung benötigt wird, um den Blindleistungsbedarf der Maschine rotorseitig zu decken. Man kann diesen Charakter der DASM zur Nutze machen, um beispielweise eine kapazitive Blindleistung vom Stator ins Netz einzuspeisen, und gleichzeitig einen hohen Wirkungsgrad zu erhalten.

## 8.2 Simulation 2: DASM als Generator in einem untererregten Betrieb

Für diese Simulation werden die Eingangsgrößen im DASM-Modell wie folgt eingestellt:

$$u_s = 1 \text{ p.u.} \quad f_s = 50 \text{ Hz} \quad p_{s-soll} = -0.8 \text{ p.u.} \quad q_{s-soll} = -0.5 \text{ p.u.}$$

Die Simulation wird mit den folgenden Drehzahlwerten durchgeführt:

$$w_m = 0, \quad 0.5, \quad 0.9, \quad 1.15$$

Die wichtigen Ergebnisse wurden in den Abbildungen 8.6 bis 8.8 dargestellt.

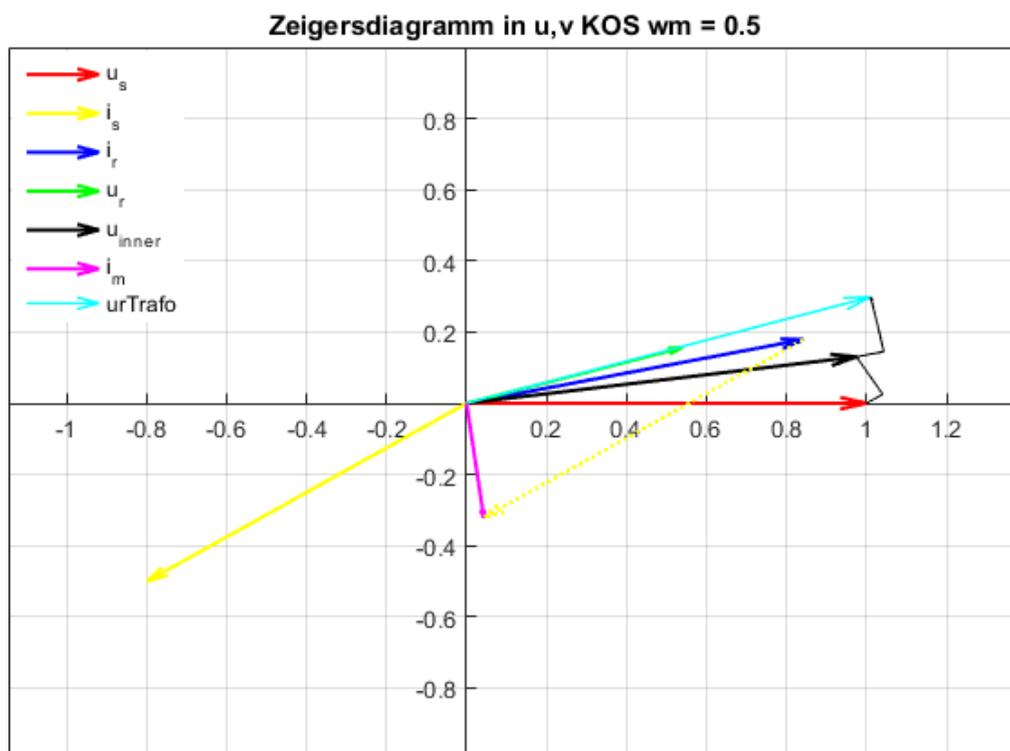


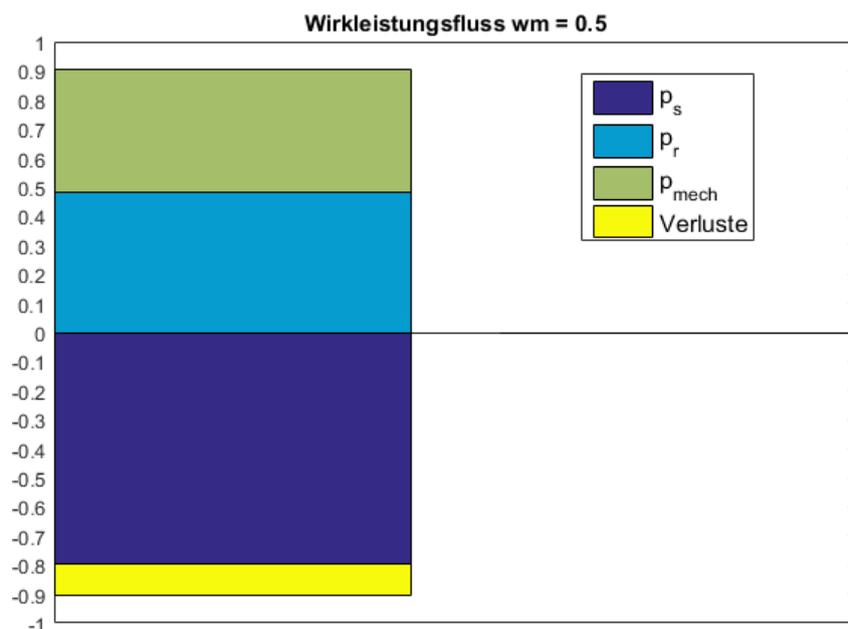
Abbildung 8-6 : Zeigerdiagramm der DASM als Generator in untererregtem Betrieb,  $w_m = 0.5$

In Abbildung 8-6 ist das Zeigerdiagramm im untererregten Generatorbetrieb dargestellt. Man sieht, dass der Statorstrom der Statorspannung um  $223^\circ$  ( $\in -\pi : 2\pi$ ) voreilt. Der Rotorstrom bleibt nach wie vor in entgegengesetzter Richtung des Statorstroms. Im

Gegensatz zum übererregten Betrieb ist die imaginäre Komponente des Statorstroms im untererregten Betrieb größer als die imaginäre Komponente des Rotorstroms. Jedoch ist der Unterschied zwischen den beiden Komponenten kleiner als der Betrag des Magnetisierungsstroms (0.3 p.u). Dies liegt daran, dass die imaginäre Komponente des Statorstroms nicht groß genug ist um den Magnetisierungsbedarf der Maschine einzubringen. Daher fließt ein Teil des Magnetisierungsstroms über den Rotor. Der Magnetisierungsstrom bleibt im Generatorbetrieb im ersten Quadrant. Die innere Spannung ist auf Grund des induktiven Statorstroms kleiner als die Statorspannung. Die Rotorspannung beträgt bei  $w_m = 0.5$  die Hälfte von  $u_{rTrafo}$  und hat bei diesem Betriebspunkt den gleichen Winkel wie  $u_{rTrafo}$ .

Der Wirkleistungsfluss beim untererregten Generatorbetrieb ist ähnlich wie beim übererregten Generatorbetrieb. In *Abbildung 8-7* ist die Wirkleistungsbilanz für  $w_m = 0.5$  dargestellt. Ein Vergleich mit dem Wirkleistungsfluss in *Abbildung 8-3* bei  $w_m = 0.9$  zeigt, dass die mechanische Leistung bei  $w_m = 0.5$  fast um die Hälfte gesunken ist. Daher muss mehr Wirkleistung über den Rotor eingebracht werden, um die statorseitig geforderte Wirkleistung und die dabei entstehenden Verluste zu decken.

Der Blindleistungsfluss in untererregten Generatorbetrieb ist in *Abbildung 8-8* dargestellt. Obwohl die Maschine statorseitig bezüglich dem Netz als Induktivität wirkt, und Blindleistung vom Netz aufnimmt, ist die vom Stator aufgenommene Blindleistung nicht groß genug, um den Magnetisierungs- und Streufeldbedarf zu decken. Die fehlende Blindleistung wird daher vom Rotor aufgenommen.



*Abbildung 8-7* : Wirkleistungsfluss der DASM, Generator in untererregtem Betrieb,  $w_m = 0.5$

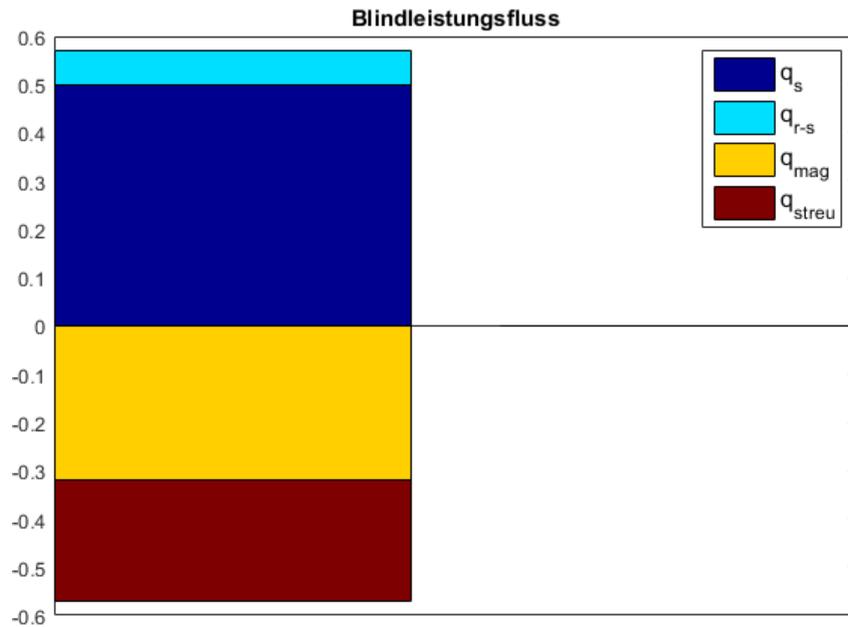


Abbildung 8-8 : Blindleistungsfluss der DASM, Generator in untererregtem Betrieb

### 8.3 Simulation 3: DASM im Motorbetrieb

Man kann einen Motorbetrieb im vorigen Modell simulieren, indem man die Soll-Wirkleistung mit positivem Zeichen eingibt. Jedoch ist es beim Motorbetrieb sinnvoller, eine mechanische und nicht eine elektrische Sollgröße für die Regelung einzusetzen. Aus diesem Grund wurde die Regelung für diese Simulation so angepasst, dass das Lastmoment und nicht die Soll-Wirkleistung als Eingangsgröße für den Regler einbezogen wird (Diese Anpassung wurde in einem eigenen Modell unter dem Namen " Reg\_Anpassung\_motor " gespeichert). Die reale Komponente des Regelsignals wurde für diesen Fall aus der Differenz zwischen dem Lastmoment und dem inneren Moment gewonnen. Die imaginäre Komponente des Regelsignals ist gleich wie im vorigen Modell, als Differenz zwischen Soll-Blindleistung und Ist-Blindleistung, geblieben. *Abbildung 8-9* zeigt wie die Anpassung der Regelung in Simulink realisiert wurde.

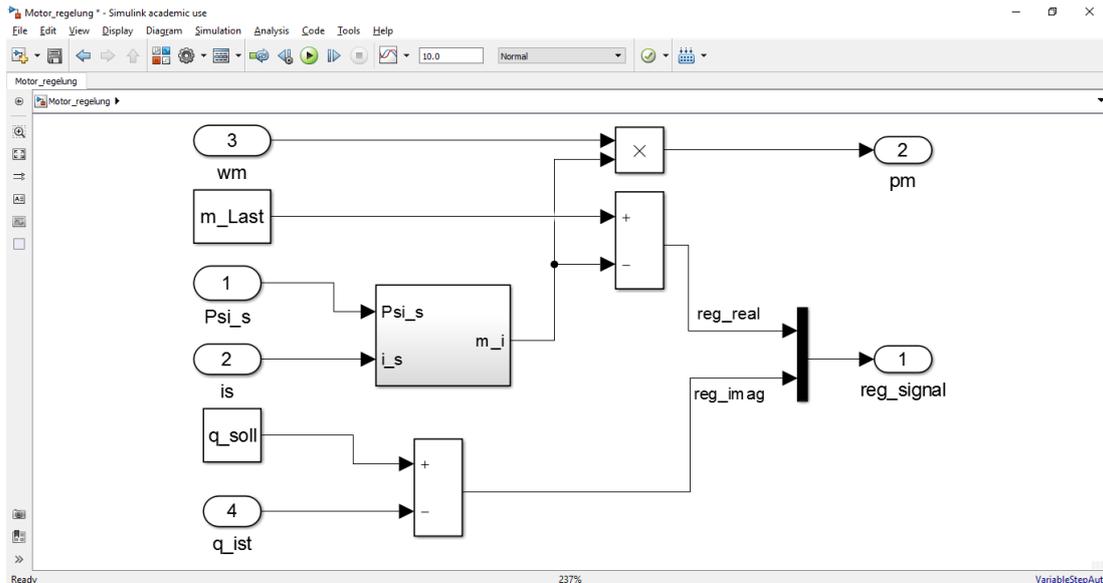


Abbildung 8-9 : Anpassung des Reglers für den Motorbetrieb

Die Eingangsgrößen für den Motorbetrieb werden wie folgt eingestellt:

$$u_s = 1 \text{ p.u.} \quad f_s = 50 \text{ Hz} \quad m_{last} = 1 \text{ p.u.} \quad q_{s-soll} = 0 \text{ p.u.}$$

Die unter- und übersynchronen Betriebe werden mit den folgenden Drehzahlwerten simuliert.

$$w_m = 0.8 \quad \text{bzw.} \quad w_m = 1.1$$

Die wichtigen Simulationsergebnisse sind in den Abbildungen 8.10 bis 8.13 dargestellt.

In *Abbildung 8-10* ist das Zeigerdiagramm für diesen Betriebspunkt bei  $w_m = 0.8$  dargestellt. Da die Statorblindleistung gleich null ist, hat der Statorstrom keine imaginäre Komponente und liegt somit auf der realen Achse. Damit das Drehmoment seinen Nennwert erreicht ( $m_{last} = 1 \text{ p.u.}$ ), muss die Amplitude des Statorstroms ihren Nennwert ( $1 \text{ p.u.}$ ) überschreiten, da sie auch für die Deckung der entstehenden Wärmeverluste zuständig ist. Das heißt die Maschine wird bei diesem Betriebspunkt überlastet. Man sieht, dass die innere Spannung im ersten Quadrant liegt, und aufgrund des Spannungsabfalls im Statorwiderstand ein bisschen kleiner ist als die Statorspannung. Die Magnetisierung der Maschine erfolgt hier über den Rotor. Deswegen beträgt die imaginäre Komponente des Rotorstroms  $0.3 \text{ p.u.}$

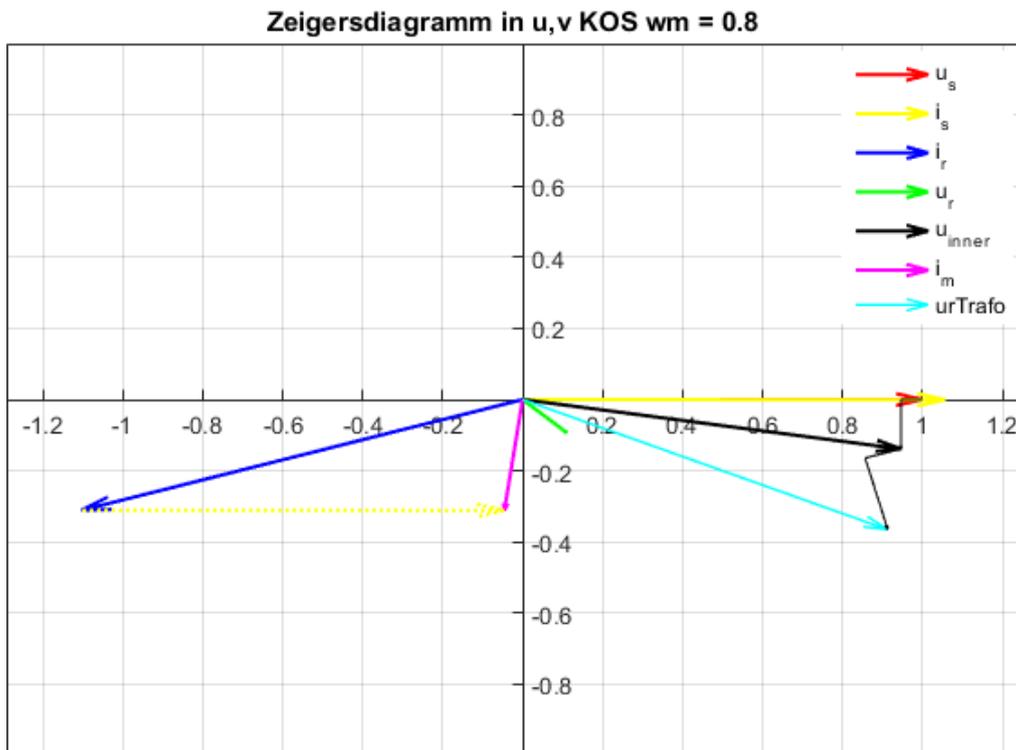


Abbildung 8-10 : Zeigerdiagramm der DASM im Motorbetrieb,  $w_m = 0.8$

Im Motorbetrieb der DASM wird die zugeführte elektrische Wirkleistung in mechanische Leistung umgewandelt. Daher liegt die Statorwirkleistung im Motorbetrieb immer in der positiven Achse des Bardiagramms (im Gegenteil zum Generatorbetrieb).

In Abbildung 8-11 ist der Wirkleistungsfluss im untersynchronen Motorbetrieb dargestellt. Die über den Stator zugeführte Wirkleistung ist in diesem Fall groß genug, um die mechanische Leistung und die dabei entstehenden Verluste zu decken. Die überbleibende Wirkleistung wird über den Rotor ins Netz zurückgespeist.

Im übersynchronen Betrieb (Abbildung 8-12) kann die über den Stator zugeführte Wirkleistung die geforderte mechanische Leistung und die dabei entstehenden Wärmeverluste nicht alleine decken. Die fehlende Leistung wird in diesem Fall über den Rotor zugeführt.

In Abbildung 8-13 ist der Blindleistungsfluss bei  $q_s = 0$  dargestellt. Hier gibt es keinen Blindleistungsaustausch zwischen Stator und Rotor. Die aufgenommene auf Statorseite bezogene Rotorblindleistung ( $q_{r_s}$ ) deckt genau den Magnetisierungs- und den Streufeldbedarf ab.

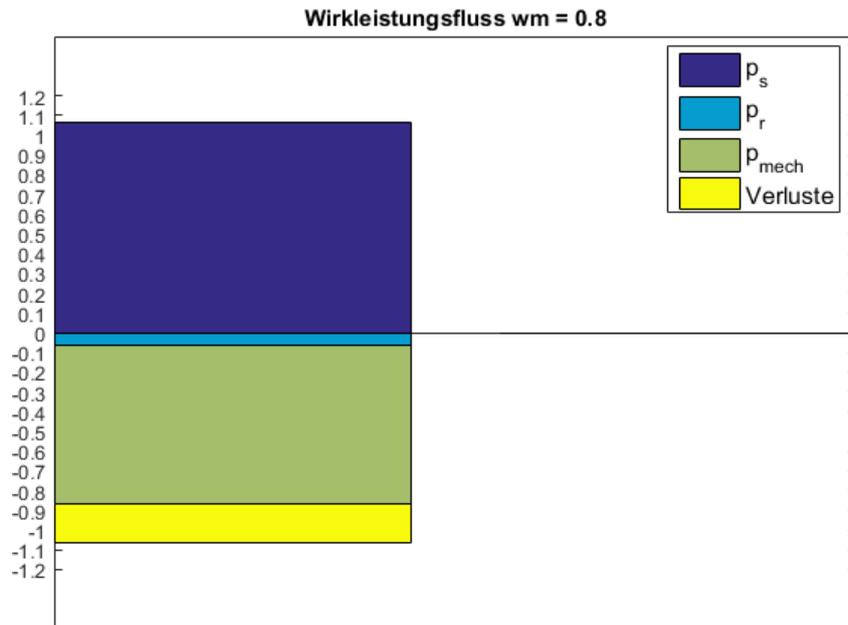


Abbildung 8-11 : Wirkleistungsfluss der DASM im Motorbetrieb, untersynchron,  $q_s = 0$  p. u.

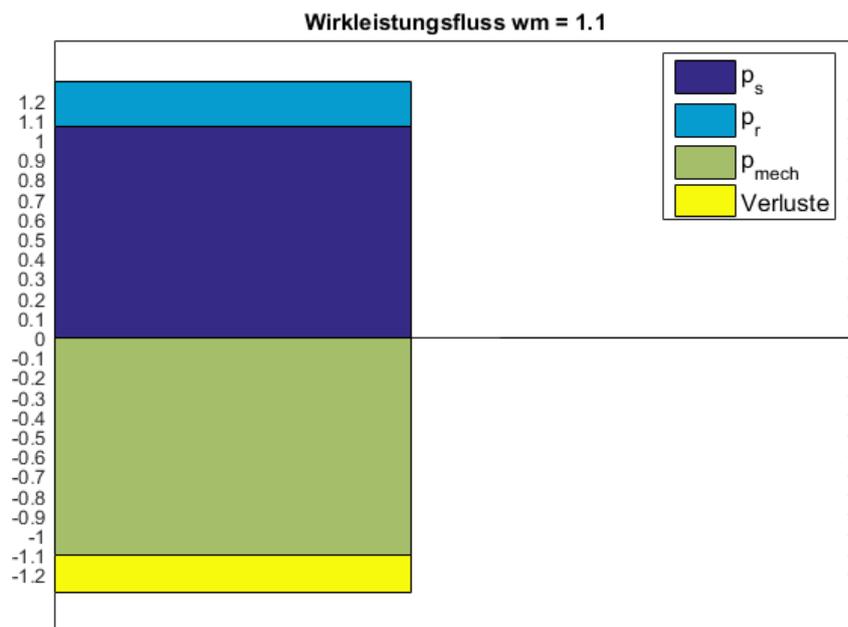


Abbildung 8-12 : Wirkleistungsfluss der DASM im Motor Betrieb, übersynchron,  $q_s = 0$  p. u.

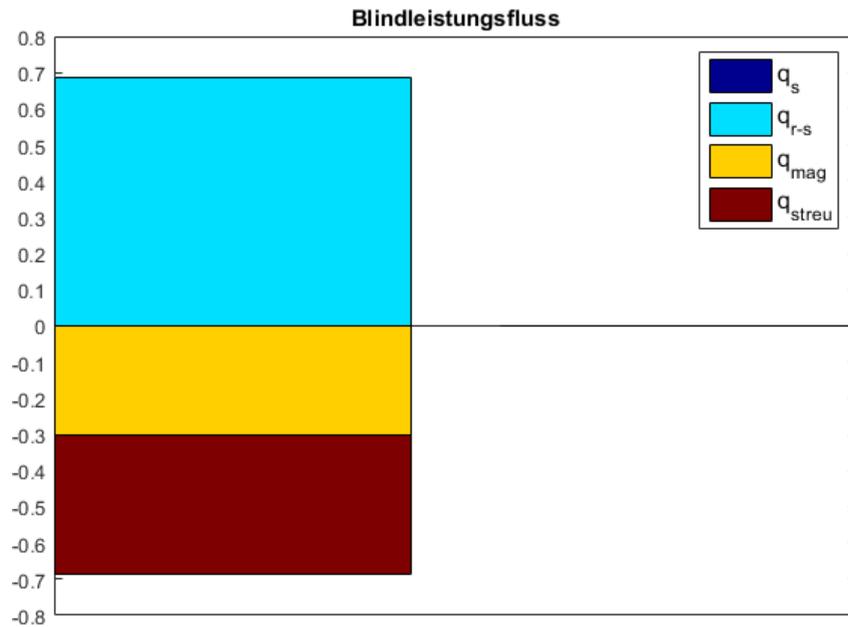


Abbildung 8-13 : Blindleistungsfluss der DASM im Motorbetrieb,  $q_s = 0$  p.u.

### 8.3 Simulation 4: DASM als Motor in einem untererregten Betrieb

Für diesen Betrieb werden Eingangsgrößen wie folgt eingestellt:

$$u_s = 1 \text{ p.u.} \quad f_s = 50 \text{ Hz} \quad m_{last} = 0.5 \text{ p.u.} \quad q_{s\_soll} = -0.8 \text{ p.u.}$$

In Abbildung 8-14 ist das Zeigerdiagramm bei  $w_m = 1.1$  dargestellt.

Der Statorstrom liegt im ersten Quadrant (eilt der Spannung um etwa  $55^\circ$  nach). Der gesamte Magnetisierungsstrom fließt in diesem Betriebspunkt über den Stator. Deswegen ist die imaginäre Komponente des Statorstroms um  $0.3$  p.u größer als die imaginäre Komponente des Rotorstroms. Der Magnetisierungsstrom liegt im Motorbetrieb immer im vierten Quadrant. Die innere Spannung im untererregten Betrieb ist kleiner als im übererregten Betrieb. Im Vergleich zum übersynchronen Betrieb wechselt der Differenzwinkel zwischen Rotorspannung und Rotorstrom im untersynchronen Betrieb sein Vorzeichen, was die Wirkungsrichtung von Rotorwirk- und Rotorblindleistung umdreht.

Da der Wirkleistungsfluss im untererregten und übererregten Motorbetrieb gleich aussieht, wurde bei dieser Simulation nur der Blindleistungsfluss dargestellt (Abbildung 8-15). Die über den Stator aufgenommene Blindleistung ist hier groß genug, um die Maschine zu magnetisieren und die dabei entstehenden Streufeldverluste abzudecken. Der Blindleistungsüberschuss wird über den Rotor ins Netz zurückgespeist. (der Rotor wirkt hier wie ein Kondensator).

Wie schon oben erwähnt, wechselt die Rotorblindleistung im übersynchronen Betrieb im Vergleich zum untersynchronen Betrieb ihr Vorzeichen. Gleichzeitig nimmt der Schlupf ein negatives Vorzeichen an. Deswegen behält die auf der Statorseite bezogene

Rotorblindleistung ( $q_{r,s} = \frac{q_r}{s}$ ) sowohl im übersynchronen als auch im untersynchronen Betrieb dieselbe Richtung.

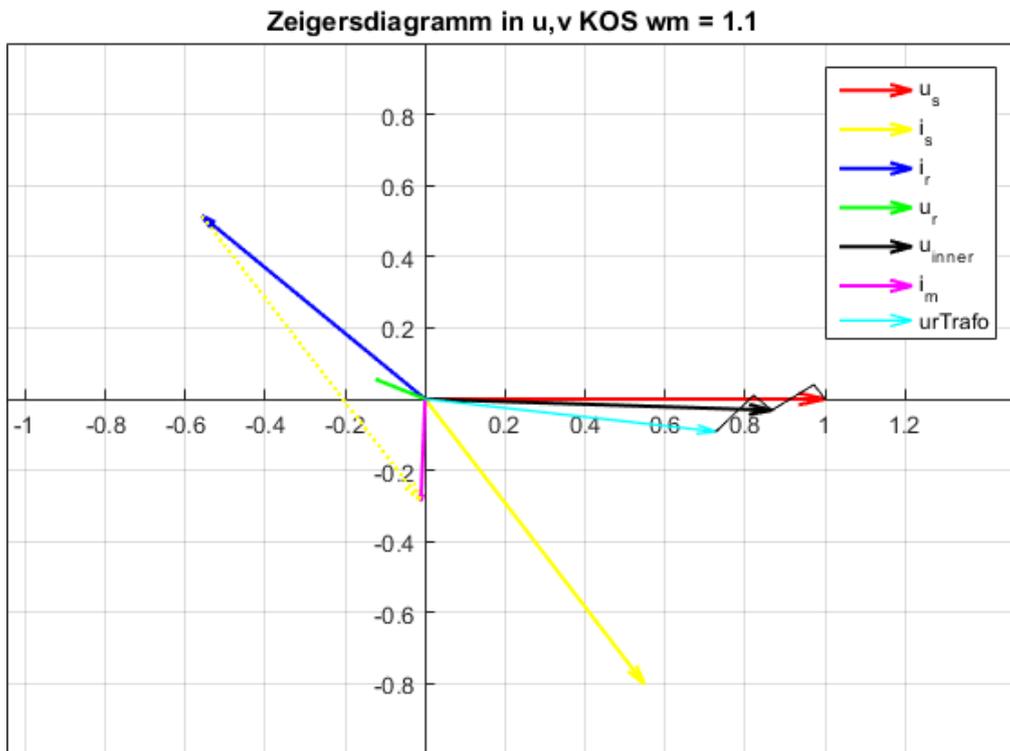


Abbildung 8-14 : Zeigerdiagramm der DASM als Motor in untererregtem Betrieb,  $w_m = 1.1$

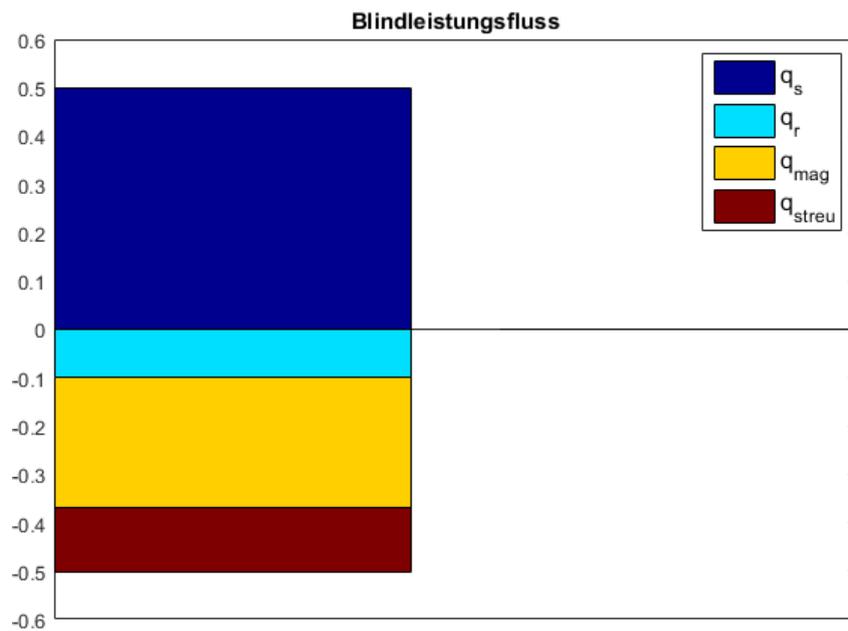


Abbildung 8-15 : Blindleistungsfluss der DASM, Motor in übererregtem Betrieb

## Appendix A: Berechnung der Rotorspannung in einem transienten Vorgang

Die Maschinengleichung im statorspannungsfesten Koordinatensystem mit ( $w_k = w_{elek}$ ):

$$\underline{u}_S = r_S \cdot \underline{i}_S + \frac{d\underline{\Psi}_S}{d\tau} + j \cdot w_{elek} \cdot \underline{\Psi}_S$$

$$\underline{u}_R = r_R \cdot \underline{i}_R + \frac{d\underline{\Psi}_R}{d\tau} + j \cdot (w_{elek} - w_m) \cdot \underline{\Psi}_R$$

$$\underline{\Psi}_S = (x_{S\sigma} + x_m) \cdot \underline{i}_S + x_m \cdot \underline{i}_R$$

$$\underline{\Psi}_R = x_m \cdot \underline{i}_S + (x_{R\sigma} + x_m) \cdot \underline{i}_R$$

Ableitung der Statorflussgleichung:

$$\frac{d\underline{\Psi}_S}{d\tau} = (x_{S\sigma} + x_m) \cdot \frac{d\underline{i}_S}{d\tau} + x_m \cdot \frac{d\underline{i}_R}{d\tau}$$

Einsetzen in die Statorspannungsgleichung:

$$\underline{u}_S = r_S \cdot \underline{i}_S + (x_{S\sigma} + x_m) \cdot \frac{d\underline{i}_S}{d\tau} + x_m \cdot \frac{d\underline{i}_R}{d\tau} + j \cdot w_{elek} \cdot \underline{\Psi}_S$$

Somit kann man schreiben:

$$\frac{d\underline{i}_R}{d\tau} = \frac{1}{x_m} \underline{u}_S - \frac{r_S}{x_m} \cdot \underline{i}_S - \frac{(x_{S\sigma} + x_m)}{x_m} \cdot \frac{d\underline{i}_S}{d\tau} - j \cdot \frac{1}{x_m} \cdot w_{elek} \cdot \underline{\Psi}_S \quad (a)$$

Ableitung der Rotorflussgleichung:

$$\frac{d\underline{\Psi}_R}{d\tau} = x_m \cdot \frac{d\underline{i}_S}{d\tau} + (x_{R\sigma} + x_m) \cdot \frac{d\underline{i}_R}{d\tau}$$

Einsetzen in die Rotorspannungsgleichung:

$$\underline{u}_R = r_R \cdot \underline{i}_R + x_m \cdot \frac{d\underline{i}_S}{d\tau} + (x_{R\sigma} + x_m) \cdot \frac{d\underline{i}_R}{d\tau} + j \cdot (w_{elek} - w_m) \cdot \underline{\Psi}_R$$

Einsetzen der Gleichung (a):

$$\underline{u}_R = r_R \cdot \underline{i}_R + x_m \cdot \frac{d\underline{i}_S}{d\tau} + (x_{R\sigma} + x_m) \cdot \left( \frac{1}{x_m} \underline{u}_S - \frac{r_S}{x_m} \cdot \underline{i}_S - \frac{(x_{S\sigma} + x_m)}{x_m} \cdot \frac{d\underline{i}_S}{d\tau} - j \cdot \frac{1}{x_m} \cdot w_{elek} \cdot \underline{\Psi}_S \right) + j \cdot (w_{elek} - w_m) \cdot \underline{\Psi}_R$$

Vereinfachung:

$$\underline{u}_R = \frac{(x_{R\sigma} + x_m)}{x_m} \underline{u}_S + \left( x_m - \frac{(x_{S\sigma} + x_m) \cdot (x_{R\sigma} + x_m)}{x_m} \right) \cdot \frac{d\underline{i}_S}{d\tau} - \frac{r_S \cdot (x_{R\sigma} + x_m)}{x_m} \cdot \underline{i}_S + r_R \cdot \underline{i}_R - j \cdot \frac{(x_{R\sigma} + x_m)}{x_m} \cdot w_{elek} \cdot \underline{\Psi}_S + j \cdot (w_{elek} - w_m) \cdot \underline{\Psi}_R$$

Vereinfachung:

$$\underline{u}_R = \frac{(x_{R\sigma} + x_m)}{x_m} \underline{u}_s - \left( \frac{x_{s\sigma} \cdot x_{R\sigma}}{x_m} + x_{s\sigma} + x_{R\sigma} \right) \cdot \frac{d\underline{i}_s}{d\tau} - \frac{r_s \cdot (x_{R\sigma} + x_m)}{x_m} \cdot \underline{i}_s + r_R \cdot \underline{i}_R - j \cdot \frac{(x_{R\sigma} + x_m)}{x_m} \cdot W_{elek} \cdot \underline{\Psi}_s + j \cdot (W_{elek} - W_m) \cdot \underline{\Psi}_R$$

Einsetzen der Statorflussgleichung:

$$\underline{u}_R = \frac{(x_{R\sigma} + x_m)}{x_m} \underline{u}_s - \left( \frac{x_{s\sigma} \cdot x_{R\sigma}}{x_m} + x_{s\sigma} + x_{R\sigma} \right) \cdot \frac{d\underline{i}_s}{d\tau} - \frac{r_s \cdot (x_{R\sigma} + x_m)}{x_m} \cdot \underline{i}_s + r_R \cdot \underline{i}_R - j \cdot \frac{(x_{R\sigma} + x_m)}{x_m} \cdot W_{elek} \cdot ((x_{s\sigma} + x_m) \cdot \underline{i}_s + x_m \cdot \underline{i}_R) + j \cdot (W_{elek} - W_m) \cdot \underline{\Psi}_R$$

Vereinfachung:

$$\underline{u}_R = \frac{(x_{R\sigma} + x_m)}{x_m} \underline{u}_s - \left( \frac{x_{s\sigma} \cdot x_{R\sigma}}{x_m} + x_{s\sigma} + x_{R\sigma} \right) \cdot \frac{d\underline{i}_s}{d\tau} + \left( - \frac{r_s \cdot (x_{R\sigma} + x_m)}{x_m} - j \cdot \frac{(x_{R\sigma} + x_m)}{x_m} \cdot W_{elek} \cdot (x_{s\sigma} + x_m) \right) \cdot \underline{i}_s + \left( r_R - j \cdot x_m \cdot \frac{(x_{R\sigma} + x_m)}{x_m} \cdot W_{elek} \right) \underline{i}_R - j \cdot (W_{elek} - W_m) \cdot \underline{\Psi}_R$$

Vereinfachung:

$$\underline{u}_R = \frac{(x_{R\sigma} + x_m)}{x_m} \underline{u}_s - \left( \frac{x_{s\sigma} \cdot x_{R\sigma}}{x_m} + x_{s\sigma} + x_{R\sigma} \right) \cdot \frac{d\underline{i}_s}{d\tau} + \left( - \frac{r_s \cdot (x_{R\sigma} + x_m)}{x_m} - j \cdot W_{elek} \cdot \left( \frac{x_{s\sigma} \cdot x_{R\sigma}}{x_m} + x_{s\sigma} + x_{R\sigma} \right) \right) \cdot \underline{i}_s + (r_R - j \cdot (x_{R\sigma} + x_m) \cdot W_{elek}) \underline{i}_R + j \cdot (W_{elek} - W_m) \cdot \underline{\Psi}_R$$

Einsetzen der Rotorflussgleichung:

$$\underline{u}_R = \frac{(x_{R\sigma} + x_m)}{x_m} \underline{u}_s - \left( \frac{x_{s\sigma} \cdot x_{R\sigma}}{x_m} + x_{s\sigma} + x_{R\sigma} \right) \cdot \frac{d\underline{i}_s}{d\tau} + \left( - \frac{r_s \cdot (x_{R\sigma} + x_m)}{x_m} - j \cdot W_{elek} \cdot \left( \frac{x_{s\sigma} \cdot x_{R\sigma}}{x_m} + x_{s\sigma} + x_{R\sigma} \right) \right) \cdot \underline{i}_s + (r_R - j \cdot (x_{R\sigma} + x_m) \cdot W_{elek}) \underline{i}_R + j \cdot (W_{elek} - W_m) \cdot (x_m \cdot \underline{i}_s + (x_{R\sigma} + x_m) \cdot \underline{i}_R)$$

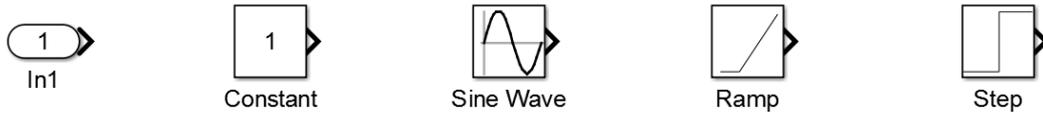
Vereinfachung:

$$\underline{u}_R = \frac{(x_{R\sigma} + x_m)}{x_m} \underline{u}_s - \left( \frac{x_{s\sigma} \cdot x_{R\sigma}}{x_m} + x_{s\sigma} + x_{R\sigma} \right) \cdot \frac{d\underline{i}_s}{d\tau} + \left( - \frac{r_s \cdot (x_{R\sigma} + x_m)}{x_m} - j \cdot W_{elek} \cdot \left( \frac{x_{s\sigma} \cdot x_{R\sigma}}{x_m} + x_{s\sigma} + x_{R\sigma} \right) + j \cdot x_m (W_{elek} - W_m) \right) \cdot \underline{i}_s + (r_R - j \cdot (x_{R\sigma} + x_m) \cdot W_{elek} + j \cdot (x_{R\sigma} + x_m) \cdot (W_{elek} - W_m)) \underline{i}_R$$

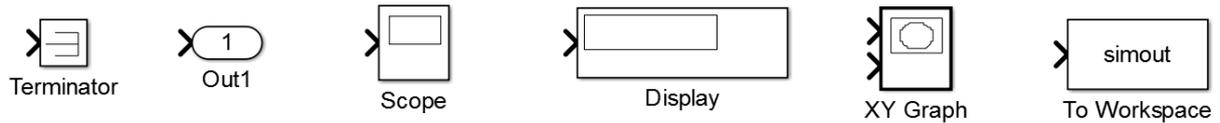
Mit dieser Gleichung kann die Rotorspannung im transienten Betrieb berechnet werden.

## Appendix B: Die von Simulink im Simulationsmodell verwendeten Blöcke

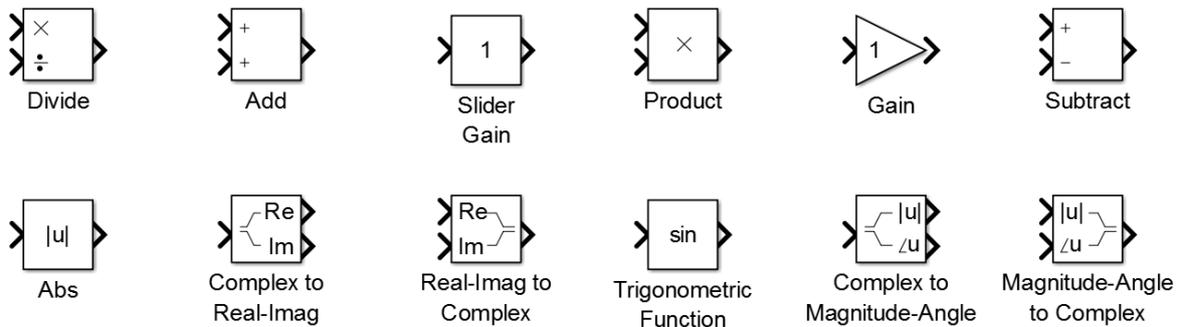
### Von Sources



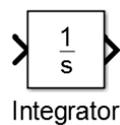
### Von Sinks



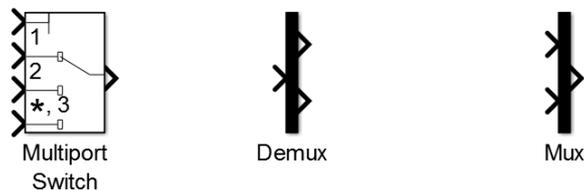
### Von Math Operations



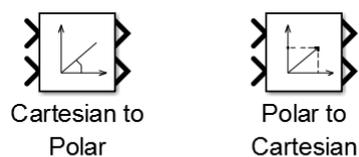
### Von Continuous



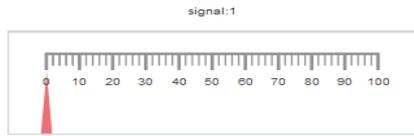
### Von Signal Routing



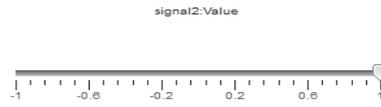
### Von Simulink Extras → Transformations



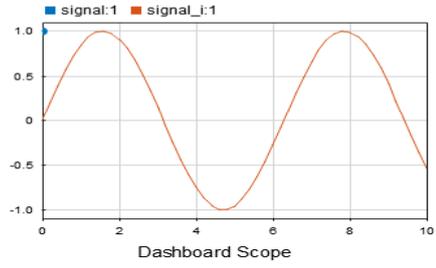
### Von Dashboard



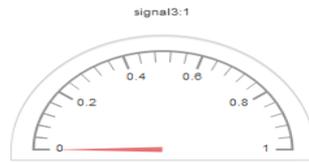
Linear Gauge



Slider



Dashboard Scope



Half Gauge

## Literaturverzeichnis

- [1] Y. Z. N. K. B. Lang, Introduction in Power Conversion and Control of Wind Energy Systems, Hoboken, NJ, USA: John Wiley Sons, 2011.
- [2] K. J. K. K. Koutnik J., Pump-Storage adjustable speed -simulative comparison of differ das Drehmoment ent variants, Sacramento, California, USA: HydroVision Conference, July 14-18, 2008.
- [3] A. Binder, Elektrische Maschinen und Antriebe - Grundlagen, Betriebsverhalten, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.
- [4] M. Schrödl, Elektrische Antriebe, Vorlesungsskript, Institut für Elektrische Antriebe und Maschinen, TU Wien, 370.027, 2013.
- [5] M. Schrödl, Maschinen und Antriebe, Vorlesungsskriptum, Institut für Elektrische Antriebe und Maschinen, TU Wien, 370.015, 2013.
- [6] P. K. Kovacs, Transiente Vorgänge in Wechselstrommaschinen, Budapest: Akademiai Kiado, 1959.
- [7] T. Wohlbank, Simulation elektrischer Antriebe, Vorlesungsskript, Institut für Elektrische Antriebe und Maschinen, TU Wien, 372.023, 2009.