



TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN  
VIENNA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## DIPLOMARBEIT

### **Regelung und Erkennung von Asymmetrien einer doppeltgespeisten Asynchronmaschine**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades  
eines Diplom-Ingenieurs unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas M. Wolbank

E370

Institut für Elektrische Energiesysteme und Elektrische Antriebe

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnologie  
von

Kenan Pasanbegovic, BSc.

Matrikelnummer: 0226902

Erlachplatz 5/309  
1100 Wien  
November 2013

## DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte Ich mich bei allen jenen bedanken die mir während des Studiums zur Seite gestanden sind.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Ao.Univ.Prof.Dipl.-Ing.Dr.tech Thomas Wolbank und Herrn Dipl.-Ing. Goran Stojcic für die hervorragende Betreuung meiner Diplomarbeit und ihre Bereitschaft bei Fragen und Unklarheiten immer zur Verfügung zu stehen.

Ich danke speziell meinen Eltern und Familie für die Motivation, den Rückhalt, das Verständnis und die Unterstützung während des gesamten Studiums.

Ein großer Dank geht schließlich an meine Freunde die für mich immer ein offenes Ohr gehabt haben und für mich in jeder Situation da waren.

## KURZFASSUNG

Bei wachsender Nachfrage nach neuen und erneuerbaren Energiequellen kommt es zum großen Einsatz von umrichter-gespeisten Asynchronmaschinen zur Stromerzeugung und zur dezentralisierten Stromversorgung im Inselbetrieb. Zur Stabilisierung des Netzes ist eine Regelung auf eine konstante Spannung und Frequenz notwendig. In dieser Hinsicht wird bei Windkraftanlagen als drehzahlvariabler Generator eine doppeltgespeiste Asynchronmaschine verwendet. Eine Simulation dieser Regelung und ihre Durchführung am Prüfstand für unterschiedliche Belastungen werden in dieser Arbeit präsentiert. Die Regelung erfolgt mittels einer kaskadierten Regelung mit Proportional/Integral Reglern. Die Referenzgröße der äußeren Regelung ist die Statorspannung mit konstantem Betrag und konstanter Frequenz. Die innere Regelung ist die Rotorstromregelung. Der Umrichter erzeugt die Rotorspannung welche die Spannung und Frequenz auf die gewünschten Werte einstellt.

Im zweiten Teil wird die Asymmetridetektion am Generator durchgeführt. Die eingesetzte Methode beruht auf dem INFORM („Indirekte Flusserfassung durch Online ReaktanzMessung“ / „Indirect Flux detection by Online Reactance Measurement“) Verfahren, durch welche die Änderung an der transienten Induktivität betrachtet wird. Die Asymmetrie der Maschine wird durch die Änderung der transienten Induktivität erfasst. Jede Änderung in der Maschine führt zu einer Asymmetrie. Diese Asymmetrien werden durch die Bildung eines sogenannten Stromänderungsraumzeigers, mit Messung der Stromantworten auf Rotorspannungspulse für verschiedene Rotorpositionen, erfasst. Die Lastvariationen manifestieren sich bei den Stromantworten der Phasen und somit auch bei dem Stromänderungsraumzeiger, die entsprechend zur Analyse herangezogen werden.

## ABSTRACT

An increasing demand for renewable energy sources results in an increased usage of inverter fed induction motors as wind turbine application for power generation with the direct connection of the stator to the grid or for an operation in an isolated grid. In order to achieve a stable power grid it is necessary to maintain a constant voltage and frequency at generator output using control theory. The doubly-fed induction generator is well suited for variable speed power generation. In a first step, the machine control was simulated in MATLAB/Simulink, afterwards it was implemented on a test stand including the test machine, inverter and auxiliary equipment. The machine control is realized through a cascade control scheme using PI-controllers for each loop. The outer loop controls the primary physical parameter (stator voltage by magnitude and frequency). The inner loop reference value is provided by the outer loop. The inner loop task is the rotor current control.

The second part of the thesis deals with the asymmetry detection in the generator. The applied method is based on the INFORM method (INdirect Flux detection by Online Reactance Measurement). This method is based on the detection of machine's transient reluctance changes. Every change of the machine configuration leads to an asymmetrical state. The asymmetries in the machine are detected due to change of a transient reluctance. Short voltage pulses applied to the rotor terminals for different rotor positions induce a current response containing the information on machine's transient behavior and state. By special signal processing chain an asymmetry indicator can be obtained for rotor and stator asymmetry detection.

# NOMENKLATUR

## Abkürzungen

ADC	Analog Digital Converter
ASM	Asynchronmaschine
DASM	Doppeltgespeiste Asynchronmaschine
GSM	Gleichstrommaschine
FPGA	Field Programmable Gate Array
IGBT	Insulate Gate Bipolar Transistor
INFORM	<u>IN</u> direkte <u>F</u> lusserfassung durch <u>O</u> nline <u>R</u> eaktanz <u>M</u> essung
KOS	Koordinatensystem
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench
PCI	Peripheral Component Interconnect
PI-Regler	Proportional Integral Regler
PWM	Pulse Width Modulation

## Formelzeichen

$I, i$	Strom, normierter Strom
--------	-------------------------

$U, u$	Spannung, normierte Spannung
$R, r$	Widerstand, normierter Widerstand
$X, x$	Reaktanz, normierte Reaktanz
$L, l$	Induktivität, normierte Induktivität
$y$	Normierte Admittanz
$\Omega, \omega$	Winkelgeschwindigkeit, normierte Winkelgeschwindigkeit
$f$	Frequenz
$t, \tau$	Zeit, normierte Zeit
$m$	Normiertes Drehmoment
$p$	Polpaarzahl
$a$	$e^{j\frac{2\pi}{3}}$
$j$	Imaginäre Einheit
$s$	Laplace Variable
$\sigma$	Streufaktor
$\xi$	Allgemeiner Raumzeiger
$\Phi$	Magnetischer Fluss
$\Psi, \psi$	Flussverkettung, normierte Flussverkettung
$\gamma$	Winkel
$\underline{c}$	Raumzeiger zur Fehler- und Asymmetriererkennung

$V$  Magnetische Spannung

### Indizes

$\alpha, \beta$  statorfestes Koordinatensystem

$d, q$  rotorfestes Koordinatensystem

$k, j$  statorsollspannungsfestes Koordinatensystem

$R$  Rotor

$S$  Stator

$N$  Nennwert

BEZUG Bezugsgröße

ges gesamt

$u, v, w$  Phase U, V, W

$t, \tau$  Zeit, normierte Zeit

*soll* Sollwert

*ist* Istwert

*Str* Stranggröße

$m$  Mechanisch

$el$  Elektrisch

$\sigma$  Streufaktor

<i>K</i>	Allgemeines Koordinatensystem
<i>KOS</i>	Koordinatensystem
<i>I – VI</i>	Schaltzustände
<i>ZK</i>	Zwischenkreisspannung
<i>sec</i>	Sekunde
<i>s</i>	Schlupf

# INHALTVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG .....	1
2	GRUNDLAGEN DER ASYNCHRONMASCHINE .....	3
2.1	Normierung .....	3
2.2	Raumzeiger .....	5
2.2.1	Definition des Raumzeigers .....	6
2.3	Koordinatensysteme .....	13
2.4	Theorie zur Asynchronmaschine .....	15
2.4.1	Aufbau und Funktionsweise .....	15
2.5	Mathematische Beschreibung der ASM .....	18
3	SIMULATIONSMODELL DER REGELUNG .....	22
3.1	DASM-Maschinenmodell .....	23
3.2	Das Kaskadenregler-Modell .....	25
3.3	Modell der Statorsollspannungsvorgabe .....	28
3.4	KOS-Umwandlungs-Modell .....	28
3.5	Die Simulationen .....	29
3.5.1	Simulation 1 .....	29
3.5.2	Simulation 2 .....	32
3.5.3	Simulation 3 .....	34
3.5.4	Simulation 4 .....	35
4	PRÜFSTAND .....	37
4.1	Hardware .....	37

4.1.1	Maschine und Inkrementalgeber .....	37
4.1.2	dSpace-Controller .....	38
4.1.3	Umrichter und Sensoren .....	38
4.1.4	FPGA .....	38
4.1.5	Gleichstrommaschine und Gleichstromsteller .....	39
4.1.6	Schnittstellenprint .....	39
4.2	Software .....	39
4.2.1	Matlab/Simulink .....	39
4.2.2	LabView .....	40
4.2.3	dSpace-ControlDesk Software .....	40
5	DIE REGELUNG AM PRÜFSTAND .....	41
5.1	Messung 1 .....	41
5.2	Messung 2 .....	44
5.3	Messung 3 .....	46
6	THEORIE ZUR FEHLERERKENNUNG .....	48
6.1	Theorie zur Messung der transienten Reaktanz .....	49
6.2	Praktische Umsetzung der Messmethode .....	55
7	DETEKTION VON ASYMMETRIEN .....	64
7.1	Messergebnisse .....	65
7.1.1	Symmetrischer Fall .....	65
7.1.2	Asymmetrie in Statorphase U .....	66
7.1.3	Widerstand zwischen den Phasen U und V .....	68
7.1.4	Abgeklemmte Phase .....	72

7.1.5	Zusatzinduktivität an den Phasen .....	73
8	ZUSAMMENFASSUNG .....	75
9	QUELLENVERZEICHNIS .....	76
10	ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....	78
11	TABELLENVERZEICHNIS .....	82
	ANHANG A .....	83
	ANHANG B .....	84
	ANHANG C .....	85
	ANHANG D .....	86

# 1 EINLEITUNG

Die stetig wachsende Nachfrage nach Energie führt unter anderem zu einem großen Zuwachs im Bereich der erneuerbaren Energiequellen, darunter auch Windkraftenergie. Der Grund dafür ist das Bestreben, die Abhängigkeit von unsauberer Energiegewinnung zu reduzieren und erneuerbare CO<sub>2</sub>-neutrale Energiequellen zu erschließen. Aus diesem Anlass ist die Verwendung der doppeltgespeisten Asynchronmaschine (DASM) bei Windkraftanlagen besonders Interessant geworden, obwohl ihre Funktionalitätsweise schon längst bekannt ist.

Es gibt zwei Betriebsarten von Asynchrongeneratoren, mit konstanter und variabler Drehzahl. Bei ersterem sind die Generatoranschlüsse direkt mit dem Netz verbunden, womit ihre Drehzahl nicht mehr als 2% variiert. Windschwankungen führen bei dieser Generatorart zur Momentoszillationen wobei die Rotordrehzahl ungefähr gleich bleibt. Das führt zu einer erheblichen mechanischen Belastung der ASM und zu einer rippelförmigen Leistungsabgabe an den Statoranschlüssen, was im Netz Störungen zur Folge hat.

Da die Windschwankungen unvermeidlich sind, ist es nötig die DASM mit variabler Rotordrehzahl in diesem Fall einzusetzen. Das wird durch die Regelung des Rotorstromes mittels Umrichter ermöglicht. Die Regelung der Spannung und Frequenz auf einen konstanten Wert ermöglicht den Anschluss an das Netz ohne negative Beeinflussung. Durch den Umrichter wird über die Rotorwicklungsanschlüsse der Rotorstrom eingepreßt, welcher das Rotorfeld erzeugt. Dieses Feld bewegt sich in der Richtung der Rotor wenn sich der Rotor langsamer dreht (untersynchroner Betrieb) oder in der Gegenrichtung bei schneller Rotordrehung (übersynchroner Betrieb).

Ein weiterer Vorteil ist die Verringerung von Leistungsschwankungen durch das regelbare Rotordrehfeld, womit der Leistungsfaktor der DASM eingestellt wird. In dieser Arbeit wird eine Möglichkeit der rotorseitigen Regelung auf eine konstante Statorspannung und Frequenz der DASM bei Inselbetrieb vorgestellt. Der Inselbetrieb ist durch eine vom Netz entkoppelte Energieversorgung charakterisiert. Die Energie zur Versorgung des Zwischenkreises und der Elektronik des in der Arbeit verwendeten Prüfstands wird durch ein Batteriesystem im Labor zur Verfügung gestellt. Dadurch wird der Inselbetrieb der Maschine simuliert.

Die vom Umrichter gespeisten Asynchronmaschinen finden in verschiedenen Industriegebieten ihre Verwendung. Für einen sicheren und verlässlichen Betrieb ist das Detektieren von Fehlern notwendig, um eine Funktionalitätsreduktion oder sogar den kompletten Ausfall des Antriebes zu vermeiden. Die häufigsten Fehlerarten bei elektrischen Maschinen sind Rotor-, Stator- und Exzentrizitätsfehler (Lagerfehler). In der Literatur gibt es eine Vielzahl von Methoden zur Fehlererkennung [24]. In der vorliegenden Arbeit wird zur Fehlererkennung eine Methode verwendet die auf dem INFORM Verfahren basiert. Sie beruht auf der Untersuchung der transienten Reaktanz nach Asymmetrien. Eine durch einen Fehler verursachte Asymmetrie resultiert in der Änderung der transienten Induktivität. Dieser Parameter kann aus der Stromantwort auf kurze Spannungspulse, an den Rotoranschlüssen, bestimmt werden. Der Vorteil dieser Methode ist, dass für die Spannungspulserzeugung und die Strommessung benötigte Hardware durch den Umrichter und dessen Sensoren schon vorhanden ist und folglich der Einsatz von zusätzlichem Equipment erspart bleibt. Bei den hier vorgestellten Versuchen wird die Symmetrie der Maschine durch zusätzliche Induktivitäten und Widerstände verändert. Diese Veränderung beeinflusst den symmetrischen Charakter der Anordnung, worauf durch die Strommessung auf die entstandenen Asymmetrien eingegangen wird.

Um die Regelung und die Fehlerdetektion in dieser Arbeit nachvollziehen zu können, ist eine detaillierte Einsicht in den Aufbau und die Funktionsweise der ASM erforderlich. Die theoretischen Grundlagen und das entsprechende mathematischen Grundgerüst (Raumzeiger und Koordinatensysteme) mit der Normierung befinden sich in Kapitel 2. Die Simulation der Regelung mit MATLAB/Simulink für verschiedene Betriebszustände ist in Kapitel 3 gezeigt. Das Kapitel 4 befasst den praktischen Teil am Prüfstand mit der eingesetzten Hard- und Software. Die Resultate der direkten Regelung am Prüfstand sind in Kapitel 5. Kapitel 6 bietet eine detaillierte theoretische Beschreibung der angewendeten Methode zur Fehlererkennung. Das letzte Kapitel 7 fasst die Resultate der Fehlerdetektion direkt an der Versuchsmaschine zusammen.

## 2 GRUNDLAGEN DER ASYNCHRONMASCHINE

In diesem Kapitel werden die Grundlagen der Asynchronmaschine (ASM) vorgestellt. Dabei werden die Funktionsweise der Maschine sowie das mathematische Grundgerüst zur Beschreibung der Maschine erläutert. Vorgestellt werden die Normierung der Größen, die Raumzeigerrechnung, Funktionsweise der ASM und ihre mathematische Beschreibung.

### 2.1 Normierung

Die physikalischen Größen werden hauptsächlich in dimensionsbehafteter Form dargestellt. Eine andere Möglichkeit ist es die Größen zu normieren. Durch die Normierung werden die dimensionsbehafteten Größen auf einen Referenzwert bezogen. Der Referenzwert muss dabei dieselbe physikalische Einheit haben wie die dimensionsbehaftete Größe. Die normierten Größen haben dann die Dimension 1. Dadurch wird gewährleistet, dass die normierten Größen sich in einem kleineren Bereich bewegen, womit die Anschaulichkeit erhöht wird, sowie ein besserer Vergleich unter verschiedenen Maschinengrößen möglich wird. Die Referenzgröße kann beliebig gewählt werden. Bei Drehfeldmaschinen werden einige Größen (wie z.B. Spitzenwerte der Stranggrößen für Strom und Spannung) konventionell als Referenzwerte gewählt. Die restlichen Bezugsgrößen werden von diesen abgebildet.

Zuerst sind die Strom- und Spannungswerte auf Spitzenwerte der Stranggrößen bezogen:

$$i(t) = \frac{I(t)}{I_{\text{BEZUG}}} \quad (2.1)$$

$$u(t) = \frac{U(t)}{U_{\text{BEZUG}}} \quad (2.2)$$

wobei gilt:

$$U_{\text{BEZUG}} = \sqrt{2} \cdot U_{\text{N,Str}} , I_{\text{BEZUG}} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{N,Str}} \quad (2.3)$$

Der bezogene Drehwinkel in Radiant ist dem physikalischen Winkel gleich:

$$\gamma_{\text{BEZUG}} = 1(\text{rad}) \quad (2.4)$$

Daraus folgt:

$$\gamma = \gamma_{\text{BEZUG}} \quad (2.5)$$

Aus der Bezugswinkelgeschwindigkeit:

$$\Omega_{\text{BEZUG}} = 2 \cdot \pi \cdot f_N \quad (2.6)$$

mit  $f_N = 50$  Hz ergibt sich die bezogene Winkelgeschwindigkeit:

$$\omega = \frac{\Omega}{\Omega_{\text{BEZUG}}} \quad (2.7)$$

Bei mehrpoligen Drehstrommaschinen ist die elektrische und mechanische Bezugswinkelgeschwindigkeit um den Faktor Polpaarzahl  $p$  verschieden zu wählen, damit die bezogenen Werte der elektrischen und mechanischen Winkelgeschwindigkeiten im Prinzip den gleichen Wert haben [1]. Damit können die elektrische und mechanische Bezugswinkelgeschwindigkeit angegeben werden als:

$$\Omega_{\text{BEZUG,el}} = 2 \cdot \pi \cdot f_N, \Omega_{\text{BEZUG,m}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_N}{p} \quad (2.8)$$

mit der Nennfrequenz  $f_N = 50$  Hz.

Die bezogene Zeit berechnet sich aus:

$$t_{\text{BEZUG}} = \frac{\gamma_{\text{BEZUG}}}{\Omega_{\text{BEZUG}}} = \frac{1}{\Omega_{\text{BEZUG}}} \quad (2.9)$$

woraus die normierte Zeit folgt als:

$$\tau = \frac{t}{t_{\text{BEZUG}}} = \Omega_{\text{BEZUG}} \cdot t \quad (2.10)$$

Aus dem physikalischen Zusammenhang von Fluss und Spannung folgt für den bezogenen Fluss nach Gleichung (2.3) und (2.9):

$$\Psi_{\text{BEZUG}} = U_{\text{BEZUG}} \cdot t_{\text{BEZUG}} \quad (2.11)$$

Damit wird:

$$\psi = \frac{\Psi}{\Psi_{\text{BEZUG}}} = \frac{\Psi \cdot \Omega_{\text{BEZUG}}}{\sqrt{2} \cdot U_{\text{N,Str}}} \quad (2.12)$$

Aus dem Bezugswert für Widerstände und Impedanzen:

$$R_{\text{BEZUG}} = X_{\text{BEZUG}} = \frac{U_{\text{BEZUG}}}{I_{\text{BEZUG}}} \quad (2.13)$$

gilt:

$$r = \frac{R \cdot I_{\text{BEZUG}}}{U_{\text{BEZUG}}} \quad (2.14)$$

$$x = \frac{X \cdot I_{\text{BEZUG}}}{U_{\text{BEZUG}}} \quad (2.15)$$

Unter der Berücksichtigung von

$$\Omega_{\text{BEZUG}} \cdot L_{\text{BEZUG}} = X_{\text{BEZUG}} \quad (2.16)$$

werden Induktivitäten normiert zu:

$$l = \frac{L \cdot \Omega_{\text{BEZUG}} \cdot I_{\text{BEZUG}}}{U_{\text{BEZUG}}} \quad (2.17)$$

## 2.2 Raumzeiger

Der Raumzeiger wird verwendet um die räumlich sinusförmigen Verläufe der elektrischen und magnetischen Größen in elektrischen Maschinen zu beschreiben [1]. Die elektromagnetischen Größen sind in elektrischen Maschinen räumlich sinusförmig verteilt [5]. Diese physikalischen und räumlichen verteilten Größen sind genauso wie zeitlich verteilte Größen durch Differentialgleichungen beschreibbar. Analog zur Zeitzeigerdarstellung wird zur Beschreibung der räumlichen Verläufe ein Raumzeiger eingeführt. Dadurch wird ein Differentialgleichungssystem durch ein algebraisches komplexes Gleichungssystem ersetzt, wodurch die mathematische Behandlung wesentlich vereinfacht wird. Der Raumzeiger wird

in einer komplexen Ebene dargestellt, die in den Maschinenquerschnitt gelegt wird. Dabei werden die dreiphasigen Stator- und Rotorsysteme in ein äquivalentes zweiphasiges kartesisches System umgewandelt (Abbildung 2.1). Der Raumzeiger zeigt in die Richtung des Maximalwertes der entsprechenden cosinusförmig-verlaufenden räumlichen Größe. Er wird aus den Augenblickswerten der Stranggrößen errechnet. Durch Raumzeigerdarstellung können beliebige zeitliche Verläufe beschrieben werden. Falls die elektromagnetischen Größen nicht sinusförmig sind, dann wird durch den Raumzeiger nur die Grundwelle erfasst.

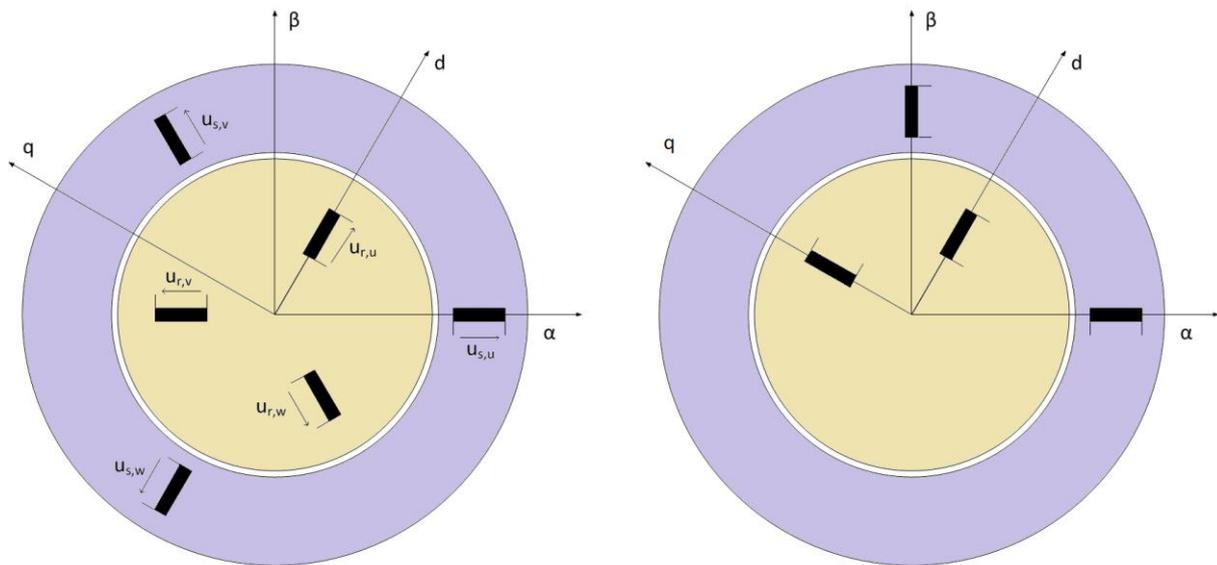


Abbildung 2.1: Die Umwandlung der dreiphasigen Stator- und Rotorsysteme (links) in ein äquivalentes zweiphasiges kartesisches System (rechts)

Um die Raumzeigerdarstellung benutzen zu können, sind bestimmte Idealisierungen zu berücksichtigen:

- Die elektromagnetischen Größen müssen räumlich sinusförmig verteilt sein. Ist das für Strombeläge und magnetische Flussdichte im Luftspalt nicht zutreffend wird, wie schon erwähnt, nur die Grundwelle betrachtet, unter der Voraussetzung dass die Oberwelleneffekte vernachlässigt werden.
- Der Magnetkreis ist rotationssymmetrisch aufgebaut wodurch konstante Induktivitäten am Umfang angenommen werden.
- Hystereseffekte, Wirbelströme und Stromverdrängung werden vernachlässigt.

### 2.2.1 Definition des Raumzeigers

Um den Raumzeiger anschaulich darstellen zu können, wird die magnetische Spannung  $V$  auf einer einpolpaarigen Maschine dargestellt. Somit stellt er eine physikalisch anschauliche

Größe dar. Dasselbe Konzept der Raumzeiger wird später auf alle relevanten Maschinengrößen angewendet.

Die folgende Darstellung geht auf KOVAC und RACZ aus dem Jahr 1959 zurück. Es wird angenommen dass kein Nullstrom (Nulleiterstrom) vorhanden ist.

Jede der einzelnen Stromwicklungen erzeugt eine sinusförmige magnetische Spannungsverteilung im Luftspalt. Die Überlagerung der einzelnen magnetischen Spannungsverteilungen ergibt wieder eine sinusförmige magnetische Gesamtspannungsverteilung  $V_{ges}$  im Luftspalt. Diese räumliche Gesamtspannungsverteilung wird durch einen komplexen Raumzeiger mit Amplitude und Phase repräsentiert. Nehmen wir an, dass im Luftspalt eine magnetische Spannungsverteilung mit einzelnen magnetischen Spannungen und der überlagerten magnetischen Gesamtspannungsverteilung wie in Abbildung 2.2 vorherrscht. Der Zeitfaktor ist dabei auch mitberücksichtigt, weil die magnetische Spannung proportional dem zeitlich veränderlichen Strom in den Statorachsen ist:

$$V_u(t) = \hat{V} \cdot \cos(\Omega t) \quad (2.18)$$

$$V_v(t) = \hat{V} \cdot \cos\left(\Omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.19)$$

$$V_w(t) = \hat{V} \cdot \cos\left(\Omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (2.20)$$

Die Summe dieser sinusförmigen Größen ergibt Null:

$$V_u(t) + V_v(t) + V_w(t) = 0 \quad (2.21)$$

Die räumliche Amplitude der durch die einzelnen Wicklungen erzeugten magnetischen Spannung am Maschinenumfang ist:

$$V_u(t, \alpha) = V_u(t) \cdot \cos(\alpha) = \operatorname{Re}\{V_u(t) \cdot e^{j\alpha}\} \quad (2.22)$$

$$V_v(t, \alpha) = V_v(t) \cdot \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) = \operatorname{Re}\{V_v(t) \cdot e^{j\alpha} \cdot e^{-j\frac{2\pi}{3}}\} \quad (2.23)$$

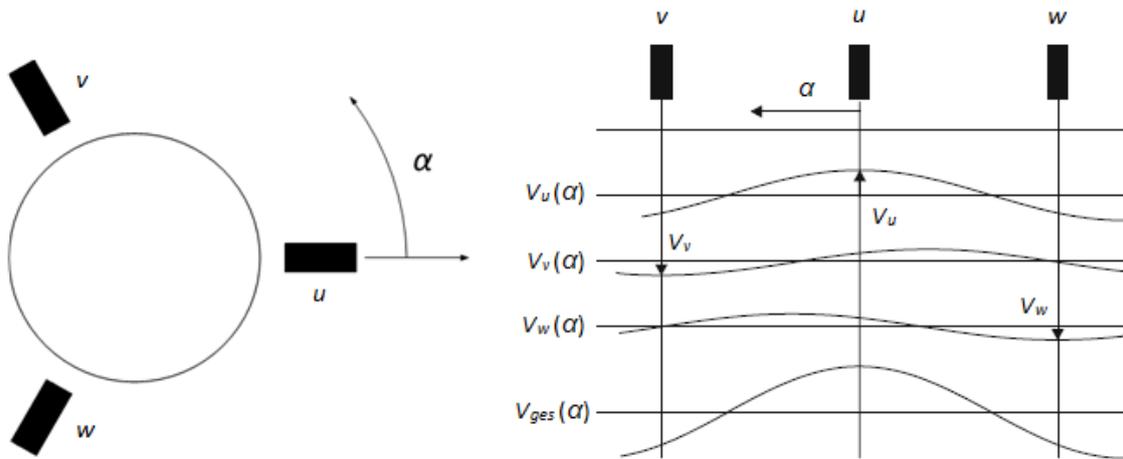


Abbildung 2.2: Die räumliche Verteilung der magnetischen Spannung im Luftspalt in Abhängigkeit vom Winkel  $\alpha$  (Momentaufnahme) [10]

$$V_w(t, \alpha) = V_w(t) \cdot \cos\left(\alpha - \frac{4\pi}{3}\right) = \operatorname{Re}\{V_w(t) \cdot e^{j\alpha} \cdot e^{-j\frac{4\pi}{3}}\} \quad (2.24)$$

Aus den Gleichungen (2.22) – (2.24) ist ersichtlich, dass die magnetische Spannung unmittelbar am Pol gleich der Amplitude des Momentanwertes an der Strangachse ist und nimmt entlang des Maschinenumfangs mit dem Abstand vom Pol ab. Die Summe aller einzelnen magnetischen Spannungen ergibt die magnetische Gesamtspannungsverteilung entlang des Umfangs als Funktion vom Umfangswinkel  $\alpha$ :

$$\begin{aligned} V_{\text{ges}}(t, \alpha) &= V_u(t, \alpha) + V_v(t, \alpha) + V_w(t, \alpha) \\ &= V_u(t) \cdot \cos(\alpha) + V_v(t) \cdot \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) + V_w(t) \cdot \cos\left(\alpha - \frac{4\pi}{3}\right) \\ &= \operatorname{Re}\{(V_u(t) + V_v(t) \cdot e^{-j\frac{2\pi}{3}} + V_w(t) \cdot e^{-j\frac{4\pi}{3}}) \cdot e^{j\alpha}\} \end{aligned} \quad (2.25)$$

Der Raumzeiger ist damit wie folgt definiert:

$$\underline{V} = \frac{2}{3} \cdot (V_u + V_v \cdot \underline{a} + V_w \cdot \underline{a}^2) \quad (2.26)$$

mit den komplexen Variable  $\underline{a}$ :

$$\underline{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (2.27)$$

$$\underline{a}^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (2.28)$$

wobei  $V_u, V_v$  und  $V_w$  die zeitabhängigen magnetischen Spannungswerte aus den Gleichungen (2.18) bis (2.20) sind.

Mit den obigen Gleichungen ergibt sich der Raumzeiger zu:

$$\underline{V} = \frac{2}{3} \cdot \hat{V} \cdot \left( \cos(\Omega t) + \cos\left(\Omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}} + \cos\left(\Omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \cdot e^{j\frac{4\pi}{3}} \right) \quad (2.29)$$

Der Zusammenhang zwischen  $V_{ges}$  und  $V$  ist somit:

$$V_{ges}(t, \alpha) = Re\left\{ \frac{3}{2} \cdot \underline{V} \cdot e^{j\alpha} \right\} \quad (2.30)$$

Die räumlichen Verteilungen der magnetischen Spannungen haben ihren Maximalwert unmittelbar unter dem jeweiligen Strang ( $V_u(t, 0), V_v\left(t, \frac{2\pi}{3}\right), V_w\left(t, \frac{4\pi}{3}\right)$ ). Diese Größen treten dann in der Formel für den Raumzeiger ein. Die komplexen Variablen  $\underline{a}$  und  $\underline{a}^2$  dienen zur Zerlegung der Maximalwerte der magnetischen Spannungen vom  $u, v, w$  - zum  $\alpha\beta$ -Koordinatensystem. Die Tatsache, dass diese Koordinatentransformation nur für Maximalwerte der magnetischen Spannungen stattfindet entspricht der Annahme, dass der Raumzeiger (nun in  $\alpha\beta$ -KOS) in Richtung der maximalen Gesamtspannungsverteilung  $V_{ges}$  zeigt.

Die jeweilige Richtung der Phasen  $u, v$  und  $w$  wird durch den Strom in den entsprechenden Wicklungen wie in Abbildung 2.3 gezeigt ermittelt. Die  $u-, v-, w$ - Richtungen zeigen in die Richtung des Flusses, welche die entsprechenden Wicklungen verursachen.

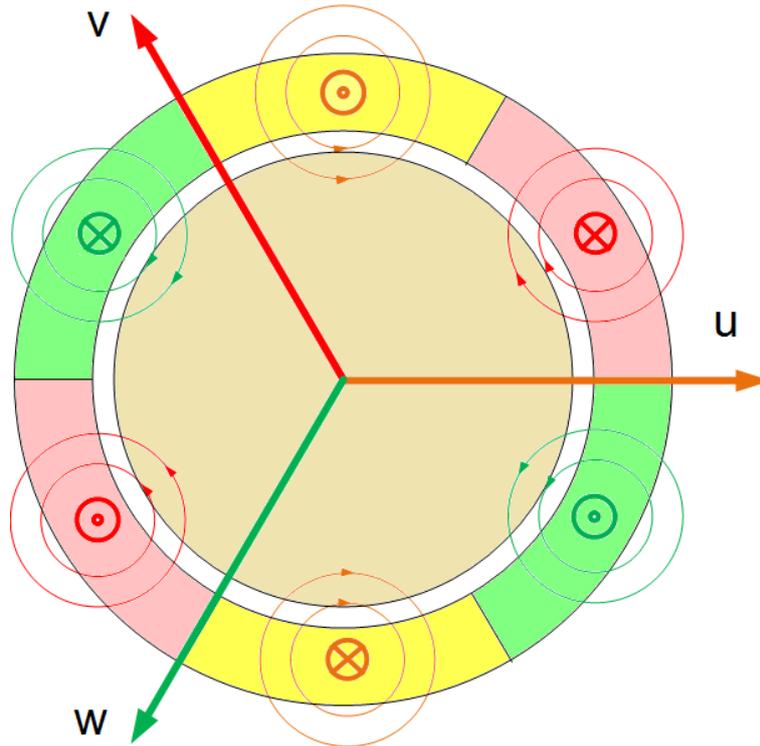


Abbildung 2.3: Die Bestimmung der  $u$ -,  $v$ - und  $w$ -Richtungen durch den Strom in den entsprechenden Phasen ( $u$ -Wicklungen (gelb);  $v$ -Wicklungen (rot),  $w$ -Wicklungen (grün))

Die Umwandlung in das  $\alpha\beta$ -Koordinatensystem ist in Abbildung 2.4 graphisch gezeigt. Die  $u$ -Achse und  $\alpha$ -Achse zeigen in dieselbe Richtung.

Die  $\alpha$ -Komponente der magnetischen Spannung  $V_\alpha$  lautet:

$$V_\alpha = k \cdot (V_u + V_v \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) + V_w \cdot \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right)) \quad (2.31)$$

Das entspricht der Projektion von  $V_u, V_v, V_w$  (die jeweils in  $u$ -,  $v$ -,  $w$ -Richtung zeigen) auf die  $\alpha$ -Achse des  $\alpha\beta$ -Koordinatensystems. Analoges gilt für  $V_\beta$  für die Projektionen auf die  $\beta$ -Achse:

$$V_\beta = k \cdot (V_v \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) + V_w \cdot \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right)) \quad (2.32)$$

In komplexer Schreibweise folgt nach kurzer Umrechnung:

$$\underline{V} = V_\alpha + jV_\beta = k \cdot (V_u + V_v \cdot \underline{a} + V_w \cdot \underline{a}^2) \quad (2.33)$$

mit  $\beta$ -Achse als imaginäre Achse. Der Faktor  $k$  ist nach Definition  $\frac{2}{3}$ .

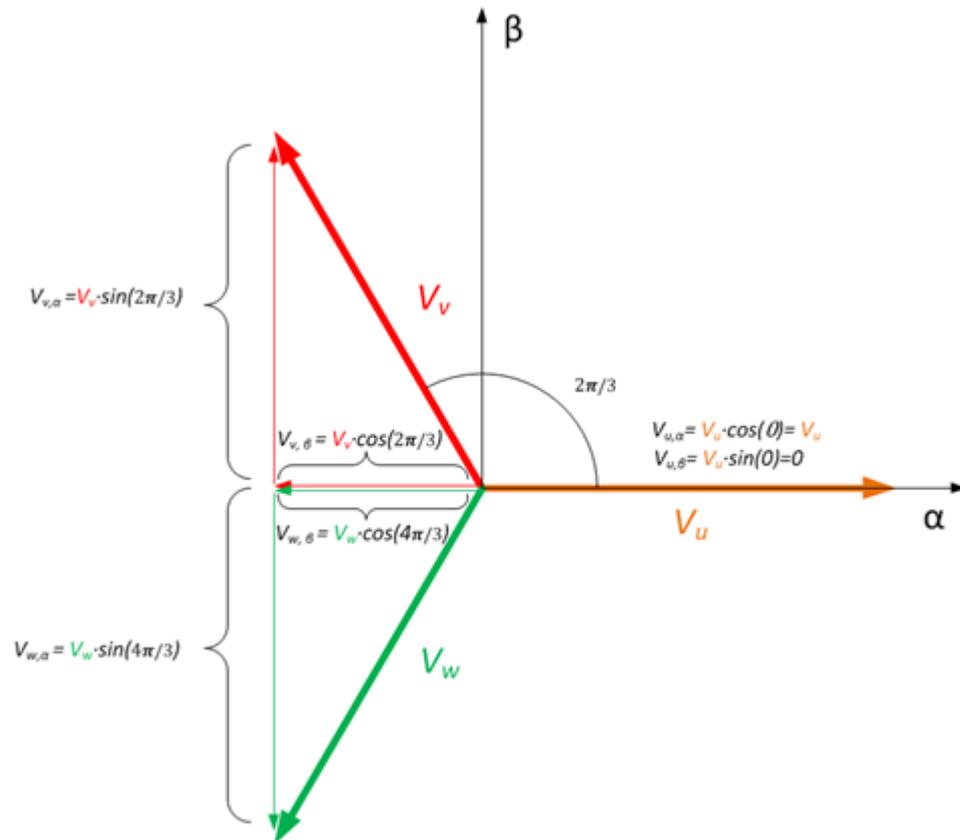


Abbildung 2.4: Bildung des Raumzeigers durch die Abbildung der räumlichen sinusförmigen Größen in der komplexen Ebene

Der Faktor  $\frac{2}{3}$  ermöglicht, dass die Amplitude des Raumzeigers identisch mit der Amplitude der Phasengrößen ist.

Der Raumzeiger lautet dann:

$$\underline{V} = \frac{2}{3} \cdot \left( \frac{3}{2} \cdot \hat{V} \cdot e^{j\omega t} \right) = \hat{V} \cdot e^{j\omega t} \quad (2.34)$$

Der Stromraumzeiger für dreiphasige Drehstromsysteme mit  $N=3$  ergibt sich speziell zu:

$$\underline{i} = \frac{2}{3} \cdot (i_u + \underline{a} \cdot i_v + \underline{a}^2 \cdot i_w) \quad (2.35)$$

Ein allgemeiner Stromraumzeiger für  $n$ -strängige Maschinen lautet:

$$\underline{i} = \frac{2}{n} \cdot \sum_{k=1}^n i_k \cdot e^{\frac{2\pi}{n}(k-1)} \quad (2.36)$$

Die Raumzeiger der magnetischen Spannung, der magnetischen Flussdichte und des Stromes stellen physikalisch anschauliche Größen dar. Auf dieselbe Art und Weise werden

die Raumzeiger für Spannung und Flussverketzung formal definiert, wobei sie nicht mehr physikalisch interpretiert werden können:

$$\underline{u} = \frac{2}{3} \cdot (u_u + \underline{a} \cdot u_v + \underline{a}^2 \cdot u_w) \quad (2.37)$$

$$\underline{\psi} = \frac{2}{3} \cdot (\psi_u + \underline{a} \cdot \psi_v + \underline{a}^2 \cdot \psi_w) \quad (2.38)$$

Alle diese Größen können nun für n-strängige Maschinen nach Gleichung (2.36) erweitert werden.

Um wieder von der Raumzeigerdarstellung auf die Stranggrößen zu gelangen, wird der betrachtete Raumzeiger auf den entsprechenden Strang projiziert. Die reelle Achse eines beliebigen Koordinatensystems wird in die Richtung der Strangachse k gelegt. Danach wird der Raumzeiger auf diese Achse projiziert, was dem Realteil des Raumzeigers entspricht.

$$\xi_k = \operatorname{Re} \{ \underline{\xi} \cdot e^{-j\gamma} \} = \operatorname{Re} \{ \underline{\xi} \cdot e^{j(\delta+\gamma)} \cdot e^{-j\gamma} \} = \operatorname{Re} \{ |\underline{\xi}| \cdot e^{j\delta} \} = |\underline{\xi}| \cdot \cos(\delta) \quad (2.39)$$

Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 2.5 veranschaulicht.

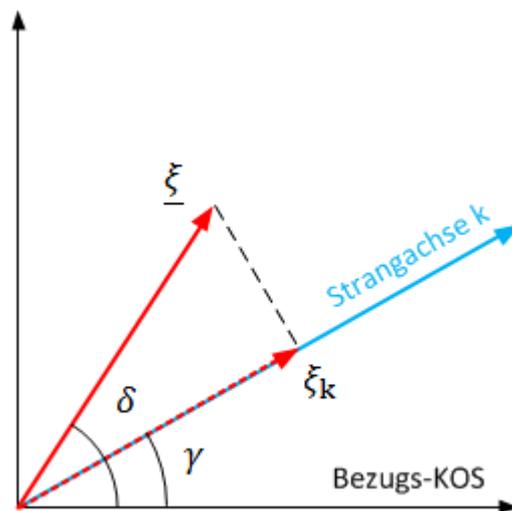


Abbildung 2.5: Bildung der Strangwerte aus den Raumzeigern

Bei der Raumzeigerrechnung kommen verschiedene KOS bei den Maschinen vor. Daher ist eine Umwandlung zwischen den verschiedenen Koordinatensystemen notwendig.

Aus Abbildung 2.6 folgt der Raumzeiger  $\underline{\xi}$  im KOS1 mit:

$$\underline{\xi}_{\text{KOS1}} = |\underline{\xi}| \cdot e^{j\alpha_1} \quad (2.40)$$

Nach der Umrechnung vom KOS1 in KOS2 ergibt sich der Raumzeiger zu:

$$\underline{\xi}_{\text{KOS2}} = |\underline{\xi}| \cdot e^{j\alpha_2} = |\underline{\xi}| \cdot e^{j(\alpha_1 - \gamma)} \quad (2.41)$$

Die graphische Darstellung des Raumzeigers und der KOS1 und KOS2 ist in Abbildung 2.6 abgebildet.

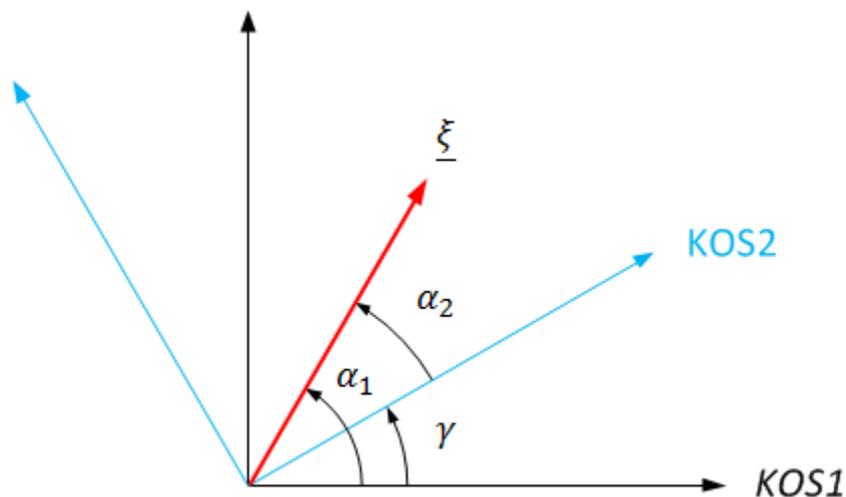


Abbildung 2.6: Umrechnung eines Raumzeigers in ein anderes Koordinatensystem

## 2.3 Koordinatensysteme

Im Rahmen dieser Diplomarbeit werden drei Koordinatensysteme angewendet:

Statorfestes Koordinatensystem ( $\alpha\beta$ -KOS): Das  $\alpha\beta$ -KOS ist fest mit dem Stator verbunden und ist somit statisch. Die  $\alpha$ -Achse zeigt in die Richtung des Stranges  $u$ . Ein Strom in der Phase  $u$  erzeugt einen Fluss in Richtung  $\alpha$  (Abbildung 2.7) womit die Lage der  $\alpha$ -Achse bestimmt ist.

Rotorfestes Koordinatensystem (dq-KOS): Das dq-KOS bewegt sich mit dem Rotor mit der Winkelgeschwindigkeit  $\Omega_m$ . Die d-Koordinate zeigt in Richtung der  $u$ -Achse der dreiphasigen Rotorwicklung (Abbildung 2.1(links)).

Statorsollspannungsfestes Koordinatensystem (kj-KOS): Die k-Achse dieses KOS zeigt in Richtung des Statorsollspannungsraumzeigers (Abbildung 2.8). Die Regelung findet in diesem KOS statt. Daher sind alle Raumzeiger auf das kj-KOS zu beziehen.

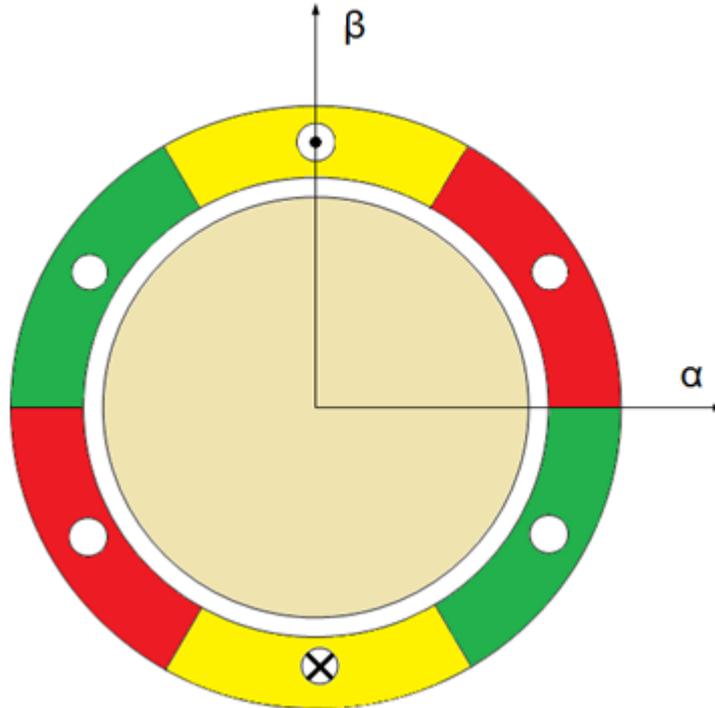


Abbildung 2.7: Bestimmung der Richtung der  $\alpha$ -Achse des statorfesten Koordinatensystems durch einen Strom in der  $u$ -Wicklung

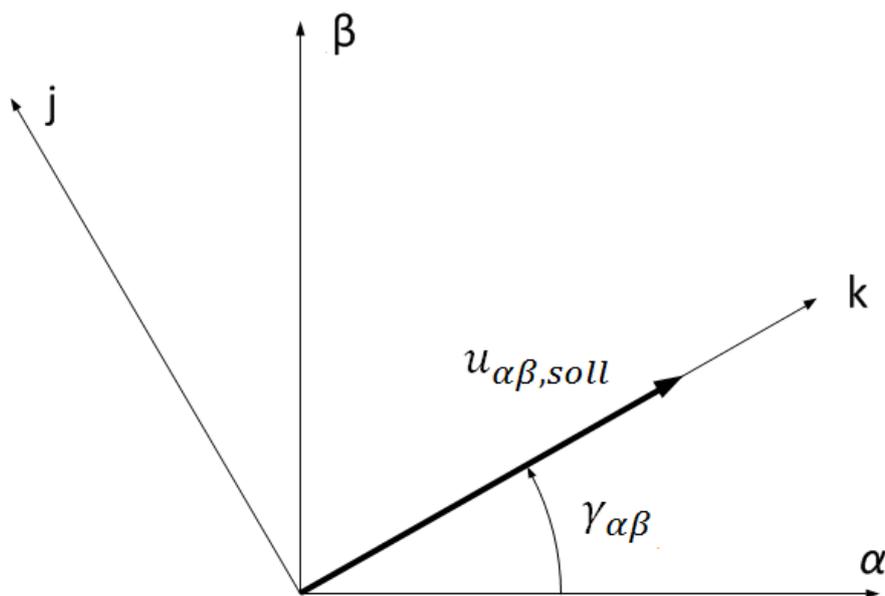


Abbildung 2.8: Statorsollspannungsfestes Koordinatensystem (kj-KOS) in Verhältnis zu Statorsollspannungsraumzeiger  $u_{\alpha\beta}$  und  $\alpha\beta$ -KOS

## 2.4 Theorie zur Asynchronmaschine

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wird die doppelgespeiste Asynchronmaschine (DASM) verwendet. Die Wirkungsweise der Asynchronmaschine (ASM) wird im Allgemeinen und die DASM im Speziellen beschrieben. Im Weiteren folgt die mathematische Beschreibung der ASM.

### 2.4.1 Aufbau und Funktionsweise

Die ASM ist heutzutage der am meisten verbreitete Antriebsmotor. Früher war nur ein drehzahlvariabler Betrieb mittels externer Beschaltung der Rotorwicklung (Schleifringläufer) oder ein Betrieb mit fester Drehzahl möglich (Käfigläufer). Durch den Einsatz von Frequenzumrichtern ist nunmehr eine höhere Flexibilität realisierbar ohne große Einbußen beim Wirkungsgrad (vgl. Schleifringläufer mit externem Rotorwiderstand) möglich. Die Statorwicklung ist durch drei um  $\frac{2\pi}{3}$  räumlich versetzte Phasenwicklungen aufgebaut. Der Rotor (Läufer) ist vom Stator durch einen Luftspalt getrennt und kann als Kurzschlussläufer (Käfigläufer) oder Schleifringläufer realisiert werden. Ein Kurzschlussläufer besteht aus gut leitfähigen Stäben die an beiden Enden kurzgeschlossen sind. Der Schleifringläufer wiederum besteht aus Spulen, welche auf einer Seite auch kurzgeschlossen sind aber auf der anderen Seite über Schleifringe an einem Anlasswiderstand angeschlossen werden können. Bei der DASM werden nun diese Schleifringe und somit die Rotorwicklung mit einem variablen Drehspannungssystem verbunden. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um einen Wechselrichter der in der Lage ist die Rotorspannung in Frequenz und Amplitude einzustellen.

Die Wirkungsweise der ASM basiert auf dem Prinzip des Drehfeldes. Durch die Statorwicklungen fließt ein dreiphasiger Drehstrom, der ein rotierendes Magnetfeld im Inneren der Maschine erzeugt. Die Drehgeschwindigkeit  $\omega_s$  dieses Drehfeldes hängt von der Frequenz des einspeisenden Netzes  $f_1$  und der Polpaarzahl  $p$  ab:

$$\omega_s = \frac{f_1}{p} \quad (2.42)$$

Die Drehfeldlinien schließen sich über Stator, Rotor und den Luftspalt. Durch konstruktive Maßnahmen werden unerwünschten Oberwellen des Drehmomentes reduziert und die erwünschte sinusförmige Verteilung des Feldes im Luftspalt erreicht.

Dreht sich der Rotor mit einer anderen Geschwindigkeit als das Drehfeld, wird durch die Relativbewegung zwischen Rotorwicklung (oder Rotorstäbe) und Drehfeld eine Spannung

induziert. Dessen zufolge fließt ein Strom in der Rotorwicklung bzw. in den Stäben. Nach der Lenz'schen Regel werden die Ströme im Rotor so fließen, dass sie ihrer Ursache (dem Drehfeld) entgegenwirken (das Drehfeld aufzuheben versuchen). Damit baut sich eine Kraft, auch Lorenzkraft genannt, an den Leitern der Rotorwicklung auf und weiter ein Drehmoment an der Welle.

Die Relativbewegung von Rotor und Feld muss aufrechterhalten werden damit in den Rotorstäben die Induktion der Spannung möglich ist. Ansonsten gibt es keine zeitliche Veränderung der Flussverketzung bzgl. der Rotorwicklung und somit auch keine induzierte Spannung. Die Differenz zwischen der Winkelgeschwindigkeit des Drehfeldes und des Läufers wird Schlupf-Winkelgeschwindigkeit genannt. Dividiert durch die Winkelgeschwindigkeit des Drehfeldes, liefert dies den Schlupf  $s$ :

$$s = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} \quad (2.43)$$

Der Stillstand ( $\omega_m = 0$ ,  $s = 1$ ) ist der Zustand des Motors beim Anlauf. Dann verhält sich dieser wie ein Drehtransformator. D.h. die Frequenzen im Stator und Rotor sind gleich. Beim Synchronlauf ( $\omega_m = \omega_s$ ,  $s = 0$ ) gibt es keine relative Bewegung zwischen Drehfeld und Rotor. Dieser Zustand kann in einer realen Maschine ohne äußere Einwirkung an der Welle wegen den Reibungsverlusten der Maschine nicht erreicht werden.

Durch die sinusförmige Verteilung des an den Rotorstäben wirkenden magnetischen Feldes ist die induzierte Spannung in den Rotorstäben ebenfalls sinusförmig.

Die Frequenz der induzierten Spannung lautet:

$$f_2 = f_1 - p \cdot f_m \quad (2.44)$$

Durch beidseitige Multiplikation mit  $2\pi$  ergibt sich:

$$\Omega_2 = \Omega_1 - p \cdot \Omega_m \quad (2.45)$$

Oder, in bezogener Form :

$$\omega_2 = \omega_1 - \omega_m \quad (2.46)$$

Das Moment der Maschinenwelle hängt von der Kraft die auf den Rotor ausgeübt wird ab. Die Lorenzkraft jedoch ist umso größer, je größer der Strom, welcher durch die Induktion im Rotor hervorgerufen wird und der magnetischen Flussdichte an derselben Stelle.

Eine andere Realisierung wird erreicht durch die äußere Einspeisung des Stromes in die Rotorwicklung. Diese Maschine wird doppeltgespeiste Asynchronmaschine (DASM) genannt da sowohl die Statorwicklung als auch die Rotorwicklung gespeist wird. Ist der einspeisende Strom ein Gleichstrom, dann verhält sich die DASM wie eine Synchronmaschine. In dieser Diplomarbeit wird die DASM als Generator betrieben. Bei angelegter Gleichspannung an den Rotorwicklungen und konstanter mechanischer Bewegung des Rotors wird ein magnetisches Drehfeld erzeugt. Die Frequenz der induzierten Spannung im Stator und die Drehgeschwindigkeit des Rotors sind zu einander proportional. Wird anstatt einer Gleichspannung eine Wechselspannung an den Rotorwicklungen angelegt, dann wird das Drehfeld nicht nur alleine durch die Drehung des Rotors bestimmt, sondern auch durch die Frequenz der angelegten Wechselspannung an den Rotoranschlüssen (Schleifringen). Die Drehgeschwindigkeit des Rotors als auch die Frequenz der eingespeisten Rotorströme bestimmen nun die Drehgeschwindigkeit des magnetischen Feldes und somit die Frequenz der induzierten Spannung im Stator. Die Beziehung zwischen den Frequenzen ist wie in Gleichung (2.44) mit dem Unterschied dass die Frequenz  $f_2$  nun die Frequenz der eingespeisten Ströme im Rotor darstellt.

Um die Verhältnisse in der Maschine vereinfacht darzustellen ist es wünschenswert die Maschine mit der Polpaarzahl  $p = 1$  zu betrachten. Das Funktionsprinzip der Maschine bleibt gleich auch bei höheren Polpaarzahlen. Die einpolpaarige Maschine besitzt drei Spulenwicklungen die physikalisch im Stator - wie in Abbildung 2.9 (links) dargestellt - verteilt sind. Bei der zeichnerischen Darstellung der Maschine wird von dieser physikalischen Wirklichkeit abgewichen [9]. Die eigentliche Spule aus Abbildung 2.9 (links) wird symbolhaft an der Stelle  $\alpha=0$  als konzentriertes Element eingetragen (Abbildung 2.9 (rechts)). Das ist die Richtung in welche die physikalische Spule das magnetische Feld erzeugt (die Pfeile in Abbildung 2.9 rechts und links).

Bei Drehfeldmaschinen werden üblicherweise drei Spulen für ein Drehfeld verwendet. Zusammengefasst werden sie als Polpaarzahl gleich eins dargestellt. Maschinen mit höheren Polpaarzahlen enthalten also ein Vielfaches von drei Spulen, gleich der Polpaarzahl je Phase. Die Feldverteilung der einpolpaarigen Maschine hat ein Maximum im Luftspalt. Mehrpolpaarige Maschinen haben mehrere Maxima was ihrer Polpaarzahl  $p$  entspricht. Obwohl es mehrere Maxima gibt, ist es immer noch möglich, die Maschinengrößen in der Raumzeigerdarstellung darzustellen.

Bei der einpolpaarigen Maschine bewegt sich während der elektrischen Periode die Drehfeldwelle über den ganzen Umfang. Bei einer mehrpolpaarigen Maschine wiederum, bewegt sich das Feld nur über ein Polpaar. Damit sinkt die Drehfeldfrequenz entsprechend der Gleichung 2.42.

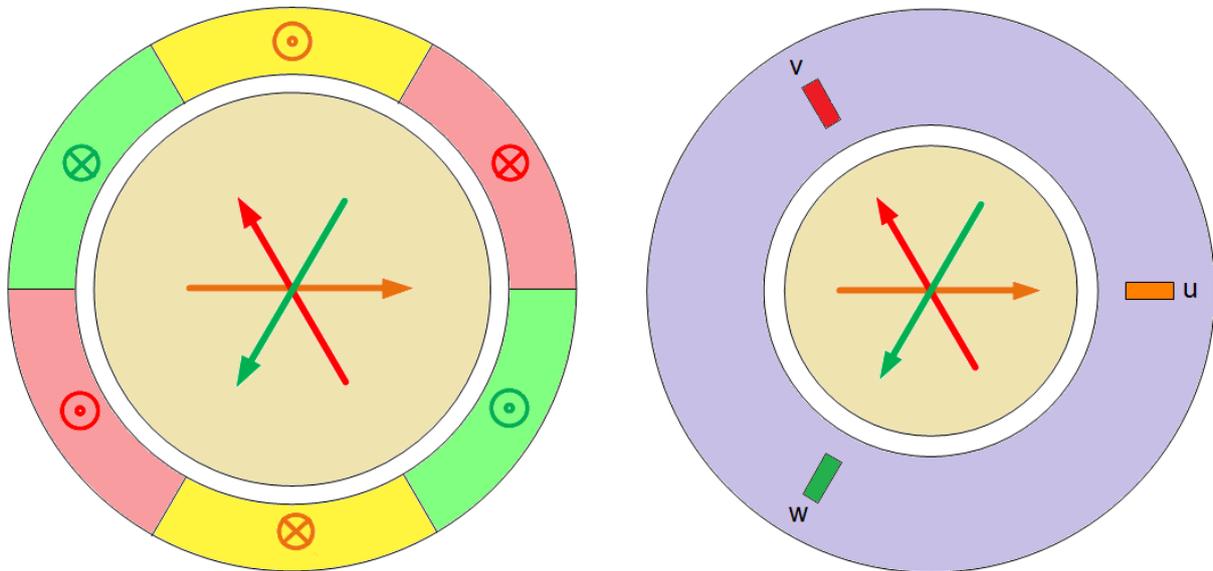


Abbildung 2.9: Die physikalische Verteilung der Spulen im Stator (links) : u-Wicklung (gelb); v-Wicklung (rot), w-Wicklung (grün); symbolhafte Darstellung der Statorspulen (rechts)

## 2.5 Mathematische Beschreibung der ASM

In der folgenden Beschreibung wird die Asynchronmaschine im Allgemeinen beschrieben. Auf den speziellen Charakter der doppeltgespeisten Asynchronmaschine mit den dazugehörigen Koordinatentransformationen wird in Kapitel 3 eingegangen.

Die Gleichungen der Statorspannungen der einzelnen Stränge in bezogener Form lauten:

$$u_{su} = i_{su} \cdot r_s + \frac{\partial \psi_{su}}{\partial \tau} \quad (2.47)$$

$$u_{sv} = i_{sv} \cdot r_s + \frac{\partial \psi_{sv}}{\partial \tau} \quad (2.48)$$

$$u_{sw} = i_{sw} \cdot r_s + \frac{\partial \psi_{sw}}{\partial \tau} \quad (2.49)$$

Multipliziert man die Gleichung (2.47) mit  $\frac{2}{3}$ , (2.48) mit  $\frac{2}{3} \cdot e^{\frac{2\pi}{3}}$  und (2.49) mit  $\frac{2}{3} \cdot e^{\frac{4\pi}{3}}$  und addiert man diese, so entsteht die Gleichung für den Raumzeiger der Statorspannung:

$$\underline{u}_s = r_s \cdot \underline{i}_s + \frac{\partial \psi_s}{\partial \tau} \quad (2.50)$$

Analog wird der Spannungsraumzeiger der Rotorspannungen berechnet zu:

$$\underline{u}_r' = r_r \cdot \underline{i}_r' + \frac{\partial \psi_r}{\partial \tau} \quad (2.51)$$

Die gestrichenen Größen in der Gleichung (2.51) sind die rotorseitig gemessenen Größen. Die umgerechnete Gleichung lautet:

$$\underline{u}_r = r_r \cdot \underline{i}_r + \frac{\partial \psi_r}{\partial \tau} \quad (2.52)$$

wobei

$$u_r = \frac{u_r'}{\underline{Ü}} \quad (2.53)$$

$$i_r = i_r' \cdot \underline{Ü} \quad (2.54)$$

$$r_r = \frac{r_r'}{\underline{Ü}^2} \quad (2.55)$$

mit  $\underline{Ü}$  als Übersetzungsfaktor.

Die Gleichungen für Stator- und Rotorfluss lauten:

$$\underline{\psi}_s = (x_{s\sigma} + x_m) \cdot \underline{i}_s + x_m \cdot \underline{i}_r \quad (2.56)$$

$$\underline{\psi}_r = x_m \cdot \underline{i}_s + (x_{r\sigma} + x_m) \cdot \underline{i}_r \quad (2.57)$$

mit

$$x_{s\sigma} = \frac{\sigma}{2} \cdot x_s \quad (2.58)$$

$$x_{r\sigma} = \frac{\sigma}{2} \cdot x_s \cdot u \quad (2.59)$$

$$x_m = (1 - \sigma) \cdot x_s \quad (2.60)$$

$$x_s = \frac{x_s'}{\dot{U}} \quad (2.61)$$

Diese Verhältnisse sind im Ersatzschaltbild (Abbildung 2.10) angegeben.

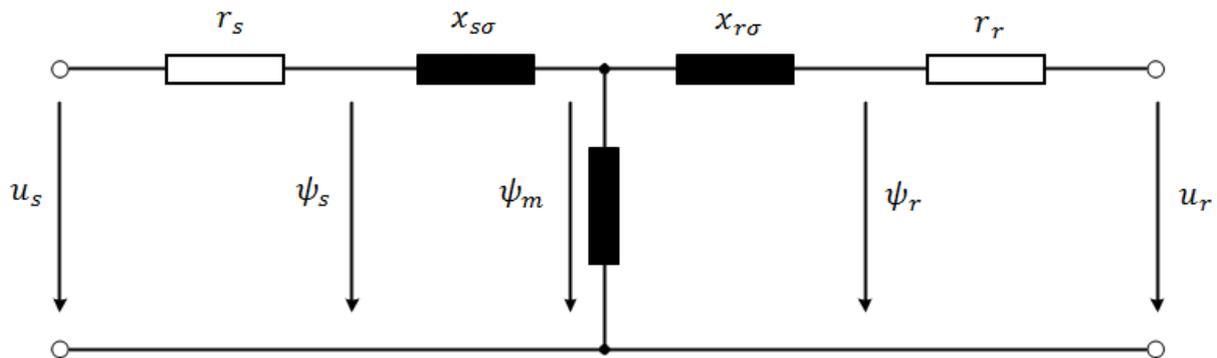


Abbildung 2.10: Ersatzschaltbild der ASM

Die Spannungsgleichungen können in einem allgemeinen KOS K wie folgt angeschrieben werden:

$$\underline{u}_s = r_s \cdot \underline{i}_s + \frac{\partial \psi_s}{\partial \tau} + j \cdot \omega_K \cdot \underline{\psi}_s \quad (2.62)$$

$$\underline{u}_r = r_r \cdot \underline{i}_r + \frac{\partial \psi_r}{\partial \tau} + j \cdot (\omega_K - \omega_m) \cdot \underline{\psi}_r \quad (2.63)$$

Die Flussverkettungsgleichungen bleiben gleich. Das innere Moment der Maschine wird aus dem Statorstrom- und dem Rotorflussraumzeiger wie folgt berechnet:

$$m_i(\tau) = -\text{Im}(\underline{i}_s^* \cdot \underline{\psi}_r) \quad (2.64)$$

Der Sachverhalt ist in Abbildung 2.11 verdeutlicht. Das bezogene innere Moment entspricht somit der von den beiden Raumzeigern aufgespannten Fläche. Die Bewegungsgleichung der ASM lautet:

$$\tau_m \cdot \frac{\partial \omega_m}{\partial \tau} = m_i - m_l \quad (2.65)$$

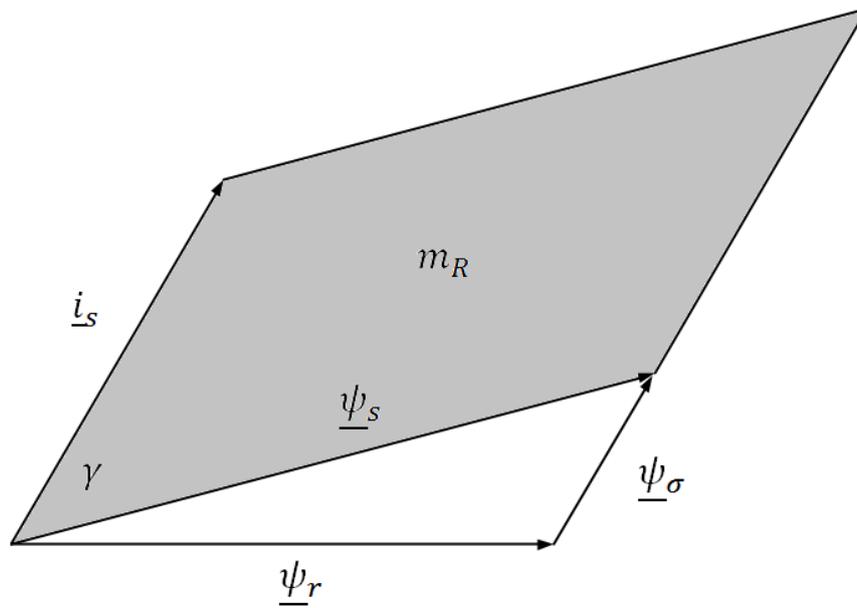


Abbildung 2.11: Darstellung des inneren Momentes im Raumzeigerkalkül

### 3 SIMULATIONSMODELL DER REGELUNG

Der größte Vorteil der DASM im Generatorbetrieb ist, dass man sowohl eine konstante Spannung als auch eine konstante Frequenz am Statorausgang - unabhängig von der Drehzahl des Rotors - einstellen kann. Das wird ermöglicht durch den Einsatz eines Frequenzumrichters an den Schleifringen der Rotorwicklung. Die Schleifringe wirken im Wesentlichen wie eine mechanische Koordiantentransformation womit der Umrichter als Rotorfest angesehen werden kann. Eine andere Möglichkeit ist die sogenannte Bürstenlose doppeltgespeiste Asynchronmaschine. Dabei werden in das Statorblechpaket zwei Wicklungssysteme eingebaut, wobei eines die Aufgaben der Statorwicklung übernimmt. Das zweite Wicklungssystem ist für die kontaktlose Regelung des Rotorstromes zuständig. In der vorliegenden Arbeit wird aber ausschließlich auf den Schleifringläufer Typus eingegangen.

Betrachtet man die DASM im Inselbetrieb, d.h. es wird keine äußere Spannung an die Statorwicklungsklemmen angelegt, ist die Höhe der Ausgangsspannung von der Flussverkettung abhängig. Die Variierung der eingespeisten Rotorspannung (Stellgröße), durch die Regelung mittels Umrichter, ermöglicht den Aufbau des Drehfeldes, welches bei einer beliebigen Rotordrehzahl für eine konstante Statorspannung benötigt wird.

Die Regelung der Maschine erfolgt durch die Kaskadenregelung von PI-Reglern. Der Vorteil dieses Reglers ist, dass der P-Anteil schnell ist und dass er bei großen Regelabweichungen schnell reagiert. Der I-Anteil ist für die Aufhebung der Regelabweichung zuständig.

Die äußere Regelung ist die Statorspannungsregelung. Durch Differenzbildung zwischen den Statorspannungssollwert und Statorspannungswert erhält man eine Differenzspannung die dann in einen PI-Regler (Statorspannungsregler) geführt wird. Die innere Regelung ist die Rotorstromregelung. Der Ausgang des Statorspannungsreglers ist der Rotorstrom. Dieser Strom wird wieder vom Rotorstrom abgezogen und der Differenzstrom wird in den zweiten PI-Regler (Rotorstromregler) geführt. Der Ausgang des Rotorstromreglers ist die Rotorspannung, die die Stellgröße darstellt. Das Blockschaltbild der Regelung ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

Diese Art der Regelung wird mit Hilfe von MATLAB/Simulink implementiert um einen Einblick über die Funktionsweise der DASM zu erlangen. Die Indizes „ab“ werden an der Stelle „ $\alpha\beta$ “ für die Größen in  $\alpha\beta$ -KOS verwendet. Die Ergebnisse sind im Kapitel 5 mit den Messungen am Prüfstand gegenüber gestellt.

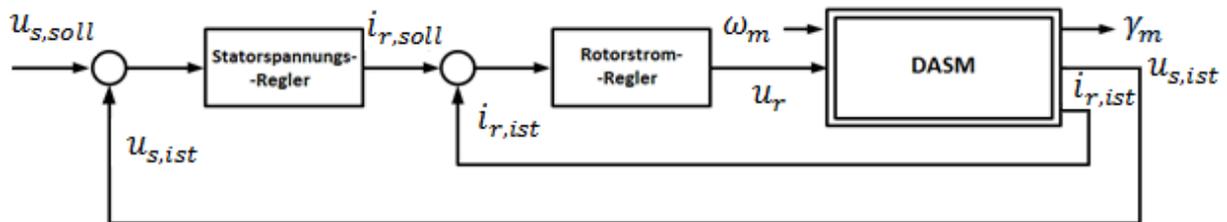


Abbildung 3.1: Schaltbild der Regelung

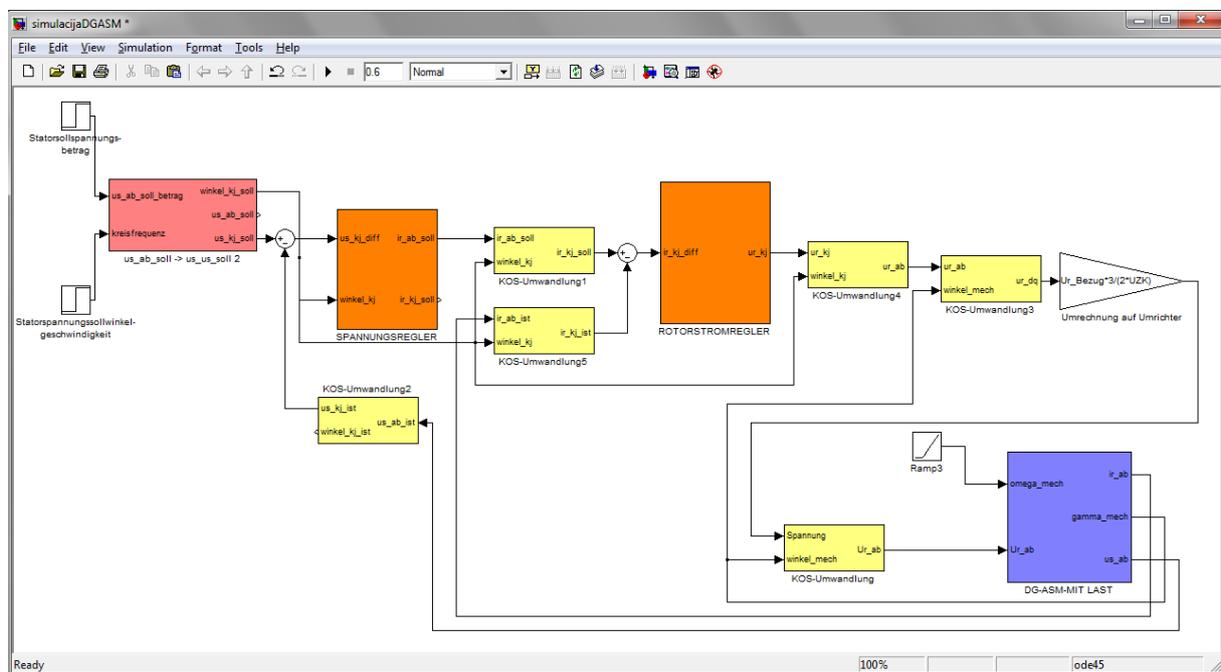


Abbildung 3.2: Regelungsmodell in Matlab/Simulink. Zum Erkennen sind die Blöcke von zwei PI-Regler (orange), DASM-Maschinenmodell (blau), Sollspannungsvorgabeblock (hell rot) und KOS-Umwandlungsblöcke (gelb)

### 3.1 DASM-Maschinenmodell

Der Ausgangspunkt der Modelbildung, sind die in Kapitel 2 abgeleiteten Maschinengleichungen:

- Statorspannungsgleichung (Gleichung 2.51),

- Rotorspannungsgleichung (Gleichung 2.53),
- Statorflussverkettungsgleichung (Gleichung 2.57) und
- Rotorflussverkettungsgleichung (Gleichung 2.58).

Den Eingang des Modells bilden die mechanische Winkelgeschwindigkeit  $\omega_m$  und die Rotorspannung  $\underline{u}_r$ . Ausgangsseitig ist der mechanische Winkel  $\gamma_m$ , der Rotorstrom  $\underline{i}_r$  und die Statorspannung  $\underline{u}_s$  ausgeführt. Darum müssen die oben aufgezählten Maschinengleichungen wie folgt umgeformt werden.

Aus Gleichung (2.48) und (2.50) folgt mit  $\omega_K = 0$  :

$$\frac{\partial \psi_s}{\partial \tau} = \underline{u}_s - r_s \cdot \underline{i}_s \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial \psi_r}{\partial \tau} = \underline{u}_r - r_r \cdot \underline{i}_r + j \cdot \omega_m \cdot \underline{\psi}_r \quad (3.2)$$

Aus (2.54) folgt für  $\underline{i}_s$  :

$$\underline{i}_s = \frac{\psi_s - x_m \cdot \underline{i}_r}{x_{s\sigma} + x_m} \quad (3.3)$$

Durch das Einsetzen von  $\underline{i}_s$  in die Rotorflussverkettungsgleichung (2.58) und nach Auflösen nach  $\underline{i}_r$  folgt:

$$\underline{i}_r = \frac{\psi_r \cdot (x_{s\sigma} + x_m) - \psi_s \cdot x_m}{(x_{s\sigma} + x_m) \cdot (x_{r\sigma} + x_m) + x_m^2} \quad (3.4)$$

Die Statorspannung erhält man durch die Multiplikation der bezogenen statorseitigen Last mit dem negativen Statorstrom  $\underline{i}_s$ , da die DASM im Generatorbetrieb betrieben wird:

$$\underline{u}_s = -\underline{i}_s \cdot \underline{Z}_{last} \quad (3.5)$$

Durch die oben ausgeführten Umwandlungen werden die Gleichungen auf ein „circuit-model“ übertragen, um die Benützung der „Derivative“-Blöcke in MATLAB/Simulink zu vermeiden weil sie beim konstanten Eingang die Unstetigkeit im System verursachen.

Durch das Einsetzen von  $\underline{i}_s = 0$  in die Gleichung (3.1) folgt die DASM im Leerlauf:

$$\frac{\partial \underline{\psi}_s}{\partial \tau} = \underline{u}_s \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial \underline{\psi}_r}{\partial \tau} = \underline{u}_r - r_r \cdot \underline{i}_r + j \cdot \omega_m \cdot \underline{\psi}_r \quad (3.7)$$

$$\underline{\psi}_s = x_m \cdot \underline{i}_r \quad (3.8)$$

$$\underline{\psi}_r = (x_{r\sigma} + x_m) \cdot \underline{i}_r \quad (3.9)$$

Aus (3.9) folgt:

$$\underline{i}_r = \frac{\underline{\psi}_r}{(x_{r\sigma} + x_m)} \quad (3.10)$$

Durch das Einsetzen von  $\underline{i}_r$  aus Gleichung (3.10) in (3.8) folgt:

$$\underline{\psi}_s = x_m \cdot \underline{i}_r = x_m \cdot \frac{\underline{\psi}_r}{(x_{r\sigma} + x_m)} \quad (3.11)$$

Damit folgt die Ausgangsgleichung (3.6) zu:

$$\underline{u}_s = \frac{\partial \underline{\psi}_s}{\partial \tau} = \frac{x_m}{(x_{r\sigma} + x_m)} \cdot \frac{\partial \underline{\psi}_r}{\partial \tau} \quad (3.12)$$

Die Implementierung der Gleichungen (3.1) bis (3.12) in MATLAB/Simulink ist in Abbildung 3.3 zu sehen. Die Gleichung (3.12) wird anstatt eines „Derivative“-Blockes durch einen PD-Glied implementiert um die Unstetigkeit im System zu vermeiden.

## 3.2 Das Kaskadenregler-Modell

Die Kaskadenregelung erfolgt mit zwei PI-Reglern. Diese Regelung ist im Statorsollspannungsfesten kj-KOS aufgebaut. Der Grund liegt daran, dass sich der Statorsollspannungsraumzeiger immer mit derselben Winkelgeschwindigkeit  $\omega_{kj}$  dreht und dadurch ein Bezug (Umrechnung) auf dieses KOS einfach ist.

Die äußere Regelung ist die Statorspannungsregelung. Der vorgegebene Statorspannungssollwert wird mit dem Statorspannungswert verglichen und die daraus folgende Regelabweichung wird dem PI-Regler zugeführt.

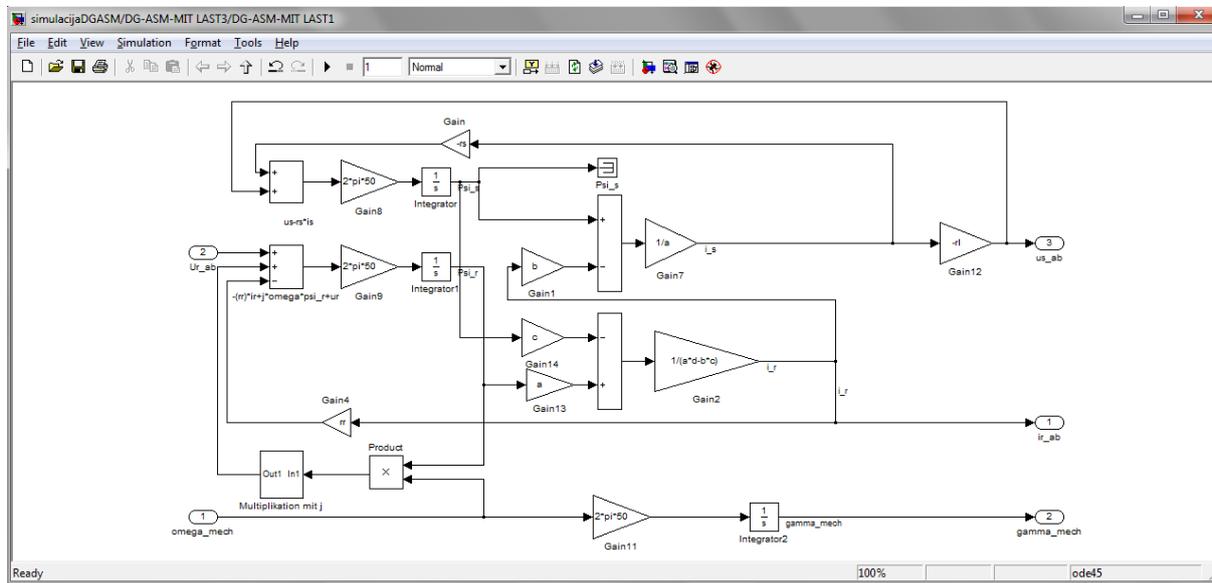


Abbildung 3.3: Modell der ASM mit Last

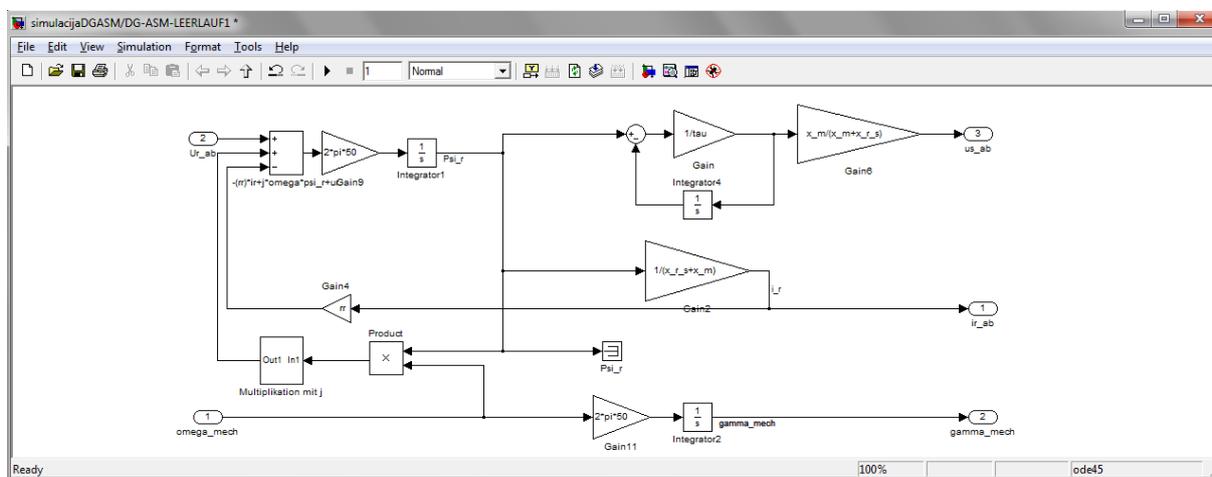


Abbildung 3.4: Modell der ASM im Leerlauf

Der PI-Regler besteht aus einem P-Anteil mit der Verstärkung  $K_P$  und dem I-Anteil mit der Verstärkung  $K_I$ :

$$K_P + \frac{K_I}{s} \tag{3.13}$$

Mit der Laplace-Variable  $s$ . Umgeformt kann es gemäß:

$$\frac{K_P \cdot (1 + Ts)}{Ts} \quad (3.14)$$

mit der Zeitkonstante  $T = \frac{K_P}{K_I}$  angeschrieben werden.

Dem äußeren Spannungsregler nachgeschaltet ist die innere Rotorstromregelung. Der Ausgang der Statorspannungsregelung ist der Rotorstromsollwert. Dieser wird vom DASM-Modell stammendem Rotorstromistwert abgezogen und als Regelabweichung in den inneren PI-Regler zugeführt. Der Rotorstromregler besitzt im Gegensatz zum Statorspannungsregler eine kleinere Zeitkonstante. Die daraus resultierende Größe ist die Stellgröße der Rotorspannung.

Die Implementierung der beiden PI-Regler im MATLAB/Simulink ist in Abbildung 3.5 zu sehen. Der einzige Unterschied zwischen den beiden Blöcken ist bei der Vorgabe der Verstärkung des P- und I-Anteils. Aus Abbildung 3.5 ist ersichtlich, dass die proportionale Verstärkung  $K_P$  mit der Verstärkung des I-Anteils  $K_I$  addiert wird. Danach wird der Betrag gebildet. Der Betrag wird auf ein Intervall von  $[-1,+1]$  begrenzt. Bei einer Überschreitung des Betrages ( $|\cdot| > 1$ ,  $|\cdot| < -1$ ) wird der Eingang des Integrators auf null gesetzt. Damit wird der Integrator eingefroren und das Reglerausgangssignal übersteigt nicht den maximalen Wert. Diese Maßnahme nennt man Anti-Wind-Up und wird bei beiden PI-Reglern angewendet. Die Bezeichnungen  $K_{p\_Spannung1}$ ,  $K_{I\_Spannung1}$ ,  $K_{p\_Strom1}$  und  $K_{I\_Strom1}$  im Schaltbild (Abbildung 3.5) stehen jeweils für  $K_P$  und  $K_I$  als Verstärkung der Spannungs- und Stromregler.

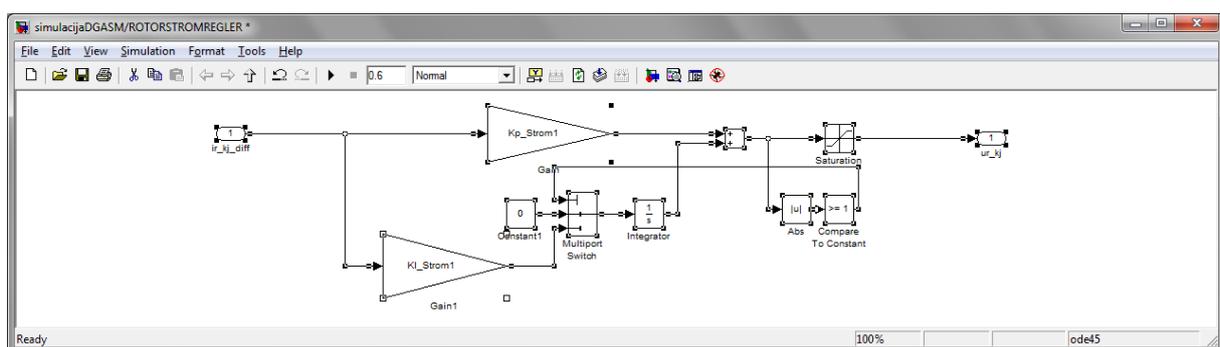


Abbildung 3.5: PI-Regler-Block

### 3.3 Modell der Statorsollspannungsvorgabe

Im folgenden Block (Abbildung 3.6) wird aus den Blockeingangsgrößen (Statorsollspannungsbetrag  $|u_{ab,soll}|$  und Statorsollspannungswinkelgeschwindigkeit  $\omega_{ab,soll}$ ) ein Raumzeiger der Statorspannung in  $\alpha\beta$ -KOS ( $\underline{u}_{ab,soll}$ ) und in kj-KOS ( $\underline{u}_{kj,soll}$ ) sowie der Winkel  $\gamma_{kj,soll}$  berechnet. Vor der Regelung müssen alle Raumzeiger auf ein gemeinsames KOS umgewandelt werden. Die statorfesten Größen werden aus dem  $\alpha\beta$ -KOS in das kj-KOS transformiert. Die rotorfesten Größen werden zuerst vom rotorfesten dq-KOS ins  $\alpha\beta$ -KOS über den Rotorwinkel und danach ins kj-KOS umgewandelt. Der Winkel  $\gamma_{kj,soll}$  wird für die Koordinatentransformation aller Raumzeiger aus dem  $\alpha\beta$ -KOS in das statorsollspannungsfeste kj-KOS benutzt. Dazu muss die Frequenz mit  $2 \cdot \pi \cdot f_N$  multipliziert werden, da die Regelung in Echtzeit stattfindet. Die Zeit muss also entnormiert werden. Aus

$$\omega_{ab,soll} = \frac{\partial \varphi_{ab,soll}}{\partial \tau} = \frac{\partial \varphi_{ab,soll}}{\Omega_{BEZUG} \cdot \partial t} \quad (3.15)$$

folgt:

$$\varphi_{ab,soll} = \Omega_{BEZUG} \cdot \int \omega_{ab,soll} dt \quad (3.16)$$

Der Ausgang des Integrators ist also der Statorsollspannungsdrehwinkel der aus der Statorsollspannungswinkelgeschwindigkeit berechnet wird (Abbildung 3.6).

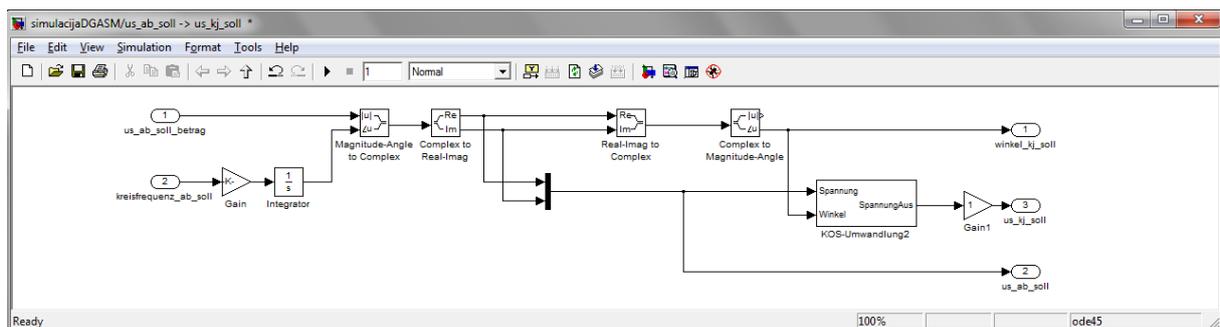


Abbildung 3.6: Statorspannungsvorgabe-Block

### 3.4 KOS-Umwandlungs-Modell

In den folgenden Blöcken (Abbildung 3.7) werden aus dem Raumzeiger ein Raumzeigerbetrag und ein Raumzeigerwinkel berechnet. Danach wird, abhängig davon in welches KOS der ursprüngliche Raumzeiger umgewandelt werden soll, dem

Raumzeigerwinkel ein zusätzlicher Winkelwert entweder addiert oder subtrahiert. Der Ausgang resultiert wieder zu einem Raumzeigervektor in umgewandelter Form, mit Real- und Imaginärteil.

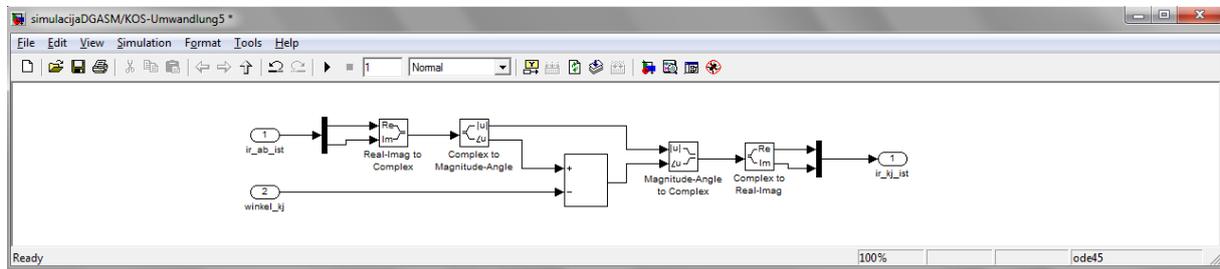


Abbildung 3.7: KOS-Umwandlungs-Block

### 3.5 Die Simulationen

Bei allen Simulationen werden die folgenden Verstärkungen eingestellt:  $K_p\_Spannung1=70$ ,  $K_I\_Spannung1=200$ ,  $K_p\_Strom1=0.55$ ,  $K_I\_Strom1=120$  (DASM mit der symmetrischen Last und DASM mit abgeklemmter Phase  $u$ ) und  $K_p\_Spannung1=60$ ,  $K_I\_Spannung1=5$ ,  $K_p\_Strom1=1.1$ ,  $K_I\_Strom1=121$  (DASM im Leerlauf). Die erste Simulation ist eine repräsentative, reduziert alleine auf das Funktionsprinzip der DASM. Die weiteren Simulationen wurden dann auch am Prüfstand verifiziert durchgeführt.

#### 3.5.1 Simulation 1

Am Eingang der Maschine im Leerlauf wird eine Rampe angelegt (Abbildung 3.8 oben), welche als Eingangsgröße die mechanische Winkelgeschwindigkeit des Rotors darstellt. Der Anfangswert ist mit 0.35 (was dem untersynchronen  $\omega_m = 0.35$  entspricht) gewählt und wird mit kleiner Steigung auf einen übersynchronen Wert von  $\omega_m = 0.65$  gehoben. Die Statorsollspannungswinkelgeschwindigkeit ist mit  $\omega_{ab,soll} = 0.5$  und der Statorsollspannungsbetrag mit  $|\underline{u}_{ab,soll}| = 0.5$  festgelegt. Die x-Achse entspricht der Zeitachse und die y-Achse der entsprechenden Größen in bezogener Form.

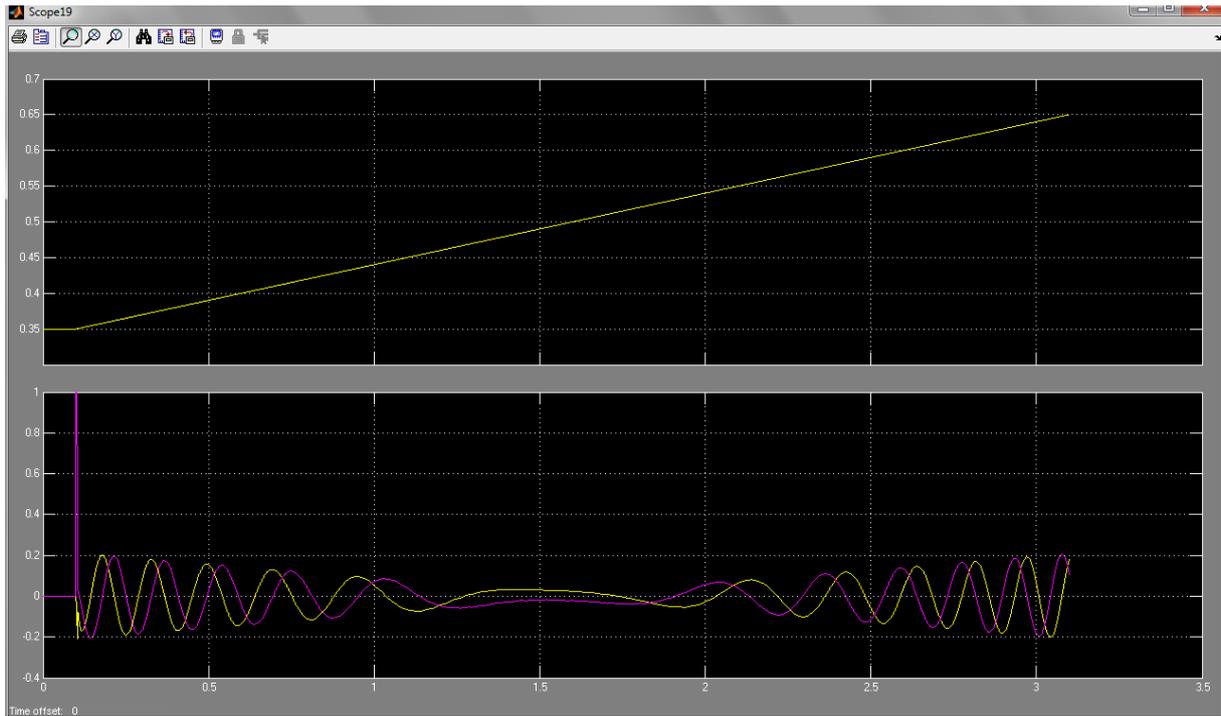


Abbildung 3.8: oben: Mechanische Winkelgeschwindigkeit des Rotors am Eingang der Maschine;  
 unten: Rotorspannung (Stellgröße)  $\underline{u}_{r,dq}$  (gelb-Realanteil; magenta-Imaginäranteil)

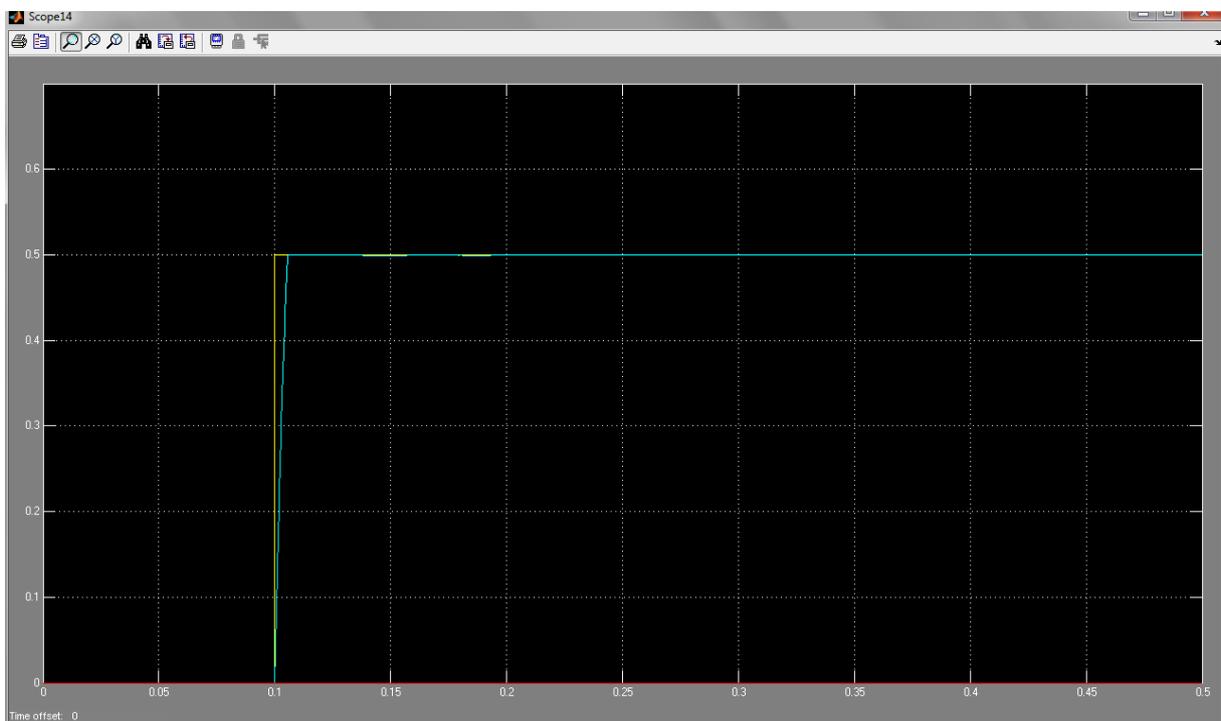


Abbildung 3.9: Soll- und Istwert des Statorspannungsbetrags  $|\underline{u}_{s,kj}|$  (gelb-Sollwert; türkis-Istwert)

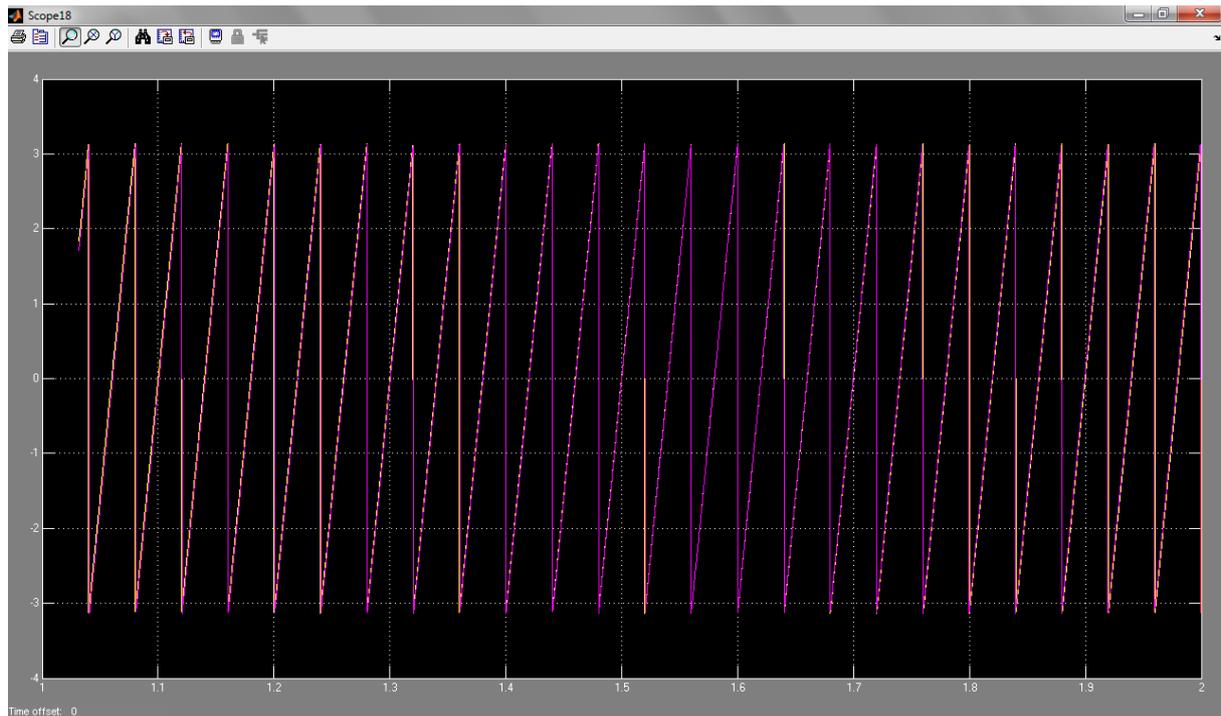


Abbildung 3.10: Soll- und Istwert des Statorspannungswinkels  $\gamma_{kj}$  (gelb-Sollwert; magenta-Istwert)

In Abbildung 3.8 (unten) ist die Rotorspannung im dq-KOS dargestellt. Bei 1.6 sec ist die Rotorgeschwindigkeit gleich der synchronen Frequenz. Damit ist die Relativgeschwindigkeit zwischen Rotor und Drehfeld gleich null und die Frequenz der Rotorspannung ebenfalls gleich null. Zu diesem Zeitpunkt befindet sich die Maschine im Synchronbetrieb. Daher ist die Stellgröße (Rotorspannungsraumzeiger)  $\underline{u}_{r,dq}$  im dq-KOS an dieser Stelle konstant. Der Betrag entspricht hier dem ohm'schen Spannungsabfall am Rotorwiderstand. Im übersynchronen und untersynchronen Zustand ist dies nicht mehr der Fall, dabei ändert sich die Amplitude, Frequenz und Drehrichtung. Die Stellgröße  $\underline{u}_{r,dq}$  stellt den geforderten Rotorstrom auf den erwünschten Sollwert. In dieser Abbildung ist auch die Wirkung der Schleifringe deutlich zu erkennen. Im Wesentlichen muss der Spannungserzeugende Umrichter nur die Schlupffrequenz aufbringen, die Schleifringe wirken als ein Koordiantentransformator. In Abbildung 3.9 und 3.10 sind der Soll- und Istwert der Statorspannung und des Statorspannungswinkels zu sehen. Die Amplitude der Statorspannung wird auf den Sollwert geregelt. Die Überlappung des Statorspannungswinkels vom Soll- und Istwert zeigt, dass es keine zeitliche Verschiebung zwischen den beiden Werten gibt.

### 3.5.2 Simulation 2

Bei der zweiten Simulation ist  $\omega_m = 0.45$  ,  $|\underline{u}_{ab,soll}| = 0.2$  ,  $\omega_{ab,soll} = 0.5$  und der Generator befindet sich im Leerlauf. Die Gleichung (2.47) lässt sich nun wie folgt nachweisen. Aus

$$\omega_2 = \omega_1 - \omega_m \quad (3.17)$$

wobei  $\omega_2$  ,  $\omega_1$  und  $\omega_m$  jeweils die bezogenen Werte des Rotorspannungs, der Statorspannungs- und der mechanischen Winkelgeschwindigkeit sind, folgt:

$$\omega_2 = \frac{\Omega_2}{\Omega_{BEZ}} = \frac{2\pi \cdot f_2}{2\pi \cdot f_N} = \frac{f_2}{50} = 0.5 - 0.45 = 0.05 \quad (3.18)$$

Aus  $f_2 = 2.5$  Hz errechnet sich die Periode von  $u_{r,dq}$  zu  $T_2 = \frac{1}{f_2} = \frac{1}{2.5} = 0.4$  sec.

Die Stellgröße  $\underline{u}_{r,dq}$  mit der oben berechneten Frequenz wird in den Rotor eingespeist, um die erwünschte Frequenz und den erwünschten Betrag der Statorspannung zu erreichen. Am Prüfstand erfolgt die Einspeisung durch den Frequenzumrichter. Die Dauer der Periode  $T_2$  von  $\underline{u}_{r,dq}$  lässt sich aus Abbildung 3.11 bestätigen. Die Amplitude wie auch der Winkel der Statorspannung  $\underline{u}_s$  erreichen ihre Sollwerte (Abbildungen 3.12 und 3.13). Die Darstellung erfolgt im  $\alpha\beta$ -KOS.

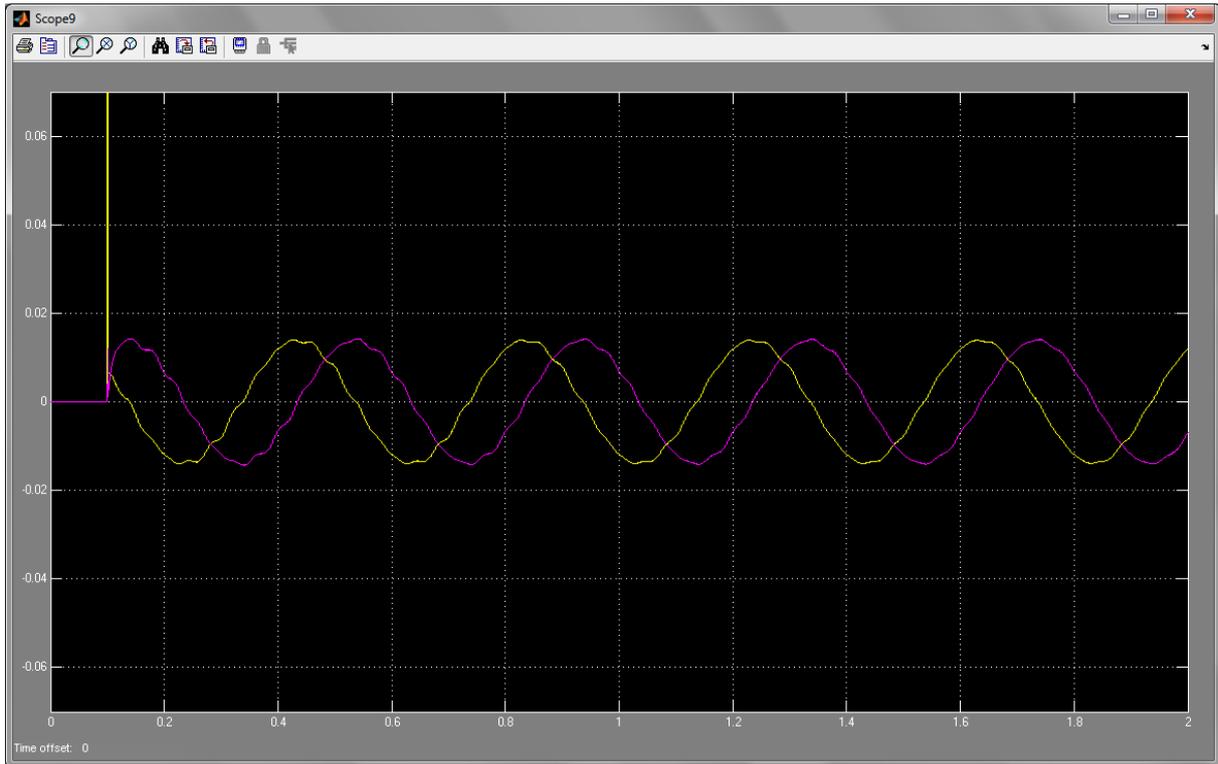


Abbildung 3.11: Rotorspannung  $\underline{u}_{r,dq}$  mit der Periode  $T_2 = 0.4$  sec und  $|\underline{u}_{ab,soll}| = 0.2$ ,  $\omega_{ab,soll} = 0.5$  und  $\omega_m = 0.45$  (gelb-Realanteil; magenta-Imaginäranteil) - Leerlauf

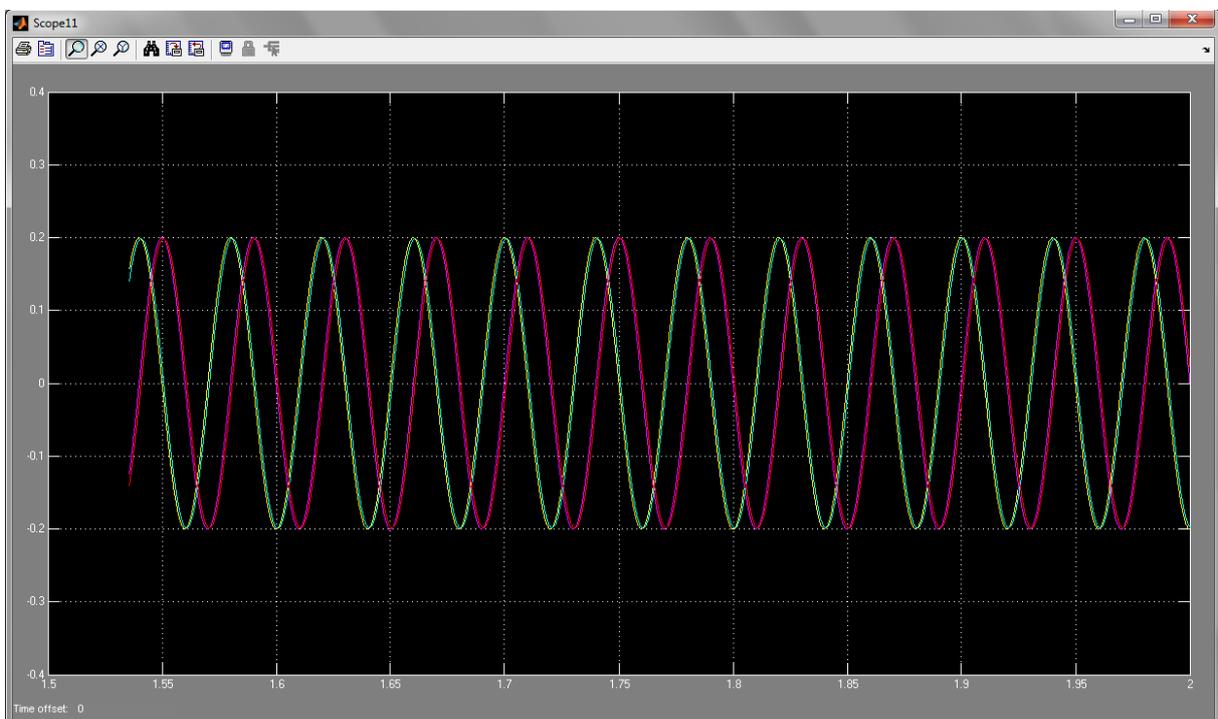


Abbildung 3.12:  $\underline{u}_{ab,soll}$  und  $\underline{u}_{ab,ist}$  im Vergleich mit  $|\underline{u}_{ab,soll}| = 0.2$ ,  $\omega_{ab,soll} = 0.5$  und  $\omega_m = 0.45$  (gelb-Realanteil des Sollwertes; magenta-Realanteil des Istwertes; cyan-Imaginäranteil des Sollwertes; rot-Imaginäranteil des Istwertes) – Leerlauf

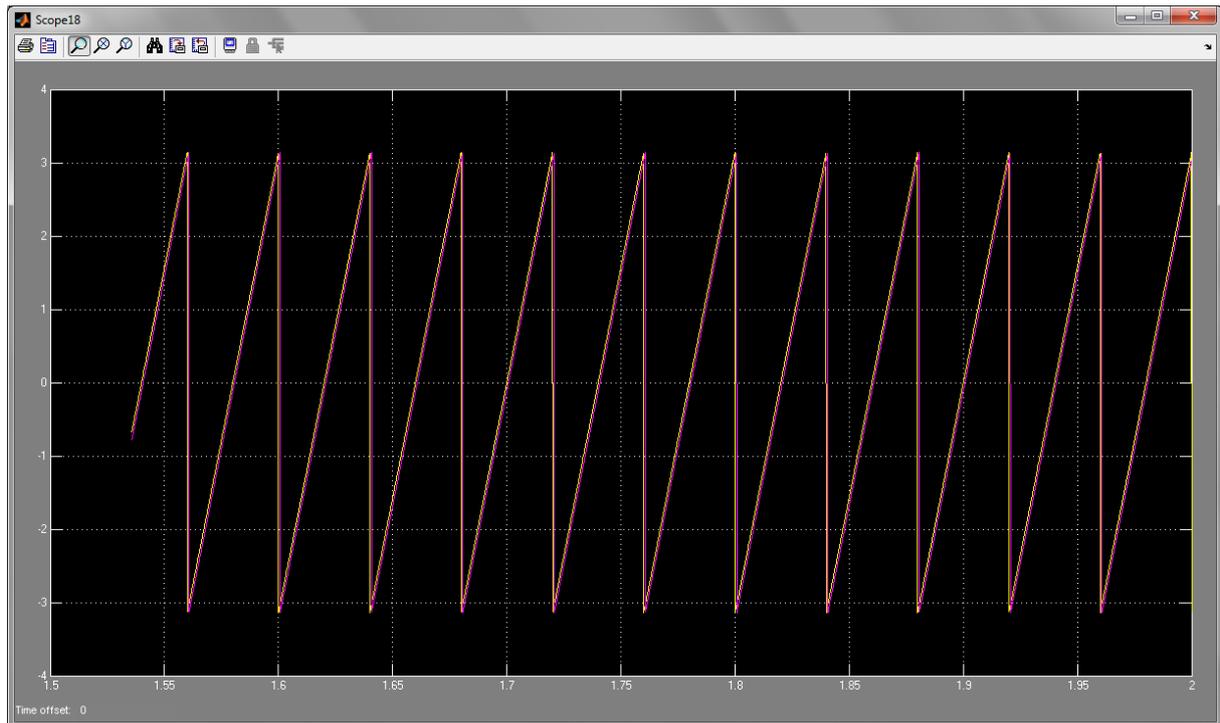


Abbildung 3.13:  $\gamma_{ab,soll}$  und  $\gamma_{ab,ist}$  im Vergleich mit  $|\underline{u}_{ab,soll}| = 0.2$ ,  $\omega_{ab,soll} = 0.5$  und  $\omega_m = 0.45$  (gelb-Sollwert; magenta-Istwert) – Leerlauf

### 3.5.3 Simulation 3

Bei dieser Simulation wird jede Phase symmetrisch mit einer rein ohmschen Belastung von  $20 \Omega$  je (bezogen  $r_l = 2$ ) belastet. Die Statorsollspannungswinkelgeschwindigkeit ist mit  $\omega_{ab,soll} = 0.5$  festgelegt. Die DASM wird übersynchron mit  $\omega_m = 0.45$  und mit der Statorsollspannung von  $|\underline{u}_{s,ab,soll}| = 0.2$  betrieben.

In Abbildung 3.14 (oben) sind Soll- und Istwert der Statorspannung  $\underline{u}_{s,kj}$  zu sehen. Entsprechend der Gleichung (3.19)

$$\omega_2 = \omega_1 - \omega_m = 0.5 - 0.45 = 0.05 = \frac{\Omega_2}{\Omega_{BEZ}} = \frac{2\pi \cdot f_2}{2\pi \cdot f_N} = \frac{f_2}{50} \quad (3.19)$$

mit  $\omega_2$ ,  $\omega_1$  und  $\omega_m$  als die bezogenen Werte des Rotorspannungs, der Statorspannungs- und der mechanischen Winkelgeschwindigkeit lässt sich aus  $f_2 = 2.5$  Hz die Periode von  $\underline{u}_{r,dq}$  zu  $T_2 = \frac{1}{f_2} = \frac{1}{2.5} = 0.4$  sec feststellen. Sie ist bei der Rotorspannung  $\underline{u}_{r,dq}$  nach dem Abklingen der Einschwingvorgänge in Abbildung 3.14 (unten) ersichtlich.

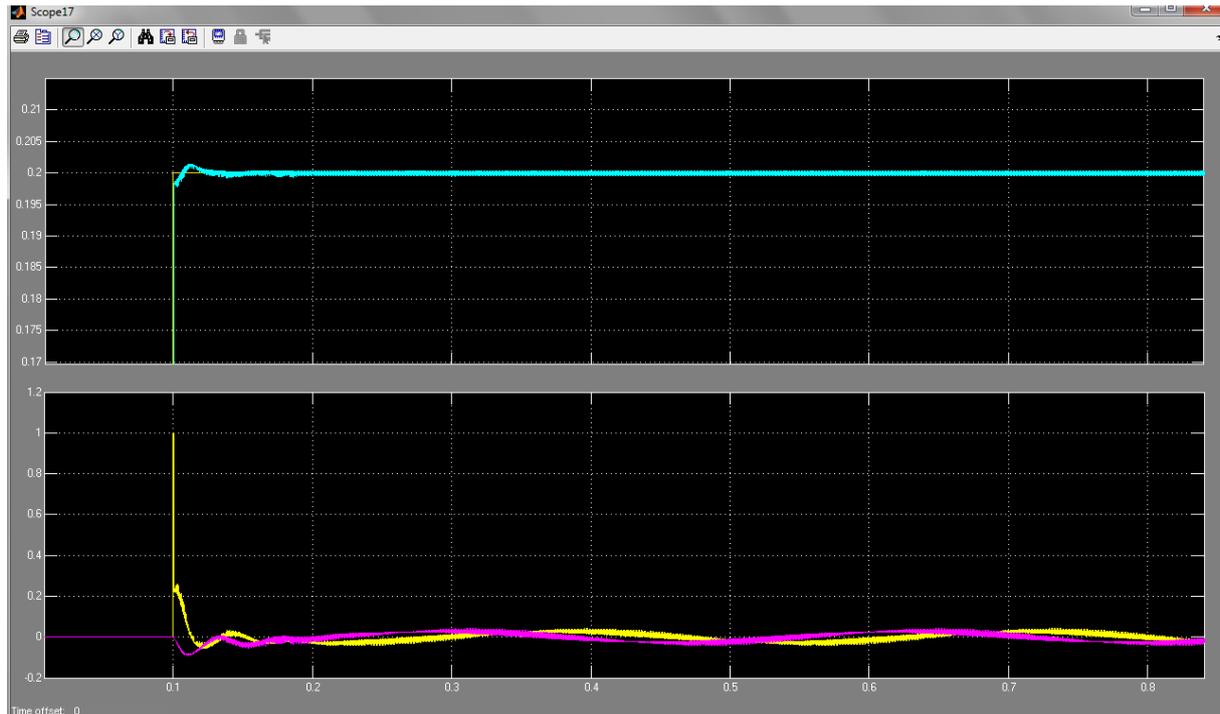


Abbildung 3.14: oben: Soll- und Istwert des Statorspannungsbetrags  $|\underline{u}_{s,kj}|$  mit  $|\underline{u}_{ab,soll}| = 0.2$ ,  $\omega_{ab,soll} = 0.5$  und  $\omega_m = 0.55$ ; unten: Rotorspannung  $\underline{u}_{r,dq}$  – symmetrische Belastung  $20 \Omega$  je Phase

### 3.5.4 Simulation 4

Bei der letzten Simulation wird bei einer rein ohmschen symmetrischen Belastung von  $20 \Omega$  je Phase (bezogen  $r_l = 2$ ) die Phase  $u$  im laufenden Betrieb abgeklemmt. Die DASM wird übersynchron mit  $\omega_m = 0.55$  mit der Statorsollspannung von  $|\underline{u}_{s,ab,soll}| = 0.2$  betrieben. Die Statorsollspannungswinkelgeschwindigkeit ist mit  $\omega_{ab,soll} = 0.5$  festgelegt. Die Implementierung in MATLAB/Simulink erfolgt dadurch, dass am Anfang  $\underline{i}_s$  bestehen bleibt. Aus einem Statorstromraumzeiger werden durch Projektionen in der Richtung der Strangachsen  $u$ ,  $v$  und  $w$  die Statorstromstrangwerte berechnet (nach Gleichung 2.40). Ab dem Zeitpunkt  $t = 0.2$  sec wird der Wert des bezogenen Statorstroms im Strang  $u$  mit Null multipliziert sodass, dadurch neu entstandene Strangwerte wieder in einem neuen Raumzeiger umgewandelt werden. Die Umwandlung aus der Raumzeigerdarstellung in die Strangwerte und umgekehrt, sowie die Multiplikation des Statorstrangstroms  $i_u$  mit Null findet im Block in Abbildung 3.15 statt. Soll- und Istwert der Statorspannung  $\underline{u}_{s,kj}$  sind in Abbildung 3.16 (oben) dargestellt. Nachdem die Phase  $u$  ab  $t = 0.2$  sec abgeklemmt ist, ist die Rotorspannung  $\underline{u}_{d,q}$  deutlich welliger weil die abgeklemmte Phase eine starke Asymmetrie darstellt (unten in Abbildung 3.16)

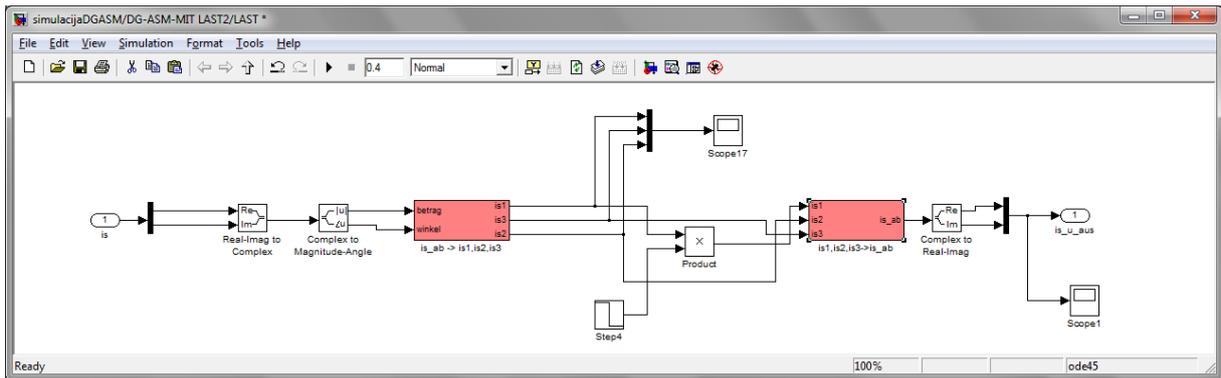


Abbildung 3.15: Modell für den Ausschluss der Phase u

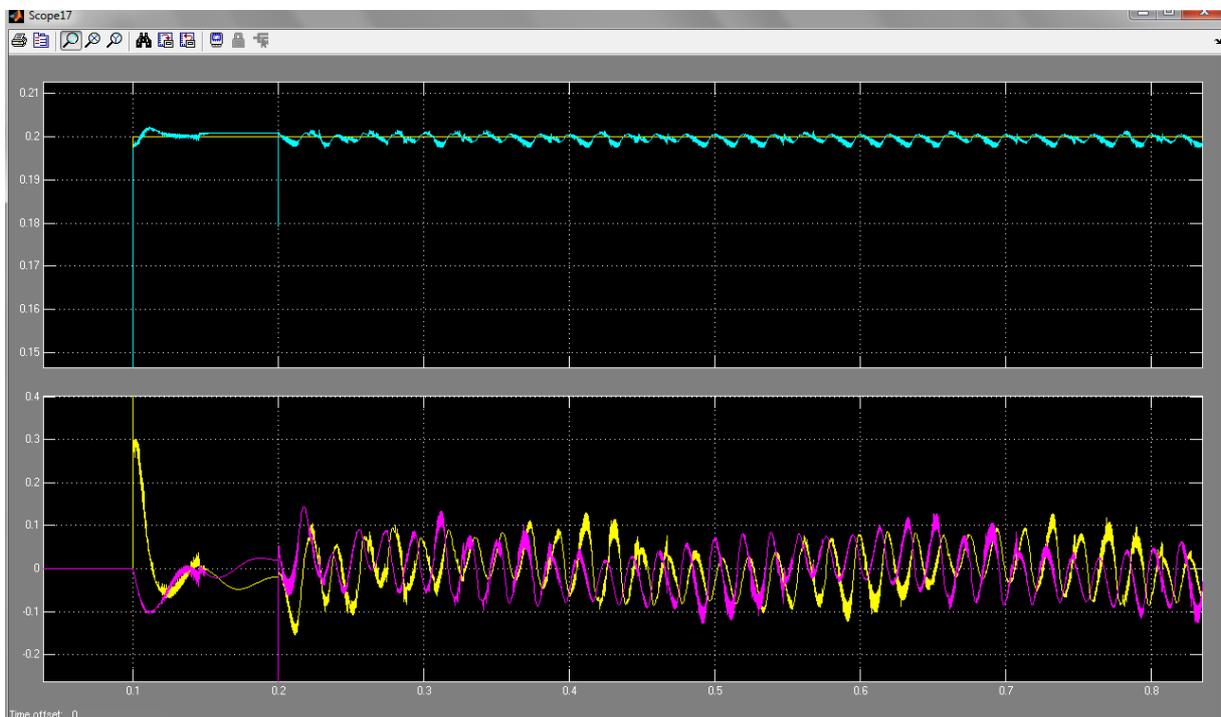


Abbildung 3.16: oben: Soll- und Istwert des Statorspannungsbetrags  $|\underline{u}_{s,kj}|$  mit  $|\underline{u}_{ab,soll}| = 0.2$ ,  $\omega_{ab,soll} = 0.5$  und  $\omega_m = 0.55$ ; unten: Rotorspannung  $\underline{u}_{r,dq}$  - Phase u bei  $t = 0.2$  sec abgeklummt

## 4 PRÜFSTAND

Für die Durchführung der Messungen zur Regelung und Fehlererkennung steht am Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe der TU Wien ein Prüfstand zur Verfügung. Die Hardware und Software für die Lösung der Aufgaben war schon vorhanden. Bestimmte Änderungen mussten vorgenommen werden, um der Aufgabenstellung dieser Diplomarbeit gerecht zu werden.

Der Prüfstand besteht aus einer Versuchsmaschine (DASM), die mit einer Gleichstrommaschine gekoppelt ist. Ein Umrichter ist über die Schleifringe der DASM mit der Rotorwicklung verbunden. Die Statorwicklung kann wahlweise offen gelassen, am Netz betrieben oder mit einer isolierten Belastung verbunden werden. Die Regelung und die Algorithmen zur Fehlererkennung auf den RTi DS1103 dSpace-Controller-Board abgelegt durch ein FPGA der Firma National Instruments werden die Ansteuersignale für die Leistungsschalter des Umrichters erzeugt.

### 4.1 Hardware

#### 4.1.1 Maschine und Inkrementalgeber

In dieser Diplomarbeit wurde eine doppelgespeiste Asynchronmaschine (Asynchron Schleifringläufer) vom Typ DD 2006 des Herstellers Elin Union verwendet (Abbildung 4.1). Es handelt sich um eine 6-polige Maschine (Polpaarzahl  $p = 3$ ) mit einer Leistung von 10.3 kW. Der Ständer hat 36 Nuten und der Läufer 54. Die genauen technischen Daten samt der Bezugsgrößen sind im Anhang A zu finden. Ein 12-Bit Inkrementalgeber (entspricht 4096 Werten) ist direkt mit der Welle verbunden. Nach einer mechanischen Umdrehung wird der Wert des Inkrementalgebers wieder auf null gesetzt. Neben der genauen Position liefert dieser auch ein Index-Signal mit welchem die genaue Position beim Systemstart definiert wird.



Abbildung 4.1: Prüfstandsanzordnung (grün: doppelgespeiste Asynchronmaschine; blau: Lastmaschine (GSM))

#### 4.1.2 dSpace-Controller

Die Regelung und die Messung läuft über ein Echtzeitsystem (dSpace Controller Board DS1103), welches in einer PX4 Expansion Box eingebaut ist. Durch ein ExpressCard System wird die Kommunikation zum PC hergestellt. Das System kann mit MATLAB/Simulink programmiert werden.

#### 4.1.3 Umrichter und Sensoren

Der verwendete Umrichter ist ein IGBT-Pulswechselrichter. Die Ansteuerung der Ventile erfolgt optisch durch sechs Lichtwellenleiter die von einem Schnittstelleprint angesteuert werden. Im Schaltschrank befinden sich weitere Sensoren, die die Stator- und Rotorgrößen (Rotorstrom, Statorspannung und Statorstrom) erfassen. Der Umrichter wird von einer Hausbatterie mit 440 V im Zwischenkreis versorgt.

#### 4.1.4 FPGA

Die Ansteuersignale des IGBT-Pulswechselrichters werden mittels eines Field Programmable Gate Array (FPGA) generiert. Die gewünschte Spannung wird dadurch an die Rotoranschlüsse gesendet. Das FPGA-Board ist im Anwender-PC integriert. Die Aufgabe

des FPGA ist die Berechnung der PWM-Signale und Schaltzeitpunkte für die Ansteuerung der Ventile des Umrichters. Eine zusätzliche Aufgabe ist es den Regelungsvorgang zu unterbrechen, um die für die Fehlerdetektion benötigten Spannungspulse zu erzeugen. Die Abtastung der Signale erfolgt alle 400  $\mu\text{s}$  (entspricht der Abtastfrequenz von 2,5 kHz). Die Eingabe der Abtastfrequenz und Programmierung des FPGA erfolgt mittels der Software LabView der Firma National Instruments.

#### **4.1.5 Gleichstrommaschine und Gleichstromsteller**

Die Gleichstrommaschine der Firma T-T Electronic ist fest mit der Versuchsmaschine verbunden und dient zur Drehung dessen Rotors. Die Maschine wird mit einem Gleichstromsteller der Firma Siemens versorgt. Die technischen Daten der Maschinen und des Gleichstromstellers befinden sich im Anhang B und C. Die Eingabe des Drehzahlsollwertes erfolgt durch eine Fernbedienung die mit dem Gleichstromsteller verbunden ist.

#### **4.1.6 Schnittstellenprint**

Der Schnittstellenprint dient als Kommunikationsschnittstelle zwischen der angewendeten Hardware und Software. Unter anderem dient sie, der Aufarbeitung der Sensorsignale aus dem Umrichterschaltschrank sowie der Inkrementalgebersignale für die dSpace-PC Karte. Weiters werden die Steuersignale für die Ventile des Umrichters ebenfalls über den Schnittstellenprint erzeugt und über Lichtwellenleiter an die Gatetreiber des Umrichters gesendet.

## **4.2 Software**

Die Entwicklungsumgebung am Prüfstand besteht aus MATLAB/Simulink, LabView und dSpace ControlDesk die auf dem Anwender-PC laufen. Hier folgt eine kurze Beschreibung der genannten Programme und ihrer Interaktion mit einander sowie mit der angewandten Hardware am Prüfstand.

### **4.2.1 Matlab/Simulink**

Das MATLAB/Simulink Programm besteht aus mehreren Blöcken: „Sensor Read“, „Fifo Read“, „Fifo Write“, „Inform Auswertung“, „Umrechnungen“ und „Regelung“. Das MATLAB/Simulink Model wurde Größtenteils aus [12] übernommen. Die Veränderungen werden im Block „Regelung“ vorgenommen, wobei die restlichen Blöcke schon vorhanden

waren. Im Block „Sensor Read“ werden die durch den Schnittstellenprint von den Sensoren und Inkrementalgeber aufgenommenen Werte eingelesen. Aus den vom Inkrementalgeber gelieferten Werten wird der mechanische Winkel  $\gamma_{mech}$  berechnet. Der Block „Umrechnungen“ dient zur dSpace-seitige Skalierung, Normierung und Umwandlung der Stator- und Rotorwerte in die Raumzeigerdarstellung, sowie zur Berechnung der Winkel und Winkelgeschwindigkeiten. Diese Werte werden dann im Block „Regelung“ verwendet.

Zusätzlich ist mit einem MATLAB/Skriptfile (\*.m-file) - welches unter Verwendung der mlib/mtrace - Bibliothek programmiert wurde - eine Kommunikation mit dem Echtzeitsystem möglich. Die Messungen für die Fehlerdetektion werden auf dieser Art und Weise realisiert.

#### **4.2.2 LabView**

Durch LabView lässt sich das FPGA programmieren. Das LabView-Programm „faultdetektion“ war vorhanden. Es dient zur Eingabe von Abtastzeiten für die Regelung und die Fehlerdetektion zur Aktivierung des Umrichters.

#### **4.2.3 dSpace-ControlDesk Software**

Während der Laufzeit kann vom PC aus über die ControlDesk-Software des dSpace, mit dem dSpace-Controlle-Board auf die Variablen des MATLAB/Simulink-Modells in Echtzeit zugegriffen werden. Hier können während des Betriebs die Parameter im MATLAB/Simulink vorgegeben werden, wie etwa der Betrag der Statorsollspannung, die Statorsollspannungswinkelgeschwindigkeit ( $\alpha\beta$ -KOS) oder die Reglerverstärkungen  $K_p$  und  $K_I$ . Die Parameter der Schalter für die Umschaltung zwischen der alleinigen Rotorspannungsansteuerung, einfachen Stromregelung oder kaskadierenden Regelung genauso wie die Parameter für die Begrenzung des Stellwertes (eingeprägte Rotorspannung) sind im dSpace-ControlDesk zu bedienen. Neben der Eingabe der Parameter ist auch eine Visualisierung und Aufzeichnung der Ströme, Spannungen und Winkel möglich.

Die Eingabe von den Parameterwerten „Informrate“, „Arraysize“ und „Schranke“ (siehe Kapitel 6.2) für die Messungen erfolgt automatisch durch das MATLAB-Skriptfile.

## 5 DIE REGELUNG AM PRÜFSTAND

Die im Kapitel 3 ausgeführten Simulationen wurden am Prüfstand umgesetzt und sind hier ausführlich dokumentiert. Die Kontrolle des Regelungsprozesses (siehe Kapitel 4) erfolgt in einem Echtzeitsystem (dSpace Controller Board DS1103) wo auch das Programmieren im Matlab/Simulink möglich ist. Der prinzipielle Aufbau der Regler- und Statorspannungsvorgabeblocke ist wie in der Simulation nur mit dem Unterschied, dass hier im zeitdiskreten Rahmen gearbeitet wird. Die PWM-Periode ist bei jeder Messung  $400 \mu\text{s}$ . Die detaillierte Beschreibung des Prüfstandes samt der Software ist im Kapitel 4 vorgegeben. Die Regelung wird im Block „Regelung“ des MATLAB/Simulink durchgeführt. In den folgenden Graphen ist die x-Achse die Zeitachse. Die Größen an der y-Achse sind entsprechend beschriftet. Die in blau dargestellten Signale sind die Sollwerte des Statorspannungswinkels in kj-KOS (beim Graphen beschriftet als  $winkel_{kj}$ ), des Realteils der Statorspannung wie auch des Imaginärteils (beim Graphen beschriftet als  $us_{kj\_Re}$  und  $us_{kj\_Im}$ ). Die roten Signale sind dann die dazugehörigen Istwerte. Beim Graphen der Spannung  $\underline{u}_{r,dq}$  (beim Graphen beschriftet als  $u_{dq}(Re\ und\ Im)$ ) handelt es sich um den Realteil (rot) und den Imaginärteil (blau). Die Phasengrößen sind bei jeder Messung in einer weiteren Abbildung dargestellt (Phase  $u$ : rot; Phase  $v$ : blau; Phase  $w$ : grün). Der Index für den Statorspannungsbetrag ( $|u_{\alpha\beta}|$ ) und seine Winkelgeschwindigkeit ( $\omega_{\alpha\beta}$ ) in  $\alpha\beta$ -KOS sind hier mit „ab“ ( $|u_{ab}|$  und  $\omega_{ab}$ ) bezeichnet. Bei der Berechnung der Rotorspannungswinkelgeschwindigkeit ( $\omega_2$ ) wird die Statorspannungswinkelgeschwindigkeit ( $\omega_{ab}$ ) auch mit  $\omega_1$  bezeichnet. Die Rotorspannung wird bei allen Messungen auf den bezogenen Wert 0.3 begrenzt. Die Verstärkungen des Statorspannungsreglers sind  $Kp\_Spannung1=0.8$ ,  $KI\_Spannung1=5$ , und des Rotorstromreglers  $Kp\_Strom1=1,1$ ,  $KI\_Strom1=21$  bei allen Messungen.

### 5.1 Messung 1

Bei der ersten Messung wird wie in der Simulation die Maschine im Leerlauf und untersynchronen Betrieb betrachtet. Der Statorsollspannungsbetrag ist  $|\underline{u}_{ab,soll}| = 0.2$  und die Sollwinkelgeschwindigkeit  $\omega_{ab,soll} = 0.5$ . Die mechanische Winkelgeschwindigkeit beträgt

$\omega_m = 0.45$ . Die Ergebnisse der Messungen sind in Abbildung 5.1 zusammen gefasst. Es ist ersichtlich, dass sich nach einer Sekunde der Sollwinkel  $\gamma_{kj,soll}$  und Istwinkel  $\gamma_{kj,ist}$  überlappen. Die Istwerte von Statorspannung in kj-KOS (Real- und Imaginärteil) erreichen nach einer Sekunde ihre Sollwerte. Es kann genauso wie bei der Simulation die Formel in der Gleichung (2.47) nachgewiesen werden. Danach gilt mit hinreichend genauer Näherung  $\omega_{1,soll} = \omega_{1,ist}$  wobei  $\omega_1$  die Statorspannungswinkelgeschwindigkeit ist.

Somit ist die Rotorspannungswinkelgeschwindigkeit:

$$\omega_2 = \omega_{1,ist} - \omega_m = 0.5 - 0.45 = 0.05 \quad (5.1)$$

Der Berechnungsvorgang ist wie in den Gleichungen (3.17) und (3.18) bzw. in der Simulation. Somit ergibt sich dieselbe Periode  $T_2 = 0.4$  sec. Sie ist deutlich bei der letzten Periode von  $\underline{u}_{r,dq}$  in Abbildung 5.1 zu erkennen. In Abbildung 5.2 sind die Statorspannungen zu sehen. Nach einer Sekunde erreichen sie ihren Sollwert. Bei einer Sekunde beträgt die Periode  $T_{1,ist} = 0.04$  sec. In diesem Punkt ist  $\omega_{1,ist} = \omega_{1,soll} = 0.5$ .

Aus

$$\omega_{1,ist} = \frac{\Omega_1}{\Omega_{BEZ}} = \frac{2\pi \cdot f_1}{2\pi \cdot f_N} = \frac{f_1}{50} = 0.5 \quad (5.2)$$

folgt  $f_1 = 25$  und  $T_1 = \frac{1}{f_1} = \frac{1}{25} = 0.04$  sec. Damit stimmen die theoretischen und praktischen Werte miteinander überein.

Die Spannungen in Abbildung 5.2 erreichen ihren Sollwert erst ab  $t = 0.9$  sec. Davor haben die Amplituden der Spannungen einen wesentlich größeren Wert. Der Grund liegt daran, dass an den Klemmen im Leerlauf keine Widerstände angeschlossen sind und somit keine Dämpfung der Spannungsamplituden stattfindet.

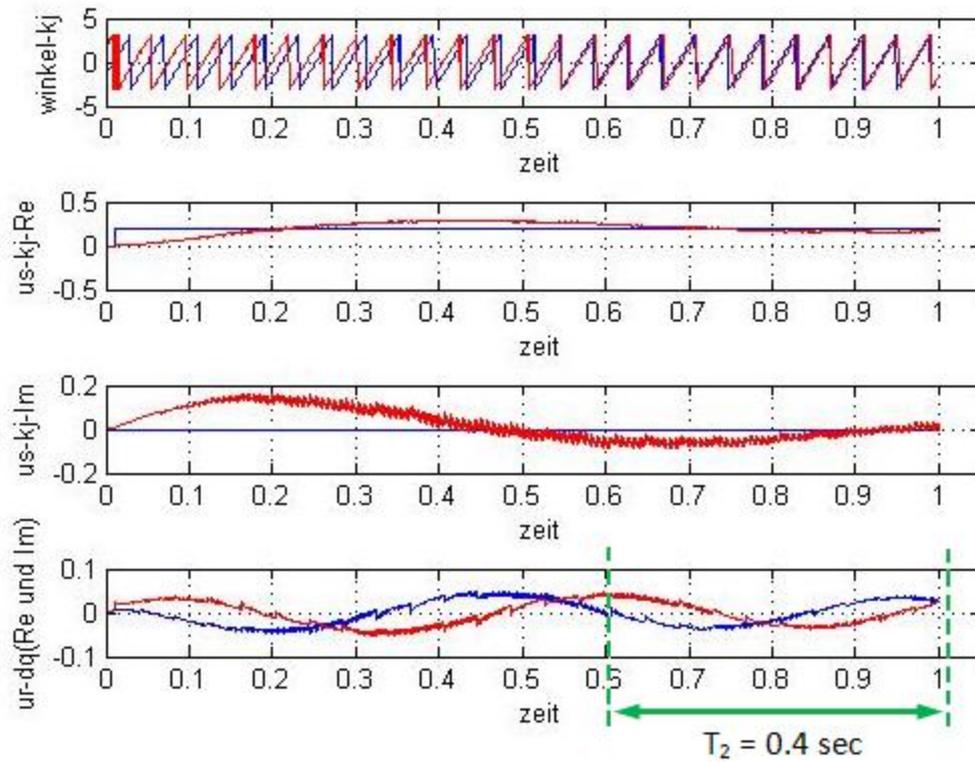


Abbildung 5.1: Statorspannungswinkelgeschwindigkeit, Statorspannung (Realteil und Imaginärteil) und Rotorspannung (Real- und Imaginärteil) mit  $|\underline{u}_{ab,soll}| = 0.2$ ,  $\omega_{ab,soll} = 0.5$ ,  $\omega_m = 0.45$  - Leerlauf

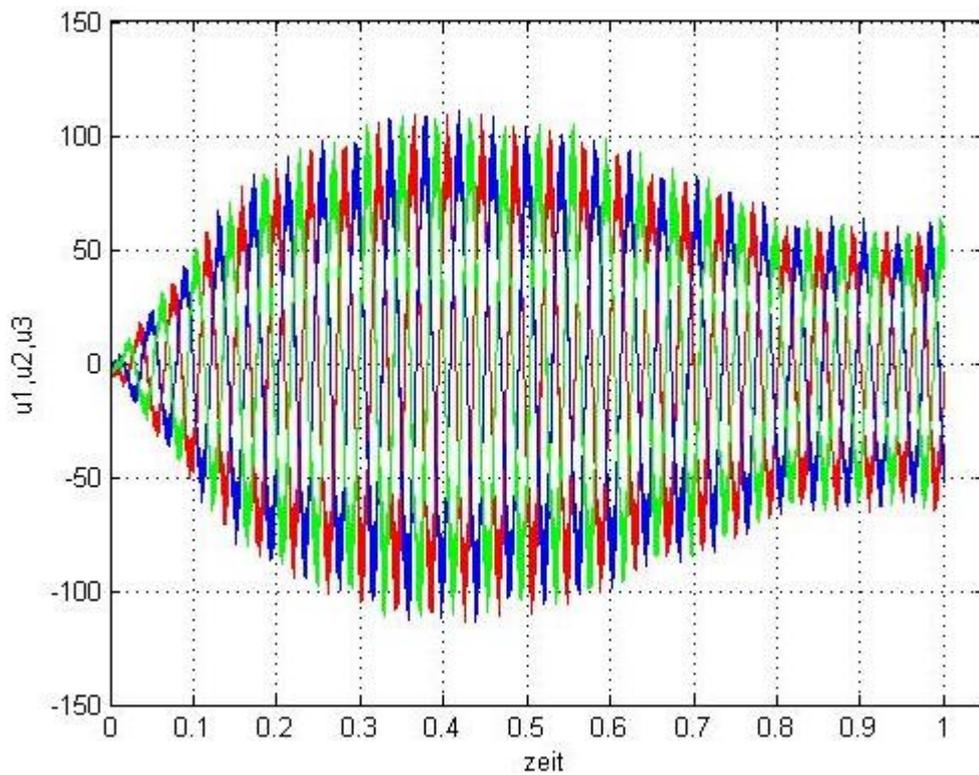


Abbildung 5.2: Statorspannungen[V] mit  $|\underline{u}_{ab,soll}| = 0.2$ ,  $\omega_{ab,soll} = 0.5$ ,  $\omega_m = 0.45$  - Leerlauf

## 5.2 Messung 2

Bei dieser Messung wird jedem Strang der drei Statoranschlüsse ein zusätzlicher Widerstand  $R_{\text{Last}} = 20 \Omega$  angeschlossen. Die Maschine wird untersynchron mit  $\omega_m = 0.45$ , einer Spannung  $|\underline{u}_{ab,\text{soll}}| = 0.2$  und einer Sollwinkelgeschwindigkeit  $\omega_{ab} = 0.5$  geregelt. Im Vergleich mit dem Leerlauf gibt es in diesem Fall bei den Statorspannungen keine Schwingung da die Widerstände dämpfend wirken (Abbildung 5.4). Die Statorspannungswinkelgeschwindigkeit, Statorspannung (Realteil und Imaginärteil) und Rotorspannung (Real- und Imaginärteil) sind in Abbildung 5.3 zu sehen.

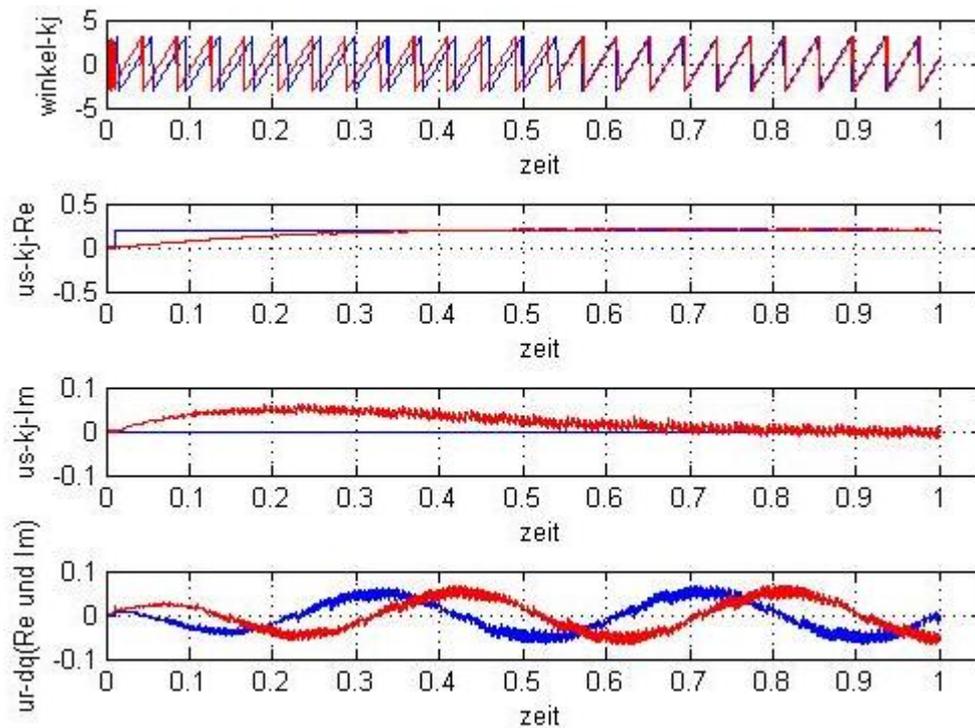


Abbildung 5.3: Die Statorspannungswinkelgeschwindigkeit, Statorspannung (Realteil und Imaginärteil) und Rotorspannung (Real- und Imaginärteil) mit  $|\underline{u}_{ab,\text{soll}}| = 0.2$ ,  $\omega_{ab,\text{soll}} = 0.5$ ,  $\omega_m = 0.45$  - symmetrische Last  $20 \Omega$  je Phase

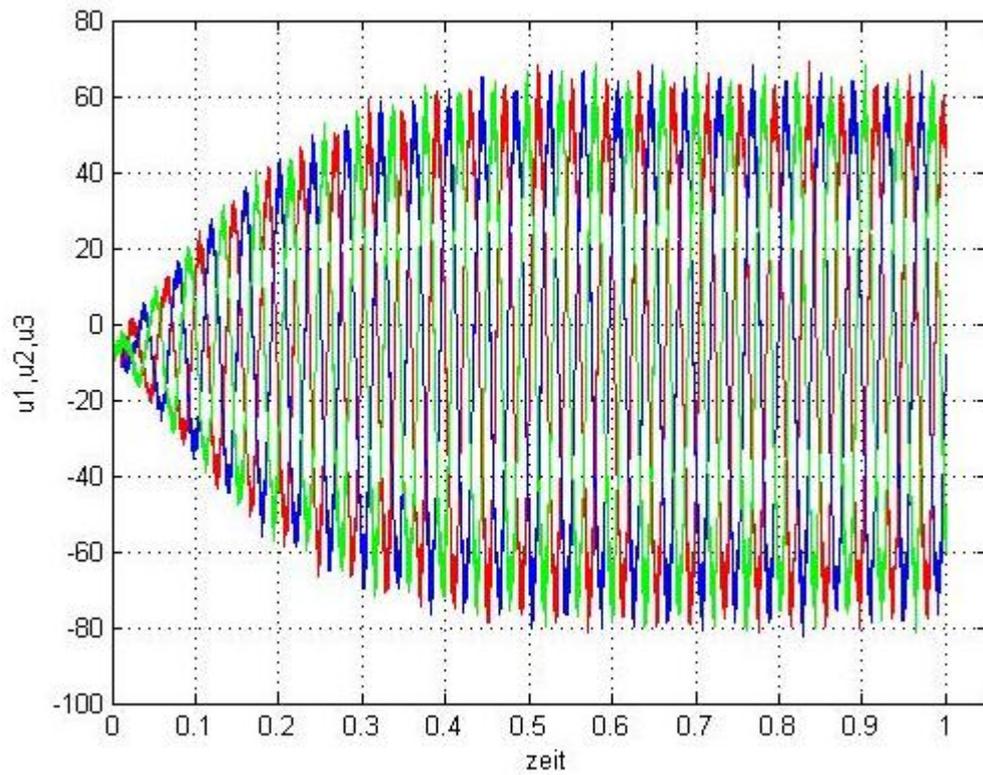


Abbildung 5.4: Statorspannungen[V] mit  $|\underline{u}_{ab,soll}| = 0.2$ ,  $\omega_{ab,soll} = 0.5$ ,  $\omega_m = 0.45$  - symmetrische Last  $20 \Omega$  je Phase

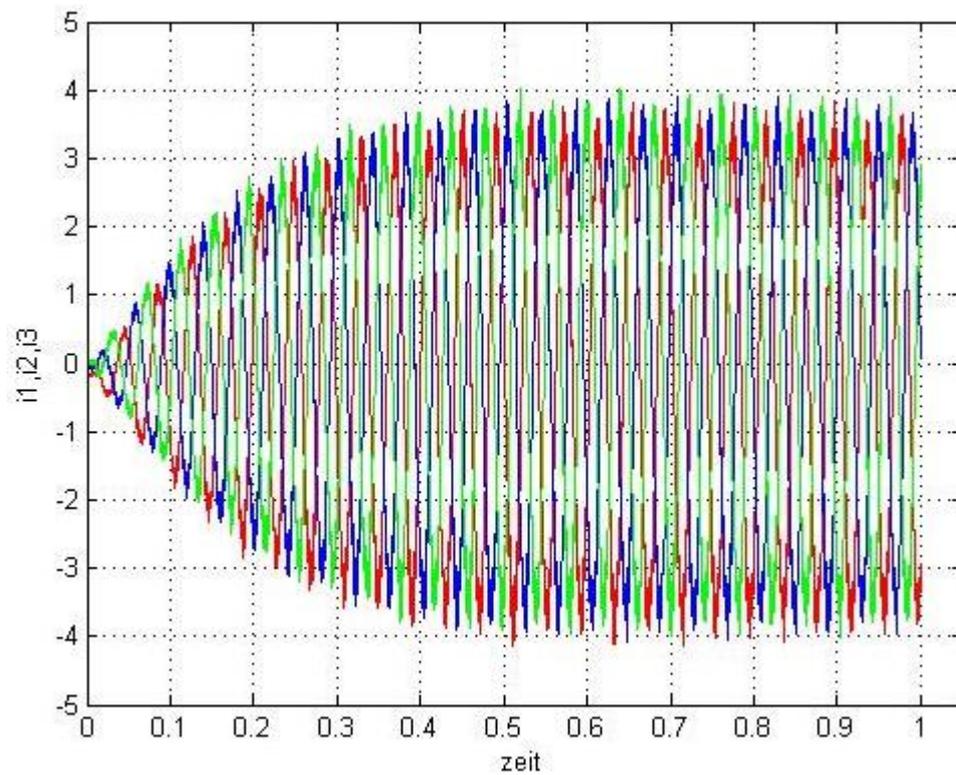


Abbildung 5.5: Statorströme[A] mit  $|\underline{u}_{ab,soll}| = 0.2$ ,  $\omega_{ab,soll} = 0.5$ ,  $\omega_m = 0.45$  - symmetrische Last  $20 \Omega$  je Phase

### 5.3 Messung 3

Bei der zweiten Messung wird die Phase  $u$  vor der Regelung abgeklemmt wobei die restlichen zwei Phasen mit je  $20 \Omega$  belastet sind. Die Maschine wird bei einer Sollwinkelgeschwindigkeit  $\omega_{ab,soll} = 0.5$  übersynchron ( $\omega_m = 0.55$ ) mit einer Statorsollspannung  $|\underline{u}_{ab,soll}| = 0.2$  betrieben. Schon nach 0.7 Sekunden erreichen die Istwerte der Statorspannung (Real- und Imaginärteil) ihren Sollwert und der Sollwinkel  $\gamma_{kj,soll}$  und Istwinkel  $\gamma_{kj,ist}$  überlappen sich (Abbildung 5.6). Die Stellgröße  $\underline{u}_r$  ist stark wellig weil die abgeklemmte Phase eine starke Asymmetrie darstellt (Abbildung 5.6).

Da die Phase  $u$  abgeklemmt wurde, beträgt der Strom  $I_{s,u}$  Null. Aus:

$$I_{s,u} + I_{s,v} + I_{s,w} = 0 \quad (5.3)$$

mit  $I_{s,u} = 0$  folgt:

$$I_{s,v} = -I_{s,w} \quad (5.4)$$

Die Ströme sind in Abbildung 5.8 zu sehen.

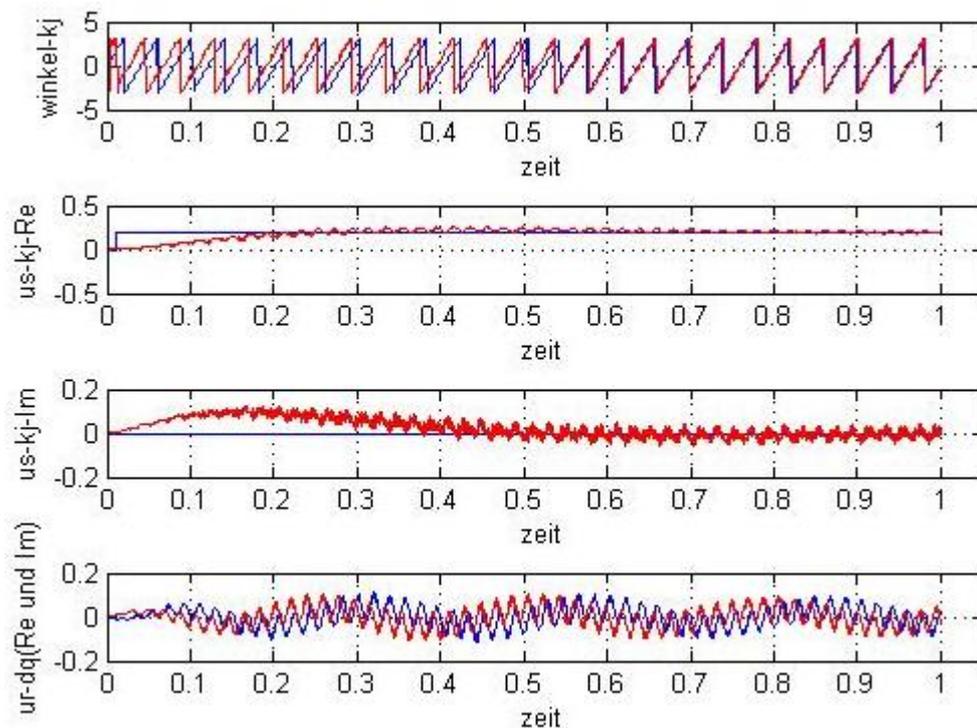


Abbildung 5.6: Die Statorspannungswinkelgeschwindigkeit, Statorspannung (Realteil und Imaginärteil) und Rotorspannung (Real- und Imaginärteil) mit  $|\underline{u}_{ab,soll}| = 0.2$ ,  $\omega_{ab,soll} = 0.5$ ,  $\omega_m = 0.55$  - Phase  $u$  abgeklemmt

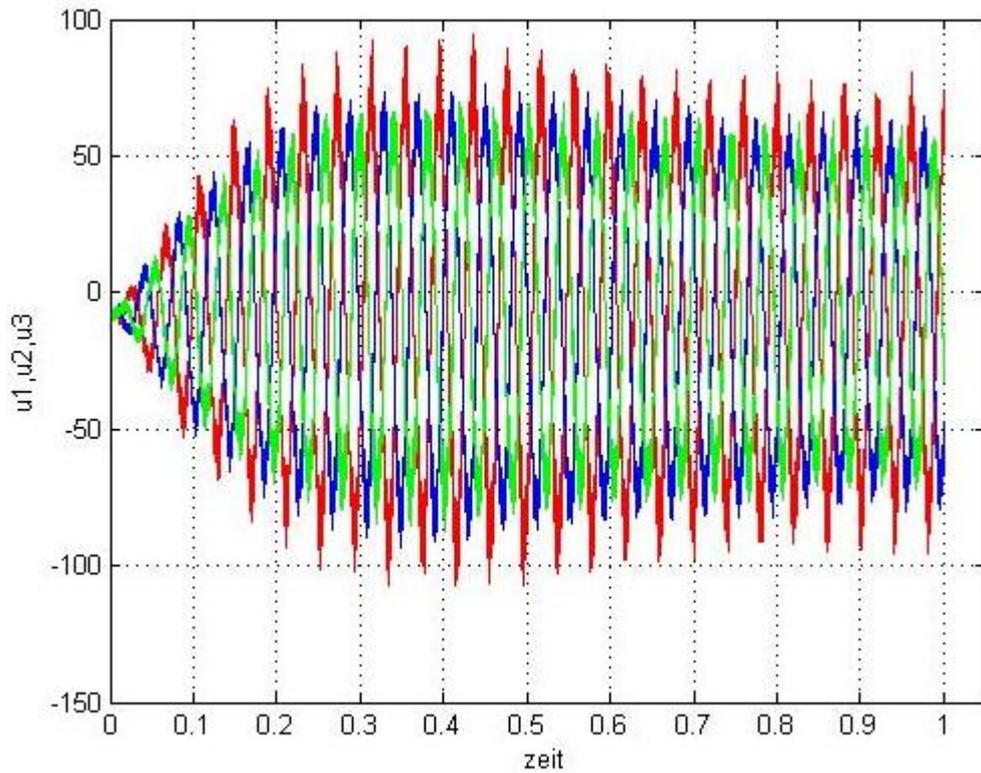


Abbildung 5.7: Statorspannungen[V] mit  $|\underline{u}_{ab,soll}| = 0.2$ ,  $\omega_{ab,soll} = 0.5$ ,  $\omega_m = 0.55$  - Phase  $u$  abgeklemt

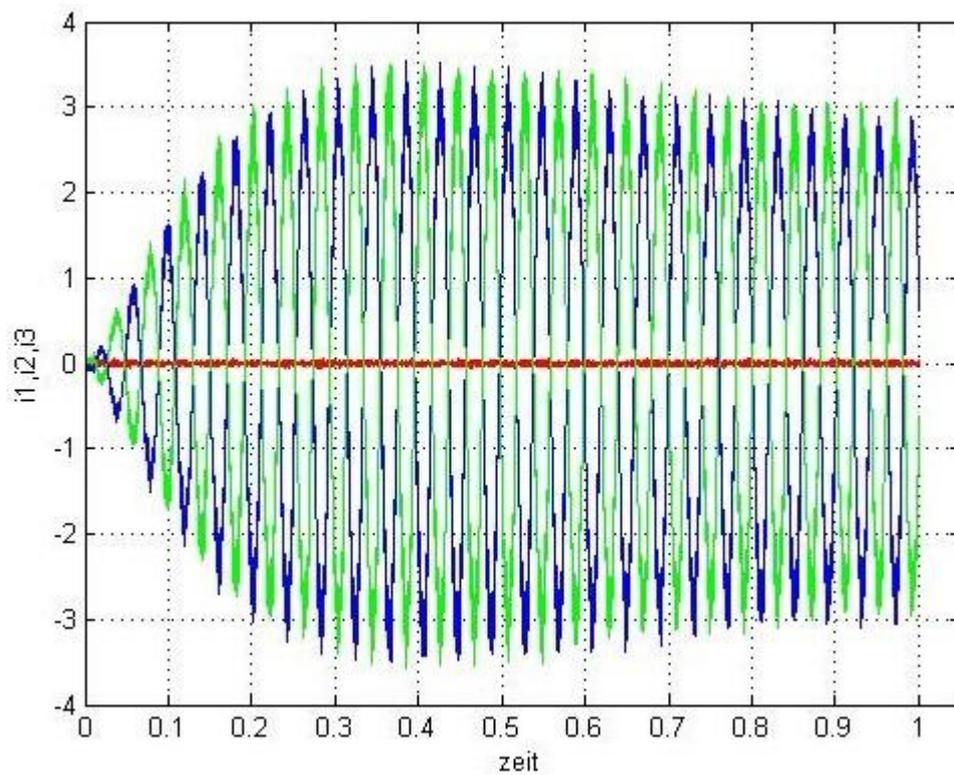


Abbildung 5.8: Statorströme[A] mit  $|\underline{u}_{ab,soll}| = 0.2$ ,  $\omega_{ab,soll} = 0.5$ ,  $\omega_m = 0.55$  - Phase  $u$  abgeklemt

## 6 THEORIE ZUR FEHLERERKENNUNG

Der zweite Teil dieser Diplomarbeit befasst sich mit der Erkennung von statorseitigen Asymmetrien der DASM.

Die umrichter gespeisten drehzahlvariablen Maschinen gehören heutzutage zum Standard in Industrieanwendungen. Ihre Dynamik verdanken sie den weitvorgestrittenen feldorientierten Regelungskonzepten. Wegen ihres hochdynamischen Verhaltens ist die Fehleranfälligkeit solcher Betriebe auch sehr hoch. Um die Wartungskosten, oder einen kompletten Ausfall zu vermeiden ist daher eine frühzeitige Erkennung und Beseitigung der Fehler schon in Entstehungsphase erwünscht.

In Kapitel 1 wurde schon erwähnt dass die häufigsten Fehlerarten bei elektrischen Maschinen Rotor-, Stator- und Exzentritätsfehler (Lagerfehler) sind. In der Literatur gibt es eine Vielzahl von Methoden zur Fehlererkennung. Sie lassen sich in vier Kategorien unterteilen:

„Frequenzanalyse“: Diese Verfahren basieren auf der Überlegung, dass sich jeder Fehler in einer Maschine in spezifischen Fehlerfrequenzen der Klemmengrößen äußert. Der Vorteil ist das aufgrund der bestehenden Strom/Spannungserfassung und Verarbeitungshardware die Implementierung einfach ist und es keinen Eingriff in die Regelung gibt. Die Nachteile sind die sehr aufwendigen Algorithmen zur Frequenzanalyse sowie Beschränkung bezüglich Dynamik, da für die Frequenzbildung sich nur langsam ändernden Größen vorausgesetzt sind [24].

„Modelvergleich“: Bei diesen Verfahren werden die Maschinengleichungen benützt um Modelle mit unterschiedlichen Eingangsgrößen aufzustellen. Aus einem Vergleich der aus unterschiedlichen Modellen berechneten Zustandsgrößen wird dann auf eine Asymmetrie geschlossen. Im Vergleich mit Frequenzanalyseverfahren hat dieses Verfahren weniger Probleme bei dynamischen oder transienten Betrieb, lässt sich besser an den Umrichterbetrieb anpassen und der Rechenaufwand wird geringer. Andererseits ist eine genaue Kenntnis einiger Maschinenparameter nötig und die direkte Integration in Umrichter/Messstruktur ist nur teilweise möglich [24].

„Direkte Zeitbereichsmessung“: Bei diesen Verfahren werden die Zeitverläufe einzelner Signale direkt im Zeitbereich ausgewertet und ein Fehlerindikator zu berechnet. Es ist parameterunabhängig da kein Maschinenmodell nötig ist. Es ist für dynamischen als auch transienten Betrieb geeignet. Es zeigt hohe Empfindlichkeit gegenüber Fehlern in der Maschine [24].

„Zusatz Sensoren“: Mit Zusatz-Sensoren werden zusätzliche Messgrößen benötigt, die im Standardumrichter nicht vorhanden sind (Streufluss, ...). Die Sensoren liefern sehr genaue Information über Fehlerzustände. Der Nachteil ist das die Integration in die bestehende Umrichter/Messstruktur nur durch Umbau möglich ist [24].

Die Asymmetrien während dem Versuch entstehen entweder durch asymmetrische Belastungen oder durch Fehler in der Statorwicklung. Die Methode zur Fehlerdetektion beruht auf INFORM Verfahren („Indirekte Flussfassung durch Online Reaktanzmessung“ / „Indirect Flux detection by Online Reactance Measurement“). Der Grundgedanke ist, dass eine Abweichung vom symmetrischen Fall im transienten Streufluss erkannt werden kann. Der große Vorteil ist es, dass die Detektion online erfolgt und es keine zusätzlichen Sensoren nötig sind außer denen, die schon im Umrichter vorhanden sind. In der vorliegenden Arbeit werden statorseitige Asymmetrien untersucht. Durch Einbringen von zusätzlichen Induktivitäten und Widerständen in den Phasen des Stators wird ein Fehlerfall simuliert. Damit erfolgt die Fehlersimulation ohne Eingriff in die Statorwicklung, womit eine zerstörungsfreie Untersuchung ermöglicht wird.

## 6.1 Theorie zur Messung der transienten Reaktanz

Wie in der Einleitung erwähnt ist es die Aufgabe die transiente Reaktanz zu bestimmen. Die Zwischenkreisspannung des Umrichters wird abwechselnd in Form von kurzen positiven und negativen Spannungsimpulsen in die drei Richtungen der Rotorwicklung angelegt. Dabei wird der Anstieg der Stromantwort an den jeweiligen Strängen gemessen. Diese Stromantwort beinhaltet die Information über vorhandene Asymmetrien. Bei einer symmetrischen DASM gilt die gewöhnliche Rotorspannungsgleichung:

$$\underline{u}_r = \underline{i}_r \cdot r_r + \frac{\partial \psi_r}{\partial \tau} = \underline{i}_r \cdot r_r + l \cdot \frac{\partial \underline{i}_r}{\partial \tau} + \frac{\partial \psi_s}{\partial \tau} \quad (6.1)$$

Der Spannungsabfall wird durch den Rotorwiderstand, die Streuinduktivität und die Rotorflussverkeftung beeinflusst [6]. In der Gleichung (6.1) ist  $l$  die Streuinduktivität. Beim Anlegen von einem Spannungspuls wird der Hauptspannungsabfall im ersten Augenblick

durch  $l \cdot \frac{\partial \underline{i}_r}{\partial \tau}$  und  $\frac{\partial \psi_s}{\partial \tau}$  bestimmt. Die Sequenz der Spannungspulse und die entsprechende Stromantwort ist in Abbildung 6.1 zu sehen. Der Spannungsschuss besteht aus einem Vorschuss, Hauptschuss und Nachschuss. Die zeitliche Spannungssumme ergibt Null. Dadurch wird wie in Abbildung 6.1 ersichtlich ist, eine symmetrierte Stromantwort erreicht womit die Messung und Identifizierung des Stromanstiegs zu bestimmten Zeitabständen einfacher ist [2]. Zur eindeutigen Identifizierung der Streuinduktivität muss der Einfluss des  $\frac{\partial \psi_s}{\partial \tau}$ -Anteils eliminiert werden. Um die Statorflussverkettung zu eliminieren, ist dazu ein Spannungspuls in der Gegenrichtung notwendig [6]. Die positiven und negativen Spannungspulse und ihre Stromantworten werden mit dem Index I und II beschriftet. Die Rotorstromraumzeiger und die Statorflussverkettungen können während der kurzen Pulse als unverändert angenommen werden ( $\underline{i}_{r,I} \approx \underline{i}_{r,II}$ ,  $\frac{\partial \psi_{s,I}}{\partial \tau} = \frac{\partial \psi_{s,II}}{\partial \tau}$ ).

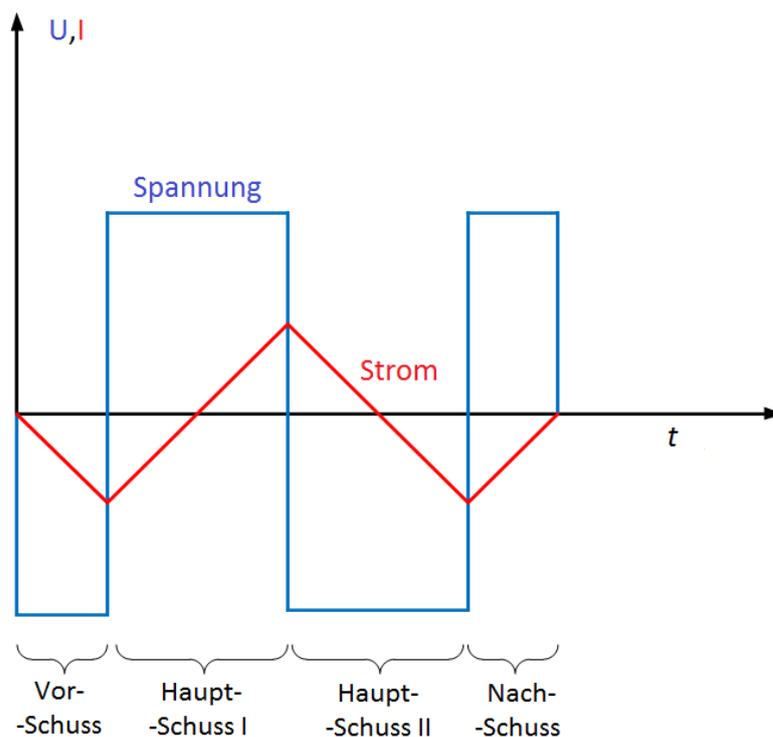


Abbildung 6.1: Abfolge der Spannungspulse und Stromantworten

Die zwei Zustände (positiver und negativer Spannungspuls) können nun gemäß:

$$\underline{u}_{r,I} = \underline{i}_{r,I} \cdot r_r + l \cdot \frac{\partial \underline{i}_{r,I}}{\partial \tau} + \frac{\partial \psi_{s,I}}{\partial \tau} \quad (6.2)$$

$$\underline{u}_{r,II} = \underline{i}_{r,II} \cdot r_r + l \cdot \frac{\partial \underline{i}_{r,II}}{\partial \tau} + \frac{\partial \psi_{s,II}}{\partial \tau} \quad (6.3)$$

angeschrieben werden. Die den Spannungspulsen  $\underline{u}_{r,I}$  und  $\underline{u}_{r,II}$  entsprechende Stromänderungszeiger sind dann:

$$\frac{\partial \underline{i}_{r,I}}{\partial \tau} = \frac{\partial i_{U,I}}{\partial \tau} + \frac{\partial i_{V,I}}{\partial \tau} \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}} + \frac{\partial i_{W,I}}{\partial \tau} \cdot e^{j\frac{4\pi}{3}} \quad (6.4)$$

$$\frac{\partial \underline{i}_{r,II}}{\partial \tau} = \frac{\partial i_{U,II}}{\partial \tau} + \frac{\partial i_{V,II}}{\partial \tau} \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}} + \frac{\partial i_{W,II}}{\partial \tau} \cdot e^{j\frac{4\pi}{3}} \quad (6.5)$$

Sie setzen sich aus den Stromänderungsraumzeiger der Phasen  $u$ ,  $v$  und  $w$  zusammen.

Subtrahiert man die Gleichung (6.2) von (6.3), folgt:

$$\underline{u}_{r,I} - \underline{u}_{r,II} = l \cdot \left( \frac{\partial \underline{i}_{r,I}}{\partial \tau} - \frac{\partial \underline{i}_{r,II}}{\partial \tau} \right) \quad (6.6)$$

Oder kurzgeschrieben:

$$\underline{u}_{r,I-II} = l \cdot \left( \frac{\partial \underline{i}_{r,I-II}}{\partial \tau} \right) \quad (6.7)$$

mit  $\underline{u}_{r,I-II} = \underline{u}_{r,I} - \underline{u}_{r,II}$  und  $\frac{\partial \underline{i}_{r,I-II}}{\partial \tau} = \frac{\partial \underline{i}_{r,I}}{\partial \tau} - \frac{\partial \underline{i}_{r,II}}{\partial \tau}$ .

Dadurch wird erreicht, dass nur die Streuinduktivität als einzige unbekannt, nicht direkt messbare und zu bestimmender Größe bleibt. Die Rotorspannungspulse sind durch den Umrichter eingeprengte Größen und konstant während der kurzen Pulsdauer. Der Stromanstieg ist messbar und ist als solcher bekannt. Die Messung des Stromanstiegs ist weiter unten genauer beschrieben.

Wenn eine Asymmetrie in der DASM vorhanden ist, ist der Wert der Streuinduktivität keine skalare Größe mehr. Das bedeutet, dass die Richtung der Differenzspannungsraumzeiger beim Schuss in eine Phasenrichtung und die Richtung der Differenzstromänderungsraumzeiger in gleicher Phase, nicht mehr übereinstimmen. Die Streuinduktivität ist dann zu einer komplexen Größe umzuwandeln:

$$\underline{u}_{r,I-II} = \underline{l} \cdot \left( \frac{\partial \underline{i}_{r,I-II}}{\partial \tau} \right) \quad (6.8)$$

Diese neu eingeführte komplexe Streuinduktivität kann nun aufgeteilt werden in einen Offsetanteil  $l_o$ , der die transiente Induktivität der symmetrischen DASM darstellt und einen durch die Asymmetrie in der Maschine verursachten veränderlichen Anteil  $\underline{l}_1$ :

$$\underline{l} = l_o + \underline{l}_1 \cdot e^{j2\gamma} \quad (6.9)$$

mit

$$l_o = \frac{l_{max} - l_{min}}{2} \quad (6.10)$$

$$\underline{l}_1 = l_1 \cdot e^{j2\gamma} = \frac{l_{max} - l_{min}}{2} \cdot e^{j2\gamma} \quad (6.11)$$

wie in Abbildung 6.2 dargestellt.

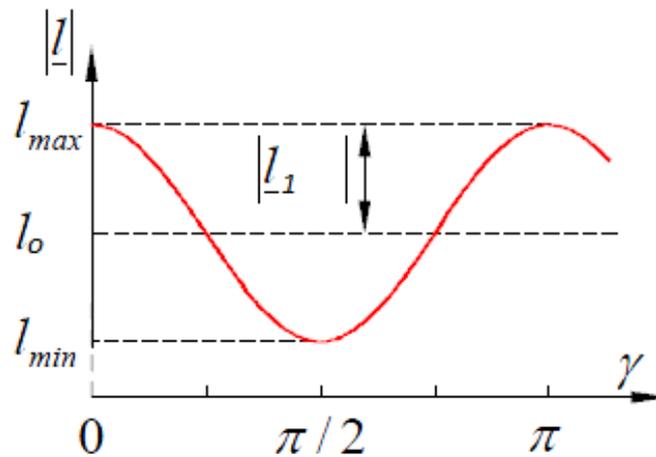


Abbildung 6.2: Komplexe Induktivität mit Offsetanteil  $l_o$  und veränderlichen Anteil  $\underline{l}_1$  [2]

Der Winkel  $\gamma$  zeigt bei der symmetrischen DASM in die Richtung der Sättigung, im asymmetrischen Fall jedoch in der Richtung der maximalen Induktivität innerhalb eines Polpaars. Wenn man die Gleichungen (6.10) und (6.11) in die Gleichung (6.8) einsetzt folgt nach einigen Rechenschritten [4]:

$$\underline{u}_{r,I-II} = l_o \cdot \left( \frac{\partial i_{r,I-II}}{\partial \tau} \right) + l_1 \cdot e^{j2\gamma} \cdot \left( \frac{\partial i_{r,I-II}^*}{\partial \tau} \right) \quad (6.12)$$

Um die Berechnung in Echtzeit zu vereinfachen, wird die transiente Induktivität invertiert. Die obige Gleichung kann dann angeschrieben werden als:

$$\left(\frac{\partial \underline{i}_{r,I-II}}{\partial \tau}\right) = y_0 \cdot \underline{u}_{r,I-II} + y_1 \cdot e^{j2\gamma} \cdot \underline{u}_{r,I-II}^* \quad (6.13)$$

Setzt man jetzt die Gleichung (6.12) in (6.13) und führt anschließend ein Koeffizientenvergleich durch, folgt für die Parameter  $y_0$  und  $y_1$ :

$$y_0 = \frac{l_0}{l_0^2 + l_1^2} = \frac{l_{max}^{-1} + l_{min}^{-1}}{2} \quad (6.14)$$

$$\underline{y}_1 = -\frac{l_1}{l_0^2 - l_1^2} \cdot e^{j\gamma} = \frac{l_{max}^{-1} + l_{min}^{-1}}{2} \cdot e^{j\gamma} = y_1 \cdot e^{j\gamma} \quad (6.15)$$

Invertiert man nun Gleichung (6.8), dann kann sie gemäß:

$$\frac{\partial \underline{i}_{r,I-II}}{\partial \tau} = \underline{y}_{I-II} \cdot \underline{u}_{r,I-II} \quad (6.16)$$

angeschrieben werden wobei die komplexe Admittanz als

$$\underline{y}_{I-II} = \frac{1}{\underline{l}} = y_0 + \underline{y}_1 \cdot e^{-2 \cdot j \cdot \arg(\underline{u}_{r,I-II})} \quad (6.17)$$

angeschrieben werden kann.

Die Spannung  $\underline{u}_{r,I}$  stellt den Zustand dar, bei dem die volle Zwischenkreisspannung an einer Phase angelegt wird. Die Spannung  $\underline{u}_{r,II}$  wird an dieselbe Phase mit umgekehrtem Vorzeichen angelegt. Im folgenden stellen die Indizes  $I$  und  $II$  die volle Zwischenkreisspannung an der Phase  $u$  (die Schaltzustände jeweils  $+u$  und  $-u$ ),  $III$  und  $IV$  die volle Zwischenkreisspannung an der Phase  $v$  (Schaltzustände  $+v, -v$ ) und  $V$  und  $VI$  die Zwischenkreisspannung an der Phase  $w$  (Schaltzustände  $+w, -w$ ). Die genauere Umsetzung dieser Schaltzustände an dem Umrichter wird im Kapitel 6.2 ausführlich beschrieben. Die Spannungsraumzeiger können nun wie folgt angeschrieben werden:

$$\underline{u}_{r,I} - \underline{u}_{r,II} = \underline{u}_{r,I-II} = u_{ZK} - (-u_{ZK}) = 2u_{ZK} \quad (6.18)$$

$$\underline{u}_{r,III} - \underline{u}_{r,IV} = \underline{u}_{r,III-IV} = u_{ZK} \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}} - u_{ZK} \cdot e^{j\frac{5\pi}{3}} = 2u_{ZK} \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad (6.19)$$

$$\underline{u}_{r,V} - \underline{u}_{r,VI} = \underline{u}_{r,V-VI} = u_{ZK} \cdot e^{j\frac{4\pi}{3}} - u_{ZK} \cdot e^{j\frac{7\pi}{3}} = 2u_{ZK} \cdot e^{j\frac{4\pi}{3}} \quad (6.20)$$

Das Einsetzen der Gleichungen in (6.16) liefert:

$$\frac{\partial \underline{i}_{r,I-II}}{\partial \tau} = 2 \cdot u_{ZK} \cdot (y_0 + y_1 \cdot e^{j\gamma}) \quad (6.21)$$

$$\frac{\partial \underline{i}_{r,III-IV}}{\partial \tau} = 2 \cdot u_{ZK} \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}} \cdot (y_0 + y_1 \cdot e^{j\gamma} \cdot e^{-j\frac{4\pi}{3}}) \quad (6.22)$$

$$\frac{\partial \underline{i}_{r,V-VI}}{\partial \tau} = 2 \cdot u_{ZK} \cdot e^{j\frac{4\pi}{3}} \cdot (y_0 + y_1 \cdot e^{j\gamma} \cdot e^{-j\frac{2\pi}{3}}) \quad (6.23)$$

Die drei Differenzstromänderungsraumzeiger sind in einem komplexen Koordinatensystem in Abbildung 6.3 dargestellt.

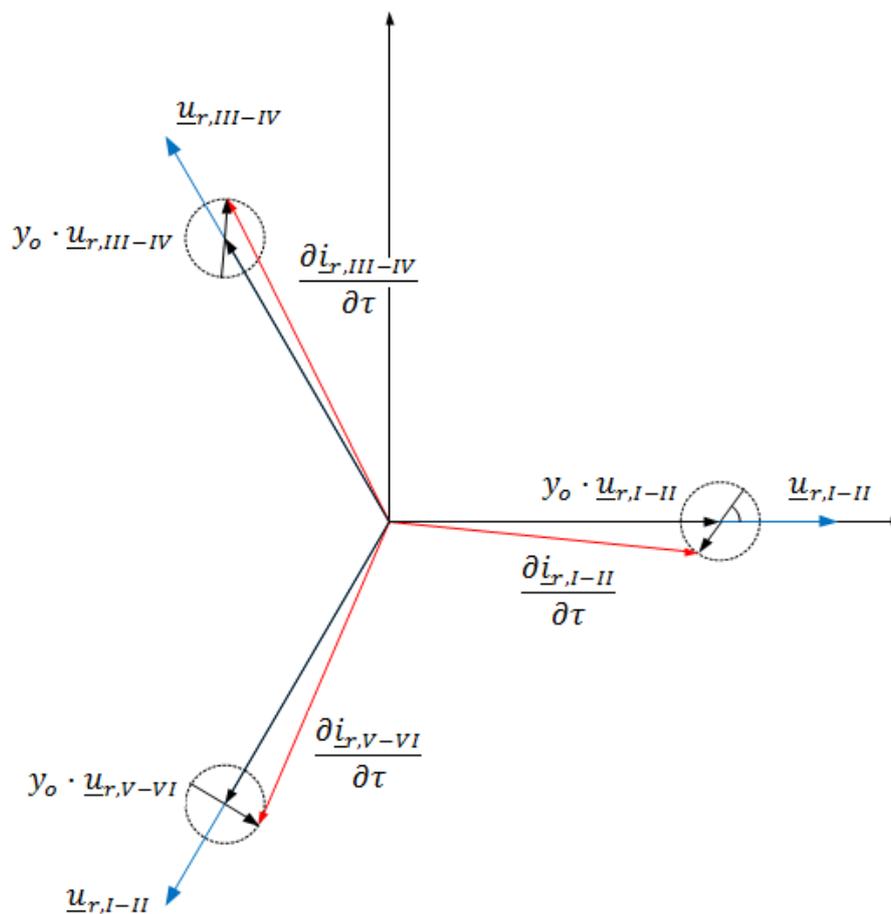


Abbildung 6.3: Differenzstromänderungsraumzeiger

Die Mittelpunkte der entsprechenden Trajektorien befinden sich in Richtungen der drei Phasen. Die Trajektorien werden (Abbildung (6.3)) bei einem mechanischen Umlauf zweimal umlaufen. Das ist der Fall bei einer einpolpaarigen Maschine. In diesem Fall ist der elektrische Winkel gleich dem mechanischen. Bei mehreren Polen werden die Kreise  $p$ -mal umlaufen ( $p$  ist die Anzahl der Pole). Durch eine Linearkombination der drei Differenzstromänderungsraumzeiger werden die Anteile  $y_0$  entfernt und als ein Raumzeiger angeschrieben (Gleichung (6.24)).

$$\underline{c} = \frac{\partial \underline{i}_{r,I-II}}{\partial \tau} + \frac{\partial \underline{i}_{r,III-IV}}{\partial \tau} \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}} + \frac{\partial \underline{i}_{r,V-VI}}{\partial \tau} \cdot e^{j\frac{4\pi}{3}} = 2 \cdot u_{ZK} \cdot 3 \cdot y_1 \cdot e^{j2\gamma} \quad (6.24)$$

Dieser Raumzeiger  $\underline{c}$  beinhaltet nun nur noch die in der Maschine vorhandenen Asymmetrien und kann in weiterer Folge als Fehlerindikator verwendet werden. Es ist zu beachten, dass bei der Ableitung des Raumzeigers  $\underline{c}$  der Faktor  $\frac{2}{3}$  bei der Bildung des Raumzeigers vernachlässigt wird.

Neben fehlerindizierten Asymmetrien gibt es in jeder Maschine, fehlerhaft oder nicht, auch inhärente Asymmetrien. Sie kommen durch diverse Maschineneigenschaften wie Sättigung, Nutung oder Anisotropie zustande. Diese überlagern sich im Raumzeiger  $\underline{c}$  können aber trotzdem identifiziert werden da sie alle ein deterministisches Verhalten aufweisen [6].

Die veränderliche Sättigung entlang des Umfangs verursacht die sättigungsabhängige Asymmetrie. Ihre Periode ist die zweifache der Grundwelle und ist somit einfach detektierbar [6] d.h. dass ihre Periodizität von der Anzahl der Polpaare abhängig ist. Ihre Amplitude ist vom eingestellten Fluss der DASM abhängig [6]. Die Nuten der DASM sind die Ursache für nutungsabhängige Asymmetrie. Sie ist  $n$ -wellig, wobei  $n$  der Anzahl der Nuten entspricht. Der transiente Fluss entsteht also unter anderem aus zwei deterministischen Komponenten.

## 6.2 Praktische Umsetzung der Messmethode

Der Raumzeiger  $\underline{c}$  dient, wie schon erwähnt, als Fehlerindikator für die Detektion von Asymmetrien in der DASM. In diesem Raumzeiger sind die Stromantworten der Spannungspulse in allen drei Phasen enthalten. Um den Raumzeiger  $\underline{c}$  bilden zu können braucht man also die Stromantworten auf die Spannungspulse in Richtung aller Phasen. Die Erfassung des Stromanstiegs während des Hauptschusses erfolgt zu genau zwei definierten Punkten. Aus den zwei Werten wird die Differenz gebildet, die eine tangentielle Annäherung des Stromanstiegs darstellt. Für diese Vorgehensweise wird jeweils ein Stromwandler in den

Phasen benötigt, wie es heute in modernen Antriebssystemen für die Regelung der Drehstrommaschine zum Standard gehört [4]. Diese Vorgehensweise ist in Abbildung 6.4 dargestellt. Der Spannungsschuss und die Stromanstiegsmessung erfolgt an der Phase  $u$ .

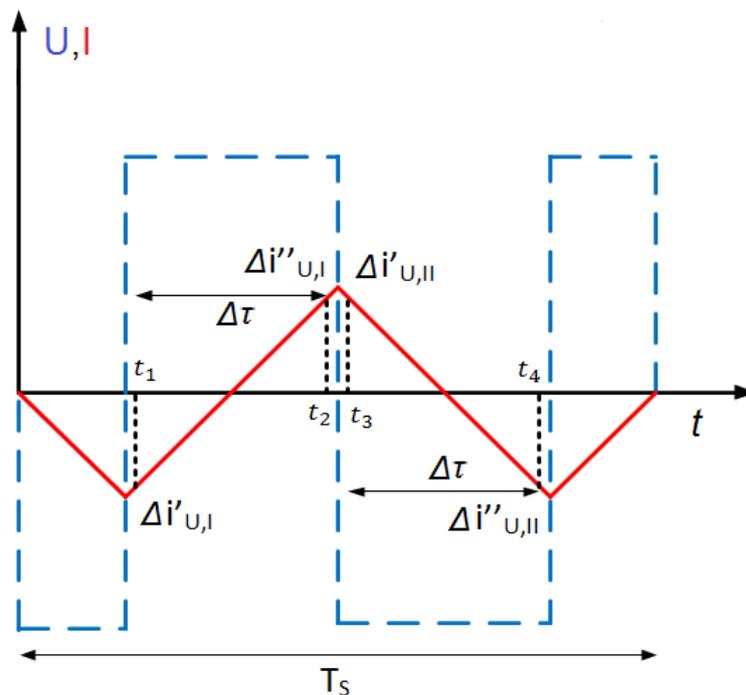


Abbildung 6.4: Spannungspulse und Stromanstiegsmessung an der Phase  $u$

Die DASM wird über PWM Zyklen (die Dauer eines Raumzeigermodulationszustandes) geregelt. Um die Messung durchführen zu können, muss die Regelung um einen PWM Zyklus unterbrochen werden. Es ist zu beachten, dass die Regelung nicht lange unterbrochen werden darf. Deswegen werden die Spannungspulse in den drei Richtungen nicht gleich hintereinander durchgeführt. Die Schussfolge wird durch die Variable „informrate“ in dSpace ControlDesk bestimmt, was weiter unten genauer beschrieben wird. Prinzipiell stellt sie ein Verhältnis zwischen den Regelungs- und Messzyklen ein. Wenn die Rate auf 10 gesetzt wird bedeutet es, dass zwischen zwei Spannungspulse (und zwei Stromanstiegsmessungen) 10 Regelungszyklen auftreten (Abbildung 6.5). Einen kompletten Raumzeiger  $\underline{c}$  bekommt man also erst nach 33 PWM-Zyklen (3 Messzyklen mit je 10 Regelungszyklen).

Die Spannungspulse in Richtung der drei Phasen erfolgen durch das Anlegen der Zwischenkreisspannung an den jeweiligen Phasen der Maschine. Die Schaltzustände des Umrichters, die anliegenden Spannungen an den drei Phasen und die dementsprechenden Raumzeigerwerte sind in der Tabelle 6.1 zusammengefasst.

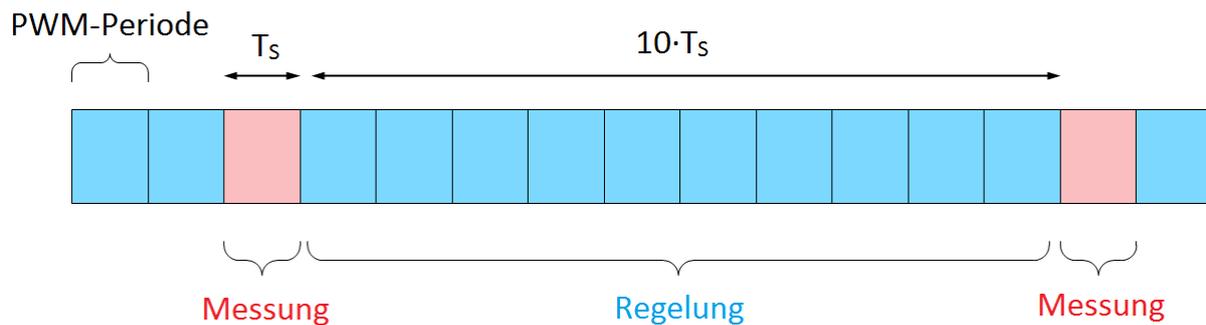


Abbildung 6.5: Regelung- und Messungsabfolge bei „informrate“=10

$$\underline{u}_{r,I} = (u_u + \underline{a} \cdot u_v + \underline{a}^2 \cdot u_w) = u_{ZK} \cdot e^{j \cdot 0} = \left( \frac{2}{3} \cdot u_{ZK} - \frac{1}{3} \cdot u_{ZK} \cdot \underline{a} - \frac{1}{3} \cdot u_{ZK} \cdot \underline{a}^2 \right) \quad (6.25)$$

Der Schaltzustand (0,1,1) entspricht einem Spannungsschuss in negativer  $u$ -Richtung. Der Spannungsraumzeiger lautet:

$$\underline{u}_{r,II} = (u_u + \underline{a} \cdot u_v + \underline{a}^2 \cdot u_w) = u_{ZK} \cdot e^{j \cdot \pi} = \left( -\frac{2}{3} \cdot u_{ZK} + \frac{1}{3} \cdot u_{ZK} \cdot \underline{a} + \frac{1}{3} \cdot u_{ZK} \cdot \underline{a}^2 \right) \quad (6.26)$$

Durch die Differenzbildung von  $\underline{u}_{r,I}$  und  $\underline{u}_{r,II}$  folgt der Differenzspannungsraumzeiger  $\underline{u}_{r,I-II}$  in (6.27).

$$\underline{u}_{r,I-II} = \underline{u}_{r,I} - \underline{u}_{r,II} = u_{ZK} \cdot e^{j \cdot 0} - u_{ZK} \cdot e^{j \cdot \pi} = 2 \cdot u_{ZK} \quad (6.27)$$

Bei der Bildung des Raumzeigers  $\underline{c}$  wird jedoch, wie schon erwähnt, der Faktor  $\frac{2}{3}$  vermieden. Ein Raumzeiger des Spannungsschusses in Richtung der Phase  $u$  bedeutet, dass die Spannungsverteilung an den Phasen wie in Abbildung 6.6 verteilt ist. Damit entspricht die Spannungsamplitude an der Phase  $u$  nur  $\frac{2}{3}$  der Zwischenkreisspannung, was in Abbildung 6.6 dargestellt ist.

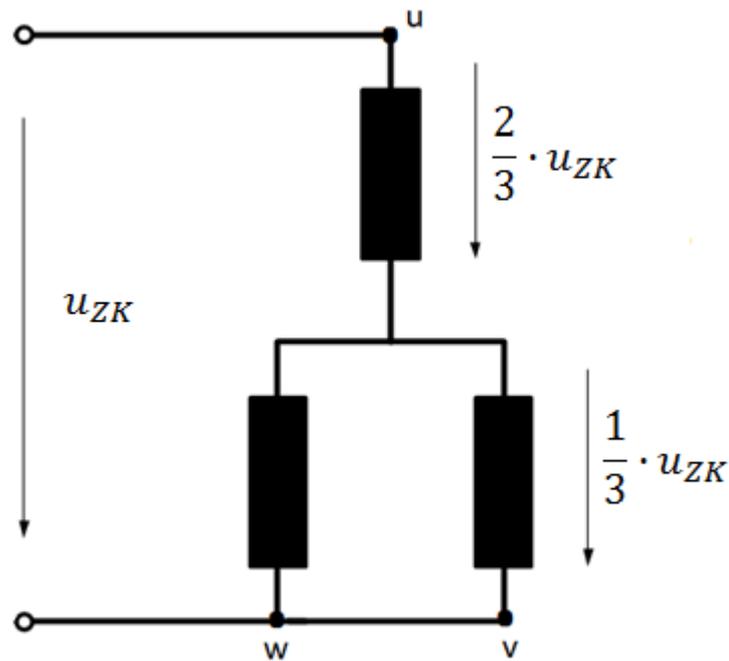


Abbildung 6.6: Verteilung der Spannungen an den Rotorsträngen bei der Spannungsschuss in die Richtung Phase  $u$

Eine Spannungsschussfolge besteht aus einem Vorschuss, Hauptschuss I, Hauptschuss II (in entgegengesetzter Richtung von Hauptschuss I) und Nachschuss. Während eines Spannungsschusses in der Richtung einer der drei Phasen wird die Stromantwort auf allen drei Phasen ermittelt. Dafür wird die Phase  $u$  näher betrachtet. Wenn die Zwischenkreisspannung in dieser Richtung an der Phase  $u$  angelegt ist, wird während des Hauptschusses I die Stromantwort in allen Phasen zu den Zeitpunkten  $t_1$  und  $t_2$  gemessen und für die ADC-Eingänge vorbereitet. Die Messung des Stromanstiegs in den drei Phasen während des Hauptschusses II erfolgt zu den Zeitpunkten  $t_3$  und  $t_4$  (Abbildung 6.4). Es wird angenommen, dass zu dieser Zeit die Einschwingvorgänge abgeklungen sind. Die Stromanstiege in den drei Phasen können dann für den Hauptschuss I nach Gleichungen (6.28), (6.29) und (6.30) angeschrieben werden.

$$\Delta i_{U,I} = \Delta i''_{U,I} - \Delta i'_{U,I} \quad (6.28)$$

$$\Delta i_{V,I} = \Delta i''_{V,I} - \Delta i'_{V,I} \quad (6.29)$$

$$\Delta i_{W,I} = \Delta i''_{W,I} - \Delta i'_{W,I} \quad (6.30)$$

Analoges gilt auch für den Hauptschuss II (Index II) als auch für die Stromanstiege bei den Spannungspulse in der Richtung der Phase  $v$  (Index III und IV) und Phase  $w$  (Index V und VI). Somit können laut Gleichungen (6.4) und (6.5) die Stromänderungszeiger für den Spannungsschuss in der Richtung der Phase  $u$  (Hauptschuss I und II) folgendermaßen angeschrieben werden:

$$\Delta \underline{i}_{r,I} = \Delta i_{U,I} + \Delta i_{V,I} \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}} + \Delta i_{W,I} \cdot e^{j\frac{4\pi}{3}} \quad (6.31)$$

$$\Delta \underline{i}_{r,II} = \Delta i_{U,II} + \Delta i_{V,II} \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}} + \Delta i_{W,II} \cdot e^{j\frac{4\pi}{3}} \quad (6.32)$$

Der Differenzstromänderungsraumzeiger der Schussfolge in Richtung  $+u$  und  $-u$  kann nun angeschrieben werden als:

$$\Delta \underline{i}_{r,I-II} = \Delta \underline{i}_{r,I} - \Delta \underline{i}_{r,II} \quad (6.33)$$

Und analog für die restlichen zwei Phasen:

$$\Delta \underline{i}_{r,III-IV} = \Delta \underline{i}_{r,III} - \Delta \underline{i}_{r,IV} \quad (6.34)$$

$$\Delta \underline{i}_{r,V-VI} = \Delta \underline{i}_{r,V} - \Delta \underline{i}_{r,VI} \quad (6.35)$$

Der Raumzeiger  $\underline{c}$  aus Gleichung (6.24) lautet somit:

$$\underline{c} \approx \frac{\Delta \underline{i}_{r,I-II}}{\Delta \tau} + \frac{\Delta \underline{i}_{r,III-IV}}{\Delta \tau} \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}} + \frac{\Delta \underline{i}_{r,V-VI}}{\Delta \tau} \cdot e^{j\frac{4\pi}{3}} \approx 2 \cdot u_{ZK} \cdot 3 \cdot y_1 \cdot e^{j2\gamma} \quad (6.36)$$

Wobei die Näherung  $\frac{\partial \underline{i}_r}{\partial \tau} = \frac{\Delta \underline{i}_r}{\Delta \tau}$  gilt. Dabei ist  $\Delta \tau = t_2 - t_1 = t_4 - t_3$ .

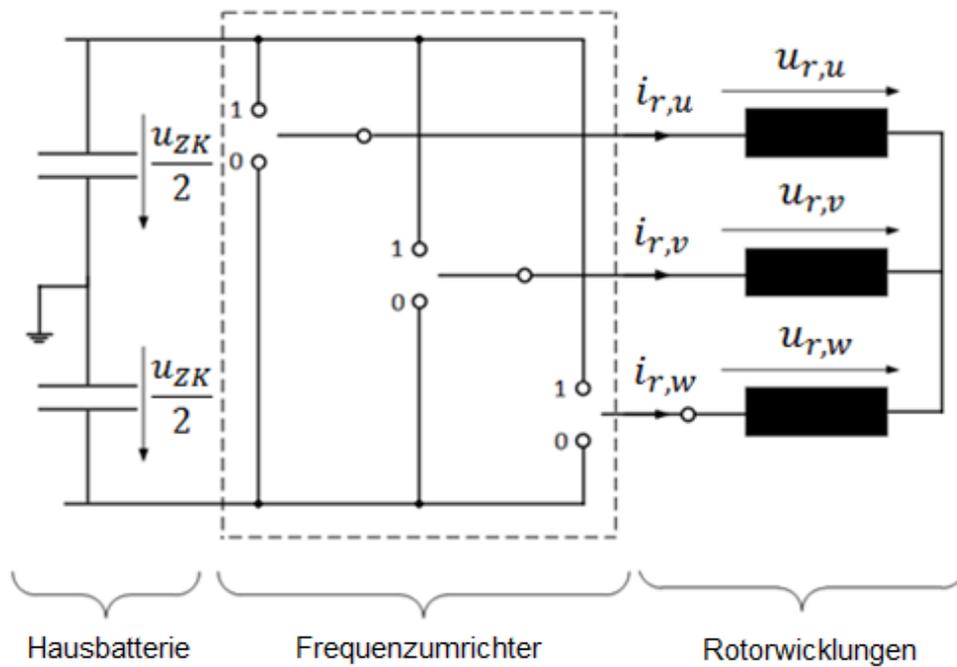


Abbildung 6.7: Schematische Anordnung mit Hausbatterie, Frequenzumrichter und Rotorwicklungen bei Regelung und Spannungspulserzeugung

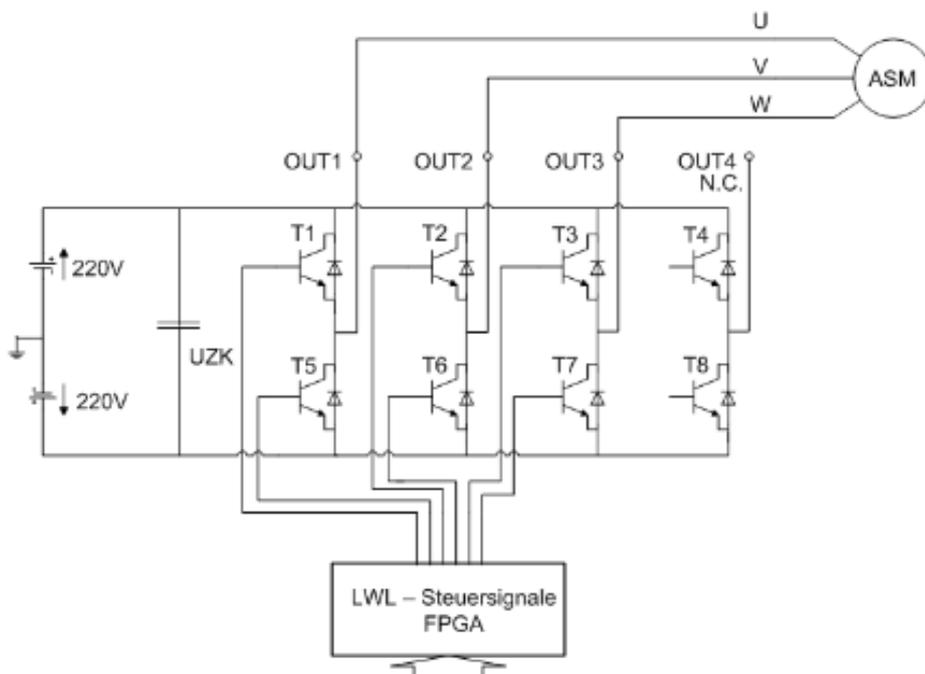


Abbildung 6.8: Schaltbild Frequenzumrichter [14]

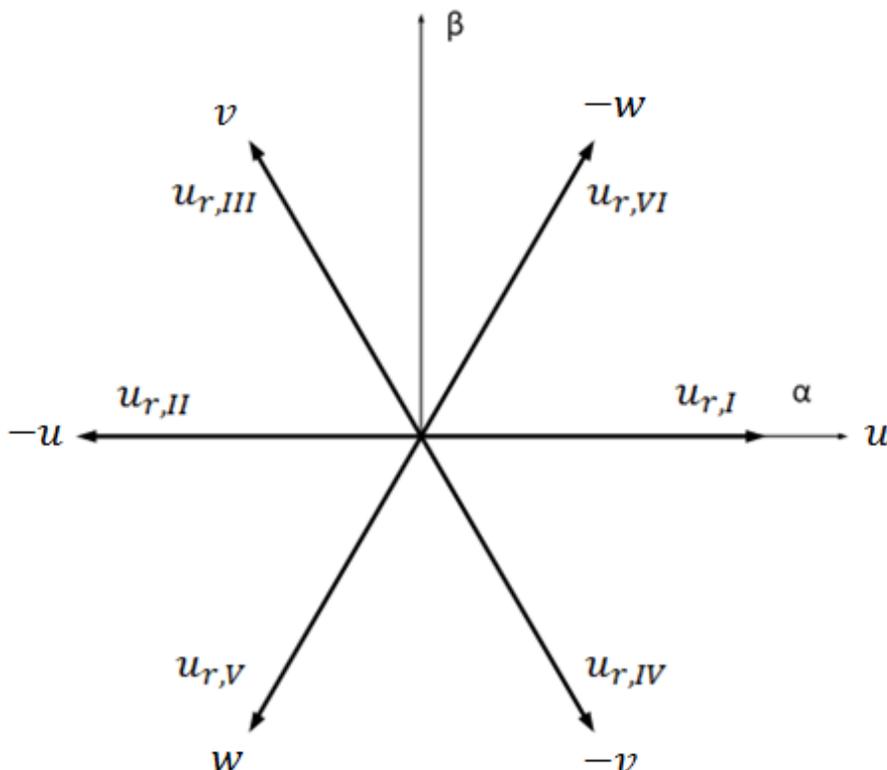


Abbildung 6.9: Die Spannungspulse in Richtung der drei Phasen

Schalter-zustände	Phasen-Spannung $u_u$	Phasen-Spannung $u_v$	Phasen-Spannung $u_w$	Raumzeiger
1,0,0	$+\frac{2}{3} \cdot u_{ZK}$	$-\frac{1}{3} \cdot u_{ZK}$	$-\frac{1}{3} \cdot u_{ZK}$	$u_{r,I} = u_{ZK} \cdot e^{j0}$
1,1,0	$+\frac{1}{3} \cdot u_{ZK}$	$+\frac{1}{3} \cdot u_{ZK}$	$-\frac{2}{3} \cdot u_{ZK}$	$u_{r,III} = u_{ZK} \cdot e^{j\frac{\pi}{3}}$
0,1,0	$-\frac{1}{3} \cdot u_{ZK}$	$+\frac{2}{3} \cdot u_{ZK}$	$-\frac{1}{3} \cdot u_{ZK}$	$u_{r,V} = u_{ZK} \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}}$
0,1,1	$-\frac{2}{3} \cdot u_{ZK}$	$+\frac{1}{3} \cdot u_{ZK}$	$+\frac{1}{3} \cdot u_{ZK}$	$u_{r,II} = u_{ZK} \cdot e^{j\pi}$
0,0,1	$-\frac{1}{3} \cdot u_{ZK}$	$-\frac{1}{3} \cdot u_{ZK}$	$+\frac{2}{3} \cdot u_{ZK}$	$u_{r,IV} = u_{ZK} \cdot e^{j\frac{4\pi}{3}}$
1,0,1	$+\frac{1}{3} \cdot u_{ZK}$	$-\frac{2}{3} \cdot u_{ZK}$	$+\frac{1}{3} \cdot u_{ZK}$	$u_{r,VI} = u_{ZK} \cdot e^{j\frac{4\pi}{3}}$

Tabelle 6.1: Schaltzustände des Umrichters und den entsprechende Phasenspannungen; Raumzeigerwerte in verschiedenen Schussrichtungen

Zur Auswertung der Ergebnisse werden die Trajektorien oder das Phasenspektrum des Raumzeigervektors  $\underline{c}$  ausgewertet. Um eine zuverlässige Interpretation und Aussage über den Fehler treffen zu können, muss die beschriebene Messung über den gesamten Umfang des

Rotors bei verschiedenen Rotorstellungen wiederholt werden [4]. An jeder Rotorstellung müssen die transienten Stromantworten auf die Spannungssprünge aller drei Schussfolgen in den unterschiedlichen Phasen ausgewertet werden [4]. Die drei somit gewonnenen Messwerte für eine Rotorstellung können dann zu einem Messpunkt der Trajektorie des Raumzeigers  $\underline{c}$  zusammengesetzt werden [4]. Der Messprozess ist anschaulich in der Abbildung 6.10 dargestellt. Die Anzahl der Messungen bestimmt die Auflösung der Messreihe. Der Vektor  $\underline{c}$  wird durch die diskrete Fourier-Transformation dargestellt. Dadurch können die ausgeprägten Harmonischen des Frequenzspektrums zur Analyse herangezogen werden. Um die effizienten Fast-Fourier-Transformation anwenden zu können, ist es wünschenswert dass die Anzahl der Messungen ein Vielfaches von  $2^n$  ist.

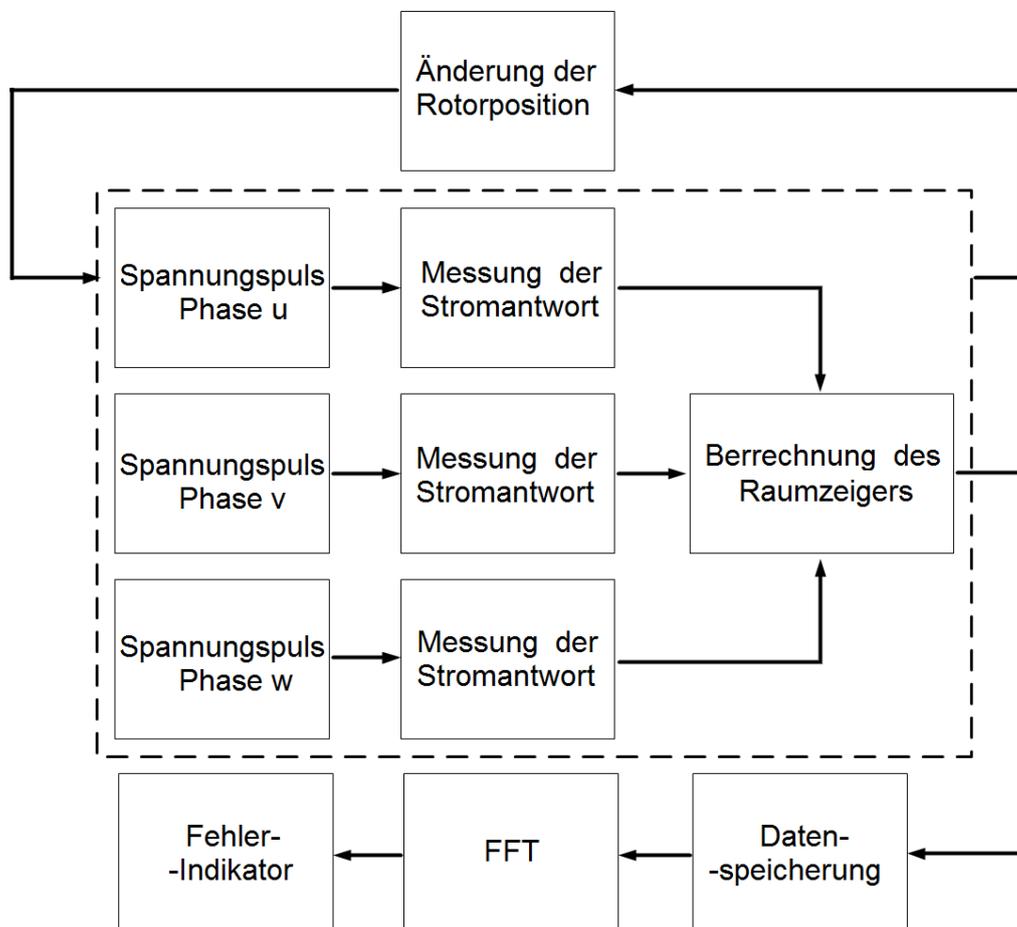


Abbildung 6.10: Blockdiagramm zur Bestimmung des Fehlerindikators [23]

Die Regelung während dessen die Fehleridentifikation durchgeführt wird, ist dieselbe kaskadierende Regelung wie im Kapitel 5. Über das dSpace-ControlDesk können die folgenden Parameter direkt eingetragen werden: die Verstärkungen der beiden PI-Reglern und die Spannungsbegrenzung der Stellgröße (Rotorspannung). Diese Parameter sind auch dieselben wie in Kapitel 5. Die Abtastzeit für die Messung wurde im LabView-Programm auf

400  $\mu\text{s}$  eingestellt. Die Eingabe des Betrages der Statorspannungssollwert, der Statorsollspannungswinkelgeschwindigkeit und der Parametern „Informrate“, „Arraysize“ und „Schranke“ (siehe unten) am dSpace-ControlDesk erfolgten automatisch über das MATLAB-Skriptfile (\*.m-file). Dieses m-File befindet sich im Anhang D.

- „Informrate“ - Dieser Parameter bestimmt die Anzahl der Regelungszyklen zwischen zwei Messungen.
- „Arraysize“ - Durch diesen Wert wird die Auflösung bestimmt, ist gleich bedeutend mit der Anzahl der Rotorpositionen an denen die Messung stattfindet.
- „Schranke“ - Dieser Parameter bestimmt die Winkeltoleranz von der die Rotorposition bei einer Messung abweichen kann.

## 7 DETEKTION VON ASYMMETRIEN

In diesem Kapitel werden die verschiedenen asymmetrischen Zustände der DASM durch die zuvor beschriebene Methode betrachtet. Im ersten Schritt wird angenommen, dass die DASM im symmetrischen Zustand ist. Die an den Statorwicklungen angeschlossene Induktivitäten und Widerstände werden verändert womit sich verschiedene asymmetrische Zustände ergeben. Das Auftreten und die Stärke der Asymmetrie werden durch die Messung der transienten Reaktanz erfasst und untersucht. Da die Fehler durch externer Beschaltung nur simuliert werden und die eigentliche Maschine als symmetrisch angenommen wird, wird der in Kapitel 6 als Fehlerindikator genannter Raumzeiger  $\underline{c}$  im weiteren Folge als Asymmetrieindikator bezeichnet.

Die Messung wird während der Regelung durchgeführt. Aus den gemessenen Werten werden die  $\underline{c}$  Vektoren gebildet. Die Anzahl der Messungen ist am dSpace-ControlDesk über den Parameter „Arraysize“ bestimmbar. Dies entspricht den verschiedenen Rotorpositionen und wurde in diesem Fall auf 256 gesetzt. Der Parameter „Informrate“ wurde zwischen 5 und 10 variiert, um die Messung eventuell zu beschleunigen. Der Parameter „Schranke“ war dabei 0.3.

Die Asymmetrien, die eingebaut wurden waren die folgenden:

- zusätzliche Widerstand an einer Phase
- kurzschlussnahes Verhalten (kleiner Widerstand zwischen zwei Phasen)
- abgeklemmte Phase
- unterschiedliche Induktivität an den Strängen

Vor Beginn der Fehlersimulation ist immer eine Messung als Referenzmessung vorzunehmen. Bei diesen Versuchen war immer eine symmetrische ohmsche Belastung an allen drei Statorsträngen (20  $\Omega$  je Stange) angelegt. Es wurden die Trajektorien und Spektren des  $\underline{c}$ -Vektors auf Asymmetrie untersucht.

## 7.1 Messergebnisse

### 7.1.1 Symmetrischer Fall

Im symmetrischen Fall wird angenommen, dass die Maschine fehlerfrei ist. Diese Messung entspricht einem technischen Fingerabdruck der Maschine. Alle anderen Ergebnisse werden mit dieser Referenzmessung verglichen. Wie schon erwähnt wird eine fehlerfreie Maschine angenommen die symmetrisch mit  $20 \Omega$  je Phase belastet ist. Die Regelung der Maschine am Prüfstand ist im Kapitel 5 beschrieben. Die Maschine wird untersynchron mit  $\omega_m = 0.25$  und  $\omega_{el} = 0.3$  betrieben. Die Ausgangssollspannung ist  $\underline{u}_s = 0.1$ . Die Trajektorie des Raumzeigers  $\underline{c}$  und ihr Spektrum sind in Abbildung 7.1 bzw. Abbildung 7.2 dargestellt.

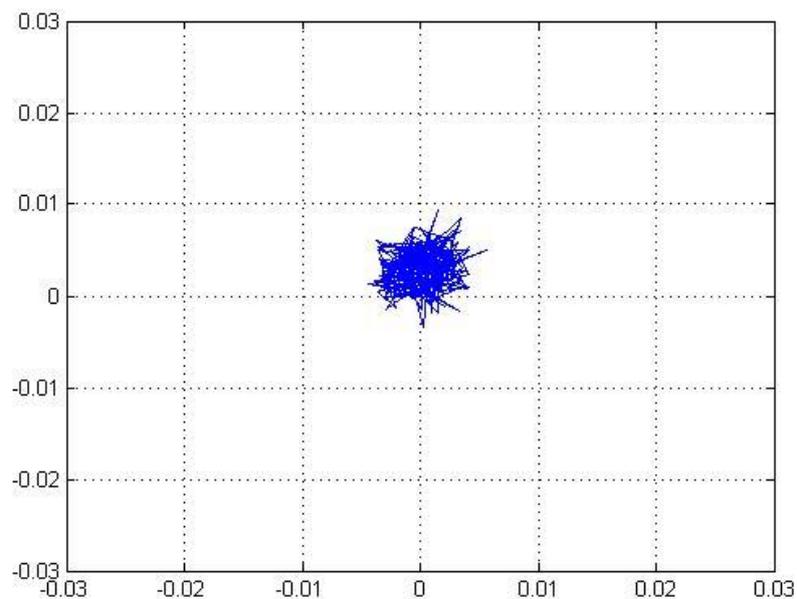


Abbildung 7.1: Trajektorie des Raumzeigers  $\underline{c}$  im symmetrischen Fall. Jede Phase ist mit  $20 \Omega$  belastet

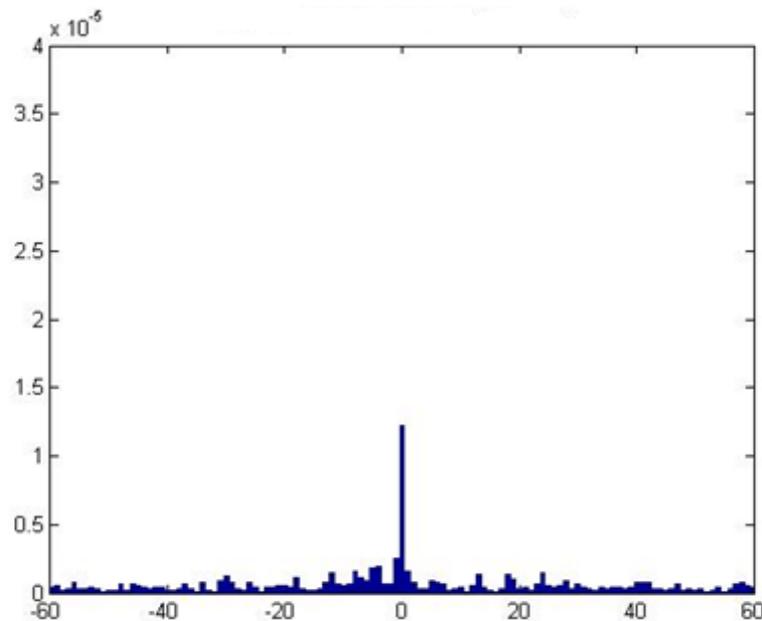


Abbildung 7.2: Spektrum des Raumzeigers  $\underline{c}$  im symmetrischen Fall. Jede Phase ist mit  $20 \Omega$  belastet

Dieser Fall entspricht der ungestörten Verteilung des Flusses entlang  $\gamma_{mech}$  (keine Asymmetrie wegen der regelmäßigen Verteilung des Flusses). Der Mittelpunkt der Trajektorie des Raumzeigers  $\underline{c}$  liegt nicht im Ursprung (0,0) (Abbildung 7.1). Diese Abweichung vom Ursprung ist die ausgeprägte Offset-Harmonische im Spektrum. Obwohl die Maschine fehlerfrei angenommen wird, ist sie nie perfekt symmetrisch. Der Offset repräsentiert die Toleranzen bzgl. der Sensoren und/oder Verkabelung, Exzentrizitäten zwischen Rotor und Stator, Fertigungstoleranzen und Anisotropien der Maschine [2]. Die einzige ausgeprägte Harmonische ist die Offset-Harmonische und beträgt  $1,22 \cdot 10^{-5}$ . Die 6. Harmonische beträgt  $8,38 \cdot 10^{-7}$ .

### 7.1.2 Asymmetrie in Statorphase U

Bei dieser Asymmetrie handelt es sich um einen zusätzlichen  $8 \Omega$  Widerstand an der Statorphase  $u$  (40% Anstieg des Widerstandes in Phase  $u$  im Vergleich zum symmetrischen Fall). Dabei ist auch jede Phase mit  $20 \Omega$  belastet. Die Höhe der Ausgangssollspannung, Rotorgeschwindigkeit und elektrischen Winkelgeschwindigkeit sind gleich wie bei der Referenzmessung. Das Frequenzspektrum und die Trajektorie des Raumzeigers  $\underline{c}$  sind in den Abbildungen 7.3 und 7.4 zu sehen.

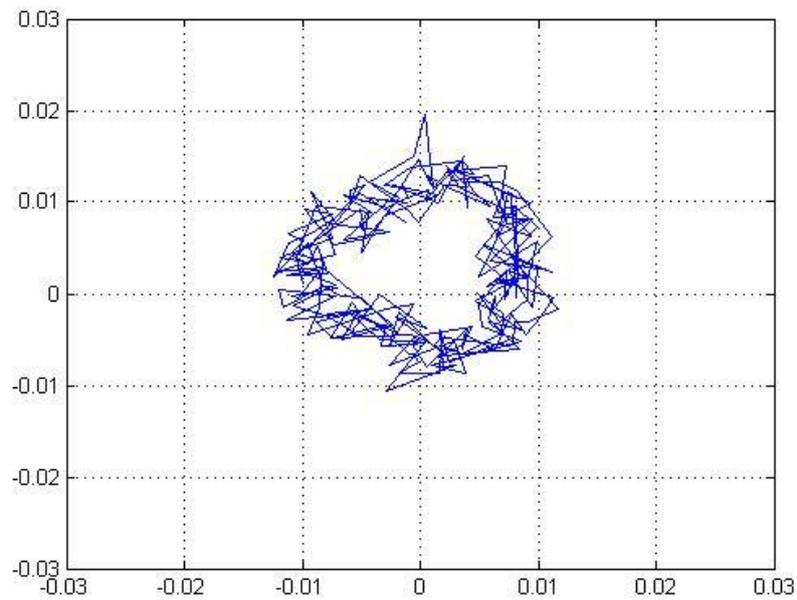


Abbildung 7.3: Trajektorie des Raumzeigers  $\underline{c}$  mit zusätzlichem Widerstand von  $8 \Omega$  an der Phase  $u$

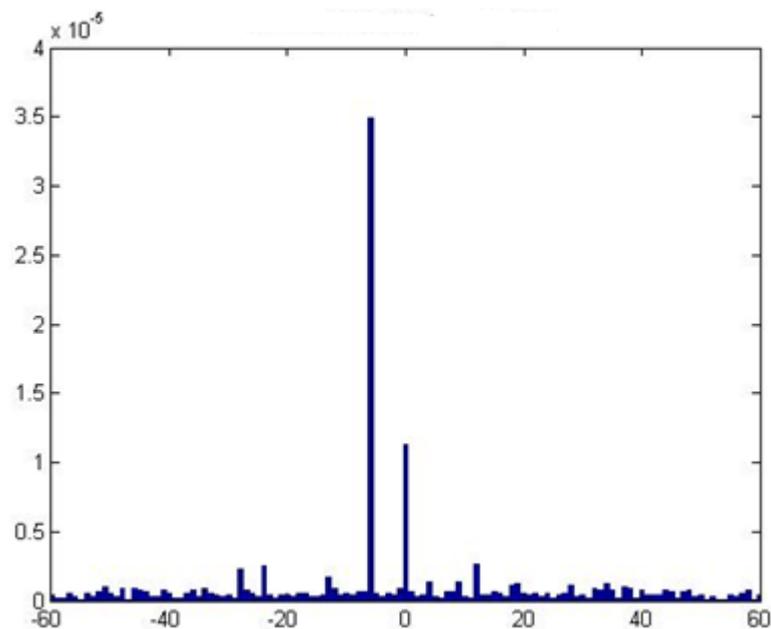


Abbildung 7.4: Spektrum des Raumzeigers  $\underline{c}$  mit zusätzlichem Widerstand von  $8 \Omega$  an der Phase  $u$

Im Vergleich mit der Referenzmessung ist hier ein deutlicher Anstieg der -6. Harmonischen zu erkennen. Eine Änderung dieser Harmonischen kann daher als Indikator für einen asymmetrischen Zustand betrachtet werden. Die Offset-Harmonische bleibt nahezu

unverändert. Die Beträge und die Änderung der Beträge in Prozent der beiden Harmonischen im Vergleich mit symmetrischem Fall sind die folgenden:

- Offset :  $1,13 \cdot 10^{-5}$  (-7,37%)
- -6. Harmonische :  $3,49 \cdot 10^{-5}$  (+3970%)

Eine Asymmetrie in Stator verändert die elektromagnetischen Eigenschaften des Stators im Vergleich zum symmetrischen Fall. Somit ändert sich auch die transiente Reaktanz. Dadurch entsteht während einer mechanischen Rotordrehung eine Asymmetrie, deren Periodizität gleich der Anzahl der Pole entspricht. Das heißt, der Differenzstromänderungsraumzeiger beinhaltet eine Modulation (während einer mechanischen Umdrehung) deren Periode gleich der Polpaarzahl ist. Der Grund liegt daran, dass die so simulierte fehlerhafte Statorwicklung während einer mechanischen Drehung unter jedem Pol der fehlerhaften Phase das gleiche Flussbild sieht. Diese Flusszustände sind von den Flussvorzeichen unabhängig. Im Fall der 6-poligen Maschine manifestiert sich die Asymmetrie durch eine ausgeprägte 6. Harmonische wodurch dieser detektierbar ist. Die Trajektorie des Raumzeigers  $\underline{c}$  ist ein Kreis, dessen Zentrum nicht im Ursprung liegt. Die Abweichung vom Zentrum stellt den Offset des Messsignals dar, der gleich dem Offset der Referenzmessung ist. Der Radius der Trajektorie ist aber erheblich größer als bei der Referenzmessung. Der Grund dafür, dass nach der Gleichung (6.24) der Radius der Trajektorien von  $\underline{c}$  desto breiter wird je die größer die Asymmetrie ( $y_1$ ) ist.

Die Trajektorie umläuft den Ursprung sechs Mal, weil wie erwähnt der Stator während einer mechanischen Drehung sechs Mal denselben Flusszustand erfährt. Die ausgeprägte 6. Harmonische stellt die Grundwelle des Messsignals dar.

### 7.1.3 Widerstand zwischen den Phasen U und V

Bei diesem Versuch werden zwischen den Phasen  $u$  und  $v$  jeweils die Widerstände mit  $8 \Omega$  und  $2 \Omega$  angeschlossen. Dieser Zustand wird wieder mit dem symmetrischen verglichen. In allen Fällen wird der Generator übersynchron mit den Sollwerten für Statorspannung  $u_s = 0.1$ , Frequenz  $\omega_{el} = 0.5$  sowie mechanischen Winkelgeschwindigkeit  $\omega_m = 0.55$  betrieben. In Abbildungen 7.5 und 7.6 sieht man die Trajektorien und Spektren bei den angeschlossenen Widerständen.

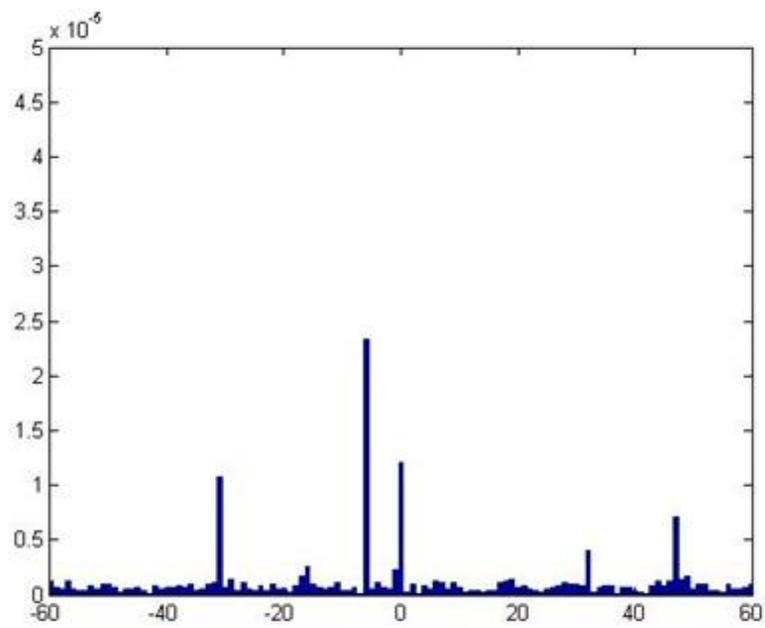
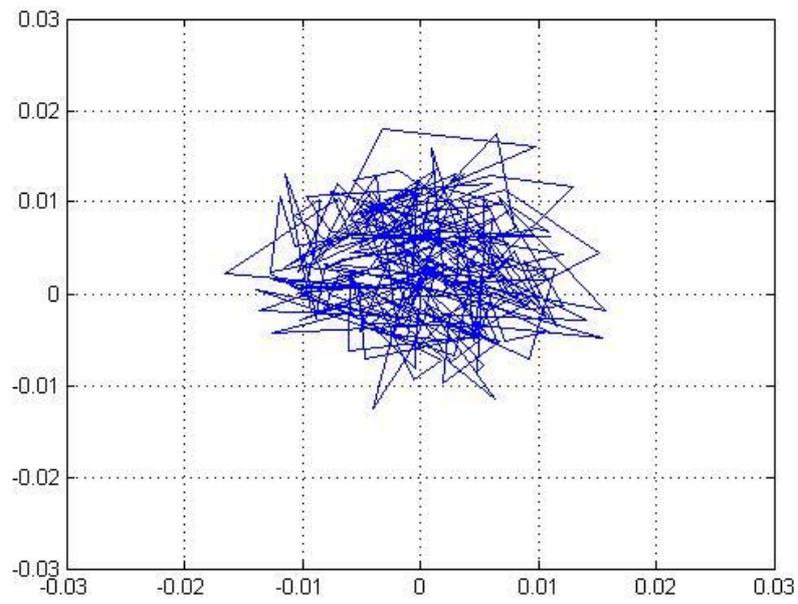


Abbildung 7.5: Trajektorie und Spektrum des Raumzeigers  $\underline{c}$  mit extra Widerstand  $8 \Omega$  zwischen den Phasen  $u$  und  $v$

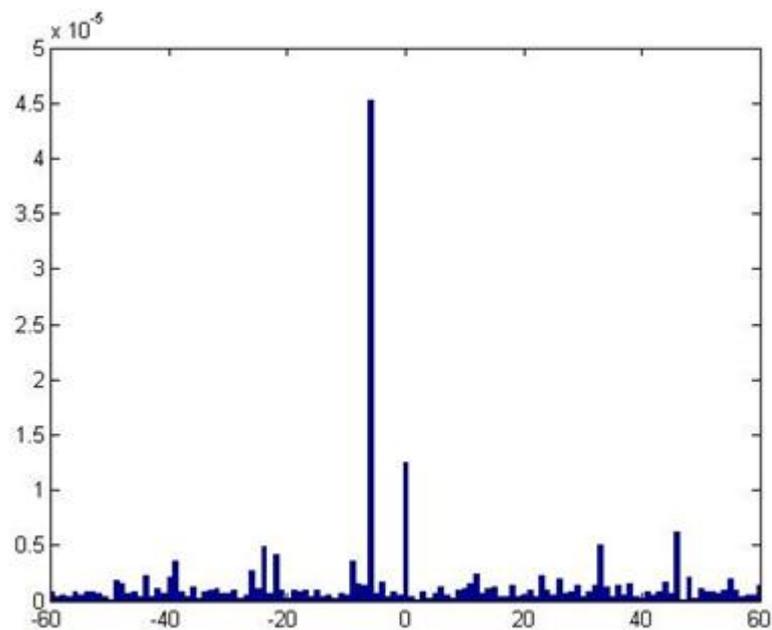
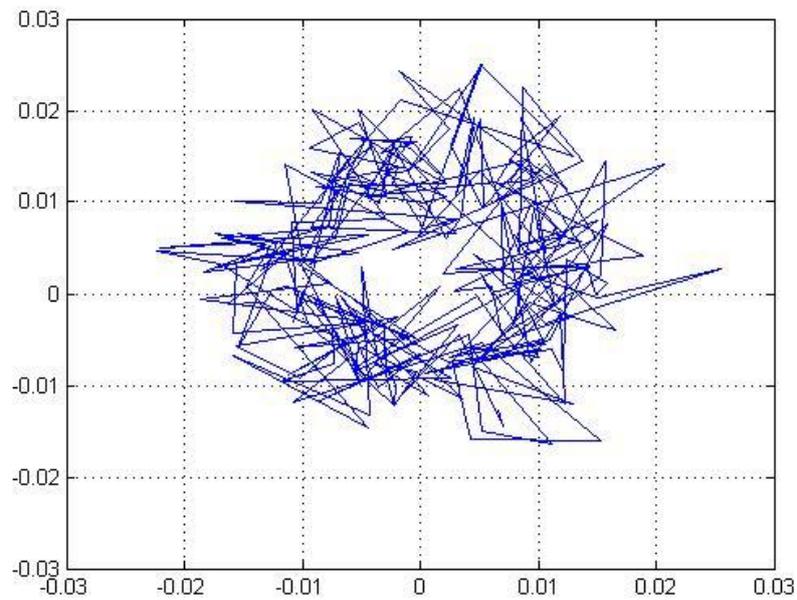


Abbildung 7.6: Trajektorie und Spektrum des Raumzeigers  $\underline{c}$  mit extra Widerstand  $2\Omega$  zwischen den Phasen  $u$  und  $v$

Die Werte und die Änderungen der Beträge in Prozent der Harmonischen im Vergleich mit dem symmetrischen Fall für verschiedene Widerstände zwischen den Phasen sind die folgenden:

Symmetrische Belastung :

- Offset:  $1,22 \cdot 10^{-5}$
- -6. Harmonische:  $8,38 \cdot 10^{-7}$

Widerstand  $8 \Omega$  zwischen den Phasen  $u$  und  $v$  :

- Offset:  $1,21 \cdot 10^{-5}$  (-0,81%)
- -6. Harmonische:  $2,33 \cdot 10^{-5}$  (+2650%)

Widerstand  $2 \Omega$  zwischen den Phasen  $u$  und  $v$  :

- Offset:  $1,25 \cdot 10^{-5}$  (+2,46%)
- -6. Harmonische:  $4,52 \cdot 10^{-5}$  (+5142%)

Es ist ersichtlich dass bei den kleineren Werten der Widerstände zwischen den Phasen der Radius der Trajektorien von  $\underline{c}$  größer wird. Ihre Radien stehen in Abbildung 7.7 zum Vergleich. Genauso wächst der Wert der 6. Harmonischen. Eine Verringerung des Widerstands bedeutet somit eine größere Asymmetrie. Mit der weiteren Verringerung des Widerstands lässt sich ein kurzschlussnahes Verhalten analysieren.

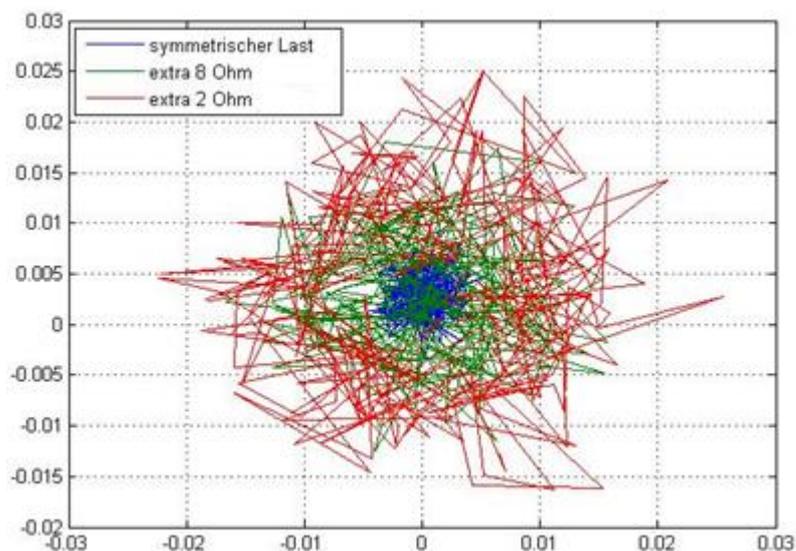


Abbildung 7.7: Die Trajektorien für verschiedene Asymmetrien zwischen den Phasen  $u$  und  $v$  im Vergleich

### 7.1.4 Abgeklemmte Phase

Bei diesem Versuch wird die Phase  $u$  vollständig abgeklemmt. Die restlichen Phasen sind mit je  $20 \Omega$  belastet. Der Generator wird untersynchron mit  $u_s = 0.1$ , elektrischen Winkelgeschwindigkeit  $\omega_{el} = 0.5$  sowie mechanischen Winkelgeschwindigkeit  $\omega_m = 0.46$  betrieben. Die ausgeprägten Harmonischen sind wie folgt:

- -6. Harmonische:  $5,89 \cdot 10^{-4}$
- -12. Harmonische:  $1,00 \cdot 10^{-4}$
- 24. Harmonische :  $4,28 \cdot 10^{-5}$

gemessen. Die Trajektorie und das Spektrum sind in Abbildungen 7.8 und 7.9 angegebenen. Eine abgeklemmte Phase bedeutet eine sehr starke Asymmetrie. Der Anstieg der ausgeprägten Harmonischen wie des Radius der Trajektorie zeigt diesen Sachverhalt sehr deutlich.

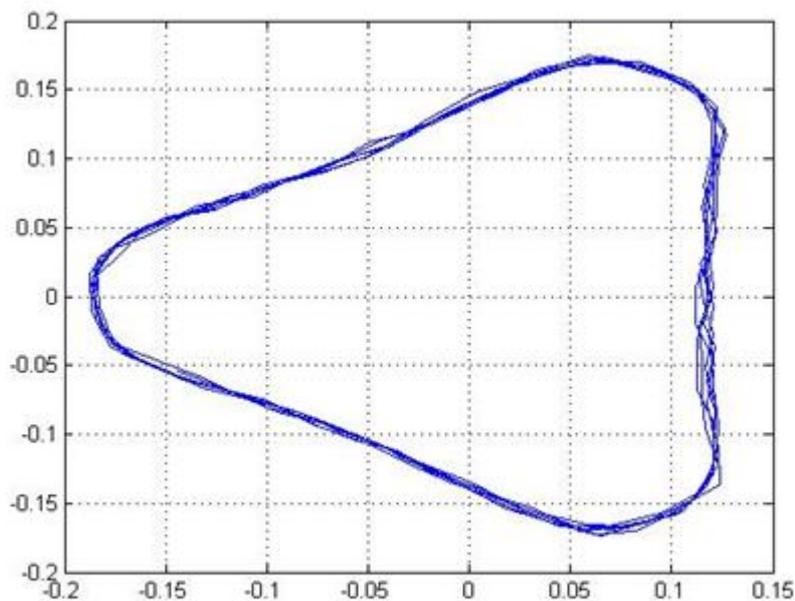


Abbildung 7.8: Die Trajektorie des Raumzeigers  $\underline{c}$  bei der abgeklemmten Phase  $u$

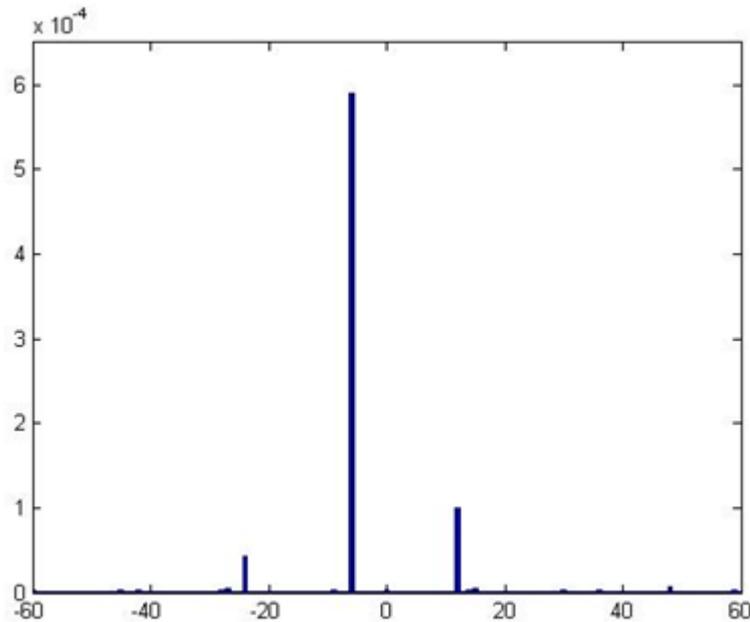


Abbildung 7.9: Das Spektrum des Raumzeigers  $\underline{c}$  bei der abgeklemmten Phase  $u$

### 7.1.5 Zusatzinduktivität an den Phasen

Bei dem letzten Versuch wird an den Statoranschlüssen an einer der Phasen neben den  $20 \Omega$  Last eine zusätzliche Induktivität angeschlossen wobei die restlichen zwei nur mit  $20 \Omega$  je Phase belastet sind. Dieser Vorgang wird für alle drei Phasen wiederholt. Es ist wieder ein Anstieg im Vergleich zum symmetrischen Fall in +6 Harmonische in Abbildung 7.10 zu sehen ( $2,56 \cdot 10^{-5}$  im Vergleich mit  $8,38 \cdot 10^{-7}$  bei der symmetrischen Belastung von  $20 \Omega$  je Phase). Der Grund sind wieder die 3 Polpaare der Maschine. Die ausgeprägte +/- 18 und +12 Harmonischen kommen wegen nicht sinusförmig ausgeprägter Wicklung vor, was auch schon im asymmetriefreien Zustand der Fall ist.

Da der Asymmetrieindikator komplex ist, ist es möglich neben der Magnitude der Asymmetrie auch die Richtung der Asymmetrie zu bestimmen [13]. In diesem Fall wird die 6. Harmonische betrachtet. Die Darstellung der 6. Harmonische bei der Belastung jeder der Phasen mit der Induktivität ist in Abbildung 7.11 zu sehen. Soll die Induktivität an der Phase  $u$  angeschlossen werden, dann schiebt sich der Asymmetrieindikator auch in  $u$ -Richtung. Dasselbe gilt für die restlichen Phasen.

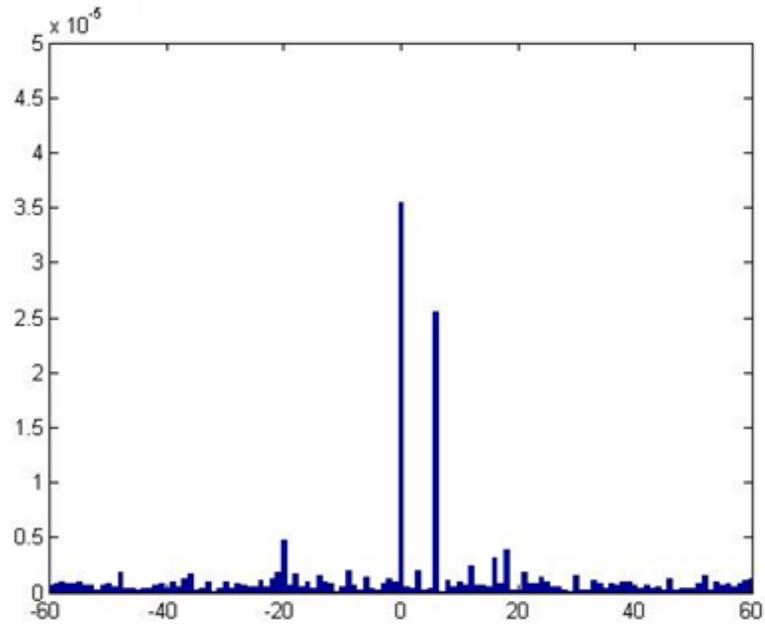


Abbildung 7.10: Das Spektrum bei einem zusätzlichen Induktivität an der Phase  $u$  und der Belastung  $20 \Omega$  je Phase

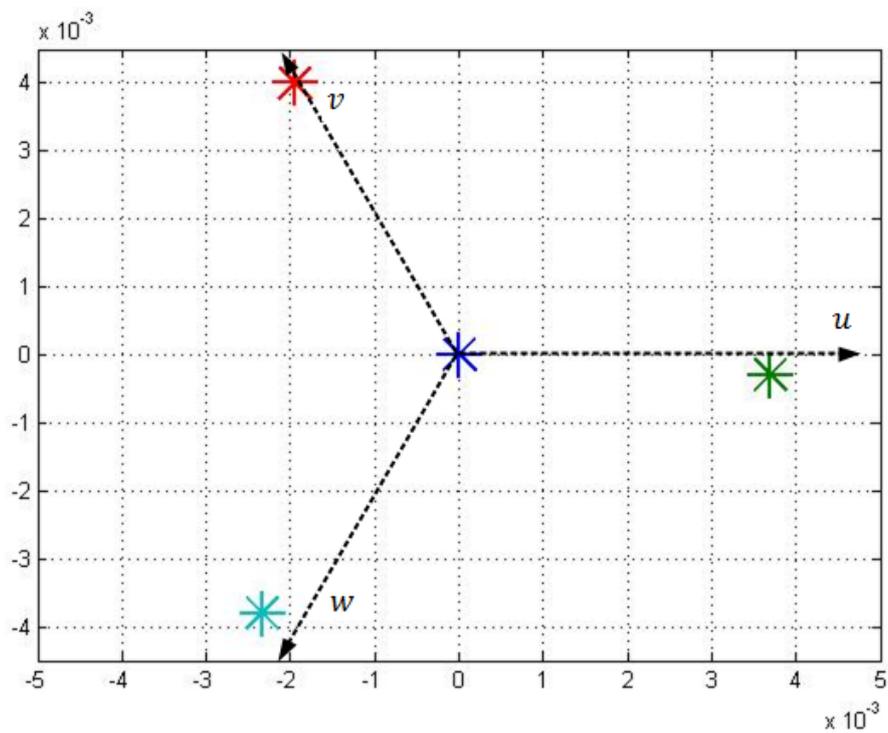


Abbildung 7.11: Der Asymmetrieindikator bei den zusätzlichen Induktivitäten an den Phasen

## 8 ZUSAMMENFASSUNG

In dieser Diplomarbeit wird die Regelung als auch die statorseitige Asymmetrierkennung der doppeltgespeisten Asynchronmaschine ausgeführt.

Die Regelung wird am Prüfstand durchgeführt. Der Regelkreis besteht aus zwei kaskadierten PI-Reglern. Die äußere Regelung regelt die Statorspannung, die innere den Rotorstrom. Die Rotorspannung stellt die Stellgröße dar. Somit bewirkt eine zusätzliche Einspeisung eines Stromes in die Rotorwicklungen ein Rotorfeld, das die Ausgangsspannung konstant hält. Die Regelung liefert zufriedenstellende Ergebnisse für unterschiedliche Belastungen an den Statoranschlüssen. Die Spannungsamplituden bei der Regelung im Leerlauf erreichen vorerst höhere Werte bevor sich der Spannungswert einstellt. Die abgeklemmte Phase stellt eine hohe Asymmetrie dar, weswegen die Stellgröße (Rotorspannung) sehr wellig ist. Bei der symmetrischen Belastung jeder Statorphase verläuft die Regelung ohne Schwankungen, da die Lastwiderstände dämpfend wirken.

Im zweiten Teil dieser Arbeit wird der Stator auf Asymmetrien untersucht, die durch zusätzliche Induktivitäten und Widerständen an den Phasen des Stators simuliert werden. Das Verfahren zur Asymmetriedetektion beruht auf Fehlererkennungsverfahren INFORM („Indirekte Flussfassung durch Online Reaktanzmessung“ / „INDirect Flux detection by Online Reactance Measurement“) das ohne zusätzliche Hardware auskommt. Die Messungen werden erstens für einen symmetrischen Fall (gleichmäßige Widerstandsbelastung an jeder Phase) durchgeführt, das auch als Referenz zum Vergleich und somit zur Asymmetrierkennung dient. Die weiteren eingebauten Asymmetrien sind: zusätzlicher Widerstand an einer Phase, kurzschlussnahes Verhalten (kleiner Widerstand zwischen zwei Phasen), abgeklemmte Phase und zusätzliche Induktivität an der Phase. Das Asymmetriedetektionsverfahren zeigt in allen Fällen, anhand seiner Sensitivität sehr gute Resultate. Die Magnitude des Asymmetrieindikators bei kleineren Abweichungen vom Referenzfall (z.B. zusätzlicher Widerstand an einer Phase) als auch bei größeren Abweichungen (abgeklemmte Phase) deutet klar auf die Größe der Asymmetrie.

## 9 QUELLENVERZEICHNIS

- [1]. **Schrödl, Manfred.** *Elektrische Antriebe und Maschinen.* Technische Universität Wien: Institut für elektrische Antriebe und Maschinen, 2008
- [2]. **Stojcic, Goran.** *Rotorfehlererkennung bei umrichter gespeisten ASM mittels Neuronaler Netzwerke.* Technische Universität Wien, 2011. Diplomarbeit.
- [3]. **Schrödl, Manfred.** *Sensorless Control of AC Machines at Low Speed and Standstill Based on the „INFORM“ Method.* s.l.: Industry Applications Conference, 31. IAS Annual Meeting, 1996. Vol. 1, no., pp270-277 vol. 1, 6-10 Oct 1996
- [4]. **Nussbaumer, Peter.** *Fehlererkennung bei umrichter gespeisten Drehstrommaschinen.* Technische Universität Wien, 2009. Diplomarbeit.
- [5]. **Wolbank, Thomas , Nussbaumer, Peter , Chen, Hao , Macheiner, Peter.** *Monitoring of Rotor-Bar Defects in Inverter-Fed Induction Machines at Zero Load and Speed.* IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL.58, NO.5, S. 1468-1478, May 2011
- [6]. **Wolbank, Thomas , Stojcic, Goran , Nussbaumer, Peter.** *Monitoring of Partially Broken Rotor Bars in Induction Machine Drives.* Technische Universität Wien. IEEE S. 906-911, 2010
- [7] **Wolbank, Thomas , Stojcic, Goran , Nussbaumer, Peter , Samonig, Mathias.** *Analysis of rotor fault detection in inverter fed induction machines at no load by means of finite element method.* Technische Universität Wien. IEEE S. 1693-1698, 2011
- [8] **Wolbank, Thomas , Stojcic, Goran , Nussbaumer, Peter , Joksimovic, Gojko , Vasak, Mario , Peric, Nedjeljko.** *Separating Inherent Asymmetries from high Sensitivity Rotor Bar Fault Indicator.* Technische Universität Wien. IEEE S. 1693-1698, 2011
- [9] **Schröder, Dierk.** *Elektrische Antriebe-Grundlagen.* Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2009
- [10] **Schröder, Dierk.** *Elektrische Antriebe-Regelung von Antriebssysteme.* Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2009
- [11] **Calis, Emine.** *Modelica-Simulation einer feldorientiert geregelten Asynchronmaschine mit integrierter Nachführung der Maschinenparameter.* Technische Universität Wien, 2009. Diplomarbeit.
- [12] **Schobesberger, Jörg.** *Regelung einer doppelt gespeisten Asynchronmaschine.* Technische Universität Wien, 2009. Diplomarbeit.

- [13] **Stojcic, Goran**. *Detecting Stator Faults in Doubly Fed Induction Generator by Rotor Side Transient Current Measurement*. 2013
- [14] **Zöller, Clemens**. *Untersuchung des elektrischen Einschwingverhaltens von umrichter-gespeisten Drehstrommaschinen*. Technische Universität Wien, 2013. Diplomarbeit.
- [15] **Hermann, Merz , Lipphart , Götz** *Elektrische Maschinen und Antriebe - Grundlagen*. Berlin : VDE-Verlag, 2008.
- [16] **Kremser, Andreas**. *Elektrische Maschinen und Antriebe*. Wiesbaden : Taubner, 2008.
- [17] **Fuest, Klaus , Döring, Peter**. *Elektrische Maschinen und Antriebe : Lehr- und Arbeitsbuch für Gleich-, Wechsel- und Drehstrommaschinen sowie elektronische Antriebstechnik*. Wiesbaden : Vieweg, 2007.
- [18] **Spring, Eckhard**. *Elektrische Maschinen – Eine Einführung*. Berlin : Springer, 2009.
- [19] **Blaschke, Felix**. *Das Verfahren der Feldorientierung zur Regelung der Drehfeldmaschine*. Technische Universität Braunschweig. Diss., 1973.
- [20] **Wirfs, Wolf**. *Ein Verfahren zur Regelung umrichtergespeister Asynchronmaschinen mit Hilfe einer gesteuerten Feldorientierung*. Technische Hochschule Darmstadt. Diss., 1991.
- [21] **I.Kovacs , K.P. Racz**. *Transiente Vorgänge in Wechselstrommaschinen. Bd.a und Bd. 2*. Verlag der Ungarischen Akademie der Wissenschaften, Budapest, 1959.
- [22] **Farschtschi, Ali**. *Elektromaschinen in Theorie und Praxis*. Berlin, Offenbach : VDE-Verlag, 2007.
- [23] **Schrödl, Manfred**. *Drehstromantriebe mit Mikrorechnern*. Technische Universität Wien: Institut für elektrische Antriebe und Maschinen, 2000
- [23] **Wolbank, Thomas , Stojcic, Goran , Pasanbegovic, Kenan**. *Detecting Faults in Doubly Fed Induction Generator by Rotor Side Transient Current Measurement*. Technische Universität Wien: Institut für elektrische Antriebe und Maschinen, 2013
- [24] **Wolbank, Thomas**. *Verfahren zur Fehlererkennung umrichtergespeisten Maschinen - Studie*. Technische Universität Wien: Institut für elektrische Antriebe und Maschinen, 2009

# 10 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2.1: Die Umwandlung der dreiphasigen Stator- und Rotorsysteme (links) in ein äquivalentes zweiphasiges kartesisches System (rechts) .....	6
Abbildung 2.2: Die räumliche Verteilung der magnetischen Spannung im Luftspalt in Abhängigkeit vom Winkel $\alpha$ (Momentaufnahme) [10].....	8
Abbildung 2.3: Die Bestimmung der $u$ -, $v$ - und $w$ -Richtungen durch den Strom in den entsprechenden Phasen ( $u$ -Wicklungen(gelb); $v$ -Wicklungen(rot), $w$ -Wicklungen(grün)).....	10
Abbildung 2.4: Bildung des Raumzeigers durch die Abbildung der räumlichen sinusförmigen Größen in der komplexen Ebene .....	11
Abbildung 2.5: Bildung der Strangwerte aus den Raumzeigern .....	12
Abbildung 2.6: Umrechnung eines Raumzeigers in ein anderes Koordinatensystem.....	13
Abbildung 2.7: Bestimmung der Richtung der $\alpha$ -Achse des statorfesten Koordinatensystems durch einen Strom in der $u$ -Wicklung.....	14
Abbildung 2.8: Statorsollspannungsfestes Koordinatensystem (kj-KOS) in Verhältnis zu Statorsollspannungsraumzeiger $u_{\alpha\beta}$ und $\alpha\beta$ -KOS.....	14
Abbildung 2.9: Die physikalische Verteilung der Spulen im Stator (links) : $u$ -Wicklung (gelb); $v$ -Wicklung (rot), $w$ -Wicklung (grün); symbolhafte Darstellung der Statorspulen (rechts).....	18
Abbildung 2.10: Ersatzschaltbild der ASM.....	20
Abbildung 2.11: Darstellung des inneren Momentes im Raumzeigerkalkül.....	21
Abbildung 3.1: Schaltbild der Regelung.....	23
Abbildung 3.2: Regelungsmodell in Matlab/Simulink. Zum Erkennen sind die Blöcke von zwei PI-Regler (orange), DASM-Maschinenmodell (blau), Sollspannungsvorgabeblock (hell rot) und KOS-Umwandlungsblöcke (gelb).....	23

Abbildung 3.3: Modell der ASM mit Last.....	26
Abbildung 3.4: Modell der ASM im Leerlauf .....	26
Abbildung 3.5: PI-Regler-Block.....	27
Abbildung 3.6: Statorspannungsvorgabe-Block .....	28
Abbildung 3.7: KOS-Umwandlungs-Block.....	29
Abbildung 3.8: oben: Mechanische Winkelgeschwindigkeit des Rotors am Eingang der Maschine; unten: Rotorspannung (Stellgröße) $u_{r,dq}$ (gelb-Realanteil; magenta-Imaginäranteil).....	30
Abbildung 3.9: Soll- und Istwert des Statorspannungsbetrags $ u_{s,kj} $ (gelb-Sollwert; türkis-Istwert).....	30
Abbildung 3.10: Soll- und Istwert des Statorspannungswinkels $\gamma_{kj}$ (gelb-Sollwert; magenta-Istwert).....	31
Abbildung 3.11: Rotorspannung $u_{r,dq}$ mit der Periode $T_2 = 0.4$ sec und $ u_{ab,soll}  = 0.2$ , $\omega_{ab,soll} = 0.5$ und $\omega_m = 0.45$ (gelb-Realanteil; magenta-Imaginäranteil) - Leerlauf .....	33
Abbildung 3.12: $u_{ab,soll}$ und $u_{ab,ist}$ im Vergleich mit $ u_{ab,soll}  = 0.2$ , $\omega_{ab,soll} = 0.5$ und $\omega_m = 0.45$ (gelb-Realanteil des Sollwertes; magenta-Realanteil des Istwertes; cyan-Imaginäranteil des Sollwertes; rot-Imaginäranteil des Istwertes) – Leerlauf .....	33
Abbildung 3.13: $\gamma_{ab,soll}$ und $\gamma_{ab,ist}$ im Vergleich mit $ u_{ab,soll}  = 0.2$ , $\omega_{ab,soll} = 0.5$ und $\omega_m = 0.45$ (gelb-Sollwert; magenta-Istwert) – Leerlauf .....	34
Abbildung 3.14: oben: Soll- und Istwert des Statorspannungsbetrags $ u_{s,kj} $ mit $ u_{ab,soll}  = 0.2$ , $\omega_{ab,soll} = 0.5$ und $\omega_m = 0.55$ ; unten: Rotorspannung $u_{r,dq}$ – symmetrische Belastung $20 \Omega$ je Phase.....	35
Abbildung 3.15: Modell für den Ausschluss der Phase $u$ .....	36
Abbildung 3.16: oben: Soll- und Istwert des Statorspannungsbetrags $ u_{s,kj} $ mit $ u_{ab,soll}  = 0.2$ , $\omega_{ab,soll} = 0.5$ und $\omega_m = 0.55$ ; unten: Rotorspannung $u_{r,dq}$ - Phase $u$ bei $t = 0.2$ sec abgeklemmt.....	36

Abbildung 4.1: Prüfstandsordnung (grün: doppeltgespeiste Asynchronmaschine; blau: Lastmaschine (GSM)) .....	38
Abbildung 5.1: Statorspannungswinkelgeschwindigkeit, Statorspannung (Realteil und Imaginärteil) und Rotorspannung (Real- und Imaginärteil) mit $ u_{ab,soll}  = 0.2, \omega_{ab,soll} = 0.5, \omega_m = 0.45$ - Leerlauf.....	43
Abbildung 5.2: Statorspannungen[V] mit $ u_{ab,soll}  = 0.2, \omega_{ab,soll} = 0.5, \omega_m = 0.45$ – Leerlauf	43
Abbildung 5.3: <i>Die Statorspannungswinkelgeschwindigkeit, Statorspannung (Realteil und Imaginärteil) und Rotorspannung (Real- und Imaginärteil) mit <math> u_{ab,soll}  = 0.2, \omega_{ab,soll} = 0.5, \omega_m = 0.45</math> - symmetrische Last <math>20 \Omega</math> je Phase</i> .....	44
Abbildung 5.4: Statorspannungen[V] mit $ u_{ab,soll}  = 0.2, \omega_{ab,soll} = 0.5, \omega_m = 0.45$ - symmetrische Last $20 \Omega$ je Phase .....	45
Abbildung 5.5: Statorströme[A] mit $ u_{ab,soll}  = 0.2, \omega_{ab,soll} = 0.5, \omega_m = 0.45$ - symmetrische Last $20 \Omega$ je Phase .....	45
Abbildung 5.6: Die Statorspannungswinkelgeschwindigkeit, Statorspannung (Realteil und Imaginärteil) und Rotorspannung (Real- und Imaginärteil) mit $ u_{ab,soll}  = 0.2, \omega_{ab,soll} = 0.5, \omega_m = 0.55$ - Phase $u$ abgeklemmt.....	46
Abbildung 5.7: Statorspannungen[V] mit $ u_{ab,soll}  = 0.2, \omega_{ab,soll} = 0.5, \omega_m = 0.55$ - Phase $u$ abgeklemmt.....	47
Abbildung 5.8: Statorströme[A] mit $ u_{ab,soll}  = 0.2, \omega_{ab,soll} = 0.5, \omega_m = 0.55$ - Phase $u$ abgeklemmt.....	47
Abbildung 6.1: Abfolge der Spannungspulse und Stromantworten .....	50
Abbildung 6.2: Komplexe Induktivität mit Offsetanteil $l_0$ und veränderlichen Anteil $l_1$ [2] .....	52
Abbildung 6.3: Differenzstromänderungsraumzeiger .....	54
Abbildung 6.4: Spannungspulse und Stromanstiegsmessung an der Phase $u$ .....	56
Abbildung 6.5: Regelung- und Messungsabfolge bei „informrate“=10.....	57
Abbildung 6.6: Verteilung der Spannungen an den Rotorsträngen bei der Spannungsschuss in die Richtung Phase $u$ .....	58

Abbildung 6.7: Schematische Anordnung mit Hausbatterie, Frequenzumrichter und Rotorwicklungen bei Regelung und Spannungspulserzeugung.....	60
Abbildung 6.8: Schaltbild Frequenzumrichter [14].....	60
Abbildung 6.9: Die Spannungspulse in Richtung der drei Phasen.....	61
Abbildung 6.10: Blockdiagramm zur Bestimmung des Fehlerindikators [23].....	62
Abbildung 7.1: Trajektorie des Raumzeigers $\underline{c}$ im symmetrischen Fall. Jede Phase ist mit $20 \Omega$ belastet.....	65
Abbildung 7.2: Spektrum des Raumzeigers im symmetrischen Fall. Jede Phase ist mit $20 \Omega$ belastet .....	66
Abbildung 7.3: Trajektorie des Raumzeigers $\underline{c}$ mit zusätzlichen Widerstand von $8 \Omega$ an der Phase $u$ .....	67
Abbildung 7.4: Spektrum des Raumzeigers $\underline{c}$ mit zusätzlichen Widerstand von $8 \Omega$ an der Phase $u$ .....	67
Abbildung 7.5: Trajektorie und Spektrum des Raumzeigers $\underline{c}$ mit extra Widerstand $8 \Omega$ zwischen den Phasen $u$ und $v$ .....	69
Abbildung 7.6: Trajektorie und Spektrum des Raumzeigers $\underline{c}$ mit extra Widerstand $2 \Omega$ zwischen den Phasen $u$ und $v$ .....	70
Abbildung 7.7: Die Trajektorien für verschiedene Asymmetrien zwischen den Phasen $u$ und $v$ im Vergleich .....	71
Abbildung 7.8: Die Trajektorie des Raumzeigers $\underline{c}$ bei der abgeklemmten Phase $u$ .....	72
Abbildung 7.9: Das Spektrum des Raumzeigers $\underline{c}$ bei der abgeklemmten Phase $u$ .....	73
Abbildung 7.10: Das Spektrum bei einem zusätzlichen Induktivität an der Phase $u$ und der Belastung $20 \Omega$ je Phase.....	74
Abbildung 7.11: Der Asymmetrieindikator bei den zusätzlichen Induktivitäten an den Phasen .....	74

# 11 TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 6.1: Schaltzustände des Umrichters und den entsprechenden Phasenspannungen;  
Raumzeigerwerte in verschiedenen Schussrichtungen

**ANHANG A**

## DATEN DER ASYNCHRONMASCHINE

Leistung	10,3 kW
$\cos(\varphi)$	0,84
Ständer Nennspannung	220 V
Ständer Nennstrom	22 A
Ständer Nennspannung	275 V
Ständer Nennstrom	25 A
Nennzahl	960U/min
Polpaarzahl	3
Übersetzungsverhältnis	1,39
Strang-Statorwiderstand	508 m $\Omega$
Strang-Rotorwiderstand	268 m $\Omega$
Streuungsfaktor $\sigma$	0,0797
Bezogene Statorwiderstand $r_s$	0,0508
Bezogene Rotorwiderstand $r_r$	0,0510
Bezogene Statorinduktivität $x_s$	2,22

**ANHANG B**

## DATEN DES GLEICHSTROMSTELLERS

T-T Electric Generator			
Type	LAK 4180-BA		No:
10 kW		1000 r/mn	
Duty	S1		Ins.Class H-RISE F
Arm.	220		Arm. 40.5 A
Exc.	220		Exc. 1.83 A
IP	23 S	IC 01	IM 1001
Cat.No.	FR 159201-HC		324 kg

# ANHANG C

## DATEN DER GLEICHSTROMMASCHINE

SOMOREG DC-MASTER				
SIEMENS DC-CONVERTER				
Ordner No./Type:     1P           6RA7025-6DV62-0				
ARMATURE				
Input:	3AC	400V	50A	50/60 Hz
Suitable for use on a circuit capable of delivering not more than k kA rms symmetrical amperes, 400 V maximum				
Output(DC-Rating)	DC	+420 V	60 A	
Output(US-Rating)	DC	+420 V	53,1 A	
FIELD SUPPLY				
Input	2AC	400 V	10 A	50/60 Hz
Output	DC	325 V	10 A	
Prod. State	A3			
Cooling	AN			



```

informGesamt_STAT_var = 'Labels/Inform_Gesamt_BG_Stator';
informSchuss_U_STAT_var = 'Labels/Inf_Schuss_u_Stator';
informSchuss_V_STAT_var = 'Labels/Inf_Schuss_v_Stator';
informSchuss_W_STAT_var = 'Labels/Inf_Schuss_w_Stator';
informGesamt_ROT_var = 'Labels/Inform_Gesamt_BG_Rotor';
informSchuss_U_ROT_var = 'Labels/Inf_Schuss_u_Rotor';
informSchuss_V_ROT_var = 'Labels/Inf_Schuss_v_Rotor';
informSchuss_W_ROT_var = 'Labels/Inf_Schuss_w_Rotor';
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
gamma_mech_var = 'Labels/gamma_mech_el';
Arraysize_el_var = 'Model Root/Inform Auswertung/Arraysize el/Value';
Arraysize_mech_var = 'Model Root/Inform Auswertung/Arraysize mech/Value';
Ausgabezaehler_mech_ROT_var = 'User Variables/AusgabeZaehler_mech';
Ausgabezaehler_el_ROT_var = 'User Variables/AusgabeZaehler_el';
Ausgabezaehler_mech_STAT_var = 'User Variables/AusgabeZaehler_mech';
Ausgabezaehler_el_STAT_var = 'User Variables/AusgabeZaehler_el';
trigger_inner_task_var = 'Labels/Read_ArrayIn';
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
inform_enable = mlib('GetTrcVar',inform_enable_var);
inform_rate = mlib('GetTrcVar',inform_rate_var);
inform_schranke_mech_ROT = mlib('GetTrcVar',inform_schranke_ROT_mech_var);
inform_schranke_el_ROT = mlib('GetTrcVar',inform_schranke_ROT_el_var);
inform_schranke_mech_STAT =
mlib('GetTrcVar',inform_schranke_STAT_mech_var);
inform_schranke_el_STAT = mlib('GetTrcVar',inform_schranke_STAT_el_var);
inverter_FPGA_Enable = mlib('GetTrcVar',inverter_FPGA_Enable_var);
%arraySize = mlib('GetTrcVar',arraySize_var);
reset_Array = mlib('GetTrcVar',reset_Array_var);
read_Array = mlib('GetTrcVar',read_Array_var);
write_Array = mlib('GetTrcVar',write_Array_var);

Spg_spannungsbetrag = mlib('GetTrcVar',Spg_spannungsbetrag_var);
Spg_winkelgeschwindigkeit =
mlib('GetTrcVar',Spg_winkelgeschwindigkeit_var);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
auswerteArray_ROT = mlib('GetTrcVar',auswerteArray_ROT_var);
auswerteArray_STAT = mlib('GetTrcVar',auswerteArray_STAT_var);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Anzahl_schuss_U_ROT = mlib('GetTrcVar',Anzahl_schuss_U_ROT_var);
Anzahl_schuss_V_ROT = mlib('GetTrcVar',Anzahl_schuss_V_ROT_var);
Anzahl_schuss_W_ROT = mlib('GetTrcVar',Anzahl_schuss_W_ROT_var);

Anzahl_schuss_U_STAT = mlib('GetTrcVar',Anzahl_schuss_U_STAT_var);
Anzahl_schuss_V_STAT = mlib('GetTrcVar',Anzahl_schuss_V_STAT_var);
Anzahl_schuss_W_STAT = mlib('GetTrcVar',Anzahl_schuss_W_STAT_var);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
informGesamt_ROT = mlib('GetTrcVar',informGesamt_ROT_var);
informSchuss_U_ROT = mlib('GetTrcVar',informSchuss_U_ROT_var);
informSchuss_V_ROT = mlib('GetTrcVar',informSchuss_V_ROT_var);
informSchuss_W_ROT = mlib('GetTrcVar',informSchuss_W_ROT_var);

informGesamt_STAT = mlib('GetTrcVar',informGesamt_STAT_var);
informSchuss_U_STAT = mlib('GetTrcVar',informSchuss_U_STAT_var);
informSchuss_V_STAT = mlib('GetTrcVar',informSchuss_V_STAT_var);
informSchuss_W_STAT = mlib('GetTrcVar',informSchuss_W_STAT_var);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
gamma_mech = mlib('GetTrcVar', gamma_mech_var);
Arraysize_el_ROT = mlib('GetTrcVar', Arraysize_el_var);
Arraysize_mech_ROT = mlib('GetTrcVar', Arraysize_mech_var);
Arraysize_el_STAT = mlib('GetTrcVar', Arraysize_el_var);
Arraysize_mech_STAT = mlib('GetTrcVar', Arraysize_mech_var);

```

```

Ausgabezaehler_mech_ROT = mlib('GetTrcVar', Ausgabezaehler_mech_ROT_var);
Ausgabezaehler_el_ROT = mlib('GetTrcVar', Ausgabezaehler_el_ROT_var);
Ausgabezaehler_mech_STAT = mlib('GetTrcVar', Ausgabezaehler_mech_STAT_var);
Ausgabezaehler_el_STAT = mlib('GetTrcVar', Ausgabezaehler_el_STAT_var);

trigger_inner_task = mlib('GetTrcVar', trigger_inner_task_var);
disp('Var init OK');
%settings
mlib('Write', inform_rate, 'Data', informrate_value);
mlib('Write', inform_schranke_mech_ROT, 'Data', schranke_mech_value_ROT);
mlib('Write', inform_schranke_el_ROT, 'Data', schranke_el_value_ROT);
mlib('Write', inform_schranke_mech_STAT, 'Data', schranke_mech_value_STAT);
mlib('Write', inform_schranke_el_STAT, 'Data', schranke_el_value_STAT);
%mlib('Write', arraySize, 'Data', array_size_value);
if(mlib('Read', inverter_FPGA_Enable) == 0)
    disp('inverter FPGA Enable OK');
    pause(2)
    for wklSt=1:1:length(winkelSteps)
        for mesSt=1:1:length(measSteps)

            mlib('Write', Spg_winkelgeschwindigkeit, 'Data', winkelSteps(wklSt));
            pause(0.1);
            mlib('Write', Spg_spannungsbetrag, 'Data', measSteps(mesSt));
            %mlib('Write', gamma_offset, 'Data', anglePsir(11));
            mlib('Write', read_Array, 'Data', 0);
            mlib('Write', write_Array, 'Data', 1);
            pause(2);
            mlib('Write', reset_Array, 'Data', 1);
            pause(0.1)
            mlib('Write', reset_Array, 'Data', 0)
            % define capture settings
mlib('Set', 'Service', 4, 'Trigger', 'ON', 'TriggerLevel', 0.1, 'TriggerEdge', 'rising', ...
    'TriggerVariable', trigger_inner_task, 'TraceVars', ...
[informGesamt_ROT; ...
informSchuss_U_ROT; ...
informSchuss_V_ROT; ...
informSchuss_W_ROT; ...
informGesamt_STAT; ...
informSchuss_U_STAT; ...
informSchuss_V_STAT; ...
informSchuss_W_STAT; ...
gamma_mech; ...
], ...
'NumSamples', 256, 'Delay', 0);

mlib('Write', inform_enable, 'Data', 1);
mlib('Write', write_Array, 'Data', 0);
disp('Wait till array full');

while ~(mlib('Read', Anzahl_schuss_U_ROT) == array_size_value &&
...
        mlib('Read', Anzahl_schuss_V_ROT) == array_size_value &&
...
        mlib('Read', Anzahl_schuss_W_ROT) == array_size_value &&
...
        mlib('Read', Anzahl_schuss_U_STAT) == array_size_value &&
...
        mlib('Read', Anzahl_schuss_V_STAT) == array_size_value &&
...

```

```

        mlib('Read',Anzahl_schuss_W_STAT) == array_size_value
    &&...
        mlib('Read',Anzahl_schuss_W_STAT) == array_size_value)
end
disp('Array Full');
mlib('Write',write_Array,'Data',1);
pause(1);
disp('Capture Started');
for k=0:1:array_size_el_value-1
    mlib('Write',Ausgabezaehler_el_ROT,'Data',k);
    mlib('Write',Ausgabezaehler_el_STAT,'Data',k);

    mlib('StartCapture',4);
    pause(0.5);
    mlib('Write',read_Array,'Data',1);
    %disp('Start Capture Read');
    while mlib('CaptureState',4) ~= 0, end
    %mlib('StopCapture',3);
    %disp('Fetch Data');
    data = mlib('FetchData','Service',4);

    dat_infGesRe_ROT(k+1,:) = data(1,:);
    dat_infGesIm_ROT(k+1,:) = data(2,:);
    dat_sU_Re_ROT(k+1,:) = data(3,:);
    dat_sU_Im_ROT(k+1,:) = data(4,:);
    dat_sV_Re_ROT(k+1,:) = data(5,:);
    dat_sV_Im_ROT(k+1,:) = data(6,:);
    dat_sW_Re_ROT(k+1,:) = data(7,:);
    dat_sW_Im_ROT(k+1,:) = data(8,:);
    dat_infGesRe_STAT(k+1,:) = data(9,:);
    dat_infGesIm_STAT(k+1,:) = data(10,:);
    dat_sU_Re_STAT(k+1,:) = data(11,:);
    dat_sU_Im_STAT(k+1,:) = data(12,:);
    dat_sV_Re_STAT(k+1,:) = data(13,:);
    dat_sV_Im_STAT(k+1,:) = data(14,:);
    dat_sW_Re_STAT(k+1,:) = data(15,:);
    dat_sW_Im_STAT(k+1,:) = data(16,:);
    dat_gamma_mech(k+1,:) = data(17,:);
    disp('Data Fetched');
    mlib('Write',read_Array,'Data',0);
    %disp('Stop Capture');
    pause(0.2);
end
    varName = [filename '_' num2str(measSteps(mesSt)) '_wel_'
num2str(winkelSteps(wklSt))];
    for j=1:length(varName)
        if (strcmp(varName(j),'.'))
            varName(j)='_';
        end
    end
    assignin('base',varName,struct('Y',struct('Data',struct([]),'Name','')));
    eval([varName '.Y(1,1).Data = dat_infGesRe_ROT;']);
    eval([varName '.Y(1,2).Data = dat_infGesIm_ROT;']);
    eval([varName '.Y(1,3).Data = dat_sU_Re_ROT;']);
    eval([varName '.Y(1,4).Data = dat_sU_Im_ROT;']);
    eval([varName '.Y(1,5).Data = dat_sV_Re_ROT;']);
    eval([varName '.Y(1,6).Data = dat_sV_Im_ROT;']);
    eval([varName '.Y(1,7).Data = dat_sW_Re_ROT;']);
    eval([varName '.Y(1,8).Data = dat_sW_Im_ROT;']);
    eval([varName '.Y(1,9).Data = dat_infGesRe_STAT;']);
    eval([varName '.Y(1,10).Data = dat_infGesIm_STAT;']);
    eval([varName '.Y(1,11).Data = dat_sU_Re_STAT;']);

```

```

eval([varName '.Y(1,12).Data = dat_sU_Im_STAT;']);
eval([varName '.Y(1,13).Data = dat_sV_Re_STAT;']);
eval([varName '.Y(1,14).Data = dat_sV_Im_STAT;']);
eval([varName '.Y(1,15).Data = dat_sW_Re_STAT;']);
eval([varName '.Y(1,16).Data = dat_sW_Im_STAT;']);
eval([varName '.Y(1,17).Data = dat_gamma_mech;']);

name = 'inf_Ges_Re_ROT';
eval([varName '.Y(1,1).Name = name;']);
name = 'inf_Ges_Im_ROT';
eval([varName '.Y(1,2).Name = name;']);
name = 'inf_Schuss_U_Re_ROT';
eval([varName '.Y(1,3).Name = name;']);
name = 'inf_Schuss_U_Im_ROT';
eval([varName '.Y(1,4).Name = name;']);
name = 'inf_Schuss_V_Re_ROT';
eval([varName '.Y(1,5).Name = name;']);
name = 'inf_Schuss_V_Im_ROT';
eval([varName '.Y(1,6).Name = name;']);
name = 'inf_Schuss_W_Re_ROT';
eval([varName '.Y(1,7).Name = name;']);
name = 'inf_Schuss_W_Im_ROT';
eval([varName '.Y(1,8).Name = name;']);
name = 'inf_Ges_Re_STAT';
eval([varName '.Y(1,1).Name = name;']);
name = 'inf_Ges_Im_STAT';
eval([varName '.Y(1,2).Name = name;']);
name = 'inf_Schuss_U_Re_STAT';
eval([varName '.Y(1,3).Name = name;']);
name = 'inf_Schuss_U_Im_STAT';
eval([varName '.Y(1,4).Name = name;']);
name = 'inf_Schuss_V_Re_STAT';
eval([varName '.Y(1,5).Name = name;']);
name = 'inf_Schuss_V_Im_STAT';
eval([varName '.Y(1,6).Name = name;']);
name = 'inf_Schuss_W_Re_STAT';
eval([varName '.Y(1,7).Name = name;']);
name = 'inf_Schuss_W_Im_STAT';
eval([varName '.Y(1,8).Name = name;']);
name = 'gamma_mech';
eval([varName '.Y(1,9).Name = name;']);
save([path varName], varName);
disp('Data Saved');
disp(['MeasNr: ' num2str(mesSt)])
pause(2);

end
end
end
mlib('Write',inform_enable,'Data',0);
mlib('Write',Spg_spannungsbetrag,'Data',0);%Am Angang- und Endzustand die
Spannung muss gleich sein. Daher Rücksetzen auf 0

```