

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit/Diplomarbeit identisch.

06.01.2016

Datum

Unterschrift

Mein Dank gilt allen Personen, die mich direkt oder indirekt bei dieser Arbeit unterstützt haben, insbesondere gilt dies für meine Betreuer, Herrn Seebacher und Herrn Krischan, die mir stets mit Rat und Tat zur Seite standen.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Inhalt und Ziel der Masterarbeit	1
1.1	Kurzfassung	1
1.2	Abstract	1
2	Erstellung des Messprogramms	1
2.1	Allgemeines	1
2.2	Nachmessung der Maschinenparameter	2
2.3	Maschinencharakteristik	2
2.4	Ideen für Messversuche in den nachfolgenden Arbeiten:	2
3	Beschreibung der Versuchsmaschine und des Prüfstands	3
3.1	Beschreibung der Versuchsmaschine	3
3.2	Beschreibung des Prüfstands	4
3.3	Anfertigung fehlender Komponenten	5
4	Reglerentwurf	7
4.1	Reglerdimensionierung	7
4.2	Reglertest	10
5	Messung der Maschinenparameter	11
5.1	Ohmscher Widerstand der Statorwicklungen	11
5.2	Induktivität der Statorwicklungen	17
5.3	Exzentrizität des Rotors	22
5.4	Analyse des mechanischen Systems	24
6	Maschinencharakteristik aus dem Rastmomentverlauf	27
6.1	Versuchsbeschreibung	27
6.2	Versuchsaufbau	27
6.3	Versuchsauswertung	28
6.1	Ergebnisse	32
6.2	Abschlusskommentar	33
7	Maschinencharakteristik aus der Flussverkettung im Leerlauf	34
7.1	Versuchsbeschreibung	34
7.2	Versuchsaufbau	34
7.3	Versuchsauswertung	36
7.4	Ergebnisse	39
7.5	Abschlusskommentar	48
8	Zusammenfassung	48
9	Anhang	49
9.1	Abkürzungsverzeichnis	49
9.2	Literaturverzeichnis	50
9.3	Codeverzeichnis	50
9.4	Tabellenverzeichnis	51
9.5	Abbildungsverzeichnis	51
9.6	Matlab-Code der einzelnen Versuchsauswertungen	53

1 INHALT UND ZIEL DER MASTERARBEIT

1.1 Kurzfassung

Bei der vorliegenden Arbeit handelt es sich um eine Messdiplomarbeit, die sich um die Vermessung einer Permanentmagnet erregten Synchronmaschine bezüglich ihrer elektromechanischen Eigenschaften dreht.

Die zu untersuchende Maschine wurde von der AVL List GmbH spezifiziert und dient zur Validierung eines Simulationsprogramms, welches von der Sparte „Advanced Simulation Technologies“ entwickelt wird. Das 2D-Modell der FEM-Simulation geht davon aus, dass beispielsweise alle Spulen und Magnete in der simulierten Maschine homogen sind, oder dass der Rotor etwa stets eine zentrische Ausrichtung hat.

Einige Besonderheiten der zur Verfügung stehenden Maschine erlauben es nun nachzuprüfen, wie sehr sich etwa Fertigungstoleranzen zum Einen, oder gezielt eingebrachte Störgrößen zum Anderen, auf definierte Vergleichswerte auswirken. Die Basis für diesen Vergleich bilden Daten aus o.a. FEM-Simulation, welche von der AVL List GmbH zur Verfügung gestellt wurden.

Die gewonnenen Erkenntnisse aus den Ergebnissen dieser Arbeit dienen dazu, Vertrauen und Wissen für die verwendeten Messgeräte und Auswertemethoden aufzubauen, Datenblattparameter und Fertigungstoleranzen nachzuprüfen und schließlich die Erstellung einer Maschinencharakteristik anzufertigen, um eventuelle Unsicherheiten der Simulation aufzuzeigen.

1.2 Abstract

The aim of this master thesis is gathering information about the electromechanical properties of a permanent magnet synchronous motor with different experiments.

The motor was specified by AVL List GmbH due to validate a simulation software which is developed by the „Advanced Simulation Technologies“ division of AVL. In its current version this software proceeds on the assumption that, e.g. both, the coils and magnets in the motor are homogenous, or that the rotor has a centric alignment at any time.

Special designed features of the motor allow investigations on production tolerances, artificial misalignment and many more, especially in this thesis the focus is on production tolerances and the comparison between the measured data and the simulated values provided by AVL.

In the end the obtained information shall help, on the one hand, to gain trust and knowledge in the used measurement equipment and evaluation methods, and on the other hand, to create certain characteristics of the motor to reveal possible uncertainties of the 2D simulation model.

2 ERSTELLUNG DES MESSPROGRAMMS

Die vorliegenden Punkte stellen den Stand vom Juni 2015 dar.

2.1 Allgemeines

Um die Vergleichbarkeit der Messergebnisse zu gewährleisten, wird die Messung der Statortemperatur von Anfang an miteinbezogen. Als Solltemperatur wird eine Temperatur von 30°C definiert.

Für die Belastungsmessungen sind Referenzmessungen durchzuführen die ebenfalls die Vergleichbarkeit der einzelnen Messungen sicherstellen sollen. Bei vertrauenswürdigen Messergebnissen kann die Häufigkeit dieser Referenzmessungen verringert werden.

2.2 Nachmessung der Maschinenparameter

- Statorwiderstand
- Statorinduktivität
 - Impedanzmessung (verschiedene Amplituden und Frequenzen)
- Mechanisches System
 - Bestimmung der Eigenfrequenz des Systems
- Flussverkettung im Leerlauf
 - Siehe 2.3

2.3 Maschinencharakteristik

- Maschinencharakteristik anhand Rastmoment
 - bei niedrigen Drehzahlen (mit Positionsregler der ASM langsam einen Umlauf abfahren)
 - bei fixer Position (Einsatz von Dithering, um einen Einfluss der Haftreibung auszuschließen)
 - Durchführung der Versuche mit zentriertem Rotor
 - Analyse der Charakteristik und Vergleich mit FEM-Daten im Frequenzbereich
- Maschinencharakteristik anhand Flussverkettung im Leerlauf
 - Messung der induzierten Spannungen in allen 18 STS, sowie in jenen 8 FMS, die jeweils an einem Statorzahn angebracht sind
 - Durchführung des Versuchs bei zwei deutlich unterschiedlichen Drehzahlen, und jeweils mit unterschiedlicher Drehrichtung (Untersuchung des Einflusses von Wirbelströmen)
 - Definition eines „Referenzzahns“, der mit STS und FMS Bestandteil jeder Messung ist.
 - Durchführung des Versuchs mit zentriertem Rotor
 - Vergleich einiger Umdrehungen von unterschiedlichen Zähnen
 - Vergleich einiger nebeneinanderliegender Zähne
 - Als Vergleichsgröße wird die Flussverkettung „Psi“ definiert (Ermittlung von „Psi“ durch integrieren der Spannungen)
 - Analyse der Charakteristik und Vergleich mit FEM-Daten im Frequenzbereich
 - Ziel: Vergleich der Homogenität von Spulen und Magneten

2.4 Ideen für Messversuche in den nachfolgenden Arbeiten:

- Messung der Erwärmung eines Statorzahns im Leerlauf
 - Durch Wirbelströme, bzw. Ummagnetisierung des Materials findet eine messbare Erwärmung des Stators statt. Dieses Verhalten soll untersucht werden. Der Rotor der PMSM wird dabei von der ASM angetrieben.
- Messung der Induktivität
 - Genauere Untersuchung der Amplituden- und Frequenzabhängigkeit der Induktivität.
- Anregen von Wirbelströmen im Rotor durch Überlagerung eines hochfrequenten Stroms
 - im Stillstand und bei drehender Maschine
 - gezieltes Erwärmen der Magnete (Lage der Temperatursensoren im Rotor sollte eine Untersuchung möglich machen)

3.2 Beschreibung des Prüfstands

Der Prüfstand besteht neben dem Maschinensatz aus zahlreichen weiteren Komponenten, welche in Abb. 3 als Blockschaltbild dargestellt sind. Nachfolgend sollen diese Komponenten genauer beschrieben werden um eine Vorstellung von den Möglichkeiten des verwendeten Prüfstands zu bekommen.

Die Versuchsmaschine ist über eine Drehmomentmesswelle und Kupplungen mit Ausgleichselementen an eine Asynchronmaschine angekuppelt worden, das verbindende Element des Maschinensatzes ist eine Schweißkonstruktion aus massivem Stahl, welche auch die Verbindung zum Prüfstandsfundament herstellt.

Beide Maschinen werden mit einer Kombination aus U_{ZK} IGBT-Pulswechselrichtern des Instituts und einem Signalprozessorsystem angesteuert, was vielfältige Betriebsarten ermöglicht. Die Energieversorgung der PWR erfolgt durch einen Drehstrom-Stelltrafo, was eine maximale Zwischenkreisspannung bis zur gleichgerichteten Netzspannung erreichbar werden lässt. Bei den Phasenströmen liegt die Grenze der PWR bei $70 A_{eff}$.

An Messtechnik stehen Temperaturmessgeräte, eine Drehmomentmesswelle, die Inkrementalgeber der Maschinen, sowie allen voran ein Leistungsmessgerät zur Verfügung, womit alle Versuche in der gegenständlichen Arbeit messtechnisch erfasst wurden. Die Messgeräte sind in aufgewärmtem Zustand zu betreiben, d.h. bevor Messungen durchgeführt werden, müssen die betreffenden Messgeräte mindestens 2 Stunden eingeschaltet sein.

Die Steuerung der unterschiedlichen Systeme wird schließlich von einem Rechner mit Windows-Betriebssystem erledigt, wobei auch die Auswertung und Datenorganisation mit diesem Rechner erfolgt ist.

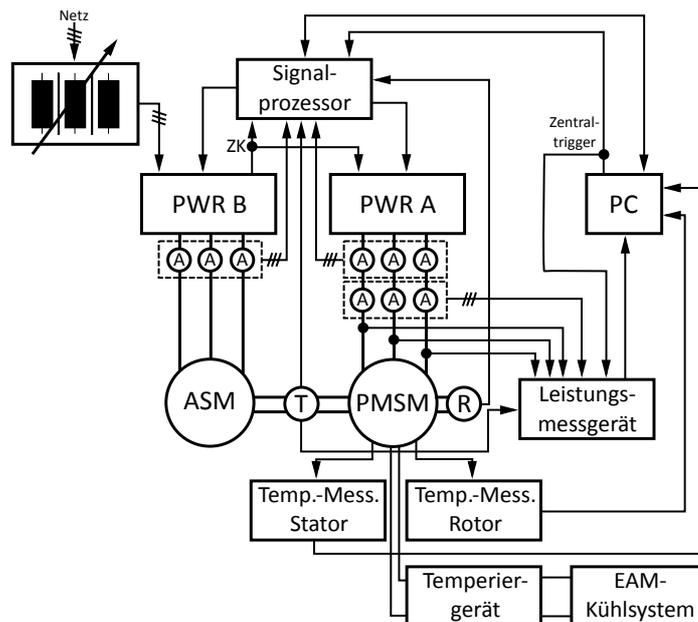


Abb. 3: Übersicht über die Prüfstandsinfrastruktur als Blockschaltbild

Zusammenfassung der wichtigsten Eigenschaften:

- IGBT-Pulswechselrichter mit Phasenströmen bis $70 A_{eff}$ und Zwischenkreisspannungen bis gleichgerichteter Netzspannung (B6), $f_s = 10 \text{ kHz}$
- Leistungsmessgerät (Norma N5000)¹
 - Großer Messbereich: (0,3 – 1000 V; 0,03 – 10 A (direkt) – 300 A (extern))
 - 12 Kanäle für Ströme, bzw. Spannungen
 - Schnittstelle für Drehmoment, bzw. Drehzahl
 - Basisgenauigkeit 0,1 %
- Signalprozessorsystem (dSpace – DS1103)

¹ [6], Seite 5

- Zur Laufzeit via Matlab-Skript ansteuerbar, was beispielsweise die Programmierung vollautomatischer Messabläufe möglich macht.
- Temperiergerät (Single STW 1-3-20-TKK5 T7)¹
 - Heizleistung: 3 kW
 - Anschluss an das EAM-Kühlsystem über einen Wärmetauscher
- Temperaturmessgeräte
 - Rotor: Telemetriesystem (8 Thermoelemente Typ T)
 - Stator: Keithley 2700 mit den Messkarten 7708 und 7706 für die Erfassung aller Signale (46 Thermoelemente Typ T + Reserve)
- Inkrementalgeber (Heidenhain ERN 180)²
 - Systemgenauigkeit: 26 Winkelsekunden
 - 1 V_{SS}
 - Strichzahl: 2500
- Drehmomentmesswelle (HBM T10F)³
 - Nennmessbereich bis 100 Nm
 - Genauigkeitsklasse 0,1

3.3 Anfertigung fehlender Komponenten

Die Prüfstandsinfrastruktur wie sie in Abb. 3 skizziert ist, war größtenteils bereits vorhanden, einige Komponenten, sowohl auf Software-, als auch auf Hardwareseite mussten allerdings vom Autor noch geplant, bzw. auch angefertigt und programmiert werden, um den Prüfstand in Betrieb nehmen zu können.

Konkret handelte es sich dabei um folgende Komponenten:

- Hardware
 - Stromverteilung für die Statorspulen, eingebaut in einem Schaltschrank
 - Anschlüsse für die Statorspulen, von Klemmenblock auf 4mm Sicherheitslaborbuchsen
 - Anschluss und Inbetriebnahme des Temperiergeräts
- Software
 - Programmierung einer Java-Applikation zur Ansteuerung des Messgeräts für die Statortemperaturmessung
 - Ansteuerung des Signalprozessorsystem und der Messgeräte zur Laufzeit, um beispielsweise vollautomatische Messabläufe durchführen zu können, ein beispielhaftes Matlab-Skript befindet sich im Anhang

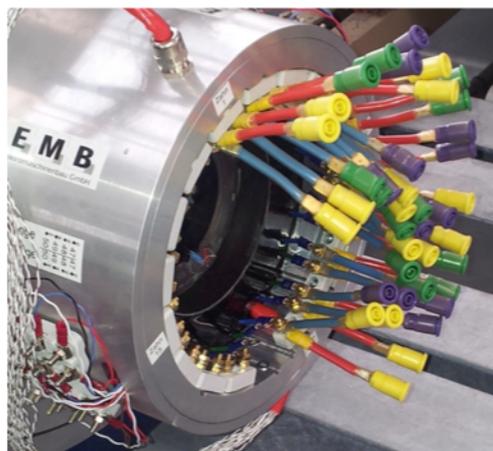


Abb. 4: Montage der Anschlüsse der Statorspulen

¹ [10]

² [9], Seite 44ff

³ [7]

Grundsätzlich wurde als Anschluss für die Statorspulen eine 4mm Sicherheitslaborbuchse gewählt, weil dieses System im EAM-Labor bereits verwendet wird, und weil damit eine rasche Änderung der Verschaltung der Spulen möglich ist. Wie in Abb. 4 ersichtlich wurde eine am EAM übliche Farbcodierung für die einzelnen Phasen verwendet (L1 – gelb, L2 – grün, L3 – violett), außerdem wurde jeder Anschluss am Klemmenblock mit 2 Laborbuchsen versehen, um Energiezufuhr, bzw. Messsignalausleitung zu trennen, wie es beispielsweise bei der 4-Leiter-Messtechnik benötigt wird.

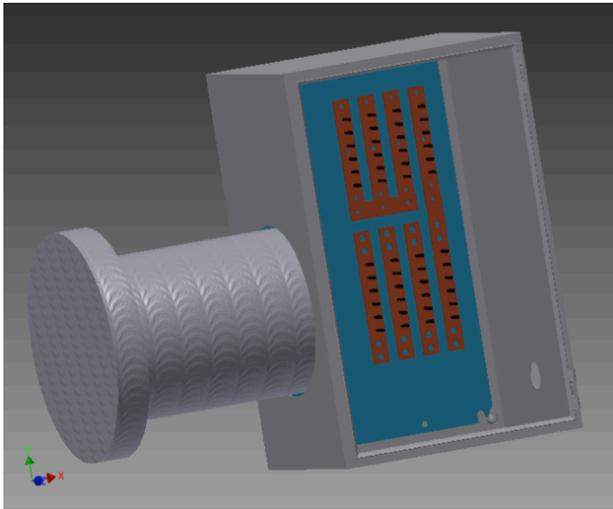


Abb. 5: Modell des Stromverteilers für die PMSM



Abb. 6: Fertiggestellter Stromverteilkasten

Der Stromverteiler besteht im Wesentlichen aus Kupferschienen mit einer hinreichenden Stromtragfähigkeit. In die Kupferschienen sind Anschlüsse für die am EAM verwendeten 4 mm Sicherheitslaborkabel eingeschraubt, was eine flexible, schnelle und übersichtliche Verschaltung der 18 Statorspulen ermöglicht. Der Schaltkasten wird außerdem dazu verwendet, einen gewissen Berührschutz der Klemmenblöcke, sowie der rotierenden Welle der PMSM sicherzustellen.

Die Software für die Ansteuerung des Temperaturmessgeräts für die Sensoren im Stator musste selbst erstellt werden, da die bereits vorhandene Labview-Applikation eine spezielle Schnittstelle benötigte, die am vorhandenen Rechner nicht verfügbar war. Es wurde schließlich ein Programm implementiert, welches das Messgerät über die serielle Schnittstelle (RS232) anspricht und die einzelnen Messwerte geordnet am Rechner abspeichert.

Die Ansteuerung des Signalprozessorsystems zur Laufzeit wurde benötigt, weil bei der Messung des Rastmoments, aufgrund der langen Dauer des Versuchs (ca. 12h), eine vollautomatische Messung notwendig wurde. Das Signalprozessorsystem ist mit einer Bibliothek für Matlab ausgeliefert worden, welche eine reibungslose Kommunikation zwischen Signalprozessorsystem und Rechner ermöglicht hat. Es hat sich außerdem gezeigt, dass eine generelle Steuerung des Prüfstands via Matlab-Skripte vorteilhaft ist, da damit die jeweiligen Einstellungen der PWR für die einzelnen Versuche automatisch mitdokumentiert werden.

4 REGLERENTWURF

Das Ziel des Reglerentwurfs ist, stabile Stromregler für den d-, und q-Strom der PMSM zu entwerfen, die keine bleibende Regelabweichung aufweisen. Da ansonsten keine besonderen Anforderungen an die Stromregler gestellt werden, sind die übrigen Kennwerte wie Anstiegszeit und Überschwingen willkürlich gewählt worden.

Als Entwurfsmethode wurde das sogenannte Frequenzkennlinienverfahren gewählt, da für dieses Verfahren bereits Vorwissen vorhanden war, und es für diese Methode eine Unterstützung durch Matlab gibt.

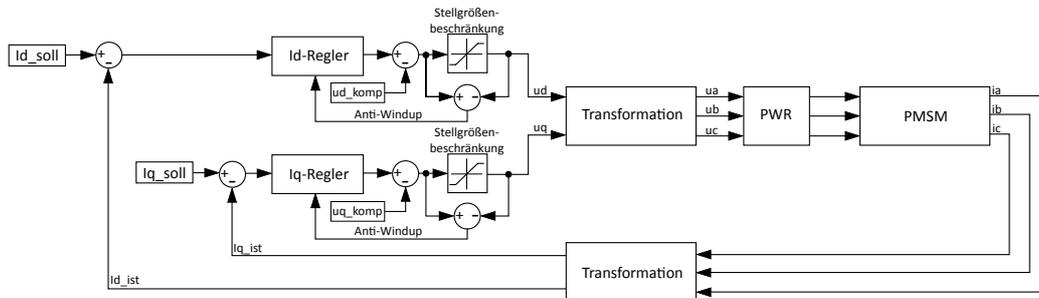


Abb. 7: Prinzip-Blockschaltbild der Reglerstruktur

Wie in Abb. 7 ersichtlich besteht die Stromregelung für die PMSM aus wesentlich mehr Elementen als den reinen Reglerblöcken, für die in diesem Kapitel die Parameter bestimmt werden. Eine Aufgabe in Zusammenhang mit dem Reglerentwurf war schließlich auch, das Zusammenwirken des bereits vorhandenen Simulink-Koppelplanes zu verstehen, welcher letzten Endes kompiliert und auf das Signalprozessorsystem geladen wird.

4.1 Reglerdimensionierung

Der erste Schritt unter dem Punkt Reglerdimensionierung war, eine Beschreibung für die Regelstrecke, im gegenständlichen Fall das elektrische System einer PMSM, zu finden.

Ein adäquates Gleichungssystem wurde aus [1], Seite 845 entnommen, siehe Gleichungen (1) bis (4).

Da das Datenblatt der vorliegenden Versuchsmaschine eine symmetrische Induktivität ausweist, konnte $L_1=L_d=L_q$ angenommen werden.

$$\frac{d\Psi_d}{dt} = U_d - R_S \cdot I_d + \omega_{el} \cdot \Psi_q \quad (1)$$

$$\frac{d\Psi_q}{dt} = U_q - R_S \cdot I_q - \omega_{el} \cdot \Psi_d \quad (2)$$

$$\Psi_d = \Psi_{PM} + L_1 \cdot I_d \quad (3)$$

$$\Psi_q = L_1 \cdot I_q \quad (4)$$

Der Weg von den Systemgleichungen zur Übertragungsfunktion wird im Folgenden (Gleichungen (5) bis (7)) anhand der q-Größen gezeigt, für die d-Größen wird analog vorgegangen und aufgrund der getroffenen Annahmen ergibt sich schlussendlich die gleiche Strecke wie bei den q-Größen, siehe Gleichung (7).

In Gleichung (2) wird Gleichung (3) eingesetzt was Zusammenhang (5) ergibt, der Teil der Gleichung der als Störgröße bezeichnet wird, wird im Rahmen einer sogenannten Störgrößenaufschaltung berücksichtigt (siehe Abb. 8) und kann daher für die Bestimmung der Strecke weggelassen werden, wodurch man ein vereinfachtes Streckenmodell erhält.

$$L_1 \frac{dI_q}{dt} = U_q - R_S \cdot I_q - \underbrace{\omega_{el} \cdot (\Psi_{PM} + L_1 \cdot I_d)}_{\text{Störgröße}} \quad (5)$$

$$\mathcal{L} \left\{ \frac{dI_q}{dt} = \frac{1}{L_1} U_q - \frac{R_S}{L_1} \cdot I_q \right\} \Rightarrow I_q \cdot (sL_1 + R_S) = U_q \quad (6)$$

$$\frac{I_q}{U_q} = \frac{1}{(sL_1 + R_S)} = G_{UI} \quad (7)$$

Die in Abb. 8 gezeigte Strecke der PMSM wurde im weiteren Verlauf mittels Matlab numerisch einer Z-, bzw. Bilinear-Transformation unterzogen, wobei die transformierte Strecke schließlich dem Hilfsprogramm **sisotool** übergeben wurde. Dieses in Matlab integrierte Hilfsprogramm ermöglicht es, geeignete Regelparameter zu berechnen, welche in weiterer Folge durch Modifikation von Phasenreserve und Verstärkung im Bode-Diagramm des offenen Kreises auf die eigenen Wünsche angepasst werden können, siehe Abb. 9.

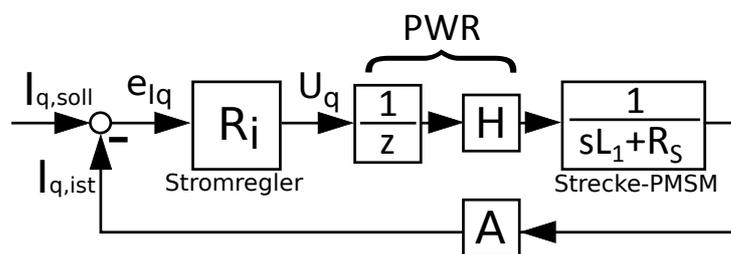


Abb. 8: Geschlossene Stromregelschleife

Listing 1: Reglerentwurf mit Unterstützung von Matlab,
reg_entw_140826

```
% 26.08.2014, H. Gruebler
% MA Gruebler - Entwurf eines PI-Stromreglers fuer die PMSM
%
% Das nachfolgende Matlab-Skript beschreibt den Weg des Reglerentwurfs
% mittels des Frequenzkennlinienverfahrens, ausgehend von der vorher
% entwickelten Strecke.

%clean-up von Workspace und Konsole
clc;
clear all;
close all;

%% Definition der Parameter, die beim Reglerentwurf benoetigt werden
Ta = 10e-5;           %s, Abtastzeit des Signalprozessorsystems
Rs = (84e-3)*6;      %Ohm, Strangwiderstand fuer eine Serienschaltung
                        %aller 6 Spulen, siehe [4]
Ll = (1.1e-3)*6;    %H, Stranginduktivitaet fuer eine Serienschaltung
                        %aller 6 Spulen, siehe [4]

% Definition von z fuer die spaetere z-Transformation
z=tf('z',Ta);

%% Stromregler

%Uebertragungsfunktion G_UI
num_Gs_ui = [1];
den_Gs_ui = [Ll Rs];
Ps_i = tf(num_Gs_ui, den_Gs_ui);

%z-Transformation der Stromreglerstrecke
Pz_i = c2d(Ps_i, Ta);

%Miteinbeziehen der Verzoegerung durch den PWR
Pz_i_ges = 1/z * Pz_i;
[num_z_i_ges, den_z_i_ges] = tfdata(Pz_i_ges, 'v');
```

```

%Bilinear-Transformation der Stromreglerstrecke
[num_q_i, den_q_i] = s_z_q(num_z_i_ges, den_z_i_ges, Ta, 'z', 'q');
Pq_i = tf(num_q_i, den_q_i);

%Ermittlung der Stromreglerparameter mit Hilfe des sisotools im q-Bereich
sisotool('bode',Pq_i)

%Mit sisotool ermittelte Reglerparameter werden geladen
load Rq_i;
[num_Rq_i,den_Rq_i]=tfddata(Rq_i,'v');

%Ruecktransformation in den z-Bereich
[num_Rz_i, den_Rz_i] = s_z_q(num_Rq_i,den_Rq_i, Ta, 'q', 'z');
Rz_i = tf(num_Rz_i, den_Rz_i,Ta);

```

Als Erklärung für die Funktion von sisotool im Rahmen dieser Arbeit sei stellvertretend Abb. 9 angeführt, man sieht die Frequenzkennlinie des offenen Kreises von Regler und Strecke, wobei die Reglerparameter durch Verschieben der Kurve einfach angepasst werden können. Wie oben erwähnt wurden an den Regler keine besonderen Anforderungen gestellt, also wurden die Parameter des Reglers, von sisotool automatisiert (PID-Tuning, robust response time), an die Strecke angepasst.

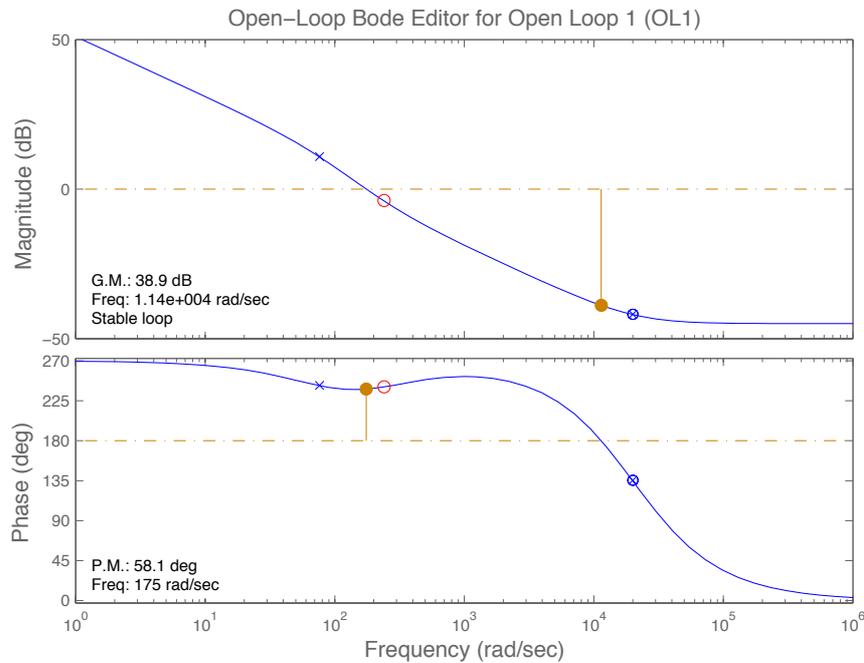


Abb. 9: Editoransicht des offenen Kreises von sisotool

Abb. 10 zeigt die parallele Reglerstruktur des verwendeten PI-Reglers, wie sie schließlich am Signalprozessorsystem implementiert ist.

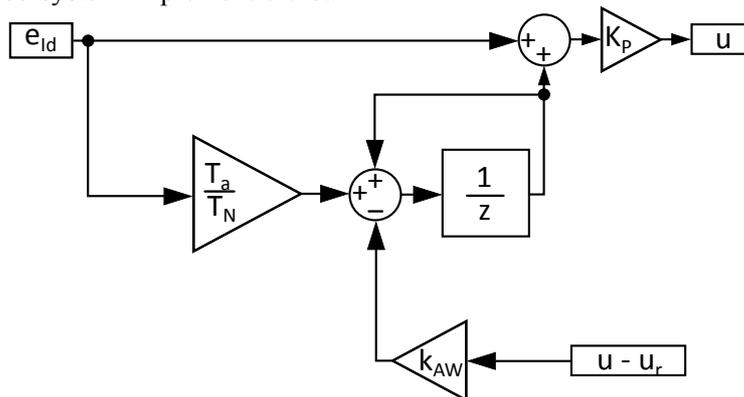


Abb. 10: Detail Stromregler R_i ¹

Als Ergebnis wurde $K_p = 0,6$ und $1/T_N = 300$ ermittelt. Die Regelparameter wurden für eine Serienschaltung aller 6 Spulen je Strang ermittelt, für eine abweichende Verschaltung sind die Parameter eventuell entsprechend anzupassen.

4.2 Reglertest

Wie Abb. 11 und Abb. 12 zeigen wurde das gesteckte Ziel erreicht. An dieser Stelle sei erwähnt, dass die Stromregler der vorliegenden Arbeit nur für den Punkt 5.2 – Bestimmung der Induktivität der Statorwicklungen verwendet wurden, was sehr gut funktioniert hat.

Für die in der Zukunft liegenden Belastungsmessungen haben erste Versuche gezeigt, dass die aktuellen Einstellungen der Regler nur bedingt geeignet sind, hier wird auf Basis der bisherigen Arbeit eine Optimierung erfolgen müssen.

Die Daten der Diagramme in Abb. 11 und Abb. 12 wurden mittels des Signalprozessorsystems aufgezeichnet, das Matlab-Skript, das zur Erstellung der Diagramme verwendet wurde befindet sich im Anhang.

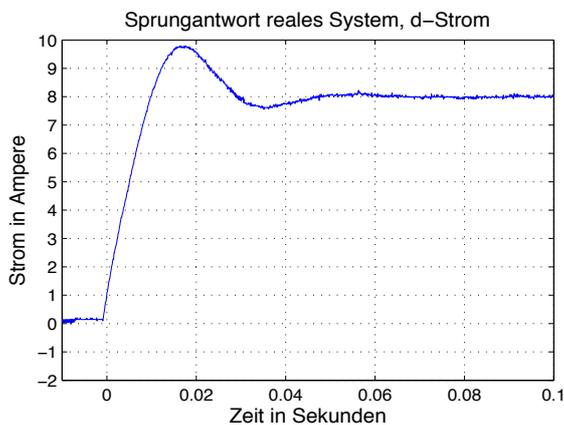


Abb. 11: Sprungantwort des geschlossenen Kreises, d-Strom

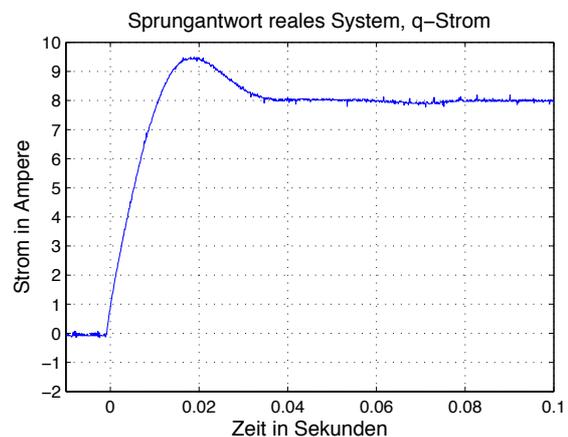


Abb. 12: Sprungantwort des geschlossenen Kreises, q-Strom

¹ siehe 04_Ansteuerung_Pruefstand\Ansteuerung Maschinensatz\dSpace\am_pmsm_150506\am_pmsm_150506.mdl, bzw. init_am_pmsm150506.m

5 MESSUNG DER MASCHINENPARAMETER

5.1 Ohmscher Widerstand der Statorwicklungen

5.1.1 Versuchsbeschreibung

Das Ziel dieses Versuchs ist die Ermittlung des ohmschen Widerstands der einzelnen Statorspulen, um die Datenblattparameter zu überprüfen und, da die Anschlüsse der Statorspulen bei der vorliegenden Maschine separat herausgeführt sind, auch eine Aussage über die Homogenität der Widerstände der Spulen zu erhalten.

5.1.2 Versuchsaufbau

Aufgrund der Datenblattwerte wurde ein sehr kleiner Widerstandswert (ca. $70\text{m}\Omega$) je Spule erwartet, weshalb als Messverfahren die sogenannte 4-Leiter-Messtechnik ausgewählt wurde, siehe Abb. 14.

Strom und Spannung wurden mit dem Leistungsmessgerät für jeweils 9 Kanäle simultan aufgenommen, wobei Gesamteffektivwerte gemessen wurden. Um alle 18 Statorspulen zu erfassen waren also 2 Messdurchgänge notwendig, wobei als Stromquelle ein DC-Netzteil (Statron 32V; 6,4A) verwendet wurde. Als Ströme wurden dabei 3A und 5A eingestellt, die Werte sind grundsätzlich willkürlich gewählt, wobei 3A den Maximalwert des externen Messwiderstands darstellt, und 5A ca. ein Drittel des Nennstroms einer Spule ist.

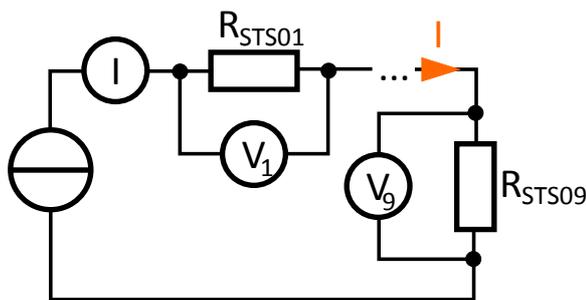


Abb. 13: Messschaltung - Widerstandsmessung der Statorspulen

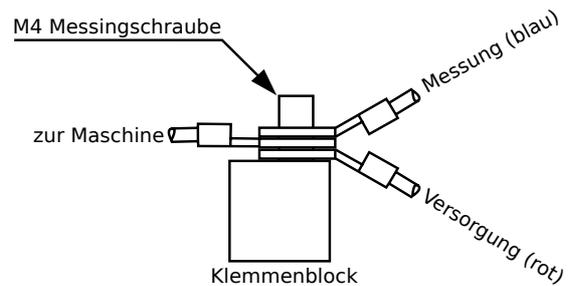


Abb. 14: Detail der Anschlüsse der Statorspulen

Tabelle 1: Kanalbelegung des Leistungsmessgeräts bei der Widerstandsmessung

Nr.	STS	Kanal
1	1	VOLT1
2	2	VOLT2
3	3	VOLT3
4	4	VOLT4
5	5	VOLT5
6	6	VOLT6
7	7	CURR6
8	8	CURR5
9	9	CURR3
10	10	VOLT1
11	11	VOLT2
12	12	VOLT3
13	13	VOLT4
14	14	VOLT5
15	15	VOLT6
16	16	CURR6
17	17	CURR5
18	18	CURR3

Der Strom wurde jeweils mit dem Kanal „CURR1“ aufgezeichnet, in Tabelle 1 finden sich nur Kanäle, mit denen eine Spannung gemessen wurde. An dieser Stelle sei erwähnt, dass bei dem verwendeten Leistungsmessgerät mit den Kanälen für die externe Strommessung auch Spannungen bis $10 V_{\text{eff}}$ gemessen werden können.

Bei den Messungen mit 3A wurde ein externer Messwiderstand verwendet, Typenkenung: A3c. Für eine detaillierte Ansicht der Einstellungen am Leistungsmessgerät sei auf die Konfigurationsdateien desselben („150912_N5000konf_i_ext.txt“ und 150912_N5000konf_i_int.txt) für diesen Versuch verwiesen.

5.1.3 Versuchsauswertung

Auswertung der Messdaten

Für die Versuchsauswertung der Messwerte wurde ein Matlab-Skript erstellt, welches nachfolgend die Berechnung der Widerstände und das Zustandekommen von Abb. 18 verdeutlichen soll.

Tabelle 2: Details zur Versuchsausführung¹

Nr.	Dauer*	Strom	Bestromte STS	Anzahl Messdaten**	Zeit bis zum nächsten Versuch***
--	s	A	--	--	mm:ss
1	10	3	1-9	10	03:23
2	14	5	1-9	10	09:35
3	10	5	10-18	10	02:35
4	10	3	10-18	10	--:--

Die Teilversuche in Tabelle 2 sind nach der Reihenfolge der Durchführung sortiert.

*Dauer der Bestromung der angeführten STS, mit dem angegebenen Strom.

**Bei den Messdaten handelt es sich um Gesamteffektivwerte.

***In dieser Zeit wurden Schaltungsänderungen, Organisation der Messdaten, etc. durchgeführt.

**Listing 2: Matlab-Skript zur Auswertung der Widerstandsmessung,
aw_r_messung_stat_150912.m**

```
% 19.09.2015, H. Gruebler
% MA Gruebler - Auswertung der Widerstandsmessung
%
% Messdaten:
% *****
% Der Versuch wurde in 2 Etappen mit je zwei unterschiedlichen Stroemen
% durchgeführt, in den Dateien mit den Endungen *_1_9.txt sind die Werte
% von STS01 bis STS09, in jenen Dateien mit den Endungen *_10_18.txt die
% Werte von STS10 bis STS18 abgespeichert.
% Es handelt sich bei den Messwerten um Gesamteffektivwerte
%
% Die Daten sind in den Dateien jeweils in Spalten organisiert und nach
% folgender Struktur abgelegt:
%
% STS01-STSO9
% -----
% 1| 2| 3|4| 5| 6| 7| 8| 9| 10| 11| 12| 13|
% -+--+--+--+-----+-----+-----+-----+-----+
% hh|mm|ss|I|STS01|STS02|STS03|STS04|STS05|STS06|STS07|STS08|STS09|
% -+--+--+--+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
%
% STS10-STSO18
% -----
% 1| 2| 3|4| 5| 6| 7| 8| 9| 10| 11| 12| 13|
% -+--+--+--+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
% hh|mm|ss|I|STS10|STS11|STS12|STS13|STS14|STS15|STS16|STS17|STS18|
```

¹ siehe 01_Widerstandsmessung\150912_r_messung_stator\01_Auswertung\Messdaten\150912_daten_r_mess_stat*

```

% ---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+
%
% Funktionsbeschreibung:
% *****
%
% Die Messdaten werden in der Reihenfolge von STS01 bis STS18 eingelesen,
% gemittelt und geordnet in den entsprechenden Vektoren abgelegt.
% Danach wird mittels des ohmschen Gesetzes aus den gemittelten
% Gesamteffektivwerten der ohmsche Widerstand berechnet.
% Es werden nun aus den Einzelwiderständen der STS mittlere Widerstände fuer
% die jeweiligen Versuche berechnet, welche dann anschliessend als
% Bezugswert für die relative Abweichung verwendet werden.

%clean-up von Workspace und Konsole
clc;
close all;
clear all;

%Einlesen der Messdaten von der Festplatte
mw_3a_1_9=load('Messdaten\150912_daten_r_mess_stat_3A_spulen_1_9.txt');
mw_3a_10_18=load('Messdaten\150912_daten_r_mess_stat_3A_spulen_10_18.txt');
mw_5a_1_9=load('Messdaten\150912_daten_r_mess_stat_5A_spulen_1_9.txt');
mw_5a_10_18=load('Messdaten\150912_daten_r_mess_stat_5A_spulen_10_18.txt');

%Aufteilen des Messdaten in Stroeme und Spannungen, Mittelung der Messwerte
%und entsprechend geordnetes Ablegen in Vektoren
i_3a_1_9 = mean(mw_3a_1_9(:,4));
i_3a_10_18 = mean(mw_3a_10_18(:,4));
i_5a_1_9 = mean(mw_5a_1_9(:,4));
i_5a_10_18 = mean(mw_5a_10_18(:,4));

n = 5:13;
k = 1:9;
m = 10:18;

u_3a_1_18(k) = mean(mw_3a_1_9(:,n));
u_3a_10_18(m) = mean(mw_3a_10_18(:,n));
u_5a_1_18(k) = mean(mw_5a_1_9(:,n));
u_5a_10_18(m) = mean(mw_5a_10_18(:,n));

%Berechnung der Einzelwiderstaende
R_3a = [u_3a_1_18(1:9) ./ i_3a_1_9 u_3a_10_18(10:18) ./ i_3a_10_18];
R_5a = [u_5a_1_18(1:9) ./ i_5a_1_9 u_5a_10_18(10:18) ./ i_5a_10_18];

%Berechnung gemittelter Widerstaende
R_m3a = mean(R_3a)
R_m5a = mean(R_5a)

R_s = mean([mean(R_3a) mean(R_5a)])

%Berechnung der relativen Abweichung der Einzelwiderstaende zum jeweiligen
%Mittelwert
n = 1:18;
f_rel_3a(n) = 100*((R_3a(n) - R_m3a) / R_m3a);
f_rel_5a(n) = 100*((R_5a(n) - R_m5a) / R_m5a);

%Darstellung der Ergebnisse
figure(1);
hold on;
plot(n,f_rel_3a,'-*', 'LineWidth',1.5);
plot(n,f_rel_5a,'-r*', 'LineWidth',1.5);
hold off;
legend('Messung mit 3A','Messung mit 5A','Location','NorthWest');
grid on;
title('Vergleich der Messungen');
xlabel('STS-Nr. ');
ylabel('Relative Abweichung vom jeweiligen Mittelwert in %');

```

Untersuchung der Erwärmung der Spulen durch den Messstrom

Wie bereits erwähnt verfügt die Versuchsmaschine über die Möglichkeit einer umfangreichen Temperaturmessung, wobei bei allen durchgeführten Versuchen die Temperatursensoren auch ausgewertet wurden.

Abb. 15 zeigt die Temperaturverläufe aller 46 Temperatursensoren im Stator, wobei die etwas dickere rote Linie den Mittelwert aller Sensoren darstellt. Es ist deutlich erkennbar, dass zwischen Minute 20 und 24 (Bestromung der Spulen) eine merkbare Erwärmung stattfindet, v.a. jene Sensoren, welche in die Spulen miteingewickelt wurden, zeigen hier wie erwartet die größte Änderung. Im Detail handelt es sich bei den zwischen Minute 20 und 24 gezeigten Erwärmungen um Teilversuch Nr. 3 und 4 aus Tabelle 2.

Die folgende Überlegung soll eine Abschätzung geben, wie sehr sich die Erwärmung der Spulen auf das Messergebnis auswirkt.

$$R(\vartheta) = R_{20} \cdot (1 + \alpha_L \cdot \Delta\vartheta) \quad (8)^1$$

Ausgehend von Gleichung (8) wird, wie in Gleichung (9) ersichtlich, ein Verhältnis gebildet, sodass sich eine Widerstandsänderung in % ergibt. Die Werte für ϑ_1 und ϑ_2 wurden aus den Daten von Abb. 15 entnommen, es handelt sich um den Temperaturunterschied jener Kurve mit der größten Änderung.

$$\begin{aligned} \left[1 - \frac{R_{(\vartheta_1=29,45)}}{R_{(\vartheta_2=29,85)}} \right] \cdot 100 &= \left[1 - \frac{1 + \alpha_L \cdot \Delta\vartheta_1}{1 + \alpha_L \cdot \Delta\vartheta_2} \right] \cdot 100 \\ &= \left[1 - \frac{1 + 3,9 \cdot 10^{-3} \cdot 9,45}{1 + 3,9 \cdot 10^{-3} \cdot 9,85} \right] \cdot 100 \\ &= 0,150\% \end{aligned} \quad (9)$$

Das Ergebnis von Gleichung (9) zeigt nun, dass die Widerstandsänderung durch die Erwärmung der Statorspulen messbar ist, was das Kreuzen der Kurven zwischen STS09 und STS10 in Abb. 18 erklären kann, jedoch sind die großen Abweichungen bis +/- 1,5% damit nicht erklärbar.

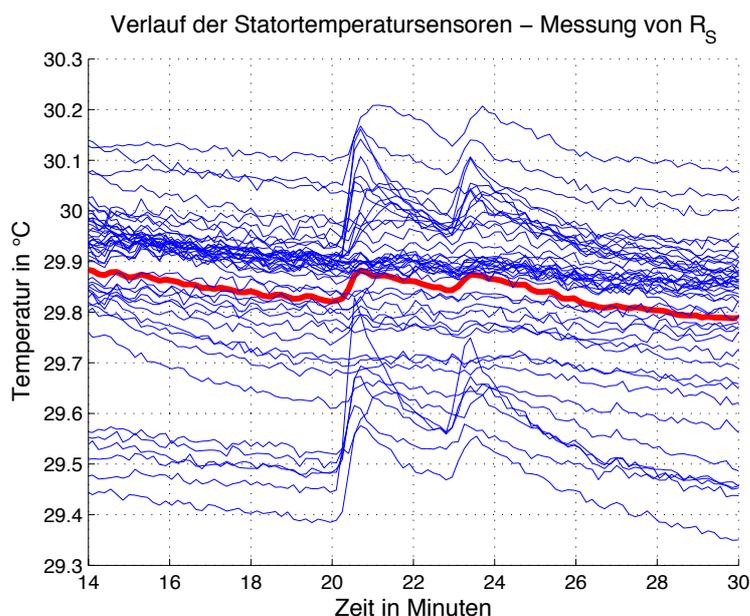


Abb. 15: Temperaturverlauf während der Versuche zur Widerstandsbestimmung

¹ [2], Seite G5 – Gleichung 2

² [2], Seite G5 – Tabelle 1

Vergleich der Spannungskanäle am Leistungsmessgerät mittels Vergleichsmessung

Um die Spannungskanäle des Leistungsmessgeräts als Ursache für die unerwartet großen Abweichungen in Abb. 18 ausschließen zu können, wurde eine Vergleichsmessung durchgeführt, wobei alle 9 verwendeten Spannungskanäle parallel zur STS18 geschaltet, und wiederum der Widerstand anhand einer Strom- Spannungsmessung bestimmt wurde.

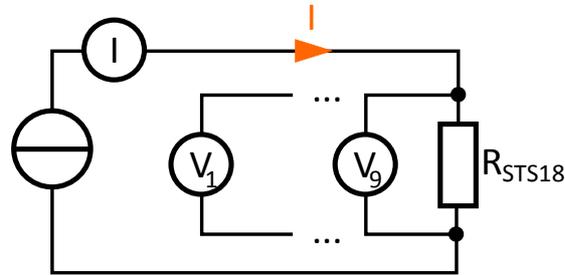


Abb. 16: Schaltung der Vergleichsmessung

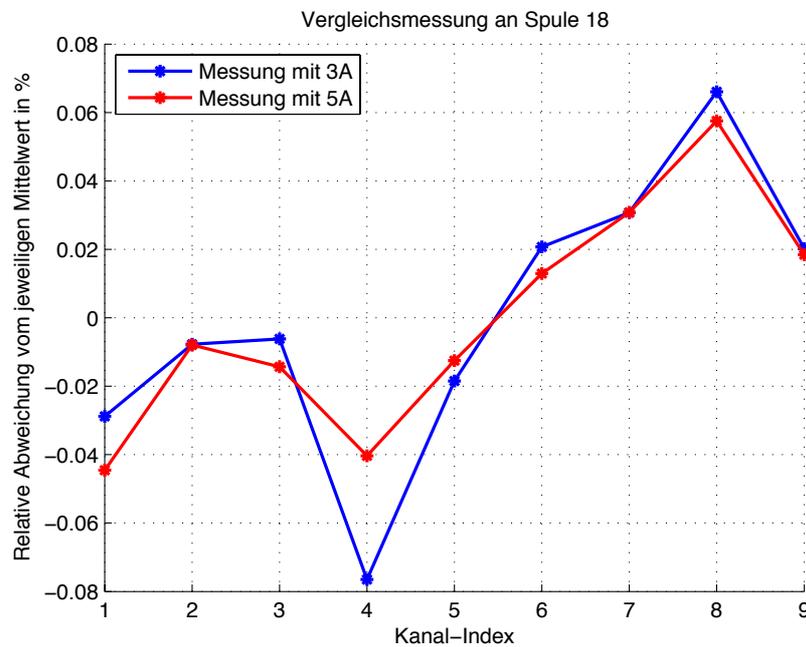


Abb. 17: Ergebnis der Vergleichsmessung

Der Mittelwert für die Messung mit 3A beträgt 74,65 mΩ, jener für die Messung mit 5A 74,89 mΩ.

Tabelle 3: Numerische Auswertung von Abb. 17

Nr.	VOLT1	VOLT2	VOLT3	VOLT4	VOLT5	VOLT6	CURR6	CURR5	CURR3
--	%	%	%	%	%	%	%	%	%
--	Index 1	Index 2	Index 3	Index 4	Index 5	Index 6	Index 7	Index 8	Index 9
1	-0,029	-0,008	-0,006	-0,077	-0,019	0,021	0,031	0,066	0,020
2	-0,045	-0,008	-0,014	-0,040	-0,013	0,013	0,031	0,058	0,019

Das Ergebnis dieser Vergleichsmessung ist nun in Abb. 17 ersichtlich, somit ist ausgeschlossen, dass das Messgerät die Ergebnisse unzulässig verfälscht.

Das Matlab-Skript zur Auswertung der Vergleichsmessung befindet sich im Anhang, siehe Listing 7.

5.1.4 Ergebnisse

Bei der Messung mit 3A ergab sich ein mittlerer Widerstand der Spulen zu 74,4 mΩ, bei der Messung mit 5A 74,6 mΩ, wobei diese beiden Werte jeweils den Bezug für die Abweichungen in Abb. 18 darstellen.

Als Endergebnis dieses Versuchs der Widerstandsbestimmung wurde schließlich der Mittelwert aus den Messungen mit 3 A und 5 A gewählt, $R_S = 74,5 \text{ m}\Omega$.

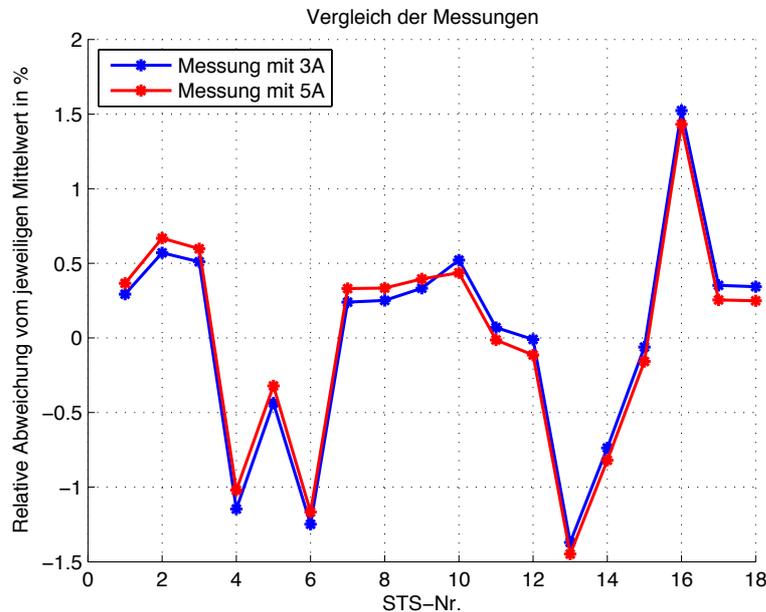


Abb. 18: Messergebnis der Widerstandsmessung

Die Zeile 3 in Tabelle 4 und Tabelle 5 ist jeweils die Differenz der Zeilen 1 und 2 der betreffenden Spalte. Diese Differenz ist deshalb separat angeführt, um zu zeigen, dass die Messergebnisse der zwei Versuche im 0,1%-Band des Leistungsmessgeräts liegen.

Tabelle 4: Numerische Auswertung von Abb. 18 - Teil 1

Nr.	Versuch	STS01	STS02	STS03	STS04	STS05	STS06	STS07	STS08	STS09
--	--	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	3A	0,293	0,571	0,510	-1,146	-0,436	-1,248	0,240	0,251	0,333
2	5A	0,366	0,668	0,598	-1,020	-0,321	-1,166	0,330	0,334	0,395
3	Diff.	-0,073	-0,097	-0,088	-0,126	-0,115	-0,082	-0,09	-0,083	-0,062

Tabelle 5: Numerische Auswertung von Abb. 18 - Teil 2

Nr.	Versuch	STS10	STS11	STS12	STS13	STS14	STS15	STS16	STS17	STS18
--	--	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	3A	0,521	0,069	-0,010	-1,369	-0,737	-0,061	1,524	0,352	0,344
2	5A	0,436	-0,013	-0,115	-1,448	-0,820	-0,158	1,431	0,254	0,249
3	Diff.	0,085	0,082	0,105	0,079	0,083	0,097	0,093	0,098	0,095

5.1.5 Abschlusskommentar

Erwartet wurde eine Abweichung der einzelnen Widerstände, welche im 0,1%-Band des verwendeten Messgeräts liegt. Abb. 18 zeigt, dass die tatsächlichen Abweichungen deutlich höher liegen, der Grund dafür kann leider nicht zweifelsfrei bestimmt werden, am ehesten kommen unerwartete Übergangswiderstände im Messpfad in Frage.

Eine weitere Erklärung für die relativ großen Abweichungen könnte das irrtümliche Weglassen, oder Hinzufügen einer Windung der betreffenden Spule bei der Fertigung sein. Dies ist gegenständlich allerdings eine Hypothese, welche sich später im Kapitel 7 (Maschinencharakteristik aus der Flussverkettung im Leerlauf) beweisen, bzw. widerlegen lässt.

5.2 Induktivität der Statorwicklungen

5.2.1 Versuchsbeschreibung

Analog zum vorhergehenden Versuch dient die Bestimmung der Statorinduktivität zur ersten Abschätzung der Homogenität der Maschine, sowie zur Kontrolle der Datenblattwerte.

Die verwendete Kombination aus PWR und Signalprozessorsystem erlaubt es einen Strom derart im SKS einzuprägen, sodass nur der d-, bzw. q-Anteil der Induktivität angeregt wird. Der Rotor wird dazu in Positionen festgehalten, in denen er sich bei Vorgabe eines d-Stromes im SKS ausgerichtet hat (Offsetwinkel gesetzt). Damit soll erreicht werden, dass sich RKS und SKS in erster Näherung überlagern, und damit bei jeder Messposition gleiche Verhältnisse herrschen.

Das Leistungsmessgerät zeichnet Spannungen und Ströme in den 3 Phasen (jeweils alle 6 Spulen in Serie) auf, aus diesen Messdaten werden dann in weiterer Folge die Werte der Induktivitäten berechnet.

Für die Auswertung werden die Stranggrößen in d-, und q-Größen umgerechnet, fouriertransformiert und schließlich die Werte der Grundschiwingung für die Berechnung herangezogen.

5.2.2 Versuchsaufbau

Für die Durchführung des Versuchs wird in erster Linie jener PWR verwendet, der die PMSM speist, PWR B und die ASM sind nur insofern beteiligt, als dass durch deren Lageregler die Welle in einer definierten Position gehalten wird.

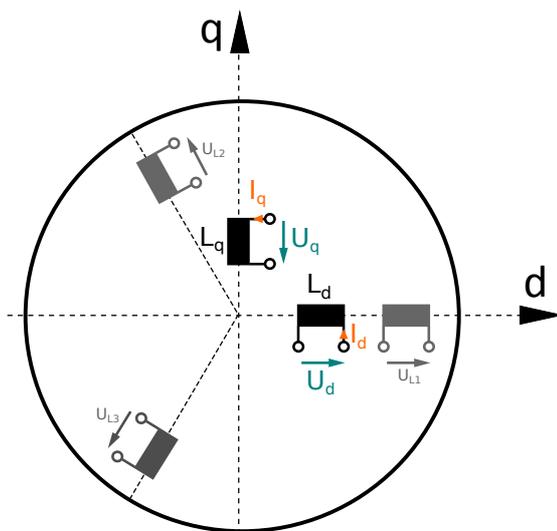


Abb. 19: Skizze Statorkoordinatensystem

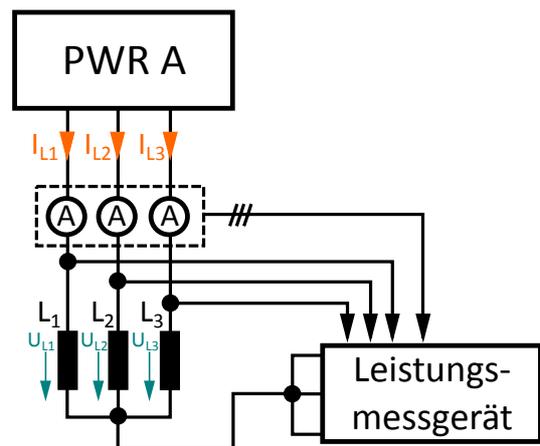


Abb. 20: Messschaltung zur Induktivitätsbestimmung

Für den Sternpunkt wurden die schwarz markierten Anschlüsse der Serienschaltung verwendet.

Bei der Lagemessung wird bei diesem Versuch, wie auch bei jedem anderen wo die Lagemessung verwendet wird, mit dem Nullindex des Inkrementalgebers der PMSM die Lagemessung auf Null gesetzt.

Der Winkel zwischen der mechanischen Lage multipliziert mit der Polpaarzahl und dem Rotorkoordinatensystem, genannt φ_{el_offset} beträgt $-1,663$ rad, wobei der Winkel durch Ausrichtung des Rotors im Stillstand mittels Vorgabe eines d-Stromes im Stator (8A) ermittelt wurde. Dieser Winkel entsteht durch den willkürlichen Einbau des Inkrementalgebers und wird durch das Signalprozessorsystem entsprechend berücksichtigt, sodass sich RKS und mechanische Rotorlage decken.

5.2.3 Versuchsauswertung

Neben Strom und Spannung in den Phasen wurde auch die Rotorlage während der Versuche aufgezeichnet. In Abb. 21 und Abb. 22 sind die Verläufe der Rotorlagen von zwei verschiedenen Versuchen zu sehen, es ist zu erkennen, dass der Rotor am Beginn des Versuchs ausgelenkt wird bis der Lageregler eingreift und den Rotor wieder an die eingestellte Position zurückführt.

Die Erkenntnis daraus ist, die Signalperioden in denen eine Auslenkung und Rückführung des Rotors erfolgt nicht in die Berechnung der Induktivität miteinfließen zu lassen.

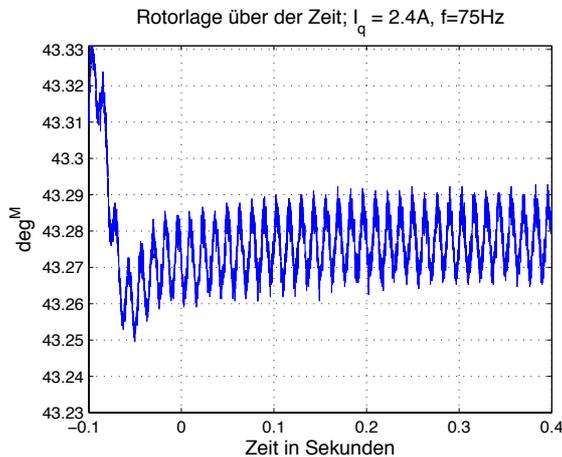


Abb. 21: Bewegung des Rotors bei 75 Hz

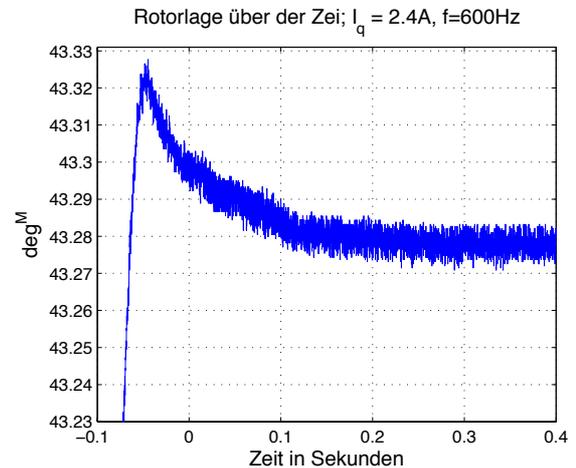


Abb. 22: Bewegung des Rotors bei 600 Hz

An folgenden Rotorpositionen wurden Messungen durchgeführt: 43,28° - 223,28° - 343,28° (jeweils mechanischer Winkel, Positionen willkürlich gewählt).

Die aufgezeichneten Stranggrößen werden zunächst mittels Clarke-Transformation in ein zweiachsiges Koordinatensystem übergeführt, siehe Gleichungen (10) bis (12).

$$T = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (10)^1$$

$$U_{dq} = T \cdot \begin{pmatrix} u_{L1} \\ u_{L2} \\ u_{L3} \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$I_{dq} = T \cdot \begin{pmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \\ i_{L3} \end{pmatrix} \quad (12)$$

Nachfolgend einige Details zu den aufgezeichneten Stranggrößen für die 4 Versuche mit jeweils unterschiedlicher Frequenz.

Tabelle 6: Details zu den unterschiedlichen Versuchen

Nr.	Signal-frequenz	Abtastrate	Aufzeichnungs-dauer	Anz. Perioden (gesamt)	Anz. Perioden (gewählt)	Samples/Periode
--	Hz	kHz	s	Stk.	Stk.	Stk.
1	75	170,67	0,5	37,5	30	2288,88
2	150	170,67	0,5	75	70	1144,44
3	300	170,67	0,5	150	140	572,22
4	600	170,67	0,5	300	200	286,11

Das Anti-Aliasing-Filter des Leistungsmessgeräts war bei allen Versuchen eingeschaltet.

¹ [1], Seite 425ff

In Abb. 23 ist das Ergebnis der vorhergehenden Operation exemplarisch für einen q-Strom dargestellt. Die Filterung mittels moving average Filter erfolgte nur zu einer ansehnlicheren Darstellung der Werte im Diagramm, für die Berechnung wurden ungefilterte Daten verwendet.

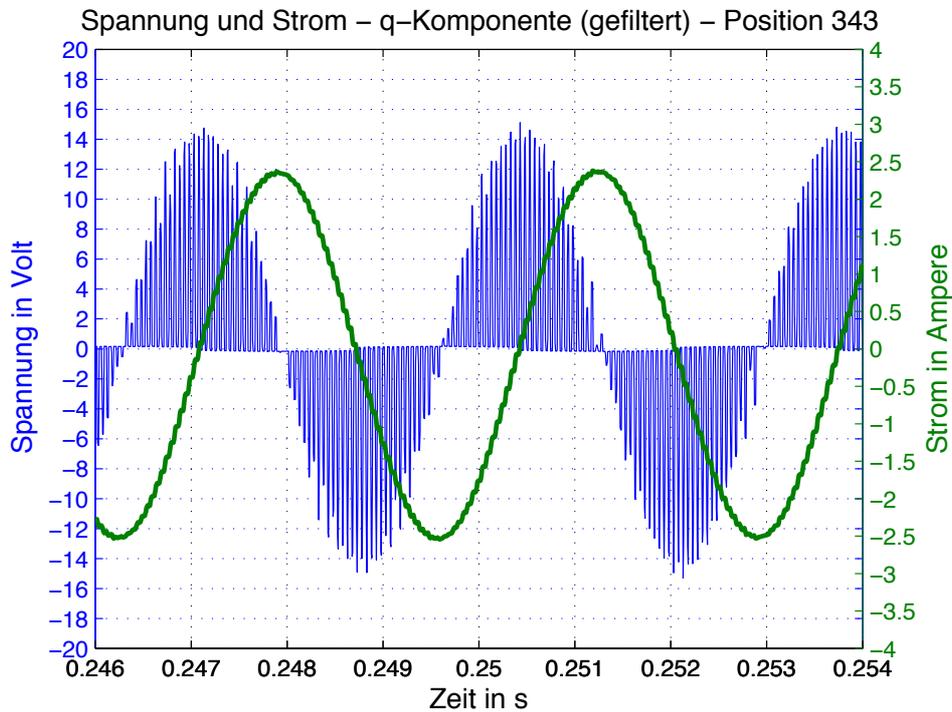


Abb. 23: Spannung und Strom zur Auswertung der q-Komponente

Zur Berechnung der Induktivität wird die Grundschwingung von d- und q-Strom, bzw. Spannung verwendet, dazu werden die Signale mittels diskreter Fourier-Transformation in den Frequenzbereich transformiert und dann jene Amplituden für die Berechnung herangezogen, welche sich bei der jeweiligen Signalfrequenz finden, siehe Abb. 24. Im Matlab-Skript wird für die DFT der Matlab-Befehl `fft()` verwendet.

$$DFT\{U_{dq}(t)\} \Rightarrow \underline{U}_{dq}(f) \quad (13)$$

$$DFT\{I_{dq}(t)\} \Rightarrow \underline{I}_{dq}(f) \quad (14)$$

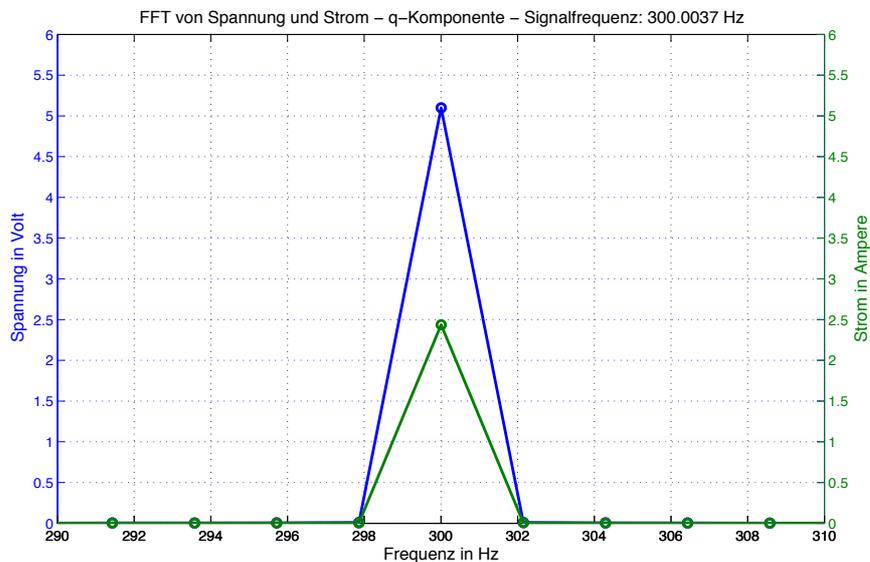


Abb. 24: Spannung und Strom der q-Komponente Fourier transformiert

Die Impedanz berechnet sich schließlich nach dem ohmschen Gesetz aus dem Quotient von komplexer Spannung und komplexem Strom der Grundschwingung, siehe Gleichung (15). Der letzte Schritt zur Berechnung der Induktivität ist dann den Imaginärteil durch die Kreisfrequenz der Grundschwingung zu dividieren und davon den Absolutbetrag zu bilden, siehe Gleichung (16).

$$\underline{Z}_{dq}(f_{GS}) = \frac{U_{dq}(f_{GS})}{I_{dq}(f_{GS})} \quad (15)$$

$$L_{dq} = \left| \frac{\Im \{ \underline{Z}_{dq}(f_{GS}) \}}{2 \cdot \pi \cdot f_{GS}} \right| \quad (16)$$

5.2.4 Ergebnisse

Zunächst sei unter diesem Punkt Abb. 25 vorgestellt, das Diagramm stellt die relative Abweichung von L_q zu dem Mittelwert aller 3 Messungen an unterschiedlichen Rotorpositionen dar. Für andere Frequenzen, bzw. für L_d zeigt sich ein ähnliches Bild, man kann also daraus schließen, dass die Rotorlage keinen Einfluss auf das Messergebnis hat, da die Abweichung vom Mittelwert ca. eine Zehnerpotenz unterhalb der Basisgenauigkeit des Messgeräts liegt.

Beim Vergleich des Mittelwerts mit dem Datenblattwert zeigt sich eine signifikante Abweichung.

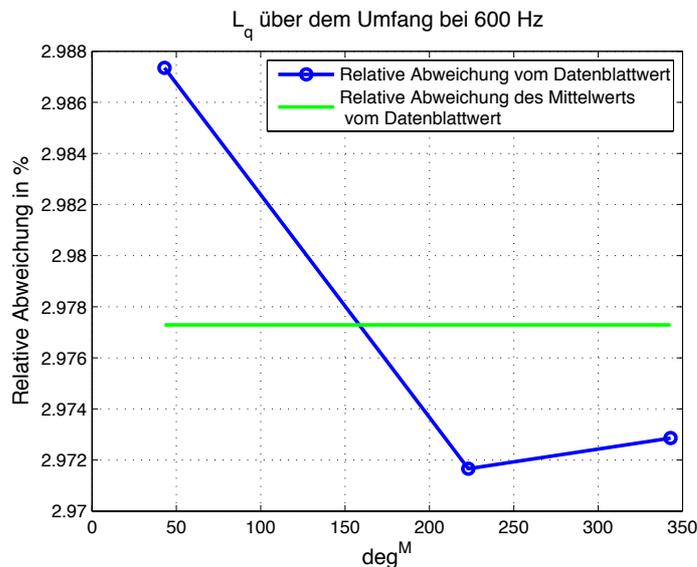


Abb. 25: L_q an verschiedenen Rotorpositionen gemessen

Abweichungen weit außerhalb des 0,1%-Bandes des Messgeräts offenbaren Abb. 26 und Abb. 27, besonders auffallend ist der Sprung zwischen den Versuchen mit 150 und 300 Hz in Abb. 27, mehr dazu in der Zusammenfassung.

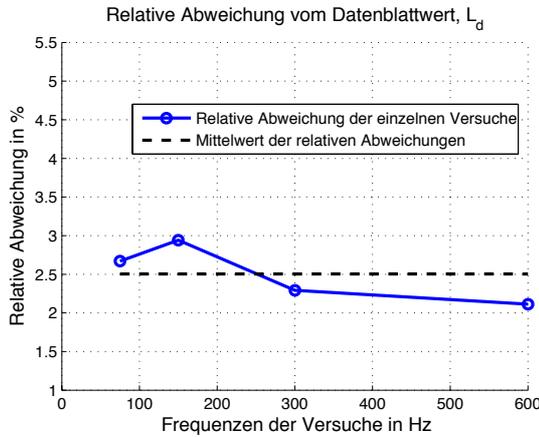


Abb. 26: Relative Abweichung vom Datenblattwert - L_d

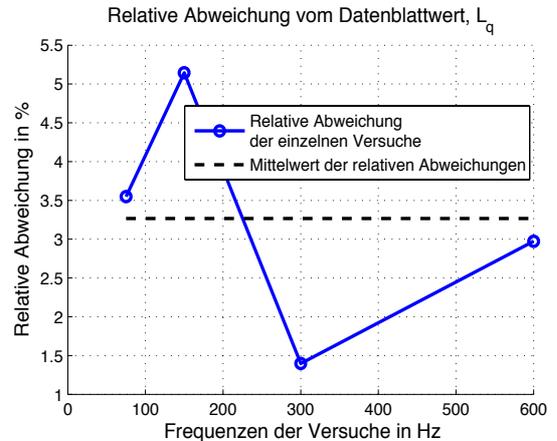


Abb. 27: Relative Abweichung vom Datenblattwert - L_q

Im Mittel wurden aus den Versuchen mit unterschiedlicher Frequenz die Werte der Induktivitäten also mit $L_d = 1,128 \text{ mH}$ und $L_q = 1,136 \text{ mH}$ bestimmt. Der Datenblattwert für L_d und L_q war jeweils $1,1 \text{ mH}$, die Diagramme in Abb. 26 und Abb. 27 wurden mit den Bezugsgrößen dieses Absatzes erstellt.

Tabelle 7: Numerische Auswertung von Abb. 26

Nr.	Signalfrequenz	Relative Abweichung	Stromamplitude
--	Hz	%	A
1	75	2,67	2,85
2	150	2,94	2,96
3	300	2,29	2,79
4	600	2,11	2,9

Tabelle 8: Numerische Auswertung von Abb. 27

Nr.	Signalfrequenz	Relative Abweichung	Stromamplitude
--	Hz	%	A
1	75	3,55	2,65
2	150	5,14	2,85
3	300	1,40	2,76
4	600	2,97	2,8

5.2.5 Zusammenfassung

Grundsätzlich bestehen sowohl bei L_d , als auch bei L_q deutliche Abweichungen zum Datenblattwert, außerdem scheint es eine gewisse Frequenzabhängigkeit der Induktivitäten zu geben, wie sehr aus den Messwerten auf den wahren Wert der Induktivitäten geschlossen werden kann ist also fraglich.

Der Sprung zwischen den Versuchen mit 150 und 300 Hz kann eventuell dadurch erklärt werden, dass sich bei der Analyse des mechanischen Systems gezeigt hat (Vorgriff), dass sich das mechanische System bei einer Frequenz von 252 Hz besonders gut anregen lässt. Wegen der Verknüpfung des q-Stromes mit dem Drehmoment wäre dann auch erklärbar, warum der Sprung in Abb. 27 größer ausfällt als in Abb. 26.

Das Fazit dieses Versuches ist, dass die Ermittlung der Induktivität der Versuchsmaschine noch einer genaueren Betrachtung bedarf, was im Zeitbudget der gegenständlichen Arbeit leider nicht möglich ist.

5.3 Exzentrizität des Rotors

5.3.1 Allgemeines

Die nachfolgende Beschreibung kann als Anleitung für die Einstellung der Exzentrizität des Rotors der Versuchsmaschine verstanden werden. Abgesehen von der Dokumentation hier in der Arbeit, liegt diese Anleitung auch am Prüfstand auf, da sie vor allem für die nachfolgenden Masterarbeiten von Bedeutung sein wird.

Die Grundidee der Exzentrizitätsbestimmung ist, sowohl Messung, als auch Auswertung möglichst einfach zu halten, da sich in Zukunft verschiedene Personen mit der Einstellung beschäftigen werden, und deshalb die Einarbeitungszeit gering gehalten werden soll.

Außerdem wurde entschieden, als Sensoren einige an den Statorzähnen angebrachte FMS zu wählen, was den Vorteil hat, nicht allzu stark in die Verschaltung der STS eingreifen zu müssen, da ansonsten die STS für eine Exzentrizitätsbestimmung herangezogen werden würden.

Als Vergleichsgröße wurde, aus Gründen der Einfachheit, schließlich der Gesamteffektivwert der in den FMS induzierten Spannungen gewählt, was eine qualitative Bestimmung der Exzentrizität möglich macht.

5.3.2 Einstellung der Exzentrizität

Maximale Umdrehungen für die Einstellschrauben: 1 (!)

- für einen zentrierten Rotor, sonst entsprechend weniger
- Steigung von M6 beträgt 1mm, was ca. der Luftspaltbreite entspricht
- dreht man weiter, kommt es zu einem „Ankleben“ des Stators am Rotor. Dies ist zu vermeiden, da die **Gefahr einer Beschädigung** der Maschine besteht.

Lösen und Anziehen der Befestigungsschrauben

- Anzugsmoment der Befestigungsschrauben: **10 Nm** (lt. E-Mail von Fr. Wand vom 28.07.2014)
- Beim Lösen der Schrauben sind diese nur zu **lockern** und nicht herauszudrehen, da der Statordeckel ansonsten entlang der Längsachse kippt.
- Beim Anziehen sind die Schrauben **kreuzweise** festzuziehen, nicht nacheinander, da sich der Stator ansonsten verschiebt.
- Es ist immer darauf zu achten, dass der Innensechskantschlüssel zur Gänze eingesteckt ist, ansonsten ist eine **Zerstörung** der Schraube sehr wahrscheinlich.

Kennwerte für den Einstellvorgang

- Drehzahl des Rotors: **2000 U/min** → Bei dieser Drehzahl wird ca. 1V eff. in den Flussmessspulen induziert und somit der 1V Messbereich des N5000 gut ausgenutzt, um ein möglichst genaues Messergebnis zu erhalten.
- Bei einem zentrierten Rotor werden in den Flussmessspulen (FMS) im Durchschnitt 1,175V Gesamteffektivwert induziert.
- Der max. Unterschied zwischen den ind. Spannungen (Gesamteffektivwert) darf 10 mV betragen, eine genauere Positionierung ist mit der vorliegenden Konstruktion nicht möglich (Anm.: 10mV entsprechen ca. 0,04mm → Schätzwert)
- Nachdem der Stator verschoben wurde, ist die Maschine auf Leichtgängigkeit der Welle, sowie auf Schleifgeräusche zu untersuchen. Zur Feststellung von Schleifgeräuschen am besten den Griff eines Schraubendrehers ans Ohr halten, und mit dem spitzen Ende den Statordeckel berühren. Somit wird der Schall aus dem Stator direkt in den Gehörgang übertragen. Strömungsgeräusche des Kühlmittels (Rauschen, Prickeln) sind normal.

- Zuordnung der FMS zu den Kanälen des N5000:

Tabelle 9: Zuordnung der FMS an die Kanäle des Messgeräts N5000

Lfd.-Nr.:	FMS-Nr.:	Name	Kanal am N5000
1	50	y_pos_1	VOLT1
2	52	y_pos_2	VOLT2
3	59	y_neg_2	VOLT3
4	57	y_neg_1	VOLT4
5	53	x_pos	VOLT5
6	60	x_neg	VOLT6

Auswertung einer Messung

- Als N5000 Konfiguration ist *150324_N5000konf_fms* zu wählen, oder später. Mit dieser Konfiguration ist das Anti-Aliasing-Filter eingeschaltet, Abtastfrequenz: 167kHz, alle Eingänge DC gekoppelt, Messzeit: 0,6s → entspricht 120 Perioden eines Spannungssignals
- Als Auswertefile ist *aw_fms_ind_150416.m* zu wählen, oder später. Mit diesem m-File werden 2 Balkendiagramme, wie in Abb. 28 und Abb. 29 zu sehen, erstellt. Das genannte Auswertefile ist im Anhang angeführt.
-

Deutung der Balkendiagramme

- Grundsätzlich wird aufgrund der induzierten Spannung in den FMS auf die Luftspaltbreite geschlossen.
- Die induzierten Spannungen in den Flussmessspulen werden als Balken dargestellt, zusammen mit der Skizzen in Abb. 30 und Abb. 31 kann somit direkt auf die Exzentrizität des Rotors geschlossen werden.
- Zu beachten ist: je kleiner der Luftspalt, desto größer die induzierte Spannung! Möchte man also den Luftspalt an der Stelle x_neg aus Abb. 29 vergrößern, so muss der Stator negative x-Richtung verschoben werden.

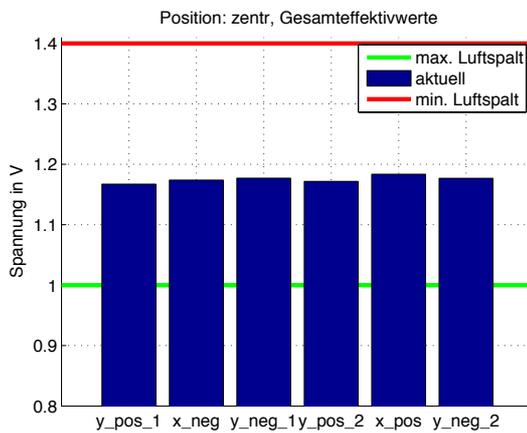


Abb. 28: Spannungen der FMS bei zentrischer Position

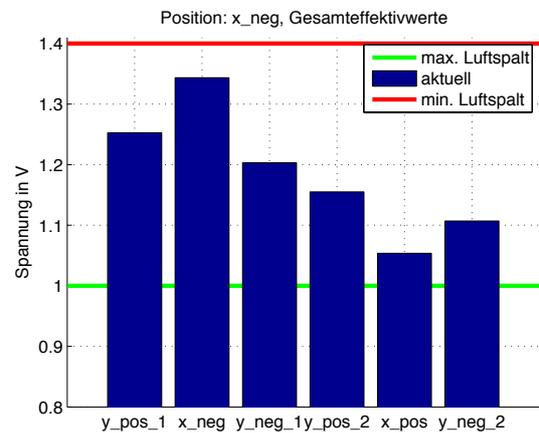


Abb. 29: Spannungen der FMS bei exzentrischer Position

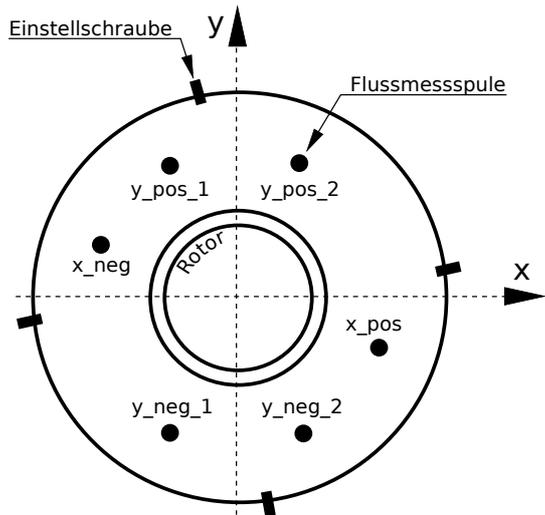


Abb. 30: Skizze der Situation mit Blick auf den Rotor, Lage der verwendeten FMS

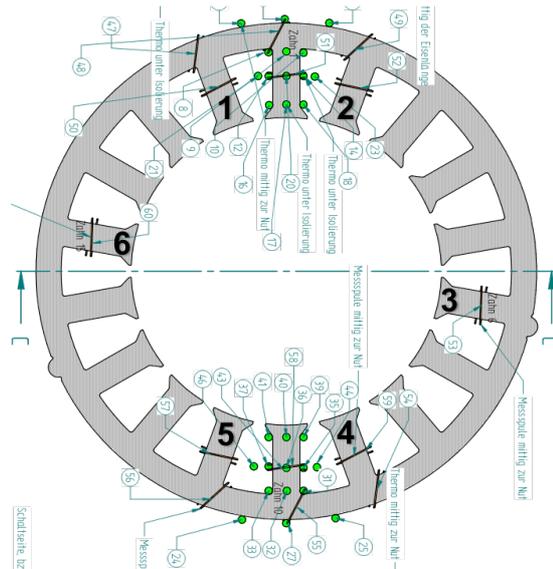


Abb. 31: Querschnitt durch den Stator inkl. Lage der verwendeten FMS¹

5.4 Analyse des mechanischen Systems

5.4.1 Versuchsbeschreibung

Die Analyse des mechanischen Systems ist vor allem deshalb wichtig, weil dadurch mechanische Frequenzen identifiziert werden, die das System zu Schwingungen anregen. Mit diesem Wissen können diese Frequenzen bei den zukünftigen Versuchen gezielt gemieden, oder bewusst ausgenutzt werden, je nach gegebener Anforderung.

Ein weiterer Punkt, der die Wichtigkeit der folgenden Versuche unterstreichen soll, ist die Möglichkeit, v.a. die später behandelten Rastmomentanalysen gegenzuprüfen, und somit auch interessante Querverbindungen herstellen zu können.

Um einen Eindruck vom Verhalten des mechanischen Systems zu bekommen wurden im wesentlichen zwei Versuche durchgeführt. Begonnen wurde mit einem Auslaufversuch, wobei die Versuchsmaschine nahe der Nenn Drehzahl beschleunigt, und anschließend durch Abschaltung jeglicher Regelung bis zum Stillstand der Welle auslaufen gelassen wurde.

Bei der zweiten Versuchsart handelt es sich um unterschiedlich starke Momentstöße, welche durch den Momentregler der ASM eingebracht wurden. Das Ziel dieser Momentstöße war, das System dermaßen anzuregen, sodass Querverbindungen zu Auslaufversuch und Rastmomentanalyse hergestellt werden konnten.

5.4.2 Versuchsaufbau

Für die Versuche zur Analyse des mechanischen Systems wurden im wesentlichen der Drehzahl-, sowie der Drehmomentregler der ASM verwendet. Die zur Durchführung des Versuchs notwendigen Komponenten sind in Abb. 32 dargestellt.

¹ Ausschnitt aus [5], die zusätzliche angebrachte Nummerierung ist die Lfd.-Nr. aus Tabelle 9

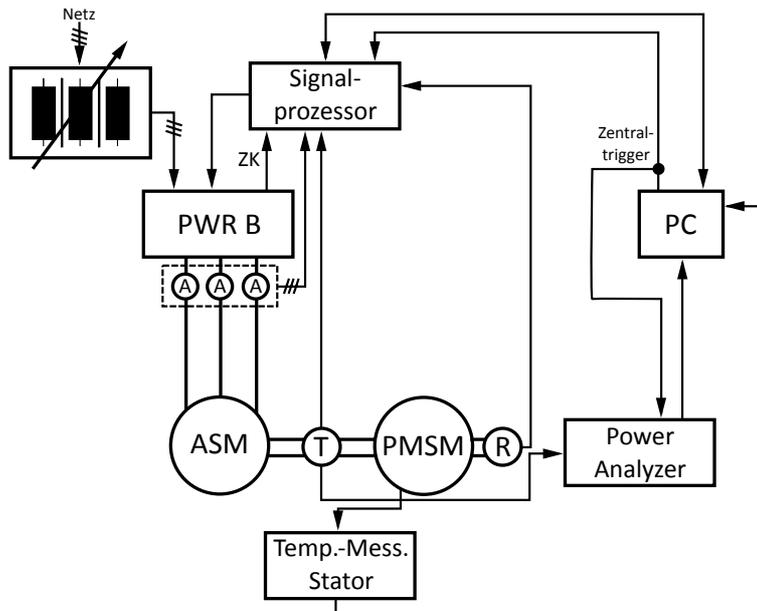


Abb. 32: Verwendete Prüfstandskomponenten für die Analyse des mechanischen Systems

5.4.3 Ergebnisse

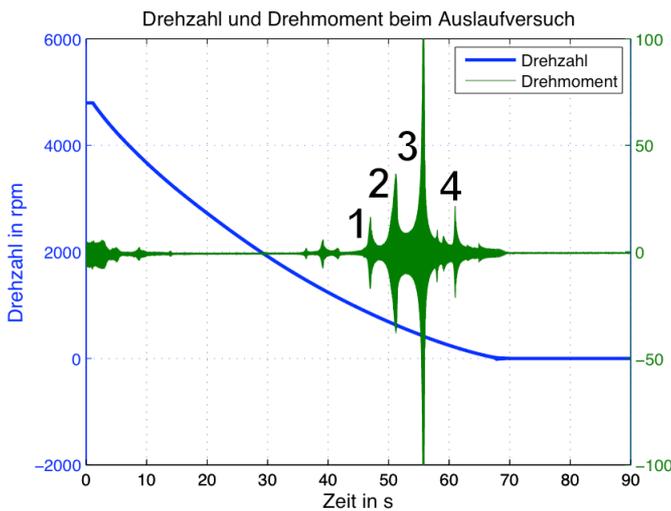


Abb. 33: Aufzeichnung der mechanischen Schwingungen, wie sie beim Auslaufversuch auftreten

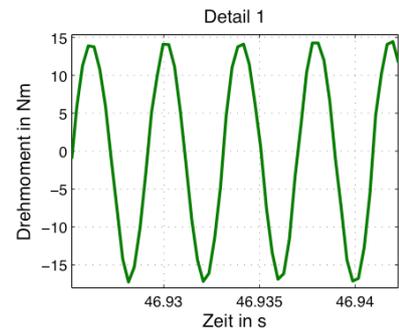


Abb. 34: Detail einer mechanischen Schwingung an der Stelle 1

Tabelle 10: Auswertung der Resonanzstellen des Auslaufversuchs

Nr.	Resonanz-stelle	Drehzahl	Drehzahl	Amplitude	Frequenz	Frequenz/Drehzahl
--	--	rpm	Hz	Nm	Hz	--
1	1	840	14	15	252	18
2	2	630	10,5	36	378	36
3	3	420	7	100	252	36
4	4	210	3,5	21	252	72

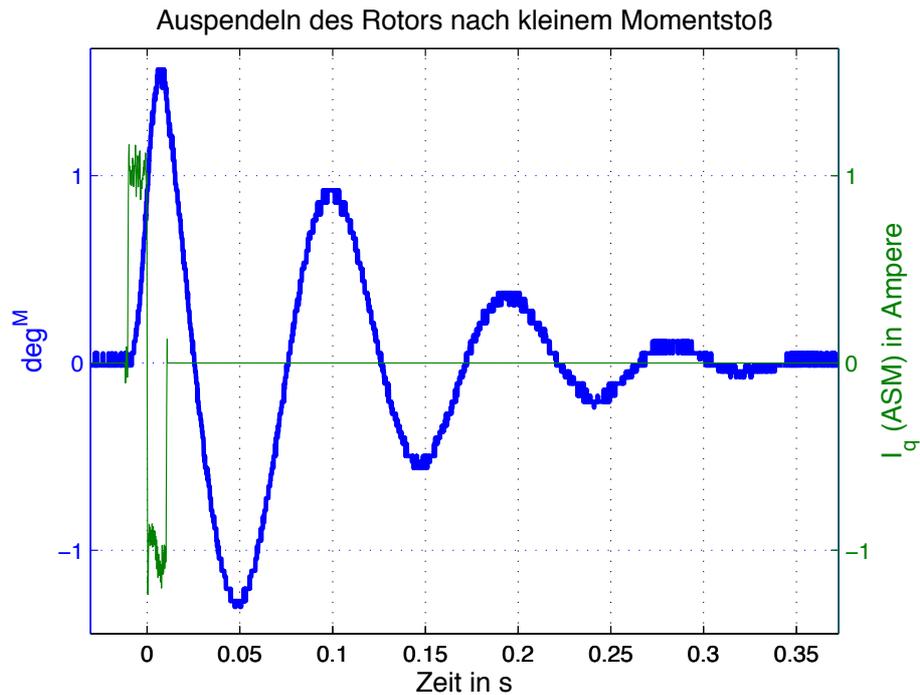


Abb. 35: Schwingung der gedachten "Feder" des Rastmoments gegen die Massenträgheit des Maschinensatzes

Auswertung von Abb. 35:

- Dauer des Stoßes: 20 ms (Duty Cycle: 50%)
- I_q : +/- 1 A
- Auspendelfrequenz von deg^M : 10 Hz
-

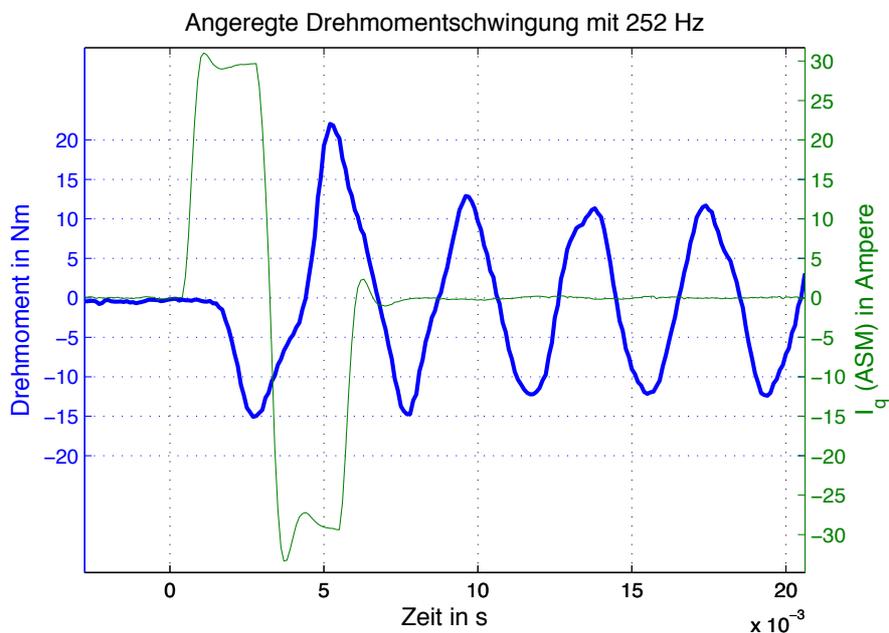


Abb. 36: Drehmomentschwingung mit gleicher Frequenz wie einige wesentliche Resonanzstellen des Auslaufversuchs

Auswertung von Abb. 36:

- Dauer des Stoßes: 5 ms (Duty Cycle: 50%)
- I_q : +/- 30 A
- Auspendelfrequenz des Drehmoments: 252 Hz

5.4.4 Zusammenfassung

Die Analyse des mechanischen Systems hat einige Frequenzen offenbart, für die sich das mechanische System besonders gut anregen lässt, besonders in Kapitel 6 - Maschinencharakteristik aus dem Rastmomentverlauf wird daher eine Brücke zurück in dieses Kapitel geschlagen werden, sieht man dort doch deutliche Spuren der Resonanzfrequenzen im Spektrum des Rastmoments.

6 MASCHINENCHARAKTERISTIK AUS DEM RASTMOMENTVERLAUF

6.1 Versuchsbeschreibung

Mit dem Kapitel 5.4 (Analyse des mechanischen Systems) wurde eingeleitet, was in den folgenden zwei Kapiteln seine Fortsetzung findet und dementsprechend genau betrachtet wird, die Erstellung einer Maschinencharakteristik.

Für die Erstellung einer Charakteristik anhand des Rastmoments musste zunächst ein Verfahren gefunden werden, den Verlauf des Rastmoments entlang einer Umdrehung möglichst genau zu bestimmen. Dazu wurden zwei Methoden der Messung ausprobiert und davon die vorteilhaftere für die Erstellung der Charakteristik herangezogen.

Ein neuer Aspekt im Vergleich zu den bisherigen Versuchen ist, dass die gemessenen Daten in diesem Kapitel erstmalig mit den Daten aus der FEM-Simulation von AVL verglichen werden. Als Vergleichsmethode wurde aus den Daten jeweils ein Fourierspektrum erstellt, und die Amplituden ausgewählter Ordnungen miteinander verglichen.

6.2 Versuchsaufbau

Zur Versuchsdurchführung wurde die ASM im positionsgeregelten Betrieb verwendet, die Wicklungen der PMSM wurden völlig unbeschaltet gelassen.

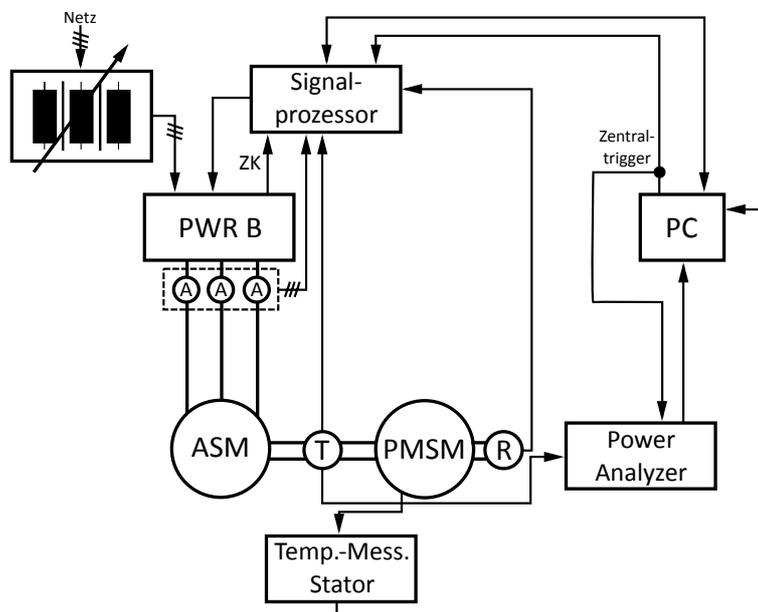


Abb. 37: Versuchsaufbau zur Rastmomentbestimmung

Zum Einen wurde der Positionsregler dazu genutzt, den Rotor möglichst langsam für einen Winkel von 360° zu drehen, zum Anderen wurde Punkt für Punkt des Umfangs ein niederfrequentes Dithersignal appliziert, diese Technik wird etwa auch bei hydraulischen Proportionalventilen verwendet, um den Einfluss der Haftreibung zu minimieren, also das gleiche Ziel, das auch bei diesem Versuch verfolgt wird, mehr dazu im folgenden Kapitel.

6.3 Versuchsauswertung

Geometrische Zusammenhänge

Zunächst soll beleuchtet werden, was als Ergebnis der Rastmomentmessung erwartet wird, dazu soll Abb. 38 die geometrische Situation der Maschine verdeutlichen, da sich das erwartete Ergebnis daraus leicht ableiten lässt.

Die Versuchsmaschine verfügt im Stator über 18 Polschuhe, die gleichmäßig in einem Abstand von 20° (mech.) angeordnet sind, wie bereits erwähnt ergibt das 6 Polpaare im Stator für die 3 phasige Maschine. Der Rotor verfügt über 6 magnetische Polpaare, siehe Skizze.

Aus Abb. 38 kann man nun ganz leicht erkennen, dass sich alle 10° (mech.) eine neue ausgerichtete Position ergibt, wobei für 5° Arbeit aufgewendet werden muss, um die alte Position zu verlassen, und die anderen 5° der Rotor zur neuen ausgerichteten Position gezogen wird.

Möchte man nun also mit einer gleichmäßigen Geschwindigkeit eine mechanische Umdrehung abfahren, so muss die Welle ständig angeschoben, bzw. abgebremst werden, was unter dem Strich einen sinusförmigen Momentverlauf erwarten lässt, mit 36 Perioden pro mechanischer Umdrehung.

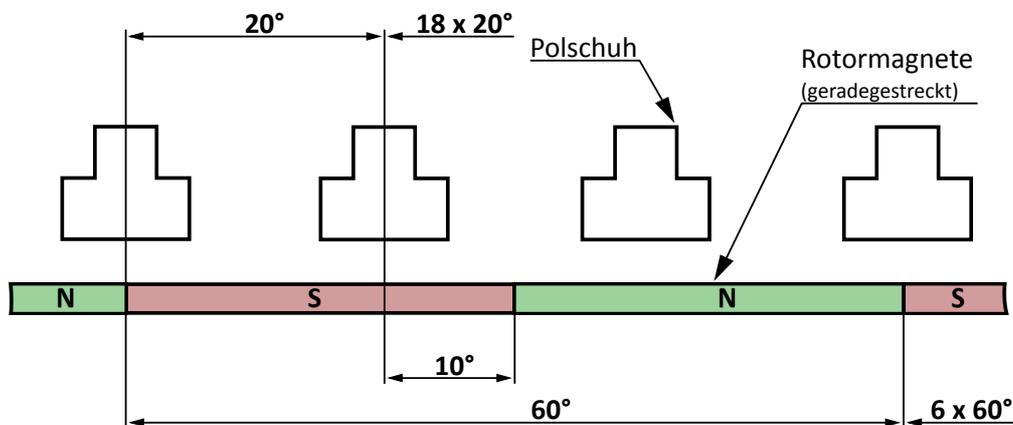


Abb. 38: Skizze eines Ausschnitts von Stator- und Rotorgeometrie (geradegestreckt)

Synchronisierung der Messsysteme

Bevor zur eigentlichen Auswertung der Daten geschritten werden kann, muss noch ein wesentlicher Umstand des Versuchsaufbaus bedacht werden, nämlich dass bei den Messungen zwei verschiedene Messsysteme verwendet werden. Der Grund dafür ist, dass das Signalprozessorsystem die Signale des Inkrementalgebers direkt auswertet, was mit dem Leistungsmessgerät nur über einen Umweg möglich wäre. Um also eine möglichst genaue Lageinformation zu haben, wird diese mittels Signalprozessorsystem ausgewertet, was allerdings folgende Probleme nach sich zieht: Die beiden Messsysteme beginnen nicht genau gleichzeitig mit der Aufzeichnung der Messwerte und haben eine unterschiedliche Zeitbasis. Die Daten müssen somit bei der Nachbereitung via Matlab-Skript ausgerichtet und die Zeitbasen entsprechend angepasst werden, wobei die Zeitbasis des N5000-Messgeräts als Referenz dient.

In Abb. 39 sieht man das zentrale unabhängige Triggersignal, das zu einem Zeitpunkt t_0 ausgelöst wird, und bei beiden Systemen gleichzeitig ansteht, jedoch reagieren die Systeme unterschiedlich schnell darauf, da das Signalprozessorsystem auf Momentanwerte, das Leistungsmessgerät jedoch auf Mittelwerte triggert.

In Listing 15 wird diese Ausrichtung noch mit einer in Matlabs Signalverarbeitungstoolbox eingebauten Kreuzkorrelationsfunktion gelöst was seinen Zweck grundsätzlich erfüllt hat, für spätere Versuche wurde allerdings ein anderes Triggersignal und eine dazupassende optimierte Ausrichtungsfunktion gewählt, mehr dazu dann im nächsten Kapitel über die Maschinencharakteristik anhand der Flussverktettung.

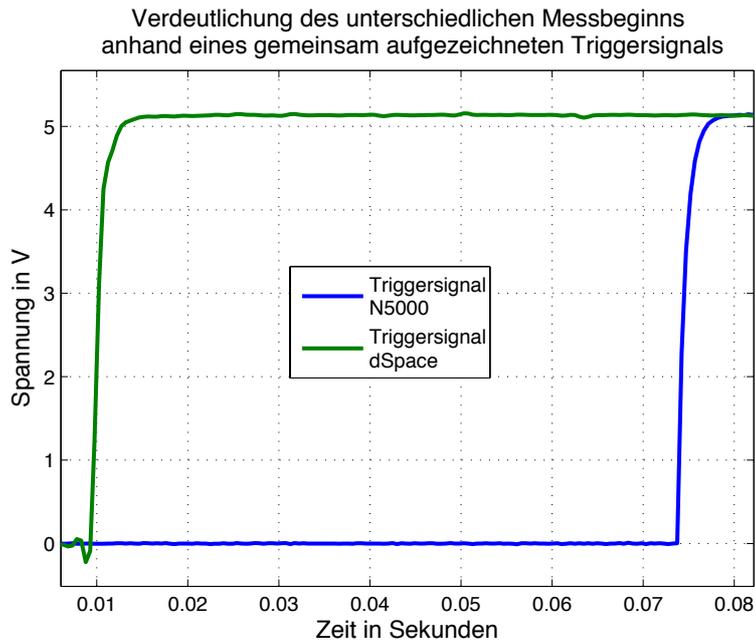


Abb. 39: Triggersignal, aufgezeichnet durch zwei unterschiedliche Messsysteme

Berechnung von Fourierkoeffizienten

Wie in der Versuchsbeschreibung erwähnt, wird der Vergleich mit den FEM-Daten mittels Amplitudenspektrum durchgeführt, dabei musste bedacht werden, dass das Drehmomentsignal über der mechanischen Rotorlage zur Berechnung des Spektrums herangezogen wird, aufgezeichnet werden aber beide Signale über der Zeit. Damit kann nicht sichergestellt werden, dass die Drehmomentsamples in äquidistanten Abständen vorliegen, was eine Verwendung von `fft()` nicht möglich macht.

Daher wurden die Amplitudenspektren aus dem Absolutbetrag der Fourier-Koeffizienten (Euler-Fourier-Formeln) berechnet, siehe [11], Seite 637ff, bzw. Gleichungen (17) und (18).

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_c^{c+T} f(x) dx \quad (17)$$

$$c_k = \frac{1}{T} \int_c^{c+T} f(x) \cdot e^{-jkx} dx \quad (18)$$

Diese Gleichungen gelten für die Voraussetzung $T=2\pi$, im Anhang befindet sich auch eine Version, mit der sich Signale mit $T \neq 2\pi$ berechnen lassen. Da es absehbar war, dass die Berechnung von Fourierkoeffizienten in Zukunft noch öfter benötigt wird, wurde die Berechnung der Fourierkoeffizienten in folgendes Matlab-Skript verpackt:

Listing 3: Matlab-Funktion zur Berechnung von Fourierkoeffizienten

```

%% 06.07.2015, H. Gruebler
% MA Gruebler - Berechnung der Fourierkoeffizienten eines uebergegebenen
% Signals
%
% Aufruf:
% [a0 ck]=fouriercoeffs(anz_os, x_werte_signal, y_werte_signal)
%   anz_os...Anzahl der Ordnungen,
%           die man berechnet haben moechte
%   x_werte_signal...x-Werte des Signals
%   y_werte_signal...y-Werte des Signals
%
%   a0...Gleichanteil des Signals

```

```

%           ck...komplexe Fourierkoeffizienten
function [a0 ck_cum] = fouriercoeffs(anz_os, x_werte_signal, y_werte_signal)

    signal_period_length = max(x_werte_signal)-min(x_werte_signal);

    a0 = ...
        1/signal_period_length ...
        * trapz(x_werte_signal, ... %Integration mit trapz()
                y_werte_signal);

    ck_cum = [];

    for k = 1:anz_os
        ck_cum = [ck_cum 2/signal_period_length ...
                  * trapz(x_werte_signal, ...
                          y_werte_signal.*exp(-j*k*x_werte_signal))];
    end
end

```

Für das Listing 3 wurde nachfolgend ein kleiner Test eingefügt, der die korrekte Funktion verifizieren soll, es wird ein Sinussignal mit 6 Perioden im Intervall $[0, 2\pi]$ und der Amplitude 1 der Funktion übergeben, welche dann ein Spektrum mit einem Peak mit dem Betrag von 1 an Ordnung 6 ausgeben soll.

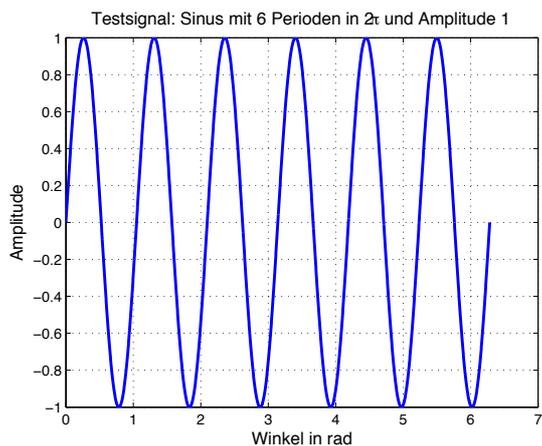


Abb. 40: Testsignal für fouriercoeffs.m

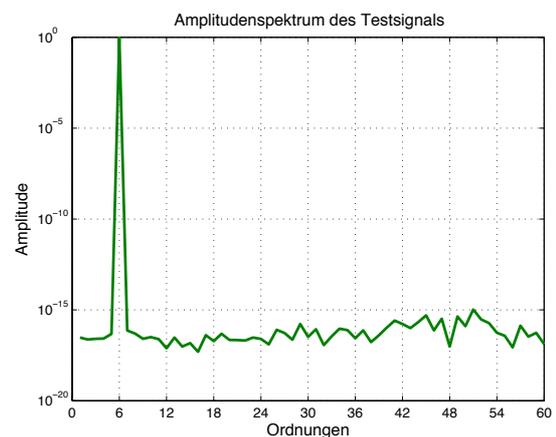


Abb. 41: Amplitudenspektrum des Testsignals

Wie Abb. 40 und Abb. 41 zeigen, ist der Test gelungen, das Testsignal wurde mit insgesamt 3600 Samples generiert, im Spektrum ist wie erwartet bei Ordnung 6 ein Peak mit dem Betrag von 1.0 aufgetreten.

Die Werkzeuge für die Auswertung der Versuche mit langsamer Umdrehung sollten an dieser Stelle hinreichend erklärt sein, ab hier wird nun die Methode mittels Dithering in Augenschein genommen.

Dithering

Das Prinzip des Versuchs ist in Abb. 42 dargestellt. Der Positionsregler fährt den Umfang in definierten kleinen Schrittweiten ab, und bewegt den Rotor an jeder dieser Stellen mit einem Sinussignal (schwarz). Das dabei entstehende Drehmomentsignal (rot) wird zusammen mit der Rotorlage aufgezeichnet, gemittelt, und hat somit das Rastmoment an einer Stelle am Umfang bestimmt. Um nun den kompletten Rastmomentverlauf zu erhalten, wurde in diesem Fall der Umfang mit einer Schrittweite von $0,1^\circ$ (mech.) abgefahren, dabei wurde als Anregung ein Sinussignal mit einer Frequenz von 1 Hz und einer Amplitude von $0,1^\circ$ (mech.) verwendet, hierbei sei auch erwähnt, dass die Analyse des mechanischen Systems insofern genutzt wurde, als dass ein ausreichend großer Abstand zur Eigenfrequenz von 10 Hz eingehalten wurde.

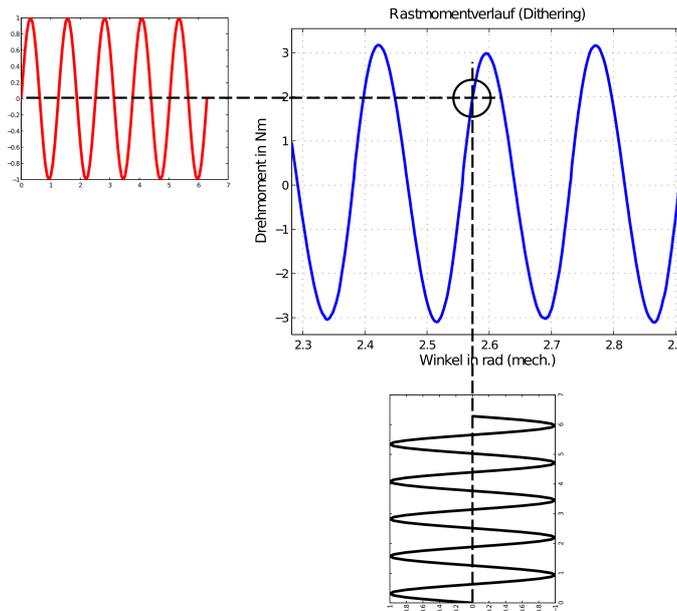


Abb. 42: Bestimmung des Rastmomentverlaufs mittels Dithering

Die Skizze in Abb. 43 soll einen großen Vorteil der Dithering-Methode erläutern, nämlich dass sich das Reibmoment der Haftreibung bei diesem Versuch aufhebt, beim Versuch mit langsamer Umdrehung etwa bildet sich das Haftmoment als Offset in den Messdaten ab.

Das Beispiel soll die Rotorwelle im statischen Fall darstellen, d.h. die ASM baut ein Moment (M_{AI} und M_{AII}) auf, um die Welle einmal nach rechts und einmal nach links in Bewegung zu setzen, das Haftreibmoment wirkt dem immer entgegen, das Rastmoment wird einmal hemmend und einmal unterstützend wirken.

Da die Amplitude der Lageänderung sehr klein gewählt wurde, kann in erster Näherung angenommen werden, dass sich das Rastmoment an einem Messpunkt am Umfang in Betrag und Richtung nicht ändert, die Beschleunigungs- und Bremsvorgänge, die in Abb. 42 angedeutet wurden, werden durch Mittelung des Signals eliminiert.

Um zu zeigen, dass sich das Haftmoment aufhebt wurden die Drehmomentgleichungen für den statischen Fall aufgestellt, wobei die Summe aller Momente Null ergeben muss, siehe [2], Seite B17, Kapitel 24.

$$I: M_{AI} - M_{Rm} - M_{RH} = 0 \quad (19)$$

$$II: M_{AII} - M_{Rm} + M_{RH} = 0 \quad (20)$$

$$I + II: M_{AI} + M_{AII} - 2M_{Rm} - M_{RH} + M_{RH} = 0 \quad (21)$$

$$M_{Rm} = \frac{M_{AI} + M_{AII}}{2} \quad (22)$$

*Vorzeichen in Variable integriert

Da beide Lastfälle Teil des Bewegungsablaufs sind, wurden sie addiert, wie man in Gleichung (21) sieht, hebt sich das Haftreibmoment auf, allerdings nur unter der Bedingung, dass das Haftmoment für Links- und Rechtslauf den gleichen Betrag hat.

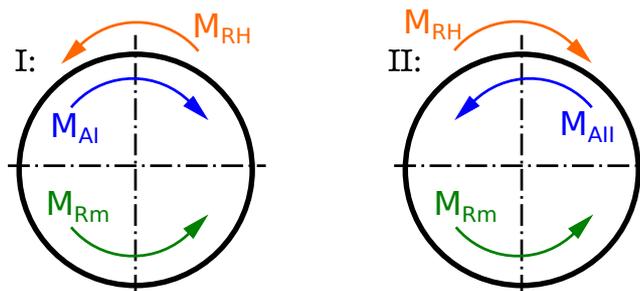


Abb. 43: Statische Momentbetrachtung bezüglich Haftmoment

6.1 Ergebnisse

Vor der Präsentation der Ergebnisse seien an dieser Stelle einige Dinge zur Wahl der Umdrehungsgeschwindigkeit, sowie von Amplitude, Schrittweite und Frequenz der Versuche angemerkt. Die Umdrehungsgeschwindigkeit für den ersten Versuch wurde mit 5° (mech.)/s sehr langsam gewählt, um einen Einfluss des Trägheitsmoments ausschließen zu können. Bei der Wahl von Amplitude und Schrittweite des Ditheringversuchs wurde im Auge behalten, dass an den Scheitelpunkten des Rastmomentverlaufs unbedingt sehr kleine Schrittweiten und Amplituden (jeweils $0,1^\circ$ mech.) notwendig sind, um einen großen Einfluss der Nichtlinearität an diesen Stellen zu verhindern. Die Frequenz wurde mit 1 Hz ebenfalls sehr niedrig gewählt, um wie bereits erwähnt einen Sicherheitsabstand zur Eigenfrequenz bei 10 Hz zu haben.

Um nun abschätzen zu können, ob die Wahl der Parameter erfolgreich war, wurden kurzerhand die Verläufe aus beiden Versuchen übereinandergelegt, um einen qualitativen Vergleich zu ermöglichen, siehe Abb. 44, wobei die **Grundschiwingung des Rastmoments** aus dem Ditheringversuch eine Amplitude von **3,05 Nm**, bzw. jene aus dem Versuch mit langsamer Umdrehung eine Amplitude von **2,97 Nm** hatte. Da sich eine augenscheinlich eine gute Überdeckung ergibt, wurde das als Hinweis für eine passende Parameterwahl gedeutet.

Der abgestufte Verlauf der blauen Linien in Abb. 44 ist damit erklärbar, dass der Drehmomentkanal des Leistungsmessgeräts langsamer abgetastet wird, als die Strom- und Spannungskanäle, wobei die Zeit bis zur neuen Abtastung mit gleichen Werten aufgefüllt wird.

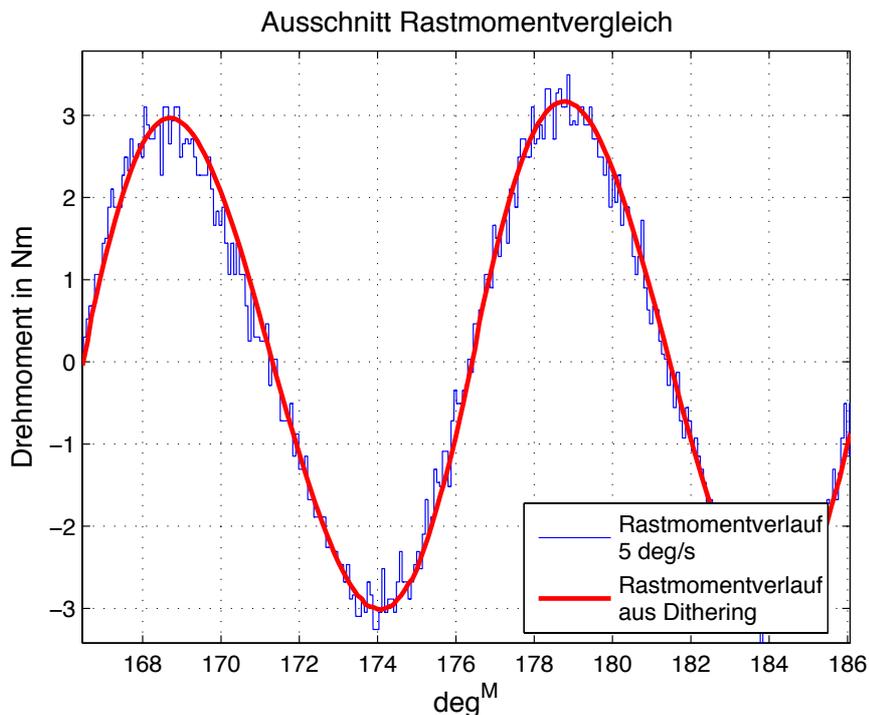


Abb. 44: Vergleich der Rastmomentverläufe - Dithering vs. langsame Umdrehung

Das Diagramm in Abb. 45 zeigt schließlich einen Vergleich der Amplitudenspektren von Mess- und FEM-Daten.

Grundsätzlich zeigen sich die Spektren wie erwartet, aufgrund des nicht sinusförmigen Verlaufs des Rastmoments sind sowohl bei den Mess-, als auch bei den FEM-Daten deutliche Oberschwingungsanteile zu sehen, besonders beachtenswert sind allerdings die Amplituden bei Ordnung 18 und 54 bei den Messdaten. Wirft man einen Blick zurück zu Kapitel 5.4 Analyse des mechanischen Systems in die Tabelle 10 so ist dort ersichtlich, dass besagte Ordnung 18 der Grund für eine Resonanzstelle des Auslaufversuchs ist.

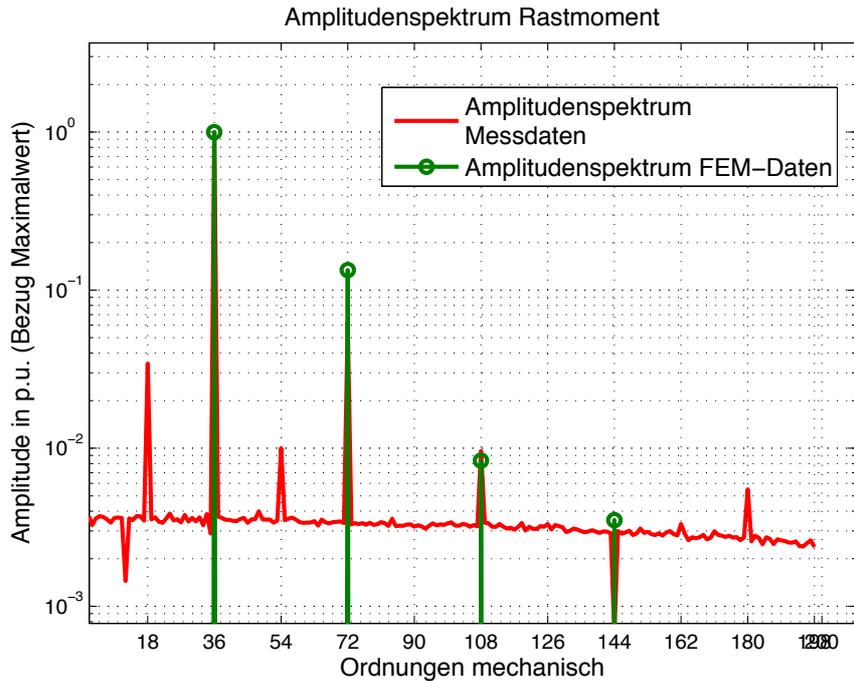


Abb. 45: Amplitudenspektren von Mess- und FEM-Daten des Rastmoments

Für die Erstellung des Amplitudenspektrums wurden schließlich die Daten aus dem Ditheringversuch herangezogen, der Grund dafür war der bessere Signal-Rausch-Abstand im Spektrum, und die Tatsache, dass über eine große Menge an Messdaten (ca. 3 GB) gemittelt wurde, was v.a. den Einfluss statistischer Messfehler auf ein Minimum reduzieren soll.

Tabelle 11: Numerische Auswertung von Abb. 45

Nr.	Ordnung	Anteil Messung	Anteil FEM
--	--	%	%
1	18	3,43	0
2	36	100 (3,05 Nm)	100 (2,08 Nm)
3	54	1,0	0
4	72	6,23	13,42
5	108	0,96	0,84

Die FEM-Daten, die in diesem und im nächsten Kapitel zum Vergleich herangezogen werden entstammen einem 2D-Modell, wobei nur 1/6 der Maschine simuliert wird. Für einen Vergleich mit den Messdaten wurden die Simulationswerte sechs mal hintereinanderkopiert und anschließend mit den gleichen Methoden wie für die Messdaten ausgewertet.

Die Matlab-Skripte für die Darstellung und Auswertung der Endergebnisse befinden sich im Anhang.

6.2 Abschlusskommentar

Die auf den ersten Blick einfach anmutende Aufgabenstellung des beschriebenen Versuchs hat sich bei genauerer Betrachtung der Details doch als trickreich erwiesen, das zeigt der sich über einige Seiten erstreckende Punkt der Versuchsauswertung.

Die Endergebnissen ermöglichen erste Querverbindungen zu vorangegangenen Versuchen, siehe Kapitel 5.4.

Die Amplituden bei Ordnung 18 und 54 sind in den FEM-Daten nicht zu sehen, das legt also den Schluss nahe, dass der Grund für das Auftreten bei der Simulation nicht berücksichtigt wurde, etwa eine ungleiche Magnetisierung der Rotormagnete.

7 MASCHINENCHARAKTERISTIK AUS DER FLUSSVERKETTUNG IM LEERLAUF

7.1 Versuchsbeschreibung

Für die Erstellung der Maschinencharakteristik aus der Flussverkettung, werden, ähnlich wie bei der Widerstandsmessung, alle Spulen separat vermessen. In die Auswertung werden, neben sämtlichen Statorspulen, auch jene Flussmessspulen miteinbezogen, welche an den Polschuhen montiert sind.

Die Versuche werden bei 2 deutlich unterschiedlichen Drehzahlen, sowie jeweils im Links- und Rechtslauf der Maschine durchgeführt, um etwaige Auswirkungen von Wirbelströmen zum Einen, v.a. aber die Reproduzierbarkeit der erhaltenen Daten zum Anderen zu prüfen.

Aus den gemessenen induzierten Spannungen wird jedenfalls die Flussverkettung im Leerlauf berechnet, woraus, ähnlich wie bei der Untersuchung des Rastmoments, ein Amplitudenspektrum zum Vergleich mit den FEM-Daten erstellt wird. Neu ist hierbei, dass neben der Untersuchung einer ganzen Umdrehung des Rotors auch Teilsegmente untersucht werden sollen, um etwa eine Information über den Zustand der Magnete am Rotor zu bekommen.

7.2 Versuchsaufbau

In bewährter Weise wurde wiederum auf das Setup vorangegangener Versuche zurückgegriffen, um alle Spulen zu erfassen waren, trotz Ausnutzung der Strommesskanäle, 5 verschiedene Beschaltungen des Leistungsmessgeräts notwendig. Natürlich wurde, wie im Messprogramm vereinbart, auch bei diesem Versuch eine konstante Maschinentemperatur gehalten, und alle Messgeräte in aufgewärmten Zustand verwendet.

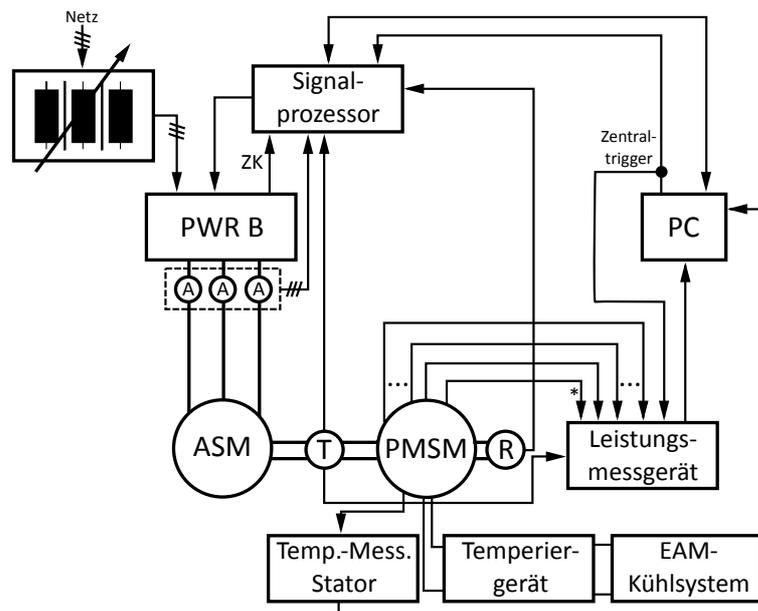


Abb. 46: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Flussverkettung

*Der Spannungsabgriff an den Spulen erfolgte für jede Spule mit einem separaten Spannungsmesskanal, wobei der schwarz gekennzeichnete Anschluss einer Spule jeweils als Bezugspunkt diente.

Zuordnung der Spulen zu den Messkanälen des Leistungsmessgeräts:

Grundsätzlich wird das **Triggersignal** immer via **CURR1** gemessen, als sogenannte Referenzspule wurde die STS18 definiert, sie wird bei jeder Konfiguration mitgemessen um einen definierten Bezugspunkt zu haben.

Die folgenden Zuordnungen werden vom Matlab-Skript der Messdatenauswertung erwartet, um die Messwerte in der richtigen Reihenfolge auszuwerten. Die Konsequenz daraus ist, dass eine Änderung der Kanalzuordnung stets ein Ändern des Auswerteskripts erfordert.

Tabelle 12: Kanalbelegung - Messung 1

Nr.	FMS-Name	FMS-Nr.	Zahn-Nr.	Kanal N5000
1	y_pos_1	50	(18)	CURR2
2	--	--	18	VOLT2
3	--	51	(01)	CURR3
4	--	--	01	VOLT3
5	y_pos_2	52	(02)	CURR4
6	--	--	02	VOLT4
7	--	--	03	VOLT5
8	--	--	04	VOLT6

Tabelle 13: Kanalbelegung - Messung 2

Nr.	FMS-Name	FMS-Nr.	Zahn-Nr.	Kanal N5000
1	y_pos_1	50	(18)	CURR2
2	--	--	18	VOLT2
3	--	--	05	VOLT3
4	x_pos	53	(06)	CURR4
5	--	--	06	VOLT4
6	--	--	07	VOLT5
7	--	--	08	VOLT6

Tabelle 14: Kanalbelegung - Messung 3

Nr.	FMS-Name	FMS-Nr.	Zahn-Nr.	Kanal N5000
1	y_pos_1	50	(18)	CURR2
2	--	--	18	VOLT2
3	y_neg_2	59	(09)	CURR3
4	--	--	09	VOLT3
5	--	58	(10)	CURR4
6	--	--	10	VOLT4
7	y_neg_1	57	(11)	CURR5
8	--	--	11	VOLT5
9	--	--	12	VOLT6

Tabelle 15: Kanalbelegung - Messung 4

Nr.	FMS-Name	FMS-Nr.	Zahn-Nr.	Kanal N5000
1	y_pos_1	50	(18)	CURR2
2	--	--	18	VOLT2
3	--	--	13	VOLT3
4	--	--	14	VOLT4
5	x_neg	60	(15)	CURR5
6	--	--	15	VOLT5
7	--	--	16	VOLT6

Tabelle 16: Kanalbelegung - Messung 5

Nr.	FMS-Name	FMS-Nr.	Zahn-Nr.	Kanal N5000
1	y_pos_1	50	(18)	CURR2
2	--	--	18	VOLT2
3	--	--	17	VOLT3

Die Drehzahlen, die bei diesem Versuch gefahren werden betragen 2000, bzw. 240 rpm, und wurden aufgrund einer guten Ausnutzung der jeweiligen Spannungsmessbereiche und wegen des Abstands zu den im Kapitel 5.4 gefundenen Resonanzstellen, festgelegt. Die Drehzahlregelung erfolgt durch das System rund um die ASM.

7.3 Versuchsauswertung

Überlegungen zur Datenaufbereitung

Die Tabellen der Kanalbelegung des Messgeräts und die Versuchsvorgaben lassen bereits erahnen, dass bei der Versuchsauswertung mit einem erhöhten Datenaufkommen zu rechnen ist, deshalb wurde der ansonsten prozedurale Stil der Matlab-Skripts im Rahmen dieser Auswertung durch einige wenige objektorientierte Features erweitert, welche eine bessere Programmübersicht bieten sollen und hier kurz vorgestellt werden.

Grundsätzlich wurde das Einlesen und Verarbeiten der Messdaten, sowie die eigentliche Auswertung mit Darstellung als Diagramme, usw. getrennt, die Schnittstelle dazwischen stellen sogenannte „Spulenobjekte“ dar, siehe Abb. 47.

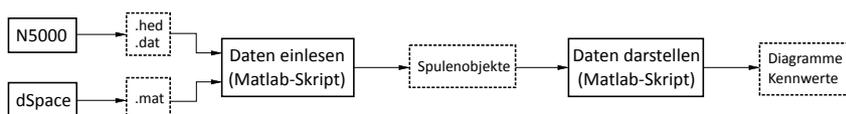


Abb. 47: Organisation der Datenauswertung

Jedes Spulenobjekt wird über Spulenummer und Versuchsart eindeutig identifiziert, und beinhaltet die jeweiligen gemessenen und berechneten Daten.

Da Objekte auch Methoden enthalten können, wurde das selbstverständlich auch hierbei genutzt, was sich als sehr wartungsfreundlich herausgestellt hat, da die einzelnen Methoden im Laufe der Zeit doch auch einigen wesentlichen Veränderungen unterworfen waren.

Die Spulenobjekte liegen im Workspace von Matlab vor, und zwar in einer Containerklasse abgelegt. Diese Containerklasse speichert nicht nur die Daten strukturiert ab, durch die Möglichkeit der Methodenzuweisung sind hier auch jene Funktionen untergebracht, die für die Darstellung von Kennwerten und Diagrammen zuständig sind.

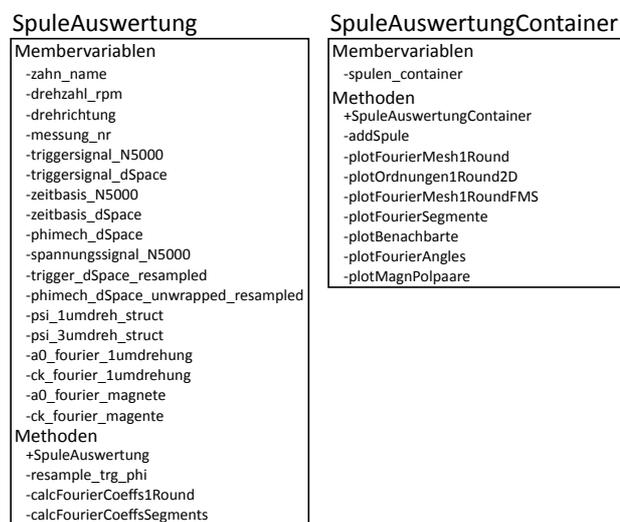


Abb. 48: Klassendiagramme des Matlab-Skripts zur Flussverkeftungsauswertung

Synchronisierung „neu“

Wie bereits im vorhergehenden Kapitel angesprochen besteht auch hier das Problem zwei unterschiedliche Messsysteme verwenden, und die Datensätze entsprechend ausrichten zu müssen. Nunmehr wird jedoch eine Methode verwendet, die statt eines transienten Triggerimpulses ein Sinussignal definierter Frequenz und Amplitude verwendet. Zunächst erfolgt eine grobe Ausrichtung anhand eines Triggerlevels und es wird eine Fourieranalyse durchgeführt, um Unterschiede in Offset, Amplitude und Rauschen auszufiltern. Die Grundschiwingung wird dann über einen kleinen Bereich des Signales bezüglich der Phasenverschiebung analysiert, und somit die aufgetretene Zeitverschiebung ermittelt.

Zusätzlich sei noch erwähnt, dass die Zeitbasen der Systeme nicht ganz gestimmt haben, d.h. eine eingestellte Abtastfrequenz von etwa 10 kHz ergibt eine reale Abtastfrequenz, die einige ppm daneben liegt. Dies wurde entsprechend berücksichtigt, wobei die Zeitbasis des N5000 als Referenz herangezogen wurde.

Die Abtastfrequenz des N5000 hat 102,4 kHz betragen, siehe Datensatz m150824\v7_pwrB_on_n2000, ausrichten_sinus.m

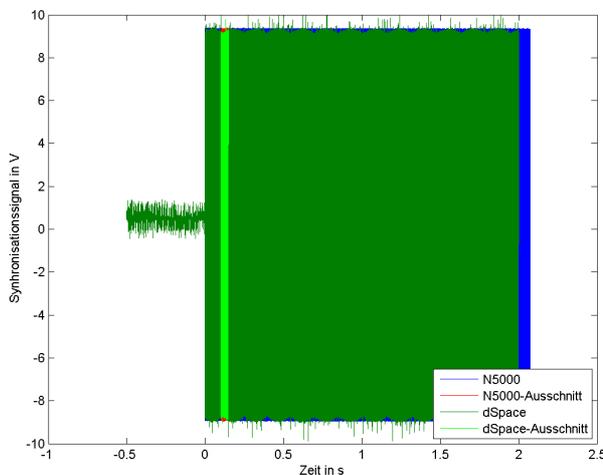


Abb. 49: Übereinandergelegte Triggersignale sowie Auswertebereich (hellgrün)¹

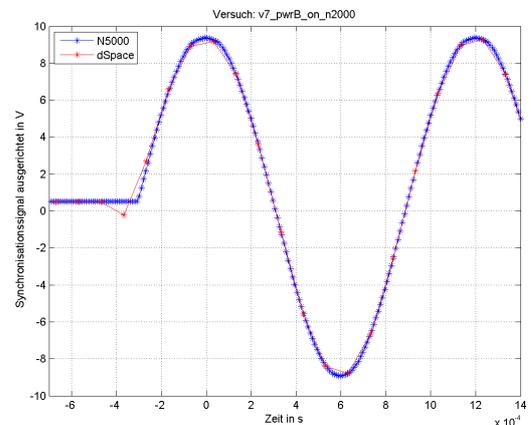


Abb. 50: Beispielhaft ausgerichtetes Signal²

Tabelle 17: Evaluierung der neuen Ausrichte-Funktion³

Nr.	Startzeit	Perioden	Zeitverschiebung
--	s	--	µs
1	0,1	40	1,66
2	0,1	400	1,63
3	1,0	400	1,25
4	1,5	400	1,00

Tabelle 17 zeigt eine Evaluierung der neuen Ausrichte-Funktion mit einem Testsignal am Triggereingang von 832,5 Hz. „Startzeit“ ist der Beginn des Auswertebereichs, „Perioden“ sind die Anzahl der betrachteten Perioden des Triggersignals und „Zeitverschiebung“ ist die ermittelte Zeitverschiebung relativ zur Grobausrichtung. Abb. 49 zeigt das Testsignal auf beiden Messsystemen, wobei der hellgrüne Bereich den Auswertebereich darstellen soll. In Abb. 50 ist dann ein gemeinsam aufgezeichnetes Signal bereits ausgerichtet dargestellt, wie man sieht kann eine sehr gute Überdeckung erzielt werden.

¹ [12], Folie 9

² [12], Folie 9

³ [12], Folie 9

Offsetbereinigung

Als Methode für die Offsetbereinigung der Messwerte wurde die Methode „Mittelwertbefreiung über eine mechanische Periode“ gewählt. Die Grundidee ist, dass ein Offset in den induzierten Spannungen nicht von der Maschine kommen kann, und somit entfernt werden muss, v.a. auch deshalb, weil eine Integration dieser Offsetspannung (siehe (23)) ein weiteres Signal erzeugt, welches der eigentlichen Flussverkettung überlagert wird, und somit das Ergebnis verfälscht.

Der Spannungsverlauf wird über eine mechanische Periode gemittelt, und der dabei gefundene Offset von der Spannung abgezogen, bei der Integration der Spannung zur Berechnung der Flussverkettung erfolgt dann noch eine entsprechende Berücksichtigung der Integrationskonstante. Die Voraussetzung, dass die Integrationskonstante entfernt werden darf, ist die Periodizität (24) und Mittelwertfreiheit (25) der Flussverkettung:

$$\Psi_{Stör} = \int u_{Offset} dt \quad (23)$$

$$\Psi(\varphi) = \Psi(\varphi + 2\pi) \quad (24)$$

$$\int_{\varphi_1}^{\varphi_1+2\pi} \Psi(\varphi) d\varphi = 0 \quad (25)$$

Für Details sei an dieser Stelle an [12], Folie 10ff, bzw. an das Matlab-Skript fun_offset.m im Anhang verwiesen.

Die Offsetbereinigung wurde natürlich auch überprüft, die nachfolgende Auswertung soll die Funktion der angestellten Überlegungen dokumentieren.

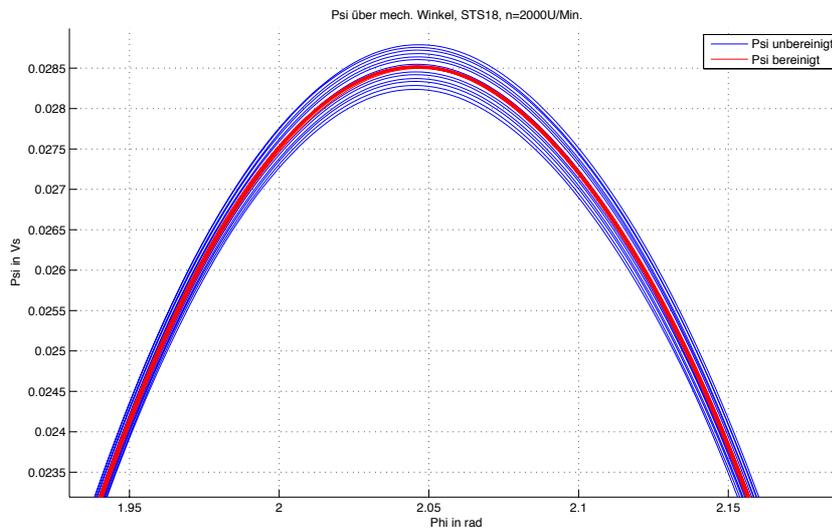


Abb. 51: Flussverkettung mit und ohne Offsetbereinigung

In Abb. 51 ist ein Teil des Verlaufs der Flussverkettung mit und ohne Offsetbereinigung skizziert, man erkennt deutlich, dass die blauen unbereinigten Kurven (mehrere 2π -Verläufe übereinandergelegt) durch den Offset davonlaufen, und somit eine Aussage über die Reproduzierbarkeit der Daten nicht möglich ist. Das Ziel ist, dieses „Davonlaufen“ mit fortschreitender Aufzeichnungsdauer zu verhindern, und trotz mehrerer Durchläufen auf den dargestellten roten Verlauf zu kommen.

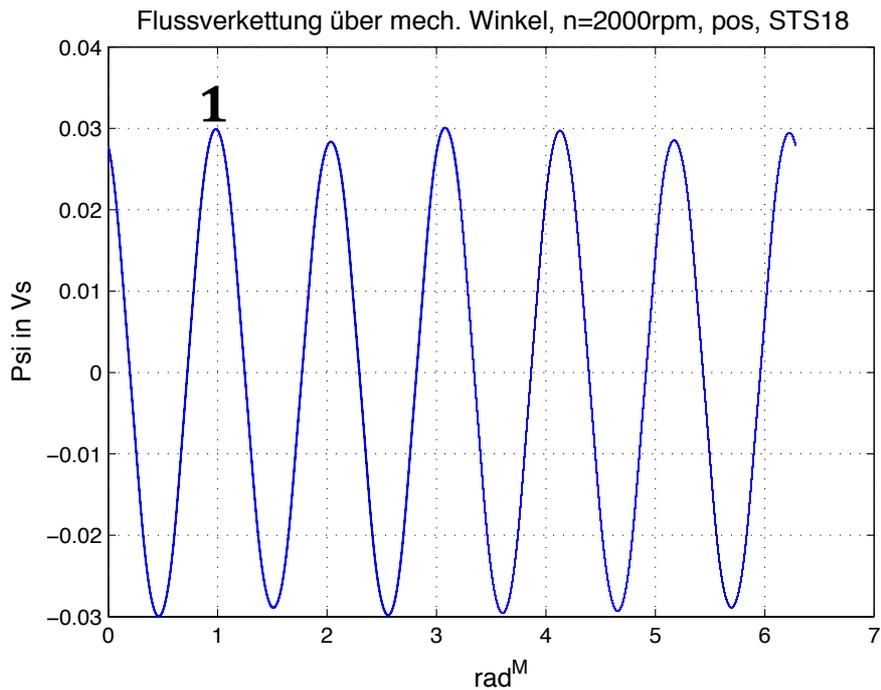


Abb. 52: Verlauf der Flussverkeftung entlang einer mechanischen Umdrehung

Der Verlauf in Abb. 52 ist eine aus einer realen Messung berechnete Flussverkeftung über der mechanischen Rotorlage. Hier wurde bereits die Matlab-Funktion zur Offsetbereinigung angewandt, und bereits beim Übersichtsbild sieht man eine ausgezeichnete Überdeckung der übereinandergelegten Verläufe.

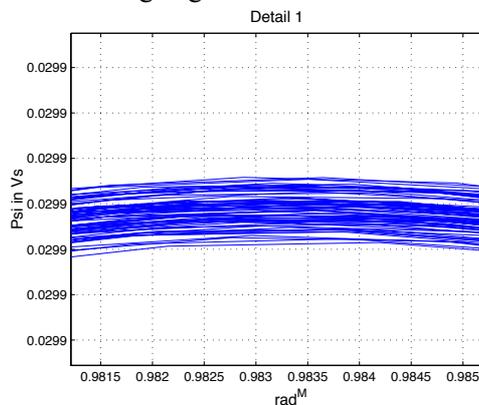


Abb. 53: Detail 1 aus Abb. 52

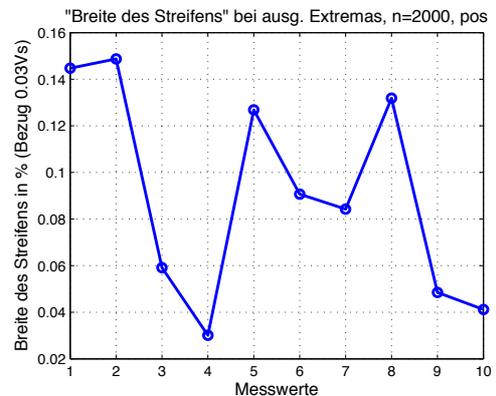


Abb. 54: Auswertung von Messpunkten aus Abb. 52

Abb. 53 stellt ein herausgezoomtes Detail aus Abb. 52 dar, man sieht zwar mehrere Kurvenverläufe, doch bei Betrachtung der y-Achse lässt sich wiederum die gute Überdeckung erahnen. Zur Überprüfung der korrekten Funktion der Offsetbereinigung wurden nun einige Extremstellen des Flussverkeftungsverlaufs bezüglich der Breite des Streifens aus Abb. 53 vermessen und in Abb. 54 dargestellt.

7.4 Ergebnisse

Die aus einem Versuch gewonnenen Ergebnisse sind in diesem Kapitel mit Abstand am umfangreichsten ausgeprägt. Zuerst wird die Flussverkeftung einer ganzen Umdrehung betrachtet und ausgewertet, was mit einem Vergleich von Mess- und FEM-Daten abgeschlossen wird. Danach steht die Betrachtung der einzelnen Segmente im Mittelpunkt, analog zur ganzen Umdrehung werden auch hier Schritt für Schritt interessante Erkenntnisse gewonnen und wiederum mit einem Vergleich zwischen Messung und Simulation beschlossen.

In Abb. 55 sind überblicksmäßig die Amplitudenspektren einer Umdrehung aller 18 STS in einem 3D-Diagramm dargestellt.

Aufgrund des nicht sinusförmigen Verlaufs der Flussverketung ergeben sich zur Grundschwingung an Ordnung 6 noch zusätzliche nennenswerte Oberschwingungen an den Ordnungen 30 und 42 (5. und 7. Oberschwingung). Außerdem sind Peaks bei Ordnung 4 und 8 erkennbar, man erkennt eine gewisse Ähnlichkeit zum Rastmomentspektrum.

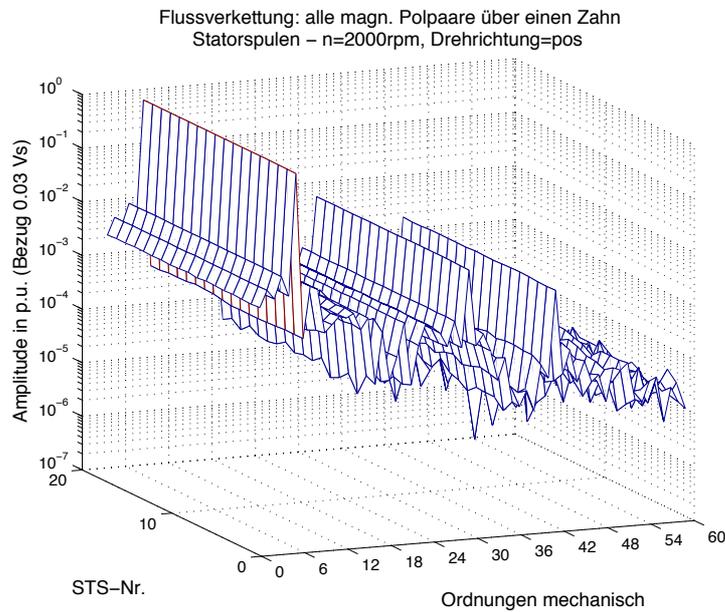


Abb. 55: Übersicht über die Amplitudenspektren einer mechanischen Umdrehung der Flussverketung aller 18 STS

Tabelle 18: Mittelwerte einiger Ordnungen aus Abb. 55

Nr.	Ordnung	Mittelwert
--	--	Vs
1	2	2,147e-4
2	4	3,715e-4
3	6	0,0298
4	8	2,228e-4
5	30	2,561e-4
6	42	7,827e-5

Um einen Eindruck von der Gleichheit der Spulen zu bekommen wurden in Abb. 56 bis Abb. 58 einzelne wichtige Ordnungen aus Abb. 55 herausgenommen, die relative Abweichung der Flussverketung jeder einzelnen STS zum Mittelwert der jeweiligen Ordnung aus Tabelle 18 berechnet und in den Diagrammen dargestellt.

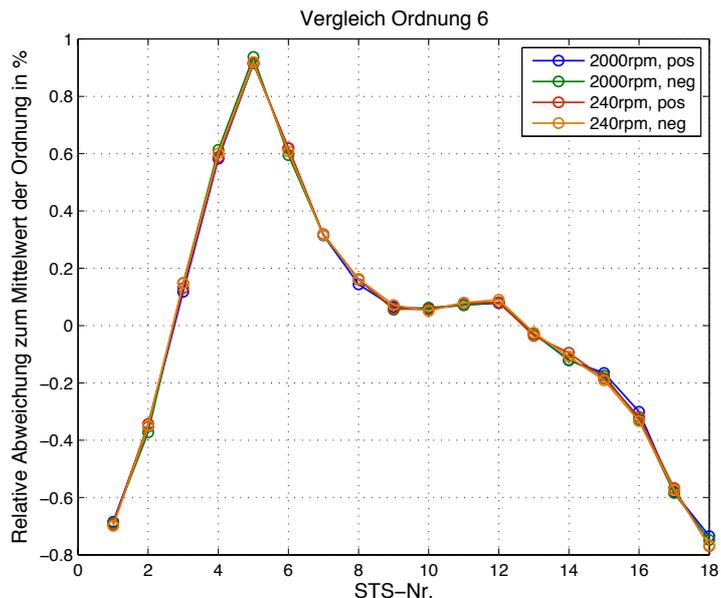


Abb. 56: Vergleich der Ordnung 6 aller 18 STS bei unterschiedlichen Versuchen

Beim Betrachten von Abb. 56 fällt auf, dass sich die einzelnen Versuche an sich kaum unterscheiden, die Messpunkte liegen jeweils im 0,1%-Band des Messgeräts, was darauf hindeutet, dass der Einfluss von Wirbelströmen und auch die Drehrichtung keinen messbaren Einfluss haben. Interessant ist der eigentliche Kurvenverlauf, dieser kann nämlich als Maß für die Exzentrizität des Rotors gesehen werden. Alle Messungen dieser Masterarbeit wurden mit zentrischem Rotor durchgeführt, wie man an Abb. 56 erkennt ist die Zentrierung sehr gut gelungen, bleiben die Abweichungen vom Mittelwert doch unter 1%.

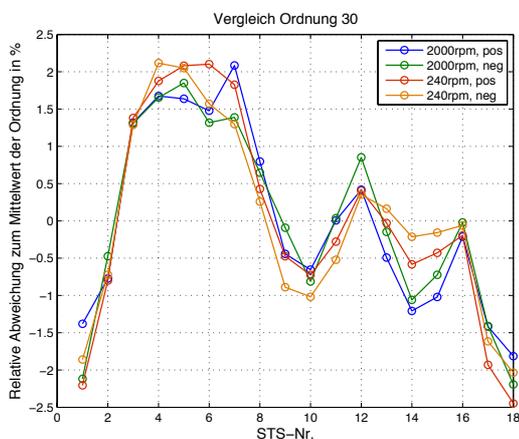


Abb. 57: Vergleich der Ordnung 30 aller 18 STS bei unterschiedlichen Versuchen

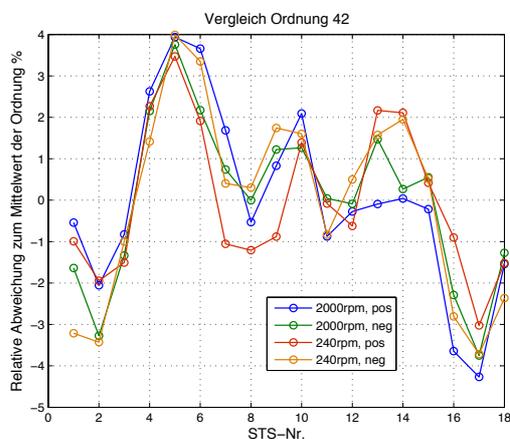


Abb. 58: Vergleich der Ordnung 42 aller 18 STS bei unterschiedlichen Versuchen

Abb. 57 und Abb. 58 sollen einen Eindruck der Abweichungen in den höheren Ordnungen geben, die Exzentrizität ist immer noch erkennbar, jedoch nehmen die Abweichungen über verschiedene Versuche mit steigender Ordnung zu.

Da beim Vergleich der Amplituden bei einer bestimmten Ordnung der Spulen kein signifikanter Unterschied zwischen den Versuchen festgestellt werden konnte, wurden auch noch die ebenso vorhandenen Phasenlagen überprüft, um eventuell hier einen Einfluss zu sehen.

In Abb. 59 wurde stellvertretend die Phasenlage aller Spulen, welche zur Phase 1 gehören, dargestellt. Wie in Abb. 60 gezeigt, ist auch hier kein nennenswerter Unterschied der verschiedenen Versuche feststellbar, liegen doch die Abweichungen je Spule weit unterhalb des 0,1%-Bands des Messgeräts. Was jedoch sehr wohl feststellbar ist, sind Winkelabweichungen bis

etwa $\pm 0,2\%$ vom Mittelwert, dies kann als Hinweis auf die Fertigungsgenauigkeit der Anordnung der Spulen im Stator gedeutet werden, wobei diese Abweichung hier und auch bei den anderen Phasen als klein und somit als Zeichen sehr guter Fertigung gedeutet werden können.

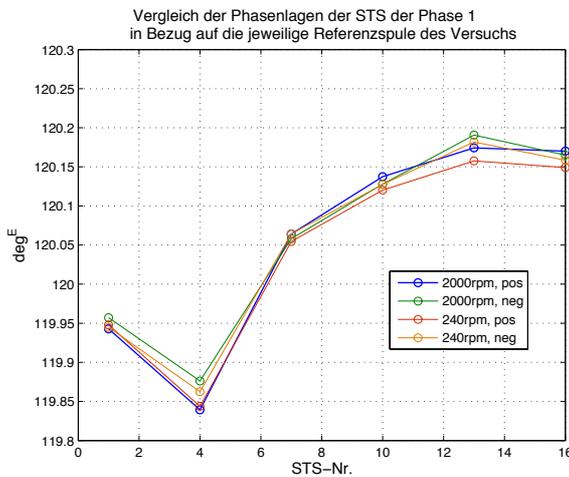


Abb. 59: Vergleich der Phasenlagen der STS der Phase 1

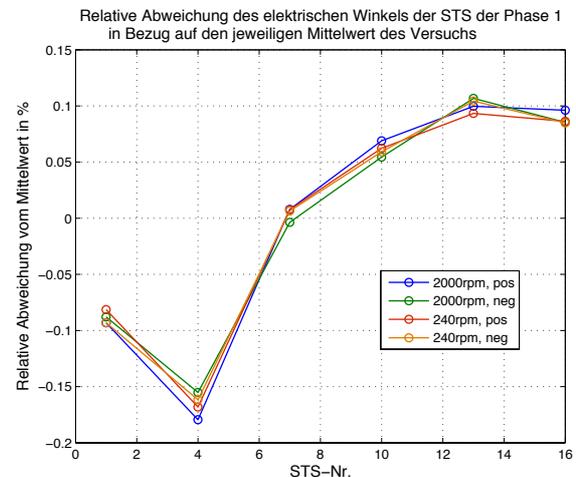


Abb. 60: Relative Abweichung des elektrischen Winkels der STS der Phase 1

Nachfolgend werden in Abb. 61 die Phasenlagen einiger ausgewählter STS verschiedener Versuche in Bezug auf eine einzige Referenzspule des Versuchs mit 2000 rpm in positiver Drehrichtung dargestellt. Im Gegensatz zu Abb. 59, wo die jeweilige Referenzspule des betreffenden Versuchs als Bezug gedient hat, offenbaren sich hier größere Winkelabweichungen, die scheinbar in Betrag und Vorzeichen vom jeweiligen Versuch abhängig sind. Dies kann als Zeichen für den Einfluss von im Stator auftretenden Wirbelströmen gesehen werden.

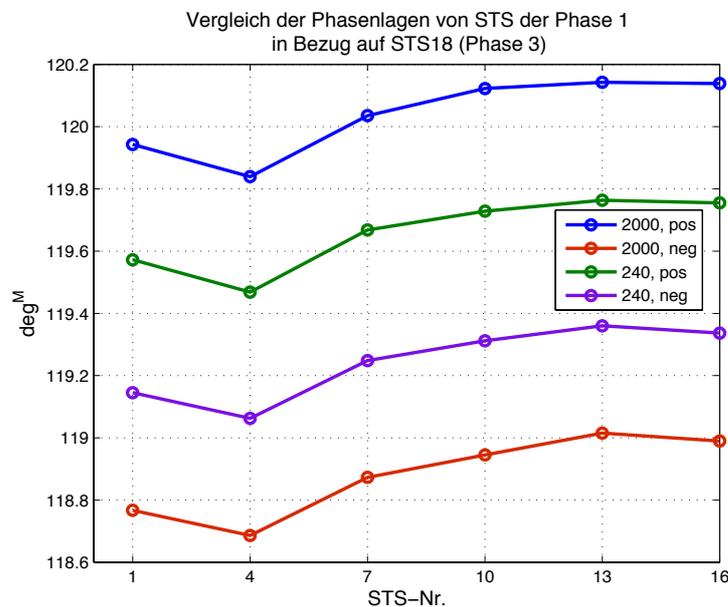


Abb. 61: Vergleich der Phasenlagen der STS der Phase 1, bei Verwendung einer einzelnen STS als Bezug

Um einen zusätzlichen Hinweis auf die Zuverlässigkeit der Messungen und Gleichheit der Spulen zu erhalten, wurden die Spektren der Flussverkettungen nebeneinanderliegender STS, sowie FMS miteinander verglichen. Es wurden keine großen Abweichungen erwartet ein Blick auf Abb. 62 und Abb. 63, bzw. Tabelle 19 und Tabelle 20 hat diese These bestätigt.

Die Daten wurden aus einem Versuch mit $n=2000$ rpm und pos. Drehrichtung bestimmt: 150906_FVK\01_Auswertung\Messdaten\Messung01\150906_daten_spg_n5000_n2000pos_m1.

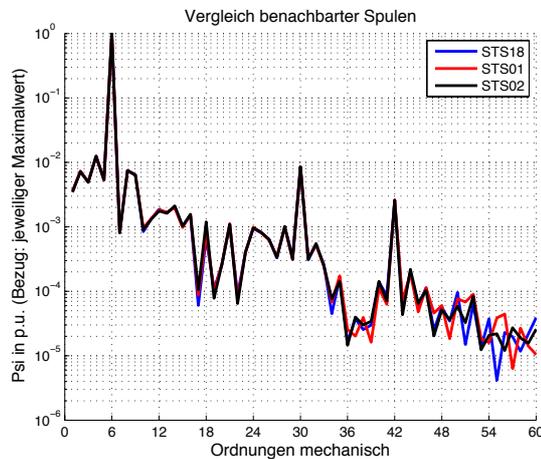


Abb. 62: Vergleich benachbarter STS anhand des Amplitudenspektrums

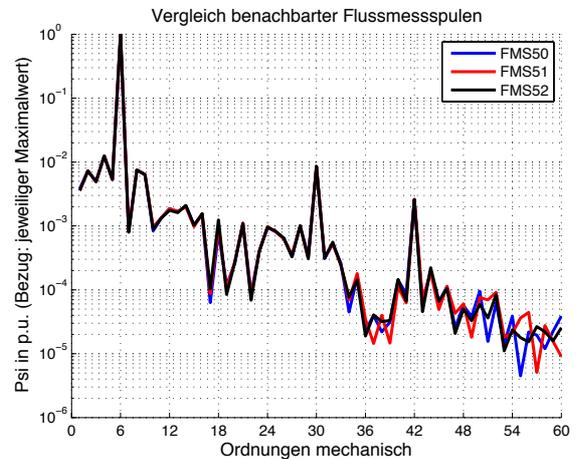


Abb. 63: Vergleich benachbarter FMS anhand des Amplitudenspektrums

Tabelle 19: Numerische Auswertung von Abb. 62

Nr.	Ordnung	STS18	STS01	STS02
--	--	%	%	%
1	2	0,71	0,73	0,72
2	4	1,25	1,25	1,25
3	6	100 (0,0296 Vs)	100 (0,0296 Vs)	100 (0,0297 Vs)
4	8	0,75	0,75	0,75
5	30	0,85	0,85	0,86
6	42	0,26	0,26	0,26

Tabelle 20: Numerische Auswertung von Abb. 63

Nr.	Ordnung	FMS50	FMS51	FMS52
--	--	--	--	--
1	2	0,72	0,73	0,73
2	4	1,25	1,24	1,25
3	6	100 (0,00131 Vs)	100 (0,00132 Vs)	100 (0,00132 Vs)
4	8	0,75	0,75	0,75
5	30	0,85	0,85	0,86
6	42	0,26	0,26	0,26

Ein bemerkenswertes Ergebnis förderte der Vergleich einer STS und FMS welche am gleichen Polschuh sitzen zutage, siehe Abb. 64.

Hierbei wurden die Flussverkettungen der Grundschwingungen miteinander verglichen, wobei der Wert der FMS mittels Windungsverhältnis auf die STS umgerechnet wurde, um einen Vergleich zu ermöglichen. Der Unterschied zwischen den Amplituden der Grundschwingung ist dann ein Hinweis auf Streufluss. Das erstaunliche ist nun, dass die Amplitude der FMS um 6,6% größer als die der STS ist, aufgrund der konstruktiven Anordnung, die STS ist über die FMS gewickelt, wurde das genau umgekehrt erwartet.

Als zu untersuchende Spule wurde die Referenzspule ausgewählt, die Daten stammen aus einem Versuch mit $n=2000$ rpm und pos. Drehrichtung (150906_FVK\01_Auswertung\Messdaten\Messung01\150906_daten_spg_n5000_n2000pos_m1).

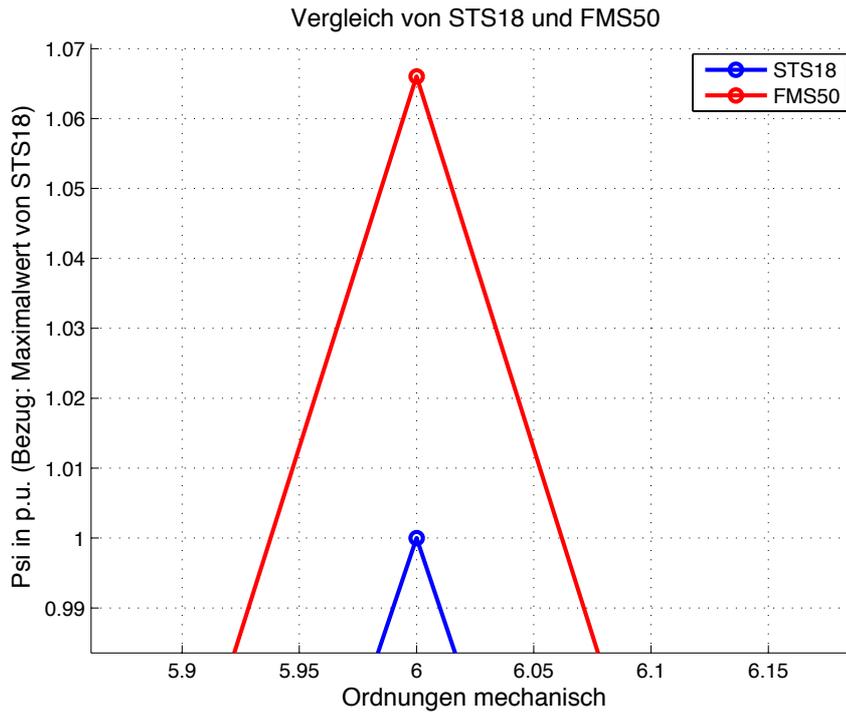


Abb. 64: Vergleich von Stator- und Flussmessspule an Zahn 18

Der nachfolgende Vergleich zwischen der gemessenen Flussverkettung mit den FEM-Daten markiert das Ende der Betrachtung der Flussverkettung einer Rotorumdrehung. Die Auswertung erfolgt in bewährter Weise graphisch (Abb. 65) und als numerische Auswertung in Tabelle 21, um einen guten Überblick auf die Unterschiede zu erhalten.

Wie im vorherigen Kapitel entstammen die FEM-Daten einem 2D-Modell, wobei nur 1/6 der Maschine simuliert wird. Für einen Vergleich mit den Messdaten wurden die Simulationen wiederum sechs mal hintereinanderkopiert und anschließend mit den gleichen Methoden wie für die Messdaten ausgewertet.

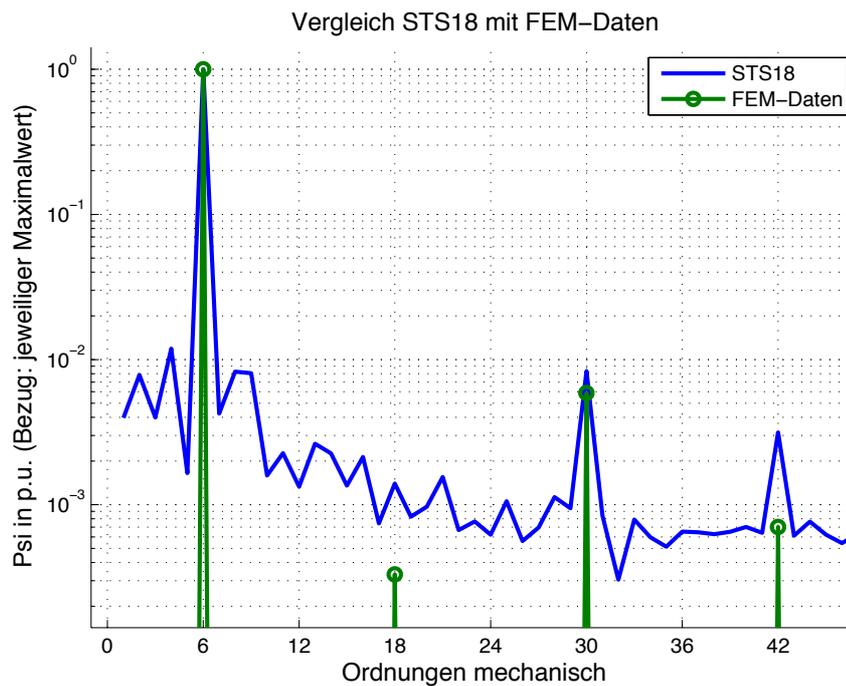


Abb. 65: Vergleich von Mess- mit FEM-Daten anhand des Amplitudenspektrums

Tabelle 21: Numerische Auswertung von Abb. 65

Nr.	Ordnung	STS18	FEM
--	--	%	%
1	2	0,78	0
2	4	1,25	0
3	6	100 (0,0296 Vs)	100 (0,0343 Vs)
4	8	0,75	0
5	30	0,85	0,59
6	42	0,26	0,07

Bei den folgenden Analysen einzelner Perioden der Flussverkettung einer Rotorumdrehung ist der Einfluss ungleich magnetisierter Polpaare beseitigt, was im Spektrum, wie in Abb. 66 zu sehen, nur mehr die Grundschwingung und die 5. und 7. Oberschwingung auftauchen lässt. Diese Betrachtung der einzelnen Polpaare erlaubt nun, die Magnetisierung der einzelnen Magnete zu untersuchen, um somit etwa auf Fertigungstoleranzen schließen zu können.

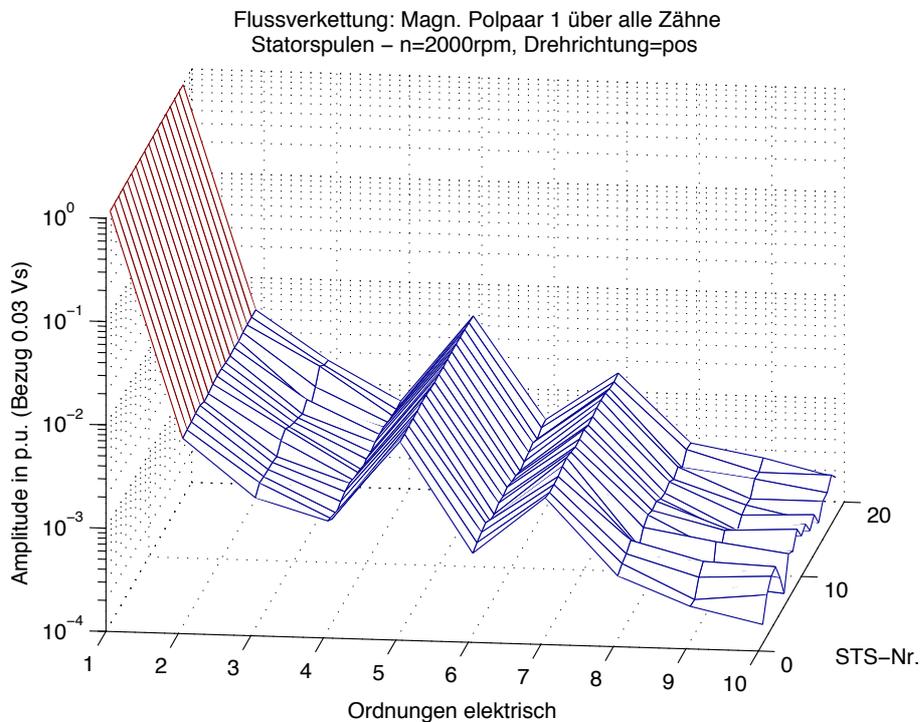


Abb. 66: Übersicht über die Amplitudenspektren einer elektrischen Umdrehung der Flussverkettung aller 18 STS

Tabelle 22: Mittelwerte der angeführten Ordnungen aller 6 magnetischen Polpaare, bzw. Gesamtmittelwert

Nr.	Ordnung	PP1	PP2	PP3	PP4	PP5	PP6	Gesamt
--	--	Vs						
1	1	0,0298	0,0295	0,03032	0,0299	0,0292	0,0301	0,0298
2	5	2,143e-4	2,850e-4	2,636e-4	1,998e-4	3,013e-4	2,802e-4	2,574e-4
3	7	6,618e-5	8,963e-5	8,516e-5	5,301e-5	9,624e-5	8,317e-5	7,890e-5

Zur Untersuchung der einzelnen magnetischen Polpaare wurde der Flussverkettungsverlauf anhand seiner Nullstellen in Segmente eingeteilt, die Ermittlung der Nullstellen erfolgt prinzipiell anhand des Verlaufs der gemessenen Spannung mit der Hilfsfunktion „perioden()“, siehe Listing 29.

Abb. 67 soll zeigen, dass die Segmenteinteilung korrekt ist, stellt das Diagramm doch einen Vergleich der Grundschwingungen vom mechanischen und elektrischen Spektrum aller STS dar, da hier auch bei der elektrischen Grundschwingung die Exzentrizität des Rotors zu sehen ist, bestätigt die Richtigkeit der getroffenen Überlegungen.

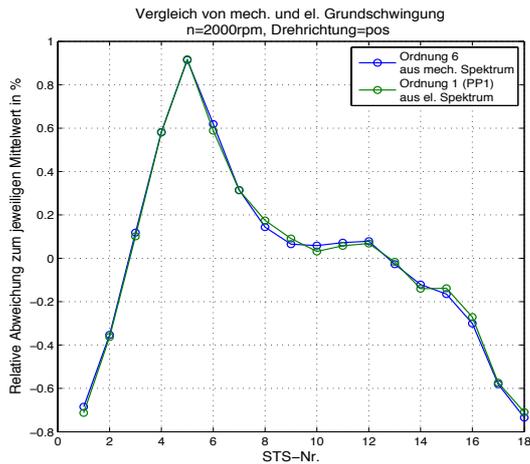


Abb. 67: Vergleich der mechanischen und elektrischen Grundschwingung aller STS anhand der relativen Abweichung vom Gesamtmittelwert

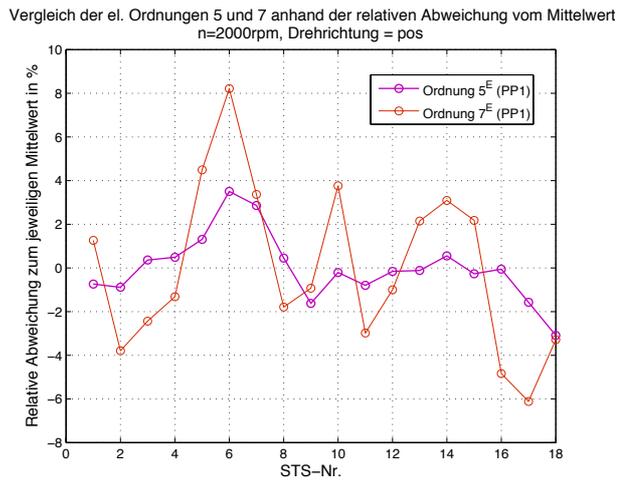


Abb. 68: Relative Abweichung aller STS vom Gesamtmittelwert jeweils für Ordnung 5 und 7

Der Kernpunkt der Auswertungen der magnetischen Polpaare ist die Darstellung der unterschiedlichen Magnetisierung.

Abb. 69 zeigt Abweichungen, welche in einem Band von etwa 3,5% liegen, im Spektrum des Rastmoments liegt die Höhe der Amplitude der Ordnung 18 ebenfalls bei etwa 3,5% der Grundschwingung. Da als Grund für die Existenz dieser Ordnung ja eine unterschiedliche Magnetisierung der Polpaare angenommen wurde, passt das sehr gut mit den Ergebnissen aus Abb. 69 zusammen, die unterschiedliche Magnetisierung wirkt quasi wie eine Amplitudenmodulation über eine mechanische Periode auf die Flussverkettung, welche dann im Spektrum sichtbar wird.

Für die Auswertung wurden nur Versuche mit positiver Drehrichtung herangezogen, weil vorhergehende Versuche gezeigt haben, dass kaum ein Unterschied bei den Leerlaufmessungen besteht und somit von einer Neuentwicklung der Segmenteinteilung für negative Drehrichtung abgesehen wurde.

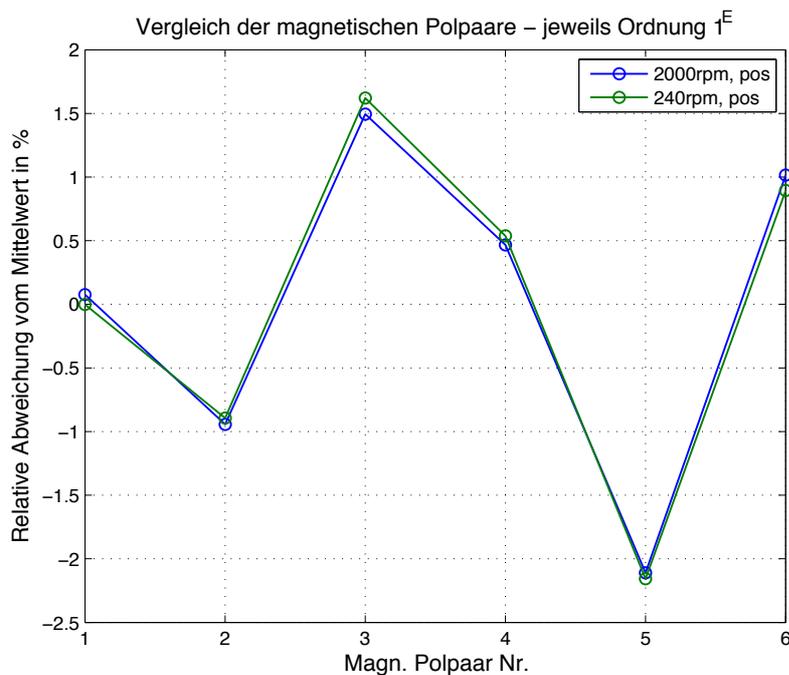


Abb. 69: Abweichung der Grundschwingung vom Gesamtmittelwert für alle magnetischen Polpaare

Die Mittelwerte für die Versuche mit $n=2000$ rpm und für $n=240$ rpm betragen $0,0298$ Vs.

Tabelle 23: Numerische Auswertung von Abb. 69

Nr.	Versuch	PP1	PP2	PP3	PP4	PP5	PP6
--	rpm	%	%	%	%	%	%
1	n=2000	0,076	-0,944	1,5	0,467	-2,11	1,015
2	n=240	-0,002	-0,894	1,621	0,538	-2,156	0,894

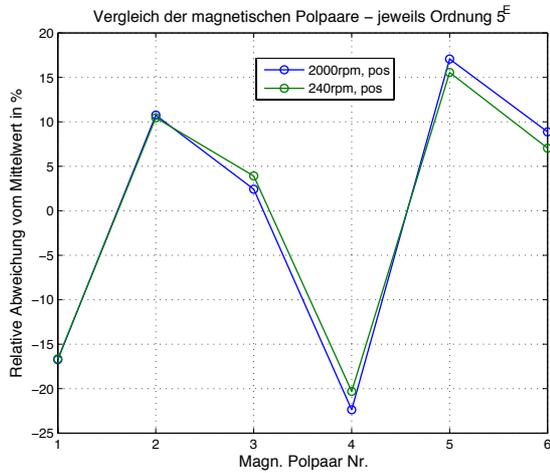


Abb. 70: Abweichung der Ordnung 5 für alle magnetischen Polpaare

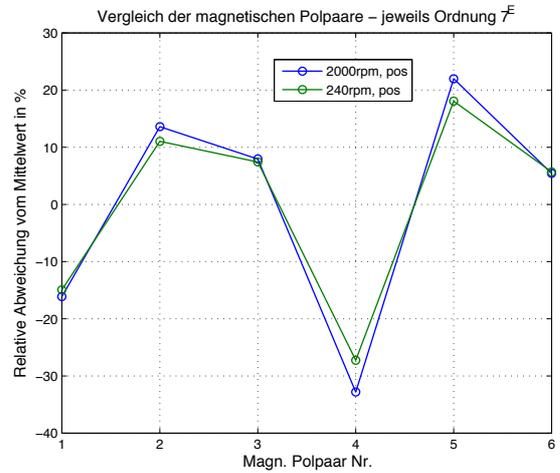


Abb. 71: Abweichung der Ordnung 7 für alle magnetischen Polpaare

Als Abschluss des Kapitels soll wieder der Vergleich zwischen Mess- und Simulationsdaten dienen, wie gehabt graphisch und in Tabellenform dargestellt. Wie Abb. 72 ersichtlich, zeigt der Vergleich nichts neues, da durch die Betrachtung lediglich eines Segments Einflüsse wie sie durch ungleiche Magnetisierung entstehen, nicht mehr im Spektrum sichtbar sind.

Vergleich der elektrischen Periode der Flussverkettung von STS18 und den FEM-Daten

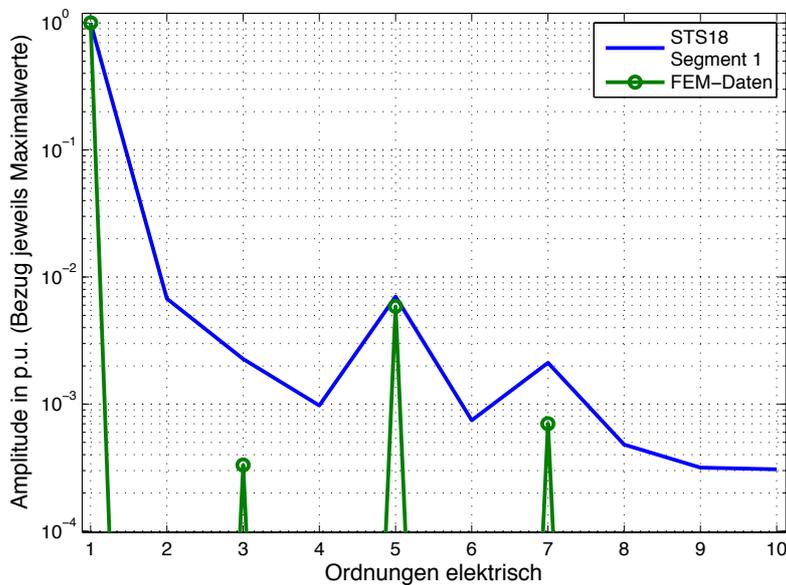


Abb. 72: Vergleich von Mess- und FEM-Daten anhand des Amplitudenspektrums

Tabelle 24: Numerische Auswertung von Abb. 72

Nr.	Ordnung	STS18-Segment1	FEM
--	--	%	%
1	1	100 (0,0296 Vs)	100 (0,0343 Vs)
2	5	0,7	0,59
3	7	0,21	0,07

7.5 Abschlusskommentar

Die Auswertung der Flussverkettung im Leerlauf ist insofern ein würdiger Abschluss dieser Masterarbeit, als dass bei den Versuchen das größte Datenaufkommen zu verzeichnen war, und auch sehr viel Zeit und Energie in die Auswertung der Daten investiert wurde. Besonders die Bereinigung der Messdaten von der Offsetspannung des Messgeräts stellte eine unerwartet hohe Hürde dar, die, durch wesentliche mithilfe seitens meiner Betreuer, dennoch überwunden werden konnte.

Belohnt wurde die Mühe mit umfangreichen Auswertungen, die in dieser Form selten gemacht werden, bzw. gemacht werden können, die aber umso mehr einen sehr guten Rückschluss auf den Charakter der untersuchten Maschine geben.

8 ZUSAMMENFASSUNG

Am Ende dieser Arbeit soll Rückschau gehalten werden, auf die vielfältigen Tätigkeiten die zum Gelingen der gegenständlichen Arbeit durchgeführt, und auf den Seiten dieser Dokumentation festgehalten wurden.

Da dies die erste von mehreren Abschlussarbeiten war, welche experimentelle Untersuchungen der Versuchsmaschine zum Thema haben werden, stand vor allem der Aufbau von Know-how und die strukturierte Dokumentation der Ergebnisse stets im Mittelpunkt, um in den Nachfolgeprojekten auf dieses Wissen zurückgreifen, und die folgenden Arbeiten damit beschleunigen zu können.

Beim Aufbau der Prüfstandsinfrastruktur wurde vor allem darauf geachtet, dass alle Komponenten flexibel verschaltbar sind. Dieses System hat sich auch bestens bewährt, da die Rüstzeiten bei Versuchsänderungen klein gehalten werden konnten, besonders bei den zukünftigen Masterarbeiten wird dies noch stärker ins Gewicht fallen, da hier oftmalige Schaltungs-, bzw. Versuchsänderungen geplant sind.

Eine der wesentlichsten Besonderheit der Maschine, nämlich der Einstellung einer Exzentrizität des Rotors, wurde im Rahmen dieser Arbeit ebenso Beachtung geschenkt, im Zuge dessen wurde eine Schritt für Schritt Anleitung inkl. Matlab-Skript erstellt, um für Versuche mit unterschiedlicher Exzentrizität gewappnet zu sein.

Die Auswertung der Datenblattparameter hat größere Abweichungen zu Tage gefördert als erwartet wurden, für die Untersuchung der Induktivität der Maschine wurden deshalb noch genauere Untersuchungen vorgemerkt und in Evidenz gehalten.

Das Kernstück der Arbeit war die Erstellung einer Maschinencharakteristik, angefangen mit der Untersuchung der Eigenfrequenzen des Maschinensatzes, über die Analyse des Rastmoments bis hin zu dem am ausführlichsten behandelten Teil, die Maschinencharakteristik aus der Flussverkettung im Leerlauf. Die Erkenntnisse aus diesen Charakteristika fließen in die weitere Entwicklung der von AVL entwickelten Simulationssoftware ein.

Abschließend bleibt noch zu sagen, dass für die Durchführung und Auswertung der Versuche ein erstaunlich breites Spektrum an Wissen und Tätigkeiten angewendet werden musste, was sehr lehrreich war, jedoch teilweise zusätzliche Hilfe von außen erforderte. Die letzten Worte dieser Arbeit möchte ich also jenen Personen widmen, die federführend an der Bewerksstellung der unterschiedlichen Herausforderungen mitgewirkt haben, allen voran meinen Betreuern, aber auch grundsätzlich jedem der einen Beitrag geleistet hat.

9 ANHANG

9.1 Abkürzungsverzeichnis

FEM	Finite Elemente Methode
STS	Statorspule
FMS	Flussmessspule
ZK	Zwischenkreis
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
PWR	Pulswechselrichter
ASM	Asynchronmaschine
PMSM	Permanentmagnet erregte Synchronmaschine
EAM	Institut für Elektrische Antriebstechnik und Maschinen
T	Kurzzeichen für Drehmomentmesswelle
R	Kurzzeichen für Inkrementalgeber
ω_{el}	Elektrische Winkelgeschwindigkeit
Ψ	Zeichen für Flussverkettung
K_p	Proportionalverstärkung
T_N	Nachstellzeit
T_a	Abtastzeit
k_{AW}	Verstärkung der Anti-Windup-Maßnahme
RKS	Rotorkoordinatensystem
SKS	Statorkoordinatensystem
DFT	Diskrete Fouriertransformation
FFT	Fast Fouriertransformation
deg^M	Winkelangabe: Grad mechanisch
deg^E	Winkelangabe: Grad elektrisch
rad^M	Winkelangabe: Radiant mechanisch

9.2 Literaturverzeichnis

- [1] Schröder, Dierk (Hrsg.): **Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen**. 3. Auflage. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2009. – ISBN 978-3-540-89612-8
- [2] Böge, Alfred (Hrsg.): **Vieweg Handbuch Maschinenbau**, Band 1, Ausgabe für Österreich. 8. Auflage. Braunschweig Wiesbaden : Vieweg-Verlag, 2004. – ISBN 3-528-74267-4
- [3] Böge, Alfred (Hrsg.): **Vieweg Handbuch Maschinenbau**, Band 2, Ausgabe für Österreich. 8. Auflage. Braunschweig Wiesbaden : Vieweg-Verlag, 2004. – ISBN 3-528-74268-2
- [4] AVL Trimerics GmbH: **REGen_15kW_data_V1.07.pdf**. Regensburg, 2013. – Datenblatt
- [5] Elektromaschinenbau GmbH: **MSP-2002-12-003-112-Stator**. Mittelbiberach, 2013. – Technische Zeichnung
- [6] LEM Deutschland GmbH: **Power Phasen PP40 – PP54**. Gross-Gerau, 2012. Publikation A24317D. – Datenblatt
- [7] Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH: **T10F**, Drehmoment-Messflansch. Darmstadt. B0120-10.0 de. – Datenblatt
- [8] Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH: **Prüfprotokoll T10F**. Darmstadt 1998. – Prüfprotokoll
- [9] Heidenhain GmbH: **Drehgeber**. Traunreut 2013. – Datenblatt
- [10] SINGLE Temperiertechnik GmbH: **T20100-D**. Hochdorf 2008. – Technische Dokumentation
- [11] Bartsch, Hans-Jochen (Hrsg.): **Taschenbuch Mathematischer Formeln**, 21. Auflage. München : Carl Hanser Verlag, 2007. – ISBN 978-3-446-40895
- [12] Seebacher R., Grübler H.: **20150826_Besprechung_PMSMpara.ppt**, Graz, August 2015 – Masterarbeits-Zwischenpräsentation

9.3 Codeverzeichnis

Listing 1: Reglerentwurf mit Unterstützung von Matlab,.....	8
Listing 2: Matlab-Skript zur Auswertung der Widerstandsmessung,.....	12
Listing 3: Matlab-Funktion zur Berechnung von Fourierkoeffizienten	29
Listing 4: Ansteuerung des Signalprozessorsystems via Matlab,	53
Listing 5: Hilfsfunktion für den Reglerentwurf, s_z_q.m.....	55
Listing 6: Matlab -Skript zur Erstellung von Abb. 11 und Abb. 12,.....	56
Listing 7: Matlab-Skript zur Auswertung des Vergleichs der Spannungskanäle,.....	56
Listing 8: Matlab-Skript zur Berechnung der Statorinduktivität,.....	57
Listing 9: Matlab-Skript zum Vergleich der Versuche der Induktivitätsbestimmung,	61
Listing 10: Matlab-Skript zur Erstellung des Diagramms des Auslaufversuchs,.....	62
Listing 11: Auswertung: Momentstoß klein,.....	63
Listing 12: Auswertung: Momentstoß groß,.....	63
Listing 13: Matlab-Skript zur Abschätzung der Exzentrizität der Versuchsmaschine,	64
Listing 14: Berechnung der Fourierkoeffizienten eines Signals einer Periodendauer ungleich 2π , fouriercoeffs_sub.m	65
Listing 15: Auswertung des Versuchs mit langsamer Umdrehung,.....	66
Listing 16: Einlesen der Rohdaten aus dem Ditheringversuch,.....	67
Listing 17: Auswertung der gemittelten Daten aus dem Ditheringversuch,.....	68
Listing 18: Auswertung und Darstellung der FEM-Daten, fem_daten_rastm_151012.m	68
Listing 19: Einlesen der Messdaten, aw_flussverk_150906	70
Listing 20: Klasse "SpuleAuswertung"	73
Listing 21: calcFourierCoeffs1Round().....	75

Listing 22: calcFourierCoeffsSegments()	75
Listing 23: Klasse "SpuleAuswertungContainer"	76
Listing 24: plotFourierMesh1Round()	76
Listing 25: plotFourierMesh1RoundFMS()	78
Listing 26: plotBenachbarte()	78
Listing 27: plotFourierAngles()	79
Listing 28: plotFourierSegmente()	81
Listing 29: plotMagnPolpaare()	82
Listing 30: plotOrdnungen1Round2D()	83
Listing 31: fun_ausrichten_sinus.m	84
Listing 32: fun_offset.m	88

9.4 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kanalbelegung des Leistungsmessgeräts bei der Widerstandsmessung	11
Tabelle 2: Details zur Versuchsausführung	12
Tabelle 3: Numerische Auswertung von Abb. 17	15
Tabelle 4: Numerische Auswertung von Abb. 18 - Teil 1	16
Tabelle 5: Numerische Auswertung von Abb. 18 - Teil 2	16
Tabelle 6: Details zu den unterschiedlichen Versuchen	18
Tabelle 7: Numerische Auswertung von Abb. 26	21
Tabelle 8: Numerische Auswertung von Abb. 27	21
Tabelle 9: Zuordnung der FMS an die Kanäle des Messgeräts N5000	23
Tabelle 10: Auswertung der Resonanzstellen des Auslaufversuchs	25
Tabelle 11: Numerische Auswertung von Abb. 45	33
Tabelle 12: Kanalbelegung - Messung 1	35
Tabelle 13: Kanalbelegung - Messung 2	35
Tabelle 14: Kanalbelegung - Messung 3	35
Tabelle 15: Kanalbelegung - Messung 4	35
Tabelle 16: Kanalbelegung - Messung 5	36
Tabelle 17: Evaluierung der neuen Ausrichte-Funktion	37
Tabelle 18: Mittelwerte einiger Ordnungen aus Abb. 55	40
Tabelle 19: Numerische Auswertung von Abb. 62	43
Tabelle 20: Numerische Auswertung von Abb. 63	43
Tabelle 21: Numerische Auswertung von Abb. 65	45
Tabelle 22: Mittelwerte der angeführten Ordnungen aller 6 magnetischen Polpaare, bzw. Gesamtmittelwert	45
Tabelle 23: Numerische Auswertung von Abb. 69	47
Tabelle 24: Numerische Auswertung von Abb. 72	47

9.5 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Versuchsmaschine am Prüfstand montiert	3
Abb. 2: Querschnitt durch den Stator inkl. Lage der Temperatursensoren und FMS	3
Abb. 3: Übersicht über die Prüfstandsinfrastruktur als Blockschaltbild	4
Abb. 4: Montage der Anschlüsse der Statorspulen	5
Abb. 5: Modell des Stromverteilers für die PMSM	6
Abb. 6: Fertiggestellter Stromverteilkasten	6
Abb. 7: Prinzip-Blockschaltbild der Reglerstruktur	7
Abb. 8: Geschlossene Stromregelschleife	8

Abb. 9: Editoransicht des offenen Kreises von sisotool	9
Abb. 10: Detail Stromregler R_i	10
Abb. 11: Sprungantwort des geschlossenen Kreises, d-Strom.....	10
Abb. 12: Sprungantwort des geschlossenen Kreises, q-Strom.....	10
Abb. 13: Messschaltung - Widerstandsmessung der Statorspulen	11
Abb. 14: Detail der Anschlüsse der Statorspulen.....	11
Abb. 15: Temperaturverlauf während der Versuche zur Widerstandsbestimmung.	14
Abb. 16: Schaltung der Vergleichsmessung.....	15
Abb. 17: Ergebnis der Vergleichsmessung.....	15
Abb. 18: Messergebnis der Widerstandsmessung.....	16
Abb. 19: Skizze Statorkoordinatensystem	17
Abb. 20: Messschaltung zur Induktivitäts-bestimmung	17
Abb. 21: Bewegung des Rotors bei 75 Hz.....	18
Abb. 22: Bewegung des Rotors bei 600 Hz	18
Abb. 23: Spannung und Strom zur Auswertung der q-Komponente.....	19
Abb. 24: Spannung und Strom der q-Komponente Fourier transformiert	19
Abb. 25: L_q an verschiedenen Rotorpositionen gemessen	20
Abb. 26: Relative Abweichung vom Datenblattwert - L_d	21
Abb. 27: Relative Abweichung vom Datenblattwert - L_q	21
Abb. 28: Spannungen der FMS bei zentrischer Position	23
Abb. 29: Spannungen der FMS bei exzentrischer Position	23
Abb. 30: Skizze der Situation mit Blick auf den Rotor, Lage der verwendeten FMS..	24
Abb. 31: Querschnitt durch den Stator inkl. Lage der verwendeten FMS	24
Abb. 32: Verwendete Prüfstandskomponenten für die Analyse des mechanischen Systems.....	25
Abb. 33: Aufzeichnung der mechanischen Schwingungen, wie sie beim Auslaufversuch auftreten	25
Abb. 34: Detail einer mechanischen Schwingung an der Stelle 1	25
Abb. 35: Schwingung der gedachten "Feder" des Rastmoments gegen die Massenträgheit des Maschinensatzes	26
Abb. 36: Drehmomentschwingung mit gleicher Frequenz wie einige wesentliche Resonanzstellen des Auslaufversuchs	26
Abb. 37: Versuchsaufbau zur Rastmomentbestimmung	27
Abb. 38: Skizze eines Ausschnitts von Stator- und Rotorgeometrie (geradegestreckt)	28
Abb. 39: Triggersignal, aufgezeichnet durch zwei unterschiedliche Messsysteme ...	29
Abb. 40: Testsignal für fouriercoeffs.m	30
Abb. 41: Amplitudenspektrum des Testsignals	30
Abb. 42: Bestimmung des Rastmomentverlaufs mittels Dithering.....	31
Abb. 43: Statische Momentbetrachtung bezüglich Haftmoment.....	31
Abb. 44: Vergleich der Rastmomentverläufe - Dithering vs. langsame Umdrehung.	32
Abb. 45: Amplitudenspektren von Mess- und FEM-Daten des Rastmoments.....	33
Abb. 46: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Flussverkettung.....	34
Abb. 47: Organisation der Datenauswertung	36
Abb. 48: Klassendiagramme des Matlab-Skripts zur Flussverkettungsauswertung....	36
Abb. 49: Übereinandergelegte Triggersignale sowie Auswertebereich (hellgrün) ...	37
Abb. 50: Beispielhaft ausgerichtetes Signal.....	37
Abb. 51: Flussverkettung mit und ohne Offsetbereinigung.....	38
Abb. 52: Verlauf der Flussverkettung entlang einer mechanischen Umdrehung.....	39
Abb. 53: Detail 1 aus Abb. 52	39

Abb. 54: Auswertung von Messpunkten aus Abb. 52	39
Abb. 55: Übersicht über die Amplitudenspektren einer mechanischen Umdrehung der Flussverkettung aller 18 STS.....	40
Abb. 56: Vergleich der Ordnung 6 aller 18 STS bei unterschiedlichen Versuchen.....	41
Abb. 57: Vergleich der Ordnung 30 aller 18 STS bei unterschiedlichen Versuchen..	41
Abb. 58: Vergleich der Ordnung 42 aller 18 STS bei unterschiedlichen Versuchen..	41
Abb. 59: Vergleich der Phasenlagen der STS der Phase 1	42
Abb. 60: Relative Abweichung des elektrischen Winkels der STS der Phase 1.....	42
Abb. 61: Vergleich der Phasenlagen der STS der Phase 1, bei Verwendung einer einzelnen STS als Bezug.....	42
Abb. 62: Vergleich benachbarter STS anhand des Amplitudenspektrums	43
Abb. 63: Vergleich benachbarter FMS anhand des Amplitudenspektrums.....	43
Abb. 64: Vergleich von Stator- und Flussmessspule an Zahn 18.....	44
Abb. 65: Vergleich von Mess- mit FEM-Daten anhand des Amplitudenspektrums....	44
Abb. 66: Übersicht über die Amplitudenspektren einer elektrischen Umdrehung der Flussverkettung aller 18 STS.....	45
Abb. 67: Vergleich der mechanischen und elektrischen Grundschiwingung aller STS anhand der relativen Abweichung vom Gesamtmittelwert.....	46
Abb. 68: Relative Abweichung aller STS vom Gesamtmittelwert jeweils für Ordnung 5 und 7.....	46
Abb. 69: Abweichung der Grundschiwingung vom Gesamtmittelwert für alle magnetischen Polpaare.....	46
Abb. 70: Abweichung der Ordnung 5 für alle magnetischen Polpaare.....	47
Abb. 71: Abweichung der Ordnung 7 für alle magnetischen Polpaare	47
Abb. 72: Vergleich von Mess- und FEM-Daten anhand des Amplitudenspektrums...	47

9.6 Matlab-Code der einzelnen Versuchsauswertungen

9.6.1 Code zu Kapitel 3.3 Anfertigung fehlender Komponenten

Listing 4: Ansteuerung des Signalprozessorsystems via Matlab, dspace_strg_belastung_150916.m

```
% 16.09.2015, H. Gruebler
% MA Gruebler - Ansteuerung des Signalprozessorsystems via Matlab
%
% Nachfolgendes Skript stellt eine Verbindung zum Signalprozessorsystem am
% Pruefstand her, um damit Variablen des Simulink-Koppelplans lesen und
% schreiben zu koennen.
% Dies ermoeeglicht Messungen automatisiert durchfuehren und darstellen
% zu koennen, was Fehler minimiert, Versuchsdurchfuehrungen beschleunigt,
% die Einstellungen eines Versuchs am Signalprozessorsystem dokumentiert
% und was ausserdem auch vollautomatische Messungen moeglich macht.
% Allerdings sei an dieser Stelle angemerkt, dass das ansprechen des
% Leistungsmessgeraets fuer eine vollautomatische Messung bis dato nicht
% mit Matlab durchgefuehrt werden kann, da die Toolbox fuer eine
% Kommunikation ueber die Ethernet-Schnittstelle nicht freigeschalten ist.
% Abhilfe wuerde hier ein Ausborgen der Lizenz eines anderen Instituts,
% oder, wie im gegenstaendlichen Fall geloest, ein Workaround mittels Java
% schaffen.
%
% Das Triggersystem des Pruefstands wird ueber das RTS-Signal der seriellen
% Schnittstelle des Rechners (COM1) ausgeloest.
%
% Achtung: Es muss grundsaeztzlich darauf geachtet werden, dass die
% Variablen des Koppelplans mit den hier in diesem Skript verknuepften
% Variablen uebereinstimmt, verwendeter Koppelplan und .sdf-File:
% am_pmsm_150521.mdl, am_pmsm_150521.sdf
```

```

close all;
clear all;

%Serielle Schnittstelle (Triggersignal) aktivieren, RTS off
com1 = serial('COM1','RequestToSend','off');
fopen(com1);

boards_info=mlib('GetBoardInfo'); % falls leer keine Karte registriert

mlibini; % die erste registrierte Karte wird verwendet

% mlib ist eine matlab mex dll die nach dem ersten Aufruf im Speicher
% bleibt bis entweder: clear mex, clear functions, clear dsmlib, clear all
% nach einem clear muss SelectBoard durchgef^hrt werden.
%
mlib('SelectBoard','DS1103');

variables = {%allg. Umrichtersteuerung, Positionsregler AM
'Model Root/System/onoff/PWM_EIN_A/Value';...
'Model Root/System/onoff/PWM_EIN_B/Value'
'Model Root/System/AM/Regelmodus/Value'; ...
'Model Root/System/in/phisol1_deg/Value'; ...
%Einstellungen i-Regler PMSM
'Model Root/System/SM/modus1/Value';...
    %0->aus,1->ein
'Model Root/System/SM/pol2kart1/is_mode/Value';...
    %id,iq->0;|i|,phi->1;u,f->2
'Model Root/System/SM/phi_mode/Value';...
    %RKS->0 (phiel_offset!),SKS->1,WKS->2
%zittern in d-Richtung:
'Model Root/System/SM/x/Gain';...
%zittern in q-Richtung:
'Model Root/System/SM/y/Gain';...
%Frequenz Wechselanteil Stromraumzeiger:
'Model Root/System/SM/fsoll_ac/Value';...
%Amplitude Wechselanteil Stromraumzeiger
'Model Root/System/SM/amplitude/Value';...
%Strombegrenzung PMSM
'Model Root/System/onoff/Überwachung/i_A_grenze/Value';...
%Phasenverschiebung zw. Flussverkettung PMSM und Nullpunkt
%mech. Winkel
'Model Root/System/SM/phiel_offset/Value';...
%Misc
'Model Root/System/u2d_pwmA/Demux/Out1';...
'Model Root/System/u2d_pwmA/Demux/Out2';...
'Model Root/System/u2d_pwmA/Demux/Out3';...
%id-ist
'Model Root/System/SM/i-Regler/idq_ist/Out1{SubArray1}';...
%iq-ist
'Model Root/System/SM/i-Regler/idq_ist/Out1{SubArray2}';...
%id-soll
'Model Root/System/SM/pol2kart1/idsoll';...
%iq-soll
'Model Root/System/SM/pol2kart1/iqsoll';...
'Model Root/System/in/phimech7';...
'Model Root/System/in/trigger_ext';...
'Model Root/System/in/m'};

%Variablen laden
%-----
%allg. Umrichtersteuerung, Positionsregler AM
[pwr_a_onoff, pwr_b_onoff, regelmod_am, phimech_soll, ...
 i_reg_pmsm_onoff, regelmod_pmsm, koord_syst_pmsm, d_onoff, q_onoff, ...
 i_freq_pmsm, i_ampl_pmsm, i_grenze_pmsm, phiel_offset_pmsm, ...
 u1_dspace, u2_dspace, u3_dspace, id_pmsm_ist, iq_pmsm_ist, ...
 id_pmsm_soll, iq_pmsm_soll, phimech_ist, trigger_ext, torque, ] ...
= mlib('GetTrcVar',variables);

%Start mit ext. Trigger, Pre-Trigger-Delay und Anzahl der Samples
mlib('Set','Trigger','on',...

```

```

        'TriggerLevel',2.5,...
        'TriggerEdge','rising',...
        'TriggerVariable',trigger_ext,...
        'TraceVars',[id_pmsm_ist;iq_pmsm_ist;ul_dspace;...
                    u2_dspace;u3_dspace;phimech_ist;trigger_ext],...
%Anzahl der Samples ist gleichzeitig die Messzeit ->
%NumSamples x Ta (Ta=1e-4 s)
'NumSamples',10000,...
'Delay',-1000,...
'TimeStamping','on');
%Messsystem dSpace scharf schalten
mlib('StartCapture');
%warten, bis Trigger bereit
while mlib('TriggerState') ~= 1, end
%Regler ein
mlib('Write',i_reg_pmsm_onoff,'Data',1);
%ext. Trigger einschalten
set(com1,'RequestToSend','on');
pause(.8);
set(com1,'RequestToSend','off');
fclose(com1);
%Daten aus dSpace-System holen
while mlib('CaptureState')~=0, end
data_out = mlib('FetchData');

%Regler aus
mlib('Write',i_reg_pmsm_onoff,'Data',0);

%Daten in struct ablegen
dspace_daten = struct('zeitbasis_dspace',data_out(1,:), 'id_pmsm_ist', ...
                    data_out(2,:), 'iq_pmsm_ist', data_out(3,:), ...
                    'u_L1_dspace', data_out(4,:), 'u_L2_dspace', ...
                    data_out(5,:), 'u_L3_dspace', data_out(6,:), ...
                    'phimech', data_out(7,:), 'trigger', data_out(8,:));

%Speicherung der Daten auf der Festplatte
save('150916_daten_dspace_sprungaw_id8A','dspace_daten');
%Darstellung der Daten, um eine Abschaetzung zu haben, ob der Versuch
%erfolgreich war
%id_pmsm
figure(1)
hold on
plot(dspace_daten.zeitbasis_dspace,dspace_daten.iq_pmsm_ist,'-r');
plot(dspace_daten.zeitbasis_dspace,dspace_daten.id_pmsm_ist);
grid on

```

9.6.2 Code zu Kapitel 4 Reglerentwurf

Listing 5: Hilfsfunktion für den Reglerentwurf, s_z_q.m

```

%Institut fuer Regelungs- und Automatisierungstechnik - TU Graz
%*****
% Berechnung der q-Uebertragungsfunktion H(q) aus der
% z-Uebertragungsfunktion H(z) oder aus der s-Uebertragungsfunktion H(s)
%
% Berechnung der z-Uebertragungsfunktion H(z) aus der
% q-Uebertragungsfunktion H(q) oder aus der s-Uebertragungsfunktion H(s)
%
% H(z) --> H(q)
% [numq,denq] = s_z_q(numz,denz,T,'z','q');
% H(q) --> H(z)
% [numz,denz] = s_z_q(numq,denq,T,'q','z');
% H(s) --> H(q)
% [numq,denq] = s_z_q(nums,dens,T,'s','q');
% H(s) --> H(z)
% [numq,denq] = s_z_q(nums,dens,T,'s','z');
%
function [nume,dene] = s_z_q(num,den,T,vers1,vers2)

[A,B,C,D] = tf2ss(num,den);
if (strcmp(vers1,'z')&strcmp(vers2,'q'))
    [Aq,Bq,Cq,Dq] = bilin(A,B,C,D,-1,'Tustin',T);

```

```

elseif (strcmp(vers1,'q')&strcmp(vers2,'z'))
    [Aq,Bq,Cq,Dq] = bilin(A,B,C,D,1,'Tustin',T);
elseif (strcmp(vers1,'s')&strcmp(vers2,'q'))
    [Ad,Bd] = c2d(A,B,T);
    [Aq,Bq,Cq,Dq] = bilin(Ad,Bd,C,D,-1,'Tustin',T);
elseif (strcmp(vers1,'s')&strcmp(vers2,'z'))
    [Aq,Bq] = c2d(A,B,T);
    Cq = C;
    Dq = D;
else
    error('q,s oder z als vers eingeben');
end
[nume,dene] = ss2tf(Aq,Bq,Cq,Dq);

```

**Listing 6: Matlab -Skript zur Erstellung von Abb. 11 und Abb. 12,
aw_sprungaw_150916.m**

```

% 16.09.2015, H. Gruebler
%
% Matlab-Skript zur Erstellung der Diagramme der Sprungantworten des
% Reglertests
close all;
clear all;
clc;

% Messgroessen vom dSpace-System einlesen
mw_ds_id = load('150916_daten_dspace_sprungaw_id8A.mat');
temp = fieldnames(mw_ds_id);
mw_id = getfield(mw_ds_id, temp{1});

mw_ds_iq = load('150916_daten_dspace_sprungaw_iq8A.mat');
temp = fieldnames(mw_ds_iq);
mw_iq = getfield(mw_ds_iq, temp{1});

figure(1)
plot(mw_id.zeitbasis_dspace, mw_id.id_pmsm_ist);
grid on;
xlim([-0.01 .1]);
title('Sprungantwort reales System, d-Strom','FontSize',12);
xlabel('Zeit in Sekunden','FontSize',12);
ylabel('Strom in Ampere','FontSize',12);

figure(2)
plot(mw_iq.zeitbasis_dspace, mw_iq.iq_pmsm_ist);
grid on;
xlim([-0.01 .1]);
title('Sprungantwort reales System, q-Strom','FontSize',12);
xlabel('Zeit in Sekunden','FontSize',12);
ylabel('Strom in Ampere','FontSize',12);

```

9.6.3 Code zu Kapitel 5.1 Ohmscher Widerstand der Statorwicklungen

**Listing 7: Matlab-Skript zur Auswertung des Vergleichs der Spannungskanäle,
aw_vergleich_150912.m**

```

% 19.09.2015, H. Gruebler
% MA Gruebler - Auswertung der Referenzmessung fuer die Widerstandsm.
%
% Messdaten:
% *****
% Der Versuch wurde, analog zur Widerstandsmessung mit je zwei
% unterschiedlichen Stroemen durchgefuehrt.
%
% Die Daten sind in den Dateien jeweils in Spalten organisiert und nach
% folgender Struktur abgelegt:
%
% STS01-STS09
% -----
%
% 1| 2| 3| 4| 5| 6| 7| 8| 9| 10| 11| 12| 13|

```

```

% --+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+
% hh|mm|ss|CURR1|VOLT1|VOLT2|VOLT3|VOLT4|VOLT5|VOLT6|CURR6|CURR5|CURR3|
% ---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+
%
% Die STS, die fuer die Referenzmessung untersucht wurde, war die Spule 18.
%
% Funktionsbeschreibung:
% *****
%
% Die Messdaten werden in der Reihenfolge von STS01 bis STS18 eingelesen,
% gemittelt und geordnet in den entsprechenden Vektoren abgelegt.
% Danach wird mittels des ohmschen Gesetzes aus den gemittelten
% Gesamteffektivwerten der ohmsche Widerstand berechnet.
% Es werden nun aus den Einzelwiderstaenden der STS mittlere Widerstaende
% fuer die jeweiligen Versuche berechnet, welche dann anschliessend als
% Bezugswert fuer die relative Abweichung verwendet werden.

%clean-up von Workspace und Konsole
clc;
close all;
clear all;

%Einlesen der Messwerte von der Festplatte
mw_3a=load('Messdaten\150912_daten_vgl_r_mess_3A_sts18.txt');
mw_5a=load('Messdaten\150912_daten_vgl_r_mess_5A_sts18.txt');

%Aufteilen des Messdaten in Stroeme und Spannungen, Mittelung der Messwerte
%und entsprechend geordnetes Ablegen in Vektoren
i_3a = mean(mw_3a(:,4));
i_5a = mean(mw_5a(:,4));

n = 5:13;
k = 1:9;

u_3a(k) = mean(mw_3a(:,n));
u_5a(k) = mean(mw_5a(:,n));

%Berechnung der Einzelwiderstaende
r_3a = u_3a ./ i_3a;
r_5a = u_5a ./ i_5a;

%Berechnung gemittelter Widerstaende
r_m3a = mean(r_3a);
r_m5a = mean(r_5a);

%Berechnung der relativen Abweichung der Einzelwiderstaende zum jeweiligen
%Mittelwert
n = 1:9;
f_rel_3a(n) = 100*((r_3a(n) - r_m3a) / r_m3a);
f_rel_5a(n) = 100*((r_5a(n) - r_m5a) / r_m5a);

%Darstellung der Ergebnisse
figure(1);
hold on;
plot(n,f_rel_3a,'-','LineWidth',1.5);
plot(n,f_rel_5a,'-r','LineWidth',1.5);
hold off;
legend('Messung mit 3A','Messung mit 5A','Location','NorthWest');
grid on;
title('Vergleichsmessung an Spule 18');
xlabel('Kanal-Index');
ylabel('Relative Abweichung vom jeweiligen Mittelwert in %');

```

9.6.4 Code zu Kapitel 5.2 Induktivität der Statorwicklungen

**Listing 8: Matlab-Skript zur Berechnung der Statorinduktivität,
aw_indukt_150916.m**

```

% 16.09.2015, H. Gruebler
% MA Gruebler - Berechnung der Statorinduktivitaet
%
clc;
close all;
clear all;

%Pfad zu Hilfsfunktionen
path('C:\Users\h_gruebler\Dropbox\Masterarbeit\03_Messdaten\00_hilfsfkt_matlab_
java',path);

%Speicher f"ur die Ergebnisvektoren reservieren
Lq_vekt = [];
Ld_vekt = [];

fnames={'Messdaten\n5000\id\150916_daten_n5000_pos43'; ...
        'Messdaten\n5000\iq\150916_daten_n5000_pos43'; ...
        'Messdaten\n5000\id\150916_daten_n5000_pos223'; ...
        'Messdaten\n5000\iq\150916_daten_n5000_pos223'; ...
        'Messdaten\n5000\id\150916_daten_n5000_pos343'; ...
        'Messdaten\n5000\iq\150916_daten_n5000_pos343'};

positions = [43 43 223 223 343 343];

%Polpaarzahl p (Induktivitäten in Serie)
p = 6;

%Transformationsmatrix
T = 2/3 * [1 -1/2 -1/2; 0 sqrt(3)/2 -sqrt(3)/2];

% config: 150312_N5000konf_indukt

% Trigger U1 I1 U2 I2 U3 I3
% t "CURR1","VOLT2","CURR2","VOLT4","CURR4","VOLT6","CURR6"
for ind=1:6

    fname = char(fnames(ind));

    mw=mwgeigl(pwd,fname);
    t=mw(:,1);
    u1=mw(:,3)/p;
    i1=mw(:,4);
    u2=mw(:,5)/p;
    i2=mw(:,6);
    u3=mw(:,7)/p;
    i3=mw(:,8);

    % u1: alle gelben in Serie
    % u2: alle grünen in Serie
    % u3: alle violetten in Serie
    % i1-i3: jeweilige Phasenströme

    %Abtastzeit
    Tn=mean(diff(t));

    %Umrechnung in Spannungs- und Stromraumzeiger, jeweils d- & q-Komponente
    Udq = T * [u1 u2 u3]';
    Idq = T * [i1 i2 i3]';
    %Reihenfolge der Werte wird umgedreht, da nicht alle Signalperioden
    %fuer die Auswertung herangezogen werden, und somit jene Werte fuer
    %eine noch nicht eingeschwungene Lage automatisch wegfallen
    fliplr(Udq);
    fliplr(Idq);

    %Filterung der Daten (Moving average) fuer die Darstellung fuer die
    %Dokumentation
    filterlaenge = 4;

    %Berechnung der FFT

```

```

NFFT = length(u1);
fa = 1/mean(diff(t));
frequenzen_fft = fa*(0:(NFFT/2-1))/NFFT;

%Berechnung der Induktivitäten
f_anreg = 600; %Hz

%Signalperiode
Ts=1/f_anreg;
%Betrachtete Signalperioden
nop = 200;
%Anfangs- und Endindex des Zeitsignals für die FFT-Berechnung
ai=1;
ei=max(find(t<Ts*nop));
%Umrechnung der Indizes der FFT in Frequenzen
NFFT = ei-ai;
fn = 1/Tn;
frequenzen_fft = fa*(0:(NFFT/2-1))/NFFT;
%Anregungsfrequenz befindet sich auf folgendem Index:
f_freq=nop+1;

%Berechnung der q-Komponente
if mod(ind,2) == 0
    Uq = Udq(2,ai:ei);
    Iq = Idq(2,ai:ei);

    Uq_filt = smooth(Uq,filterlaenge);
    Iq_filt = smooth(Iq,filterlaenge);

    Uq_fft = fft(Uq)';
    Iq_fft = fft(Iq)';

    Zq = Uq_fft(f_freq)/Iq_fft(f_freq);

    Lq = abs(imag(Zq)/(2*pi*f_anreg))

    Lq_vekt = [Lq_vekt Lq];

%Berechnung der d-Komponente
else
    ['Position ',num2str(positions(ind))]

    Ud = Udq(1,ai:ei);
    Id = Idq(1,ai:ei);

    Ud_filt = smooth(Ud,filterlaenge);
    Id_filt = smooth(Id,filterlaenge);

    Ud_fft = fft(Ud)';
    Ud_fft_abs = abs(Ud);
    Id_fft = fft(Id)';
    Id_fft_abs = abs(Id);

    Zd = Ud_fft(f_freq)/Id_fft(f_freq);

    Ld = abs(imag(Zd)/(2*pi*f_anreg))

    Ld_vekt = [Ld_vekt Ld];

end
end

Ld_mean = mean(Ld_vekt)
Lq_mean = mean(Lq_vekt)
%Wert von Ld und Lq lt. Datenblatt: 1.1mH
Ld_dat = 1.1e-3;
Lq_dat = 1.1e-3;
%relative Abweichung
Ld_rel = ((Ld_vekt - Ld_dat) / Ld_dat) * 100;
Lq_rel = ((Lq_vekt - Lq_dat) / Lq_dat) * 100;

```

```

Ld_mean_rel = ((Ld_mean - Ld_dat) / Ld_dat) * 100;
Lq_mean_rel = ((Lq_mean - Lq_dat) / Ld_dat) * 100;
Ld_rel_mean = ((Ld_vekt - Ld_mean) / Ld_mean) * 100;
Lq_rel_mean = ((Lq_vekt - Lq_mean) / Lq_mean) * 100;

%plots der Ergebnisse
figure(1);
plot(positions(1:2:end), Lq_rel, '-ob', [positions(1) positions(end)],...
      [Lq_mean_rel Lq_mean_rel], '-g', 'LineWidth',2);
title('L_q ber dem Umfang bei 600 Hz','FontSize',12);
xlabel('deg^M','FontSize',12)
ylabel('Relative Abweichung in %','FontSize',12);
legend('Relative Abweichung vom Mittelwert',...
       'Relative Abweichung des Mittelwerts vom Datenblattwert',...
       'Location','NorthEast');
grid on;

figure(2);
[hAx,hLine1,hLine2] = plotyy(t(ai:ei),Uq_filt,t(ai:ei),Iq_filt);
xlim(hAx(1), [0.246 0.254]);
xlim(hAx(2), [0.246 0.254]);
set(hAx(1), 'YTick', [-20:2:20]);
set(hAx(2), 'YTick', [-4:.5:4]);
title(['Spannung und Strom - q-Komponente (gefiltert) - Position ',...
      num2str(positions(ind))],'FontSize',12)
xlabel('Zeit in s','FontSize',12)
h1=ylabel(hAx(1),'Spannung in Volt','FontSize',12);
h2=ylabel(hAx(2),'Strom in Ampere','FontSize',12);
grid on;
set(hLine2, 'LineWidth',2);

%Absolutbetrag der FFT wird über der Frequenz aufgetragen und die Amplitude
%skaliert
figure(3);
[hAx,hLine1,hLine2] = plotyy(frequenzen_fft, (abs(Ud_fft(1:NFFT/2))*2)/NFFT...
                             ,frequenzen_fft, (abs(Id_fft(1:NFFT/2))*2)/NFFT);
ymin=0;
ymax=6;
axis(hAx(1), [590 610 ymin ymax]);
axis(hAx(2), [590 610 ymin ymax]);
set(hAx(1), 'YTick', [ymin:0.5:ymax]);
set(hAx(2), 'YTick', [ymin:0.5:ymax]);
title(['FFT von Spannung und Strom - d-Komponente - Signalfrequenz: ',...
      num2str(f_anreg) ' Hz'])
xlabel('Frequenz in Hz')
ylabel(hAx(1),'Spannung in Volt')
ylabel(hAx(2),'Strom in Ampere')
grid on;
zoom on;

figure(4);
[hAx,hLine1,hLine2] = plotyy(frequenzen_fft, (abs(Uq_fft(1:NFFT/2))*2)/NFFT...
                             ,frequenzen_fft, (abs(Iq_fft(1:NFFT/2))*2)/NFFT);
axis(hAx(1), [590 610 ymin ymax]);
axis(hAx(2), [590 610 ymin ymax]);
set(hAx(1), 'YTick', [ymin:0.5:ymax]);
set(hAx(2), 'YTick', [ymin:0.5:ymax]);
title(['FFT von Spannung und Strom - q-Komponente - Signalfrequenz: ',...
      num2str(f_anreg) ' Hz'],'FontSize',12)
xlabel('Frequenz in Hz','FontSize',12)
h1=ylabel(hAx(1),'Spannung in Volt','FontSize',12);
h2=ylabel(hAx(2),'Strom in Ampere','FontSize',12);
grid on;
zoom on;
set(hLine1, 'LineWidth',2);
set(hLine2, 'LineWidth',2);

%Ausgabe der Rotorlage während der Messung
mw_ds= load('Messdaten\dspace\iq\150916_daten_dspace_pos43.mat');
temp = fieldnames(mw_ds);

```

```

mw_dspace_iq = getfield(mw_ds, temp{1});

ai=1;

figure(5);
plot(mw_dspace_iq.zeitbasis_dspace(ai:end),mw_dspace_iq.phimech(ai:end)*180/pi)
;
grid on;
title('Rotorlage über der Zei; I_q = 2.4A, f=600Hz','FontSize',12);
ylabel('deg^M','FontSize',12);
xlabel('Zeit in Sekunden','FontSize',12);
ylim([43.23 43.331]);
mean(mw_dspace_iq.phimech(ai:end)*180/pi)

```

**Listing 9: Matlab-Skript zum Vergleich der Versuche der Induktivitätsbestimmung,
aw_indukt_vergleich_150916**

```

% 16.09.2015, H. Gruebler
% MA Gruebler - Zusammenfuehrung der Auswertungen der Versuche zur
% Induktivitaetsbestimmung
%
% Zur Induktivitaetsbestimmung wurden 4 Versuche mit jeweils
% unterschiedlicher Frequenz durchgefuehrt. Die Auswertung dieser 4
% Versuche erfolgte jeweils durch ein Auswerteskript, welches direkt einem
% Versuchsordner zugeordnet ist.
% Um nun einen einfachen Vergleich der unterschiedlichen Versuche zu
% ermoeeglichen, wurden die Werte von Ld und Lq jedes einzelnen Versuchs vom
% jeweiligen Workspace in den Ordner "Versuchsdaten" im gegenwaertigen
% Verzeichnis exportiert.
% Im wesentlichen werden die Daten mit diesem Skript eingelesen, die
% relative Abweichung zu Datenblattwert und Mittelwert des jeweiligen
% Versuchs berechnet und die Ergebnisse als Diagramm dargestellt.

%clean-up von Workspace und Konsole
clc;
close all;
clear all;

%Ablage der untersuchten Frequenzen zur spaeteren Verwendung als x-Achse in
%den Diagrammen
frequenzen = [75 150 300 600];

%Angabe von Pfad und Dateinamen
fnames={'Versuchsdaten\Ld_mean_75Hz.mat'; ...
        'Versuchsdaten\Lq_mean_75Hz.mat'; ...
        'Versuchsdaten\Ld_mean_150Hz.mat'; ...
        'Versuchsdaten\Lq_mean_150Hz.mat'; ...
        'Versuchsdaten\Ld_mean_300Hz.mat'; ...
        'Versuchsdaten\Lq_mean_300Hz.mat'; ...
        'Versuchsdaten\Ld_mean_600Hz.mat'; ...
        'Versuchsdaten\Lq_mean_600Hz.mat'};

%Speicherplatz fuer die einzulesenden Daten reservieren
Ld_mean = [];
Lq_mean = [];

for ind=1:8

    fname = char(fnames(ind));
    temp = load(fname);

    if(mod(ind,2) == 0)
        Lq_mean = [Lq_mean temp.Lq_mean];
    else
        Ld_mean = [Ld_mean temp.Ld_mean];
    end
end

end

```

```

%Mittlung ueber alle Versuche
Ld_mean_versuche = mean(Ld_mean)
Lq_mean_versuche = mean(Lq_mean)
%Wert von Ld und Lq lt. Datenblatt: 1.1mH, siehe [4]
Ld_dat = 1.1e-3;
Lq_dat = 1.1e-3;
%Relative Abweichungen berechnen
Ld_rel = ((Ld_mean - Ld_dat) / Ld_dat) * 100;
Lq_rel = ((Lq_mean - Lq_dat) / Lq_dat) * 100;
Ld_mean_rel = ((Ld_mean_versuche - Ld_dat) / Ld_dat) * 100;
Lq_mean_rel = ((Lq_mean_versuche - Lq_dat) / Lq_dat) * 100;
Ld_rel_mean = ((Ld_mean - Ld_mean_versuche) / Ld_mean_versuche) * 100;
Lq_rel_mean = ((Lq_mean - Lq_mean_versuche) / Lq_mean_versuche) * 100;

%plots der Ergebnisse
figure(1)
hold on;
plot(frequenzen, Ld_rel, '-o', 'LineWidth',2);
plot(frequenzen, Ld_mean_rel*ones(1,4), '--k', 'LineWidth',2);
hold off;
grid on;
title('Relative Abweichung vom Datenblattwert, L_d','FontSize',12);
ylabel('Relative Abweichung in %','FontSize',12);
xlabel('Frequenzen der Versuche in Hz','FontSize',12);
legend('Relative Abweichung der einzelnen Versuche','Mittelwert der relativen
Abweichungen','Location','West');
ylim([1 5.5]);

figure(2)
hold on;
plot(frequenzen, Lq_rel, '-o', 'LineWidth',2);
plot(frequenzen, Lq_mean_rel*ones(1,4), '--k', 'LineWidth',2);
hold off;
grid on;
title('Relative Abweichung vom Datenblattwert, L_q','FontSize',12);
ylabel('Relative Abweichung in %','FontSize',12);
xlabel('Frequenzen der Versuche in Hz','FontSize',12);
legend('Relative Abweichung der einzelnen Versuche','Mittelwert der relativen
Abweichungen','Datenblattwert','Location','Best');
ylim([1 5.5]);

```

Code zu Kapitel 0

9.6.5 Analyse des mechanischen Systems

Listing 10: Matlab-Skript zur Erstellung des Diagramms des Auslaufversuchs, aw_auslauf_140903

```

% 03.09.2014, H. Gruebler
% MA Gruebler - Auswertung des Auslaufversuchs
%
% Messdaten:
% *****
% Die Daten des Auslaufversuchs wurden mittels dSpace-System aufgezeichnet.

%clean-up von Workspace und Konsole
clc;
close all;
clear all;

% dSpace Daten laden
mw=load('20140903_auslauf.mat');
t = mw.auslauf.X.Data;
n = mw.auslauf.Y(5).Data;
m = mw.auslauf.Y(9).Data;
pos = mw.auslauf.Y(10).Data;

figure(1);

```

```

[hAx,hLine1,hLine2] = plotyy(t,n,t,m);
title('Drehzahl und Drehmoment beim Auslaufversuch','FontSize',12);
xlabel('Zeit in s','FontSize',12);
ylabel(hAx(1),'Drehzahl in rpm','FontSize',12) % left y-axis
ylabel(hAx(2),'Drehmoment in Nm','FontSize',12) % right y-axis
legend('Drehzahl','Drehmoment');
grid on;
zoom on;
set(hLine1, 'LineWidth',2);

figure(2);
plot(n, m);
title('Drehmoment über Drehzahl');
xlabel('Drehzahl in rpm');
ylabel('Drehmoment in Nm');
grid on;
zoom on;

```

**Listing 11: Auswertung: Momentstoß klein,
aw_feig_150304**

```

% 04.03.2015, H. Gruebler
% MA Gruebler - Mech.-System-Parameter
close all;
clear all;
clc;

fname='150304_daten_eigenfrequ_iq1_t001';

% dSpace Messung
mw=load(fname);
hilf=fieldnames(mw);
mw=getfield(mw,hilf{1});

% Messgroessen:
iq = mw.Y(1).Data;
phi = mw.Y(7).Data;
m = mw.Y(6).Data;
t=mw.X.Data';

% Offsetbefreiung des Winkels
phi=phi-mean(phi);

% Rauschen auf dem Stromkanal wird ausgeblendet
ai=min(find(t>=-.0118));
ei=min(find(t>=.0108));
iq = [zeros(1,length(iq(1:ai-1))) iq(ai:ei) zeros(1,length(iq(ei+1:end)))]];

%gesamter Verlauf
figure(1);
[hAx,hLine1,hLine2] = plotyy(t,phi*180/pi,t,iq);
title('Auspendeln des Rotors nach kleinem Momentstoß','FontSize',12)
xlabel('Zeit in s','FontSize',12)
ylabel(hAx(1),'deg^M','FontSize',12)
ylabel(hAx(2),'I_q (ASM) in Ampere','FontSize',12)
grid on;
zoom on;
set(hLine1,'LineWidth',2);

```

**Listing 12: Auswertung: Momentstoß groß,
aw_mpuls.m**

```

% 25.2.2015, R. Seebacher, H. Gruebler
% MA Gruebler - Mech.-System-Parameter
%
fnames={'psi02_isq10_2pulse';'psi02_isq20_2pulse';'psi02_isq30_pulse';...
        'psi02_isq30_2pulse'}; % Messwertdateien

wahl=4;
fname=fnames{wahl};

```

```

% dSpace Messung
mw=load(fname);
hilf=fieldnames(mw);
mw=getfield(mw,hilf{1});

% Messgroessen:
isd=mw.Y(1).Data';
isq=mw.Y(2).Data';

isds=mw.Y(3).Data';
isqs=mw.Y(4).Data';

uka=mw.Y(5).Data';
ukb=mw.Y(6).Data';
ukc=mw.Y(7).Data';

ia=mw.Y(8).Data';
ib=mw.Y(9).Data';
ic=mw.Y(10).Data';

m=mw.Y(11).Data';
n=mw.Y(12).Data';

t=mw.X.Data';

% Darstellung der Drehmomentschwingung
figure(1);
[hAx,hLine1,hLine2] = plotyy(t,m,t,isq);
title('Bestimmung der Eigenfrequenz','FontSize',12)
xlabel('Zeit in s','FontSize',12)
ylabel(hAx(1),'Drehmoment in Nm','FontSize',12)
set(hAx(1),'YTick',-20:5:20)
ylabel(hAx(2),'I_q (ASM) in Ampere','FontSize',12)
set(hAx(2),'YTick',-40:5:40)
grid on;
zoom on;
set(hLine1,'LineWidth',2);

```

9.6.6 Code zu Kapitel 5.3 Exzentrizität des Rotors

Listing 13: Matlab-Skript zur Abschätzung der Exzentrizität der Versuchsmaschine, aw_fms_ind_150416.m

```

% 16.04.2015, H. Gruebler
% MA Gruebler - Skript zur Exzentrizitaetsbestimmung
%
% Fuer die Einstellungen, bzw. Anmerkungen im log-file
% (150416_log_fms.txt) und konfig-file fuer das N5000
% (150324_N5000konf_fms.txt) bietet dieses Skript ein standardtisierte
% Moeglichkeit, die Exzentrizitaet des Rotors der Versuchsmaschine zu
% ermitteln.
% Die Datei "150324_daten_fms_ind_n2000_zentr_vgl" im Ordner Messdaten
% stellt einen Zustand sehr guter Ausrichtung der PMSM dar, und sollte als
% Vergleichsbasis stets mitausgewertet werden.
% ACHTUNG: Die Struktur der Dateinamen sollte wie in diesem Beispielskript
% belassen werden (v.a. die Laenge), da beim Erstellen der Diagramme auf
% Teile des Strings des Dateinamens zugegriffen wird.

%clean-up von Konsole und Workspace
clc;
close all;
clear all;

%min. & max. Luftspaltbreite in V
ls_min = 1.4; %V
ls_max = 1; %V

%x-Achsenbeschriftung: bar-plots
xbar = {'y_pos_1', 'x_neg', 'y_neg_1', 'y_pos_2', 'x_pos', 'y_neg_2'};

```

```

%Einlesen der Messdaten
fnames={'Messdaten\150416_daten_fms_ind_n2000_zentr_vgl'; ...
        'Messdaten\150324_daten_fms_ind_n2000_x_neg'};

%Einlesen und Auswerten der Messdaten
for index = 1:length(fnames)
    fname = char(fnames(index));
    % Ablage der Daten in den Messwertdateien:
    %   y_pos_1 y_pos_2 y_neg_2 y_neg_1   x_pos   x_neg
    % t "VOLT1","VOLT2","VOLT3","VOLT4","VOLT5","VOLT6"
    mw=mwgeigl(pwd,fname);
    t=mw(:,1);
    y_pos_1 = mw(:,2);
    y_pos_2 = mw(:,3);
    y_neg_2 = mw(:,4);
    y_neg_1 = mw(:,5);
    x_pos = mw(:,6);
    x_neg = mw(:,7);

    % Berechnung des Gesamteffektivwerts, zugleich: Ausgabe dieser Werte
    % auf die Konsole
    Y_pos_1 = sqrt(mean(y_pos_1 .^2))
    Y_pos_2 = sqrt(mean(y_pos_2 .^2))
    Y_neg_1 = sqrt(mean(y_neg_1 .^2))
    Y_neg_2 = sqrt(mean(y_neg_2 .^2))
    X_pos = sqrt(mean(x_pos .^2))
    X_neg = sqrt(mean(x_neg .^2))

    % Darstellung der Messdaten als Balkendiagramme
    figure(index)
    hold on;
    plot([0 7], [ls_max ls_max], '-g','LineWidth',3);
    bar([Y_pos_1, X_neg, Y_neg_1, Y_pos_2, X_pos, Y_neg_2]);
    plot([0 7], [ls_min ls_min], '-r','LineWidth',3);
    hold off;
    temp=title(['Position: ' fname(38:42)','Gesamteffektivwerte'], ...
              'FontSize',12);
    ylim([.8 1.41]);
    ylabel('Spannung in V','FontSize',12);
    legend('max. Luftspalt','aktuell','min. Luftspalt','Location','Northeast');
    set(temp,'Interpreter','none');
    set(gca,'XTickLabel',xbar, 'XTick',1:numel(xbar));
    set(gca,'FontSize',12);
    grid on;
end

```

9.6.7 Code zu Kapitel 6 Maschinencharakteristik aus dem Rastmomentverlauf

Listing 14: Berechnung der Fourierkoeffizienten eines Signals einer Periodendauer ungleich 2π , `fouriercoeffs_sub.m`

```

%% 06.07.2015, H. Gruebler
%   MA Gruebler - Berechnung der Fourierkoeffizienten eines uebergegebenen
% Signals
%
% Es handelt sich bei dieser Funktion um eine allgemeine Version zur
% Berechnung von Fourierkoeffizient, d.h. es koennen auch Signale mit einer
% Periode != 2*pi berechnet werden.
%
% Aufruf:
%   [a0 ck]=fouriercoeffs(anz_os, x_werte_signal, y_werte_signal)
%   anz_os...Anzahl der Ordnungen,
%           die man berechnet haben moechte
%   x_werte_signal...x-Werte des Signals
%   y_werte_signal...y-Werte des Signals
%
%   a0...Gleichanteil des Signals
%   ck...komplexe Fourierkoeffizienten

```

```

function [a0 ck_cum] = fouriercoeffs_sub(anz_os, x_werte_signal,
y_werte_signal)

    signal_period_length = max(x_werte_signal)-min(x_werte_signal);

    a0 = ...
        1/signal_period_length ...
        * trapz(      x_werte_signal, ...
                  y_werte_signal);

    ck_cum = [];

    % lineare Abbildung von x_werte_signal auf das Intervall [0 2*pi]
    hilf=(x_werte_signal-x_werte_signal(1))/signal_period_length*2*pi;

    for k = 1:anz_os
        ck_cum = [ck_cum 2/signal_period_length ...
                 * trapz(x_werte_signal, ...
                         y_werte_signal.*exp(-j*k*hilf))];
    end
end
end

```

**Listing 15: Auswertung des Versuchs mit langsamer Umdrehung,
aw_rastm_150815**

```

% 15.08.2015, H. Gruebler
% MA Gruebler - Ermittlung des Rastmoments anhand langsamer Umdrehung
%
% Dieses Skript wertet den Versuch der langsamen Umdrehung fuer die
% Ermittlung des Rastmomentverlaufs aus.
% Es findet eine Anpassung der Messdaten der beiden Messsysteme statt,
% danach werden die Fourierkoeffizienten des Signals berechnet und die
% Ergebnisse in Diagrammform dargestellt.
close all;
clear all;
clc;

fnames_n5000 = {'Messdaten\Messung01\150815_n5000_dphi5_pos'};
fnames_dspace = {'Messdaten\Messung01\150815_dspace_dphi5_pos'};

wahl = 1;

mw=mwgeigl(pwd,fnames_n5000{wahl});

% Messgroessen:
t_n5000 = mw(:,1);
trig_n5000 = mw(:,2);
m = mw(:,3);

mw_ds = load(fnames_dspace{wahl});
temp = fieldnames(mw_ds);
mw_dspace = getfield(mw_ds, temp{1});

t_dspace = mw_dspace.X.Data;
trig_dspace = mw_dspace.Y(2).Data;
phimech = mw_dspace.Y(1).Data;

%Unterschied in der Zeitbasis zw. N5000 und dSpace ausgleichen
tdfaktor=0.99998468; % 1, Faktor f"ur die Zeittransformation
% t_N5000=t_dSpace*tdfaktor siehe dazu
%
U:\share\hg\Messungen\m150710\aw_tkorr_v2.m
% dieser Faktor wurde dort als
% Mittelwert "uber die Versuche 100,
% 200, 500 und 1000 Hz
% mit der Einstellung fflag=2
% (lineare Transformation) bestimmt

t_dspace = t_dspace * tdfaktor;

```

```

%Pre-Trigger-Delay ausgleichen
t_dspace = t_dspace + 0.01;

%Anzahl der Datenpunkte der dSpace-Signale mittels "interp1" auf
%die Samplingrate des N5000 anpassen
phimech_resampled = interp1(t_dspace,unwrap(phimech),t_n5000,'linear');
trig_dspace_resampled = interp1(t_dspace,trig_dspace,t_n5000,'spline');

%Messung der Phasenverschiebung zwischen den beiden Triggersignalen
%mittels Kreuzkorrelation -> xcorr()
[correlation_trigger, lags_trig] = xcorr(trig_n5000,trig_dspace_resampled);

[maximum_correlation, index_max_correlation] = max(correlation_trigger);
phasenversch_ind = abs(lags_trig(index_max_correlation));
%Berechnung des Start- (dSpace), bzw. Endpunkts (N5000)
%N5000 ist in der Aufzeichnung immer nacheilend
start_dspace = phasenversch_ind;
ende_n5000 = length(t_n5000)-phasenversch_ind+1;

t_n5000 = t_n5000(1:ende_n5000);
trig_n5000 = trig_n5000(1:ende_n5000);
m = m(1:ende_n5000);
trig_dspace_resampled = trig_dspace_resampled(start_dspace:end);
phimech_resampled = phimech_resampled(start_dspace:end);

%Berechnung der Fourierkoeffizienten
%Indizes graphisch ermittelt
ai = 2397;
ei = 149847;
[ao ck_cum]=fouriercoeffs(360,phimech_resampled(ai:ei),m(ai:ei));

%Darstellung der Ergebnisse
%Verlauf des Rastmoments ueber dem Winkel
figure(1)
plot((phimech_resampled-2*pi)*180/pi,m-mean(m))
grid on;

%Amplitudenspektrum
figure(2)
semilogy(abs(ck_cum)/max(abs(ck_cum)));
grid on

```

**Listing 16: Einlesen der Rohdaten aus dem Ditheringversuch,
aw_rastm_150906.m**

```

% 06.09.2015, H. Gruebler
%
% Einlesen der Rohdaten aus dem Ditheringversuch
close all;
clear all;
clc;

%Pfad zu Hilfsfunktionen
path('C:\Users\h_gruebler\Dropbox\Masterarbeit\03_Messdaten\00_hilfsfkt_matlab_
java',path);

phi = [];
torque = [];

%5 Positionen am Beginn und 3 am Ende der Messung mussten verworfen werden
for data_ind = 5:3597

    fname = ['150908_rastm_dither_n5000_' num2str(data_ind)];

    %aufgrund der Groesse der Rohdaten (~3GB), sind diese lokal am
    %Institutsrechner abgespeichert
    mw=mwgeigl('D:\Gruebler\150908_dithering_messdaten\n5000',fname);

    % Messgrößen:
    t_n5000 = mw(:,1);

```

```

    trig_n5000 = mw(:,2);
    m_n5000 = mw(:,3);

    mw_ds =
load(['D:\Gruebler\150908_dithering_messdaten\dspace\150908_rastm_dither_dspace
_'...
        num2str(data_ind) '.mat']);
    temp = fieldnames(mw_ds);
    mw_dspace = getfield(mw_ds, temp{1});

    t_dspace = mw_dspace.zeitbasis_dspace;
    trig_dspace = mw_dspace.trigger_dspace;
    phimech = mw_dspace.phimech_dspace;

    phi = [phi mean(phimech)];
    torque = [torque mean(m_n5000)];
end

figure(1)
plot(phi, torque)
grid on;

```

**Listing 17: Auswertung der gemittelten Daten aus dem Ditheringversuch,
aw_rastm_150910.m**

```

% 10.09.2015 H. Gruebler
% MA Gruebler - Auswertung der separat eingelesenen und gemittelten Daten
% aus dem Ditheringversuch
%
close all;
clear all;
clc;

%Pfad zu Hilfsfunktionen
path('C:\Users\h_gruebler\Dropbox\Masterarbeit\03_Messdaten\00_hilfsfkt_matlab_
java',path);

%gemitteltes Drehmoment und gemittelten Winkel laden
load([pwd '\Messdaten\150908_rastm_dither_ampl_0_1_phi.mat']);
load([pwd '\Messdaten\150908_rastm_dither_ampl_0_1_torque.mat']);

[a0 ck_cum] = fouriercoeffs(198, phi', torque');

figure(1)
semilogy(abs(ck_cum)/max(abs(ck_cum)), 'LineWidth', 2);
grid on;
title('Fourieranalyse eines Rastmomentverlaufs "ber 2\pi mech.');
xlabel('Ordnungen mechanisch');
ylabel('Amplitude in p.u. (Bezug Maximalwert)');
h=get(gca, 'Title');
set(h, 'FontSize', 12);
h=get(gca, 'XLabel');
set(h, 'FontSize', 12);
h=get(gca, 'YLabel');
set(h, 'FontSize', 12);

figure(2)
plot(phi*180/pi, torque, 'LineWidth', 2);
grid on;
title('Rastmomentverlauf "ber 2\pi mech.');
xlabel('deg^M');
ylabel('Drehmoment in Nm');
h=get(gca, 'Title');
set(h, 'FontSize', 12);
h=get(gca, 'XLabel');
set(h, 'FontSize', 12);
h=get(gca, 'YLabel');
set(h, 'FontSize', 12);

```

Listing 18: Auswertung und Darstellung der FEM-Daten, fem_daten_rastm_151012.m

```

% 12.10.2015, H. Gruebler, bzw. M. Mohr
% MA Gruebler - Auswertung der FEM-Daten fuer das Rastmoment

clc;
clear all;
close all;
%Pfad zu Hilfsfunktionen
path('C:\Users\h_gruebler\Dropbox\Masterarbeit\03_Messdaten\00_hilfsfkt_matlab_
java',path);
%
% read raw data
load ./Id.dat;
load ./Iq.dat;
load ./IU.dat;
load ./IV.dat;
load ./IW.dat;
load ./RotorPosition.dat;
load ./PsiPhaseU.dat;
load ./PsiPhaseV.dat;
load ./PsiPhaseW.dat;
load ./TorqRotVirt.dat;

%%
%%Current
Id=reshape(Id,[61,9,11]);
Iq=reshape(Iq,[61,9,11]);
%%
%
% TORQUE EVALUATION
%
%% Torque
% [rotpos,id,iq]
TorqRotVirt=reshape(TorqRotVirt,[61,9,11]);
% force periodicity
TorqRotVirt(61,:,:)=TorqRotVirt(1,:,:);
%%
%
% FLUXLINKAGE EVALUATION
%
%% phase flux linkages
nmp=6;
Nwdg=48;

PsiPhaseU = reshape(PsiPhaseU,[61,9,11,6]);
PsiPhaseV = reshape(PsiPhaseV,[61,9,11,6]);
PsiPhaseW = reshape(PsiPhaseW,[61,9,11,6]);
PsiPhaseU=squeeze(sum(PsiPhaseU,4))*Nwdg/nmp;
PsiPhaseV=squeeze(sum(PsiPhaseV,4))*Nwdg/nmp;
PsiPhaseW=squeeze(sum(PsiPhaseW,4))*Nwdg/nmp;
% complete to 360degE
PsiU = [PsiPhaseU(1:60,:,:);-PsiPhaseV(1:60,:,:);PsiPhaseW(1:60,:,:);...
        -PsiPhaseU(1:60,:,:);PsiPhaseV(1:60,:,:);-PsiPhaseW(1:60,:,:);...
        PsiPhaseU(1,:,:)];
PsiV = [PsiPhaseV(1:60,:,:);-PsiPhaseW(1:60,:,:);PsiPhaseU(1:60,:,:);...
        -PsiPhaseV(1:60,:,:);PsiPhaseW(1:60,:,:);-PsiPhaseU(1:60,:,:);...
        PsiPhaseV(1,:,:)];
PsiW = [PsiPhaseW(1:60,:,:);-PsiPhaseU(1:60,:,:);PsiPhaseV(1:60,:,:);...
        -PsiPhaseW(1:60,:,:);PsiPhaseU(1:60,:,:);-PsiPhaseV(1:60,:,:);...
        PsiPhaseW(1,:,:)];

%Indizes fuer die Leerlaufsimulationen (Id=0, Iq=0)
idx1=6;
idx2=5;

%Skalierung von 1m Rotorlänge auf die tatsächliche Länge von 50mm
scale_fac = .05;

%Torque auf eine ganze mech. Umdrehung aufdehnen, sodass ein Vergleich mit

```

```

%der Messung stattfinden kann
torque_mech = [];

for i=1:35
    temp_torque = squeeze(TorqRotVirt(:,idx2,idx1));
    torque_mech = [torque_mech temp_torque(1:end-1)'];
end
torque_mech = [torque_mech temp_torque(1:end)'];

torque_mech = torque_mech .* scale_fac;

phi=0:360/2160:360;

figure(100)
plot(phi,torque_mech);
grid on;

[a0 ck] = fouriercoeffs_sub(198,phi',torque_mech');

figure(101)
semilogy(abs(ck)/max(abs(ck)));
grid on;

```

9.6.8 Code zu Kapitel 7 Maschinencharakteristik aus der Flussverkettung im Leerlauf

Listing 19: Einlesen der Messdaten, aw_flussverk_150906

```

%06.09.2015, H. Gruebler
% MA Gruebler - Einlesen der Messdaten fuer den Versuch "Flussverkettung
% im Leelauf"

clc;
close all;
clear all;

%Pfad zu Hilfsfunktionen
path('C:\Users\h_gruebler\Dropbox\Masterarbeit\03_Messdaten\00_hilfsfkt_matlab_java',path
);

%Container fuer alle Messdaten und Auswertungen je Spule
master_container = SpulenAuswertungContainer();
obj = master_container.spulen_container;
%% Dateinamen der Messungen
%Pfad und Datum
pfad_datum = '150906';
fnames_n5000={ ['Messdaten\Messung01\' pfad_datum '_daten_spg_n5000_n2000pos_m1']; ...
['Messdaten\Messung01\' pfad_datum '_daten_spg_n5000_n2000neg_m1']; ...
['Messdaten\Messung01\' pfad_datum '_daten_spg_n5000_n240pos_m1']; ...
['Messdaten\Messung01\' pfad_datum '_daten_spg_n5000_n240neg_m1']; ...
['Messdaten\Messung02\' pfad_datum '_daten_spg_n5000_n2000pos_m2']; ...
['Messdaten\Messung02\' pfad_datum '_daten_spg_n5000_n2000neg_m2']; ...
['Messdaten\Messung02\' pfad_datum '_daten_spg_n5000_n240pos_m2']; ...
['Messdaten\Messung02\' pfad_datum '_daten_spg_n5000_n240neg_m2']; ...
['Messdaten\Messung03\' pfad_datum '_daten_spg_n5000_n2000pos_m3']; ...
['Messdaten\Messung03\' pfad_datum '_daten_spg_n5000_n2000neg_m3']; ...
['Messdaten\Messung03\' pfad_datum '_daten_spg_n5000_n240pos_m3']; ...
['Messdaten\Messung03\' pfad_datum '_daten_spg_n5000_n240neg_m3']; ...
['Messdaten\Messung04\' pfad_datum '_daten_spg_n5000_n2000pos_m4']; ...
['Messdaten\Messung04\' pfad_datum '_daten_spg_n5000_n2000neg_m4']; ...
['Messdaten\Messung04\' pfad_datum '_daten_spg_n5000_n240pos_m4']; ...
['Messdaten\Messung04\' pfad_datum '_daten_spg_n5000_n240neg_m4']; ...
['Messdaten\Messung05\' pfad_datum '_daten_spg_n5000_n2000pos_m5']; ...
['Messdaten\Messung05\' pfad_datum '_daten_spg_n5000_n2000neg_m5']; ...
['Messdaten\Messung05\' pfad_datum '_daten_spg_n5000_n240pos_m5']; ...
['Messdaten\Messung05\' pfad_datum '_daten_spg_n5000_n240neg_m5'];
};

fnames_dSpace={ ['Messdaten\Messung01\' pfad_datum '_daten_lage_dspace_n2000pos_m1.mat'];
...
['Messdaten\Messung01\' pfad_datum '_daten_lage_dspace_n2000neg_m1.mat'];
...
['Messdaten\Messung01\' pfad_datum '_daten_lage_dspace_n240pos_m1.mat'];
...

```

```

        ['Messdaten\Messung01\' pfad_datum '_daten_lage_dspace_n240neg_m1.mat'];
...
        ['Messdaten\Messung02\' pfad_datum '_daten_lage_dspace_n2000pos_m2.mat'];
...
        ['Messdaten\Messung02\' pfad_datum '_daten_lage_dspace_n2000neg_m2.mat'];
...
        ['Messdaten\Messung02\' pfad_datum '_daten_lage_dspace_n240pos_m2.mat'];
...
        ['Messdaten\Messung02\' pfad_datum '_daten_lage_dspace_n240neg_m2.mat'];
...
        ['Messdaten\Messung03\' pfad_datum '_daten_lage_dspace_n2000pos_m3.mat'];
...
        ['Messdaten\Messung03\' pfad_datum '_daten_lage_dspace_n2000neg_m3.mat'];
...
        ['Messdaten\Messung03\' pfad_datum '_daten_lage_dspace_n240pos_m3.mat'];
...
        ['Messdaten\Messung03\' pfad_datum '_daten_lage_dspace_n240neg_m3.mat'];
...
        ['Messdaten\Messung04\' pfad_datum '_daten_lage_dspace_n2000pos_m4.mat'];
...
        ['Messdaten\Messung04\' pfad_datum '_daten_lage_dspace_n2000neg_m4.mat'];
...
        ['Messdaten\Messung04\' pfad_datum '_daten_lage_dspace_n240pos_m4.mat'];
...
        ['Messdaten\Messung04\' pfad_datum '_daten_lage_dspace_n240neg_m4.mat'];
...
        ['Messdaten\Messung05\' pfad_datum '_daten_lage_dspace_n2000pos_m5.mat'];
...
        ['Messdaten\Messung05\' pfad_datum '_daten_lage_dspace_n2000neg_m5.mat'];
...
        ['Messdaten\Messung05\' pfad_datum '_daten_lage_dspace_n240pos_m5.mat'];
...
        ['Messdaten\Messung05\' pfad_datum '_daten_lage_dspace_n240neg_m5.mat']
    };

spulennamen = { {'FMS50' 'STS18' 'FMS51' 'STS01' 'FMS52' 'STS02' 'STS03' 'STS04'};
                {'FMS50' 'STS18' 'STS05' 'FMS53' 'STS06' 'STS07' 'STS08'};
                {'FMS50' 'STS18' 'FMS59' 'STS09' 'FMS58' 'STS10' 'FMS57' 'STS11'
                'STS12'};
                {'FMS50' 'STS18' 'STS13' 'STS14' 'FMS60' 'STS15' 'STS16'};
                {'FMS50' 'STS18' 'STS17'}};

%% Einlesen der Daten und Erstellen der Objekte
for index = 1:20
    %N5000-Daten einlesen
    n5000_pfad = char(fnames_n5000(index));
    fname = n5000_pfad;
    mw_n5000 = mwgeigl(pwd,fname);

    % dSpace Daten laden
    mw_ds = load(char(fnames_dSpace(index)));
    temp = fieldnames(mw_ds);
    mw_dspace = getfield(mw_ds, temp{1});

    %Bestimmung der Drehrichtung
    if(mod(index,2) == 0)
        drehrichtung = 'neg';
    else
        drehrichtung = 'pos';
    end

    %Bestimmung der Drehzahl
    if(str2num(n5000_pfad(45:48)) == 2000)
        drehzahl = 2000;
    else
        drehzahl = 240;
    end

    %Messung01
    if(index <= 4)
        %Spulenobjekte erzeugen und direkt in den Container speichern
        %messung_nr -> Zeile im Spulennamen-Array
        %spalten_offs -> Beginn der Spannungssignale in N5000-Messwertedatei
        messung_nr = 1;
        spalten_offs = 3;
        for count = 1:length(spulennamen(messung_nr,1))
            master_container.addSpule(SpuleAuswertung(
            char(spulennamen(messung_nr,1)(count)), drehzahl, ...
            drehrichtung, messung_nr, ...

```

```

%Triggersignal N5000
...%Triggersignal dSpace
N5000
%Zeitbasis dSpace
dSpace
%Spannungssignal N5000
end
%Messung02
elseif(index > 4 && index <= 8)
messung_nr = 2;
for count = 1:length(spulennamen{messung_nr,1})
master_container.addSpule(SpuleAuswertung(
char(spulennamen{messung_nr,1}(count)), drehzahl, ...
drehrichtung, messung_nr, ...
mw_n5000(:,2), ...
mw_dspace.trigger_dspace,
mw_n5000(:,1), ... %Zeitbasis
mw_dspace.zeitbasis_dspace, ...
mw_dspace.phimech_dspace, ...%phimech
mw_n5000(:,count+spalten_offs)));

%Triggersignal N5000
...%Triggersignal dSpace
N5000
%Zeitbasis dSpace
dSpace
%Spannungssignal N5000
end
%Messung03
elseif(index > 8 && index <= 12)
messung_nr = 3;
for count = 1:length(spulennamen{messung_nr,1})
master_container.addSpule(SpuleAuswertung(
char(spulennamen{messung_nr,1}(count)), drehzahl, ...
drehrichtung, messung_nr, ...
mw_n5000(:,2), ...
mw_dspace.trigger_dspace,
mw_n5000(:,1), ... %Zeitbasis
mw_dspace.zeitbasis_dspace, ...
mw_dspace.phimech_dspace, ...%phimech
mw_n5000(:,count+spalten_offs)));

%Triggersignal N5000
...%Triggersignal dSpace
N5000
%Zeitbasis dSpace
dSpace
%Spannungssignal N5000
end
%Messung04
elseif(index > 12 && index <= 16)
messung_nr = 4;
for count = 1:length(spulennamen{messung_nr,1})
master_container.addSpule(SpuleAuswertung(
char(spulennamen{messung_nr,1}(count)), drehzahl, ...
drehrichtung, messung_nr, ...
mw_n5000(:,2), ...
mw_dspace.trigger_dspace,
mw_n5000(:,1), ... %Zeitbasis
mw_dspace.zeitbasis_dspace, ...
mw_dspace.phimech_dspace, ...%phimech
mw_n5000(:,count+spalten_offs)));

%Triggersignal N5000
...%Triggersignal dSpace
N5000
%Zeitbasis dSpace
dSpace
%Spannungssignal N5000
end
%Messung05
else
messung_nr = 5;
for count = 1:length(spulennamen{messung_nr,1})

```

```

        master_container.addSpule(SpuleAuswertung(
char(spulennamen{messung_nr,1}(count)), drehzahl, ...
                                drehrichtung, messung_nr, ...
                                mw_n5000(:,2), ...

%Triggersignal N5000
                                mw_dspace.trigger_dspace,
...%Triggersignal dSpace
                                mw_n5000(:,1), ...      %Zeitbasis
N5000
                                mw_dspace.zeitbasis_dspace, ...
%Zeitbasis dSpace
                                mw_dspace.phimech_dspace, ...%phimech
dSpace
                                mw_n5000(:,count+spalten_offs)));
%Spannungssignal N5000
    end
    end

end

```

Listing 20: Klasse "SpuleAuswertung"

```

%% 03.07.2015, H. Gruebler
%Die Klasse 'SpuleAuswertung' speichert die einer Spule in der Maschine
%zugehoerenden Messwerte eines Versuchs, sowie die daraus berechneten
%Parameter und einige grundlegende Eigenschaften gesammelt ab.
classdef SpuleAuswertung < handle
    properties(SetAccess = private)
        %Grundlegende Eigenschaften
        zahn_name
        drehzahl_rpm
        drehrichtung
        messung_nr
        %Messwerte
        triggersignal_N5000
        triggersignal_dSpace
        zeitbasis_N5000
        zeitbasis_dSpace
        phimech_dSpace
        spannungssignal_N5000
        %Berechnete Werte
        phimech_dSpace_unwrapped_resampled
        psi_lumdreh_struct
        psi_3umdreh_struct
        a0_fourier_lumdrehung
        ck_fourier_lumdrehung
        a0_fourier_magnete = {};
        ck_fourier_magnete = {};
        %
        temp_segment_indices
    end
    methods
        %Konstruktor
        function obj = SpuleAuswertung( zahn_name, drehzahl_rpm, ...
                                        drehrichtung, messung_nr, ...
                                        triggersignal_N5000, ...
                                        triggersignal_dSpace, ...
                                        zeitbasis_N5000, ...
                                        zeitbasis_dSpace, ...
                                        phimech_dSpace, ...
                                        spannungssignal_N5000)

            if (nargin > 0)
                %Setzen der Werte
                obj.zahn_name = zahn_name;
                obj.drehzahl_rpm = drehzahl_rpm;
                obj.drehrichtung = drehrichtung;
                obj.messung_nr = messung_nr;
                obj.triggersignal_N5000 = triggersignal_N5000;
                obj.triggersignal_dSpace = triggersignal_dSpace;
                obj.zeitbasis_N5000 = zeitbasis_N5000;
            end
        end
    end
end

```

```

obj.zeitbasis_dSpace = zeitbasis_dSpace;
obj.phimech_dSpace = phimech_dSpace;
obj.spannungssignal_N5000 = spannungssignal_N5000;
%Berechnung und setzen von Werten aus den Messergebnissen
%-----
%%Ausrichtung der Signale der beiden Messsysteme anhand der
%%Zeitbasen
[obj.zeitbasis_N5000,...
 obj.zeitbasis_dSpace,...
 deltat] = fun_ausrichten_sinus(obj.zeitbasis_N5000,...
                               obj.triggersignal_N5000,...
                               obj.zeitbasis_dSpace,...
                               obj.triggersignal_dSpace);

%% Auswertebereich gesamt
% Minimum von gemeinsamer Beobachtungszeit
tmin=max(obj.zeitbasis_N5000(1),obj.zeitbasis_dSpace(1));
% Maximum von gemeinsamer Beobachtungszeit
tmax=min(obj.zeitbasis_N5000(end),obj.zeitbasis_dSpace(end));

% Beschneidung auf untersuchbaren Bereich
% N5000 Anfangsindex für das Zeitintervall [tmin tmax]
ai=min(find(obj.zeitbasis_N5000>=tmin));
% N5000 Endindex ...
ei=max(find(obj.zeitbasis_N5000<=tmax));

% N5000 Variablen werden auf den gemeinsamen
% Beobachtungsbereich beschnitten
obj.zeitbasis_N5000=obj.zeitbasis_N5000(ai:ei);
obj.spannungssignal_N5000=obj.spannungssignal_N5000(ai:ei);

%% Upsampling der dSpace Werte
obj.resample_trg_phi();
%%Berechnung von Psi
%Berechnung für eine mechanische Umdrehung
p=6; %Polpaarzahl -> Konstante

phia=-3.5338; % °,Konstante !!!!
           % mittlere Lage (+-240 +-2000 U/min)
           % des Maximums der Grundschwingung der
           % Flussverkettung von Spule 18 (Referenz)

% rad, um phia in den Bereich [0 2*pi] zu ruecken wird
% willkuerlich eine elektrische Periode hinzugefuegt
phia=phia*pi/180+2*pi/p;

% Bereichsanfang nahe bei Psi=0 mit positiver Flanke
hipsi=-pi/2/p;

% ganze Zahl, notwendige Bedingung 1 <= interv1,
% Anfangsintervall
interv1=1;
% ganze Zahl, notwendige Bedingung 1 <= anz, Anzahl der
% 2*pi Intervalle für die psi berechnet werden soll
anz=1;

obj.psi_lumdreh_struct = ...
    fun_offset(obj.zeitbasis_N5000,...
              obj.phimech_dSpace_unwrapped_resampled,...
              obj.spannungssignal_N5000,...
              phia,...
              phipsi,...
              interv1,...
              anz);
%% Berechnung der Fourierkoeffizienten fuer eine Umdrehung
obj.calcFourierCoeffs1Round();
%% Berechnung der Fourierkoeffizienten des segmentierten
%Signals
obj.calcFourierCoeffsSegments();
%nicht mehr benoetigte Daten loeschen

```

```

        obj.triggersignal_N5000 = [];
        obj.triggersignal_dSpace = [];
        obj.zeitbasis_dSpace = [];
        obj.phimech_dSpace = [];
        obj.spannungssignal_N5000 = [];
    end
end
end
methods(Access = private)
    %Upsampling der dSpace-Messwerte
    resample_trg_phi(obj);
    %Berechnung von Psi inkl. Mittelwertbefreiung
    %fun_offset befindet sich im allgemeinen Ordner für
    %Hilfsfunktionen
    %Berechnung der Fourierkoeffizienten einer mech. Umdrehung
    %des Psi-Signals
    calcFourierCoeffs1Round(obj);
    %% Berechnung der Fourierkoeffizienten des segmentierten
    %Signals
    calcFourierCoeffsSegments(obj);
end
end
end

```

Listing 21: calcFourierCoeffs1Round()

```

%% 05.07.2015, H. Gruebler
% Die Funktion calcFourierCoeffs1Round() berechnet die Fourierkoeffizienten
% des Psi-Signals einer mechanischen Umdrehung.
function calcFourierCoeffs1Round(obj)

aktpsi = obj.psi_lumdreh_struct;
phii = obj.phimech_dSpace_unwrapped_resampled;
ck_cum = [];

for aktord=1:60
    if aktpsi.wmech<0

        ck_cum=[ck_cum 2/(aktpsi.phiende-
aktpsi.phianfang)*fun_trapz(flipud(phii(aktpsi.ai:aktpsi.ei)),flipud(aktpsi.psi
).*exp(1j*aktord*flipud(phii(aktpsi.ai:aktpsi.ei))),aktpsi.phianfang,aktpsi.phi
ende)];

    else

        ck_cum=[ck_cum 2/(aktpsi.phiende-
aktpsi.phianfang)*fun_trapz(phii(aktpsi.ai:aktpsi.ei),aktpsi.psi.*exp(1j*aktord
*phii(aktpsi.ai:aktpsi.ei)),aktpsi.phianfang,aktpsi.phiende)];
    end
end

obj.ck_fourier_lumdrehung = ck_cum;
end

```

Listing 22: calcFourierCoeffsSegments()

```

%% 05.07.2015, H. Gruebler
% Die Funktion calcFourierCoeffsSegments() berechnet die Fourierkoeffizienten
% des der einzelnen Segmente des Psi-Signals einer mechanischen Umdrehung.
function calcFourierCoeffsSegments(obj)

%Startindex für die Segmenteinteilung wurde bereits von fun_offset
%berechnet
%Indizes werden in einem Vektor abgelegt
anz_seg = 6;
aktpsi = obj.psi_lumdreh_struct;

start_ind = aktpsi.ai;
stop_ind = aktpsi.ei;
seg_ind = floor((stop_ind-start_ind)/anz_seg);

```

```

ind_vekt = start_ind:seg_ind:stop_ind;
ind_vekt_psi = 1:seg_ind:length(aktpsi.psi);

phii = obj.phimech_dSpace_unwrapped_resampled;
ck_cum = [];

for i=1:length(ind_vekt)-1
    %Daten in Segmente einteilen
    phii_seg = phii(ind_vekt(i):ind_vekt(i+1));
    psi_seg = aktpsi.psi(ind_vekt_psi(i):ind_vekt_psi(i+1));

    if aktpsi.wmech<0
        flipud(phii_seg);
        flipud(psi_seg);
        [a0
obj.ck_fourier_magnete{i,1}]=fouriercoeffs_sub(10,phii_seg,psi_seg);
    else
        [a0
obj.ck_fourier_magnete{i,1}]=fouriercoeffs_sub(10,phii_seg,psi_seg);
    end
end
end
end

```

Listing 23: Klasse "SpuleAuswertungContainer"

```

%%03.07.2015, H. Gruebler
%Die Klasse 'SpulenAuswertungContainer' nimmt die einzelnen
%'SpulenAuswertung's Objekte auf und kann Daten der Objekte gefiltert nach
%Zahn-Nr., Drehzahl, Drehrichtung, uvm. gefiltert ausgeben.
classdef SpulenAuswertungContainer < handle
    properties(SetAccess = private)
        spulen_container
    end
    methods
        %Konstruktor
        function obj = SpulenAuswertungContainer()
            end
        %haengt Spulenobjekt am Ende des Containers an
        function addSpule(obj, new_spule)
            obj.spulen_container = [obj.spulen_container new_spule];
        end
        %plottet Fourieranalysen aller 18 Spulen einer Umdrehung als "mesh"
        %notwendige Informationen: Drehzahl, Drehrichtung
        plotFourierMesh1Round(obj,drehzahl,drehrichtung);
        %plottet die gewünschten Ordnungen eines Versuchs mit STS
        plotOrdnungen1Round2D(obj,drehzahl,drehrichtung,ordnungen)
        %plottet die Fourieranalysen aller 8 FMS einer Umdrehung als "mesh"
        plotFourierMesh1RoundFMS(obj,drehzahl,drehrichtung);
        %plottet die Spektren aller STS mit dem angegebenen magn. Polpaar
        plotFourierSegmente(obj,drehzahl,drehrichtung,magn_polpaar);
        %plottet die Spektren benachbarter Spulen und vergleicht STS und
        %am Referenzzahn
        plotBenachbarte(obj);
        %plottet die Winkel einer Phase
        plotFourierAngles(obj, drehzahl, drehrichtung);
        %plottet die Auswertung der magn. Polpaare
        plotMagnPolpaare(obj,drehzahl,drehrichtung,magn_polpaar);
    end
end
end

```

Listing 24: plotFourierMesh1Round()

```

function plotFourierMesh1Round(obj,drehzahl,drehrichtung)

    %Indizes der gewünschten Versuche lt. Übergabeparametern in
    %Vektor ablegen
    ind_versuch = [];
    %Index Referenzspulen

```

```

ind_ref_sp = [];

%Indizes der Referenzspulen suchen
for k=1:length(obj.spulen_container)
    if (obj.spulen_container(k).drehzahl_rpm == drehzahl &&...
        strcmp(obj.spulen_container(k).drehrichtung,drehrichtung) && ...
        strcmp(obj.spulen_container(k).zahn_name,'STS18') && ...
        ~strncmp(obj.spulen_container(k).zahn_name,'FMS',3))

        ind_ref_sp = [ind_ref_sp k*ones(1,4)];
    end
end
%Indizes der eigentlichen Versuche suchen
for k=1:length(obj.spulen_container)
    if (obj.spulen_container(k).drehzahl_rpm == drehzahl &&...
        strcmp(obj.spulen_container(k).drehrichtung,drehrichtung) && ...
        ~strcmp(obj.spulen_container(k).zahn_name,'STS18') && ...
        ~strncmp(obj.spulen_container(k).zahn_name,'FMS',3))

        ind_versuch = [ind_versuch k];
    end
end
%Index der letzten (Messung 5) STS18 anf^ngen
for k=1:length(obj.spulen_container)
    if (strcmp(obj.spulen_container(k).zahn_name,'STS18') &&...
        obj.spulen_container(k).messung_nr == 5 && ...
        strcmp(obj.spulen_container(k).drehrichtung,drehrichtung) && ...
        obj.spulen_container(k).drehzahl_rpm == drehzahl)

        ind_versuch = [ind_versuch k];
    end
end

x=[];
y=[];
z=[];
fvk_raw = [];
angle_abw = [];

anz_ordnungen = length(obj.spulen_container(1).ck_fourier_lumdrehung);

for i=1:length(ind_versuch)
    temp = (1:anz_ordnungen)';
    x=[x temp];
    temp = i*ones(anz_ordnungen,1);
    z=[z temp];

temp=abs((obj.spulen_container(ind_versuch(i)).ck_fourier_lumdrehung)/0.03)';
fvk_raw=[fvk_raw
abs((obj.spulen_container(ind_versuch(i)).ck_fourier_lumdrehung))'];
y=[y temp];
end

figure(1)
mesh(x,z,y)
title(['Flussverkettung: alle magn. Polpaare ^ber einen Zahn, Statorspulen
- n='...
        num2str(drehzahl) 'rpm, Drehrichtung='
drehrichtung'],'FontSize',12);
xlabel('Ordnungen mechanisch','FontSize',12);
ylabel('STS-Nr.','FontSize',12);
zlabel('Amplitude in p.u. (Bezug 0.03 Vs)','FontSize',12);
set(gca, 'ZScale', 'log')
grid on;

return
end

```

Listing 25: plotFourierMesh1RoundFMS()

```
function plotFourierMesh1RoundFMS(obj,drehzahl,drehrichtung)
%Indizes der gewünschten Versuche lt. Übergabeparametern in
%Vektor ablegen
ind_versuch = [];

for k=1:length(obj.spulen_container)
    if (obj.spulen_container(k).drehzahl_rpm == drehzahl &&...
        strcmp(obj.spulen_container(k).drehrichtung,drehrichtung) && ...
        ~strcmp(obj.spulen_container(k).zahn_name,'FMS50') && ...
        ~strncmp(obj.spulen_container(k).zahn_name,'STS',3))

        ind_versuch = [ind_versuch k];
    end
end
for k=1:length(obj.spulen_container)
    if (strcmp(obj.spulen_container(k).zahn_name,'FMS50') &&...
        obj.spulen_container(k).messung_nr == 5 && ...
        strcmp(obj.spulen_container(k).drehrichtung,drehrichtung) && ...
        obj.spulen_container(k).drehzahl_rpm == drehzahl)
        ind_versuch = [ind_versuch k];
    end
end

x=[];
y=[];
z=[];

anz_ordnungen = length(obj.spulen_container(1).ck_fourier_lumdrehung);

fms_nr = [51 52 53 59 58 57 60 50];

for i=1:length(ind_versuch)
    temp = (1:anz_ordnungen)';
    x=[x temp];
    temp = fms_nr(i)*ones(anz_ordnungen,1);
    z=[z temp];

temp=abs((obj.spulen_container(ind_versuch(i)).ck_fourier_lumdrehung)/0.0013)';
y=[y temp];
end

figure(1)
mesh(x,z,y)
title(['Flussverkettung: alle magn. Polpaare über einen Zahn,
Flussmessspulen - n='...
    num2str(drehzahl) 'rpm, Drehrichtung=' drehrichtung]);
xlabel('Ordnungen');
ylabel('FMS-Nr. ');
zlabel('Amplitude in p.u., Bezug=0.0013Vs');
set(gca, 'ZScale', 'log')
grid on;
end
```

Listing 26: plotBenachbarte()

```
%plotted die Fourierspektren von STS18 und FMS50 in einem Diagramm, sowie
%die Spektren der benachbarten Spulen STS18, STS01 und STS02 und ihrer FMS
%in ein Diagramm
%n=2000rpm, drehrichtung = pos
function plotBenachbarte(obj)
%Indexreihenfolge: STS18, FMS50, STS01, FMS51, STS02, FMS52
ind_versuch = [2 4 6 1 3 5];
colors = {'-b'; '-r'; '-k'};

windungsverhaeltnis = (2/48);
%plot von STS18 und FMS50 (FMS werden über das Windungsverhältnis auf
%STS umgerechnet
figure(1)
```

```

hold on
plot(abs(obj.spulen_container(2).ck_fourier_lumdrehung) / ...
max(abs(obj.spulen_container(2).ck_fourier_lumdrehung)), 'LineWidth', 2);

plot(abs(obj.spulen_container(1).ck_fourier_lumdrehung) / ...
      (max(abs(obj.spulen_container(2).ck_fourier_lumdrehung)) * ...
      windungsverhaeltnis), '-r', 'LineWidth', 2);
hold off
grid on;
%set(gca, 'YScale', 'log')
title('Vergleich von STS18 und FMS50', 'FontSize', 12);
xlabel('Ordnungen mechanisch', 'FontSize', 12);
ylabel('Psi in p.u. (Bezug: Maximalwert von STS18)', 'FontSize', 12);
legend('STS18', 'FMS50');

%plot von STS18 bis STS02
figure(2)
for k=1:3
hold on
    plot(abs(obj.spulen_container(ind_versuch(k)).ck_fourier_lumdrehung) /
...
max(abs(obj.spulen_container(ind_versuch(k)).ck_fourier_lumdrehung))...
      ,char(colors(k)), 'LineWidth', 2);
    hold off
    %max(abs(obj.spulen_container(ind_versuch(k)).ck_fourier_lumdrehung))
end
grid on;
set(gca, 'YScale', 'log')
title('Vergleich benachbarter Spulen', 'FontSize', 12);
xlabel('Ordnungen mechanisch', 'FontSize', 12);
ylabel('Psi in p.u. (Bezug: jeweiliger Maximalwert)', 'FontSize', 12);
legend('STS18', 'STS01', 'STS02');

%plot von FMS50 bis FMS52
figure(3)
for k=4:6
hold on
    plot(abs(obj.spulen_container(ind_versuch(k)).ck_fourier_lumdrehung) /
...
max(abs(obj.spulen_container(ind_versuch(k)).ck_fourier_lumdrehung))...
      ,char(colors(k-3)), 'LineWidth', 2);
    hold off
    %max(abs(obj.spulen_container(ind_versuch(k)).ck_fourier_lumdrehung))
end
grid on;
set(gca, 'YScale', 'log')
title('Vergleich benachbarter Flussmessspulen', 'FontSize', 12);
xlabel('Ordnungen mechanisch', 'FontSize', 12);
ylabel('Psi in p.u. (Bezug: jeweiliger Maximalwert)', 'FontSize', 12);
legend('FMS50', 'FMS51', 'FMS52');

end

```

Listing 27: plotFourierAngles()

```

function plotFourierAngles(obj, drehzahl, drehrichtung)

%Indizes der gewünschten Versuche lt. Übergabeparametern in
%Vektor ablegen
ind_versuch = [];
%Index Referenzspulen
ind_ref_sp = [];

%Indizes der Referenzspulen suchen
for k=1:length(obj.spulen_container)
    if (obj.spulen_container(k).drehzahl_rpm == drehzahl &&...
        strcmp(obj.spulen_container(k).drehrichtung, drehrichtung) && ...

```

```

        strcmp(obj.spulen_container(k).zahn_name,'STS18') && ...
        ~strncmp(obj.spulen_container(k).zahn_name,'FMS',3))

        ind_ref_sp = [ind_ref_sp k*ones(1,4)];
    end
end
%Indizes der eigentlichen Versuche suchen
for k=1:length(obj.spulen_container)
    if (obj.spulen_container(k).drehzahl_rpm == drehzahl &&...
        strcmp(obj.spulen_container(k).drehrichtung,drehrichtung) && ...
        ~strcmp(obj.spulen_container(k).zahn_name,'STS18') && ...
        ~strncmp(obj.spulen_container(k).zahn_name,'FMS',3))

        ind_versuch = [ind_versuch k];
    end
end
%Index der letzten (Messung 5) STS18 anfügen
for k=1:length(obj.spulen_container)
    if (strcmp(obj.spulen_container(k).zahn_name,'STS18') &&...
        obj.spulen_container(k).messung_nr == 5 && ...
        strcmp(obj.spulen_container(k).drehrichtung,drehrichtung) && ...
        obj.spulen_container(k).drehzahl_rpm == drehzahl)

        ind_versuch = [ind_versuch k];
    end
end

x=[];
y=[];
z=[];
fvk_raw = [];
angle_abw = [];

anz_ordnungen = length(obj.spulen_container(1).ck_fourier_lumdrehung);

for i=1:length(ind_versuch)
    temp = (1:anz_ordnungen)';
    x=[x temp];
    temp = i*ones(anz_ordnungen,1);
    z=[z temp];

temp=abs((obj.spulen_container(ind_versuch(i)).ck_fourier_lumdrehung)/0.03)';
fvk_raw=[fvk_raw
abs((obj.spulen_container(ind_versuch(i)).ck_fourier_lumdrehung)')];
y=[y temp];
%Ausgabe der Winkeldifferenz, bezogen auf S18 der jeweiligen Messung
angle_abw = [angle_abw
angle(obj.spulen_container(ind_versuch(i)).ck_fourier_lumdrehung(6))...
*180/pi-
angle(obj.spulen_container(ind_ref_sp(i)).ck_fourier_lumdrehung(6))*180/pi];
end

figure(1)
plot(1:3:18,angle_abw(1:3:end));
title('Phase 1');
grid on;

figure(2)
plot(2:3:18,angle_abw(2:3:end));
title('Phase 2');
grid on;

figure(3)
plot(3:3:18,angle_abw(3:3:end));
title('Phase 3');
grid on;

figure(4)
plot(1:3:18,(angle_abw(1:3:end)-
mean(angle_abw(1:3:end)))/mean(angle_abw(1:3:end))*100);

```

```

title('rel Abw in %, Ph1');
grid on;

end

```

Listing 28: plotFourierSegmente()

```

function plotFourierSegmente(obj,drehzahl,drehrichtung,magn_polpaar)
%Indizes der gewünschten Versuche lt. Übergabeparametern in
%Vektor ablegen
ind_versuch = [];

for k=1:length(obj.spulen_container)
    if (obj.spulen_container(k).drehzahl_rpm == drehzahl &&...
        strcmp(obj.spulen_container(k).drehrichtung,drehrichtung) && ...
        ~strcmp(obj.spulen_container(k).zahn_name,'STS18') && ...
        ~strncmp(obj.spulen_container(k).zahn_name,'FMS',3))

        ind_versuch = [ind_versuch k];
    end
end
for k=1:length(obj.spulen_container)
    if (strcmp(obj.spulen_container(k).zahn_name,'STS18') &&...
        obj.spulen_container(k).messung_nr == 5 && ...
        strcmp(obj.spulen_container(k).drehrichtung,drehrichtung) && ...
        obj.spulen_container(k).drehzahl_rpm == drehzahl)
        ind_versuch = [ind_versuch k];
    end
end

anz_ordnungen = length(obj.spulen_container(1).ck_fourier_magnete{1,1});

%f. magn. Polpaar 1, alle weiteren Polpaare können berechnet werden
%Sortierung der Spulen: STS01, STS02, ..., STS18 für positive
%Drehrichtung
segmente = [1 2 2 2 3 3 3 4 4 4 5 5 5 6 6 6 1 1];

mod_operator = 7*ones(1,length(segmente));
%Berechnung der Segmentreihenfolge für ein Polpaar != 1
if(magn_polpaar > 1)
    for k=1:(magn_polpaar-1)
        segmente = segmente + 1;
        segmente = mod(segmente, mod_operator);
        segmente(segmente == 0) = 1;
    end
end

x=[];
y=[];
z=[];
o1=[];

for i=1:length(ind_versuch)
    temp = (1:anz_ordnungen)';
    x=[x temp];
    temp = i*ones(anz_ordnungen,1);
    z=[z temp];

temp=(abs(obj.spulen_container(ind_versuch(i)).ck_fourier_magnete{segmente(i),1}
)/.03)';
    y=[y temp];
    o1 = [o1
abs(obj.spulen_container(ind_versuch(i)).ck_fourier_magnete{segmente(i),1})'];
end

figure(1)
mesh(x,z,y)
title(['Flussverkettung: Magn. Polpaar ' num2str(magn_polpaar) ' über alle
ZΣhne Statorspulen - n=' num2str(drehzahl) 'rpm, Drehrichtung=' drehrichtung]);
xlabel('Ordnungen elektrisch');

```

```

ylabel('STS-Nr. ');
xlabel('Amplitude in p.u. (Bezug 0.03 Vs)');
set(gca, 'ZScale', 'log')
grid on;

figure(2)
plot((ol(7,:) - mean(ol(7,:)))/mean(ol(7,:))*100);
grid on;
mean(ol(1,:))

end

```

Listing 29: plotMagnPolpaare()

```

function plotMagnPolpaare(obj,drehzahl,drehrichtung,magn_polpaar)
%Indizes der gewünschten Versuche lt. Übergabeparametern in
%Vektor ablegen
ind_versuch = [];

for k=1:length(obj.spulen_container)
    if (obj.spulen_container(k).drehzahl_rpm == drehzahl &&...
        strcmp(obj.spulen_container(k).drehrichtung,drehrichtung) && ...
        ~strcmp(obj.spulen_container(k).zahn_name,'STS18') && ...
        ~strncmp(obj.spulen_container(k).zahn_name,'FMS',3))

        ind_versuch = [ind_versuch k];
    end
end

for k=1:length(obj.spulen_container)
    if (strcmp(obj.spulen_container(k).zahn_name,'STS18') &&...
        obj.spulen_container(k).messung_nr == 5 && ...
        strcmp(obj.spulen_container(k).drehrichtung,drehrichtung) && ...
        obj.spulen_container(k).drehzahl_rpm == drehzahl)
        ind_versuch = [ind_versuch k];
    end
end

anz_ordnungen = length(obj.spulen_container(1).ck_fourier_magnete{1,1});

%f. magn. Polpaar 1, alle weiteren Polpaare können berechnet werden
%Sortierung der Spulen: STS01, STS02, ..., STS18 f,r positive
%Drehrichtung
segmente = [1 2 2 2 3 3 3 4 4 4 5 5 5 6 6 6 1 1];

mod_operator = 7*ones(1,length(segmente));
%Berechnung der Segmentreihenfolge f,r ein Polpaar != 1
if(magn_polpaar > 1)
    for k=1:(magn_polpaar-1)
        segmente = segmente + 1;
        segmente = mod(segmente, mod_operator);
        segmente(segmente == 0) = 1;
    end
end

x=[];
y=[];
z=[];
ol=[];

for i=1:length(ind_versuch)
    temp = (1:anz_ordnungen)';
    x=[x temp];
    temp = i*ones(anz_ordnungen,1);
    z=[z temp];

temp=(abs(obj.spulen_container(ind_versuch(i)).ck_fourier_magnete{segmente(i),1})/.03)';
    y=[y temp];
    ol = [ol
abs(obj.spulen_container(ind_versuch(i)).ck_fourier_magnete{segmente(i),1})'];
end

%Berechnung der Mittelwerte der Grundschiwingung über alle 18 STS für
%alle 6 magnetischen Polpaare und Darstellung derselben in einem
%Diagramm
anz_magn_pp = 6;
ordl = {};

```

```

ord5 = {};
ord7 = {};
mean_ord1 = [];
mean_ord5 = [];
mean_ord7 = [];
temp = [];
segmente = [1 2 2 2 3 3 3 4 4 4 5 5 5 6 6 1 1];
mod_operator = 7*ones(1,length(segmente));
%Iteration ,ber alle Polpaare
for pp=1:anz_magn_pp
    %Iteration ,ber alle 18 Statorspulen
    for i=1:length(ind_versuch)
        temp = [temp
abs(obj.spulen_container(ind_versuch(i)).ck_fourier_magnete(segmente(i),1)']];
    end
    ord1{pp,1} = temp(1,:);
    mean_ord1 = [mean_ord1 mean(temp(1,:))];
    ord5{pp,1} = temp(5,:);
    mean_ord5 = [mean_ord5 mean(temp(5,:))];
    ord7{pp,1} = temp(7,:);
    mean_ord7 = [mean_ord7 mean(temp(7,:))];
    temp = [];
    segmente = segmente + 1;
    segmente = mod(segmente, mod_operator);
    segmente(segmente == 0) = 1;
end

%Erstellung der Diagramme
plot(1:anz_magn_pp, (mean_ord1./mean(mean_ord1)-1)*100,'-o','LineWidth',1)
grid on;
title('Vergleich der magnetischen Polpaare - relative Abweichung zu Ihrem Mittelwert
- jeweils Ordnung 1^E','FontSize',12);
xlabel('Magn. Polpaar Nr.','FontSize',12);
ylabel('Relative Abweichung vom Mittelwert in %', 'FontSize', 12);
legend([num2str(drehzahl) 'rpm, ' drehrichtung]);
%Ausgabe des Mittelwerts, auf den Bezug genommen wird
disp(['Mittelwert Ordnung 1: ' num2str(mean(mean_ord1)) 'Vs']);

figure(4)
plot(1:anz_magn_pp, (mean_ord5./mean(mean_ord5)-1)*100,'-o','LineWidth',1)
grid on;
title('Vergleich der magnetischen Polpaare - relative Abweichung zu Ihrem Mittelwert
- jeweils Ordnung 5^E','FontSize',12);
xlabel('Magn. Polpaar Nr.','FontSize',12);
ylabel('Relative Abweichung vom Mittelwert in %', 'FontSize', 12);
legend([num2str(drehzahl) 'rpm, ' drehrichtung]);
%Ausgabe des Mittelwerts, auf den Bezug genommen wird
disp(['Mittelwert Ordnung 5: ' num2str(mean(mean_ord5)) 'Vs']);

figure(5)
plot(1:anz_magn_pp, (mean_ord7./mean(mean_ord7)-1)*100,'-o','LineWidth',1)
grid on;
title('Vergleich der magnetischen Polpaare - relative Abweichung zu Ihrem Mittelwert
- jeweils Ordnung 7^E','FontSize',12);
xlabel('Magn. Polpaar Nr.','FontSize',12);
ylabel('Relative Abweichung vom Mittelwert in %', 'FontSize', 12);
legend([num2str(drehzahl) 'rpm, ' drehrichtung]);
%Ausgabe des Mittelwerts, auf den Bezug genommen wird
disp(['Mittelwert Ordnung 7: ' num2str(mean(mean_ord7)) 'Vs']);
end

```

Listing 30: plotOrdnungen1Round2D()

```

%plotted die gewünschten Ordnungen eines Versuchs
function plotOrdnungen1Round2D(obj,drehzahl,drehrichtung,ordnungen)
    ind_versuch = [];
    %Suchen und Einsortieren der gew. Spulen in einen Vektor (ind_versuch)
    for k=1:length(obj.spulen_container)
        if (obj.spulen_container(k).drehzahl_rpm == drehzahl &&...
            strcmp(obj.spulen_container(k).drehrichtung,drehrichtung) && ...
            ~strcmp(obj.spulen_container(k).zahn_name,'STS18') && ...
            ~strncmp(obj.spulen_container(k).zahn_name,'FMS',3))

            ind_versuch = [ind_versuch k];
        end
    end
end
for k=1:length(obj.spulen_container)

```

```

        if (strcmp(obj.spulen_container(k).zahn_name,'STS18') &&...
            obj.spulen_container(k).messung_nr == 5 && ...
            strcmp(obj.spulen_container(k).drehrichtung,drehrichtung) && ...
            obj.spulen_container(k).drehzahl_rpm == drehzahl)
            ind_versuch = [ind_versuch k];
        end
    end

    ck_mat = ones(length(ordnungen),length(ind_versuch));
    %Auswertungen der Spulen, welche im Vektor ind_versuch stehen
    for k=1:length(ordnungen)
        for i=1:length(ind_versuch)
            ck_mat(k,i) =
obj.spulen_container(ind_versuch(i)).ck_fourier_lumdrehung(ordnungen(k));
        end
    end

    for k=1:length(ordnungen)
        figure(k)
        plot((abs(ck_mat(k,:))-
mean(abs(ck_mat(k,:)))/mean(abs(ck_mat(k,:)))*100,'-o');
        grid on;
        title(['Ordnung ' num2str(ordnungen(k)) ', n = ' num2str(drehzahl)
'rpm' ', Drehrichtung: ' drehrichtung]);
        ylabel('Relative Abweichung zum jeweiligen Mittelwert in %');
        xlabel('STS-Nr. ');
    end
end
end

```

Listing 31: fun_ausrichten_sinus.m

```

% 28.8.2015 R. Seebacher, H. Gruebler
%      hervorgegangen aus
%      U:\share\hg\Messungen\m150827\ausrichten_sinus_LeCroy.m
% MA Grübler
%   Synchronisation dSpace-N5000
%   Ausrichten mit Sinussignal erzeugt von ArbStudio 1102 LeCroy
%
% Messung eines gemeinsamen sinusförmigen Signales mit N5000 und dSpace
%
% t...Zeitvektor N5000
% ut..Triggersignal von N5000 gemessen
%
% td...Zeitvektor dSpace
% utd..Triggersignal von dSpace gemessen
%
% Das von dSpace und N5000 gemessene sinusförmige Triggersignal wird
% zunächst grob ausgerichtet (Überschreitung eines Spannungswertes).
% Für die Bestimmung der Frequenz w wird ut gefiltert und die Periodendauern
% eines wählbaren Ausschnittes
% durch Suchen der Nulldurchgänge bestimmt (ut weil dieses Signal weniger
% verrauscht ist als utd).
% Dann wird die Fourieranalyse für die ungefilterten Signale ut und utd für
% diese eine Frequenz w ausgeführt (Integration mit der Trapezmethode).
% Dies liefert die Grundschnitte:      ut1=ut1_dach*cos(w*(t-t0nn))
%                                     und utd1=utd1_dach*cos(w*(td-t0dd))
% Da beiden Grundschnitten dieselbe Quelle zugrundeliegt, geben die Werte
% t0nn und t0dd die Verschiebung der Zeitachsen an.
%
%
% Aufruf:
%      function [tt,ttt,deltat]=fun_ausrichten_sinus(t,ut,td,utd)
%
%      t....Zeit N5000
%      ut...Trigger N5000
%      td...Zeit dSpace
%      utd..Trigger dSpace
%
%      Ausgerichtete Zeit      (td bleibt unverändert, t wird verschoben)
%      tt=t-t0nn+t0dd          N5000

```

```

%          ttd=td          dSpace
%          deltat=t0nn-t0dd  Versatz zwischen N5000 und dSpace
%

function [tt,ttd,deltat]=fun_ausrichten_sinus(t,ut,td,utd)

%% Einstellungen

% "Naturkonstante"
tdfaktor=0.99998468; % 1, Faktor für die Zeittransformation
% t_N5000=t_dSpace*tdfaktor
% siehe dazu
% U:\share\hg\Messungen\m150710\aw_tkorrv2.m
% dieser Faktor wurde dort als Mittelwert ueber die
% Versuche 100, 200, 500 und 1000 Hz
% mit der Einstellung flag=2 (lineare Transformation)
% bestimmt %

td = td .* tdfaktor;
% fixe Werte
fexp=832; % Hz, erwartete Signalfrequenz aufgrund der Einstellung des
% Funktionsgenerators

uth=2; % V, Schwellwert für Grobausrichtung

%          Filterung für Nulldurchgangssuche, Bandpass
%(Butterworth willkuerlich ausgewaehlt)
fhi=200; % Hz, Knickfrequenz des Hochpasses Butterworth 2. Ordnung
flo=1400; % Hz, Knickfrequenz des Tiefpasses Butterworth 2. Ordnung

% veränderbare Werte
%          Bereich für die Nulldurchgangsbestimmung und anschließende
Fourieranalyse
tstart=.5; % s, ab tstart wird gesucht (0 < tstart, nicht zu nah an 0
%herangehen wegen des Einschwingens der Filter)
nop=50; % 1, Suche über nop-Signalperioden ab tstart

% Darstellungen
zeigen=0;

% Drucken für Präsentationen
drucken=0;

fname='test';

device='-dpng';
fname_bereich=[fname '_uvw'];
fname_ausrichtung=[fname '_xyz'];
bildpfad='U:\share\hg\doc\praesentation_150826';

Tn=mean(diff(t)); % s, aus t ermittelte Abtastperiode des N5000
%(genaugenommen liefert N5000 diesen Wert und daraus wird in "mwgeigl.m" der
Zeitvektor t erzeugt)

Td=mean(diff(td)); % s, Abtastperiode dSpace

% Messwertkontrolle

if zeigen

figure(2);
plot(t,ut,td,utd);
grid on;
th=title(['Versuch: ' fname]);
set(th,'Interpreter','none');

```

```

xlabel('Zeit in s');
ylabel('Synchronisationssignale');
legend('ut N5000','ut dSpace',2);

end;

%% grobes Ausrichten

it=min(find(ut>=uth));      % 1, Index ab dem ut den Schwellwert "bersteigt
itd=min(find(utd>=uth));   % 1, ... dSpace

t0=t(it);
t=t-t0;                    % s, entsprechend der Grobausrichtung verschobene
N5000 Zeitachse

td0=td(itd);
td=td-td0;                % s, entsprechend der Grobausrichtung verschobene
dSpace Zeitachse

%% Frequenzbestimmung N5000
% Hochpassfilter
[bb aa]=butter(2,fhi*2*Tn,'high');
utf=filter(bb,aa,ut);
% Tiefpassfilter
[bb aa]=butter(2,flo*2*Tn,'low');
utf=filter(bb,aa,utf);    % V, Bandpassgefiltertes Triggersignal

% Indexbereich für Nulldurchgangsbestimmung und Fourieranalyse suchen
ai=min(find(t>tstart));
ei=ai+ceil(nop/fexp/Tn); % length(t);

% Nulldurchgänge suchen
% perioden.m erwartet ein gering verrauschtes nahezu mittelwertfreies Signal
[posi,f,fp,vari,f1,varil]=perioden(t(ai:ei),utf(ai:ei),1/fexp);

% f...Frequenz aus allen Halbperioden
% fp..Frequenz aus allen ganzen Perioden
% die Frequenz mit der geringeren Schwankungsbreite wird genommen
fsoll=f;
if vari<varil
fsoll=fp;
end;

Ts=1/fsoll;    % s, vermutete Periodendauer des Triggersignales

%% Fourieranalyse N5000
% Zeitintervall f"r die Fourieranalyse
an=t(it)+tstart;    % s, Beginn
en=an+nop/fsoll;   % s, Ende

% Berechnung der komplexen Fourierkoeffizienten f"r Gleichanteil und
Grundschiwingung
c0nn=1/(en-an)*fun_trapz(t,ut,an,en);    % Gleichanteil
c1nn=2/(en-an)*fun_trapz(t,ut.*exp(j*2*pi*fsoll*t),an,en); % Grundschiwingung

utr=real(c0nn+c1nn.*exp(-j*2*pi*fsoll*t)); % V, Rekonstruktion
des Triggersignales

%% Fourieranalyse dSpace

% Index f"r die Darstellung
aid=min(find(td>tstart));
eid=aid+ceil(nop/fexp/Td); % length(t);

% Zeitintervall f"r die Fourieranalyse
ad=td(itd)+tstart;
ed=ad+nop/fsoll;

```

```

% Fourierkoeffizienten für Gleichanteil und Grundschiwingung
c1dd=2/(ed-ad)*fun_trapz(td,utd.*exp(j*2*pi*fsoll*td),ad,ed);
c0dd=1/(ed-ad)*fun_trapz(td,utd,ad,ed);

utdr=real(c0dd+conj(c1dd).*exp(j*2*pi*fsoll*td)); % V, Rekonstruktion

%% Bestimmung der Zeitverschiebung
t0nn=angle(c1nn)/(2*pi*fsoll); % s, Verschiebung N5000 tsoll=tist-t0nn
t0dd=angle(c1dd)/(2*pi*fsoll); % s, Verschiebung dSpace tdsoll=tdist-t0dd

tt=t-t0nn+td0+t0dd;
ttd=td+td0;
deltat=t0+t0nn-(td0+t0dd);

%% Kontrollplot Synchronisationsausschnitt

if zeigen
figure(20);
plot(t,ut,t(ai:ei),ut(ai:ei),'-r',td,utd,td(aid:eid),utd(aid:eid),'-g');
th=title(['Versuch: ' fname]);
set(th,'Interpreter','none');
xlabel('Zeit in s');
ylabel('Synchronisationssignal in V');
legend('N5000','N5000-Ausschnitt','dSpace','dSpace-Ausschnitt',4);

if drucken
print(20,device,[bildpfad '\ ' fname_bereich]);
end;

figure(22);
plot(t(ai:ei)-t0nn,ut(ai:ei),'-b',t(ai:ei)+t0nn,utr(ai:ei),'b',...
td(aid:eid)-t0dd,utd(aid:eid),'-g',td(aid:eid)-t0dd,utdr(aid:eid),'r*');
th=title(['Versuch: ' fname]);
set(th,'Interpreter','none');
xlabel('Zeit in s');
ylabel('Synchronisationssignal in V');
legend('N5000','N5000-Rekonstr.','dSpace','dSpace-Rekonstr.',2);

figure(32);
plot(td-t0dd,utd-utdr,'-c',td(aid:eid)-t0dd,utd(aid:eid)-utdr(aid:eid),'c',...
t-t0nn,ut-utr,'-b',t(ai:ei)-t0nn,ut(ai:ei)-utr(ai:ei),'b*');
th=title(['Versuch: ' fname]);
set(th,'Interpreter','none');
xlabel('Zeit in s');
ylabel('Signal-Rekonstruktion in V');
legend('dSpace','dSpace','N5000','N5000',2);

figure(33)
plot(t-t0nn,ut,'-b*',td-t0dd,utd,'-r*');
grid on;
th=title(['Versuch: ' fname]);
set(th,'interpreter','none');
xlabel('Zeit in s');
ylabel('Synchronisationssignal ausgerichtet in V');
legend('N5000','dSpace',2);

if drucken
figure(33);
axis([-7e-4 14e-4 -10 10]);
print(33,device,[bildpfad '\ ' fname_ausrichtung]);
end;

z1=sprintf('\n\t t0nn-t0dd \n\t %1.10f',[t0nn-t0dd]);

```

```

disp(z1);

z1=sprintf('\n\t t0nn-t0mm \n\t %1.10f',[t0nn-t0mm]);
disp(z1);

z1=sprintf('\n\t t0mm-t0dd \n\t %1.10f',[t0mm-t0dd]);
disp(z1);

end;

```

Listing 32: fun_offset.m

```

% 13.9.2015 R. Seebacher, H. Gruebler
% MA Gruebler
% Offsetermittlung und Integration von u zu psi
%
%
% Eingang:
% t.....Zeitvektor (Spaltenvektor)
% phi....mech Rotorlage interpoliert über t (Spaltenvektor)
% 0 <= phi(1) <= 2*pi !
% u.....Spannungsmatrix, Zeilenanzahl wie t
% phia...Lage des Spannungsnulldurchganges der Referenzspule (negative
Flanke, bei Psimax)
% phipsi..Der Anfangswinkel für die Berechnung von Offset und Psi der
Referenzspule
% beginnt bei phia+phipsi+n*2*pi, n ganze Zahl die noch zu
bestimmen ist
% interv1.Wunsch: n=interv1
% anz.....Wunsch: Anzahl von 2*pi Intervallen über die die Psi-Berechnung
zu erstrecken ist
%
% Ausgang:
% Array of structs mit den Feldern
% psi....Flussverkettung (Spaltenvektor)
% psioff.Flussverkettung aufgrund der Offsetspannung integral(-
uoffset(t)*dt
% psi0...Integrationskonstante (von psi bereits abgezogen)
% phia...Anfangswinkel des gültigen Bereiches
% phie...Endwinkel des gültigen Bereiches (phia < phie)
% w.....mech. Drehzahl in rad/s
% interv1.Wirklichkeit zu Eingang interv1
% anz.....Wirklichkeit zu Eingang anz
% ai.....Anfangsindex des Berechnungsbereiches
% ei.....Endindex des Berechnungsbereiches
%
% Aufruf: psi=fun_offset(t,phi,u,phia,phipsi,interv1,anz)
%
function psi=fun_offset(t,phii,u,phia,phipsi,interv1,anz);
% Abschnitte
% Allgemein
% Prüfen
% Drehzal und Periodendauer
% Gueltige Intervalle
% Psiberechnung

%% Allgemein
phi_interpolation_method='spline'; % method for interpolation of phi(td)
% (dSpace) at time t (N5000).
offset_method='nearest'; % method for interpolation of u0 given
% for each period of u at time t

p=6; % 1, Polpaarzahl, man sollte ein Maschinenstruct
% mitföhren indem allgemeine Parameter zentral gespeichert sind!!!!

phireserve=5*pi/180;% rad, mechanischer Winkel um den das Intervall auf
% beiden Seiten vergrößert wird um bei pos. und neg. Drehzahl sicher
% den gesuchten Bereich zu umfassen (die entsprechenden

```

```

% Spannungsnulldurchgänge müssen im Bereich liegen)
phischwelle=5*pi/180; % rad, Suchbereich

% phipsi=0; % rad, elektrischer Winkel der zu phiasoll addiert wird
% 0....Beginn des Intervalles bei max(Psi)
% -90*pi/180...Beginn des Intervalles bei Psi=0 positive Flanke

%% Pruefen
tt=t(:);
phii=phii(:);
if (phii(1)<0)&(phii(1)>2*pi)
    error('phi(1) liegt nicht im Intervall [0 2*pi]');
end;

if (phia<0)&(phia>2*pi)
    error('phia liegt nicht im Intervall [0 2*pi]');
end;

if size(u,1)~=length(t)
    error('length(u)~= length(t)');
end;

if length(phii)~=length(t)
    error('length(phii)~= length(t)');
end;

if interv1<0
    error('Startintervall interv1 <0');
end;

if anz <1
    error('Intervallanzahl anz <1');
end;

%% Drehzal und Periodendauer
% Bestimmung der mittleren mechanischen Periodendauer aus dem dSpace
Winkelverlauf
gmech=polyfit(tt,phii,1); % indealerweise sollte phi=w*t+phi(1) gelten,
w=konst.
Tmech=abs(2*pi/gmech(1)); % geschätzte mechanische Periodendauer
wmech=gmech(1);

%% Gueltige Intervalle

phasoll=phia; % rad, mech. Rotorlage für ein Psimax der Grundschiwung
% in Refspule (S18) bei n=0
% ,geschätzt aus Mittelung über Versuche mit pos. und neg. Drehzahl

phimin=phasoll-2*pi/3/p+phipsi-phireserve;
phimax=phasoll+2*pi/3/p+phipsi+phireserve+2*pi;

if wmech>0
    n=ceil((phii(1)-phimin)/(2*pi)); % kleinster Winkel
    m=floor((phii(end)-phimax)/(2*pi)); % grösster Winkel
    if (n+1)>(m-1) % gültiger Bereich lässt
        %am Rand jeweils ein 2*pi Intervall
        error('kein gültiges Intervall vorhanden');
    end;
    interv1=max((n+1),interv1);
    interv1=min(m-1,interv1);
    anz=min(m-1-interv1,anz);
    intervallbereich=[interv1 interv1+anz];
else % w < 0
    n=ceil((phii(end)-phimin)/(2*pi));
    % kleinster Winkel, das ist in diesem Fall am Ende der Messung

```

```

m=floor((phii(1)-phimax)/(2*pi));
% grösster Winkel, in diesem Fall am Beginn der Messung

if (n+1)>(m-1)
    % gültiger Bereich lΣsst am Rand jeweils ein 2*pi Intervall
    error('kein gültiges Intervall vorhanden');
end;

intervl=min(m-1,-intervl);
% der Anwender darf für interv1 eine positive Zahl auswählen
% im Sinne von das zeitlich erste auftretende
% gültige Intervall (daher -intervl)
intervl=max((n+1),intervl);
anz=min(intervl-(n+1),anz);
% zeitlich vorwärts, vom Winkel her aber rückwärts
% interv1-(n+1) 2*pi-Intervalle wahren möglich,
% der Anwender will aber nur "anz" davon
intervallbereich=[intervl-anz interv1];
end;

% Die Berechnung ist also über den Bereich "intervallbereich"
% zu erstrecken, links und rechts existieren ganze Intervalle um auch die
Offsetberechnug der anderen
% Phasen sicher zu ermöglichen
%

%% Psiberechnung
uanzahl=size(u,2);

for z=1:uanzahl
    uu=u(:,z);
    % Offset anhand der nulldurchgänge entfernen
    uu_phi=uu;          % dieselbe Spannung da uu im weiteren Verlaufe
verändert wird

    uu0=zeros(size(uu));    % initialisierung Offsetspannung

    % Durch Mittelwertbildung von einem Spannungsnulldurchgang bis zum
    % 2*p-ten Nachbarn (eine mechanische Periode)
    % wird eine Offsetspannung für diese Periode ermittelt
    % Da die Korrektur der Spannung um diesen Offset auf die Zeitpunkte der
    % Nulldurchgänge Auswirkungen haben kann,
    % wird dies maxiter-mal durchgeführt
    iter=1;          % Initialisierung des Iterationszählers
    maxiter=5;      % Maximalanzahl der Iterationen (bei "alle=1" 2 bis 3, bei
"alle=0" 5

    alle=0;          % alle=1 zu jedem Spannungsnulldurchgang wird eine
Mittelung
    % über eine mechanische Periode durchgeführt
    % das Intervall wird jeweils um einen Nulldurchgang weitergeschoben
    % alle=0 über das Intervall vom ersten bis (2*p+1)-ten Nulldurchgang wird
gemittelt
    % dann weiter vom (2*p+1)-ten bis zum (4*p+1)-ten
    % Das Intervall wird jeweils um 2*p Nulldurchgänge weitergeschoben
    while(iter<=maxiter)
        % Bestimmung der Nulldurchgänge von uu
        [posi,f,fp,vari,f1,varil,indi]=perioden(tt,uu,Tmech/p); % Tmd/p da
        % zunächst die elektrischen Perioden gesucht werden und davon dann jede
p-te

        aux=[1:2*p:length(posi)]';    % Indizes für jede p-te elektrische
        % Periode (= eine mechanische Periode)
        if alle
            a=posi(aux(1):aux(end-1)); % von jedem Spannungsnulldurchgang
            % zu seinem 12-ten Nachbarn wird gemittelt

```

```

        b=posi(aux(2):aux(end)); % das sind die Indizes der 12-ten
Nachbarn
    else
        a=posi(aux(1:end-1)); % vom ersten Spannungsnulldurchgang
        %bis zum 12-ten Nachbarn wird gemittelt
        b=posi(aux(2:end)); % von dort dann wieder 12
Nulldurchgänge weiter
    end;
    A=fun_trapz(tt,uu,a,b); % A...Fläche die uu über dem Intervall
[a b] aufspannt
    % diese Fläche wird der jeweiligen Intervallmitte zugeordnet
    % A/(b-a) = Mittelwert von uu über dem Intervall [a b]
    % da die Offsetspannung für jeden
    % Zeitpunkt tt ben+tigt wird, wird interpoliert
    switch offset_method
        case 'linear'
            u0=interp1((a+b)/2,A./(b-a),tt,'linear','extrap'); % linearer
Verlauf %
        case 'nearest'
            u0nan=interp1((a+b)/2,A./(b-a),tt,'nearest');
            % abschnittsweise konstanter Verlauf %
            u0=u0nan;
            % erster Block NaNs, die Methode "nearest" erlaubt keine
            %Extrapolation, daher entsehen an den Rändern NaNs
            % diese NaN Bereiche werden mit dem ersten gültigen Wert
            %von u0 bzw. dem letzten aufgefüllt %
            nans=isnan(u0nan);
            hilf=find(diff(nans)<-0.5);
            u0(1:hilf)=u0(hilf+1);

            hilf=find(diff(nans)>0.5);
            u0(hilf+1:end)=u0(hilf);
        otherwise
            error('offset_method unknown');
    end;

    uu0=uu+u0;
    uu=uu-u0;
    iter=iter+1;

end;

%
% Phase bestimmen (Phasenlage der Jochspule überprüfen!!!!)
%
phisuch=phia+interv1*2*pi; % rad, dort wird für Phase 1 (
%Refspule) ein Nulldurchgang mit negativer Flanke erwartet (Psi=Psimax)
tsuch=interp1(phii,tt,phisuch); % s, und zu diesem Zeitpunkt würde phisuch
auftreten

% Nulldurchgang der am nächsten liegt
[aux nullindex]=min(abs(posi-tsuch));
% Winkelabstand dieses Nulldurchganges von phisuch
phinull=interp1(tt,phii,posi(nullindex)); % rad, bei diesem Winkel
%tritt der nächstliegende Nulldurchgang auf
deltaphi=phisuch-phinull; % rad, Abstand
% Phase 1: der Abstand muss kleiner phischwelle sein
% bei positiver Drehzahl phasel phase 2 phase 3
% Phase 2 positive Flanke liegt 60° vor phase 1
% Phase 3 positive Flanke liegt 60° nach Phase 1
% daher wenn wmech >0 und deltaphi ausserhalb
% phischwelle dun deltaphi>0 Phase 2 sonst 3
% bei wmech <0 umgekehrt

if abs(deltaphi)<phischwelle
    phase=1;
else
    if wmech>0

```

```

        if deltaphi>0
            phase=2;
        else
            phase=3;
        end;
    else
        if deltaphi>0
            phase=3;
        else
            phase=2;
        end;
    end;
end;

% Intervallgrenzen bestimmen
if wmech >0
    phianfang=phia+hipsi+intervallbereich(1)*2*pi;
    phiende=phia+hipsi+intervallbereich(2)*2*pi;

    switch phase
        case 1
            % nichts weiter
        case 2
            phianfang=phianfang+2*pi/3/p;
            phiende=phiende+2*pi/3/p;

        case 3
            phianfang=phianfang-2*pi/3/p;
            phiende=phiende-2*pi/3/p;

        otherwise
            error('phase unbestimmt');
    end;
else
    phianfang=phia+hipsi+intervallbereich(1)*2*pi;
    phiende=phia+hipsi++intervallbereich(2)*2*pi;

    switch phase
        case 1
            % nichts weiter
        case 2
            phianfang=phianfang-2*pi/3/p;
            phiende=phiende-2*pi/3/p;

        case 3
            phianfang=phianfang+2*pi/3/p;
            phiende=phiende+2*pi/3/p;

        otherwise
            error('phase unbestimmt');
    end;
end;

% Nimm den gefundenen Nulldurchgang und suche nach beiden Seiten jeden 12-
ten
index=[fliplr([nullindex-2*p:-2*p:1]) [nullindex:2*p:length(posi)]];
% linker Rand bezüglich phi
% Anfangszeit

tanfang=interp1(phi_i,tt,phianfang-phireserve);

% rechter Rand bezüglich phi
tende=interp1(phi_i,tt,phiende+phireserve);

if wmech>0
    aux=max(find(posi(index)<=tanfang));
    indexanfang=aux;

```

```

        aux=min(find(posi(index)>=tende));
        indexende=aux;
        nullindices=index(indexanfang:indexende);
    else
        aux=max(find(posi(index)<=tende));
        indexanfang=aux;

        aux=min(find(posi(index)>=tanfang));
        indexende=aux;

        nullindices=index(indexanfang:indexende);
    end;

    % 2*pi Intervalle einpassen mit mldivide
    tnullen=posi(nullindices);
    phinullen=interp1(tt,phii,tnullen);

    B=phinullen-[0:length(phinullen)-1]*sign(wmech)*2*pi;
    A=ones(size(phinullen));

    phinull1=A\B;

    phinullen_least=phinull1+[0:length(phinullen)-1]*sign(wmech)*2*pi;

    if wmech>0
        aux=max(find(phinullen_least<=phianfang));
        indexanfang=aux;

        aux=min(find(phinullen_least>=phiende));
        indexende=aux;
        phinullen_least=phinullen_least(indexanfang:indexende);
    else

        aux=max(find(phinullen_least>=phiende));
        indexanfang=aux;

        aux=min(find(phinullen_least<=phianfang));
        indexende=aux;
        phinullen_least=phinullen_least(indexanfang:indexende);
    end;

    tnullen_least=interp1(phii,tt,phinullen_least);
    % Offsetspannung anteilig f^r den Bereich phinullen_least bestimmen
    a=tnullen_least(1:end-1);
    b=tnullen_least(2:end);
    A=fun_trapz(tt,uu_phi,a,b); % A...Fläche die uu_phi über dem
    Intervall [a b] aufspannt
    % diese Fläche wird der jeweiligen Intervallmitte zugeordnet
    % A/(b-a) = Mittelwert von uu über dem Intervall [a b]
    % da die Offsetspannung für jeden
    % Zeitpunkt tt benötigt wird, wird interpoliert
    switch offset_method
        case 'linear'
            u0=interp1((a+b)/2,A./(b-a),tt,'linear','extrap'); % linearer
    Verlauf %
        case 'nearest'
            u0nan=interp1((a+b)/2,A./(b-a),tt,'nearest'); %
    abschnittsweise konstanter Verlauf %
            u0=u0nan;
            % erster Block NaNs, die Methode "nearest" erlaubt keine
    Extrapolation,
            %daher entstehen an den Rändern NaNs
            % diese NaN Bereiche werden mit dem ersten gültigen Wert von u0
            %bzw. dem letzten aufgefüllt %
            nans=isnan(u0nan);
            hilf=find(diff(nans)<-0.5);
            u0(1:hilf)=u0(hilf+1);

```

```

        hilf=find(diff(nans)>0.5);
        u0(hilf+1:end)=u0(hilf);
    otherwise
        error('offset_method unknown')
end;

uu_psi=uu_phi-u0;
uoff=u0;

if wmech>0
    ai=max(find(phii<=phianfang));
    ei=min(find(phii>=phiende));

else
    ei=min(find(phii<=phianfang));
    ai=max(find(phii>=phiende));

end;

if anz==1
    if wmech>0
        t1=interp1(phii,tt,phianfang);
        t2=interp1(phii,tt,phiende);
    else
        t1=interp1(phii,tt,phiende);
        t2=interp1(phii,tt,phianfang);
    end
    uoff=ones(ei-ai+1,1)*1/(t2-t1)*fun_trapz(tt,u0,t1,t2);
    psihilf=cumtrapz(tt(ai:ei),uu_phi(ai:ei)-uoff);
    psioffset=cumtrapz(tt(ai:ei),uoff);
else
    psihilf=cumtrapz(tt(ai:ei),uu_phi(ai:ei)-uoff(ai:ei));
    psioffset=cumtrapz(tt(ai:ei),uoff(ai:ei));

end;

%psihilf=cumtrapz(tt(ai:ei),uu_phi(ai:ei)-uoff);
%psioffset=cumtrapz(tt(ai:ei),uoff(ai:ei));

% Integrationskonstante
if wmech>0
    Psi0=1/(phiende-
phianfang)*fun_trapz(phii(ai:ei),psihilf,phianfang,phiende);
else
    Psi0=1/(phiende-
phianfang)*fun_trapz(flipud(phii(ai:ei)),flipud(psihilf),phianfang,phiende);
end;

% Rückgabe anfüllen

psi(z).psi=psihilf-Psi0;

psi(z).psioffset=psioffset;

psi(z).psi0=Psi0;

psi(z).phianfang=phianfang;
psi(z).phiende=phiende;
psi(z).ai=ai;
psi(z).ei=ei;
psi(z).phase=phase;
psi(z).wmech=wmech;
psi(z).interv1=interv1;
psi(z).anz=anz;

end;

```