

DIPLOMARBEIT

Fehlerdetektion für verschleißende magnetische Nutkeile elektrischer Asynchronmaschinen mittels Maschineninduktivitätsmessung

Robert Magnet, BSc

0625288

1

Leitung und Mithilfe:

Universität: Technische Universität Wien

Institut: Elektrotechnik und Informationstechnik

Fakultät: Elektrische Maschinen und Antriebe

Vorstand:

O. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. tech. Manfred Schrödl

Gruppenleiter:

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

Persönlicher Betreuer:

Dipl.-Ing. Goran Stojcic

Unterstützende Personen und Ratgeber:

- Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Thomas M. Wolbank
- Dipl.-Ing. Goran Stojcic
- Dipl.-Ing. Peter Nussbaumer
- Dipl.-Ing. Matthias Samonig
- Dipl.-Ing. Christoph Macek

Danksagung an die Arbeitsgruppe:

Danke allen jenen, die mir bei dieser Diplomarbeit geholfen haben und mir während dieser arbeitsintensiven Zeit unterstützend zur Seite gestanden sind. Besonders hervorheben möchte ich Herrn Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Thomas M. Wolbank und Herrn Dipl.-Ing. Goran Stojcic, die mir bei Fragen aller Art eine unentbehrliche Hilfe waren. Die detaillierten Skripten von Herrn O. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. tech. Manfred Schrödl boten mir eine wichtige Grundlage zum Verfassen dieser Arbeit.

Vielen herzlichen Dank an all jene Personen der Technischen Universität Wien, der elektrotechnischen Fakultät und des Instituts für elektrische Antriebe, die mich unterstützten.

Private Danksagung:

Neben der fachspezifischen Unterstützung, war auch jene im privaten Bereich ein wichtiger Faktor für das Gelingen meiner Arbeit. Deshalb möchte ich mich an dieser Stelle bei allen Personen bedanken, die mich in dieser Zeit hierbei unterstützt haben.

Dazu gehören meine Familie, meine Freunde Jacqueline, Stefanie, Patrick, Manuel und Markus, sowie mein Freundeskreis in Wien und alle Mitstudenten, welche mir während dieser Zeit stets hilfsbereit zur Seite standen.

Abstract

In asynchronous machines from the type of the short circuit cage rotor, slot wedges are needed to increase the efficiency.

As it comes to big machines, with a certain performance, the change of the slot wedges is connected to a very high cost. If the performance decreases or the harmonics increase this change takes place.

Implementing software, which returns the condition of the magnetic slot wedges, you could calculate with this information and find the optimal time to change the slot wedges. So it would not be necessary to have a real look into the machine to check the condition of the slot wedges.

In detail specific voltage will cause a transient electrical current response related to the inductivity of the machine, which is our parameter to detect very small changes in the magnetic circle, especially defect or missing slot wedges. Even very small faults change the inductance of the machine. They can be detected by current sensors.

We can compare these currents with the ones of the faultless reference machine. The difference between the measured values, will show in a demonstrative way how far the slot wedges are damaged.

These data have to be analysed, in order to have a look at the condition of the machine and of its slot wedges.

Kurzfassung

In Asynchronmaschinen mit Kurzschlusskäfig werden magnetische Nutkeile dazu verwendet, die Effizienz zu erhöhen.

Wenn der Wirkungsgrad fällt oder die Oberwellen zunehmen, findet deren Auswechslung statt. Bei großen Maschinen hat das sehr hohe Kosten zur Folge.

Implementiert man jedoch Software, welche es einem ermöglicht den Zustand der Nutkeile zu erkennen, kann man mit dieser Information den optimalen Austauschzeitpunkt berechnen. Dann ist es auch nicht nötig die Maschine zu öffnen, um den Zustand der Nutkeile direkt zu überprüfen.

Im Detail wird eine bestimmte Spannungssequenz auf die Maschine geschaltet, was eine transiente Stromantwort zur Folge hat. Diese lässt Rückschlüsse über die Maschineninduktivität zu, welche unser Parameter ist, um kleine Veränderungen im magnetischen Kreis unserer Maschine festzustellen, zu dem auch die Nutkeile zählen. Auch minimale Fehler verändern die Induktivität der Maschine, die schlussendlich mit Hilfe von Stromsensoren gemessen wird.

Man kann diese Ströme mit denen der neuen Referenzmaschine vergleichen. Die Differenz der gemessenen Werte demonstriert anschaulich, in wie weit die Nutkeile abgenützt sind.

Diese Daten müssen ausgewertet werden, um einen Blick auf den Zustand der Maschine und deren magnetische Nutkeile zu werfen.

Inhaltsangabe

1. Einleitung
2. Theorie zur Asynchronmaschine (ASM)
 - 2.1 Grundlegende Funktionsweisen der Maschine
 - 2.2 Normierung und Raumzeigerrechnung
 - 2.3 Die Maschinengleichungen der Asynchronmaschine
 - 2.4 Zwischenkreisumrichter
 - 2.5 Regelung der Asynchronmaschine
3. Magnetische Nutkeile
 - 3.1 Grundlagen
 - 3.2 Zur Detektion fehlender Nutkeile
 - 3.3 Methoden zur Detektion von Fehlern und Messung der Maschineninduktivität durch Anlegen der INFORM-Spannungssequenz
4. Prüfstand
 - 4.1 Aufbau
 - 4.2 Funktionsweise
5. Messungen und Ergebnisse
 - 5.1 Aufbau der Maschine
 - 5.2 Simulierte Fehlerarten
 - 5.3 Wahrscheinlichkeitsverteilung und Detektionsgenauigkeit
6. Zusammenfassung und Ausblick

Verzeichnisse und Anhang

V Verzeichnisse

V.A Abbildungsverzeichnis

V.B Referenzverzeichnis

V.C Abkürzungsverzeichnis

A Anhang – Datenschilder der verwendeten elektrischen Maschinen

1. Einleitung

In unserer Welt sind elektrische Maschinen aus dem täglichen Leben nicht mehr wegzudenken. Sich von selbst öffnende Türen, automatische Kräne zum Heben schwerer Lasten, ja das gesamte moderne Leben, an das wir uns gewöhnt haben, wäre ohne elektrische Maschinen und ohne ausreichende, effiziente Energieversorgung nicht möglich.

In meiner Arbeit beschäftige ich mich insbesondere mit Asynchronmaschinen.

In leistungstärkeren Maschinen werden magnetische Nutkeile (engl. *slot wedges*) zur Erhöhung des Wirkungsgrades und zur Vermeidung von Oberwellen eingesetzt. Nutkeile unterliegen aufgrund ihres Materials und der hohen Belastung durch den Betrieb der Maschine einem erhöhten Verschleiß.

Defekte Nutkeile müssen ausgetauscht werden, was sich bei großen Maschinen als sehr kostspielig und zeitintensiv gestaltet.

Durch das in dieser Arbeit beschriebene System der Fehlerdetektion mittels transienter Maschineninneninduktivität, kann man durch eine Überwachung der Anlage ein Bild vom Inneren der Maschine generieren, um Fehler (zum Beispiel defekte Nutkeile) unmittelbar zu erkennen. Dadurch kann der kostengünstigste und somit optimale Zeitpunkt für den aufwendigen Austausch der Nutkeile bestimmt werden.

Aufbau und Funktion eines solchen Systems sollen in dieser Arbeit dargestellt werden.

2. Theorie zur Asynchronmaschine (ASM)

Elektrische Maschinen sind heutzutage wirtschaftlich und technisch nicht mehr wegzudenkende menschliche Errungenschaften. Ihre grundlegendste Eigenschaft ist jene, Energie und Impuls vom elektromagnetischen Feld in mechanische Energie und retour zu transformieren. So spricht man einerseits vom Motor, andererseits vom Generator.

Generatoren werden in jedem Kraftwerk benötigt, um die von einer Turbine erzeugte Energie in elektrische Energie umzuwandeln.

Elektrische Motoren werden in jenen Geräten benötigt, durch die man mit elektrischer Energie etwas bewegen möchte, also in verschiedenen Aktoren (das Gegenstück ist der Sensor), in der Industrie, im Haushalt, im Autoverkehr, etc.

Ein und dieselbe Maschine kann dabei sowohl als Generator, als auch als Motor dienen, die Auslegung des Betriebszustandes bestimmt ihr Verhalten.

Man versucht, bei der Herstellung einer Maschine immer hinsichtlich Wirtschaftlichkeit, Wirkungsgrad und Beständigkeit zu optimieren.

Ein moderner elektrischer Motor besitzt einen Umrichter (Frequenzumrichter, engl. *frequency converter*), welcher ihn mit den für jeden Betriebspunkt festgelegten Spannungsverläufen versorgt. Um dies befriedigend zu bewerkstelligen, wird die Maschine mittels Regelungen gesteuert, welche mit Hilfe von Mikrochips bzw. Computer realisiert werden. Eine Software bekommt über diverse Sensoren Signale, welche sie in einem

speziellen Algorithmus auswertet. Dann wird das entsprechende Signal an die Aktoren des Umrichters zurückgeleitet, welcher nun die elektrischen Spannungen in gewünschter Frequenz, Phase und Amplitude an die Maschine anlegt. Wenn man bei einem Umrichter von Aktoren spricht, sind meistens die in ihm enthaltenen IGBT's (engl. *insulated-gate bipolar transistor* für Bipolartransistor mit isoliertem Gate) gemeint. Diese elektrischen Schalter sind Halbleiterventile, die nicht netz-, sondern selbstgeführt sind und sich somit gut für den Einsatz in Frequenzumrichtern eignen. Sie ermöglichen quasi-verlustlose Schaltvorgänge. Beim verwendeten Prüfstand (Schaltung ist in Abb. 2.1 dargestellt) sind sie in Halbbrückenschaltung mit Zwischenkreisspannung aufgebaut. Ob die generierten Spannungen den Anforderungen der Maschine genügen, ist zu prüfen. Bei der verwendeten Kombination entsprechen sie in den meisten Fällen.

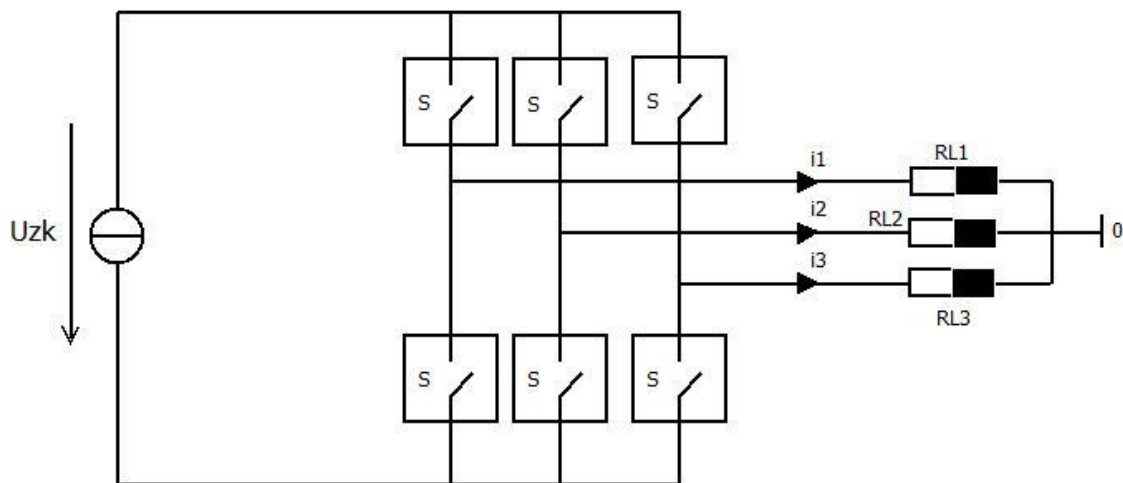


Abb. 2.1: Schaltbild des Prüfstands (sogenannte Halbbrücke mit Zwischenkreisspannung): die angesteuerte ASM ist in Stern geschaltet; die Schalter S wurden als IGBT's realisiert;

RL_n ... Widerstand und Induktivität in Phase n;

U_{zk} ... Zwischenkreisspannung;

i_n ... Strom in Phase n;

Betrachten wir nun wichtige Parameter und Kenngrößen größerer elektrischer Energietransformationssysteme. Dazu gehören etwa Transformatoren, Frequenzumrichter, Elektromotoren und Generatoren, um die gebräuchlichsten Vertreter dieser Gruppe zu nennen.

Wichtige Nenngrößen bei elektrischen Dreiphasenmaschinen sind die Nennspannung U_N [V], der Nennstrom I_N [A], die Nennleistung

S_N [W] (siehe Gl. 2.2) und die Nennfrequenz f_N [Hz] bzw. die mechanische Nennwinkelgeschwindigkeit Ω_N [rad/s] und die Nenndrehzahl n_N [U/min] (Nennbedingungen). Nennstrom, Nennspannung und Nennleistung dürfen zumeist nicht stark überschritten werden. Die mechanische Drehzahl kann jedoch im Feldschwächbereich durchaus auch zwei- bis dreimal Nennwert erreichen.

Die Nennfrequenz f_N steht mit der Nennwinkelgeschwindigkeit Ω_N und der Nenndrehzahl n_N der Maschine in folgendem Zusammenhang:

$$\Omega_N = \frac{2\pi \cdot f_N}{p} = \frac{2\pi \cdot n_N}{60s/\text{min} \cdot p} \quad (\text{Gl. 1.1})$$

Die Nennleistung lässt sich mit

$$S_N = 3 \cdot I_N \cdot U_N \quad (\text{Gl. 2.2})$$

berechnen. Der Faktor drei in der Gleichung rührt vom hier stets vorausgesetzten Dreiphasennetz her. Sie gilt unabhängig für jeden Maschinentyp und für jede Verschaltungsart der Wicklungen (ob Dreieck-, Sternschaltung), da sich die Nennscheinleistung immer aus dem dreifachen Produkt der Strangwerte von Nennspannung und -strom ergeben muss.

2.1 Grundlegende Funktionsweisen der Maschine

In diesem Abschnitt widmen wir uns der grundlegenden Funktionsweise elektrischer Maschinen. Wir gehen also der Frage auf den Grund, wie Energie physikalisch und technisch vom Elektromagnetischen ins Mechanische oder zurück transportiert werden kann.

Dazu betrachten wir den Aufbau einer solchen Maschine. Trotz der Vielzahl an verschiedenen Maschinentypen, sind der grundlegende physikalische Aufbau und Vorgang dahinter immer dieselben.

Jede elektrische Maschine besteht aus einem Rotor, dem rotierenden Teil, in dem die mechanische Rotationsenergie gespeichert wird, und einem Stator, an welchem dieser Rotor montiert ist. Die am weitesten verbreitete Variante ist jene, die den Rotor innen trägt und den Stator außen, so etwas nennt man Innenläufer. Das Pendant dazu ist der Außenläufer. Im Folgenden werden wir uns auf den Innenläufer konzentrieren.

Der Stator der Maschine trägt Wicklungen, welche jeweils nicht zu vernachlässigbare Werte der Induktivität und des Widerstandes tragen. Im Betriebsfall führen diese Wicklungen in einer Maschine, die mit Wechselspannung betrieben wird, elektrischen Strom. Dieser Strom ruft nach dem Durchflutungssatz ein magnetisches Feld hervor. Durch spezielle geometrische Anordnung der Wicklungen, des magnetischen Materials und mittels Wechselrichterspeisung kann dieses Feld in gewissen Grenzen beliebig geformt werden.

Dieses Magnetfeld wiederum ruft Ströme in geschlossenen elektrischen Kreisen - wie der Kurzschlusskäfig einer Asynchronmaschine - hervor und bewirkt folglich eine gerichtete

Lorentzkraft. Die Lorentzkraft wirkt in einer elektrischen rotierenden Maschine immer in tangentialer Richtung. So wird eine Änderung der Rotationsgeschwindigkeit erzwungen. Folglich kann man auch jeden beliebigen erlaubten Zustand, welcher durch die Maschinengleichungen möglich erscheint, prinzipiell erreichen. Nicht erlaubte Zustände wären etwa Überspannungen oder das Überschreiten der maximal erlaubten Drehzahl. Hierbei können Schäden an der Maschine auftreten.

2.2 Normierung und Raumzeigerrechnung

Die mathematische Beschreibung elektrischer Maschinen erschließt sich mittels der Raumzeigerrechnung. Hierbei werden elektrodynamische, räumlich sinusförmig verteilte Größen mithilfe komplexer Zeiger ausgedrückt.

Diese komplexen Zeiger sind mathematisch gesehen nichts anderes als komplexe Zahlen, visualisierbar in der Gauß'schen Zahlenebene (siehe Abb. 2.2).

In dieser Ebene legt man die reelle Zahlenachse auf die x-Achse, die imaginäre Zahlenachse auf die y-Achse, also senkrecht zur reellen. Eine komplexe Zahl kann nun als Zeiger (Verbindung zwischen dem Nullpunkt oder Ursprung und einem definierten Punkt) in dieser Ebene interpretiert werden. Die Spitze des Zeigers repräsentiert die komplexe Zahl selbst, die reellen und die imaginären Koordinaten sind abzulesen. Die Länge c des Zeigers gibt den Betrag

$$c = |\underline{z}| = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (\text{Gl. 2.8})$$

der komplexen Zahl

$$\underline{z} = a + jb \quad (\text{Gl. 2.9})$$

an, der mit der reellen Achse eingeschlossene Winkel θ das

Argument

$$\theta = \angle \underline{z} = \arg(\underline{z}) = \tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right) \quad (\text{Gl. 2.10})$$

der komplexen Zahl an. Eine mit einem Unterstrich versehene Größe ist als komplex zu betrachten, ihr Definitionsbereich erstreckt sich demnach über die gesamten komplexen Zahlen \mathbb{C} .

Die komplexe Einheit j ist definiert durch

$$j^2 = -1 \text{ bzw. } j = \sqrt{-1}. \quad (\text{Gl. 2.11})$$

Eine zusätzliche Erleichterung liefert die Euler'sche Formel

$$c \cdot e^{j\theta} = c \cdot \cos(\theta) + jc \cdot \sin(\theta) = c \cdot [\cos(\theta) + j \cdot \sin(\theta)]. \quad (\text{Gl. 2.12})$$

Durch sie erhält man den Zusammenhang zwischen der polaren und der kartesischen Darstellung der komplexen Zahlen. Benötigt werden zwar beide Darstellungen, einfacher rechnen lässt sich jedoch oft mit der polaren Darstellung der Form $c \cdot e^{j\theta}$. Bei einer Multiplikation zweier komplexer Zahlen werden die Winkel addiert, da sie im Exponenten stehen und die Beträge multipliziert, da diese durch den Vorfaktor definiert sind (Gl. 2.13).

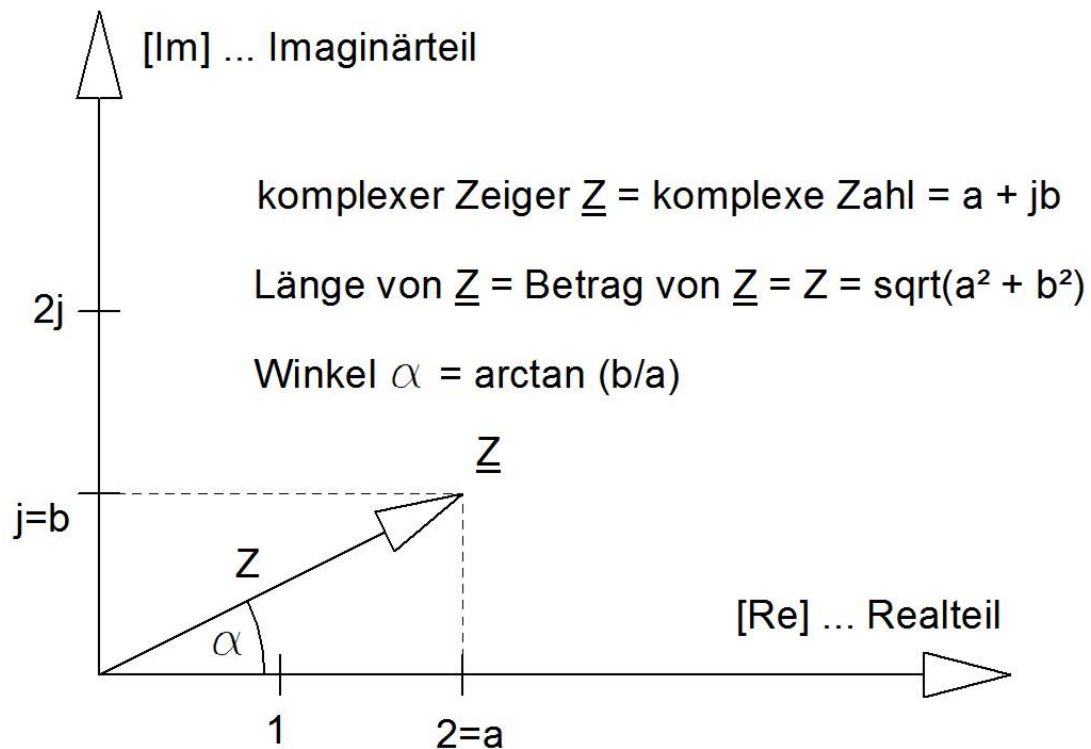


Abb. 2.2: komplexer Zeiger; hier Beispiel $\underline{Z} = 2 + j = Z e^{j\alpha} \approx \sqrt{3} e^{j26,6^\circ}$;

$$\underline{Z} = a + jb = (a^2 + b^2)^{1/2} \cdot e^{j\alpha} \quad \text{mit } \alpha = \tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right) \quad (\text{Gl. 2.13})$$

Der linke Ausdruck der Gl. 2.13 gibt die kartesischen Koordinaten wieder, der rechte wird für das Rechnen im Polarkoordinatensystem verwendet.

Das Beschriebene können wir nun auf eine elektrische Maschine in Form von Raumzeigern anwenden.

Wichtige Raumzeiger bei elektrischen Maschinen sind:

- der komplexe Spannungsraumzeiger \underline{U}
- der komplexe Stromraumzeiger \underline{I}
- der komplexe magnetische Flussverkettungsraumzeiger $\underline{\Psi}$

Diese Größen sind miteinander über die spezifischen Maschinengleichungen [(Gl. 2.18-22); herzuleiten aus dem Ersatzschaltbild (Abb. 2.4)], sowie über die mechanischen Gleichungen (Gl. 2.23) und (Gl. 2.24) verknüpft.

Es existieren in elektrischen Maschinen somit folgende weitere relevante Zustandsgrößen, welche reelle Variablen sind:

- der mechanische Drehwinkel γ
- die mechanische Winkelgeschwindigkeit Ω
- die Zeit t
- das Drehmoment M

Feste Parameter elektrischer Maschinen sind:

- elektrische Widerstände R_i
- elektrische Induktivitäten L_i
- elektrische Impedanzen Z_i
- Zeitkonstanten T_i
- der Streukoeffizient der Maschine σ
- das Trägheitsmoment J

Das i im Index der Parameter soll auf eine sinnvolle Beschriftung dieser Werte hinweisen und andeuten, dass sie öfters in ein und derselben Maschine vorkommen können.

Als einfaches Beispiel wie man einen Raumzeiger berechnen kann, betrachte man etwa die mathematische Darstellung der Spannung an den Maschinenklemmen (zur Berechnung des komplexen Spannungsraumzeiger) zum Zeitpunkt t . Sie setzt sich aus den drei Strangspannungen, welche praktisch meist messbar sind, folgendermaßen zusammen:

$$\underline{U} = \frac{2}{3} (\underline{u}_1 + \underline{u}_2 \underline{a} + \underline{u}_3 \underline{a}^2) \quad \text{mit} \quad \underline{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}} = e^{j120^\circ} \quad (\text{Gl. 2.14})$$

wobei

\underline{U} ... Klemmenspannung zum Zeitpunkt t ,

u_{1,2,3} ... zeitabhängige Strangspannungen;

Die jeweilige 120°-Phasenverschiebung der Strangspannungen rührt wiederum vom Dreiphasennetz her. Die drei Ströme und Spannungen sind jeweils zeitlich zueinander um 120° (einer kompletten Oszillation) phasenverschoben.

Dieselbe Gleichung (Gl. 2.14) gilt auch äquivalent für den Stromraumzeiger und seine zugehörigen Strangströme der dreiphasigen Maschine.

Dem magnetischen Flussverkettungsraumzeiger $\underline{\Psi}$ lassen sich nicht so einfach von außerhalb der Maschine messbare Stranggrößen zuordnen. Doch auch er spiegelt wichtige mathematische und physikalische Sachverhalte wider, ist Teil der Gleichungen (Kapitel 2.3 – Maschinengleichungen der ASM) und veranschaulicht die Feldverteilung in der Maschine. Er zeigt die in Richtung von einem der beiden betragsmäßigen Maxima des Magnetfeldes der 2-poligen Ersatzmaschine, welches an der mechanischen Kraftentwicklung - neben dem Strom durch die Wicklungen - beteiligt ist.

Konventionsgemäß legen wir nun die reelle Achse der Gauß'schen Zahlenebene mit der Richtung des komplexen Spannungsraumzeigers der Statorspannung zusammen.

Es ergibt sich folgendes Bild:

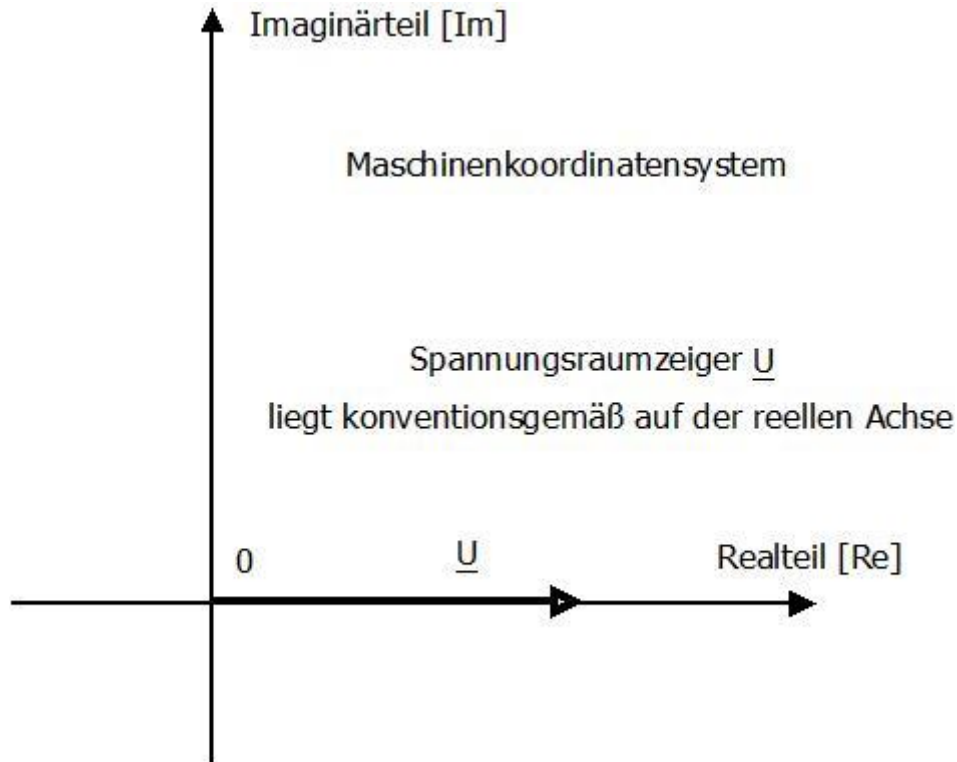


Abb. 2.3: Raumzeiger im statorspannungsfesten KOS als komplexe Zahl

Dabei ist eine Besonderheit erkennbar: das Maximum des Betrages der räumlich sinusförmigen Verteilung von physikalischen Größen in der zweipoligen Ersatzmaschine, fällt immer genau in die Richtung des zugehörigen Raumzeigers in der komplexen Ebene (welche nach Festlegung starr mit dem Koordinatensystem der Maschine verschmolzen wurde).

Wie bereits erwähnt, liefert beispielsweise der magnetische Flussverkettungsraumzeiger $\underline{\Psi}$ hierbei eine anschauliche Erklärung.

Seine radial sinusförmige magnetische Feldverteilung besitzt, wenn der komplexe Vektor (der Raumzeiger) auf Argument Null steht, ihr Maximum bzw. Minimum bei 0 und n (Fall Polpaarzahl $p=1$).

Man erkennt, dass eine genaue Berechnung nur bei räumlich sinusförmig verteilten Größen möglich ist und ansonsten nur eine gröbere Grundwellenberechnung stattfinden kann. Dies hat jedoch nichts mit der zeitlichen Verteilung zu tun. Es können mit der Raumzeigerrechnung also sowohl eingeschwungene bzw. stationäre Vorgänge, als auch transiente Vorgänge (Einschwingvorgänge) berechnet werden.

Eine zusätzliche Normierung der Größen spielt eine vereinfachende Rolle für die Übersicht und somit auch für die Berechnung. Allgemein bedeutet die Normierung auf eine Größe X ein Beziehen auf eine so genannte Bezugsgröße X_{BEZ} in der Form

$$x = X / X_{BEZ} \quad (Gl. 2.15)$$

sodass die normierte Größe x im Zahlenbereich zwischen 0 und 1 liegt, sofern die Bezugsgröße so gewählt wird, dass die Werte 0 und 1 im extremsten Fall erreicht werden können. Dies hat den Vorteil, dass - egal mit welcher normierten Zahl multipliziert wird - das Ergebnis ebenfalls sofort normiert wird, folglich auch im Bereich zwischen (inklusive) 0 und 1 zu liegen kommt. Für die

Rückrechnung benötigt man also nur noch die Multiplikation mit der zugehörigen Bezugsgröße.

Folgende Formelzeichen werden für die normierten Größen verwendet:

u ... normierte Spannung

i ... normierter Strom

ψ ... normierte magnetische Flussverkettung

γ ... normierter Drehwinkel

ω ... normierte Winkelgeschwindigkeit

τ ... normierte Zeit

m ... normiertes Drehmoment

r ... normierter Ohm'scher Widerstand

c ... normierte Kapazität

l ... normierte Induktivität

z ... normierte Impedanz

T ... normierte Zeitkonstante

Der normierte Streukoeffizient σ ist dimensionslos und als Koeffizient bereits von 0 bis 1 normiert, er wird hier der Vollständigkeit halber erwähnt.

Diese normierten Größen sind dimensionslos, ganz im Gegensatz zu den verwandten, nicht normierten physikalischen Größen. Die

Bezugsgröße muss somit zwingender Weise dieselbe Dimension (physikalische Einheit) wie die zu normierende Größe besitzen.

Nun bleibt die Frage, welche Werte als Bezugswerte zu wählen sind. Um etwa im Bereich von Null bis zum Bezugswert zu bleiben, bezieht man immer auf Spitzenwert bei Nennbedingungen. Eine sinusförmige Spannung, welche an der Maschine bei Nennspannung U_N (Effektivwert) anliegt, besitzt den Spitzenwert

$$\hat{U} = U_N \cdot \sqrt{2} = U_{BEZ} \quad (\text{Gl.2.16})$$

Analoges gilt für den Strom. Die Bezugsimpedanz Z_{BEZ} ergibt sich aus Division von Bezugsspannung und Bezugsstrom, äquivalent zur Formel für die elektrische Impedanz:

$$Z_{BEZ} = U_{BEZ} / I_{BEZ} \quad (\text{Gl.2.17})$$

So lassen sich auch alle anderen oben erwähnten Bezugsgrößen, entweder aus Maximalwert oder mittels Formel abgeleitet, errechnen.

2.3 Die Maschinengleichungen der Asynchronmaschine

Die Asynchronmaschine (ASM) ist eine der vier Grundbauarten elektrischer Maschinen. Neben ihr existieren noch die Gleichstrommaschine (GM), die Synchronmaschine (SM) und die Permanentmagnetsynchronmaschine (PSM). Im weiteren Sinne wird auch der Transformator dazugezählt, obwohl dieser keine rotierende elektrische Maschine ist. Wie auch die Synchronmaschinen wird die ASM mit Wechselstrom, in unserem Fall dreiphasig, betrieben.

Sie bietet den Vorteil eines einfachen mechanischen Aufbaus mit vergleichsweise billigen Materialien, zusätzlich verfügen diese Maschinentypen über ein hohes Anlaufmoment bei gleichzeitig geringem Anlaufstrom.

Dies und andere vorteilhafte Eigenschaften gegenüber anderen Bauweisen haben sie zum am meisten verwendeten Typen für Antriebe (Motoren) gemacht.

Zusätzlich lässt sich eine ASM noch als doppelt gespeiste Maschine realisieren, wenn eine zusätzliche Speisung von der Rotorseite her stattfindet.

Meist ist sie als Innenläufer konstruiert, der Rotor befindet sich dabei innen.

Man unterscheidet zwei Bauweisen, einerseits den Schleifringläufer, andererseits den Kurzschlusskäfigläufer. Für weitere Informationen, wie detaillierte Ansichten der beiden Bauarten, siehe [Q1, S.148].

Beim Schleifringläufer, der Variante mit erhöhtem Verschleiß und somit höheren Wartungskosten, wird die elektrische Energie

mittels Schleifringen auf den Rotor übertragen. Er wurde mit dem Aufkommen moderner Frequenzumrichter größtenteils aus technischen Anwendungen eliminiert. Ohne Umrichter würde man nur ein starres, rein von der Polpaarzahl abhängiges, Drehzahl-Netzfrequenz-Verhältnis realisieren können.

Der Kurzschlusskäfigläufer besitzt keine (inneren) rotierenden Wicklungen, das Windungssystem wird durch einen Kurzschlusskäfig aus elektrisch leitfähigem Material ersetzt (z.B. Kupfer, Aluminium). Er vermittelt sein Drehmoment über diesen Kurzschlusskäfig. Dieser ist ein Zylinder, welcher als Rotor fungiert, und an beiden Bodenflächen je einen durchgehenden Metallring besitzt. Diese beiden Ringe sind durch ebenfalls leitfähige Stäbe (entlang des Zylindermantels) miteinander verbunden, welche in ein (magnetisch leitfähiges) Blechpaket eingelassen sind. Die Stäbe sind meist leicht schräg eingesetzt, um günstigere Anlaufbedingungen zu garantieren.

Das vom Stator herrührende Magnetfeld induziert im Käfig elektrische Spannungen. Diese sind durch die gemeinsame Verbindung elektrisch kurzgeschlossen. Somit können Ausgleichsströme fließen, welche den Rotor in Bewegung versetzen.

Gehen wir nun, nach dieser prinzipiellen Erläuterung der Funktionsweise, auf die mathematischen Gleichungen dieser speziellen Maschine ein.

Werfen wir dazu einen Blick auf das Raumzeigerersatzschaltbild der ASM (Abb. 2.4).

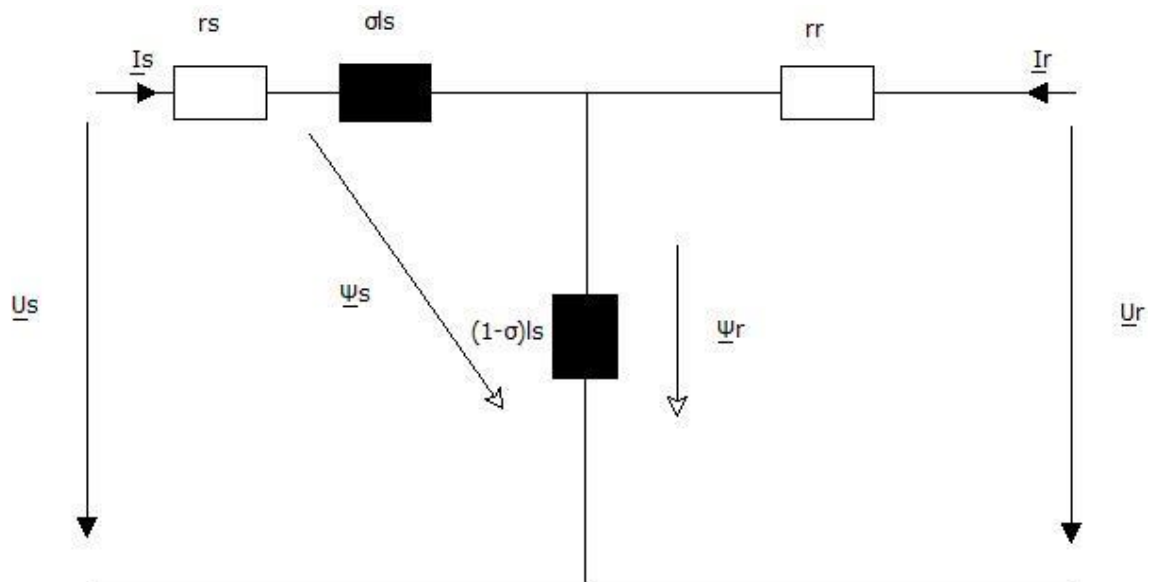


Abb. 2.4.: Raumzeiger-ESB der ASM mit statorseitigem Streuparameter [Beschriftung wie in den folgenden Gleichungen (Gl. 2.18 - 21)].

Aus diesem Ersatzschaltbild werden nun die Maschinengleichungen angeschrieben.

Es handelt sich dabei um die so genannten Spannungs- und Flussverkettungsgleichungen der Asynchronmaschine in normierter Form:

$$\underline{u}_S(\tau) = \underline{i}_S \cdot r_S + j\omega_K \cdot \underline{\psi}_S + \frac{d\underline{\psi}_S}{d\tau} \quad (\text{Gl. 2.18})$$

$$\underline{u}_R(\tau) = \underline{i}_R \cdot r_R + j(\omega_K - \omega_m) \cdot \underline{\psi}_R + \frac{d\underline{\psi}_R}{d\tau} \quad (\text{Gl. 2.19})$$

$$\underline{\psi}_S = l_S \cdot \underline{i}_S + l_S \cdot (1 - \sigma) \cdot \underline{i}_R = \underline{\psi}_R + (\sigma \cdot l_S) \cdot \underline{i}_S \quad (\text{Gl. 2.20})$$

$$\underline{\psi}_R = l_S \cdot (1 - \sigma) \cdot (\underline{i}_S + \underline{i}_R) \quad (\text{Gl. 2.21})$$

Wobei

S, R in den Indizes ... Stator, Rotor

ω_K ... Winkelgeschwindigkeit des Bezugskoordinatensystems

ω_m ... mechanische Winkelgeschwindigkeit

Die restlichen Größen sind Kapitel 2.2 (Normierung und Raumzeigerrechnung) zu entnehmen.

Die mit dem Unterstrich versehenen komplexen Größen können, wie im vorigen Kapitel beschrieben, als Raumzeiger interpretiert werden.

In [Q1], ab S.158, findet man die Herleitung der vier Maschinengleichungen.

Mit diesem Gleichungssatz lassen sich nun alle elektrisch relevanten Größen in einer Asynchronmaschine berechnen, sofern wir zuvor durch Messung die Maschinenparameter bestimmt und die Ströme und Spannungen gemessen haben.

Wir hantieren hier also mit Stator- und Rotorspannungen, sowie – strömen und Verkettungsflüssen als variable elektrische Größen, abhängig vom Betriebszustand.

Die Winkelgeschwindigkeit ist allgemein definiert als die zeitliche Ableitung des zurückgelegten Rotationswinkels, ihre Einheit ist daher rad/s oder °/s.

Die Gleichungen lassen sich aus dem Raumzeiger-Ersatzschaltbild der Maschine und den elementaren elektrischen Zusammenhängen mathematisch ableiten.

Wie nun die Werte für die Winkelgeschwindigkeiten zu wählen sind, ist abhängig vom verwendeten Bezugskordinatensystem. Dieses wird meist entweder als Stator-, oder als Rotorkordinatensystem gewählt (ist aber im Grunde beliebig wählbar).

In diesen Koordinatensystemen ruht entweder der Stator, oder der Rotor. Die Art der Anwendung entscheidet, welche die rechnerisch einfachere Variante darstellt. Grundsätzlich lässt sich mit beiden oder eben einem anderen, beliebig gewählten Bezugssystem rechnen (etwa einem rotorflussfesten System).

Gehen wir nun beide Fälle der Wahl des Koordinatensystems durch:

Für das statorfeste Koordinatensystem wählen wir für die Winkelgeschwindigkeit $\omega_K = 0$ (nicht rotierendes Koordinatensystem). Damit fällt der Ausdruck $j\omega_K \cdot \underline{\psi}_S$ in Gleichung (Gl.2.18) weg. Die mechanische Winkelgeschwindigkeit ω_m bleibt erhalten, an der Gleichung ändert sich an dieser Stelle folglich nichts.

Wählt man ein rotorfestes Koordinatensystem, setzt man $\omega_K = \omega_m$. Dieses Koordinatensystem rotiert zum ruhenden, statorfesten Koordinatensystem genau mit der mechanischen Winkelgeschwindigkeit. Somit fällt der Ausdruck $j(\omega_K - \omega_m) \cdot \underline{\psi}_R$ in Gleichung (Gl.2.19) weg.

Zusätzlich benötigt man für die vollständige Beschreibung der Asynchronmaschine das auf den Rotor wirkende (zeitlich veränderliche) Drehmoment $m_R(\tau)$.

Dieses mechanische Moment auf den Rotor, welches einer rotatorischen Kraft entspricht, entsteht nach folgender Regel (normierte Form):

$$m_R(\tau) = -\text{Im}[\underline{i}_S^* \cdot \underline{\psi}_S] = -\text{Im}[\underline{i}_S^* \cdot \underline{\psi}_R] = \text{Im}[\underline{i}_R^* \cdot \underline{\psi}_R] \quad (\text{Gl. 2.22})$$

(ein „*“ neben der Variablen bedeutet, dass mit der komplex konjugierten Größe zu rechnen ist);

Dem Moment zu jedem Zeitpunkt entspricht somit graphisch die von den beiden Raumzeigern zu diesem Zeitpunkt aufgespannte Parallelogramm-Fläche.

Mit der mechanischen Gleichung der Asynchronmaschine, lassen sich beliebige, transiente Probleme lösen. Sie lautet durch Gleichsetzen der wirkenden Momente

$$\tau_m \cdot \frac{d\omega_m}{d\tau} = m_R + m_L \quad (\text{Gl. 2.23})$$

wobei

τ_m ... Anlaufzeitkonstante (gibt an, wie lange der Rotor aufgrund von Massenträgheit zur Beschleunigung von Null auf Nenndrehzahl bei Anlegen des Nennmoments benötigt)

m_L ... Lastmoment (das auf die Maschine entgegen der Antriebsrichtung wirkende Moment durch das an der Antriebswelle hängende mechanische System)

Der oft benötigte Zusammenhang zwischen Drehmoment und Drehzahl, lässt sich durch diese Gleichungen ermitteln. Bei Umrichterspeisung, wie sie beim Arbeitsprüfstand verwendet wurde, und feldorientierter Regelung, regelt man meist auf konstanten Rotorfluss [Q1]. Da sich das Moment aus dem negativen Imaginärteil von Rotorfluss multipliziert mit dem komplex konjugierten Raumzeiger des Statorstromes ergibt, regelt

man das Moment in diesem Fall also mit Hilfe des Statorstromraumzeigers.

Eine hier noch erwähnenswerte Größe ist der so genannte Lagewinkel γ . Mit dessen Kenntnis kann man stets vom rotorfesten ins statorfeste Koordinatensystem und zurück gelangen. Dies ist durch die einfache Multiplikation der Raumzeiger mit dem Ausdruck $e^{j\gamma}$ (rotorfest in statorfest) bzw. $e^{-j\gamma}$ (statorfest in rotorfest) zu erreichen, was bei komplexen Zahlen einer Addition des Winkels entspricht.

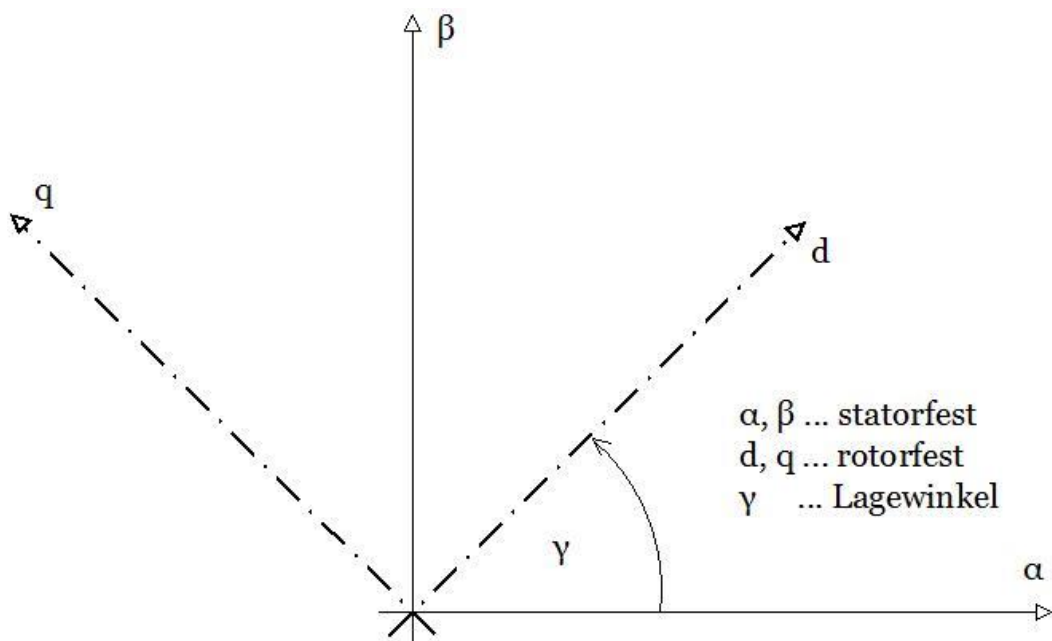


Abb. 2.5: Lagewinkel und beide Koordinatensysteme (rotorfest und statorfest)

2.4 Frequenzumrichter

Hier betrachten wir noch einmal den verwendeten Zwischenkreisumrichter (Abb. 2.6 und Abb. 2.7) genauer, dessen Kernstück in unserem Fall eine selbstgeführte IGBT-Halbbrückenschaltung ist. Dieser Umrichter trägt am Systemeingang die so genannte Zwischenkreisspannung U_{zk} . Sein Ausgangsstrom ist gleich dem Eingangsstrom in die Maschine. Mit drei um je 120° phasenverschobenen Sinusströmen, kann ein stationär rotierender Betrieb der angeschlossenen Maschine aufrecht erhalten werden. Die Maschine wird mit Spannungen geregelt, der Umrichter mit Zwischenkreisspannung versorgt. Er wird von der programmierten Regelung angesteuert und ist so gebaut, dass er in etwa den gewünschten Strom in die elektrische Asynchronmaschine einprägen kann, um den gewünschten Betriebsfall korrekt ausregeln zu können.

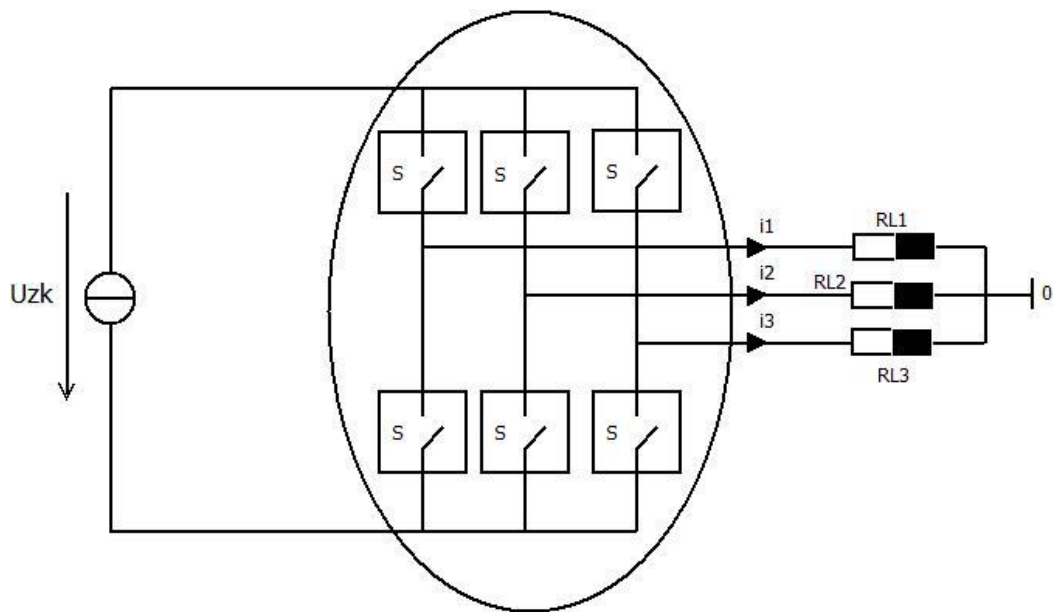


Abb. 2.6: Prinzipielles Schaltbild des Zwischenkreisumrichters:
 Der Zwischenkreisumrichter wird dieser schematischen
 Darstellung durch den umrundeten Bereich gekennzeichnet,
 Beschriftung wie in Abb. 2.1;



Abb. 2.7: Fotos des verwendeten Frequenzumrichters

2.5 Regelung der Asynchronmaschine

Um die ASM regeln zu können, sollten wir zuvor ihre verschiedenen Betriebszustände, nämlich Leerlauf, den unerregten Fall und den Lastfall kennen.

Im Leerlauf wird kaum Energie verbraucht, der Rotor rotiert mit derselben Geschwindigkeit wie das Feld in der Maschine. Im Leerlauf verschwindet somit auch das Drehmoment, demnach ist die Drehzahl konstant (Leerlaufdrehzahl). In der Drehmoment-Drehzahlkennlinie der Asynchronmaschine befindet sich dieser Punkt bei etwas höherer Drehzahl als das Kippmoment (maximales Drehmoment).

Im unerregten Zustand existiert kein Statorfeld, der Rotor ist demnach stromlos, er befindet sich daher in Ruhe und auf ihn wirkt keine Kraft.

Beim Lastfall bewirkt nun eine bestimmte Last eine Kraft an der Welle der Maschine. Beim verwendeten Prüfstand wurde dies durch eine zweite, an die Welle gekoppelte, elektrische Asynchronmaschine erreicht. Die Drehzahl der Fehlersimulationsmaschine wird dann bis zum gewünschten Betriebspunkt erhöht.

Nun gibt es zwei unterschiedliche Regelungsarten für die ASM, einerseits die Spannungs-Frequenz-Steuerung, andererseits die feldorientierte Regelung, welche in dieser Arbeit zur Regelung verwendet wurde.

Die feldorientierte Regelung orientiert sich am Raumzeigermodell, wobei die rotorflussparallele Stromkomponente zur

Flussaufbringung und die Normalkomponente des Statorstromes auf den Rotorflussraumzeiger der Drehmomentbildung dienen [siehe auch (Gl. 2.22)].

Dies geschieht über einen Regelkreis mithilfe von Stromsensoren an der Maschinenversorgung, aus denen man den Statorstromraumzeiger berechnet.

3 Magnetische Nutkeile

Um verschiedenste unzulässige Betriebszustände in elektrischen Maschinen zu detektieren, hervorgerufen etwa durch falsche Anwendung, Alterung oder Abnutzung (Verschleiß), kann man beispielsweise die Ströme und Spannungen mit Hilfe eines Sensors ermitteln, um so auf die komplexen Impedanzen zu schließen. Mit diesen Werten lassen sich Fehler mit gewisser Wahrscheinlichkeit vorhersagen.

Dabei existieren eine Reihe von Fehlern, wie etwa Kurzschlüsse (einphasig, zweiphasig, dreiphasig; gegen Nullpotential oder gegen andere Leitungen), thermische Überlastungen, Windungsschlüsse oder kleine Leckströme – etwa durch alternde oder schlechte Isolierungen. Zusätzlich kann zwischen Rotor- und Statorfehler unterschieden werden.

Eine Fehlerart, die wir hier genauer untersuchen wollen, ist die der fehlenden Nutkeile im Statorblock elektrischer Asynchronmaschinen. Diese magnetischen Nutkeile befinden sich zwischen dem Luftspalt und den Erregerwicklungen, um den magnetischen Fluss besser zu leiten und folglich Verluste zu minimieren. Hauptsächlich aber minimieren sie Oberwellen (höhere Harmonische) im magnetischen Feld und somit auch jene im Strom (ist besonders bei Netzspeisung wichtig). In den anschließenden Kapiteln wird detailliert darauf eingegangen.

3.1 Grundlagen

Nutkeile (engl. *slot wedges*) sind in vielen Asynchronmaschinen höherer Leistung zu finden. Sie bestehen aus magnetisch gut leitendem Material (wie die meistens verwendeten, gepressten Eisenspäne), sind jedoch dadurch auch meist sehr spröde und anfällig auf mechanische Belastung. Ihren Namen verdanken sie den Nuten im Stator der Maschine, also kleinen, länglichen Einkerbungen direkt über den einzelnen Wicklungen der Erregerwicklung. Sie fungieren als eine Art Keil und füllen diese Nuten aus. Über jeder Nut sitzt ein solcher Nutkeil - meist mechanisch befestigt. Dies ist schematisch Abb. 3.1 zu entnehmen.

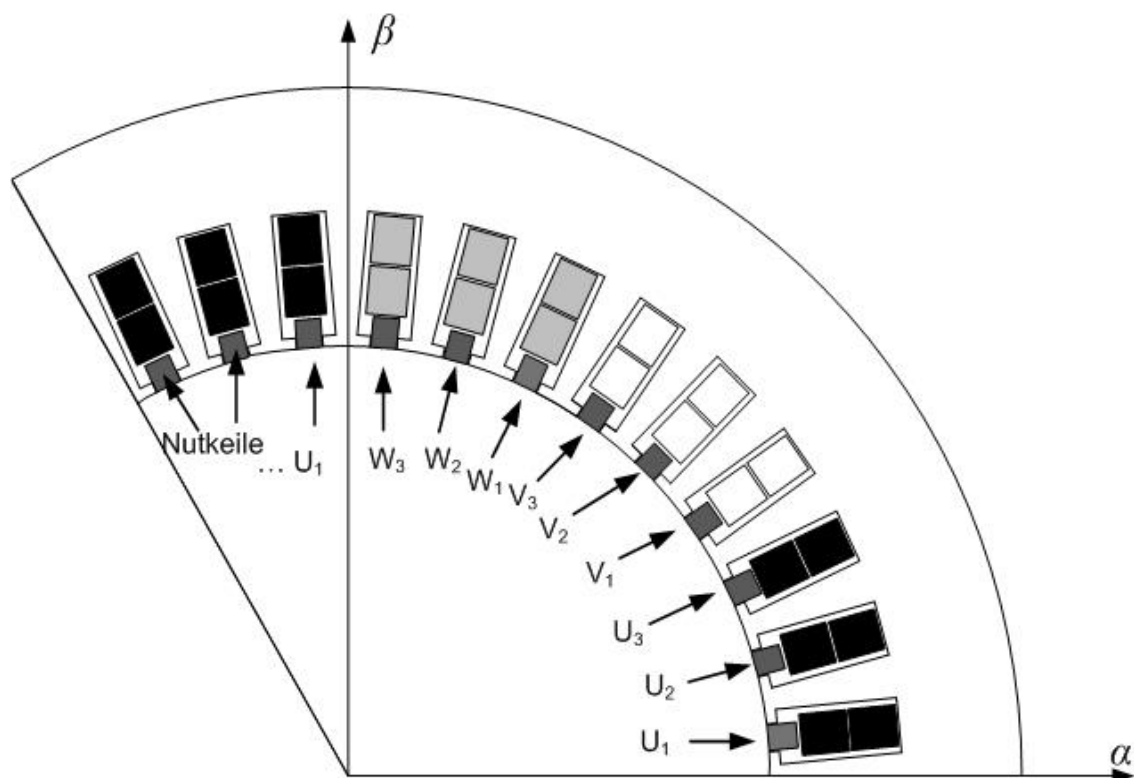


Abb. 3.1 [Q2]: Nutkeile im Maschinenquerschnitt: die magnetisch hochpermeablen Nutkeile sind gekennzeichnet; pro Phase (U,V,W) und Pol existieren bei unserer Versuchsmaschine je drei Windungen und Nutkeile; die Maschine ist sechspolig (drei Polpaare, $p=3$);

3.2 Zur Detektion fehlender Nutkeile

Aufgrund von Abnutzungserscheinungen, wegen ihrer starken Sprödigkeit und durch das Alter lösen sich diese Nutkeile häufig trotz mechanischer Verankerung und teilweise zusätzlicher Befestigungstechniken oder werden in der Maschine förmlich zerstäubt. Man bemerkt mit steigendem Gebrauch und mit der Zeit also ein erhöhtes Fehlen von Nutkeilteilen bzw. kompletten Nutkeilen. Durch das starke Magnetfeld bei hoher Belastung und Drehzahl der Maschine, werden die so mechanisch locker werdenden, spröden Nutkeile vom Rotor zerstört.

Mit den Kosten für eine Erneuerung inklusive Rotorentnahme verhält es sich in der Regel so: je größer eine Maschine, desto teurer und aufwendiger gestaltet sich das Entfernen des Rotors. Besonders bei Windkraftanlagen wird solch eine Totalrevision durch die Höhenlage des Generators noch kostenintensiver. Daher ist eine eindeutige Erkennung dieser Fehlerart von außen notwendig, um kostenoptimal zu arbeiten.

Mit der in dieser Arbeit vorgestellten Art von Fehlerdetektion ist es nun möglich, den kostengünstigsten Zeitpunkt der Rotorentfernung, sowie des danach stattfindenden Nutkeiltauses zu eruieren.

Allein aus diesen Gründen ist eine Fehlererkennung sinnvoll. Zusätzlich bietet sie den Vorteil, den Zustand der Maschine genauer zu kennen, ohne die Maschine dabei öffnen zu müssen.

3.3 Methoden zur Detektion von Fehlern und Messung der Maschineninduktivität durch Anlegen der INFORM-Spannungssequenz

In diesem Abschnitt gehen wir der Frage nach, wie von außen auf fehlende oder beschädigte Nutkeile in der Maschine geschlossen werden kann.

Auf die dreiphasige, elektrische Zuleitung wird hierbei kurz eine spezielle Spannungssequenz aufgeschaltet. Die Sequenz ist somit nur sehr kurz (im ms-Bereich) anzulegen, damit der Regelkreis der Maschine störungsfrei weiterarbeiten kann und es zu keinen unerwarteten oder unbekanntem Betriebszuständen kommt.

Das Signal, welches angelegt wird, trägt den Namen INFORM-Sequenz. Damit ist das Anlegen des in folgender Abb.3.2 sichtbaren Spannungsverlaufs an die Maschine gemeint.

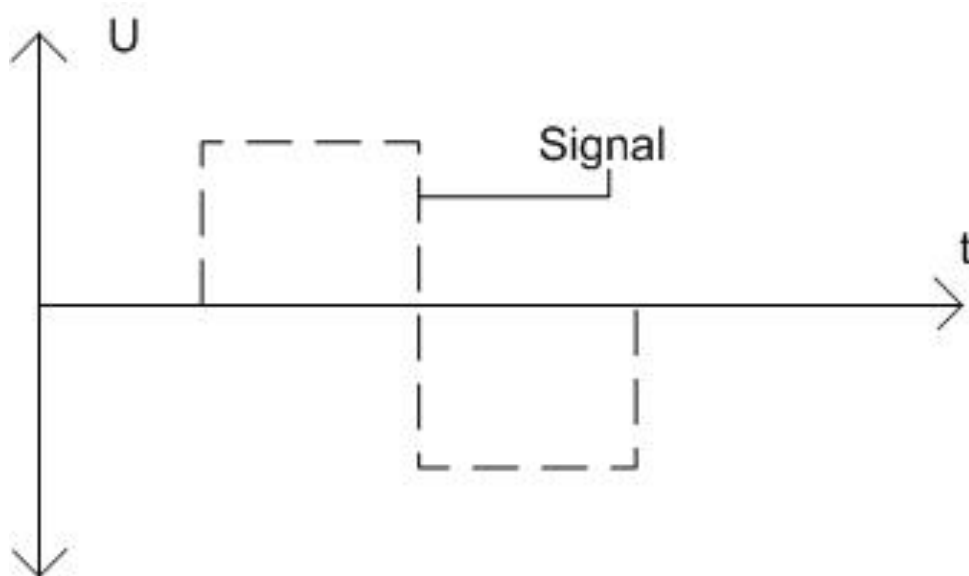


Abb. 3.2: Grundstruktur INFORM-Sequenz Spannungsverlauf

Man erkennt ein spezielles Rechtecksignal. Auf dieses Muster antwortet die Maschine aufgrund ihres komplexen Ersatzschaltbildes mit einer bestimmten transienten Stromantwort (also mit einem gewissen Stromverlauf in den selben Leitungen in der selben Zeit), die mit Hilfe von Stromsensoren zu diskreten Zeitpunkten abgetastet werden kann. Es lässt sich somit, pro Rechteck in der INFORM-Sequenz, eine gewisse Steigung des Stromes in der Zeit in der Signalantwort in jeder Phase messen. Misst man einmal den Referenzfall der kompletten, unbeschädigten Maschine, kann man durch die Änderung dieser Steigung bei einer Schädigung der Nutkeile, auf deren Ausmaß schließen.

Diese einzelnen Stromanstiege, die das Resultat der Spannungs-Rechteckimpulse (INFORM-Sequenz) sind, welche an die Maschine

gelegt wurden, geben Aufschluss über die elektrischen Größen (des Ersatzschaltbildes) der elektrischen Maschine. Dabei lassen sich Widerstände und Induktivitäten erfassen.

Durch dieses Verfahren lässt sich, die richtigen Messmethoden vorausgesetzt, demnach sowohl qualitativ, als auch quantitativ auf einen Fehler schließen. Denn ein im vorigen Kapitel (3.2 Zur Detektion fehlender Nutkeile) beschriebener Fehler - also etwa ein zusätzlicher fehlender Nutkeil - verändert immer auch die Induktivität der Maschine.

Die genaue Stromantwort einer Induktivität verläuft für konstante Spannungen - wie die einzelnen, oben gegebenen INFORM-Rechteckimpulse - exponentiell.

Die über die Zeitspanne eines Rechteckpulses gemittelte Steigung einer typischen Stromantwort einer Maschine, ist folgender Abb.3.3 schematisch zu entnehmen.

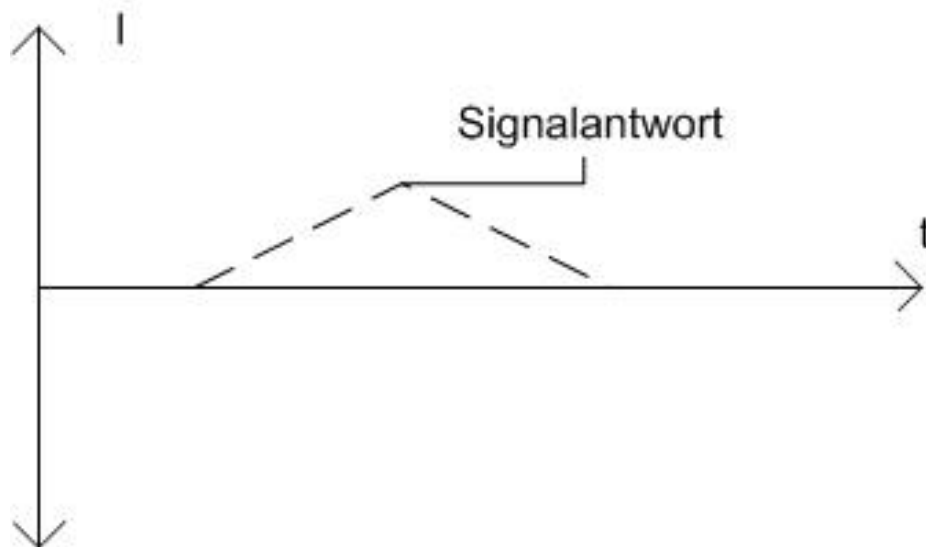


Abb. 3.3: Grundstruktur der INFORM-Stromantwort (die Abtastzeitpunkte könnten den Lücken der strichlierten Linie entsprechen, die Steigung des Stromes kann gemessen und folglich die Induktivität der Maschine errechnet werden).

Um ein übersichtliches Bild vom Sachverhalt zu gestalten, tragen wir die drei Phasenrichtungen, jede um 120° geometrisch versetzt, in ein Diagramm ein. Betrachten wir nun die Beträge der Steigungen der Stromantworten in den einzelnen Phasen als Länge eines Ortsvektors und die Phasenverschiebung der selbigen als Winkel, welcher von der betreffenden Phase abweicht, kann man die Steigung der Stromantwort einer INFORM-Sequenz als einen Punkt oder Ortsvektor einzeichnen - für jede Phase in ihrer

Richtung (oder bei gegebener Phasenverschiebung leicht abweichend davon).

Liegt ein Ensemble von Messungen vor, sprechen wir von einer Punktwolke. Diese repräsentiert die diskreten Messpunkte mehrerer Messungen der Stromantworten. Mehrere Messungen sind deshalb erforderlich, um den statistischen Abweichungen entgegenzuarbeiten, um ein möglichst genaues und zufallbefreites Messergebnis zu erhalten. Schlussendlich kann man die Messungen in den drei Phasenrichtungen addieren und man erhält ein Punktensemble, welches für alle drei Phasen spricht.

In Abbildung 5.3 etwa sieht man ein Beispiel eines solchen Diagramms. Dabei wurde der Referenzfall mit dem Fall eines fehlenden Nutkeils oberhalb einer der Wicklungen, welche von Phase U mit Strom versorgt wird, verglichen.

Man erkennt, dass die Vektorsumme der drei einzelnen Phasenstromantworten, genauso Aussagen über die betroffene Wicklung zulässt, wie die Phasenantworten selbst, da der Fehlerraum linear ist. Ein Fehler der sich zu Null addiert, bleibt weiterhin, wie wir in Kapitel 5 sehen, durch die Messung der Gesamtinduktivität erkennbar.

Die Größe der Abweichung repräsentiert die zeitliche Ableitung der Stromantwort auf die INFORM-Spannungssequenz und somit die Stärke des Fehlers, da eine Änderung der Gesamtinduktivität der Maschine (etwa ein fehlender magnetischer Nutkeil) mit einer zeitlichen Änderung der Stromsteigung ($\frac{\Delta i}{\Delta t}$) bei gleicher Spannung einhergeht.

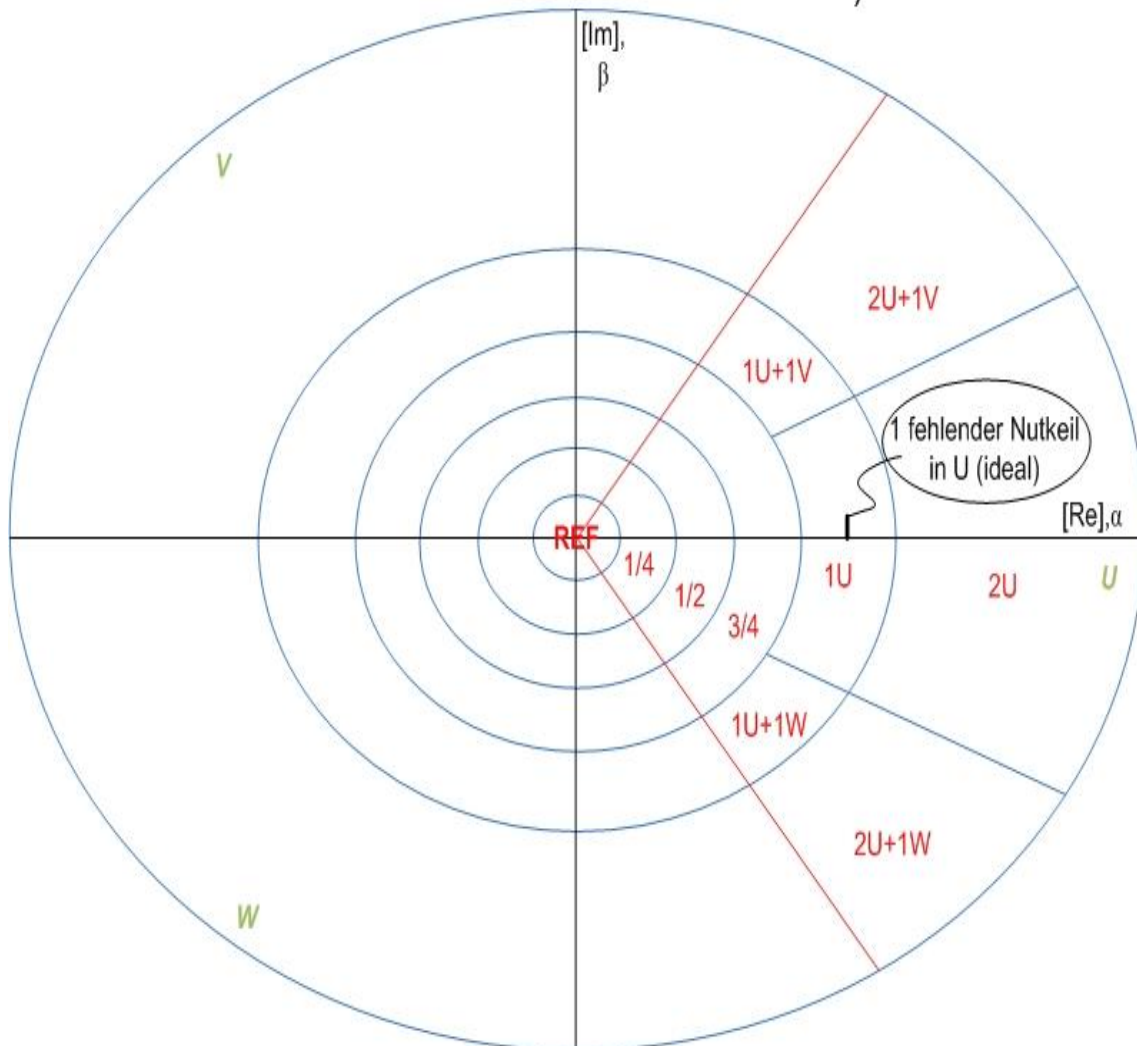
Der Winkel zeigt immer, in welcher Phase der Fehler liegt [kleine Abweichungen von den genauen Phasenrichtungen rühren von

Messfehlern her oder aber von der Lage der genauen Nut, in der der magnetische Nutkeil entfernt wurde, wie wir später noch sehen werden (Kapitel 5.2)].

Nachfolgende Abbildung 3.4 soll einen prinzipiellen Bezug zu einigen ausgewählten Fehlern und deren Veranschaulichung im Diagramm der zeitlichen Stromänderungsantworten schaffen.

- Phasenrichtungen U, V, W
- bestimmter Fehlerfall
- Achsen + Beschriftung

„Tortenstück-Schema der asymmetrischen Fehlererkennung“ (hier nur eingezeichnet für Phase U; äquivalent für die anderen beiden Phasen)



Der Kreis wird in 3 Sektoren geteilt, jedem Sektor die passende Phase zugewiesen. Diese Sektoren werden dann jeweils in Segmente unterteilt, abhängig von Phase (Winkel) und Betrag vom Referenzpunkt (also der Lage im Koordinatensystem mit dem Referenzfall als Ursprung), womit man dieses Schema, im Falle einer unsymmetrischen Nutkeilverteilung in der Maschine, als Fehlerindikator verwenden kann – man sieht sofort, um welche Art von Fehler es sich höchstwahrscheinlich handelt. Die Phasen V und W verhalten sich bezüglich der Segmenteinteilung äquivalent zu U, hierbei wird der gesamte Sektor, welcher in U-Richtung zeigt, einfach um 120° nach links (V) bzw. nach rechts (W) gedreht – die Fehlerfälle sind dann den neuen Phasen so anzupassen, dass, wenn man nach links dreht, in positiver Phasenrichtung eine Phase dazu zählt (aus U wird V, aus V W und aus W wird U), wenn man nach rechts dreht, gegen Phasenverlauf zählt (aus U wird W, aus W V und aus V U).

Abb. 3.4: „Tortenstück“-Schema; REF = Referenzmessung;

Um für die Einteilung in Abb. 3.4 möglichst genaue Werte in Form von Punkten zu erhalten, kann man eine Mittelwertbildung über alle gemessenen Elemente der x- und y-Achse in Betracht ziehen. Dies wurde mit „MATLAB“ (Firma: MathWorks) und dessen vorimplementierte „mean()“-Funktion realisiert.

Wir haben nun einen Überblick, wie die Fehlererkennung erfolgt und wie wir die Fehlerauswertung mit Hilfe eines Diagramms interpretieren können.

4 Der Prüfstand

In diesem Kapitel wird der verwendete Prüfstand und dessen Funktionen genau erklärt.

4.1 Aufbau

Das Kernstück des Prüfstandes, an dem die Messungen zwecks Nutkeil-Fehlererkennung stattfinden, ist die 11-kW Asynchronmaschine (Datenschild im Anhang A 1). Ihre Welle ist starr gekoppelt mit einer 22-kW Asynchronmaschine (A 2) mit Drehzahlregelung. Dadurch lassen sich gewünschte Drehzahlen auf die Asynchronmaschine einprägen.

Drei Stromsensoren, einer für jede Phase der Asynchronmaschine, geben der Regelung der Maschine Auskunft über den Betriebszustand und liefern zusätzlich die Strommessung für das INFORM-Signal.

Die Messung des Stromanstiegs erfolgt dabei durch Messung mehrerer Punkte in der Steigung. Da bei den darauf folgenden Kalkulationen eine lineare Interpolation ausreicht, kann eine Gerade durch die Punkte errechnet werden, was mittels Mikrocomputer und Geradengleichung erfolgt. Der Analog-Digital-Wandler hat die Funktion eines Messwandlers, und rechnet den elektrischen Spannungswert des Sensors in einen Digital-Code um, welcher wiederum den gemessenen Stromstärkewerten in Ampere entspricht. Die Steigung des Stromes nach Anlegen einer konstanten Spannung, gibt – wie bereits im vorigen Kapitel genauer erläutert – Auskunft über die Induktivität der Maschine.

Dieser Zusammenhang kann auch der erweiterten Ohm'schen Beziehung

$$u = L \cdot \frac{\partial i}{\partial t} \quad (\text{Gl. 4.1})$$

entnommen werden,

wobei

L ... Induktivität [H].

Die Energieversorgungskabel führen von der Asynchronmaschine in den Frequenzumrichter. Er versorgt diese mit den nötigen Spannungen, wie sie durch die Regelung gesetzt werden, um einen definierten Betriebszustand zu erreichen. Die Regelung arbeitet feldorientiert und benutzt das in Kapitel 2.2 beschriebene Raumzeigermodell, mit den maschinenspezifischen Parametern, wie Statorwiderstand, -Induktivität, Rotorinduktivität oder Streuparameter.

An dem Umrichter hängt, neben den Zuleitungen zur Asynchronmaschine, einerseits die Zwischenkreisspannung (Versorgung, maximal 440 V), andererseits ist er über ein Informationskabel mit der Zwischenprint per Lichtwellenleiter verbunden. Diese ist wiederum mit dem Computer verbunden, wie etwa mit dem FPGA (field programmable gate array – ein programmierbarer integrierter Schaltkreis), das für die Generierung der Signale des Frequenzumrichters verantwortlich ist, wie auch für das des INFORM-Signals.

Zur Regelung wurde die Automatisierungssoftware „LabView“ (Firma: National Instruments) verwendet. Ebenfalls mit Computer und Zwischenprint verbunden ist das D-Space-System, es wird auch regelungstechnisch benötigt. Zur Datenanalyse wurde „MATLAB“ (MathWorks) verwendet.

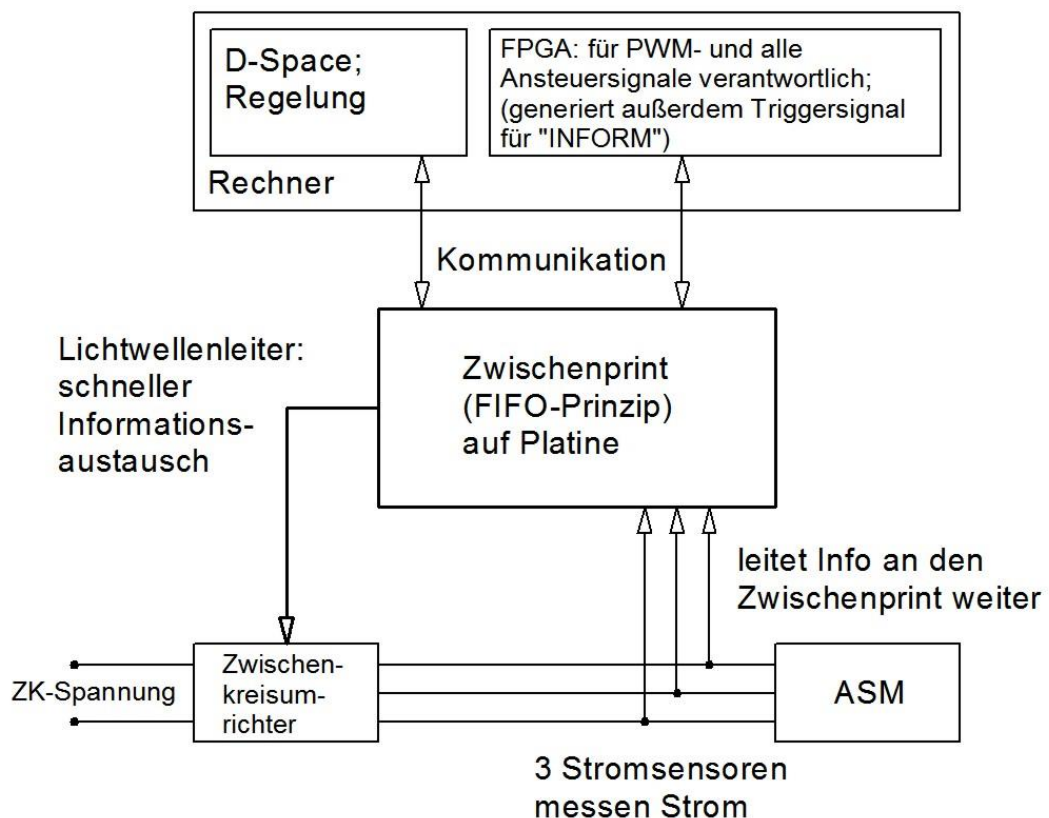


Abb. 4.1: Signalflussplan/Netzplan des Prüfstandes

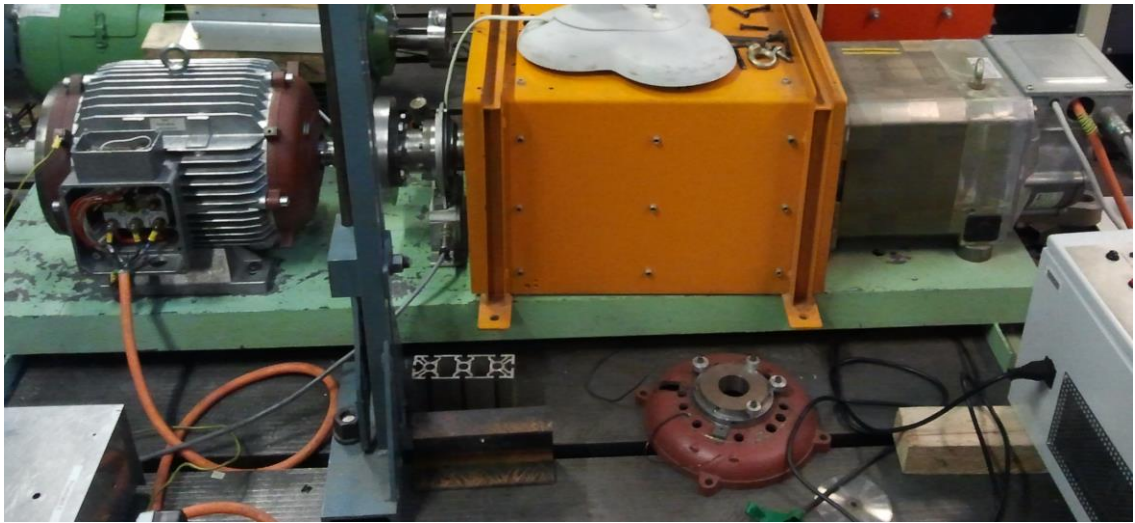


Abb. 4.2: Fotos des Prüfstandes

- oberes Bild: links ASM, Mitte: Antriebswelle, rechts neben oranger Verkleidung: Antriebs-ASM, rechts unten: Zwischenkreisumrichter, links unten: D-Space-Box;
- unteres Bild: Prüfstand (im Hintergrund) inklusive verwendetem PC;

4.2 Funktionsweise

Wie gelangen die in „MATLAB“ implementierten Daten zur Asynchronmaschine und zum Computer zurück? Voraussetzung ist die physikalische und virtuelle Verknüpfung der Komponenten Personal Computer, dessen Betriebssystem, MATLAB/Simulink-Programm, D-Space-Programm, D-Space-Box, Frequenzumrichter, Stromsensoren, Asynchronmaschine und Gleichstrommaschine mit Drehzahlregelung, wie in Abb. 4.1 erläutert.

Wollen wir nun einen Befehl vom Computer ausführen, welcher die Asynchronmaschine ansteuert, müssen wir uns für einen Betriebszustand der Asynchronmaschine entscheiden. Auf jeden Fall soll kein Moment ohne Last aufgeschaltet werden, deswegen auch die starr gekoppelte Asynchronmaschine, welche eine Last simulieren kann.

Die Maschine kann die Zustände „Last“, „Leerlauf“ oder „unerregt“ einnehmen, je nachdem ob wir eine Erregungsdurchflutung mit oder ohne Last oder keines von beiden anlegen. Im letzten Fall sorgt die gekoppelte Maschine für eine inkrementelle Drehwinkelgabe.

Ist diese Entscheidung im Sinne der Messung getroffen, der gewünschte Zustand der Maschine ausgewählt und alle Sicherheitsanforderungen erfüllt, sowie alle Verschaltungen und Zustände auf deren Richtigkeit kontrolliert, kann die Versorgungsspannung aufgeschaltet und der Umrichter freigegeben werden.

Das Freigeben erfolgt sowohl mechanisch als auch über die Software, um maximale Sicherheit zu garantieren.

Nun kann der Rechner die programmierten Daten der Regelung zur D-Space-Box weiterleiten, welche die Information für den Frequenzumrichter bereitstellt und die Messdaten, wie im Computer implementiert, aufnimmt.

Der Umrichter, welcher mit maximal 440 V Gleichspannung versorgt wird, kann nun seine gewünschte Ausgangsspannung auf die Maschine schalten. Von der Maschine werden spezielle Frequenzen benötigt, um den vorgegebenen Drehmoment-, Drehzahl- oder Lageverlauf des Rotors zu erreichen. Diese Verläufe sind konsistent mit dem Raumzeigerersatzschaltbild der Asynchronmaschine.

Hier ist der prinzipielle Aufbau der Anordnung dargestellt.
(Abb.4.3)

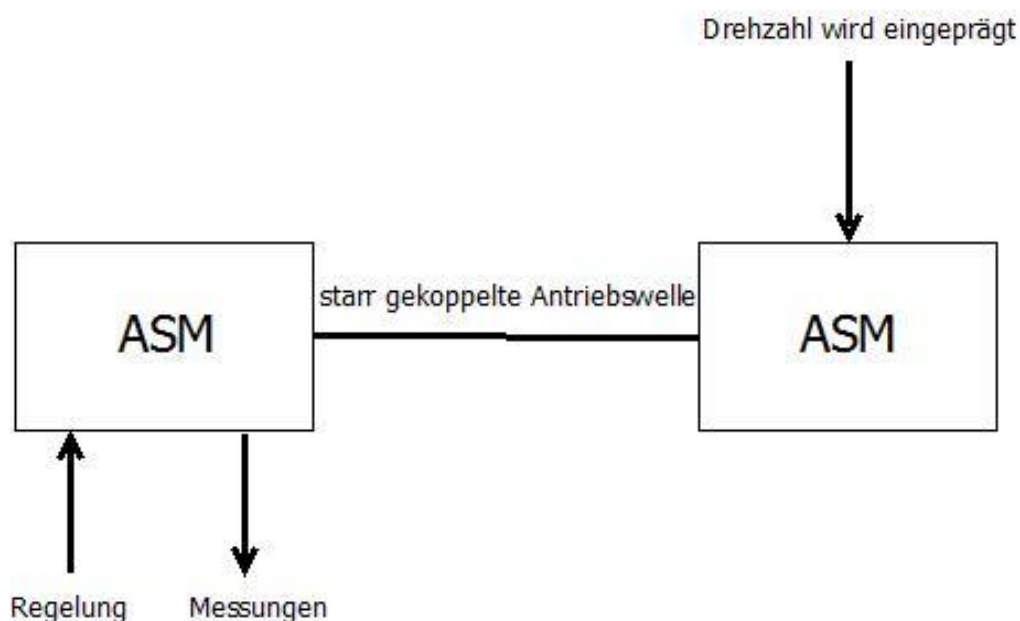


Abb. 4.3: Aufbau der Anordnung am Prüfstand

5 Messungen und Ergebnisse

Nachdem wir das prinzipielle Know-how, den Aufbau des Prüfstandes und die genaue Problematik spezifiziert haben, wenden wir uns kurz dem Maschinenaufbau, dann dem eigentlichen Kernthema zu: der Quantifizierung der Fehlererkennung. Hierbei sehen wir, in wie weit die fehlenden (Teile der) Nutkeile detektierbar sind und welche Probleme dabei gelöst werden müssen. Eine statistische Auswertung wird dann im anschließenden Unterkapitel erörtert.

5.1 Aufbau der Maschine

Die zu den Messzwecken verwendete ungesiehtete Asynchronmaschine mit einer Leistung von 11 kW ist sechspolig (Polpaarzahl $p=3$) und besteht aus 36 Nuten, also sechs Nuten pro Pol. Über jeder Nutöffnung sitzt ein magnetisch leitfähiger Nutkeil. In Abb. 3.1 sehen wir bereits einen Maschinenausschnitt, der das Bild dieser Situation noch einmal verdeutlicht.



Abb. 5.1 Die verwendete Asynchronmaschine

5.2 Simulierte Fehlerarten

Will man zwei bestimmte Fälle miteinander vergleichen, nämlich beispielweise den Referenzfall einer neuen, vollständigen (fehlerlosen) Maschine mit dem eines simulierten Fehlers der Maschine, ist es notwendig, das Diagramm der zugehörigen Stromanstiegsantworten zu vergleichen.

Vorerst ist also eine Referenzmessung durchzuführen. Wie in Abbildung 5.2 zu erkennen, ergibt sich dabei eine Punktwolke im zweidimensionalen Koordinatensystem. Diese repräsentiert die gesammelten Messdaten der Referenzmaschine, also der fehlerlosen Asynchronmaschine für den Fall „unerregt“ einer vollständigen mechanischen Umdrehung. Die Messung findet etwa alle $2,8^\circ$ der gesamten mechanischen Umdrehung statt. Das 7 Bit lange Codewort für den Lagewinkel ist also nach 128 Schritten vollständig aufgefüllt. Jeder Messung wird dabei ihre eigene, charakteristische Information des Lagewinkels zugeschrieben.

Besonders hinzuweisen ist auf die nicht zentrale oder leicht asymmetrische Lage um den Koordinatenursprung, denn nur bei völlig fehlerloser Funktion müsste der eingezeichnete, berechnete Mittelpunkt der Wolke direkt im Nullpunkt zu liegen kommen.

Da auch eine vermeintlich fehlerlose Maschine bereits einige Asymmetrien enthält, können diese durch die INFORM-Induktivitäts-(oder Stromantwort-) Messung bereits verifiziert werden. Nun wird diese Maschine als Referenzfall verwendet und die Lage des Mittelpunktes somit dem Koordinatenursprung zugewiesen.

Die kleinen anfänglichen Abweichungen sind jedoch nicht wirklich für unsere Arbeit relevant und dienen hier nur der Erklärung. Sie

werden also in den darauf folgenden Abbildungen weggerechnet, die Maschine wird idealisiert betrachtet. Dies geschieht durch Subtraktion aller Messdaten vom Referenzfall, welcher somit im Koordinatenursprung (0/0-Punkt) zu liegen kommt.

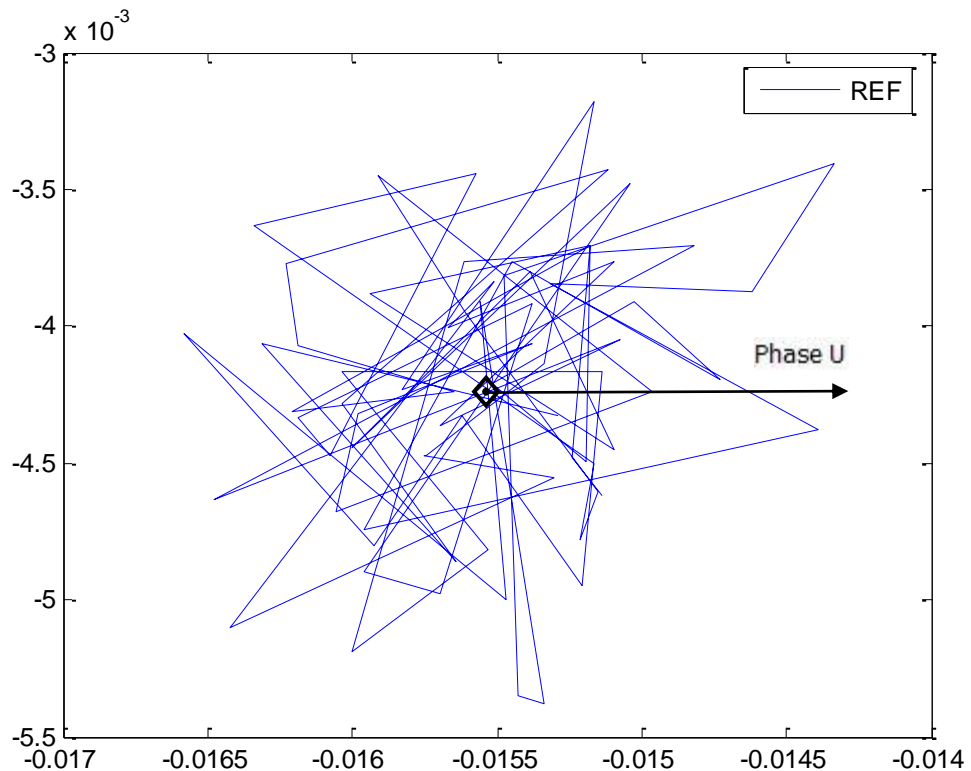


Abb. 5.2: Diagramm der Punktwolke der Stromanstiegsantworten

$\frac{\Delta i}{\Delta t}$ des Referenzfalls der quasi-symmetrischen Maschine, aufgetragen auf die Geometrie der Maschine; horizontal nach rechts verlaufend: Richtung der Phase U; dazu um jeweils 120° im Uhrzeigersinn verschoben: Richtungen der Phase V und W; Die einzelnen Messpunkte der Punktwolke wurden zur etwas anschaulicheren Darstellung mit Geraden verbunden. Das Karo

mit dem Punkt in zentraler Lage zeigt den errechneten Mittelpunkt an.

Die Phasenrichtungen und der Mittelpunkt gelten in dieser Form auch für die anderen Abbildungen mit Punktwolken.

Die Abweichung der Messpunkte um den Mittelpunkt der Messung entspricht der durchschnittlichen Größe einer solchen Punktwolke. Diese Größe variiert für die verschiedenen Messungen mit gleicher Zwischenkreisspannung (hier 440V) nur sehr geringfügig und kann daher als annähernd konstant betrachtet werden. Ein wachsender symmetrischer Fehler (gleicher Anteil von Fehlern in allen drei Phasen) verkleinert den Radius der Streuung, da sich die Induktivität der Maschine aufgrund fehlender Stücke im magnetischen Kreis) verkleinert. Er verschiebt jedoch nicht den Mittelpunkt der Punktwolke. Wir werden später (hier in Kap 5.2 und später in Kap. 5.3) noch näher auf symmetrische Fehler eingehen und mit Messdaten validieren.

In der nun folgenden Abbildung (Abb. 5.3) wird die Referenzmessung der vollständigen Maschine mit einem einfachen Fehler und zwar mit einem fehlenden Nutverschluss in seitlicher Nutlage der Phase U [in Richtung der Phase V – also U_3 (siehe Abb. 3.1)] mittels Visualisierung der INFORM-Stromanstiegsantworten (zeigt uns die Induktivität der Maschine) verglichen.

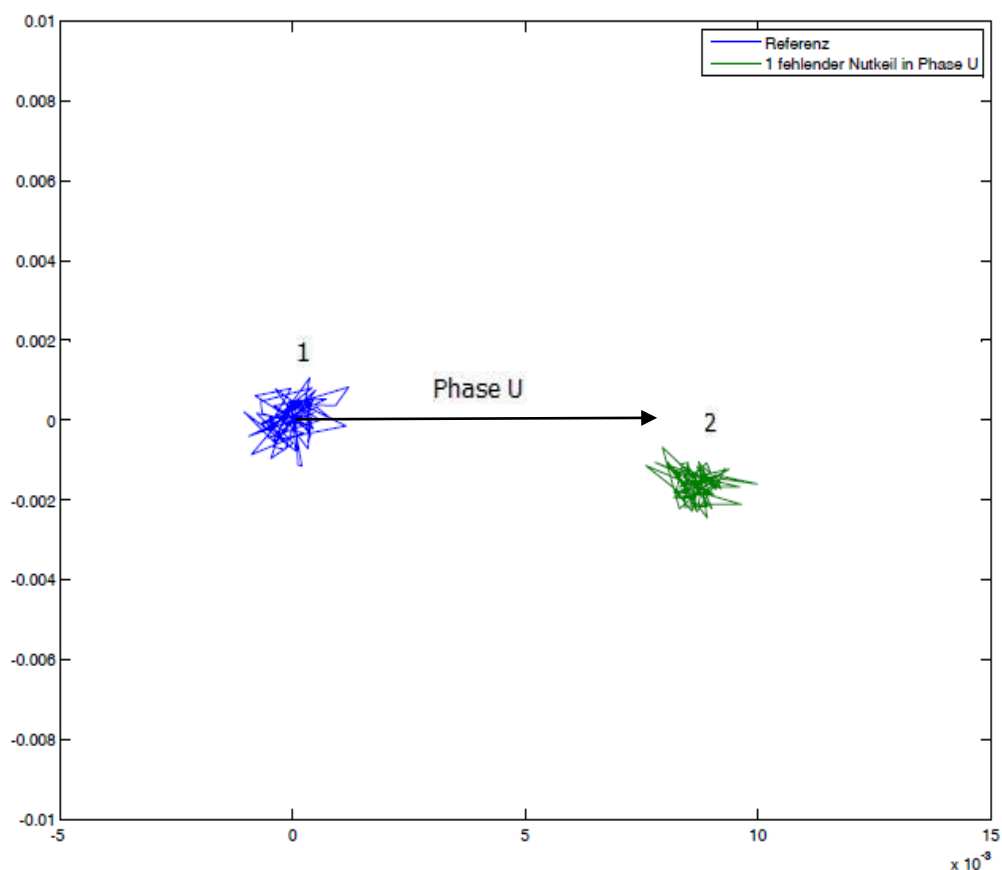


Abb. 5.3: Vergleich der Punktwolken „Referenz verschoben in den Nullpunkt“ (Index 1) und um die Referenzmessung verschobener Fehlerfall „fehlender Nutkeil in Phase U“ (2);

Daten zur Abb. 5.3 [Index 2: ein fehlender Nutkeil; dx_i ...Abstand der Mittelpunkte des Objekts mit dem Index i zur Referenz in x -Richtung (U-Richtung); dy_i ...Abstand in y -Richtung (um 90° von x nach links gedreht); d_i ...Betrag des Abstands; $argd_i$...Argument des Abstands; $argd_deg_i$...Argument (Winkel) des Abstandes in Grad (die Abkürzungen sind für alle Abbildungen gleich)]:

$$dx_2 = 0.0087; dy_2 = -0.0016; d_2 = 0.0088; argd_2 = -0.1847; \\ argd_deg_2 = -10.5833;$$

Wir sehen einerseits den genauen Abstand dx_2 in x -Richtung (Richtung der Phase U) des Fehlerfalls zur Referenz. Er sagt uns, inwieweit ein Fehler besteht. Je größer dieser Fehler, desto mehr Nutkeilmaterial wurde verschlissen.

Andererseits erkennen wir einen Winkel $argd_2$, den eine Gerade durch die beiden Mittelpunkte einschließt. Er beträgt in diesem Fall etwa $-10,5^\circ$. Diese Abweichung resultiert offensichtlich aus der Wahl der genauen Nutlage in der Phase U, nämlich $U_3 \cdot 10^\circ$ entsprechen $1/36$ einer vollständigen Umdrehung und somit genau der Abweichung einer Nut der 36 vorhandenen Nuten in der Maschine. Wir erkennen: Die Wahl der seitlichen Nut in Phase U verschiebt, im Vergleich zur mittleren Nut, die Phasenlage um etwa 10° (in Richtung der Phase V, da U_3 auch in der Maschine direkt neben der Phase V liegt). Mit Abweichungen bis zu dieser Größenordnung ist also durchaus zu rechnen. Die ordnungsgemäße Fehlerdetektion wird dadurch nicht beeinflusst.

Haben wir das Grundprinzip des Diagramms einmal verstanden, können wir nun weitere beliebige Fälle durch Messdaten verifizieren und anführen – wie die folgenden sechs unterschiedlichen Fehlerfälle, alle in Phase U – siehe Abbildung 5.4.

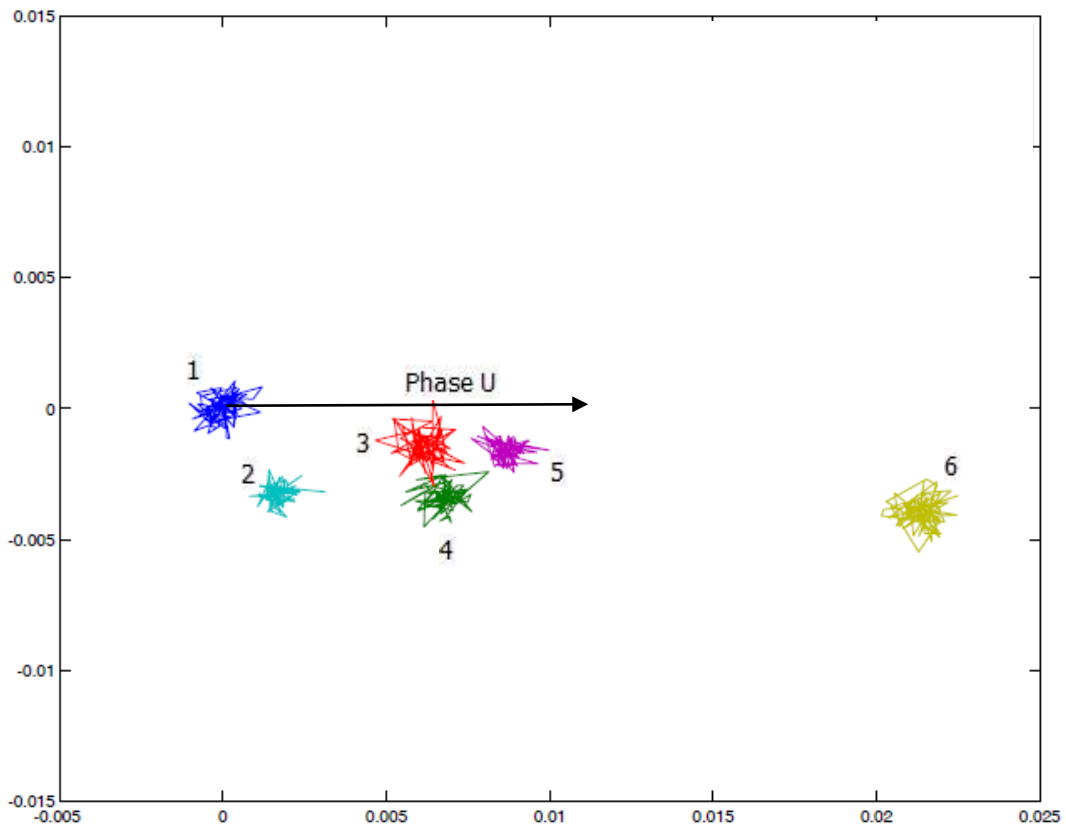


Abb. 5.4: Vergleich der Punktwolken (alle um die Referenzmessung verschoben, um den Referenzfall in den Koordinatenursprung zu verschieben) „Referenz“ (Index 1), „1/4 des Nutkeils in Phase U fehlt“ (2), „die Hälfte des Nutkeils in Phase U fehlt“ (3), „3/4 des Nutkeils in Phase U fehlt“ (4), „ein Nutkeil in Phase U fehlt“ (5) und „zwei Nutkeile in Phase U fehlen“ (6);

Daten zur Abb. 5.4 (Abkürzungen der Daten wie bei Abb. 5.3):

$$dx2 = 0.0017; dy2 = -0.0032; d2 = 0.0036; argd2 = -1.0941; \\ argd2_deg = -62.6904;$$

$$dx3 = 0.0051; dy3 = -6.8809e-004; d3 = 0.0052; argd3 = - \\ 0.1339; argd3_deg = -7.6701;$$

$$dx4 = 0.0067; dy4 = -0.0034; d4 = 0.0075; argd4 = -0.4692; \\ argd4_deg = -26.8865;$$

$$dx5 = 0.0087; dy5 = -0.0016; d5 = 0.0088; argd5 = -0.1847; \\ argd5_deg = -10.5833;$$

$$dx6 = 0.0214; dy6 = -0.0039; d6 = 0.0218; argd6 = -0.1818; \\ argd6_deg = -10.4160;$$

Die vergleichsweise starke Winkelabweichung in Messung 2 dürfte Messfehlern zuzuschreiben sein, der Betrag spiegelt jedoch sehr gut die Anzahl der fehlenden Nutkeile wieder.

Bereits in Abb. 5.4 sehen wir, wie sich ein Fehler in der Maschine im Detail entwickeln kann. In diesem Beispiel wird immer nur die Phase U betrachtet, die restliche Maschine wird als komplett und fehlerfrei angenommen. Man erkennt in den Fällen des halben, des ganzen und der zwei fehlenden magnetischen Keile im Vergleich zum Referenzfall, eine sehr schöne Regel, nämlich dass ein

zusätzlich fehlender Nutkeil in Phase U, den Gesamtfehler ungefähr jedes Mal um etwa 0,01 Einheiten in Richtung U verschiebt.

Folgend gilt es herauszufinden, ob es sich mit den verschiedenen Phasenrichtungen (U, V, W) ebenfalls so verhält. Kann also dem Fehler in U ein beliebiger Fehler in V, welcher ja im Grunde nur wie ein Fehler in U um 120° gedreht behandelt werden kann, hinzugezählt werden? Herrscht folglich auch diesbezüglich Linearität? Befinden wir uns in einem linearen System, also in einem System, in dem das Superpositionsprinzip bezüglich der Fehler in alle Phasenrichtungen gilt?

Wir können die Antwort vorwegnehmen: ja dieses Superpositionsprinzip gilt, wie uns die nächsten Abbildungen und Ausführungen zeigen werden.

Betrachten wir dazu nun die folgenden beiden Bilder (Abb. 5.5 und Abb. 5.6):

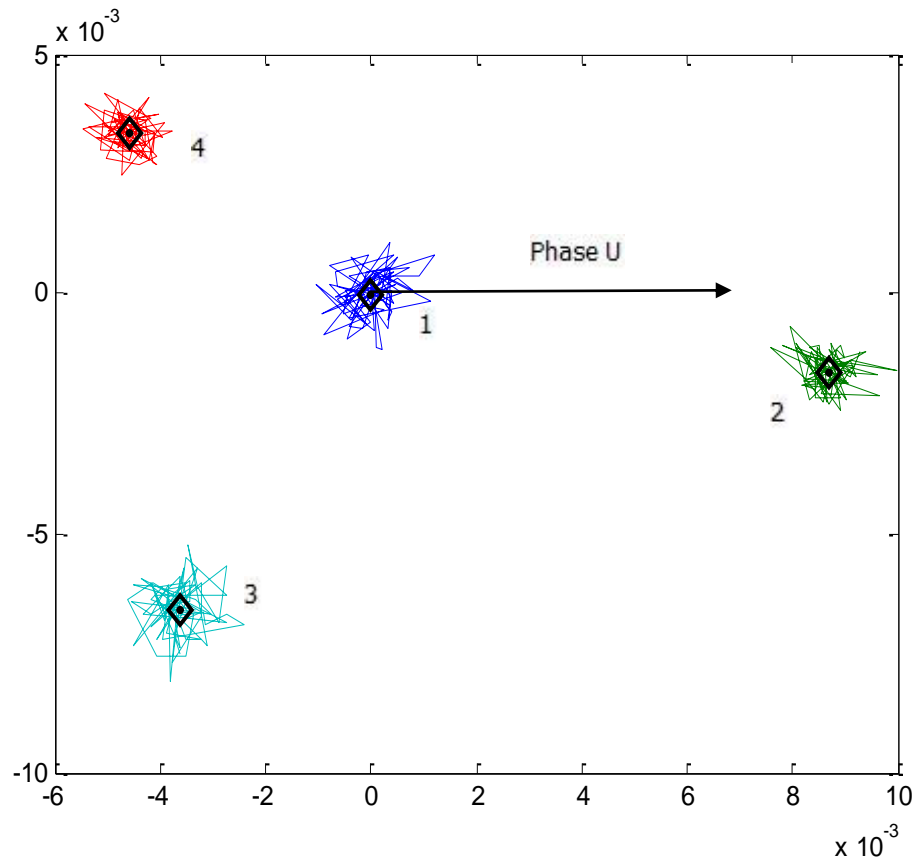


Abb. 5.5: (alle um die Referenzmessung verschoben, um den Referenzfall in den Koordinatenursprung zu verschieben)
„Referenz“ (Index 1), „ein Nutkeil in Phase U fehlt“ (2), „ein Nutkeil in Phase V fehlt“ (3) und „ein Nutkeil in Phase W fehlt“ (4);

Daten zur Abb. 5.5:

$$dx2 = 0.0087; dy2 = -0.0016; d2 = 0.0088; argd2 = -0.1847; \\ argd2_deg = -10.5833;$$

$dx3 = -0.0036$; $dy3 = -0.0066$; $d3 = 0.0075$; $argd3 = 1.0666$;
 $argd3_deg = 61.1139$ entspricht $\sim 1^\circ$ Abweichung von Phase V
(120°);

$dx4 = -0.0046$; $dy4 = 0.0034$; $d4 = 0.0057$; $argd4 = -0.6314$;
 $argd4_deg = -36.1795$ entspricht $\sim -24^\circ$ Abweichung von Phase
W (240°);

Durch drei Messungen der Stromantworten bei je einem fehlenden Nutkeil in den Phasen U, V und W erhalten wir obiges Bild und somit einen guten Eindruck, wie sich die Phasenrichtungen U, V und W im Diagramm verteilen. Die Abweichungen von den exakten Winkeln [0° (U), 120° (V), 240° (W)] betragen etwa minus 10° für Phase U, minus 24° für Phase W und 1° für Phase V.

Um das nun gefragte Verhalten bezüglich Linearität der Richtungen im Stromanstiegsdiagramm zu demonstrieren, wurde also eine Messung aufgezeichnet, welche je einen fehlenden Nutkeil pro Phase enthielt (Abb. 5.6). Bei gültigem Superpositionsprinzip und idealen Parametern müsste der Summenfehler nahe der Referenzmessung zu liegen kommen. Betrachten wir folgendes Bild (Abb. 5.6), ist dies der Fall. Kleine Abweichungen rühren bereits von den ursprünglichen Fehlern her, beispielsweise einer Messung der Richtung V von 121° statt 120° . Das Linearitätsprinzip behält hierbei seine Gültigkeit.

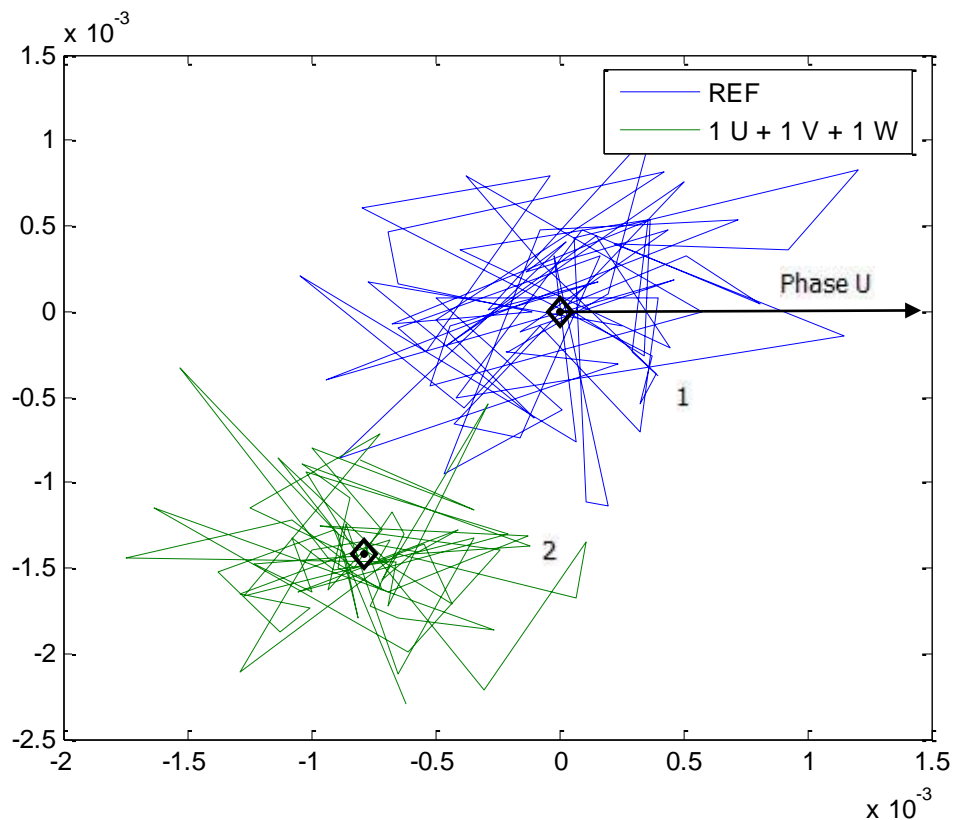


Abb. 5.6: Vergleich der Punktwolken (alle um Referenz verschoben) „Referenz“ (Index 1) und „ein Nutkeil fehlt in Phase U, einer in V und einer in W“ (2);

Daten zur Abb. 5.6:

$$dx2 = -7.8406e-004; dy2 = -0.0014; d2 = 0.0016; argd2 = 1.0661; argd2_deg = 61.0834$$

Um den Vergleich der gegebenen Abstände hier zu verdeutlichen, wird darauf hingewiesen, dass die Referenzmessung in beiden Diagrammen (Abb. 5.5 und Abb. 5.6) dieselbe ist, und wir somit

anhand der Größe der Streuung der Punktwolke des Referenzfalls, die relative Lage der Messungen zueinander erkennen können. Der Abstand in Abb. 5.6 der beiden Messungen beträgt demnach nur etwa ein Achtel des gemessenen Abstandes eines fehlenden Nutkeils in Abb. 5.5 und kann auch den Daten der Abbildungen entnommen werden. Auf den ersten Blick entsteht hierbei der Eindruck, als fehle nur etwa ein Achtel eines Nutkeils in Phasenrichtung V , der Rest der Maschine wäre in Ordnung. Währenddessen entsteht dieser Fehler jedoch durch die Kombination dreier zueinander fast symmetrischer Fehler (im Falle „je ein fehlender Nutkeil pro Phase“).

Auch diese, bereits im Kapitel angesprochenen, symmetrischen Fehler sind im Diagramm erkennbar: es findet zwar keine Verschiebung um den Mittelwert der Punktwolken statt, jedoch verkleinert sich die Varianz der Werte, was sich in einer Verdichtung der Punktwolke um den Mittelpunkt äußert. Eine genaue Analyse der statistischen Daten kann für eine Fehlererkennung herangezogen werden (siehe Ende Kap. 5.3). Eine Verkleinerung der Varianz weist demnach auf ein zusätzliches Fehlen magnetischer Nutkeile hin. Da sich die Gesamtinduktivität der Maschine mit jedem zusätzlichen bzw. fehlenden magnetischen Nutkeil ändert, bleibt dies auch in den Stromantworten messbar.

Dabei gilt das Superpositionsprinzip, wir befinden uns in einem linearen Raum, hinsichtlich Richtungen und Fehlerstärken ist das System linear. Anders ausgedrückt – die Bilder der Summe der Fehler ist gleich der Summe der Bilder der Fehler – und zwar bezüglich Richtung und Größe der Fehler. Das ist der Grund, warum sich symmetrische Fehler auf den ersten Blick nicht so

schnell erkennen lassen, ihre Vektorsumme ergibt nämlich definitionsgemäß Null.

Es handelt sich beim verwendeten Verfahren also um ein integriertes Werkzeug, um eventuelle Schäden hinsichtlich der Nutkeile zu erkennen. Für die benötigte Anwendung, der Erkennung eines wirtschaftlichen Revisionszeitpunkts, erfüllt diese Technik die Anforderungen sehr gut.

Folgende Abbildung (Abb. 5.7) zeigt die Abweichung des kombinierten Fehlers „je ein fehlender magnetischer Nutkeil in Phase U und Phase V“ vom Referenzfall zum besseren Verständnis.

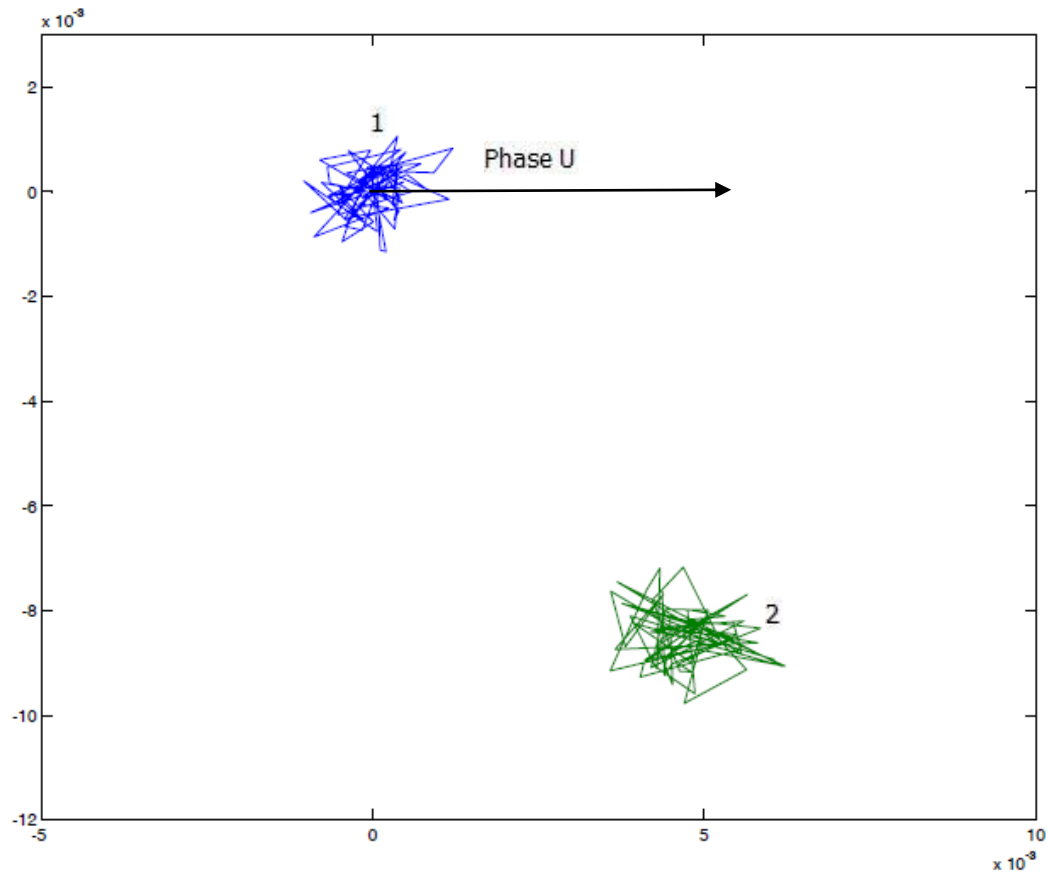


Abb. 5.7: Vergleich der Punktwolken (alle um Referenz verschoben) „Referenz“ (Index 1) und „je ein Nutkeil fehlt in den Phasen U und V“ (2);

Daten zur Abb. 5.7 :

$dx2 = 0.0047$; $dy2 = -0.0085$; $d2 = 0.0097$; $argd2 = -1.0665$;
 $argd2_deg = -61.1064$;

Abbildung 5.7 und Abbildung 5.8 veranschaulichen bestimmte Fehlerarten, gewisse Linearkombinationen von Fehlern, welche die Linearität bzw. das Superpositionsprinzip noch einmal veranschaulichen und zum grundsätzlichen Verständnis der Diagramme beitragen sollen. Wird - wie etwa in Abbildung 5.7 - eine Vektoraddition zweier gleich langer Vektoren - einer in Richtung der Phase U und der andere in Richtung der Phase V - durchgeführt, entspricht der resultierende Vektor auch der Summe der Fehler. Er wird etwa gegenüber der Phase W zu liegen kommen, immer vorausgesetzt die beiden Fehler in U und V sind gleich groß.

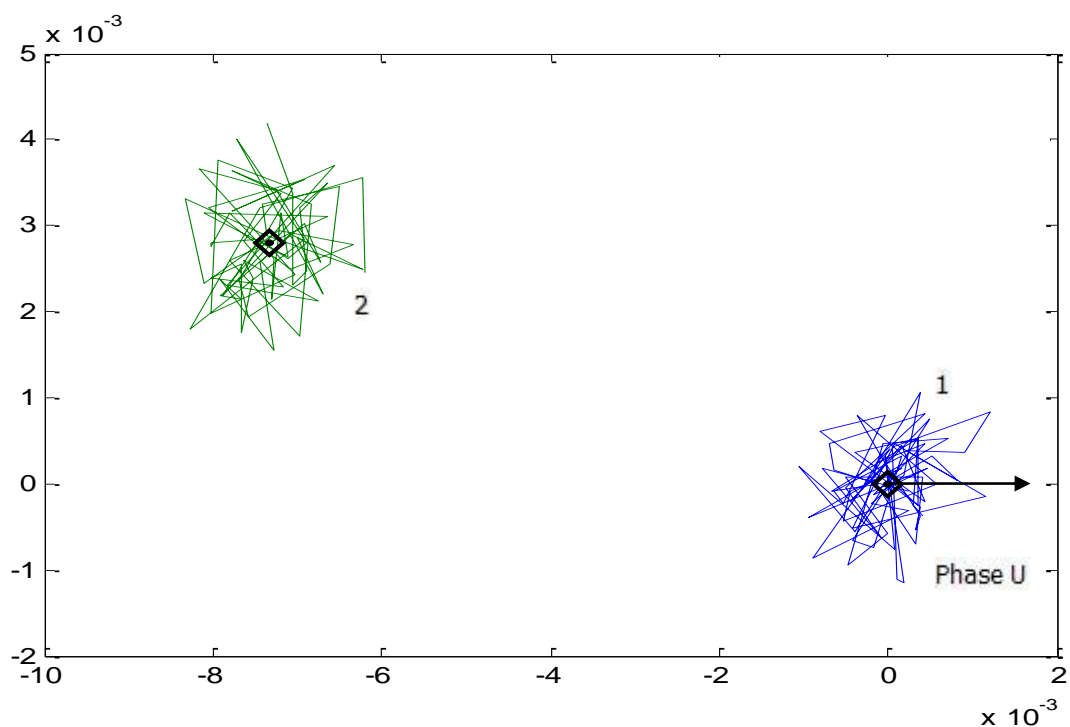


Abb. 5.8: Vergleich der beiden Punktwolken (um Referenz verschoben) „Referenz“ (Index 1) und „ein halber Nutkeil fehlt in Phase U, einer in V und zwei in W“ (2);

Daten zur Abb. 5.8:

$$\begin{aligned} dx2 &= -0.0073; dy2 = 0.0028; d2 = 0.0078; \text{argd2} = -0.3643; \\ \text{argd2_deg} &= -20.8745; \end{aligned}$$

Hier sehen wir bei genauerer Betrachtung, dass der Fehler der Phase U durch die Fehler in den anderen beiden Phasen nicht mehr trivial erkennbar wird. Er kann, wie im folgenden Kapitel erörtert, durch eine Varianzermittlung der Daten verifiziert werden, um den symmetrischen (Gleichanteil der Fehler in allen drei Phasen) Fehler auszumachen.

Wir haben hiermit diese praktische Methode zur Fehlererkennung an magnetischen Nutkeilen genauer kennengelernt und im Detail betrachtet, wie bei der Auswertung vorgegangen wurde.

5.3 Wahrscheinlichkeitsverteilung und Detektionsgenauigkeit

Wenden wir uns nun der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Punktwolken zu. Testet man mit Chi-Quadrat, bestehen die gesammelten Werte diesen Test und es folgt daraus, dass sie normalverteilt sind (Gauß'sche Glockenfunktion). Dies kommt durch eine hohe Anzahl voneinander unabhängiger Zufallsvariablen zustande, welche aufsummiert ebendiese Verteilung ergeben, sowie Mittelwert und Varianz aufweisen.

Eine weitere anschaulichere Methode die ungefähre Verteilung herauszufinden, sind Histogramme. In Abb. 5.9 sehen wir ein beispielhaftes Histogramm einer Punktwolke, welches einen definierten Bereich um die Punktwolke [hier $\pm\sigma$ (σ ist die Standardabweichung) um den Erwartungswert μ] in beliebig viele (hier zehn) Teile teilt und diskret die Anzahl der vorkommenden Punkte in jedem Intervall zählt.

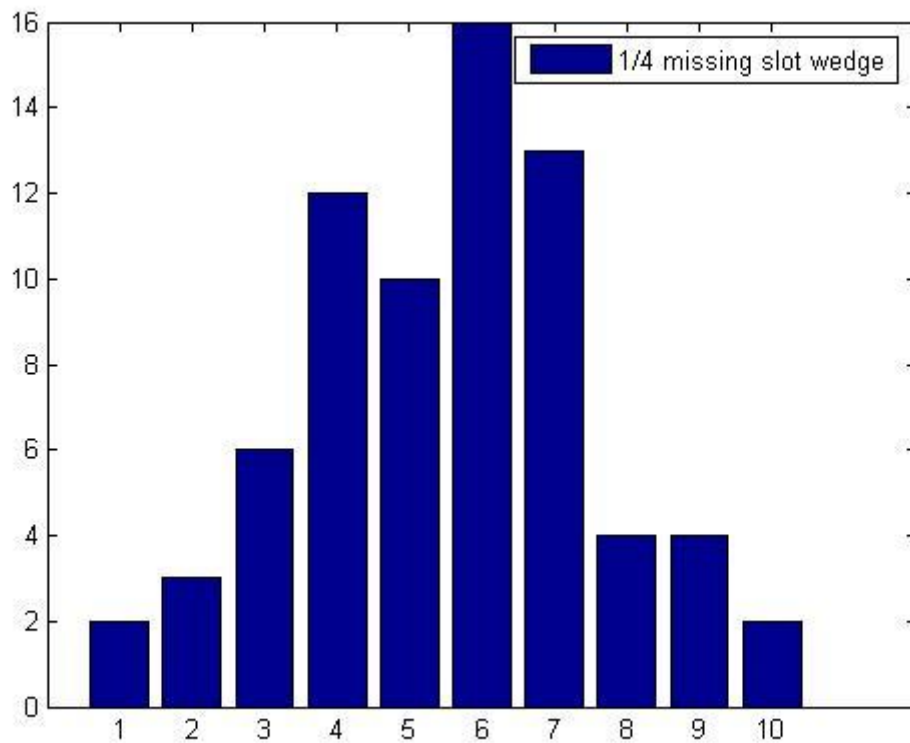


Abb. 5.9: Histogramm einer ausgewählten Punktwolke (Fehlerart: $\frac{1}{4}$ des Nutkeils fehlt); horizontale x-Achse: die linke und die rechte σ -Grenze der Normalverteilung (vom Erwartungswert) stellen hier die Eins bzw. die Zehn dar, der Erwartungswert liegt hier in der Mitte zwischen der Fünf und der Sechs, das gesamte 2σ -Intervall ($\sim 68\%$ -Konfidenzintervall) wurde in zehn gleiche Teile unterteilt (1 bis 10); vertikale y-Achse: Anzahl der im zugeordneten Bereich zu liegen kommenden Teilmessungen mit variablem Lagewinkel;

Wie wir wissen, können wir einer Gauß-Funktion zwei grundlegende Parameter der Statistik zuordnen, und zwar den Erwartungswert μ und die Standardabweichung σ . Die Funktion lässt sich mathematisch in eindimensionaler Form, wie folgt ausdrücken:

$$f_{GAUSS}(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (\text{Gl. 5.1})$$

Befinden wir uns im Funktionsdiagramm im Bereich $\mu \pm 3\sigma$, so sprechen wir von einem 99 %-Konfidenzintervall, das heißt, etwa 99 % der gesamten Fläche der Kurve liegen dazwischen, anders ausgedrückt liegen 99% der Messwerte in diesem Bereich.

Äquivalent dazu existiert ein 95 %-Konfidenzintervall, hier ist der Bereich $\mu \pm 2\sigma$ entscheidend und ein 68%-Konfidenzintervall ($\mu \pm \sigma$). Auch dazwischen liegende kontinuierliche Werte für $\mu \pm c\sigma$ ($c \in \mathbb{R}$) können Konfidenzintervallen bestimmter Größe zugeordnet werden.

Aufgrund der höheren Sicherheit wählen wir für unsere Auswertungen Ersteres.

Betrachten wir nun unsere zweidimensionale Punktwolke und ihre Gauß-Verteilung: Diese kann man in einen Real- und einen Imaginärteil (also kartesische Koordinaten) oder in Betrag und Winkel (Polarkoordinaten) aufspalten.

Betrachten wir folgende Abbildungen Abb. 5.10 – Abb. 5.13, in denen wir nacheinander Betrag, Realteil und Imaginärteil der Gaußverteilung der Punktwolke und die zugehörigen Punktwolken sehen:

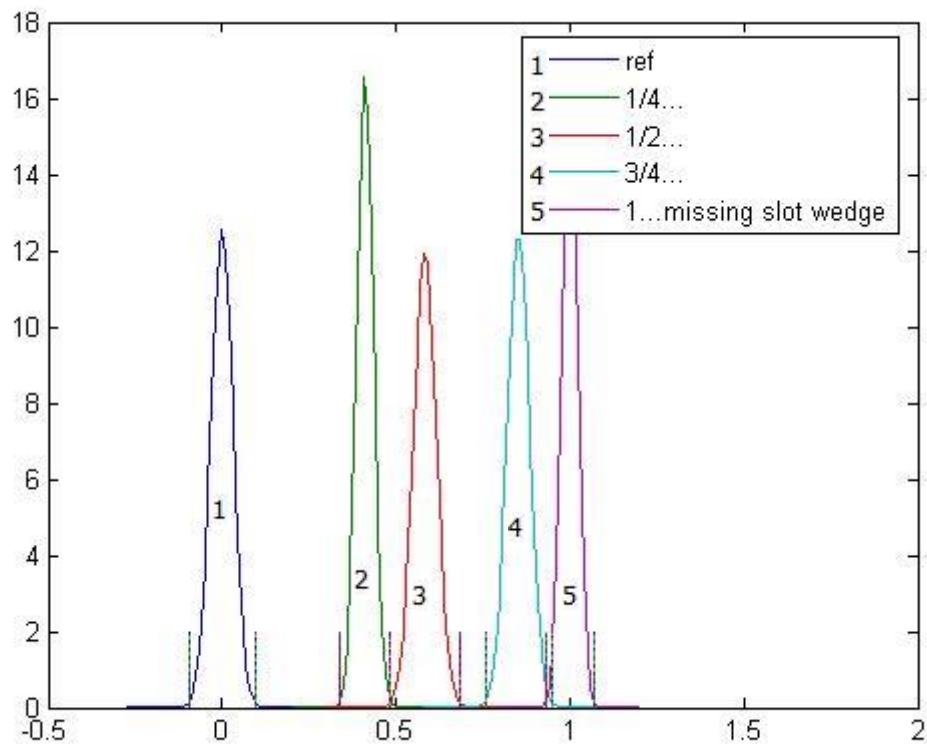


Abb. 5.10: Gaußverteilungen der Beträge der zugehörigen

Punktwolken; horizontale x-Achse: Anzahl der fehlenden Nutkeile; vertikale y-Achse: Wahrscheinlichkeitsdichte (so, dass die Fläche unter den Kurven gleich eins ergibt)

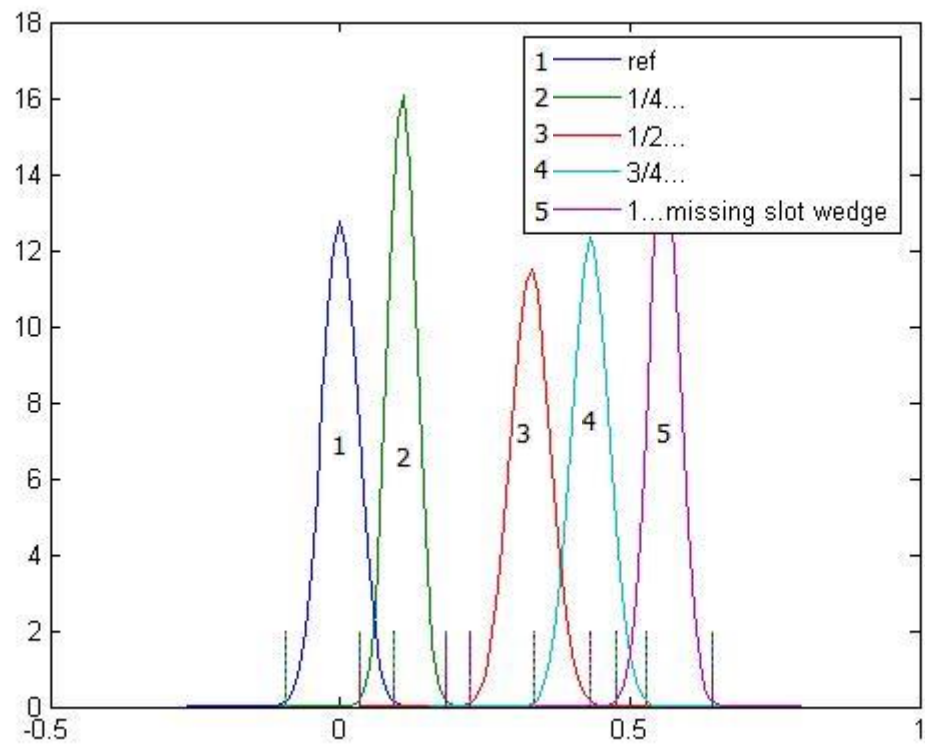


Abb. 5.11: Gaußverteilung des Realteils der zugehörigen Punktwolken; Beschriftung wie in Abb. 5.10;

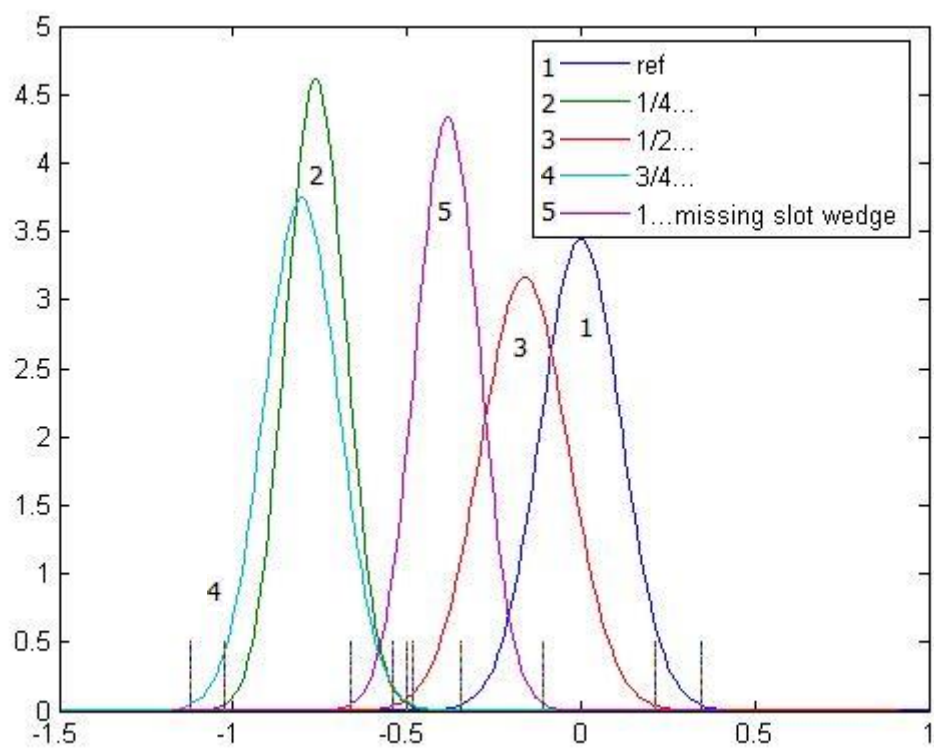


Abb. 5.12: Gaußverteilung des Imaginärteils der zugehörigen Punktwolken; Beschriftung wie in Abb. 5.10;

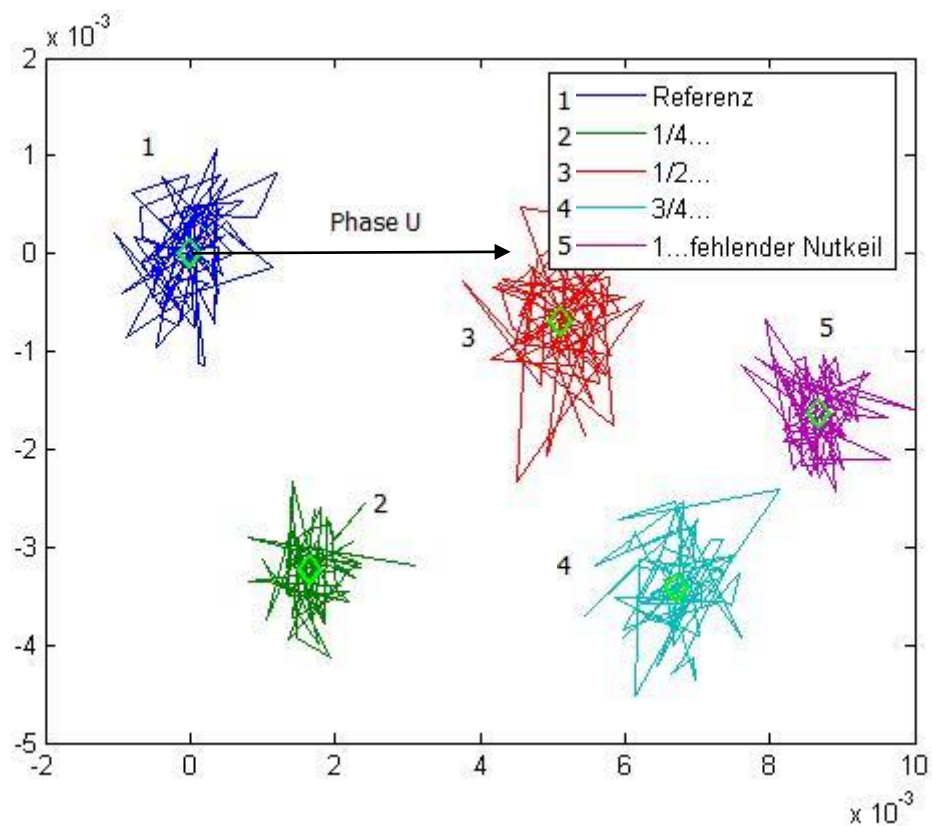


Abb. 5.13: Zu den Gaußverteilungen gehörendes Punktwolkenbild

Wollen wir uns ein grobes Bild von der Detektionsgenauigkeit machen, unterscheiden wir hier - aufgrund der stochastischen Verteilung der Messpunkte - zwischen Real-, Imaginärteil und Betrag.

Beim Betrag entspricht $1/8$ des magnetischen Nutkeils in etwa dem 3σ -Konfidenzintervall, beim Realteil ist es circa $1/4$ eines Nutkeils. Der Imaginärteil schwankt deutlicher und lässt nur eine Genauigkeit von ungefähr einem halben Nutkeil für das 99%-Konfidenzintervall zu. Das bedeutet, man kann sich beim Imaginärteil lediglich auf einen halben Stab genau, zu 99 % sicher sein, den Fehler richtig zu detektieren.

Den genauesten Wert liefert somit der Betrag, auch der Realteil taugt an sich zu einer guten Detektion.

Wählt man also den Betrag der Normalverteilung als Detektionsparameter, kann man sich den Zustand der Maschine am genauesten ansehen. Hierbei kann man, wie erwähnt, eine 99%-ige Genauigkeit auf 1/8 eines Nutkeils erzielen.

Nun kann man noch prüfen, wie es sich mit der Detektionsgenauigkeit der symmetrischen Fehler verhält, da diese ja nicht so leicht erkennbar sind, da sich ihre Vektorsumme – wie bereits erwähnt – zu Null addiert.

Werfen wir dazu einen Blick auf ein gutes Beispiel für einen symmetrischen Fehler: die Kombination des Fehlers „je ein fehlender magnetischer Nutkeil pro Phase“, zu sehen in Abb. 5.6.

Eine Berechnung der Standardabweichungen (σ) der beiden Punktwolken vom jeweiligen Erwartungswert ergibt:

$$\sigma_{x, REF} \approx 0,0312$$

$$\sigma_{y, REF} \approx 0,1158$$

$$\bar{\sigma}_{REF} \approx 0,0735$$

$$\sigma_{x, SYM1} \approx 0,0258$$

$$\sigma_{y, SYM1} \approx 0,1107$$

$$\bar{\sigma}_{SYM1} \approx 0,068$$

$$\sigma_{x, SYM2} \approx 0,0328$$

$$\sigma_{y, SYM2} \approx 0,1056$$

$$\bar{\sigma}_{SYM2} \approx 0,0692$$

$$\bar{\sigma}_{SYM1,2} \approx 0,0686$$

$$v = \frac{\bar{\sigma}_{SYM1,2}}{\bar{\sigma}_{REF}} \approx 0,93 \approx 93,33\%$$

mit

den Indizes bzw. den Variablen

x	...	Realteil
y	...	Imaginärteil
REF	...	Referenzmessung
SYM1	...	symmetrischer Fehler Messung 1
SYM2	...	symmetrischer Fehler Messung 2
$\bar{\sigma}_n$...	Mittelwert der Standardabweichungen der Messung n
$\bar{\sigma}_{SYM1,2}$...	Mittelwert der Standardabweichungen der beiden symmetrischen Fehler
v	...	Verhältnis angegebener Mittelwerte

Das heißt die Standardabweichung schrumpft für den symmetrischen Fehler des einen fehlenden magnetischen Nutkeils pro Phase durchschnittlich auf etwa 93%. Somit bleibt auch dieser symmetrische Fehler detektierbar und quantifizierbar. Der Fehlerzusammenhang zwischen phasensymmetrisch fehlenden Nutkeilen und der Standardabweichung der Induktivitätsmessung ist nicht-linear (besitzt unter anderem eine Asymptote bei der Restmaschineninduktivität ohne Nutkeile und einen Nulldurchgang bei σ_{REF}), man kann sich aber mittels Interpolation zwischen den Messpunkten aushelfen (Vorschlag: quadratische Interpolation).

Das Fazit: je mehr die Standardabweichung der statistischen Messwerte von jenem des Referenzfalls divergiert, desto höher ist der symmetrische Fehler.

In den folgenden beiden Abbildungen (Abb. 5.14 und Abb. 5.15) ist nochmal klar in den Dichtefunktionen zu erkennen, wie sich der symmetrische Fehler etabliert (Real- und Imaginärteil).

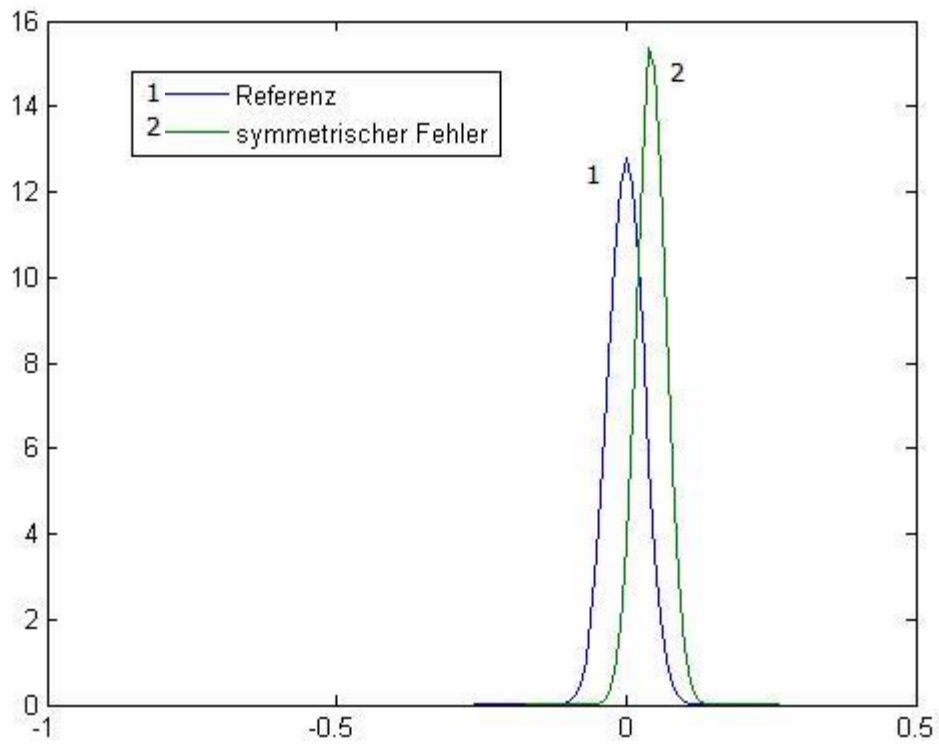


Abb. 5.14: Gaußverteilung des Realteils des symmetrischen Fehlers im Vergleich; Achsenbeschriftung wie in Abb. 5.10;

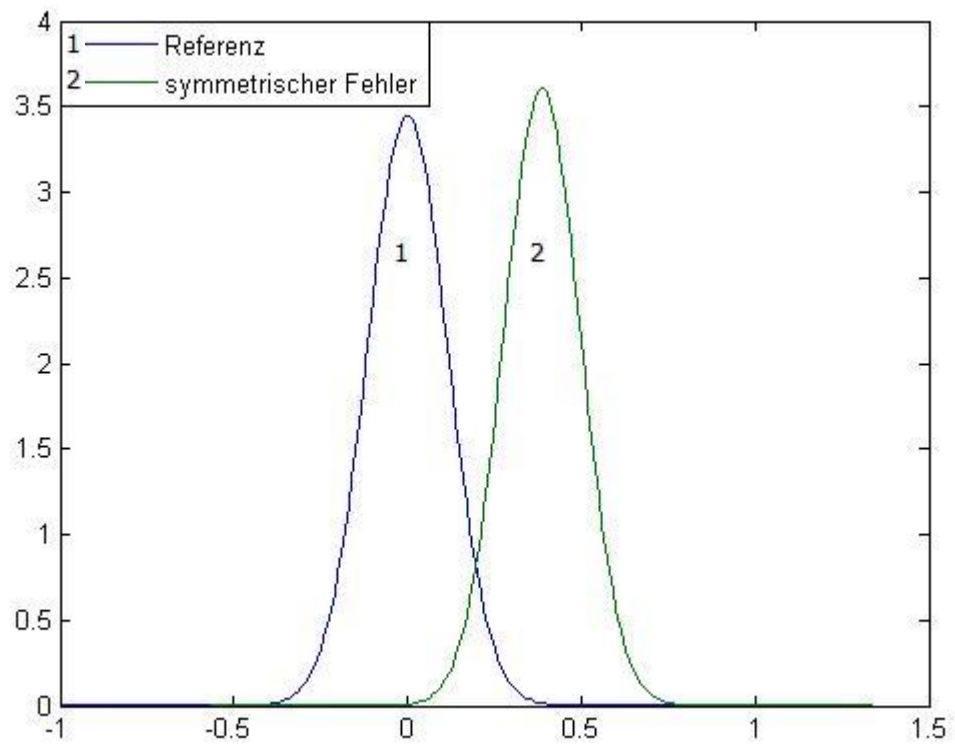


Abb. 5.15: Gaußverteilung des Imaginärteils des symmetrischen Fehlers im Vergleich; Achsenbeschriftung wie in Abb. 5.10;

6 Zusammenfassung und Ausblick

Mit der vorgestellten Methode der Induktivitätsmessung - genauer der transienten Stromantwort der Maschineninduktivitäten auf eine rechteckförmige Spannungssequenz - lassen sich mit großem praktischen und ökonomischen Nutzen, Fehler ziemlich genau – etwa auf 1/8 Teil eines magnetischen Nutkeils – erkennen. Auch symmetrische Fehler können anhand der Standardabweichungen der Messwerte abgeschätzt werden.

Nun kann bei Kenntnis der Fehlerzustände in der Maschine, der kostengünstigste Revisionszeitpunkt errechnet werden.

Die beschriebene Methode der Fehlerdetektion spart enorm an Kosten und Aufwand ein. Besonders bei großen und leistungsstarken Maschinen wie Windkraftanlagen, verstärken sich diese positiven Auswirkungen noch einmal deutlich.

V Verzeichnisse

V.A Abbildungsverzeichnis

- Abb. 2.1: Schaltbild des Prüfstands
- Abb. 2.2: komplexer Zeiger
- Abb. 2.3: komplexer Raumzeiger
- Abb. 2.4: Raumzeiger-ESB der ASM
- Abb. 2.5: Lagewinkel
- Abb. 2.6: Schaltbild Zwischenkreisumrichter
- Abb. 2.7: Fotos Frequenzumrichter
- Abb. 3.1: Nutkeile in der Maschine
- Abb. 3.2: INFORM-Signal Spannung
- Abb. 3.3: INFORM-Signal Stromantwort
- Abb. 3.4: „Tortenstück“-Schema
- Abb. 4.1: Signalflussplan/Netzplan Prüfstand
- Abb. 4.2: Foto Prüfstand
- Abb. 4.3: Aufbau Prüfstand
- Abb. 5.1: Die verwendete Asynchronmaschine
- Abb. 5.2-5.8: Punktwolken der Stromantworten in Diagrammen und
Vergleiche
- Abb. 5.9: Histogramm
- Abb. 5.10-12: Gauß'sche Verteilungen gemessener Punktwolken

- Abb. 5.13: zu den Gauß-Verteilungen gehörendes Punktwolkenbild
- Abb. 5.14: Gaußverteilung des Realteils des symmetrischen Fehlers
- Abb. 5.15: Gaußverteilung des Imaginärteils des symmetrischen Fehlers

V.R Referenzverzeichnis

[Q1] ... Elektrische Antriebe, Prof. O. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.
tech. Manfred Schrödl, TU Wien;

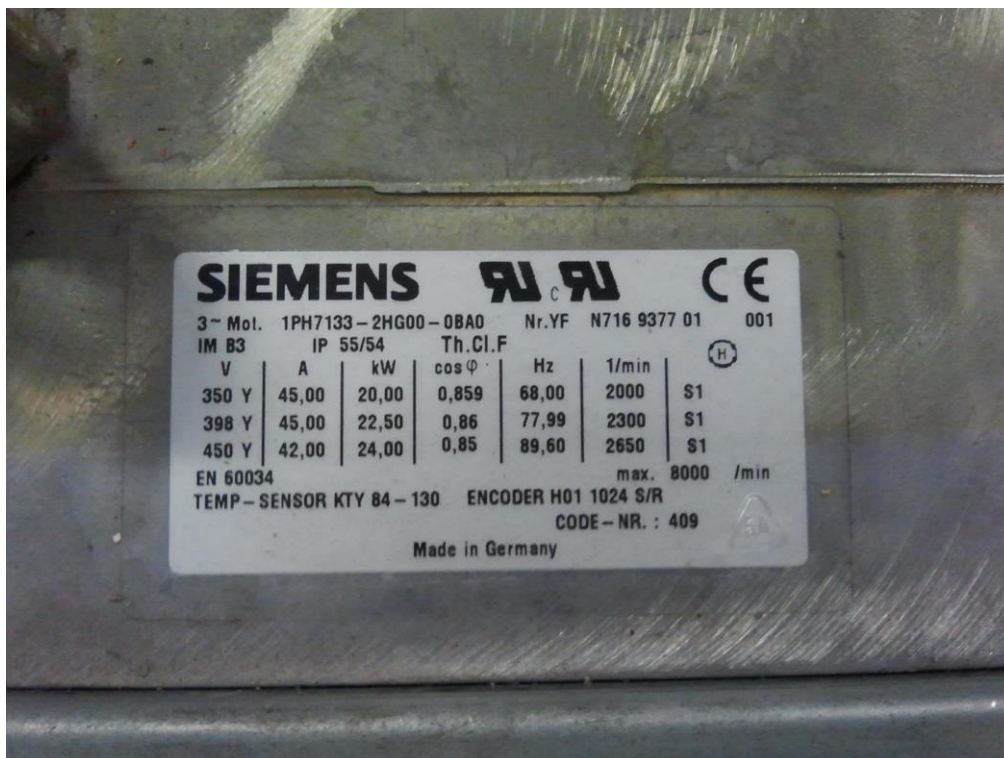
[Q2] ... Mitarbeiter des Instituts für elektrische Antriebe und
Maschinen, TU Wien;

V.A Abkürzungsverzeichnis

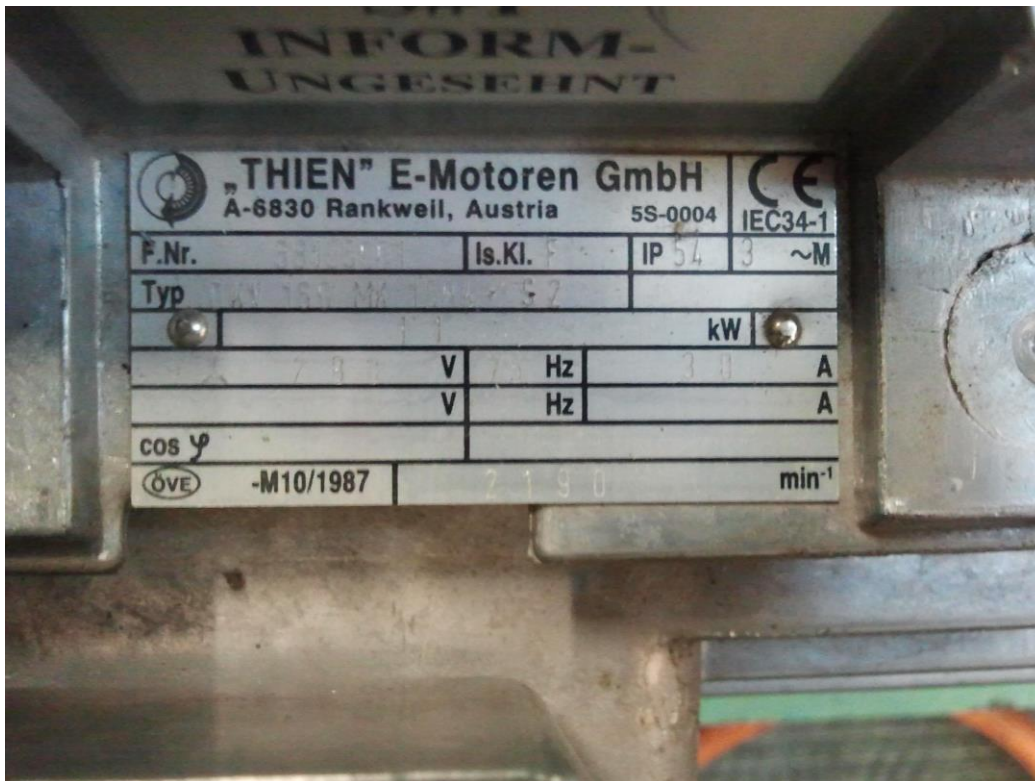
ESB	... Ersatzschaltbild
KOS	... Koordinatensystem
ZK	... Zwischenkreis
IGBT	... engl. <i>insulated gate bipolar transistor</i>
ASM	... Asynchronmaschine
PSM	... Permanentsynchronmaschine
GM	... Gleichstrommaschine
SM	... Synchronmaschine

A Anhang - Datenschilder der verwendeten elektrischen Maschinen

1) Datenschild der starr gekoppelten Asynchronmaschine:



2) Datenschild der Asynchronmaschine zur Fehlersimulation:



Nennzahl: 2190 U/min

Nennspannung: 290 V in Sternschaltung

Nennstrom: 30 A

Nennfrequenz: 75 Hz

Nennleistung: 11 kW