Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist in der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt und zugänglich.
http://www.ub.tuwien.ac.at

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology.
http://www.ub.tuwien.ac.at/eng

Technische Universität Wien

DIPLOMARBEIT

Beschleunigte Alterung der Wicklungsisolation einer Drehstrommaschine und Analyse des Verlusts der Isolationsfestigkeit mittels umrichterinduzierten pulsfrequenten Spannungsprüngen

verfasst von

Burak Türdüoglu, BSc.

Matrikelnummer: 1029596

Göllnergasse 29/12, 1030 Wien

unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. WOLBANK Thomas

und

Dipl.-Ing. ZÖLLER Clemens

durchgeführt am

Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe

Gußhausstraße 25-29/370-2

1040 Wien, Österreich

Wien, April 2016

Danksagung

Zuerst möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, welche während meines Studiums mich immer unterstützt und mir für alle meine Entscheidungen vertraut haben. Weiters danke ich meinen Großeltern, welche mir ihre Liebe gezeigt hatten. Ich weiß mein verstorbener Großvater hört mich jetzt!

An alle meine Freunde... Ich habe euch nicht vergessen. Danke für eure Herzlichkeit.

Für die Betreuung meiner Diplomarbeit möchte ich mich bei Herrn Clemens Zöller und Professor Thomas Wolbank bedanken, welche stets Verständnis bei unseren Unterhaltungen gezeigt haben und stets hilfreich für alle Umstände gewesen sind.

Hiermit möchte ich mich auch bei meinem Kollegen Saban Kaynak bedanken. Außerdem bin ich sehr dankbar, dass er mir während des Masterstudiums immer geholfen hat.

Großen Dank auch an alle meine vorherigen Lehrer und Lehrerinnen.

DANKE FÜR ALLES...

Kurzfassung

Das Ziel dieser Diplomarbeit ist, die Auswirkungen auf die Stromantworten durch Alterung der Isolation von Statorwicklungen einer umrichtergespeisten Asynchronmaschine zu untersuchen. Die Prüfmaschine ist einer thermischen Alterung ausgesetzt, somit soll die Isolationsfestigkeit der Wicklungen der Maschine eingehend untersucht werden. Die Wicklung der Prüfmaschine ist einmal getränkt- und nicht getränkt ausgeführt. Dadurch soll auch der Einfluss des Harzmaterials untersucht werden.

Die Analyse des Isolationszustandes beschäftigte sich mit zwei unterschiedlichen Diagnoseverfahren, welche jeweils zwischen den Alterungsvorgängen angewendet werden. Die erste Methode beinhaltet die Erfassung des transienten Einschwingverhaltens, sichtbar in der Stromantwort als Folge einer Spannungspulssequenz, hervorgerufen durch den angeschlossenen Umrichter. Die Dauer eines Pulses wurde variiert, damit die Einflüsse von Pulsfolgen mit unterschiedlichen Grundfrequenzanteilen auf die Stromantwort, sowie die Detektierbarkeit einer Isolationsveränderung untersucht werden. Da die Ansteuermodule des Umrichters eine vorgegebene Totzeit von 2µs haben, kann die Grundfrequenz einer Pulsfolge 250kHz nicht überschreiten. Andererseits ist eine Frequenz der Pulsfolge unter 12.5kHz nicht sinnvoll, da die Stromantwort in einem Bruchteil der Dauer der Einzelpulse (typischerweise 10µs) abgeklungen ist. Bei der zweiten Methode wird das Impedanz- bzw. Übertragungsverhalten der Wicklungen der Maschine über einen großen Frequenzbereich (1kHz-10MHz) mit Hilfe eines Spektrum-Analysators untersucht.

Durch die Ergebnisse der Messungen zwischen den einzelnen Alterungszyklen wird die Verschlechterung der Isolation anhand von mehreren Merkmalen nachgewiesen, wie z.B. einer Verschiebung der Resonanzfrequenzen.

Abstract

The aim of this master thesis is to study the effects on the current response caused by aging of the stator windings of a converter-fed asynchronous machine. The test machine is exposed to accelerated thermal aging cycles, thus the insulation strength of the machine winding is investigated in detail. To analyze the influence of the epoxy resin the stator winding system of the test machine is immersed in one case and non-immersed in the other case. Due to this fact the influence of the resin material is examined.

The investigations deal with two different targeted diagnostic procedures, which are applied after each aging cycle. At the first method the transient current response is recorded after excitation by a voltage pulse sequence applied with the inverter. The voltage pulse sequences are created in such a way that they contain different fundamental frequencies, so that the influences of these pulse sequences can be examined regarding the detectability of the insulation degradation. Because of short dead times (2µs) existing in the inverter IGBT modules the fundamental switching frequency of the pulse sequence is limited to 250kHz. On the other hand a switching frequency below 12.5kHz is not applied, because the transient part of the current response has already decayed after 10µs. The second method is to measure the frequency response characteristic of the windings of the machine by use of a frequency-response-analyzer.

According to the results of the measurements the deterioration of the insulation strength is estimated, for instance by the shift of the resonant frequencies.

Nomenklatur

Abkürzungen

a.u.	arbitrary unit (willkürliche Einheit)
ASM	Asynchronmaschine
dB Ω	Dezibel Ohm
FFT	Fast Fourier Transformation
FPGA	Field Programmable Gate Array
FRD	Frequency Response Deviation
FTP	File Transfer Protocol
IGBT	Insulated-Gate Bipolar Transistor
ISI	Insulation State Indicator
MAT	MathWorks MATLAB Datencontainer
NI	National Instruments
PD	Partial Discharge
PWM	Pulsweitenmodulation
RT	Real Time
SFRD	Spatial Frequency Response Deviation
TDMS	Technical Data Management Streaming
TEAM	Thermal Electrical Ambient and Mechanical

Formelzeichen

C	Kapazität
f	Frequenz
f_s	Abtastfrequenz
i	elektrischer Strom
L	Induktivität
N	Anzahl der Windungszahl in einer Spule
N	natürliche Zahl, z.B. Anzahl der Elemente einer Menge
R_{iso}	Isolationswiderstand
t	Zeit
T	Abtastperiode
u	elektrische Spannung
Ψ	Flußverkettung
μ	magnetische Permeabilität

Inhaltsverzeichnis

1 EINLEITUNG 1

2 ISOLATIONSSYTEM IN DER ELEKTRISCHEN MASCHINE 2

2.1 STATOR ISOLATIONSSYTEM 3

3 STATOR-ISOLATIONSFEHLER BEI DREHFELDMASCHINEN 5

3.1 EINLEITUNG 5
3.2 ALTERUNG DER WICKLUNGSISOLATION 5
3.2.1 Realisierung des beschleunigten Alterungsprozesses 7
3.2.2 Durchführung einer thermischen Alterung 8
3.3 PRÜFVERFAHREN DER WICKLUNGSISOLATION 10

4 BESCHREIBUNG DES PRÜFSTANDES 12

4.1 AUFBAU 12
4.2 VERSUCHSMASCHINE 13
4.3 UMRICHTER 14
4.4 MESSBOX 15
4.4.1 LEM Sensoren 16
4.4.2 Rogowski Spulen 16
4.5 MESS-STEUER-REGELUNGSSYSTEM 17
4.6 BESCHREIBUNG DER FRD MESSUNGEN 19

5 EVALUIERUNG DER ALTERUNG MIT FREQUENCY RESPONSE DEVIATION(FRD) 23

5.1 ISOLATIONSALTERUNG DER UNGETRÄNKTEN WICKLUNGEN 30
5.1.1 Untersuchung mittels LEM Sensoren 31
5.1.2 Untersuchung mittels Rogowski Spulen 36
5.2 ISOLATIONSALTERUNG DER GETRÄNKTEN WICKLUNGEN 39
5.2.1 Untersuchung mittels LEM Sensoren 39
5.2.2 Untersuchung mittels Rogowski Spulen 44

6 EVALUIERUNG DER ALTERUNG MITTELS FREQUENZ-SPEKTRUM-ANALYSATOR 49

6.1 KALIBRIERUNG DES ANALYSATORS 49
6.2 FREQUENZDURCHLAUF MODUS 50
6.2.1 Impedanzmessungen 50

7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK 65

8 BIBLIOGRAPHY 66

9 ABBILDUNGSVERZEICHNIS 68

10 TABELLENVERZEICHNIS 71

11 ANHANG 72

1 Einleitung

Eine bedeutende Anzahl von Maschinenstillstandszeiten resultiert aus Statorfehlern bei elektrischen Maschinen. Isolationsfehler von Statorwicklungen treten meistens plötzlich auf und deshalb benötigt es ein passendes Überwachungsverfahren für Stator Isolationsfehler. Solch ein Verfahren wurde im Rahmen der Diplomarbeit am Institut für Energiesysteme und elektrische Antriebe untersucht. Durch dieses Verfahren können die Maschinen solange kontinuierlich betrieben werden, bis eine präventive Wartung aufgrund der gealterten Wicklungen benötigt wird.

Durch eine gealterte Isolation kann es bei einer belasteten Maschine schließlich zu einem Durchschlag in der Isolation bzw. einer Maschinenzerstörung kommen. Deshalb ist es das Ziel, die Maschine mit einem Online-Überwachungsverfahren zu verwenden. Somit kann die sich langsam verschlechternde Isolation erkannt werden.

Neben den sogenannten TEAM (thermal-electrical-ambient-mechanic)- Beanspruchungen [1], kann zusätzlich der hochdynamische Betrieb am Frequenzumrichter die Isolation der elektrischen Maschine beanspruchen. Bei Speisung mittels Zwischenkreisumrichter verursacht jeder Puls durch hohe Spannungsänderungen in sehr kurzer Zeit, d.h. großes du/dt, eine hohe Belastung für die Isolation der angeschlossenen Maschine [2], [3]. Die Auswirkungen dieser Belastungen sind sehr komplex und deshalb findet heutzutage mehr Forschung in diesem Gebiet statt.

Im folgenden Kapitel der Arbeit erfolgt eine allgemeine Beschreibung von Isolationsystemen und die hauptsächliche Ursache von Statorfehlern. Der verwendete Prüfstand und alle wichtigen Komponenten werden auch genauer erläutert. Der Hauptteil der hier vorliegenden Arbeit befindet sich in den darauffolgenden Kapiteln. Die Idee, welche zur Methode führte, um Isolationsveränderungen detektieren und beobachten zu können, wird Schritt für Schritt beschrieben.

2 Isolationssytem in der elektrischen Maschine

Die Lebensdauer der elektrischen Maschinen ist mit der Einhaltung der zulässigen Temperaturgrenze bestimmt. Die zulässige Erwärmung einer elektrischen Maschine ist je nach Klasse des Isolationsmaterials, die durch die Wärmebeständigkeit des Materials bestimmt ist, definiert. Die Vorschriften DIN EN 61558 und DIN-VDE 0570 beschreiben die thermische Beständigkeit von Isolierstoffen. Die höchstzulässige Temperatur und die meist verwendeten Materialen in elektrischen Maschinen sind in Tabelle 1 sichtbar.

Klasse	**Höchstzulässige Dauertemperatur**	**Isolierstoffe**
Y	90°C	Baumwolle, Naturseide, Zellwolle, Kunstseide, Polyamidfaser, Papier, Pressspan, Vulkanfiber, Holz, Formaldehyd-Kunstharz
A	105°C	Wie Klasse Y, jedoch mit Natur- oder Kunstharzlacken, Schellack etc. getränkt, lackbehandelte Textilien, Drahtlack auf Ölharzbasis
E	120°C	Drahtlacke verschiedener Art, Preßteile mit Zellulosefüllstoff, Papierschichtstoffe
B	130°C	Glasfaser, Asbest, Glimmerprodukte, Preßteile mit mineralischen Füllstoffen
F	155°C	Glasfaser, Asbest , Glimmerprodukte, Drahtlacke auf Imid-Polyester-Basis
H	180°C	Glasfaser, Asbest mit Silikon-Harzen behandelt, Silikon-Kautschuk
C	>180°C	Glimmer, Porzellan, keramische Stoffe, Glas, Quarz

Tabelle 1: Isolierstoffklassen und höchstzulässige Dauertemperatur(nach VDE 0530,Teil 1)[1]

Da die Maschinenisolation sehr komplex ist, wird eine Vielzahl von Materialien eingesetzt. Die Isolierstoffe werden in thermische Klassen mit verschiedenen Grenztemperaturen eingeteilt. Mit steigender Temperatur verschlechtern sich die Eigenschaften von Isolierstoffen und dadurch spricht man von einer Alterung der Maschine.

Die TEAM Belastungen führen zu lokalen Veränderungen der dielektrischen Eigenschaften des Isoliersystems [1].

[1] Quelle:Rolf Fischer, „Elektrische Maschinen“,7. Auflage Seite 371, Carl Hanser Verlag München Wien, Jahr:1989

Im Kapitel 3 wird das Thema Alterung im Detail erwähnt.

2.1 Stator Isolationssytem

Die Ständerwicklungen der elektrischen Maschine sind aus einzelnen Stäben oder Spulen aufgebaut. In dieser Arbeit hat der Stator der Versuchsmaschine eine Zweischicht-Träufelwicklung, wobei die Bezeichnung auf die Herstellungsart der Wicklung deutet. Dabei handelt es sich meist um Spulen aus Runddraht, welche zu Spulen mit mehreren Windungen vorgefertigt und in die Nuten eingelegt werden.

Die Ständer können je nach Maschinenleistung und Verwendungszweck in drei verschiedene Wicklungsarten eingeteilt werden. Diese sind in Tabelle 2 sichtbar [4].

Wicklungsart	**Merkmale**
Runddraht gewickelte (z.B. *orthozyklisch*)	<100kW,kleinere Motoren
Form gewickelt (Multiturn-Spulen)	50-100 MW,Motor und Generatoren
Form gewickelt (Roebelstäbe)	>50MW, Generatoren

Tabelle 2:Arten von Ständerwicklungen

Jede Spule der Statorwicklung setzt sich aus einzelnen, gegeneinander isolierten Teilleitern zusammen. Man unterscheidet die Isolierung der einzelnen Leiter und die Hauptisolierung im Nut- und Wickelkopfbereich.

Die Isolierung der in der Nut befindlichen Spulen gegenüber dem Blechpaket wird als „Hauptisolierung“ bzw. „Erdisolation“ bezeichnet. Die Erdisolation isoliert die Spulen vom umliegenden Eisenkern. Um eine hohe Lebensdauer einer Maschine zu erhalten, soll besonders die Festigkeit der Hauptisolierung gegen Belastungen beständig sein.

Die einzelnen Drahtisolationen einer Spule nennt man „Windungsisolation“ und besteht häufig aus Lackschichten.

Die Isolation der Spulen zwischen unterschiedlichen Strängen bezeichnet man als „Phasenisolierung“. In zweischichtgewickelten Wicklungen befindet sich noch zusätzlich eine Isolierung zwischen den zwei Spulen in einer Nut, welche meist mit einer Nutabdeckung bestehend aus dem gleichen Material wie die Hauptisolation verschlossen werden.

Bei dieser Diplomarbeit wird untersucht, wie in [5] ebenfalls gezeigt wurde, dass die Wicklungskapazitäten im Zuge einer Isolationsalterung starken Veränderungen unterliegen.

In der folgenden Abbildung 2.1 ist der Nutquerschnitt gezeigt und die einzelnen Isolierungen sichtbar dargestellt.

Abbildung 2.1: Seitenansicht einer Stator -Nut.Siehe [4]-Seite 14

Am Ende des Fertigungsprozesses der Isolierung wird die eingelegte Wicklung im Stator mit einem Imprägnierharz oder Lack bedeckt, damit die elektrische und mechanische Festigkeit des Isolationssystems erhöht wird. Das Harz füllt die sich zwischen den Spulen befindende Luft aus und dadurch werden die Wicklungen mechanisch verfestigt. Es schützt die elektrischen Leiter vor Feuchtigkeit und Staub. Beim Betrieb wird die entstehende Verlustwärme besser abgeführt.

Genauere Informationen über die Isolierungen der elektrischen Maschine findet man unter [4].

3 Stator-Isolationsfehler bei Drehfeldmaschinen

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit einer kurzen Einführung in das Thema der Alterungsprozesse der Statorisolation und gibt einen Überblick über bestimmte Methoden zur Erkennung von Stator-Isolationsfehlern.

3.1 Einleitung

Moderne umrichtergespeiste Induktionsmaschinen sind in den letzten Jahrzehnten in der Industrie sehr gebräuchlich. Durch Umrichterspeisung tritt eine transiente Spannung an den Maschinenklemmen auf, die das Zwei bis Vierfache der Zwischenkreisspannung betragen kann. Diese Überspannungen schaden der Isolation zwischen den Statorwicklungen über einen längeren Zeitraum. Unter anderem beeinflusst die Länge der Verbindungskabel zwischen dem Umrichter und der Maschine die Spannungsüberhöhungen stark, siehe [2] und [6].

Die Gründe für einen Ausfall der elektrischen Maschine können in drei Kategorien eingeteilt werden:

- ca. 35% Stator basierende Fehler
- ca. 40% Ursache von Lagerschäden
- ca. 10% Rotor basierende Fehler

Etwa 72% der Stator-Fehler sind auf Wicklungs- und Erdisolationsfehler zurückzuführen, siehe [7] und [8].

Im nächsten Kapitel werden die Ursachen für Statorwicklungsalterung sowie die Fehler im Stator einer elektrischen Maschine beschrieben.

3.2 Alterung der Wicklungsisolation

Wie erwähnt, treten die Isolationsfehler im Stator nicht augenblicklich auf sondern nach einem gewissen Zeitraum. Da bestimmte Fehler in der Isolation zu einem raschen Ausfall der Maschine führen, ist es von Vorteil diese Fehler schon früher zu detektieren. Die Hauptgründe für einen beschleunigten Alterungsprozess, bzw. engl: accelerated aging test, der Wicklungsisolation sind nach [4] folgende:

- **thermische Belastung**

  Wenn die Temperaturgrenze des Isolierungsmaterials der Wicklungen überschritten wird, wird dieses Isolationsmaterial über einen längeren Zeitraum brüchig. Dadurch wird die Lebensdauer der Wicklungen einer Maschine beeinflusst. Eine Temperaturerhöhung um 10°C wird oft als eine Halbierung der Lebensdauer gedeutet (Regel von Montsinger). Die Lebensdauer der Wicklungen wird in der Literatur [4] aus der Gleichung (4.1) bestimmt. (Siehe auch Abbildung 3.1)

$$\boldsymbol{L = A * e^{\frac{B}{T}}} \tag{4.1}$$

  wobei *L* die Lebensdauer, *T* die absolute Temperatur, *B* der thermische Lebensdauerexponent und A der Lageparameter ist Der Lageparameter wird vom Isolierstoff, dem geometrischen Aufbau der Isolierung und den Prüfbedingungen bestimmt. Der Lebensdauerexponent ist von der chemischen Struktur der Isolierung abhängig. Diese Gleichung ist nur gültig für relativ hohe Betriebstemperaturen.

  Bei einem Belastungssprung der Maschine steigt die Temperatur der Spulen schneller als die des Isolationsmaterials. Da die Spulen aus Kupfer bestehen und das Kupfer einen größeren Wärmeausdehnungskoeffizienten hat, kann sich das Kupfer vom Isolationsmaterial der Wicklungen nach einer gewisse Zeit lösen. Desweiteren entstehen noch die Kupferverluste, Eisenverluste und Wirbelstromverluste infolge der thermischen Belastung.

Temperatur Klasse	Zulässige Übertemp.(°C)
A	105
B	130
F	155
H	180

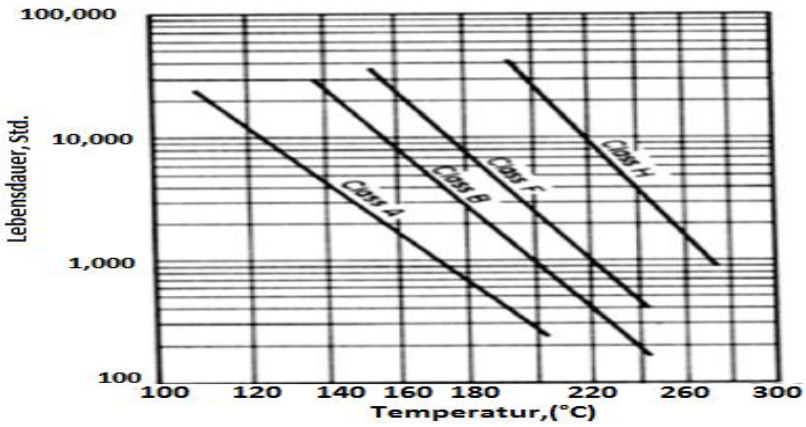

Abbildung 3.1:Lebensdauer der Isolationsmaterialien der elektrischen Maschine nach Klassen [9]

- **elektrische Belastung**

  Bei umrichtergespeisten Antrieben tritt die elektrische Belastung infolge der Schnelligkeit der Schalthandlungen der leistungselektronischen Komponenten auf. Die Komponenten schalten mehrere zigtausend Male pro Sekunde Spannungsimpulse mit sehr steilen Flanken auf die

Maschine auf. Dadurch entstehen Spannungsstoßwellen welche vor allem die Isolation der ersten Windungen der Maschine stark belasten. Bei höheren Speisespannungen können auch Teilentladungen zwischen einzelnen Windungen auftreten, welche die Isolierung verschlechtern können.

- **Umgebungsbelastung**
  Die Isolierungen der Maschine werden auch je nach Einsatzgebiet mehr oder weniger beeinflusst. Wie z.B. hoher Luftfeuchtigkeit, verschmutzter Umgebungsluft, aggressive Chemikalien und letztlich Kondenswasser auf den Wicklungen einer Maschine. Durch Verschmutzung der Oberfläche einer Maschine verringert sich die Wärmeabgabe an die Umgebung, welche wiederum eine thermische Alterung einer Maschine hervorruft.
- **mechanische Belastung**
  Durch Bewegung der Spulen der Statorwicklungen einer Maschine entsteht die mechanische Belastung. Diese Bewegungen resultieren als eine elektromagnetische Kraft, welche proportional zum Quadrat des fließenden Stromes ist. Wenn sich die Windungen in der Nut lockern, dann resultiert ein Isolierungsverschleiß.

In [10] wird der Zusammenhang zwischen der Isolationsalterung und einer Änderung der Kapazität ΔC, sowie des Tangens des Verlustwinkels $\Delta tan\delta$ gezeigt. Es ist zu sehen, dass bei einer Maschine, bei der jährlich die Kapazität gemessen wurde, ein starker Anstieg der Maschinenkapazität vor dem Ausfall der Maschine zu beobachten war. Es ist eine Kapazitätserhöhung zu beobachten, wenn das Isolationsmaterial durch Entladungskanalbildung (engl. electrical treeing) geschädigt wird. Ebenfalls ist eine Kapazitätsverringerung zu beobachten, wenn sich bestimmte Materialschichten von der Isolation lockern bzw. lösen.

3.2.1 Realisierung des beschleunigten Alterungsprozesses

Da das Ziel dieser Arbeit die Detektierung einer Isolationszustandsänderung ist, wurde der beschleunigte Alterungsprozess so realisiert, dass das Prüfobjekt unter wiederholter thermischer Belastung altert. Mit dieser Realisierung können Aussagen über die Haltbarkeit und Lebensdauer von Isolationsmaterialen abgegeben werden. Es können auch andere Methoden angewandt werden z.B. wiederholte mechanischer Belastung, erhöhen der Feuchtigkeit oder elektrische Belastungen. Jedoch wurde in dieser Implementierung eine rein thermische Alterung durchgeführt. Ziel ist laut [11] ungefähr 10 wiederholte Alterungszyklen durchzuführen. Auch die Zyklendauer je nach Temperaturklasse, vom Isolationsmaterial abhängig, wird durch diesen Standard bestimmt. In der Tabelle 3 ist die Einteilung nach Isolationsklasse, Alterungstemperatur und Zyklusdauer aufgelistet.

Klasse F-155°C	Klasse H-180°C	Tag/Zyklus
220-230	245-255	1-2
210-220	234-245	2-3
200-210	225-235	4-6
190-200	215-225	7-10

Tabelle 3:Empfohlene Temperatur und Belastungszyklusdauer nach Norm [11]

Durch eine Vielzahl von Beanspruchungen wie zB.elektrisch, thermisch oder mechanisch kann der Alterungsprozess schneller beschleunigt werden. Dadurch wird eine schnelle Alterung, aber mit ausreichenden Messdaten erreicht. In Testreihen können eine größere Anzahl von Prüfobjekten untersucht werden, um etwaige Produktionsfehler statistisch zu berücksichtigen.

3.2.2 Durchführung einer thermischen Alterung

Zur Erzeugung einer thermischen Belastung wird die Induktionsmaschine in einem Ofen aufgeheizt. Der Temperaturbereich vom Ofen liegt zwischen 0-250°C. Obwohl der Ofen eine eigene analoge Temperaturanzeige hat, wird die Temperatur an mehreren Stellen der Maschine mit Hilfe von K-Typ Temperatursensoren, welche eine genauere und zuverlässigere Temperaturmessung liefern, aufgezeichnet. Der Temperaturverlauf der Maschinenwicklungen wird mit Hilfe einer Zwischenplatine, mittels der die ausgelesenen Temperaturwerte der Sensoren zum PC übertragen werden, im Programm PicoLog angezeigt (Abbildung 11.2). Die Erwärmungs-Kurve der Wicklungen und des Maschinengehäuses sieht man in der Abbildung 3.2. Wie gezeigt wird, steigt die Temperatur der der Wicklungen (blauer Verlauf) langsamer als im Vergleich zur Temperatur des Gehäuses (roter Verlauf) an.

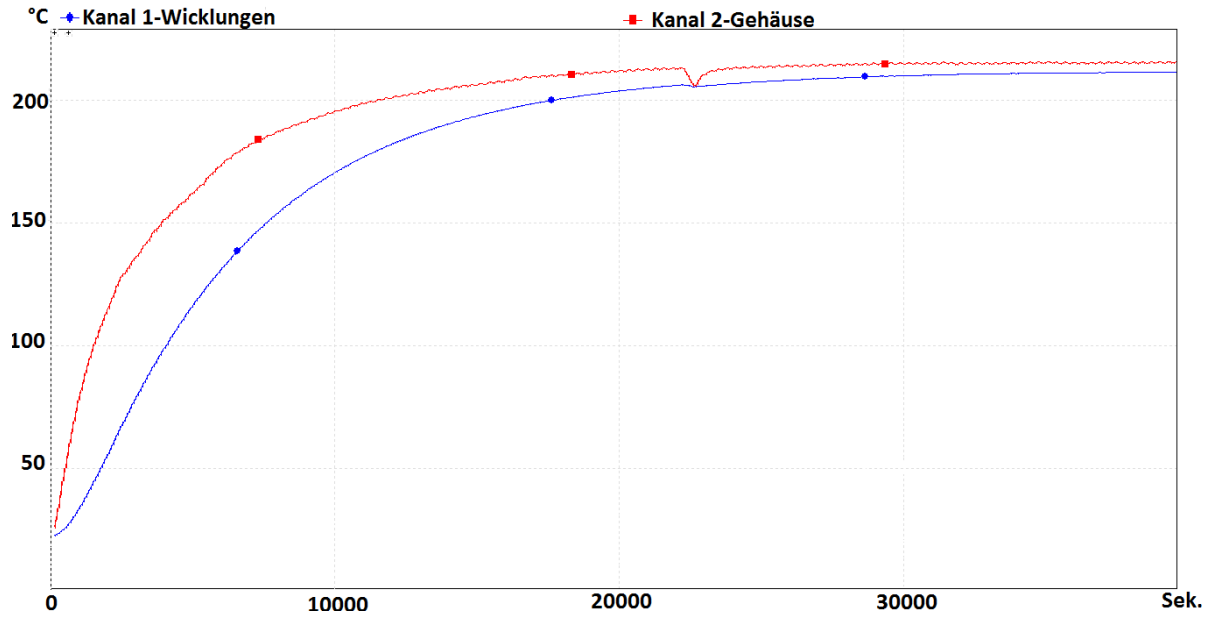

Abbildung 3.2:Erwärmungs-Kurve der Wicklungen der Maschine und Maschinengehäuse

Die Maschine sollte möglichst gleichmäßig erwärmt werden. Das Ziel im Falle der nichtgetränkten Maschine war eine möglichst langsame Alterung um genügend Messungen für die Beobachtung der Isolationsänderungen zu bekommen. In Tabelle 4 befindet sich die eingestellte Temperatur der einzelnen Heizvorgänge der nicht getränkten Maschinenwicklungen.

Vorgänge	**Eingestellte Temp.(°C)**	**Heizdauer(Std.)**
1-10	210	120
11-15	220	60
16-20	225	60
21-25	240	60
25-29	250(max)	312
		Total=612

Tabelle 4:Heizvorgangsdauer der nicht getränktisolierte Maschine mit eingestellte Temperaturen

Die genauen Daten des Heizvorgangs der getränkten Maschinenwicklung ist in Tabelle 5 dargestellt, wobei die Temperatur und Belastungsperiode exakt nach Norm [11] bestimmt wurden.

Am Ende des achten Heizvorgangs wurden in einer Phase der Maschine (Phase W) sichtbare Fehlstellen der Drahtlackisolation festgestellt. An mehreren Stellen trat zwischen Wicklung und

Maschinengehäuse ein Kurzschluss auf. Im Anhang Abbildung 11.8 sieht man diese anhand der Seitenansicht der getränkten Wicklungen. Mittels der Messergebnisse, welche im folgenden Kapitel gezeigt werden, konnte diese Beschädigung ebenfalls festgestellt werden.

Vorgänge	**Eingestellte Temp.(°C)**	**Heizdauer(Std.)**
1-2	220	72
3	230	48
4-7	240	120
8	245	48
		Total=288

Tabelle 5: Heizvorgangsdauer der getränkten Maschine mit eingestellte Temperaturen

3.2.2.1 Zusätzliche elektrische Einspeisung

Da die erste Maschinenwicklungen am Ende der geplanten Alterungszeit, welche nach [11] bestimmt wurde, nicht nach 10 Zyklen ausgefallen ist, ist die Maschine mittels Gleichstromnetzgerät zusätzlich elektrisch belastet worden, damit eine Wicklungstemperatur von über 250°C erreicht werden konnte. Die Einspeisung ist in der Abbildung 11.3 zu sehen. Die Temperatur der im Ofen liegenden Maschine steigt von außen nach innen an, wenn die Erwärmung durch die Heizstäbe im Ofen stattfindet, bis schließlich alle Teile den Endwert erreicht haben. Mit der zusätzlichen elektrischen Einspeisung steigt die Temperatur weiter, diesmal jedoch von innen nach außen. Dadurch können die Isolationen auch stärker beschädigt werden. Die Wicklungstemperatur konnte so 250°C übersteigen, welche die maximal Temperatur des Ofens darstellt.

Schließlich ist die Isolation der nicht getränkten Maschinenwicklungen auf diese Weise bis zur endgültigen Zerstörung gealtert. Die Seitenansicht der nicht getränkten Wicklungen ist in der Abbildung *11.6* zu sehen.

3.3 Prüfverfahren der Wicklungsisolation

Die Verfahren können in Online und Offline-Verfahren eingeteilt werden. Bei den Offline-Verfahren wird die Maschine außer Betrieb gesetzt und vom Netz bzw. Umrichter getrennt. Ein Ausbau der Maschine ist daher erforderlich. Bei Online-Verfahren kann die Maschine ohne diese außer Betrieb

zu nehmen mit zusätzlicher Hardware geprüft werden. Online-Verfahren bieten den Vorteil des unterbrechungsfreien Betriebs.

Typische verwendete Offline Verfahren sind der „Offline Surge Test“, „DC Conductivitiy Test“, „Insulation Resistance Test“ und der „Polarization Index Test“. Eine Übersicht der Verfahren wird in [4] gegeben. Ein Offline Verfahren welches in dieser Arbeit verwendet wird ist die Messung des Übertragungsverhaltens der Wicklung bzw. Einzelkomponenten mittels Frequenzspektrumanalysator. Die Ermittlung des Frequenzübertragungsverhaltens wird mit Hilfe eines Frequenzanalysators durchgeführt, welcher das Messobjekt mit einer sinusförmigen Spannung von circa 1V anregt und dabei einen bestimmten Frequenzbereich durchläuft. Das Verhältnis aus der Eingangsspannung und dem gemessenen Strom wird in Abhängigkeit von der Frequenz dargestellt.

Zu den Online Verfahren zählen unter anderen der „Online Partial Discharge (PD) Monitor“ [4] und der am Institut für Energiesysteme und elektrische Antriebe entwickelte „Insulation State Indicator (ISI)“ [12]. Der Online PD Monitor ist ein von der Industrie akzeptiertes Verfahren, welche bei Maschinen mittlerer und höherer Spannung anwendbar ist. Das heißt dieses Verfahren ist passend für formgewickelte Statorwicklungen. Dieses Verfahren ist ein zerstörungsfreies vorbeugendes Instandhaltungswerkzeug, welche Teilentladungen in Windungen erkennen und lokalisieren kann.

Im Folgenden wird das Online Verfahren ISI kurz erklärt.

- **Insulation State Indicator**

  Mit den vom Wechselrichter generierten Spannungssprüngen wird die zuvor strom- und flusslose Statorwicklung der Prüfmaschine angeregt. Danach wird die erhaltene transiente Stromantwort mit einer hohen Abtastrate aufgezeichnet. Durch Änderung des Isolationszustandes wird auch eine Änderung der Stromantwort hervorgerufen. Nach bestimmter Signalverarbeitung der Messungen und Vergleich mit der Referenzmessung der gesunden Maschine, kann eine Aussage über den Isolationszustand getroffen werden. Nach [13] und [14] benötigt dieses Verfahren keine zusätzliche Hardware. In Anlehnung an diese Methode wird in dieser Arbeit eine adaptierte Variante mit Pulsfolgen verwendet, um den Isolationszustand der Statorwicklungen der Induktionsmaschine zu überwachen.

4 Beschreibung des Prüfstandes

In diesem Kapitel wird der verwendete Prüfstand vorgestellt, um ein Verständnis für das Gesamtsystem und das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten zu erlangen. Der Prüfstand wird vom Institut für Energiesysteme und elektrische Antriebe zur Verfügung gestellt. Er wurde im Rahmen diverser Diplom- und Bachelorarbeiten entwickelt. Eine Übersicht des verwendeten Messplatzes ist im Anhang in der Abbildung 11.1 zu sehen.

4.1 Aufbau

In der Abbildung 4.1 ist die Interaktion der einzelnen Komponenten des Prüfstandes ersichtlich. Das Mess-Steuer-Regelungssystem dient zwei Aufgaben. Erstens zeichnet es die Signale von den Stromsensoren auf und zweitens erzeugt es die Steuersignale für den Umrichter. Mit diesem System kann auch die feldorientierte Regelung der angeschlossenen Maschine durchgeführt werden. Diese ist für die Ermittlung des Isolationszustandsindikators nicht notwendig, weil die Stromantworten immer bei stillstehender Maschine und nicht eingebautem Rotor im unmagnetisierten Zustand gemessen werden.

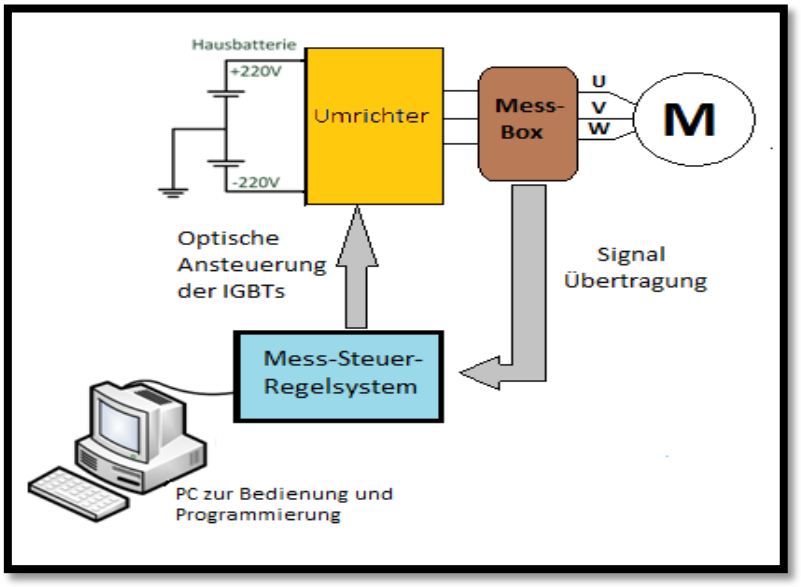

Abbildung 4.1: Prinzipskizze des Prüfstandes

Die Versuchsmaschine wird an einen Semikron IGBT-Pulsumrichter angeschlossen, dessen Gleichspannungsversorgung zuerst von der Hausbatterie des Instituts bzw. von einem Delta-

Gleichsspannungsnetzgerät geliefert wird. Es wurde daher kein eingangsseitiger Gleichrichter im Umrichter benötigt.

Eine Messbox wird zwischen dem Umrichter und der Maschine aufgebaut. Die Strangströme werden mit zwei unterschiedlichen Sensoren gemessen. Die LEM Stromsensoren messen den Strangstrom in der Messbox (über Abschlusswiderstände wird das Spannungssignal an den ADC weitergeleitet) und zusätzliche Rogowski Spulen, messen die Ströme direkt ohne Signalaufbereitung.

Die oben gezeigten Komponenten werden im Folgenden im Detail beschrieben.

4.2 Versuchsmaschine

Als Testmaschine wird eine Asynchronmaschine ohne Rotor des Instituts für Energiesysteme und elektrische Maschinen verwendet. Nachdem die erste Versuchsreihe mit nicht getränkter Statorwicklung durchgeführt wird, wird der zweite Durchgang mit demselben Stator mit getränkter Wicklung untersucht. Die Kenndaten der ersten Maschine sind in Tabelle 6 aufgelistet.

Bezeichnung	**Wert**
Nennspannung(V)	280
Nennstrom(A)	14,28
Nennfrequenz(Hz)	75
Polpaarzahl (1)	2
Nenndrehzahl (Upm)	2186
Nennschlupf (%)	2,832
Nennleistung (W)	5500
Nennmoment (Nm)	24,04
Leistungsfaktor (1)	0,916
Statorwiderstand(Ω)	0,678

Tabelle 6: Kenndaten der Asynchronmaschine für Sternschaltung und serielle Wicklungen

Die Statorwicklung der ersten Maschine ist als Zweischichtwicklung mit gesehnten Spulen, 18 Leiter pro Nut mit der F-Klasse Isolation gewickelt. Der Draht hat einen Querschnitt von 1,98 mm^2.

Die getränkte Maschine besteht aus einer ganz ähnlichen Wicklung, wobei einige Komponenten für die Isolationsklasse H-Klasse spezifiziert sind. Wie in Kapitel 3 erwähnt, dient das Tränkharz zur Verfestigung und liefert bessere dielektrische und mechanische Eigenschaften. In Abbildung 4.2 ist

ein Foto der verwendeten Asynchronmaschine mit nicht getränkter Wicklunge dargestellt. Die leeren Nuten vom Statorgehäuse der Maschine sind in der rechten Seite der Abbildung 4.2 dargestellt.

Im Anhang in der Abbildung 11.4, Abbildung 11.7 und Abbildung 11.8 ist die Seitenansicht der beiden verwendeten Wicklungen bevor und nach dem Alterungsvorgang dargestellt. Der Einfluss der oben erwähnten zusätzlichen elektrischen Einspeisung in die Wicklung ist ebenfalls im Anhang in der Abbildung 11.5 und Abbildung 11.6 sichtbar.

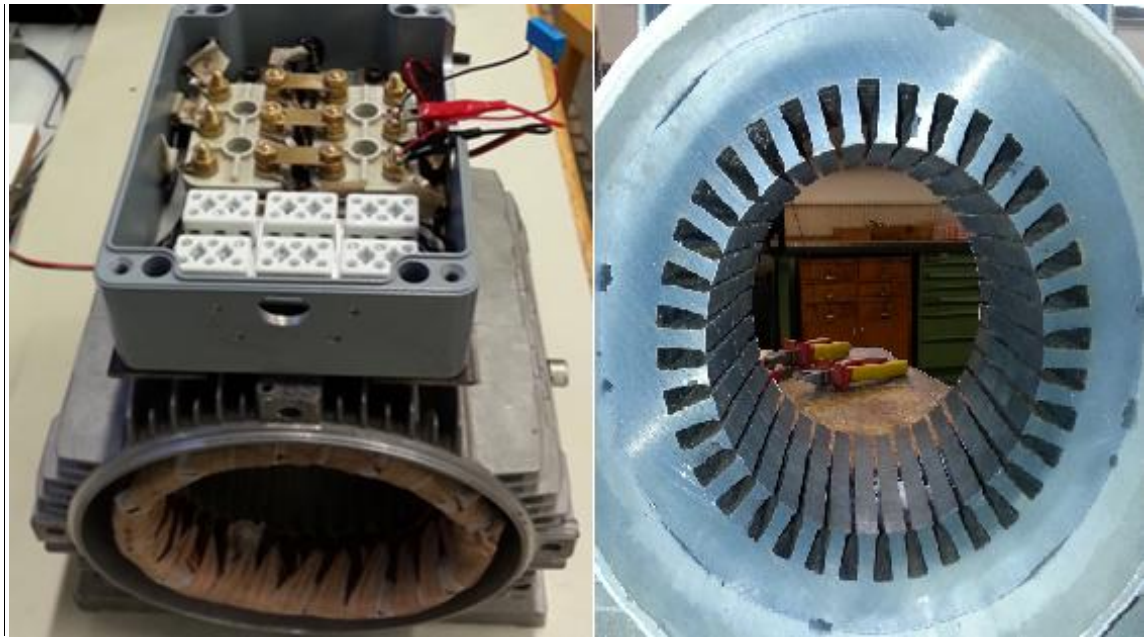

Abbildung 4.2:li. Foto ASM und re. leeres Statorgehäuse

4.3 Umrichter

Im Rahmen einer Bachelorarbeit wurde der Frequenzumrichter am Institut für Energiesysteme und elektrische Maschinen eingerichtet. Dieser dreiphasige Halbbrücken-Umrichter enthält einen Semikron-Leitungs-IGBT-Stack, welcher sehr schnellere Schalthandlungen bis zu einer Zwischenkreisspannung von 600V durchführen kann. Der Spannungszwischenkreis wird am Anfang der Arbeit mit der Hausbatterie mit 440V (+/- 220V) und nach einer gewissen Zeit mit dem Gleichspannungsnetzgerät versorgt. Es wird kein Gleichrichter benötigt.

Der Umrichter kann für 1 Minute bei 100% bis 150% des Nennstroms (I_N=50A) und für 10 Sekunden bei 150% bis 200% des Nennstromes betrieben werden. Der Umrichter ist mit sechs Glasfaserkabeln zur Zwischenplatine verbunden über welche die Ansteuersignale für die Halbbrücken geliefert werden. Die Signale müssen invertiert angelegt werden. D.h. eine logische Null bedeutet, dass der IGBT leitet.

Der Umrichter muss aus Sicherheitsgründen software- und hardwareseitig freigegeben werden. In Tabelle 7 sind einige Kennwerte des Umrichters aufgelistet.

Parameter	Wert	Einheit
max. Versorgungsspannung Stack DC	800	V
max. Versorgungsspannung Stack AC	380	V
max. Schaltfrequenz	10	kHz
max. Ausgangsstrom (RMS)	50	A
Entladedauer der Kapazitätsbank	60	s
AC Versorgungsspannung	230	V

Tabelle 7: Kenndaten des Umrichters

4.4 Messbox

In diesem Abschnitt werden die verwendeten Messsensoren und ihre bestimmten Merkmale dargestellt. Durch Nutzung zweier verschiedener Arten von Stromsensoren mit unterschiedlichem Messprinzip und Bandbreitenbegrenzungen kann das Verhalten und die Genauigkeit in Abhängigkeit des Sensors verglichen werden. Die verwendete Messbox ist bei dem Projekt so aufgebaut, dass die Stromwerte der zugeführten Leitungen zur Maschine mit geschirmten Kabeln erfasst werden können. Für jeden Phasenleiter der Maschine ist in der Messbox ein Sensor zuständig. Die Sensoren sind auf einer Lochrasterplatine gelötet. Der Aufbau der Messbox ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Da die zu messenden Signale möglichst gut frei von Einstreuungen von außen sein sollen, ist die Messbox geerdet und die Kabel sind geschirmt. Um die hochfrequenten Kopplungen zu eliminieren ist diese Schirmung nötig. Das Signal-Rauschverhältnis (SNR) hängt von der Verkabelung zwischen Umrichter und Maschine, dem Versorgungsspannungspegel und den verwendeten Sensoren selbst ab. In der Abbildung 4.4 ist der Einfluss der Schirmung ab 6MHz sichtbar.

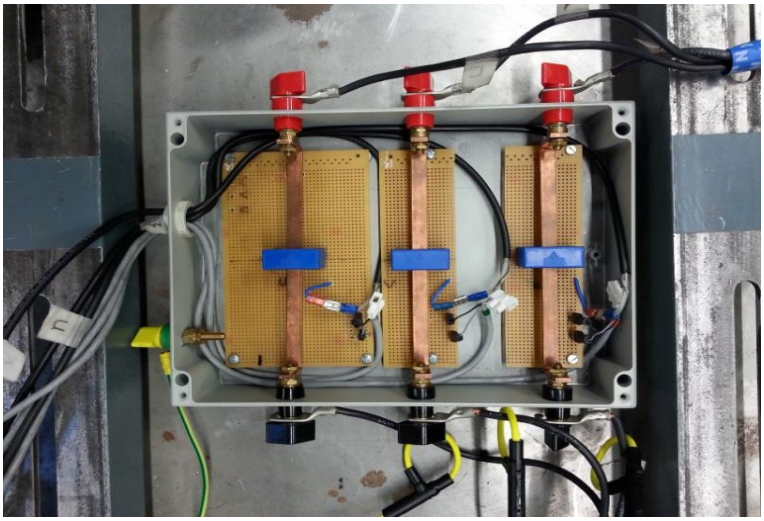

Abbildung 4.3: Aufbau des Messbox

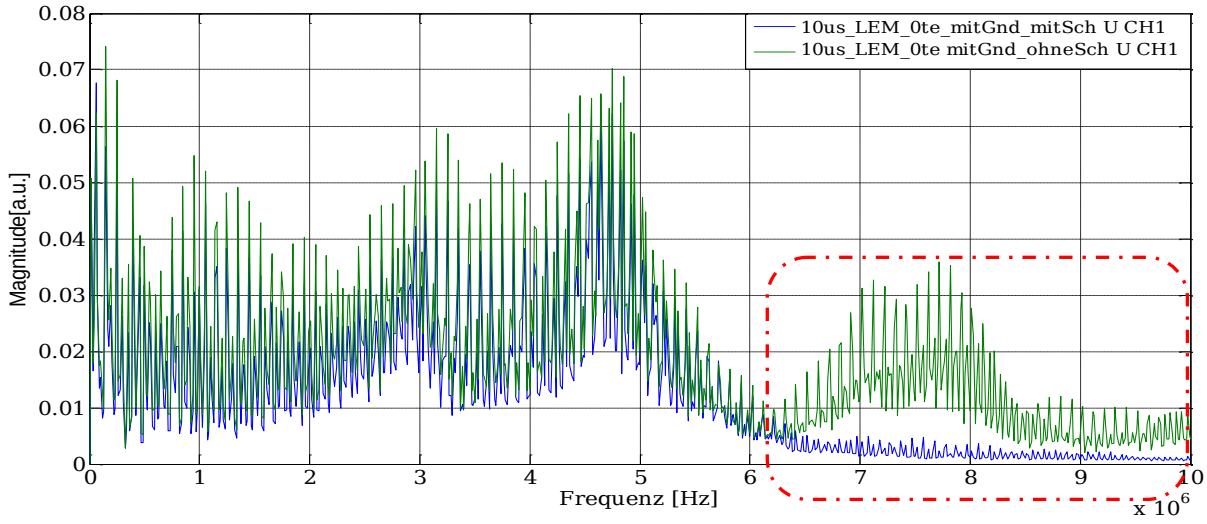

Abbildung 4.4:Frequenzspektrum von 10µs Pulse, mit und ohne geschirmte Kabeln

4.4.1 LEM Sensoren

Der LEM LA-55P-SP1, dargestellt in der Abbildung 4.5, ist ein closed-loop-Wandler und dient der Messung von Gleich- und Wechselströmen. Diese Sensoren sind in der Messbox so aufgebaut, dass die Zuleitungen der Maschine mit einem massiven Stromleiter durch das innere der Sensoren geführt werden. Dies Art Sensoren haben eine große Genauigkeit, sehr hohe Linearität, geringen Temperaturdrift und eine große Bandbreite (DC 200kHz). Die Reaktionszeit ist kleiner als 1 µs. Die closed-loop-Wandler können $\frac{di}{dt}$-Steilheiten von etwa 50A/µs bis zu mehreren 100 A/µs messen.

Abbildung 4.5: Foto des LEMs [17]

4.4.2 Rogowski Spulen

Die Rogowski CWT Mini HF06B, dargestellt in der Abbildung 4.6, dient der Strommessung mittels geschlossener Messschleife. Der stromführende Leiter wird durch diese Schleife geführt und erzeugt ein veränderliches Magnetfeld Ψ , welches in der Rogowskispule eine Spannung $''u''$ induziert (4.40). Der Strom $''i''$ läßt sich durch integrieren der induzierten Spannung berechnen, siehe Formel (4.41).

Abbildung 4.6:Foto der verwendeten Rogowski Spule

$$u = \frac{d\Psi}{\mathrm{dt}} = \mathrm{N} * \mathrm{A} * \mu * \frac{\mathrm{di}}{\mathrm{dt}} = \mathrm{L} * \frac{\mathrm{di}}{\mathrm{dt}} \tag{4.40}$$

$$i = \frac{1}{L}\int u\, dt \tag{4.41}$$

Rogowskispulen haben einen robusten Aufbau im Vergleich zum LEM. Mit diesem Stromsensor können $\frac{di}{dt}$-Steilheiten bis 40kA/µs gemessen werden. Die Rogowski Spulen haben einen Bandbreite von 20MHz und eine Sensitivität von 50mV/A.

4.5 Mess-Steuer-Regelungssystem

In diesem Teil wird das verwendete Mess-Steuer-Regelsystem beschrieben. Es handelt sich dabei um ein System von National Instruments (NI). Das Hardware System ist in der Abbildung 4.7 zu sehen, welches einen Prozessor vom Typ „NI PXIe-8133“ mit vier Rechenkernen besitzt mit einer maximalen Taktfrequenz von 3,06 GHz. Es besitzt über vier Gigabyte Arbeitsspeicher und eine 250 Gigabyte großen Solid-State Festplatte. Im Gehäuse haben bis zu acht Module Platz, jedoch sind derzeit nur drei Module aufgebaut. Zwei der drei Module wurde für die Messung verwendet. Der nicht verwendete FPGA ist vom Typ „NI PXIe-7961R“, welcher auf das Digitizer Adaptermodul „NI 5751“ aufgesteckt wird und kann 16 Kanäle zu je 50 MS/s mit einer Auflösung von 14 Bit erfassen. Er dient zur Strommessung, welche für die sensorlose Regelung der Maschinen nötig ist.

Abbildung 4.7: Foto des NI Systems

Das erste FPGA ist vom Typ ``NI PXI-7841R``, welches zur Erzeugung des Pulsmusters für die Transistoren des Umrichters dient. Das zweite FPGA vom Typ ``NI PXIe-7962R``, das mit einem zusätzlichen Digitizer Modul ``NI 5734`` ausgestattet ist, wird für Messaufgaben verwendet. Dieses FPGA wird für die hochfrequente Stromabtastung benötigt. Es hat vier Analogkanäle mit einer Abtastrate von 120MHz und einem 16 Bit Auflösung.

Alle Komponenten des Systems wurden mit der auf dem PC installierten Software *LabVIEW 2011* programmiert. LabVIEW ist eine von National Instruments lizenzierte Programmierungssoftware. Der PC und das LabVIEW-Programm kommunizieren über eine Ethernet-Schnittstelle.

Eine Zwischenplatine dient zum Ansteuern des Umrichters und der Messprint dient zur Anpassung der Sensorsignale für die Eingänge der NI Hardware hinsichtlich Spannungsbereich und Abschlusswiderstand. Weitere Details sind der Diplomarbeit [15] zu entnehmen. In Abbildung 4.8 sind die beiden verwendeten Prints sichtbar.

Abbildung 4.8:Abbildungen von Zwischenplatine (li.) und Messprint (re.)

4.6 Beschreibung der FRD Messungen

In diesem Teil der Arbeit wird der Ablauf einer Messung beschrieben. Im ersten Schritt werden die abwechselnden Spannungssprünge bzw. Pulsfolgen in den Strängen U, V und W aufgeschalten. Dabei werden die Stromantworten der drei Phasen gemessen. Die Anregungspulsfolgen werden mit Hilfe des Spannungszwischenkreisumrichter erzeugt. In der Abbildung 4.9 ist das Prinzipschaltbild eines Spannungszwischenkreisumrichter dargestellt.

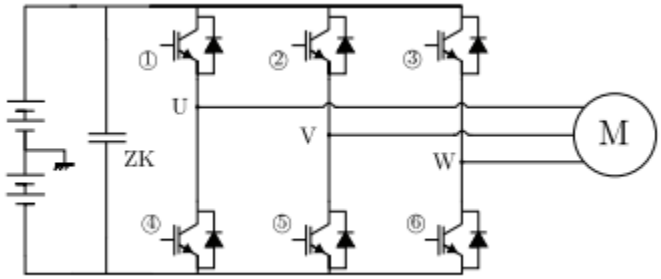

Abbildung 4.9: Prinzipschaltbild eines Spannungszwischenkreisumrichter

Bei einer sternförmig verschaltenen Statorwicklung der Maschine steigt der Strom in der Phase, wo die positive Spannung angelegt wird, steil an. So sinken die Ströme in den anderen Wicklungen, so dass die Summe der Ströme in einem Y-Schaltung Null liefert. In der folgenden Abbildung 4.10 ist die an die U Phase gelegte Spannungspulsfolge und die daraus resultierenden Ströme I_U, I_V und I_W der Wicklungen der Maschine gezeigt.

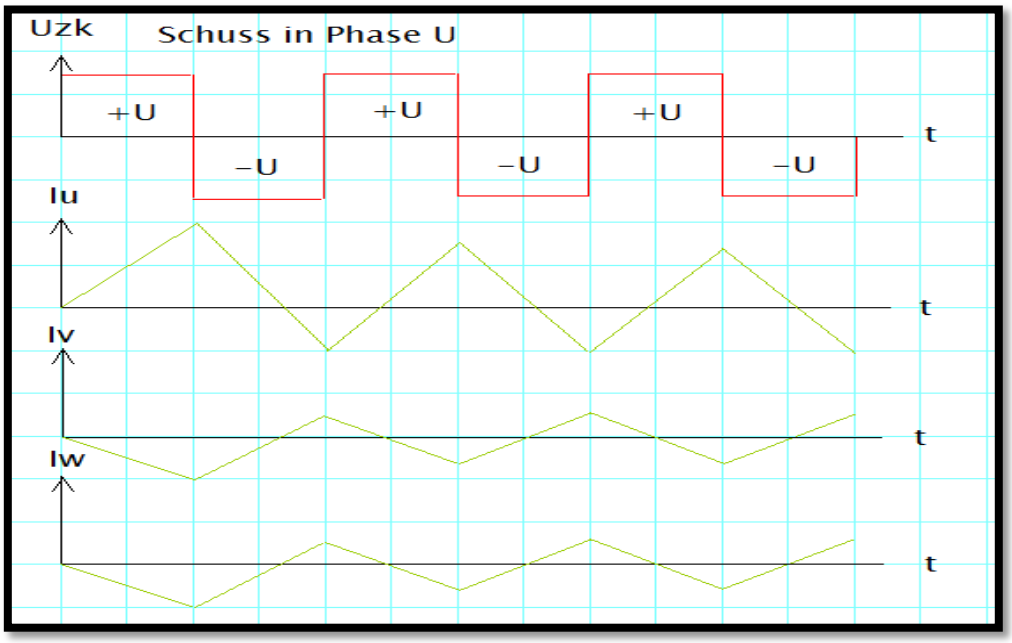

Abbildung 4.10:Pulsfolge in Phase U und resultierende Ströme der Wicklungen

Die Messungen werden immer bei abgekühlter Maschine nach jedem Zyklus im unmagnetisierten Zustand durchgeführt. Das Mess-Steuer-Regelsystem unterstützt auch die Aufzeichnung der Messsignale im geregelten Betrieb, dazu wird für einen Regelzyklus das PWM generierte Pulsmuster durch ein eigens festlegbares Pulsmuster ersetzt.

Der Ablauf der Messung sieht folgendermaßen aus:

- ❖ Anlegen der entworfenen Spannungssprünge vom IGBT-Pulsumrichter und Aufzeichnung der Stromantworten aller Phasen der Maschine
- ❖ Signalverarbeitung: Anwenden des Triggererkennungsalgorithmus auf die erhaltenen Signale, um die erste steigende Flanke zu bestimmen.
  Dann subtrahieren des berechneten Mittelwertes um im Spektrum den Gleichanteil zu eliminieren.
- ❖ Anwenden des FFT Algorithmus auf die resultierenden Signale um das Frequenzspektrum auf Änderungen zu analysieren
- ❖ FRD bestimmen mittels Berechnung des RMSD-Methode.
  Eventuell kann der SFRD (räumlicher frequency response deviation) mit der Linearkombination von jeder Phase berechnet werden.
- ❖ Testen der Isolationszustandsänderung durch Vergleich zwischen dem Referenzsignal und den weiteren Messungen nach den Alterungszyklen.

Um eine Messreihe aufzunehmen muss folgendes über die Anwenderschnittstelle von LabVIEW eingestellt werden:

- o **Maschinenparameter**
  Für die Regelung sind diese Parameter notwendig. Diese sind in csv- Dateien gespeichert und werden geladen sobald die Datei aufgerufen wird.
- o **PWM-Periodendauer**
  Eine PWM-Periodendauer von 400 µs wurde für die Messungen eingestellt. 300 µs wird nur für Messungen der Pulsfolge mit einer Einzelpulsdauer von 3µs verwendet.
- o **Pulsmuster**
  Das anzulegende Pulsmuster wird in einer Textdatei, welche aus sechs Spalten besteht, festgelegt. Der Wert welcher den anzulegenden Spannungsraumzeiger definiert befindet sich in der ersten Spalte. In der zweiten Spalte wird der Zeitpunkt der Schalthandlung in Promille der PWM-Periode angegeben. Die restlichen vier Spalten entsprechen den Messzeitpunkten. Die Zahl 65535 ist als Platzhalter für nicht erreichbare Zeiten definiert. 255 ist der Platzhalter für nicht genutzte Spannungsraumzeiger. Die Pulsfolgen können erzeugt werden indem

jeweils der obere oder der untere Transistor einer Halbbrücke des Umrichters leitend ist, wobei sich insgesamt $2^3 = 8$ Schaltkombinationen ergeben. Der Wert 1 wird für den leitenden oberen Transistor definiert und 0 ist der Wert für den unteren leitenden Transistor. Für die Reihenfolge W-V-U kann die Schaltkombination als Dezimalwert interpretiert werden. Diese interpretierende Zahl entspricht dem jeweiligen Spannungsraumzeiger.

Eine Übersicht ist in Tabelle 8 dargestellt. In der Abbildung 4.11 ist der erste Teil der verwendete Pulsmuster mit 6µs Pulsfolge abgebildet. Da pro PWM-Periodendauer bis zu acht Schalthandlungen möglich sind, können maximal drei vollständige Perioden die Pulsfolge definieren. (Siehe Abbildung 4.10) .

Schussrichtung	**Halbbrücke W**	**Halbbrücke V**	**Halbbrücke U**	**Dezimalwert**
U+	0	0	1	1
U-	1	1	0	6
V+	0	1	0	2
V-	1	0	1	5
W+	1	0	0	4
W-	0	1	1	3
Kurzschluss+	1	1	1	7
Kurzschluss-	0	0	0	0

Tabelle 8: Zur Codierung des Spannungsraumzeigers.

0	0	65535	65535	65535	65535
1	125	125	65535	65535	65535
6	140	65535	65535	65535	65535
1	155	65535	65535	65535	65535
6	170	65535	65535	65535	65535
1	185	65535	65535	65535	65535
6	200	65535	65535	65535	65535
0	215	65535	65535	65535	65535

Abbildung 4.11:Pulsmuster-Dateien von +U/-U Anregungen für 6µs Pulsfolge

- **Puls-Rate** (Informrate)

  Die Pulsrate gibt an, nach wie vielen PWM-Perioden ein Pulsmuster aus der oben gezeigten Tabelle erzeugt wird. Für die Puls-Rate wurde der Wert 50 eingestellt. Das hat zur Folge, dass alle 50 PWM-Zyklen die Messung durchgeführt wird.

- **Anzahl der Abtastpunkte** (Number of Samples)

  Gibt an wie viele Messpunkte bei einer Messung aufgenommen werden. Je nach Abtastfrequenz wird die Anzahl so eingestellt, dass die komplette Pulsfolge aufgezeichnet wird (zB.: Eine Signaldauer von 100µs entspricht ca. 12000 Abtastpunkten bei einer Abtastrate von 120MS/s).

- **Anzahl der Messungen** (Number of Records)

  Gibt die Anzahl der durchzuführenden Messungen pro Schussrichtung und Phase an. Bei einer statistischen Auswertung der Messungen spielt diese Zahl eine wichtige Rolle. Je mehr Messdaten aufgenommen werden, desto genauer kann eine Aussage über die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse gemacht werden. Typische Werte sind im Bereich zwischen 40 und 150.

- **Konvertierung der Messdaten**

  Wenn eine Messreihe abgeschlossen ist, befinden sich die Messdaten als TDMS Datei auf der Festplatte des RT Systems. Diese Datei kann auf den PC über einen FTP Server, welcher am RT System läuft, übertragen werden. Für die anschließende Auswertung mit Matlab ist eine Konvertierung der Messdaten vom TDMS in MAT-Dateien notwendig.

Eine weitere Analysemethode neben der Pulsfolge ist die *Common-Mode Messung*, bei welcher die Erdkapazitätsänderungen bzw. Hauptisolationsänderungen untersucht werden. Alle drei Phasen der Versuchsmaschine werden gleichzeitig zuerst auf das positive Potential und dann auf das negative Potential des Zwischenkreises gelegt. Dieser Vorgang wird bis zu dreimal wiederholt. Da alle Phasen auf das gleiche Potential gelegt werden, kann kein Strom in der Maschine fließen und nur die Erdströme werden damit betrachtet. Diese Methode wird ebenfalls in dieser Arbeit untersucht.

5 Evaluierung der Alterung mit Frequency Response Deviation(FRD)

In diesem Kapitel wird das Online Verfahren FRD Schritt für Schritt erklärt. Wie bei dem Messablauf vorher erwähnt wurde, soll zuerst die Stromantwort der Maschine erfasst werden. Durch das Anlegen der Spannungspulsfolgen mit je 10µs für eine halbe Periodendauer, besitzt die Pulsfolge eine Grundfrequenz von $\frac{1}{20\mu s}$ =50kHz.

Zunächst können die konvertierten Messdaten der Stromantworten mit Hilfe des am Institut entwickelten Diagnosetool (FRD Tool) dargestellt werden, siehe Abbildung 5.1. Die Beschreibung der Legende soll hier kurz erläutert werden. Die erste Zahl gibt die halbe Periodendauer der Anregungsfrequenz wieder. Dann steht 'rog' für Rogowskispulen Messsensor bzw. LEM für die Messung mittels Lem-Sensor und das Zeichen `#` deutet an, dass die Versuchsmaschine mit Tränk- bzw. Harzmaterial isolierten Wicklungen ausgerüstet ist. Wenn das Zeichen`#` fehlt, dann ist die Maschinenwicklungen ohne Tränk- bzw. Harz Isolierungsmaterial ausgeführt. Weiters steht `U CH1, CH2 und CH3´ in dieser Box. Mit dem Zeichen `U` versteht man, dass die U Phase der Statorwicklung durch den Umrichter positiv angeregt ist und die drei Kanäle (CH1, CH2 und CH3) die Signale für die einzelnen Phasen (U, V und W) zeigen.

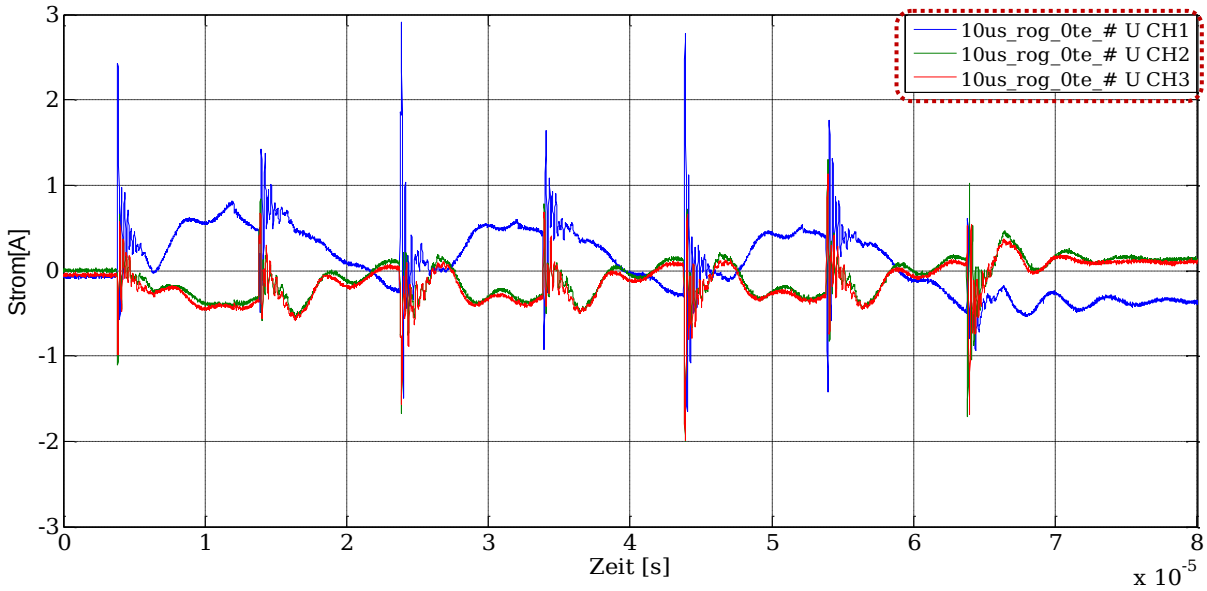

Abbildung 5.1: Mit Rogowski Spulen aufgezeichnete Stromantwortmessungen der Wicklungen bei 50kHz Anregung

In den oben gezeigten Signalen sieht man alle drei Phasenmessungen der Wicklungen U, V und W. Wie erwartet steigen am Anfang die Stromwerte der positiv angeregten Wicklung-U (blaues Signal) an und die andere Wicklungen V (grün) und W (rot) sinken dagegen, wobei die Summe im (quasi-) stationären Zustand Null liefert. An den Zeitpunkten, wo die Schalthandlungen stattfinden, zeigen die Ströme transiente Einschwingvorgänge mit hohen Stromspitzen. Der Grund dafür sind, wie auch in [2] beschrieben wird, die vom IGBT-Umrichter verursachten großen Spannungsänderungen (hohes du/dt) sowie Reflexionen auf der Leitung zwischen Umrichter und Maschine.

Das angelegte Spannungssignal bei Schalthandlung mit 10µs ist mit Hilfe eines Oszilloskops in Abbildung 5.2 zu sehen. Hier sieht man die Verzögerung zwischen einem Ansteuersignal (blauer Verlauf oben) und dem am Umrichterausgang gemessenen Signal. Ein Versatz von etwa 3µs ist zu sehen, bedingt durch die Totzeit, Verzögerung im Übertragungsmodul etc. Wie ebenfalls in dieser Abbildung zu sehen ist, kann durch das nichtideale Schaltverhalten des Umrichters, bedingt durch die Totzeit, Anstiegszeiten etc. kein ideales rechteckförmiges Signal erzeugt werden.

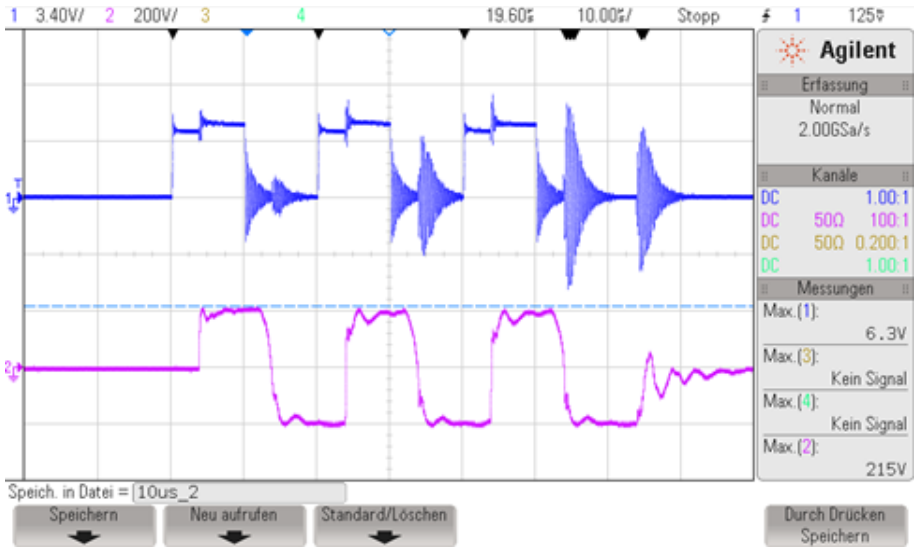

Abbildung 5.2: Pulssignale am Ausgang des Ansteuerprints und gemessen an der Maschinenwicklung mit 20µs Pulsfile

Gemäß des FRD Verfahrens werden die Signale mittels Matlab-Tool verarbeitet. In diesem Tool steht eine Schnittstelle für die Verarbeitung, in der man unter anderem die Anzahl der Messpunkte, Fenstergröße für FFT und interessierenden Frequenzbereich einstellen kann, zur Verfügung. Ein Ausschnitt des FRD-Tools ist in der Abbildung 5.3 dargestellt. Sowohl für die Zeitsignalverarbeitungen als auch für die weitere benötigte Frequenzbereichs-Analyse wird dieses Tool verwendet.

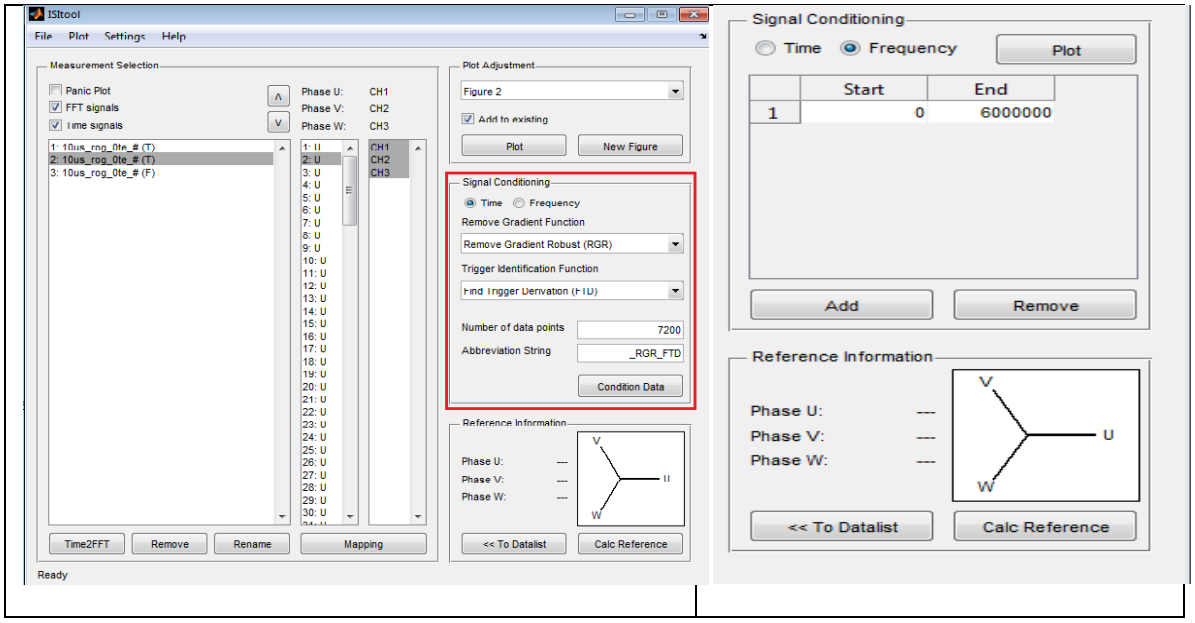

Abbildung 5.3: FRD-Tool

In der folgenden Abbildung 5.4 sieht man die bearbeiteten aufgenommenen Stromantworten. Der Mittelwert wurde abgezogen und das Fenster für die FFT definiert. Das bearbeitete Zeitsignal kann jetzt in den Frequenzbereich transformiert werden.

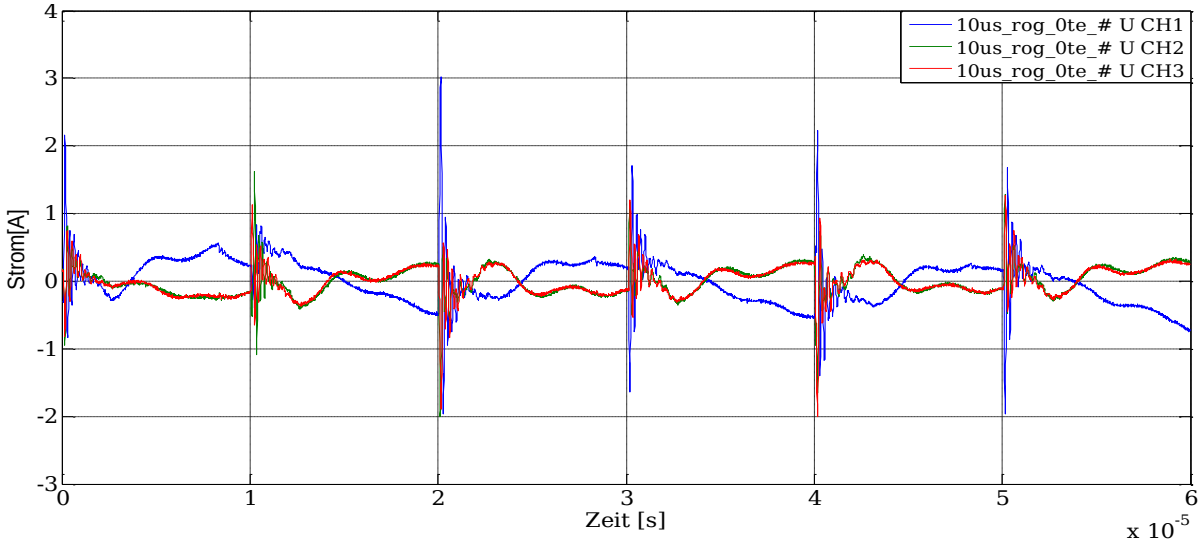

Abbildung 5.4: Bearbeitete Zeitsignale aller drei Phasen

Wie erwähnt, ist der transiente Einschwingvorgang des Signals sehr wichtig für die Analyse der Wicklungsalterung. In der Abbildung 5.5 ist ein Zeitsignal mit einer Dauer von 10µs abgebildet, wo der erste positive Anstieg des Stromsignals der Phase U dargestellt wird. Zu sehen ist, dass ein sehr hochfrequenter Anteil innerhalb der ersten 2-3µs abklingt und der weitere Stromanstieg hauptsächlich durch die Induktivität bestimmt ist.

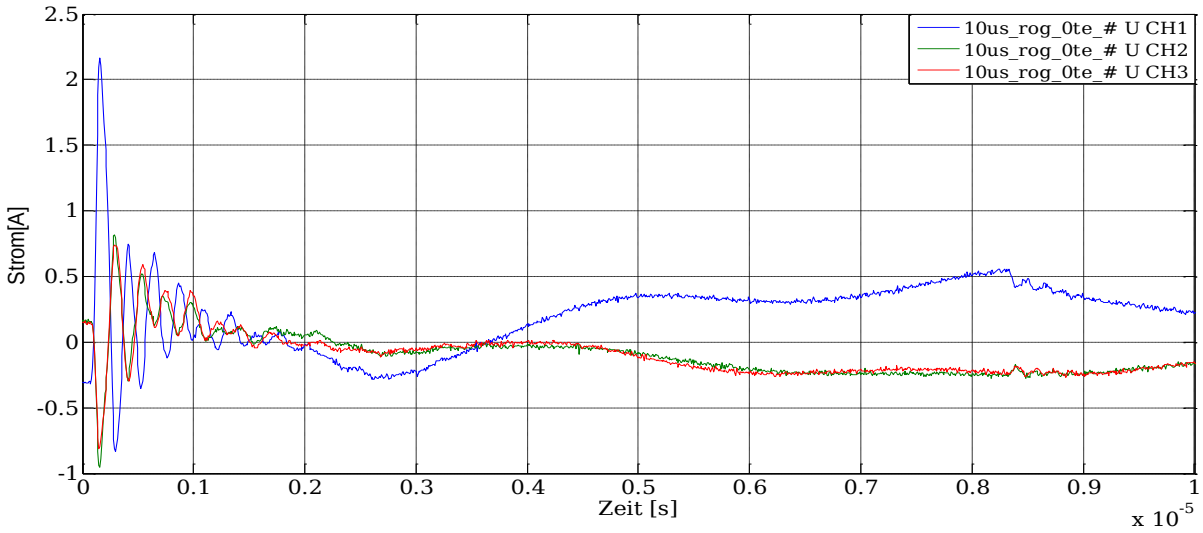

Abbildung 5.5: Zeitsignale mit einer Dauer von 10µs in allen Phasen

Das bearbeitete Signal wird mit Hilfe des FFT Algorithmus in den Frequenzbereich konvertiert. Obwohl das Spektrum über einen weiten Bereich erstellt wird, interessieren wir uns nur bis zu einem Bereich von etwa 6MHz in den Evaluierungen dieser Arbeit. Die merkliche Veränderung innerhalb dieses Frequenzbereichs, wie in [16] gezeigt wird, hängt davon ab welche Isolationskomponenten eine Veränderung erfahren und in welchem Ausmaß. Wenn die Alterung der Isolierung die ganze Phase betrifft, z.B. Isolation mehrerer Windungen verschlechtert sich, dann liegt die Veränderung in einem breiten Frequenzbereich. Wenn nur eine Windungsisolation sich verschlechtert, dann liegt die Veränderung in einem kleinen Frequenzbereich. In der Abbildung 5.6 sieht man das Amplitudenspektrum des transformierten bearbeiteten Zeitsignals bis zu 6MHz. Bei einem Bereich von wenigen kHz zeigt das Spektrum größere Amplituden. Das Amplitudenspektrum in Abbildung 5.7 zeigt den Verlauf bis 1 MHz.

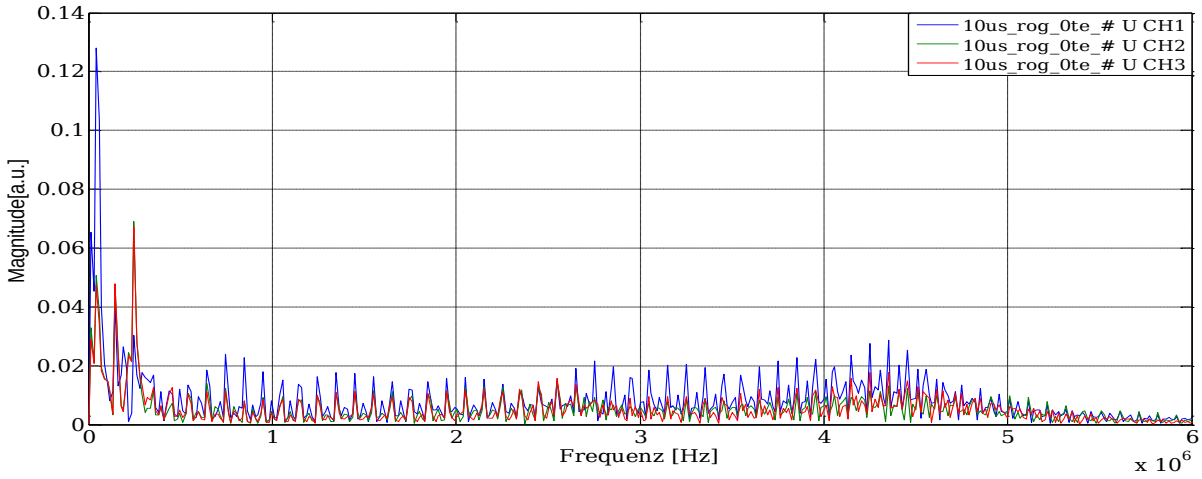

Abbildung 5.6:Amplitudenspektrum der konvertierten Signale in allen Phasen in einem Frequenzbereich bis 6MHz

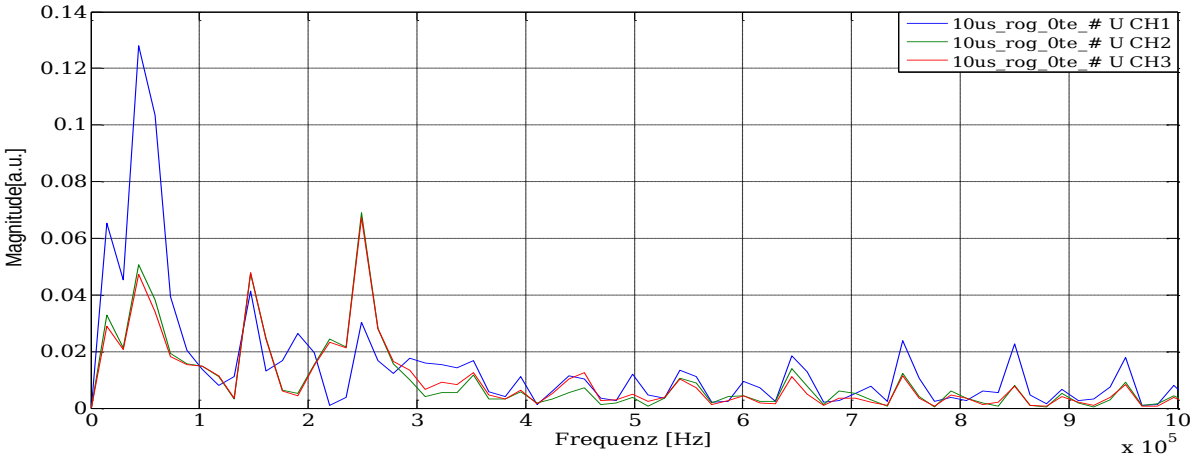

Abbildung 5.7: Amplitudenspektrum der konvertierten Signale in allen Phasen in einem Frequenzbereich bis 1MHz

Nachdem die Signale in den Frequenzbereich transformiert werden, werden diese Signale auf Veränderungen in bestimmten Frequenzintervallen untersucht. Dabei werden die Signale nach den einzelnen Zyklen miteinander verglichen um Änderungen durch die Isolationsverschlechterung festzustellen. Diese Intervalle können mit Hilfe des ISI Tools, wie auf der rechten Seite in Abbildung 5.3 zu sehen ist, mit Anfangs- und Endfrequenzwerte eingestellt werden.

Damit können die sogenannten FRD Werte zur Analyse der Isolierungsveränderungen ermittelt werden, welche sich mit dem „root mean square deviation“ (RMSD) wie in [16] genauer beschrieben wird, berechnen lassen. Mit diesem Vorgang erhält man einen Indikator dessen Wert im Vergleich zu einer Referenz als Isolationszustandsindikator dient.

Zusätzlich können die ermittelten FRD Werte der einzelnen Phase miteinander in der komplexen Gauß`schen Ebene dargestellt werden. Dies geschieht mittels Linearkombination der einzelnen Werte für die komplexe Ebene. In der Gleichung 5.1 läßt sich die SFRD Werte berechnen.

$$SFRD = FRD_u + FRD_v * e^{\frac{j2\pi}{3}} + FRD_w * e^{\frac{j4\pi}{3}} \tag{5.1}$$

In der Abbildung 5.8 sieht man die zusammengesetzten Indikatoren in der komplexen Ebene. Diese Ebene stellt die Phasen U, V und W jeweils mit einer Phasenverschiebung von 120° dar. Somit ist die Verschlechterung der Isolierungen der einzelnen Wicklungen sichtbar. Vom Ursprung durch eine gewisse Streuung abweichend, kann man die erste Messung als Referenz annehmen und die nachfolgenden Messungen mit dieser Referenz vergleichen. In der Mitte der Abbildung 5.8 liegt ein blauer Stern, welcher das Referenzsignal repräsentiert. Wenn es keinerlei Störeinflusse gibt und alle Sensoren exakt gleich arbeiten, würde die Referenz genau im Ursprung liegen. Durch die Lage des Referenzpunktes sieht man, dass die Wicklung U von der Referenzmessung sich mehr Beeinflusst als die anderen Wicklungen. Je mehr sich der Wicklung von Störungen beeinflusst wird, desto größer wirkt sich bei der Berechnungen der FRSD Werte.

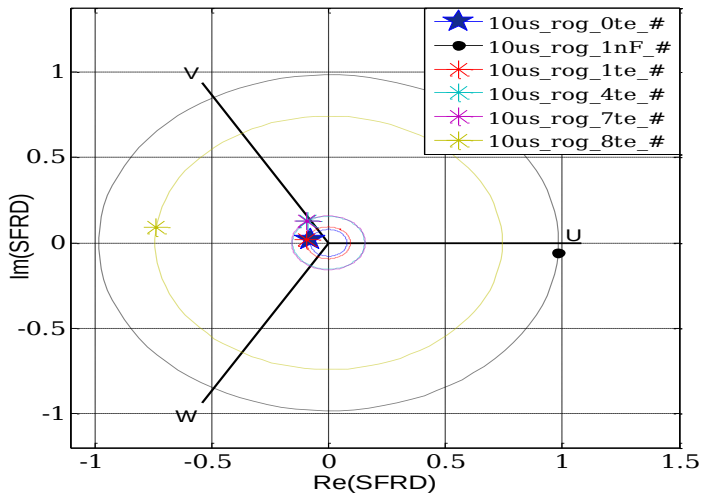

Abbildung 5.8: SFRD Werte dargestellt in der komplexen Gauß`schen Ebene

In Richtung U Achse liegt ein schwarzer Punkt, der eine künstlich gealterte Wicklungsisolation in Phase U mit einer parallel geschalteten Kapazität zur Phase U repräsentiert. Die Messung ist mit einem 100pF Kondensator parallel zur Wicklung U durchgeführt worden. Dadurch hat sich der Kapazitätswert der Wicklung erhöht. Wie bekannt ist, kann die Alterung der Wicklungen mit einer Veränderung des Kapazitätswerts der Isolierungen bestimmt werden.

Um die einzelnen Wicklungsstränge getrennt voneinander zu betrachten, werden die Indikatoren der einzelnen Phasen im Folgenden für 8 Alterungszyklen getrennt dargestellt. Bei durchgehend gesunder Maschine müssten alle Absolut-FRD Koeffizienten der Stränge den gleichen Wert annehmen. In der Abbildung 5.9, Abbildung 5.10 und Abbildung 5.11 sind jedoch die Veränderungen der einzelnen Stränge zwischen den Alterungsvorgängen deutlich erkennbar. An der vertikalen Achse

sind die Messinformationen und die Zyklenzahl sichtbar. Im gesunden Fall haben die Wicklungen ca. einen Wert von 0.0022. Wenn der Kondensator parallel angeschlossen wird, sieht man eine große Veränderung im Vergleich zu der gesunden Maschine und speziell im Fall von Phase U. Die anderen Wicklungen V und W zeigen geringere Abweichungen vom gesunden Zustand. Die Werte sind Absolutwerte von den berechneten FRD Koeffizienten der einzelnen Phasen. Die Größe der Amplituden hängt vom im FRD-Tool eingestellten Frequenzbereich ab.

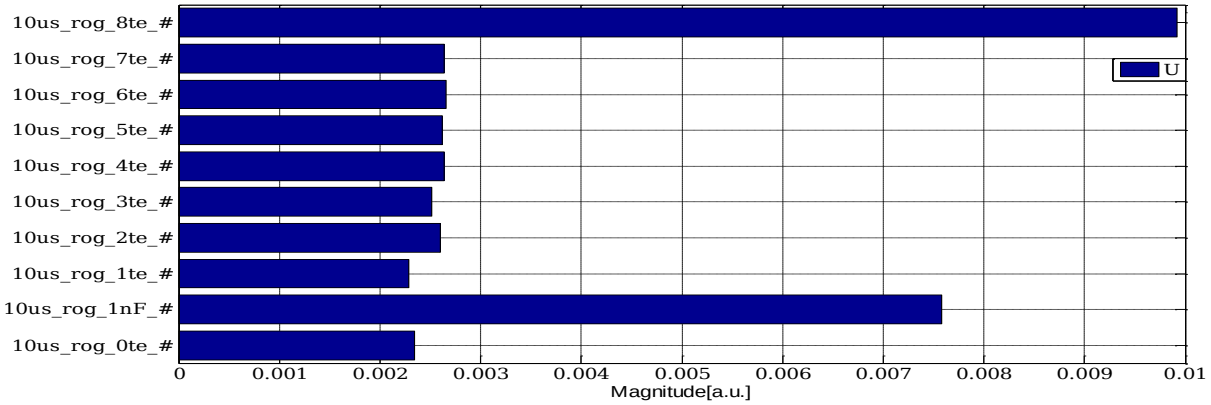

Abbildung 5.9: Absolute FRD Werte der getränkten Wicklungen von Phase U

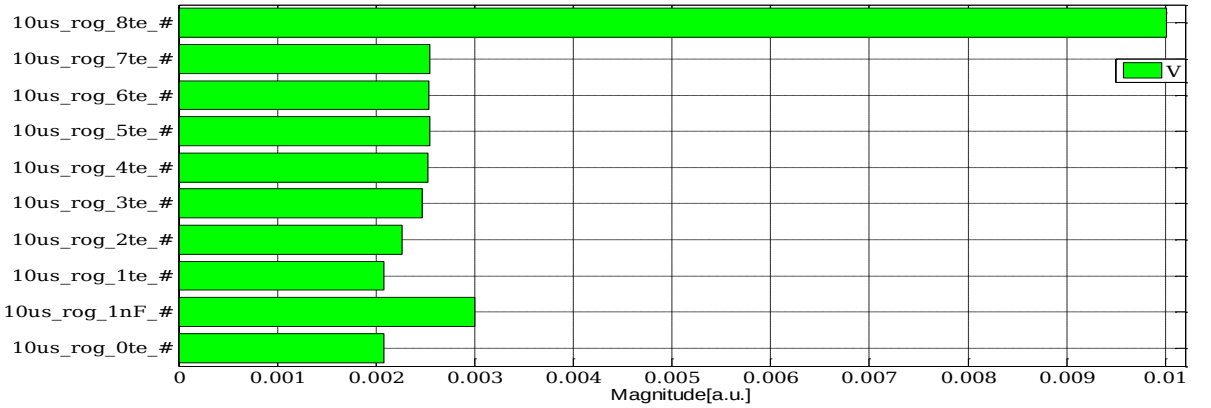

Abbildung 5.10: Absolute FRD Werte der getränkten Wicklungen von Phase V

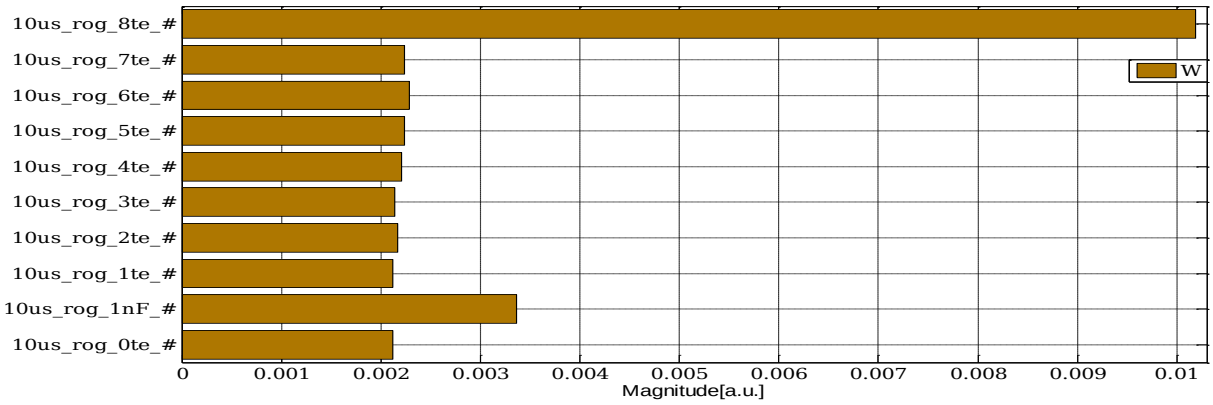

Abbildung 5.11: Absolute FRD Werte der getränkten Wicklungen von Phase W

Ein leichter Anstieg der FRD Koeffizienten resultiert durch die Alterung der Maschine. Der Ausschlag der Indikatoren im Falle des Kondensators und des Zyklus 8 zeigen hingegen schon einen Ausfall der Maschine an. Die unterschiedlichen Schwankungen der Indikatoren hängen natürlich nicht nur rein von der thermischen Alterung ab, sondern auch durch Messeinflüsse wie z.B. Messkabeleinfluss, Schirmungseinfluss, Versorgungsspannungseinfluss usw. Solche Messunsicherheiten werden auch im folgenden Verlauf der Arbeit behandelt.

5.1 Isolationsalterung der ungetränkten Wicklungen

In diesem Abschnitt werden die Messergebnisse der ungetränkten Statorwicklungen, welche mit dem FRD Verfahren ermittelt wurden, aufgezeigt. Da die Messungen mit zwei unterschiedlichen Sensoren durchgeführt wurden, werden die Ergebnisse getrennt analysiert.

Wie in der Einleitung erwähnt, wird die Wicklung der Maschine mit fünf unterschiedlichen Frequenzen durch Spannungsfolgen separat angeregt. Die Perioden haben eine halbe Periodendauer von 3, 6, 10, 20 und 40 µs, bzw. einer Pulsfrequenz von 166.6, 83.3, 50, 25 und 12,5 kHz. Die Messergebnisse werden immer mit der Dauer der halben Periodendauer angegeben. Das Ziel war es, die Alterung der Ständerwicklungsisolierung mittels unterschiedlicher Pulsfolgeanregungen zu untersuchen. Zusätzlich werden die kapazitiven Erdungsströme der Wicklungen mit einer Common Mode-Anregung analysiert.

Aufgetretene Probleme: Es wurden zwei Fehler im Zeitraum während der Alterung der ungetränkten Maschine beobachtet. Die Gründe für die Beeinflussung der Messergebnisse vom FRD-Verfahren sind folgender:

- Ein Faktor waren schlechte BNC-Steckverbinder die ab dem dritten Zyklus eine Veränderung in der Messreihe hervorgerufen haben die nicht durch eine Alterung verursacht wurde.

- Ein weiterer Einfluss hatte der Wechsel der Versorgung für die Zwischenkreisspannung. Ab dem neunten Alterungsvorgang wurde der Umrichter mit einem Gleichspannungsnetzgerät versorgt, wodurch beide Messungen von LEM und Rogowski Spulen von erster Alterungsvorgang beeinflusst wurden.

5.1.1 Untersuchung mittels LEM Sensoren

Die Verschlechterung der Isolierungen der Wicklungen ist wie erwähnt durch die Beobachtung von einer Veränderung im transienten Einschwingvorgang des Stromsignal detektierbar. Durch eine Frequenzbereichsanalyse wird diese Verschlechterung deutlicher und leichter interpretierbar, obwohl auch im Zeitbereich unterschiede in den Signalverläufen erkennbar sind.

- **Versuch mit 3 µs Pulsfolge**

In der Abbildung 5.12 sieht man die Messdaten der verarbeiteten Zeitsignale. Die Zeitdauer der Pulsperiode beträgt 6µsx3=18 µs. Um eine ersichtliche Darstellung zu erhalten und leichter die Signale unterscheiden zu können, sind die Signale mit verschiedenen Farben geplottet.

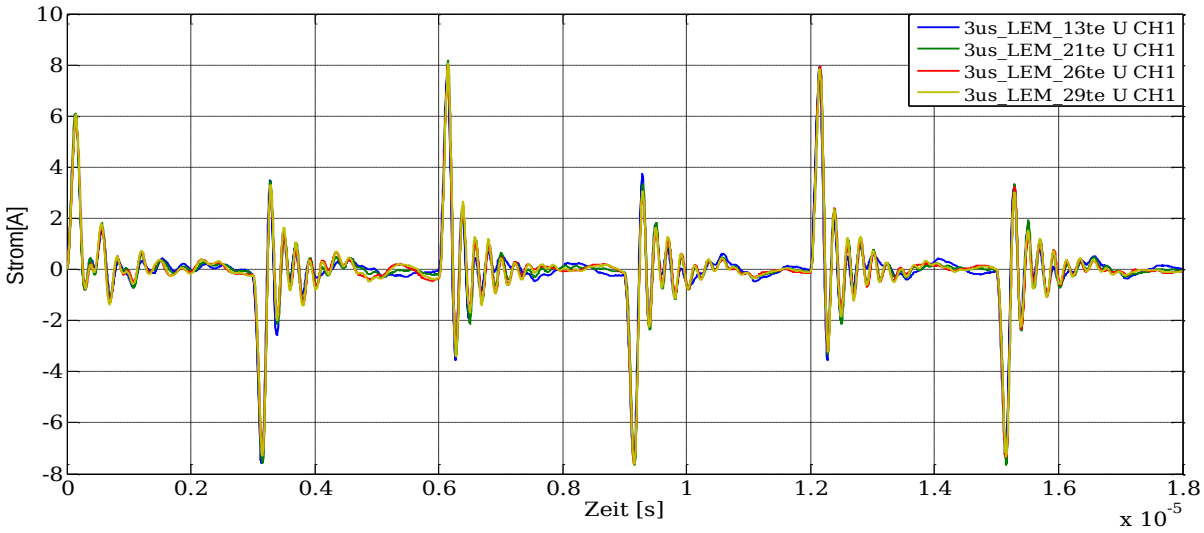

Abbildung 5.12: Zeitsignale Phase U der Alterungsvorgänge 13, 21, 26 und 29

Die Signale werden anschließend im Frequenzbereich untersucht. Die Anregungsfrequenz der Pulsfolge des Signals beträgt 166.6 kHz, und die FFT Koeffizienten sind in Abbildung 5.13 bis zu 6MHz sichtbar.

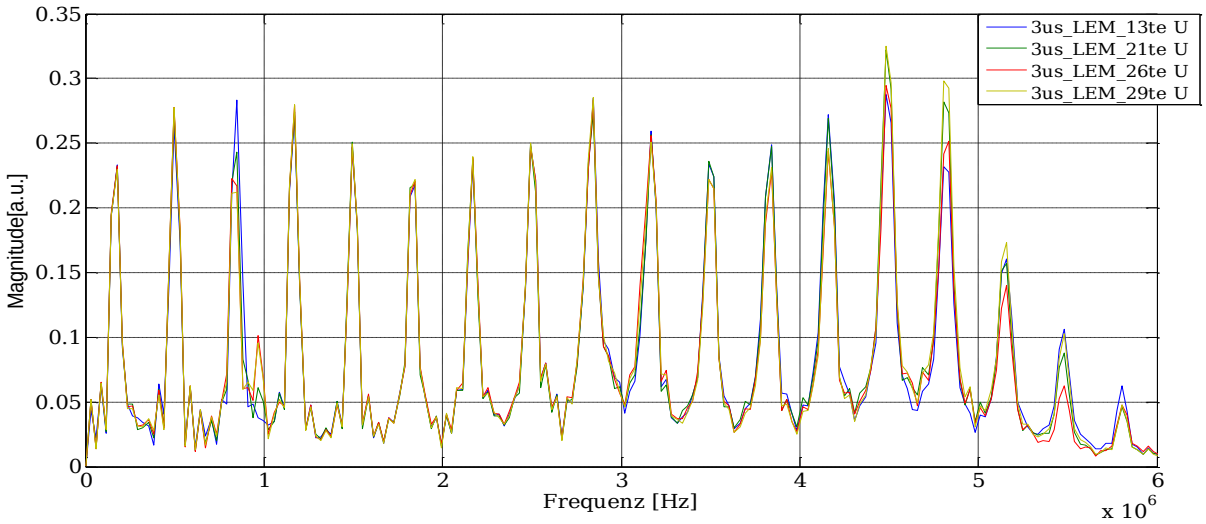

Abbildung 5.13: Amplitudenspektrum der Stromsignale von Phase U in einem Frequenzbereich bis 6MHz

Mit Hilfe der SFRD Interpretation können die Veränderungen der gemessenen Signale miteinander in der komplexen Gauß`schen Ebene, wie in der Abbildung 5.14 gezeigt, dargestellt werden. Hier wird eine Messung als Referenz angenommen und die nachfolgenden Messungen mit dieser Referenz vergleichen. In diesem Szenario wird die Messung vom 13. Alterungsvorgang die Referenz, welche mit einem blauen Stern gekennzeichnet ist. Weitere Messungen sind je nach Stärke der Isolationsverschlechterung in der Ebene zu sehen.

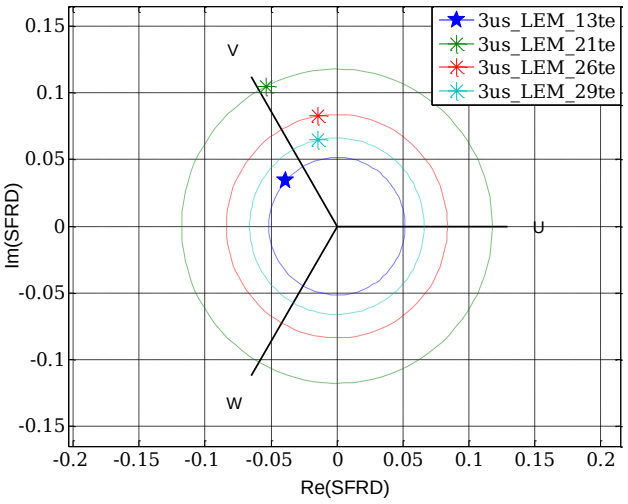

Abbildung 5.14: FRD Werte dargestellt auf der komplexen Gauß`schen Ebene

Um die Veränderungen bzw. Verschlechterungen der Windungsisolation genauer zu bestimmen, sind die Absolutwerte der FRD Koeffizienten im Folgenden separat aufgezeichnet. In der Abbildung 5.15 sind ausgewählte Indikatoren des 13. Zyklus bis zum letzten Alterungsvorgang in einem Balkendiagramm dargestellt. Anhand der blauen Balken, welche den Indikatoren der Wicklung-U entsprechen, sieht man eine leicht steigende Tendenz. Diese Änderung deutet darauf hin, dass die Isolierung von Wicklung-U sich verschlechtert hat. Bei den restlichen Strängen V und W kann keine deutliche Aussage getroffen werden, dass diese durch thermische Alterung deutlich beeinflußt

wurden. Die Schwankungen der Indikatoren sind sehr groß. Eine eindeutige Tendenz aufgrund der Alterung sieht man nicht genau. Die Ursache kann andere Messeinflüsse haben, wie z.B. Störeinflüsse von außerhalb oder Einfluss der verwendete BNC Messkabeln.

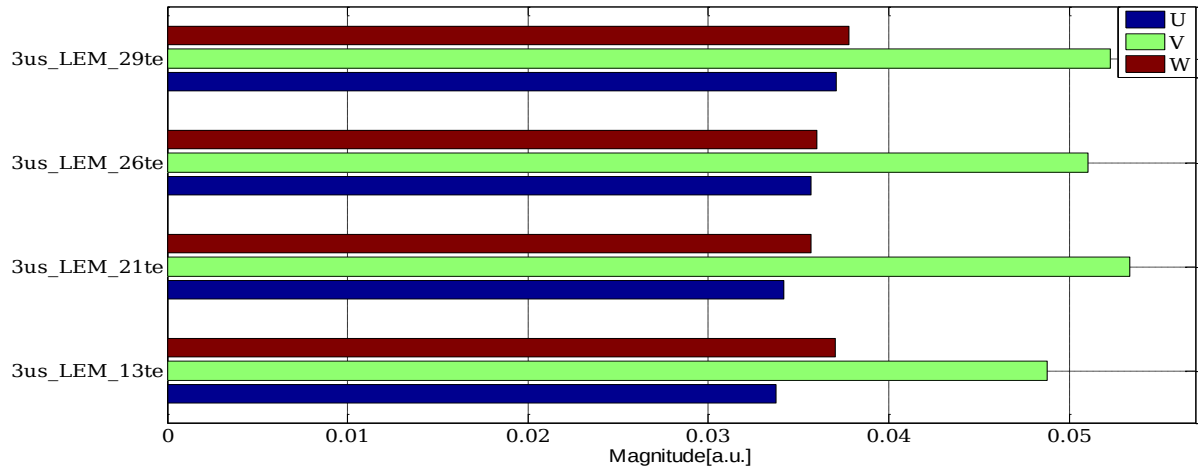

Abbildung 5.15:Absolute FRD Werte der nicht getränkten Wicklungen von 3µs Pulsfolge

- **Versuch mit 10µs Pulsfolge**

In der Abbildung 5.16 sieht man bei diesem Versuch die Änderungen der Wicklungsisolationen infolge thermischer Alterung anhand der Balkendarstellung. Alle drei Phasen U,V und W zeigen eine deutliche Veränderung nach dem 1. Vorgang, wobei anscheinend nicht alle drei Phasen gleichmäßig davon betroffen sind. Zwischen dem 1. und 2. Vorgang gibt einen kleineren Abfall. Dies könnte daher kommen, dass dieser Zyklus weniger Effekte auf die Alterung hatte.

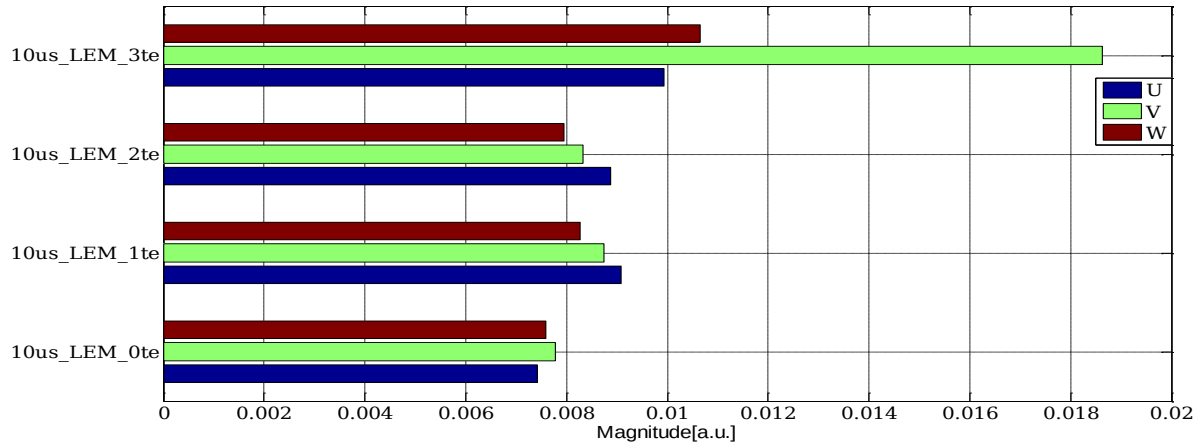

Abbildung 5.16: Absolute FRD Werte der nicht getränkten Wicklungen von 10µs Puslfolge vor dem Kabeländerung

In der folgenden Abbildung 5.17 sind die mittels LEM Sensoren ermittelten Messungen mit der SFRD Darstellung gezeigt. In dieser Ebene sieht man, dass die Änderungen entlang der negativen Achse-V stattfinden. Das heißt die Phase V wurde weniger im Vergleich zu anderen Phasen gewichtet. Es kann keine eindeutige Tendenz aus dieser Darstellung beobachtet werden.

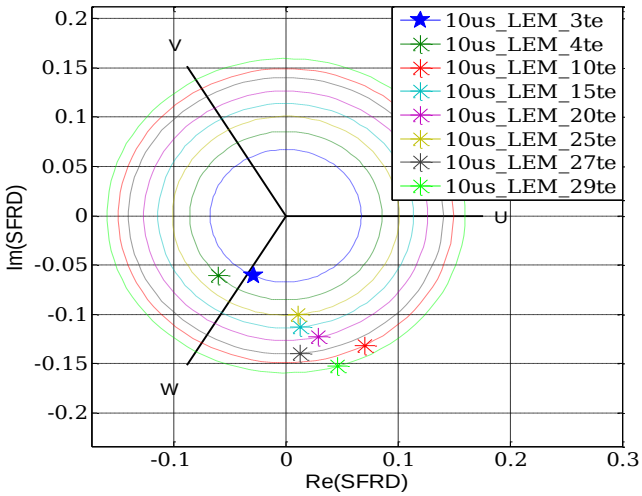

Abbildung 5.17: FRD Werte dargestellt auf der komplexen Gauß`schen Ebene ab 3. Vorgang

Die einzelnen FRD Werte liefern genauere Informationen über die Alterung der Wicklungen. Die in der Abbildung 5.18 gezeigten Phasen weisen zwischen dem 10. und 29. Alterungsvorgang eine merkliche Wert-Änderung auf. Die Werte scheinen zu steigen aber die Schwankungen zwischen den Zyklen sind jedoch sehr groß.

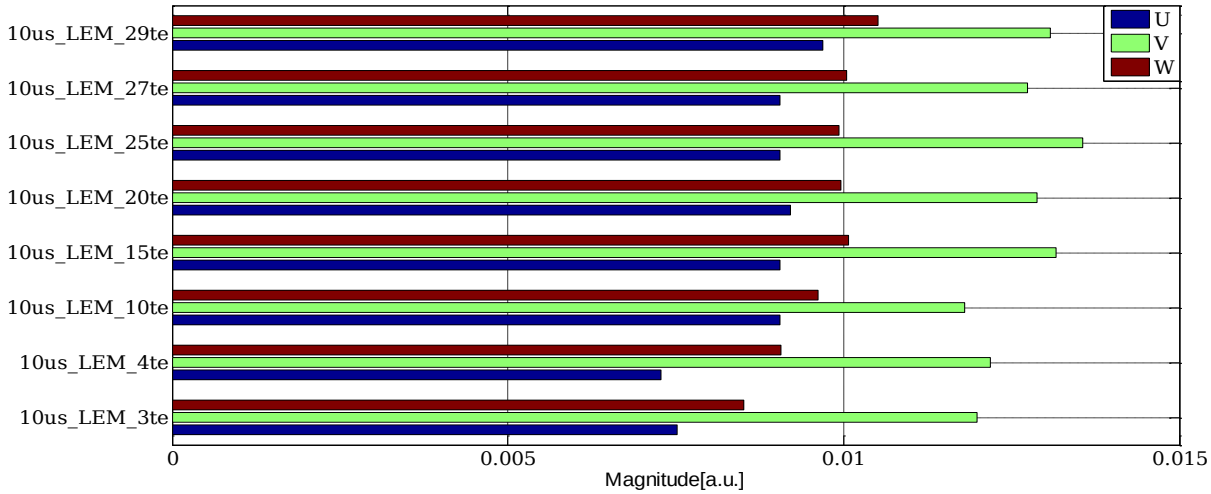

Abbildung 5.18: Absolute FRD Werte der nicht getränkten Wicklunge -10µs Pulsfolge

- **Common-Mode Versuch**

Dieser Versuch soll eine Tendenz der Änderung der Erdisolation liefern. Wie bereits beschrieben, erfolgen bei der *Common-Mode* Anregung die Potentialwechsel zwischen oberen und unteren Zwischenkreispotential für alle drei Phasen gleichzeitig. Das Frequenzspektrum ist in der Abbildung 5.19 dargestellt, wo die Koeffizienten bis etwa 400kHz dargestellt sind.

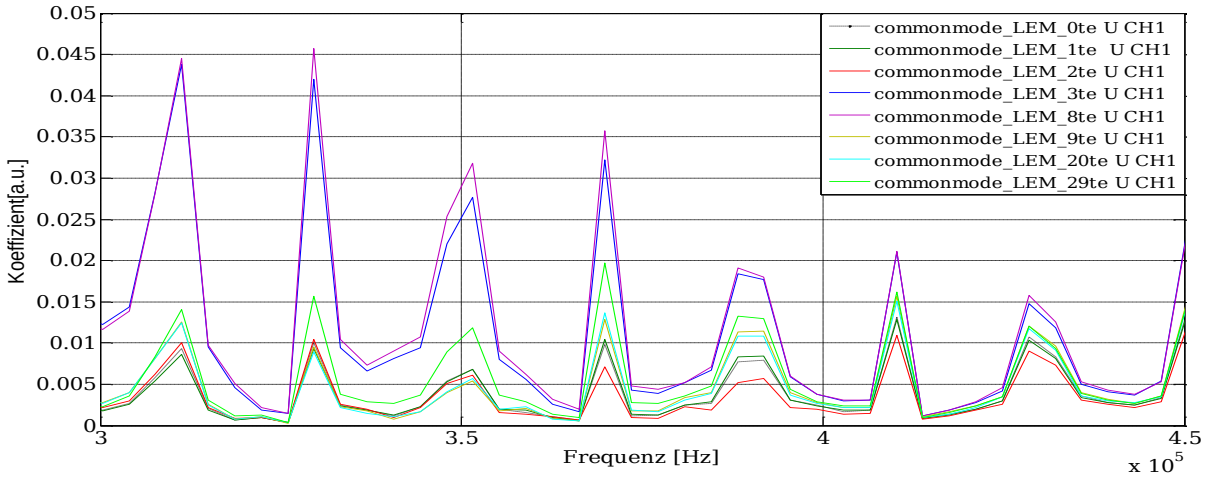

Abbildung 5.19: Amplitudenspektrum der Common-Mode Signale in Phase U in einem Frequenzbereich bis 450kHz

Um eine übersichtlichere Darstellung zu liefern wird wieder nur ein Teil der Messungen dargestellt. Somit werden separat die Änderungen der evaluierten FRD Werte innerhalb der Bereiche für ausgewählte Zyklennummern gezeigt. Vom Anfang bis zum 2. Vorgang, vom 3. bis zum 8. Vorgang und letztlich vom 9. bis zum 29. Vorgang steigen alle drei Indikatoren deutlich an. Wie erwähnt, fließen die Ausgleichströme der Wicklungen über die Erdkapazitäten. Diese sichtbaren Änderungen zeigen, dass die Ursache dafür die thermische Alterung ist. Die Erdkapazitäten haben sich daher verschlechtert.

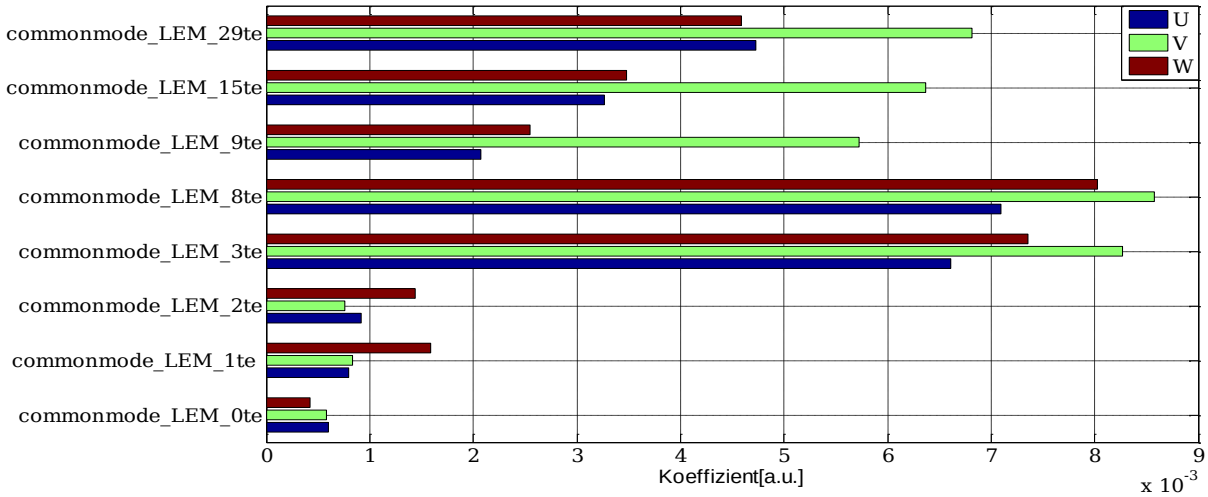

Abbildung 5.20: Absolute FRD Werte der nicht getränkten Wicklung – Common-Mode Versuch

Da durch die Ergebnisse der 6µs,20µs und 40µs-Pulsfolgen keine zusätzlichen Aussagen über den Verlauf der thermische Alterung getroffen werden können, werden diese Evaluierungen nicht in der Arbeit gezeigt.

5.1.2 Untersuchung mittels Rogowski Spulen

- **Versuch mit 3µs Pulsfolge**

Die mittels Rogowski Spulen ermittelten 3µs-Pulsfolge Messungen wurden in den Frequenzbereich transformiert und sind in Abbildung 5.21 dargestellt. Zwischen 150 kHz und 350 kHz sieht man wie die Messungen durch die thermische Alterung variieren.

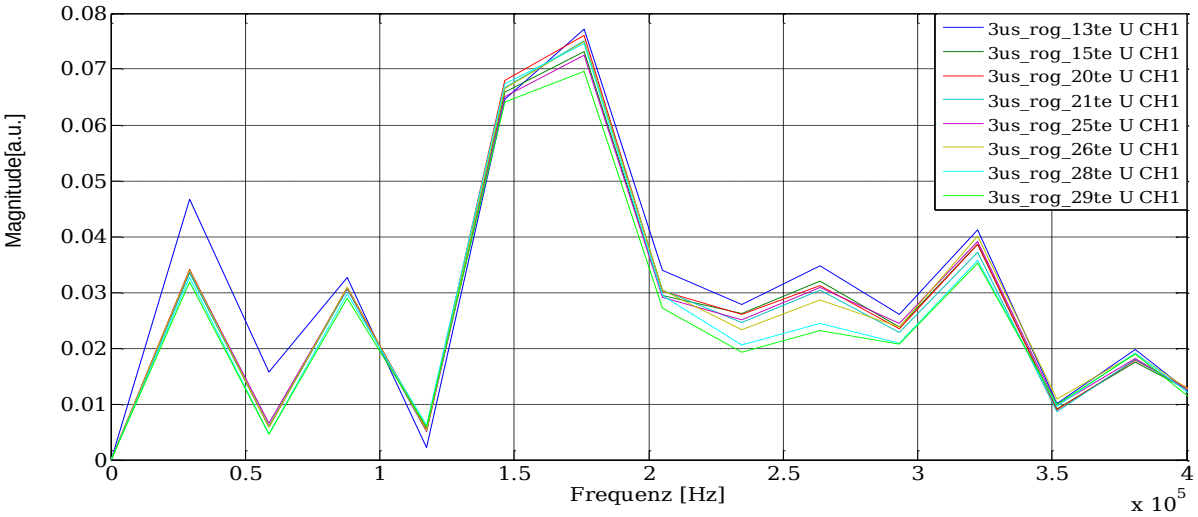

Abbildung 5.21: Amplitudenspektrum der Signale in Phase U- Frequenzbereich bis 400 kHz

In der folgenden Abbildung 5.22 sieht man wie sich die Messungen in einem engen Bereich konzentrieren. Die Absolut-FRD Koeffizienten der 3µs Pulsfolgemessungen sind in der Abbildung 5.23 dargestellt.

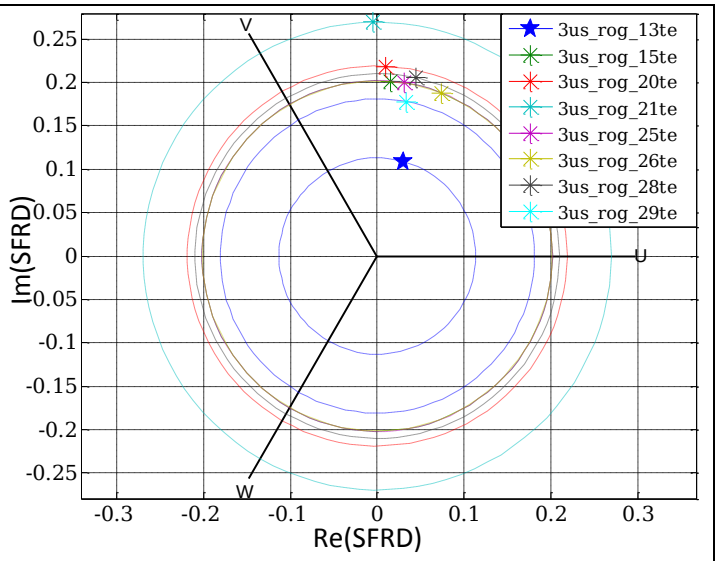

Abbildung 5.22: FRD Werte dargestellt auf der komplexen Gauß`schen Ebene

Aus den Verläufen kann keine eindeutige Tendenz sichtbar gemacht werden, dass die Ursache nur thermische Alterung ist. Es muss darauf hingewiesen werden, dass diese 3µs-Pulsfolge erst ab dem 13. Zyklus eingeführt wurde und die Wicklung zu diesem Zeitpunkt schon stark gealtert wurde.

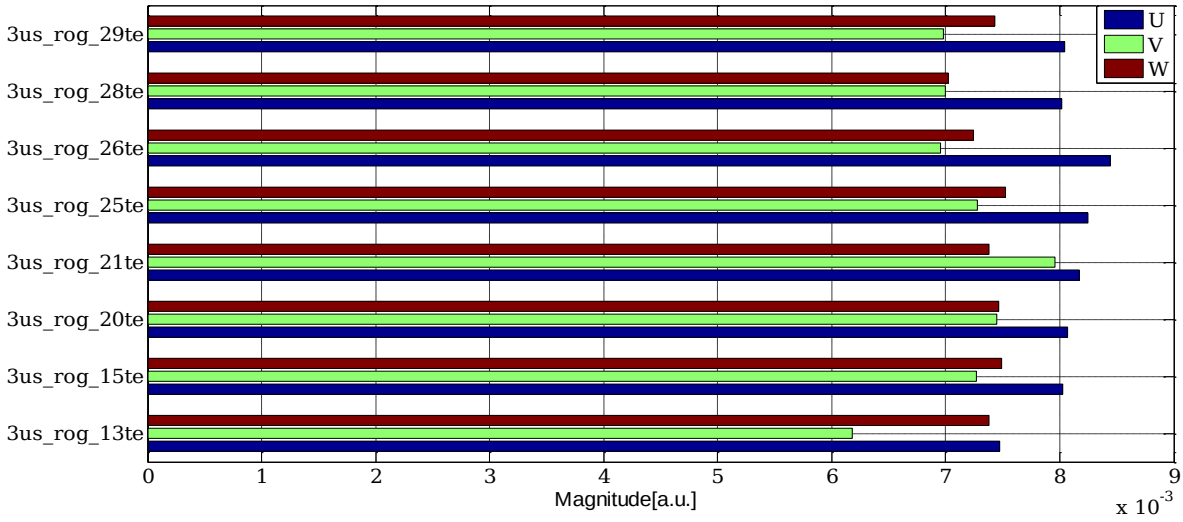

Abbildung 5.23: Absolute FRD Werte der nicht getränkten Wicklungen von 3µs Pulsfolge

- **Versuch mit 10µs Pulsfolge**

In der folgenden Abbildung 5.24 sieht man einen Ausschnitt der Koeffizienten der Fouriertransformierten, bei Anregung mit 10µs-Pulsfolge. Die Koeffizienten bei etwa 250 kHz zeigen, mit ein paar Ausnahmen, eine abfallende Tendenz als Folge der zyklischen thermischen Belastung.

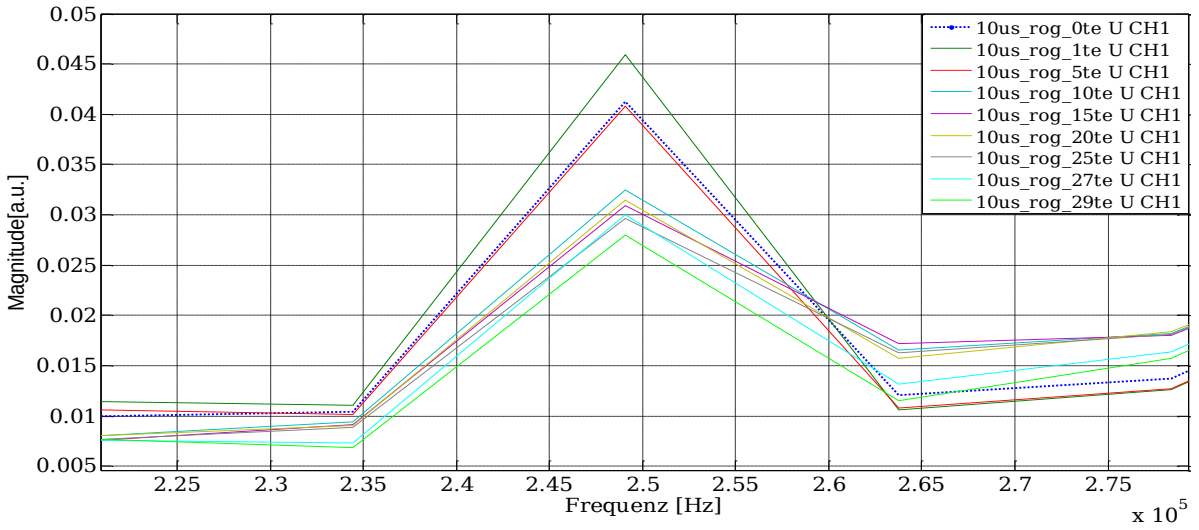

Abbildung 5.24: Amplitudenspektrum der Signale in Phase U Frequenzbereich um 250kHz

Die Anregungsfrequenz befindet sich etwa bei 44 kHz im Frequenzbereich, welche in der Abbildung 5.25 noch aufgezeichnet ist. Hier gibt es nur leichte Änderungen der Amplituden, jedoch gibt es keine Tendenz in eine Richtung.

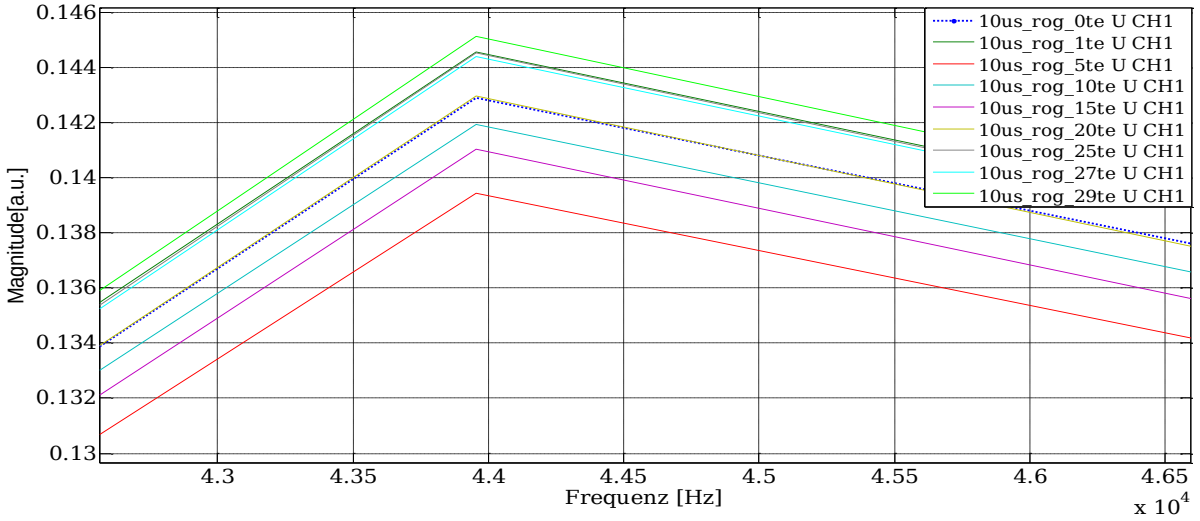

Abbildung 5.25: Amplitudenspektrum der konvertierten Signale in Phase U bei einem Frequenzbereich etwa 44kHz

Die Anfangssprünge der FRD Werte von 10µs Pulsfolgemessungen sind in der Abbildung 5.26 ausdrücklich sichtbar. Der Einfluss der Versorgungsspannungswechsel ist auch in der Abbildung zwischen 5. und 10. Vorgang merkbar. Vom 10. Zyklus bis zum Schluss der Alterung gibt es schwankende Koeffizienten. Eine bestimmte Tendenz der Änderung sieht man kaum.

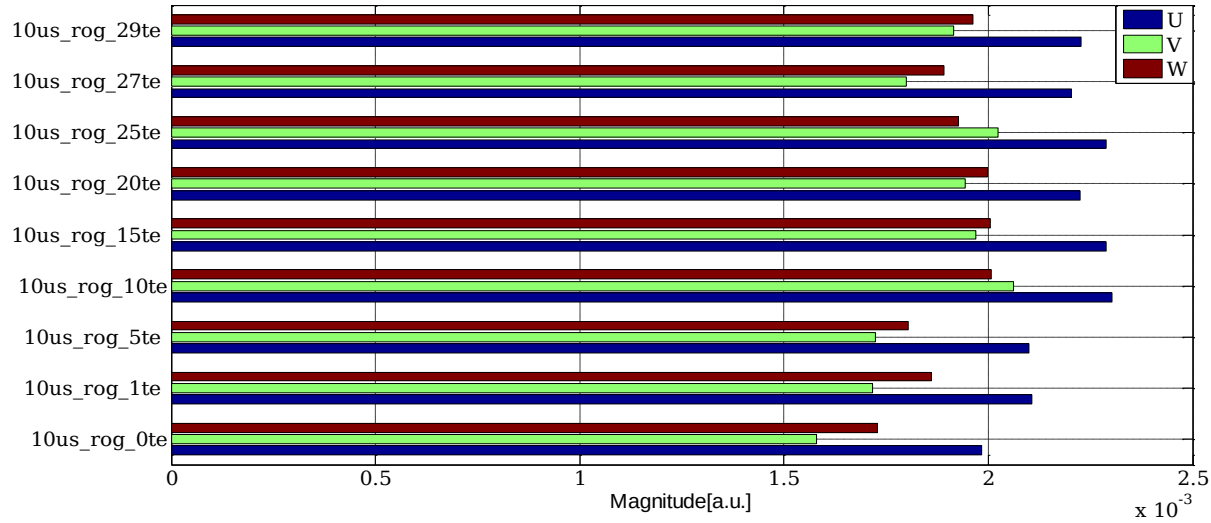

Abbildung 5.26:Absolute ISI Werte der nicht getränkten Wicklungen von 10µs Pulsfolge

Im Falle der nicht getränkten Maschine können keine tendenziellen Veränderun der Indikatoren beobachtet werden. Die Größe Veränderung findet bei alle Anregungspulsfolge zwischen 0. und 1. Zyklen statt.

5.2 Isolationsalterung der getränkten Wicklungen

In diesem Teil des Kapitels werden die Messergebnisse der getränkten Maschine diskutiert. Da die Maschine nach IEEE Norm mit einer erhöhten Temperatur unter Belastung gesetzt wurde, wurde die Wicklungen schneller bzw. in acht Zyklen gealtert. Der Unterschied dieser Wicklungen im Gegensatz zum ersten Versuch ist, dass die Statorwicklung getränkt wurde.

Bevor die Messungen gezeigt werden soll an dieser Stelle erwähnt werden, dass an den Maschinenleiteranschlüssen an der Messbox beim 2. Alterungszyklus neue Kabelpolschuhe angebracht wurden. Möglicherweise dadurch bedingte Änderungen werden zu Beginn der Evaluierungen der Messungen gezeigt. Der 8. Alterungszyklus wird als der Zustand, wo die Maschine kurz vor Ausfall gemessen wurde. Zur Erinnerung wird darauf hingewiesen, dass das Zeichen `#` in der Legende auf Messungen an der getränkten Wicklung hindeutet.

5.2.1 Untersuchung mittels LEM Sensoren

- **Versuch mit 3µs Pulsfolge**

In der folgenden Abbildung 5.27 sieht man in den Zeitsignalverläufen der 3µs Pulsfolgemessungen der Wicklung V, wie ein Wechsel des Polschuh an der Zuleitung der Phase V vor dem 2. Alterungszyklus, die Messungen zusätzlich beeinflusst hat. Die restlichen Zeitsignale der Phasen sind nicht aufgezeichnet. In Phase W gab es ähnliche Abweichungen hingegen Phase U gleich geblieben ist. Das schwarz gestrichelte Signal zeigt den Verlauf von der Wicklung V an der nachweislich gealterten Maschine (Isolationswiderstand von Phase L3 ermittelt mit Fluke 1555 R_{iso}<200kΩ - vollständiger Stehspannungstest 1500V nicht möglich). Die Messungen mittels Umrichter bei 440V Zwischenkreisspannung waren jedoch weiterhin möglich. In der Industrie könnte dieses Signal eine Referenz sein bzw. Hinweise darauf geben ab wann ein Ausfall kurz bevor steht bzw. Wartungsarbeiten dringend notwendig sind.

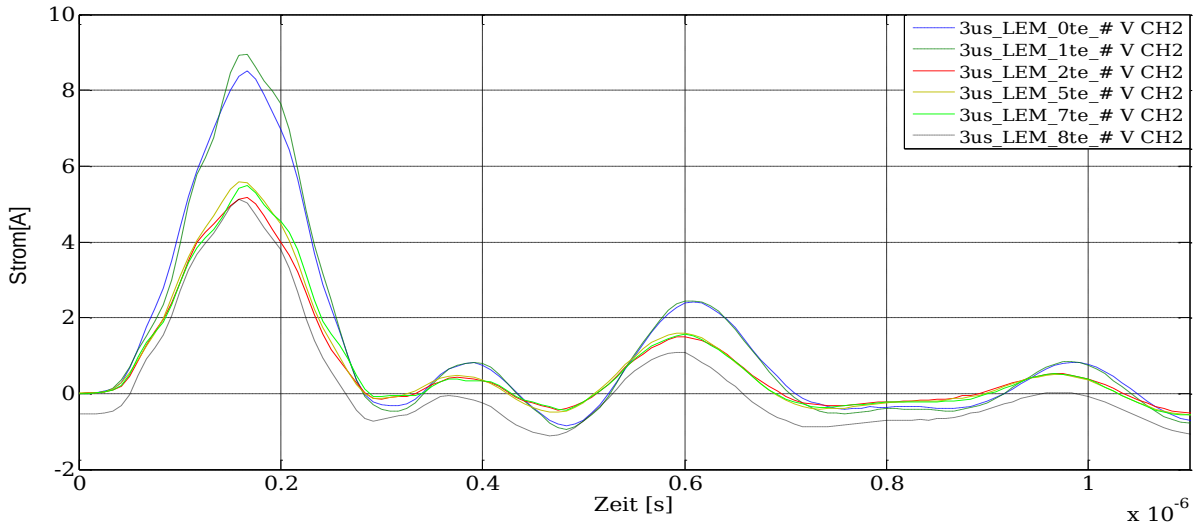

Abbildung 5.27: Zeitsignale mit einer Dauer von 1.1 µs in Phase V

Im Frequenzbereich zeigt der Versuch mit den acht durchgeführten Zyklen Änderungen bei den Koeffizienten im Spektrum der Phase U. Die Signale sind in der folgenden Abbildung 5.28 sichtbar. Eine deutliche Änderung zwischen den Messungen ist in diesem gezeigten Bereich sichtbar.

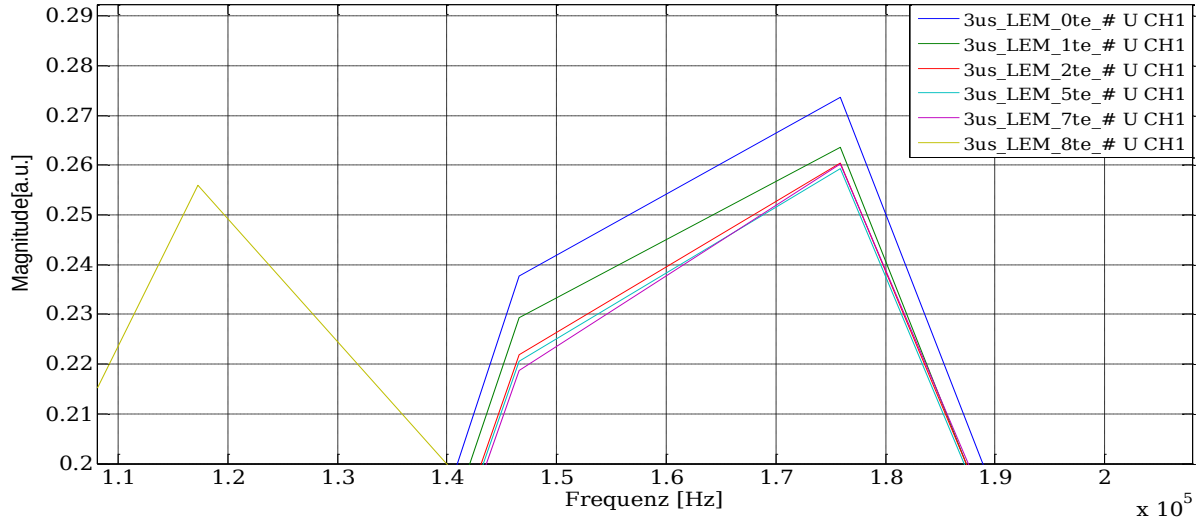

Abbildung 5.28: Amplitudenspektrum Signale in Phase U Frequenzbereich etwa 150kHz

Wie erwartet, gibt es Änderungen in den FRD Werte der Wicklungen. Dies sieht man in der Abbildung 5.29 bei den Phasen U und V deutlicher. Man sieht wieder bei den Indikatoren, dass diese durch Schwankungen auch innerhalb der Sensoren deutliche Unterschiede zeigen. Jedoch ist der Unterschied zwischen der 8. Zustand(8. Messung) und gesunden Maschine (0. Vorgang) in Abbildung 5.29 merkbar.

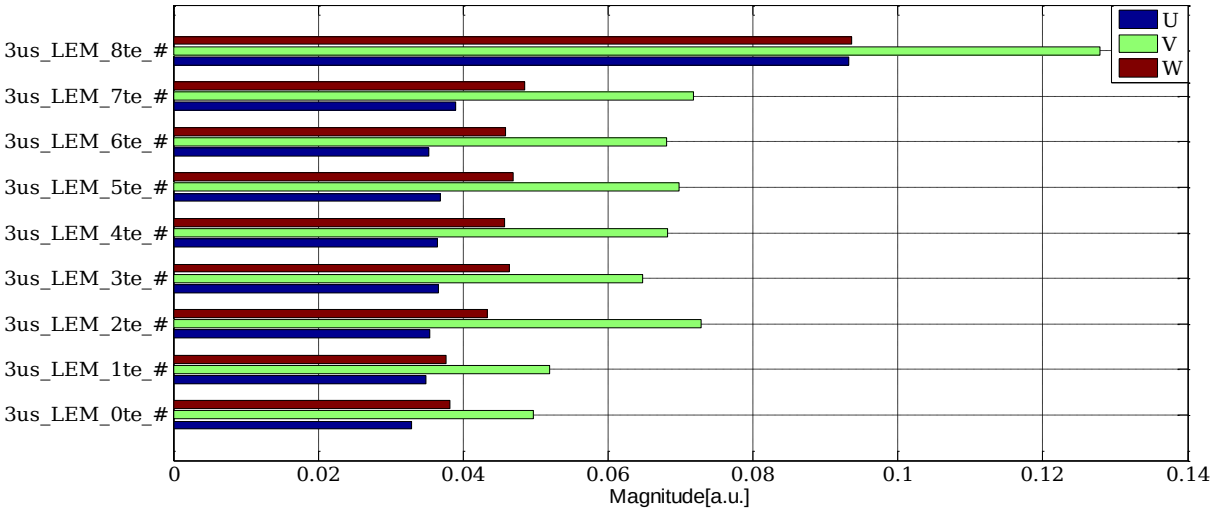

Abbildung 5.29: Absolute FRD Werte der getränkten Wicklungen von 3µs Pulsfolge

- **Versuch mit 10µs Pulsfolge**

Eine Messung mit einem Kondensator am Anschluss der Wicklung U wird hier zuerst diskutiert. In der folgenden Abbildung 5.30 sieht man die Signalunterschiede zwischen der Gesunden, vor kurz der Defekten Zustand und im Fall mit einem zusätzlichen Kondensator parallel zur Phase U. Aus dem Signalverlauf im künstlich veränderten Fall sieht man, dass der 1nF Kapazitätswert eine sehr deutliche Änderung in der Isolation nachbildet. Mit so großen Abweichungen ist bei der thermischen Alterung jedoch nicht zu rechnen, mit Ausnahme die Isolation hat bereits einen Defekt zum Gehäuse wie später gezeigt wird.

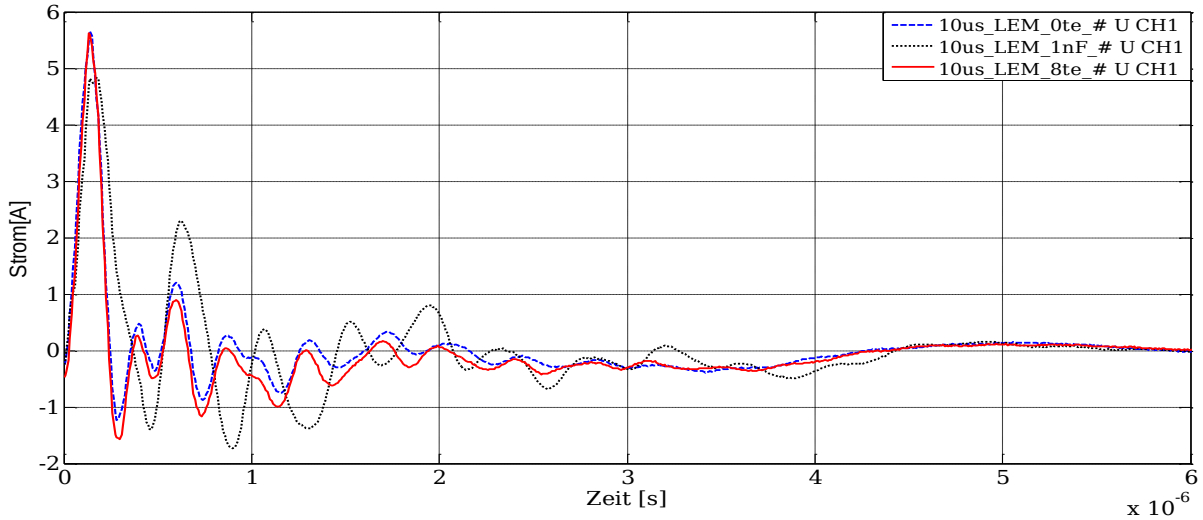

Abbildung 5.30: Zeitsignale mit einer Dauer von 6µs in Phase U

Die frequenztransformierten Koeffizienten der Wicklung U sind in der folgenden Abbildung 5.31 zu sehen.

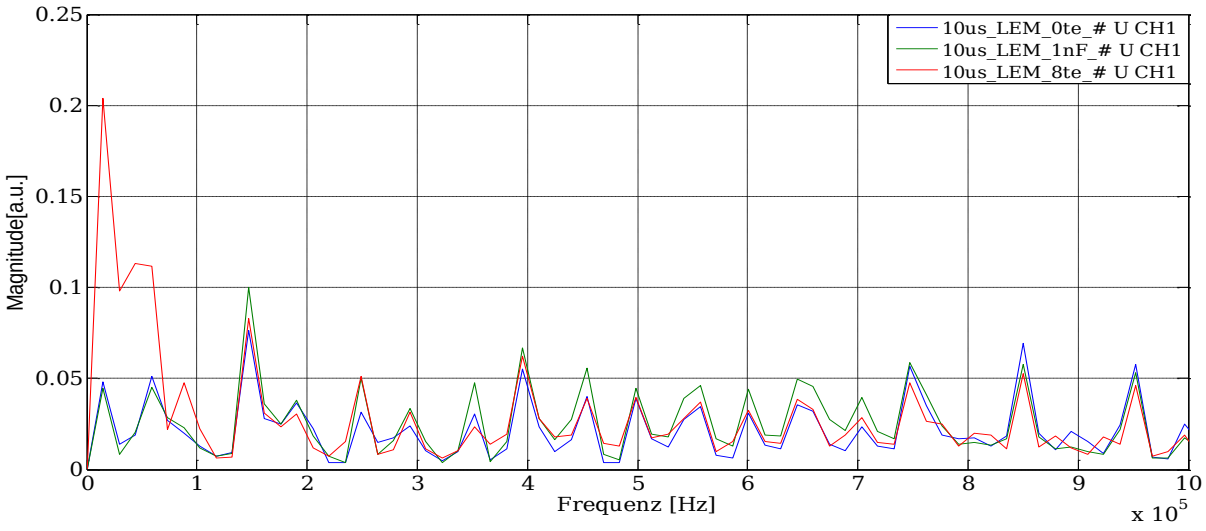

Abbildung 5.31: Amplitudenspektrum der Signale in Phase U Frequenzbereich bis 1MHz

Es ist auch in der Abbildung 5.32 zu sehen, dass die FRD Werte sich sehr deutlich durch den künstlichen Fall verändert haben. Auch die erhöhten Koeffizienten der defekten Maschine sind bei dieser Darstellung deutlich sichtbar.

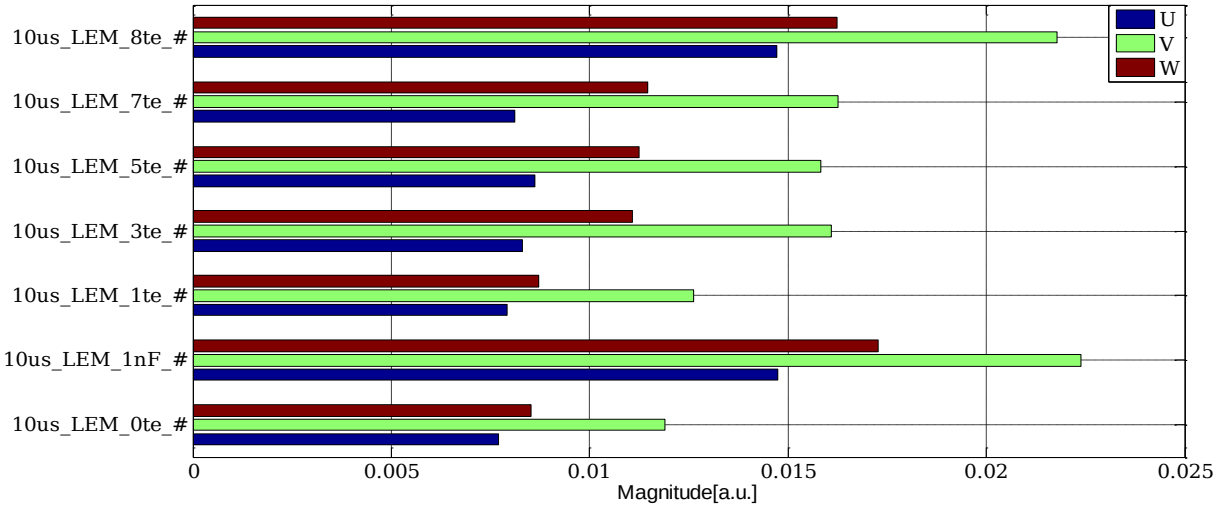

Abbildung 5.32: Absolute FRD Werte der getränkten Wicklungen von 10µs Pulsfolge

- **Versuch mit 20µs Pulsfolge**

Der deutliche Unterschied im Falle der defekten Maschine ist bei diesen Versuchen deutlich sichtbar. Wie man in der folgenden Abbildung 5.33 sieht, ergibt sich keine merkliche Änderung bei den Indikatoren außer am Anfang des Vorgangs und kurz vor dem endgültigen Ausfall.

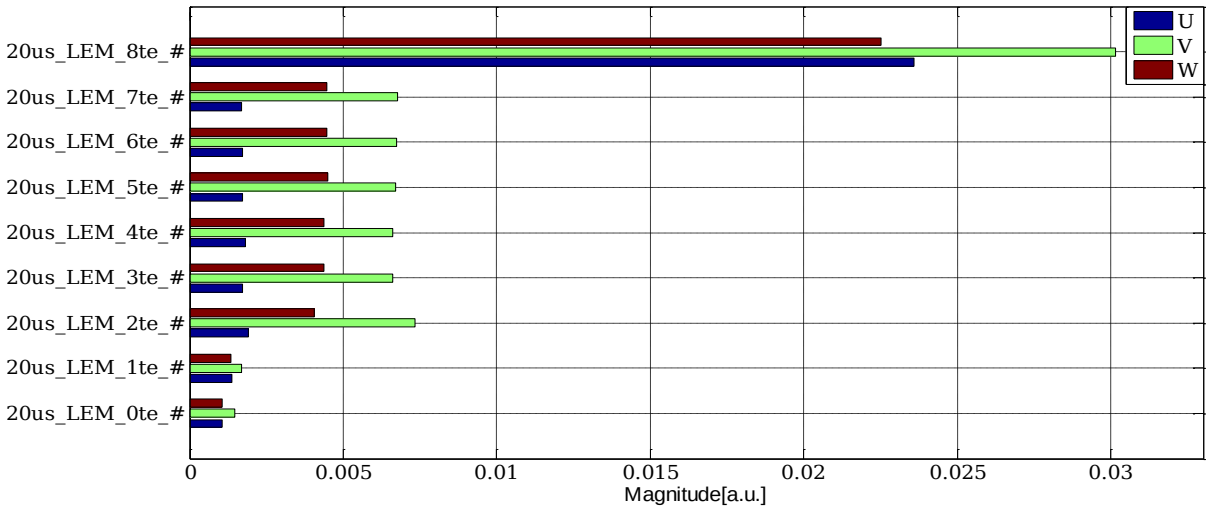

Abbildung 5.33: Absolute FRD Werte der getränkten Wicklungen von 20µs Pulsfolge

- **Common-Mode Versuch**

In der folgenden Abbildung 5.34 sind die Stromsignale der Wicklung U beim Common-Mode Versuch zu sehen. Veränderungen im Verlauf sind deutlich sichtbar. Zu Beginn des Signals sind einige hochfrequente Einkopplungen zu sehen. Diese Einkopplungen sind bei den Phasen V und W nicht zu beobachten.

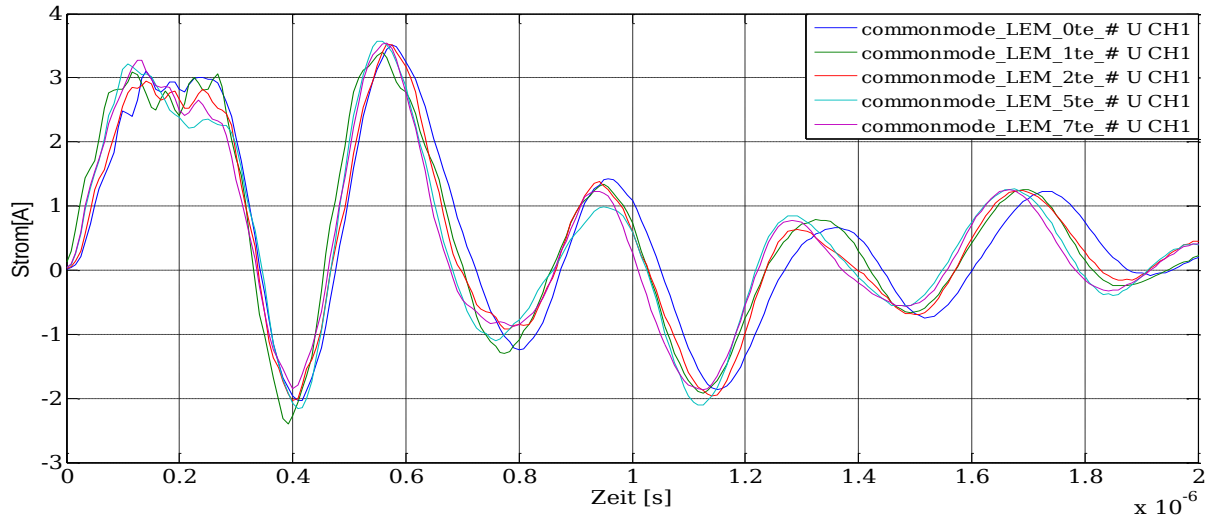

Abbildung 5.34: Zeitsignale der Phase U mit einer Dauer von 2µs in Phase U

In der folgenden Abbildung 5.35 sind die FRD Werte der Messungen aufgezeichnet. Aufgrund der thermischen Alterung ändert sich die Erdisolation der Statorwicklungen deutlich.

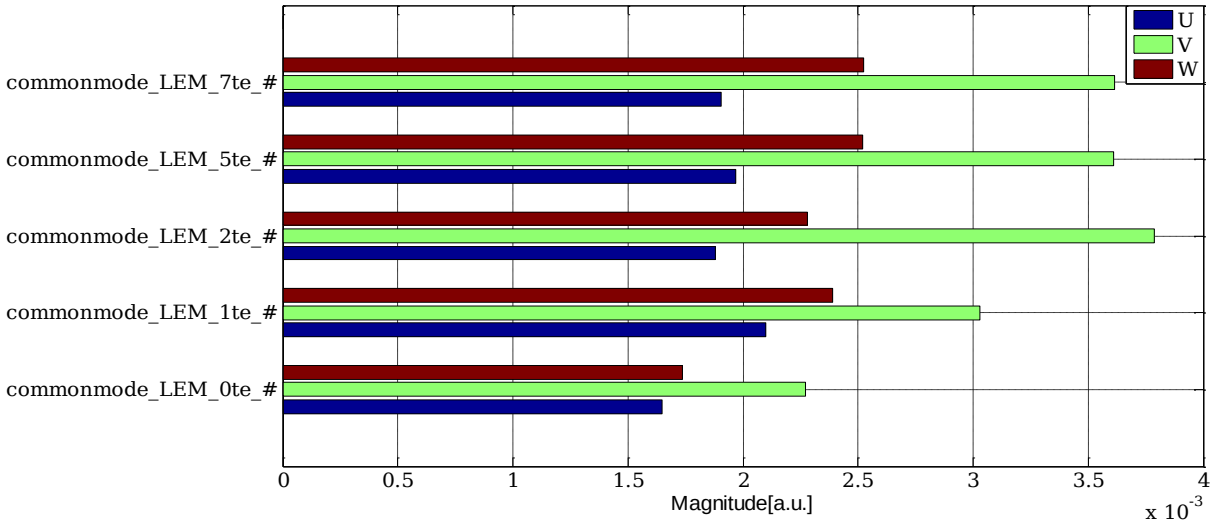

Abbildung 5.35: Absolute FRD Werte der getränkten Wicklungen von Common-Mode Versuch

5.2.2 Untersuchung mittels Rogowski Spulen

- **Versuch mit 3µs Pulsfolge**

In den folgenden Abbildung 5.36 zeigt das schwarz gestrichelte Signal die Messung der 8. Maschinenzustand Maschine. Die großen Amplitudenunterschiede sind über den ganzen Frequenzbereich zu sehen.

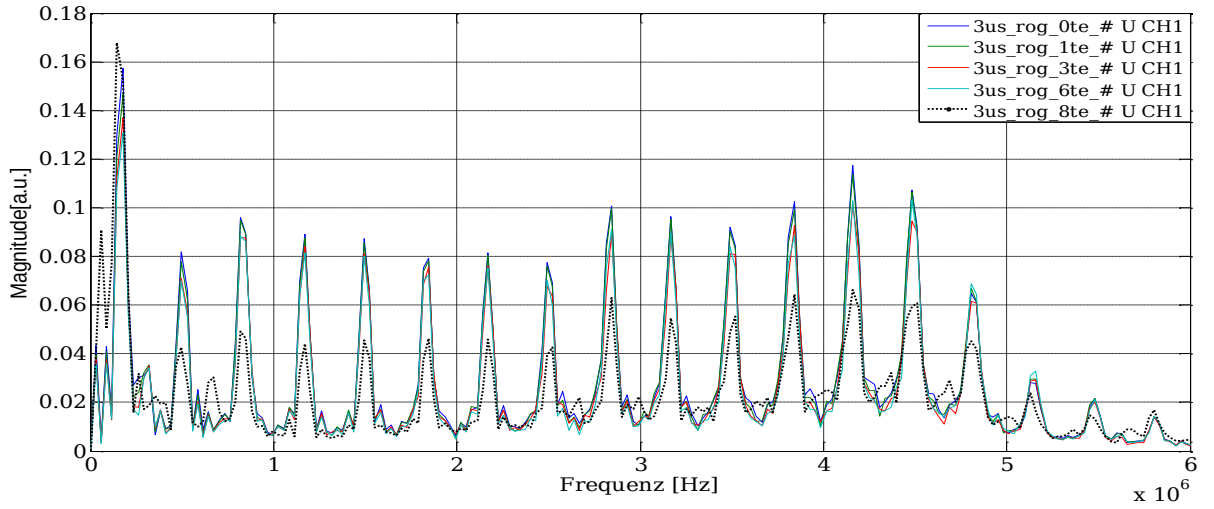

Abbildung 5.36: Amplitudenspektrum der Signale in Phase U- Frequenzbereich bis 6MHz

Ein Ausschnitt des Frequenzbereichs ist in der folgenden Abbildung 5.37 deutlicher zu sehen. Das schwarz gesrichelte Signal könnte wieder eine Art Referenz annehmen für einen bevorstehenden Ausfall. Die Tendenzen der Veränderung ist auch in der folgenden Abbildung bei 150kHz sichtbar, welche durch thermische Alterung verursacht wurde.

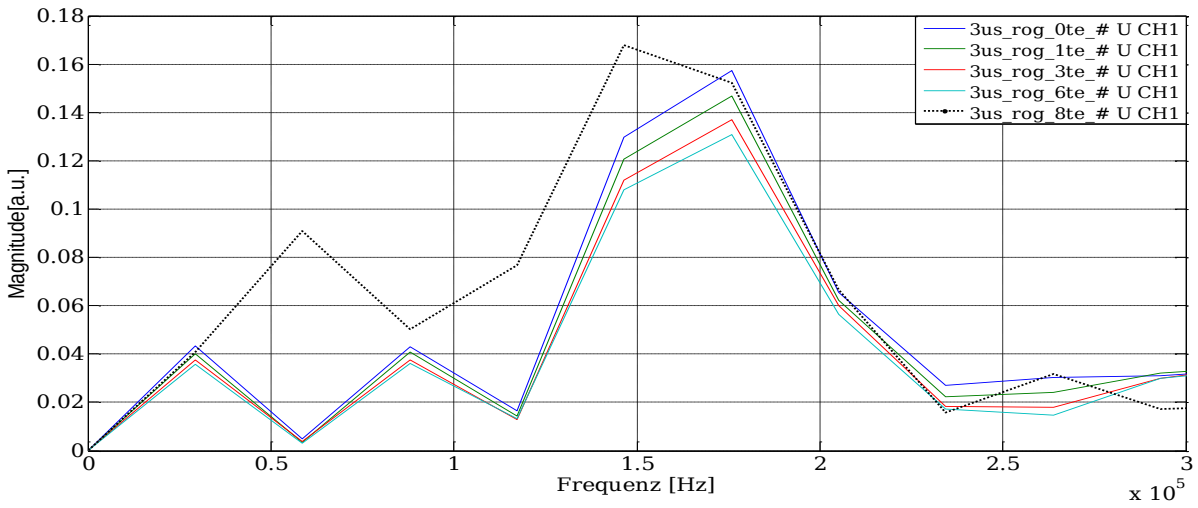

Abbildung 5.37: Amplitudenspektrum der Signale in Phase U Frequenzbereich bis 150kHz

In den FRD Werten der Messungen sieht man in der folgenden Abbildung 5.38 keine monoton ansteigenden Werte. Dies ist auch darauf zurückzuführen, dass der gesamte Frequenzbereich bis 6MHz hier analysiert wurde. Der letzte Zyklus zeigt dagegen einen hohen Ausschlag bei den Indikatoren.

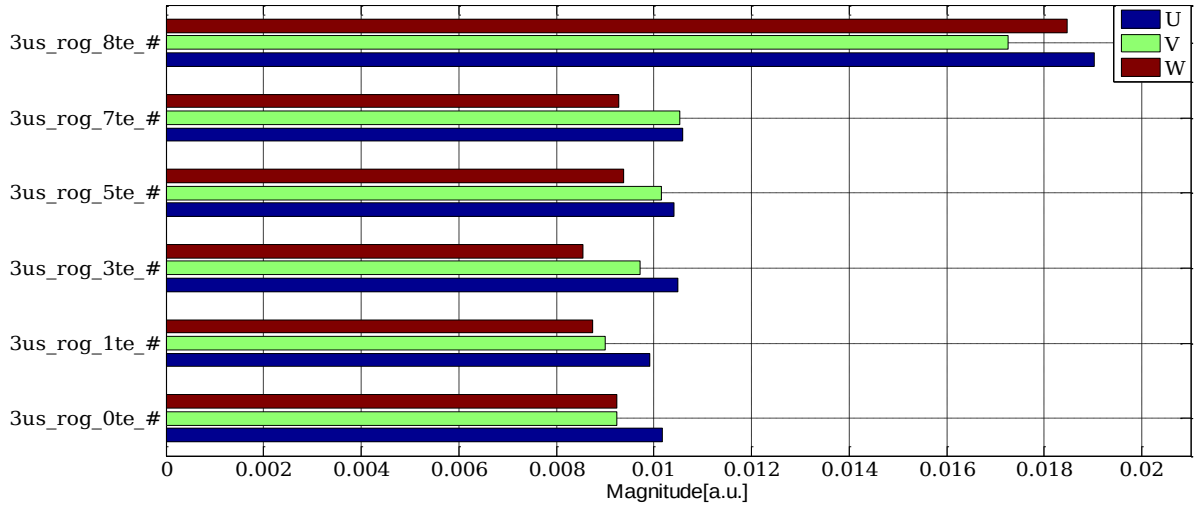

Abbildung 5.38: Absolute FRD Werte der getränkten Wicklungen von 3µs Pulsfolge

- **Versuch mit 10µs Pulsfolge**

Die sichtbaren Zeitverläufe bei 10µs-Pulsfolgen Anregung und künstlich parallel geschalteter Kapazität sind in der folgenden Abbildung 5.39 dargestellt. Die beiden aufgezeichneten Signale zeigen unterschiedlich schwankende Signalverläufe, welche einer Änderung der parasitären Kapazitäten der Maschine entspricht.

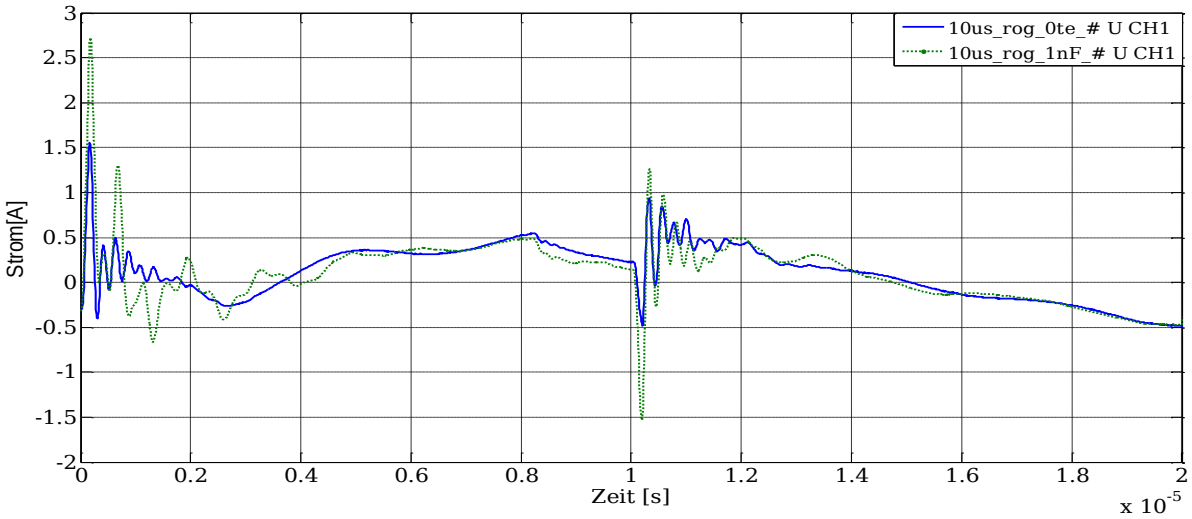

Abbildung 5.39:Zeitsignale der gesunden Maschine und im Fall einer künstlichen Veränderung mit parallelem Kondensator - Pulsdauer 20µs in PhaseU

Die steigende Änderung der Indikatoren zwischen den Zyklen ist in der Abbildung 5.40 leicht zu sehen. Der Einfluss der künstlichen Kapazität ist auch in dieser Abbildung bemerkbar. Da die Kapazität parallel zur Wicklung U geschalten war, ist der Indikatorwert von Wicklung U deutlich größer als in den anderen Phasen. Wegen der Sternschaltung sind die Änderungen in den Phasen V und W ebenfalls bemerkbar. Wie im Falle des 8. Zyklus zu erkennen ist, liefern die Indikatoren deutlich höhere Werte im Vergleich zu den restlichen Zyklen.

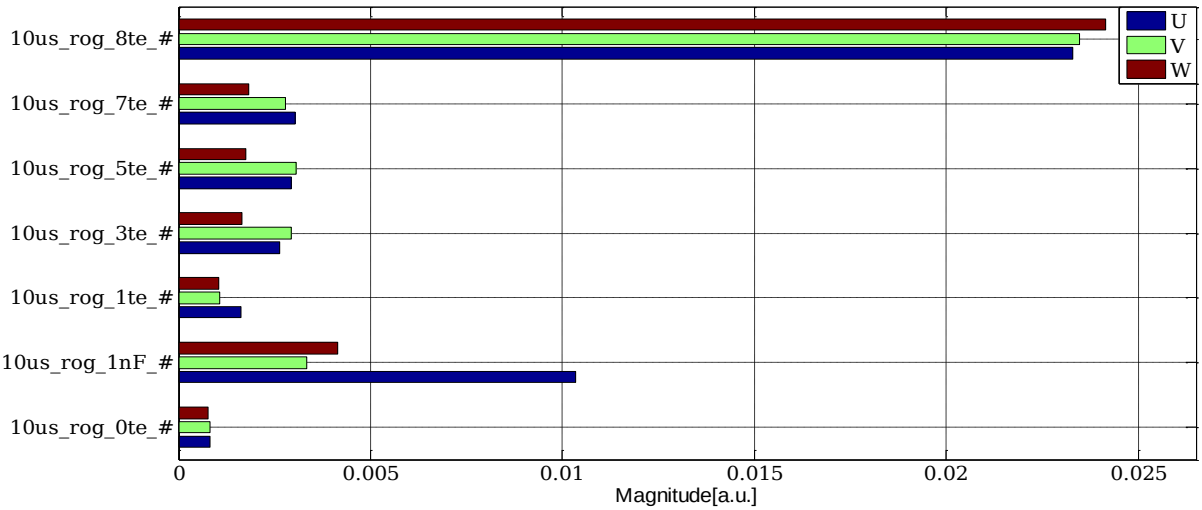

Abbildung 5.40:Absolute FRD Werte der getränkten Wicklungen von 10µs Pulsfolge

- Versuch mit 20µs Pulsfolge

Bei diesem Versuch sieht man in der folgenden Abbildung 5.41 die unterschiedlichen Verläufe der Ströme der Wicklung V. Die 8.Messung der Maschine ist wieder merkbar zu sehen.

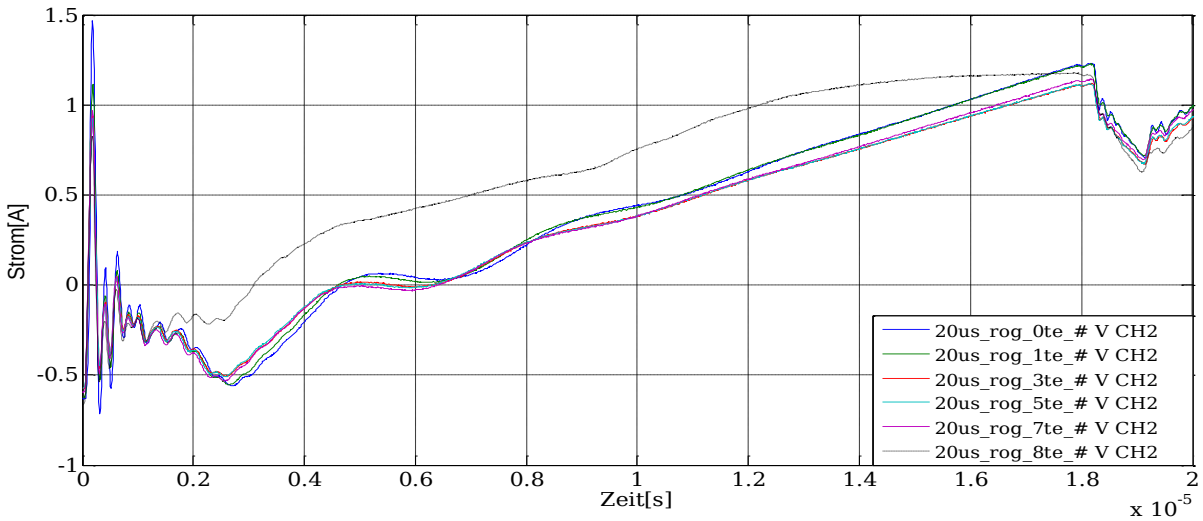

Abbildung 5.41: Zeitsignale mit einer Dauer von 20µs in Phase V

Die Messungen an der Phase V zeigen mehr Streuung und dies sieht man noch in der folgenden Abbildung 5.42 anhand der grünen Balken. Außer bei den anfänglichen Änderungen sieht man keine deutliche Tendenz aus den Indikatoren für diese Versuche.

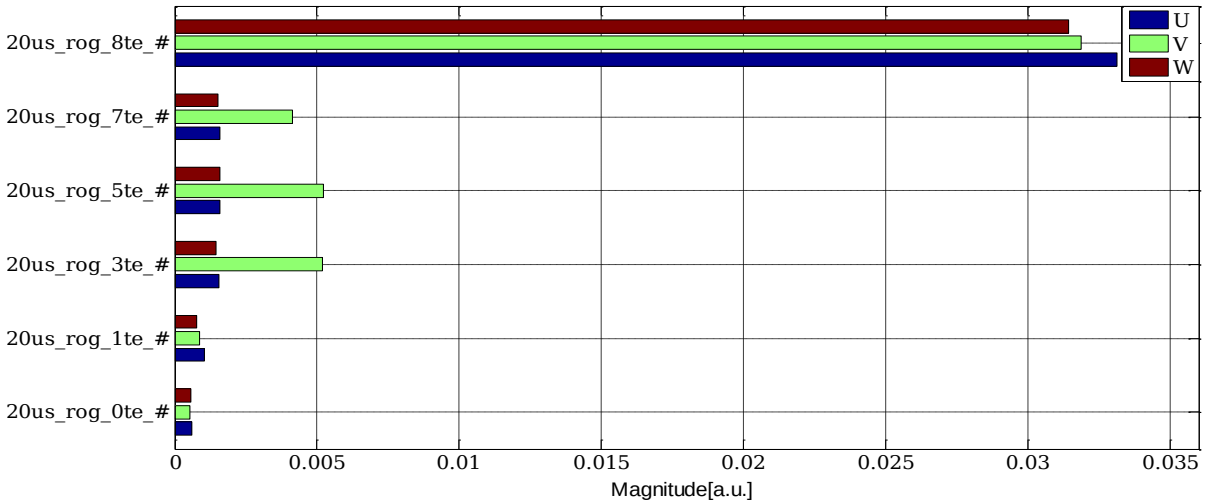

Abbildung 5.42: Absolute FRD Werte der getränkten Wicklungen von 20µs Pulsfolge

- **Common-Mode Versuch**

Hier werden wieder die Common-Mode Messungen gezeigt. In der folgenden Abbildung 5.43 sieht man die Stromverläufe der Wicklung V der aufgezeichneten Vorgänge.

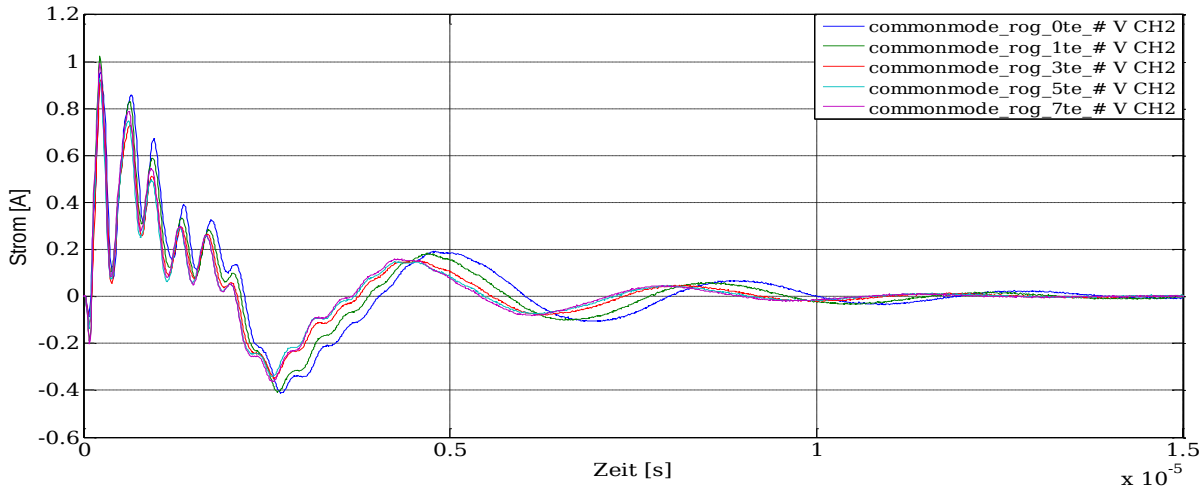

Abbildung 5.43: Zeitsignale der Common-Mode Versuch in Phase V mit einer Dauer von 15µs

Aus der Abbildung 5.44 sieht man wie die Koeffizienten der Wicklungen U,V und W eine steigende Tendenz bilden. Alle drei Wicklungen haben sich mehr oder weniger gleichgewichtet verändert. Das heißt die Erdkapazitäten bzw. die Erdisolationen der Maschine haben sich durch die zyklische Alterung verändert.

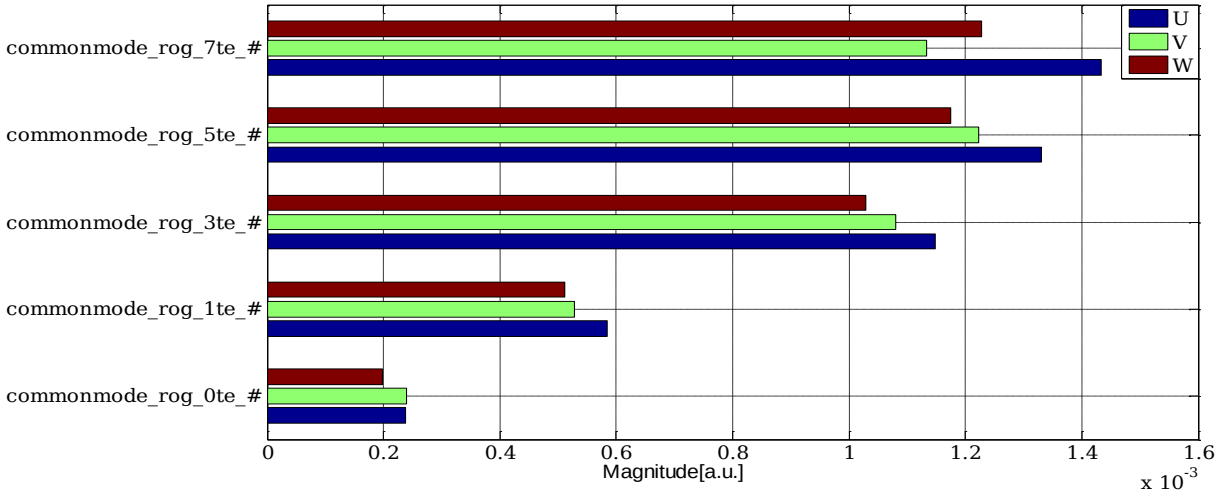

Abbildung 5.44: Absolute FRD Werte der getränkten Wicklungen des Common-Mode Versuch

Die evaluierten Ergebnisse der 6µs und 40µs-Pulsfolgen Anregungen werden nicht in dieser Arbeit präsentiert, da keine neuen Erkenntnisse daraus geschlossen werden können. Jedoch ist bei allen Versuchen eine erhöhte Änderung der Indikatoren zwischen dem 0. und 1. Zyklus zu erkennen.

Aus der Zuwachsrate der Änderungswerte der Indikatoren bei getränkten Wicklungen merkt man, dass die thermische Alterung mit dem FRD Verfahren deutlicher als im Falle der nicht getränkten Wicklungen beobachtet wurde.

6 Evaluierung der Alterung mittels Frequenz-Spektrum-Analysator

Das Bode 100 von der Firma Omicron Lab dient zur Impedanzmessung bzw. Messung des Übertragungsverhaltens. Die Isolation der Wicklungen spielt bei der Untersuchung der thermischen Alterung eine wichtige Rolle. Die parasitären Kapazitäten bilden einen Teil des Impedanzsystems aus [16]. Über einen weiten Frequenzbereich können die Impedanzverläufe der Wicklung mittels Frequenz-Spektrum-Analysators sichtbar abgebildet werden. Daraus können Merkmale in verschiedenen Frequenzbereichen erkennbar sein.

Die Änderungen der Impedanzen, darunter auch Isolationskapazitätsänderungen wegen der thermischen Alterung, zwischen den Maschinenphasen, innerhalb einer Phase und Phase zu Maschinenmasse können mit diesem Messgerät beobachtet werden.

Um mit dem Bode Analyzer eine präzise Messung durchzuführen, ist es notwendig das Gerät zu kalibrieren.

6.1 Kalibrierung des Analysators

Standardisierte BNC Kabelverbindungen werden verwendet, um das Messgerät und die Maschine zu verbinden. Es können unterschiedliche Messarten durchgeführt werden. Die Messleitungen können die Ergebnisse erkennbar beeinflussen. Um diesen Einfluss auf die Messergebnisse zu eliminieren, muss das Gerät mit den verwendeten Kabeln kalibriert werden. Deshalb ist es wichtig immer wieder dieselben Kabel auf den Messeingängen zu verwenden.

Nach Bedienungsanleitung der Firma Omicron Lab, mit Verwendung der mitgelieferten Anwendersoftware am PC, sollen mit dem Bode 100 folgende Schritte durchgeführt werden, damit die Kalibrierung der Kabel erfolgt:

- Aus dem Menü Kalibrierung auswählen
- User/Probe Kalibrierung getrennt auswählen
- Mit dem offenen Ende des BNC Kabel, Start Knopf drücken
- Mit dem kurzgeschlossenen BNC Kabeln, Start Knopf drücken
- Mit dem Abschlusswiderstand von 50 Ω belastete BNC Kabeln, Start Knopf drücken

Nach einem erfolgreichen Abgleichen der User- und Probe-Kalibrierung ist die gewünschte Impedanz- und Übertragungsverhaltenmessungen bzw. Gainmessungen bereitgestellt.

6.2 Frequenzdurchlauf Modus

Im Frequenzdurchlauf Modus des Bode Analyzer ist es möglich, viele Einstellungen zu machen. Damit kann die Anfangs- und Endfrequenz der Messung und die Darstellung und Skalierung der Achsen eingestellt werden.

In dieser Arbeit werden die Impedanzmessungen für Phase zu Phase, Phasen zu Erde und Wickelanfang zu Wickelende durchgeführt.

Die Einstellungen für diese Messungen sind im Tabelle 9 erkennbar.

Parameter	Einstellung
Anfangsfrequenz	1kHz
Endfrequenz	40MHz
Durchlaufmodus	Logarithmisch
Empfänger Bandbreite	1kHz
Referenzwiderstand	50 Ω
Art der Messung	Impedanzmessung oder Gainmessung
Anzahl der Messpunkte	4096

Tabelle 9:Frequenz Durchlauf Einstellungen in der Bode Analyzer Software

6.2.1 Impedanzmessungen

Als Ergebnis einer Alterung der Statorwicklungen einer elektrischen Maschine wurde in [5] gezeigt, dass die Impedanz der Wicklungen sich langsam ändert. Besonders ist die kapazitive Änderung zwischen den dreiphasigen Wicklungen ein wichtiger Indikator beim beschleunigten Alterungsprozess.

Um diese merkbaren Änderungen zu bestimmen, wurden verschiedene Messungen durchgeführt. Die Messungen finden zwischen zwei Phasen, einer Phase zu Erde und entlang einer Phase statt. Damit werden die Änderungen der Phasenisolation, Wicklungsisolation und Erdungsisolation untersucht. Die Phasen der Maschine werden in Stern geschalten, sowie für bestimmte Messungen

wird der Sternpunkt aufgetrennt. Mit aufgetrennten Sternpunkt werden die parasitären Kapazitäten zwischen den Statorwicklungen der Maschine gemessen.

In der folgenden Abbildung 6.1 sieht man ein vereinfachtes Impedanzmodell von einer Statorwicklung. Die in Serie geschaltenen Elemente $\mathbf{R_s}$ und $\mathbf{L_s}$ entsprechen dem Statorwiderstand und der Induktivität der Spule einer Statorwicklung. Dazu parallel geschalten ist die Kapazität $\mathbf{C_{t\text{-}t,}}$ die Isolierungskapazität, welche aus allen zwischen den einzelne Drähten der Spule befindlichen Windungskapazitäten gebildet ist.

Dieses Modell bildet einen RLC Parallelschwingkreis, welche zur Beobachtung der Änderung der Isolierungskapazitäten bzw. Windungskapazitäten erstellt wird. Je nach gealterter Wicklungsisolierung ändert sich der Kapazitätswert. Somit verschiebt sich die Resonanzfrequenz des Schwingkreises. Diese Änderung der Resonanzfrequenz ist ein Indikator für die Auswirkung der thermischen Alterung.

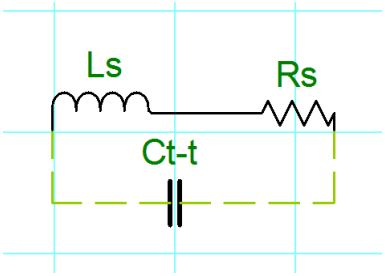

Abbildung 6.1: Impedanzmodell einer Statorwicklung

Die Impedanzberechnung des RLC Schwingkreises läßt sich so berechnen:

$Z=(X_L+Rs)//\ Xc$, wobei $X_L=jwl$ und $Xc=\frac{1}{jwC}$ mit $w=2\pi f$ sind.

Die Messdaten wurden mit Matlab verarbeitet, um die Signalverläufe in einer gemeinsamen Abbildung darstellen zu können.

6.2.1.1 Messungen der nicht getränkten Wicklungen

Mittels Bode 100 wird die Impedanzmessung der nicht getränkten Maschine durchgeführt. In der folgenden Abbildung 6.2 sieht man zwei untereinander dargestellte Abbildungen von einer Impedanzmessung einer Wicklung, welche dem Bode Diagramm entspricht. Obere Abbildung zeigt den Betrag der berechneten Wicklungsimpedanz in dBΩ. In der unteren Abbildung sieht man das entsprechende Phasendiagramm der Messung in Grad. Die Frequenzen sind in einer logarithmischen Skala dargestellt.

An der Kreuzung der rot gestreiften Linien sieht man wo genau die Resonanz auftritt. Durch die Impedanz Berechnung eines RLC Schwingkreises liefert der Imaginärteil der Impedanz den Wert 0 in diesem Bereich. Die Resonanz ist auch im Phasenverlauf der Abbildung zu sehen.

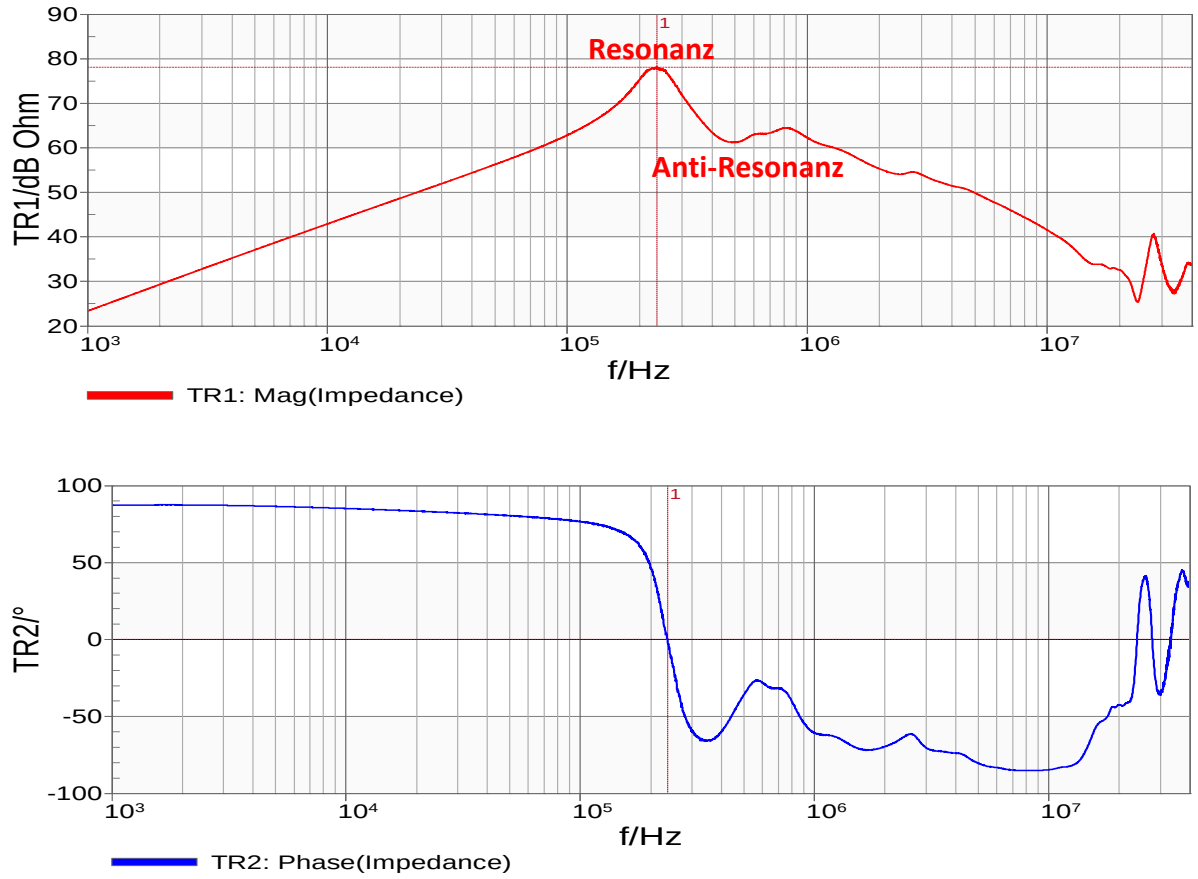

Abbildung 6.2:Betrag und Phasendiagramme einer Impedanz-Messung der einzelnen Wicklung

Die Resonanzfrequenz lässt sich mit der folgenden Formel 6.1 berechnen.

$$fr = \frac{1}{2*\pi}\sqrt{\left(\frac{1}{L*C} - \frac{R^2}{L^2}\right)} \qquad \textbf{(6.1)}$$

Wobei **L** der Induktivität der Spule, **R** dem Statorwiderstand, **C** dem Kapazitätswert der Isolierung und **fr** der Resonanzfrequenz entspricht.

Obwohl die Analyse zwischen 1kHz und 40MHz durchgeführt wird, interessieren wir uns zwischen 1kHz und 1MHz Bereich. In ähnlichen Arbeiten wird ein Bereich über 1MHz ebenfalls zur Analyse genutzt, siehe [5].

- **Analyse Wicklung U**

In diesem Teil wird die Änderung der Isolierungskapazität der Phase U untersucht. Es wird die Verschiebung der Resonanzfrequenz und der vom induktiven Verhalten niedrigere Frequenzbereich untersucht. Vor Beginn der thermischen Alterung ist eine Messung mit einer künstlichen Kapazität mittels Bode-Analyser durchgeführt worden. Da sich der Kapazitätswert wegen der Parallelschaltung

erhöht hat, hat sich die Resonanzfrequenz nach links verschoben bzw. sich verringert. In der folgenden Abbildung 6.3 sieht man die Impedanzverläufe der Phase U.

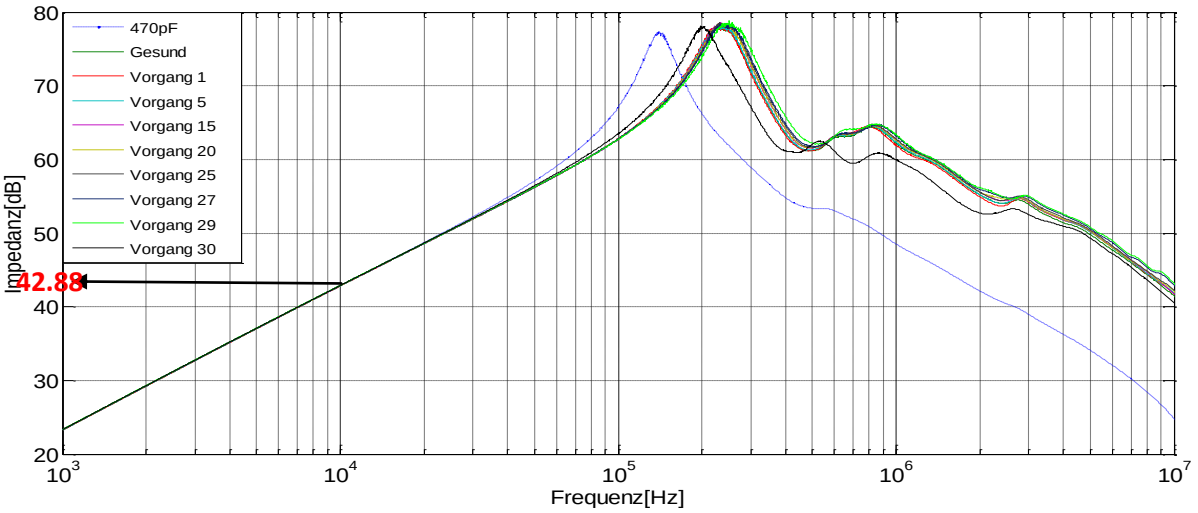

Abbildung 6.3:Impedanz-Messung der Wicklung U

Im unteren Frequenzbereich dominiert das induktive Verhalten der Statorwicklung mit einem Anstieg von +20dB/Dekade, wo $X_L = s*L$ und $s = j*w$ die frequenzabhängige Variable im Laplace-Bereich ist. Bei höheren Frequenzen dominiert der kapazitive Teil des Schwingkreises nach der Resonanz. Bei niedrigeren Frequenzen z.B. bei *f=10kHz* nimmt der Betrag einen Wert von *42.88 dBΩ*. Durch Rückberechnung von ***L*** aus $42.88 = 20 * \log(\mathrm{w} * \mathrm{L})$, ergibt sich die Induktivität der Statorspule zu *L=2.21 mH.* Der Statorwiderstand der Wicklung ist aus den Kenndaten der Maschine als *R=0,678 Ω* angenommen. Die Kapazitätswerte können aus den entsprechenden Frequenzen berechnet werden.

In der folgenden Abbildung 6.4 ist der Resonanzbereich vergrößert aufgezeichnet. Durch die Darstellung der Resonanzfrequenzen mit den Pfeilen sind die genaueren Werte oberhalb der Abbildung zu sehen. Die Unterschiede zwischen den Verläufen der Letzten und der vorherigen Messungen, sind deutlich zu sehen. Wegen der alternden Isolierung verschieben sich die Messungen nach rechts. Aus der Berechnung der Resonanzfrequenz versteht man, dass sich der Wert der Isolierungskapazität von Phase U verkleinert hat.

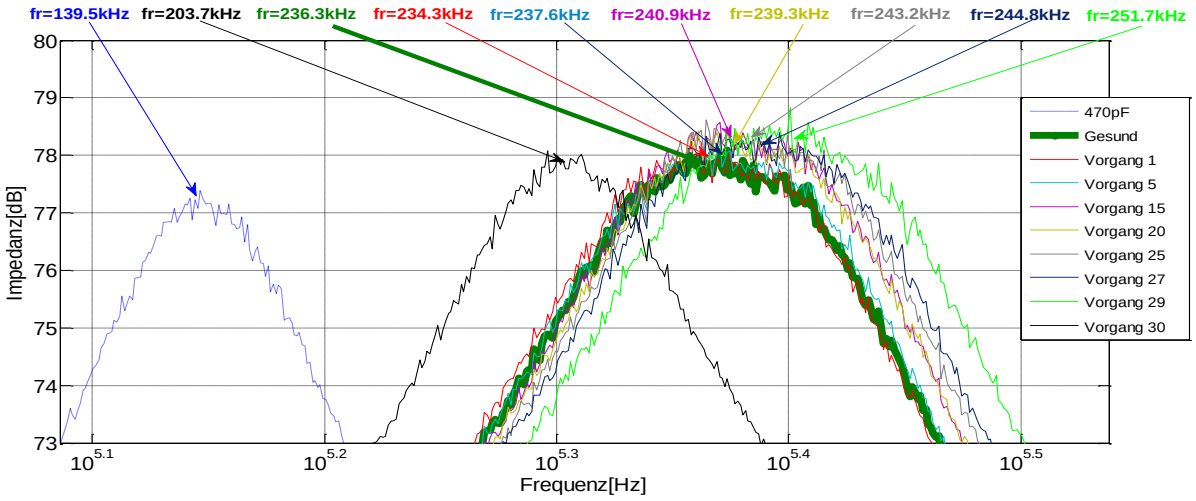

Abbildung 6.4:Resonanzspitze des Impedanzspektrums der Phase U

Die entsprechenden Kapazitätswerte von Wicklungsisolierung in Phase U sind in der Abbildung 6.5 gezeigt. Wie stark die Isolation gealtert wurde, sieht man in der nachfolgenden Abbildung 6.6 aus den Änderungswerten der Kapazitäten.

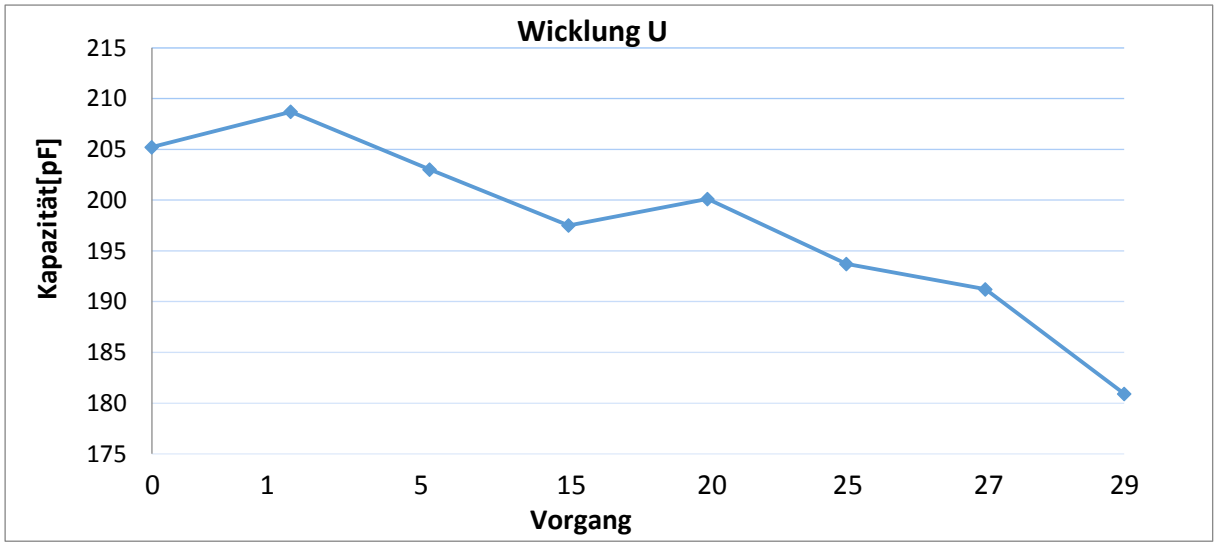

Abbildung 6.5:Kapazitätswerte der Isolierung von der Wicklung U

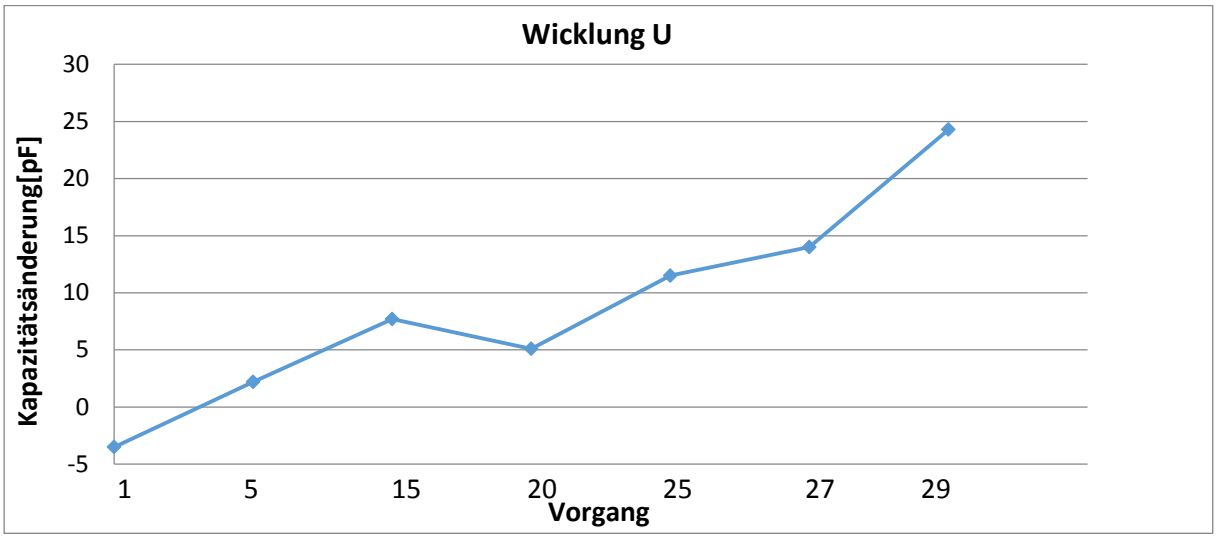

Abbildung 6.6: Kapazitätsänderung der Isolierung von der Wicklung U

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde die Phase V weggelassen, da die Werte und Tendenzen der Phase U ähnlich sind.

- **Analyse Wicklung W**

Die Phase W ist ebenfalls mit der Zeit gealtert. Dies sieht man in den in der folgenden Abbildung 6.7 aufgezeichneten Impedanzmessungen.

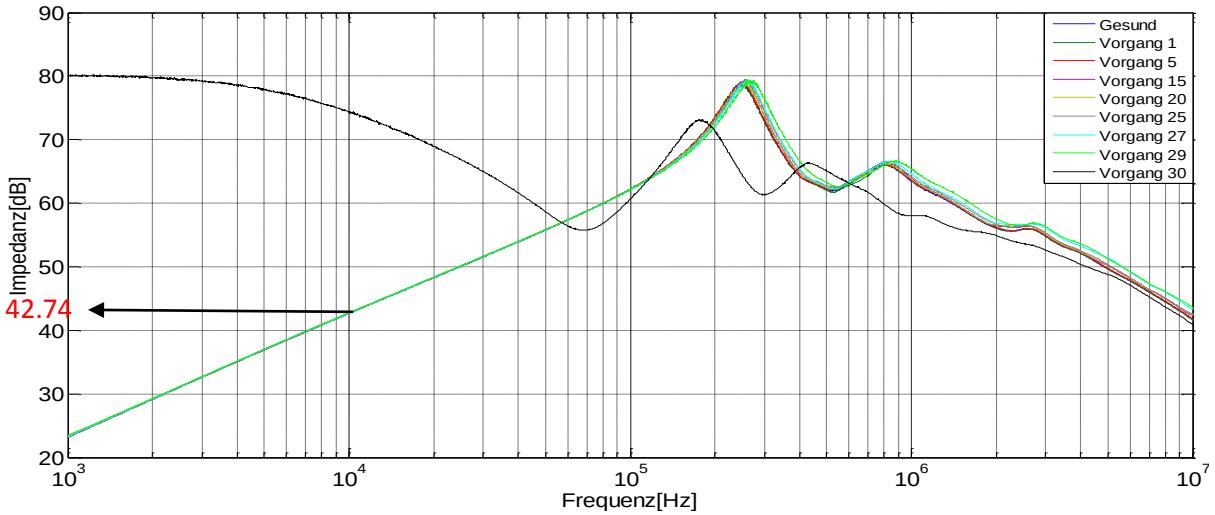

Abbildung 6.7: Impedanz-Messung der Wicklung W

Der vergrößerte Resonanzbereich ist in der folgenden Abbildung 6.8 dargestellt. Aus den berechneten Werten der Resonanzfrequenz lassen sich die Änderungen der Isolierungskapazitäten berechnen. Die Statorinduktivität lässt sich aus $42.74 = 20 * log(w * L)$ zu *L=2.18mH* berechnen. Die Kapazitätsänderungen durch die Alterung sind in der nachfolgenden Abbildung 6.9 dargestellt.

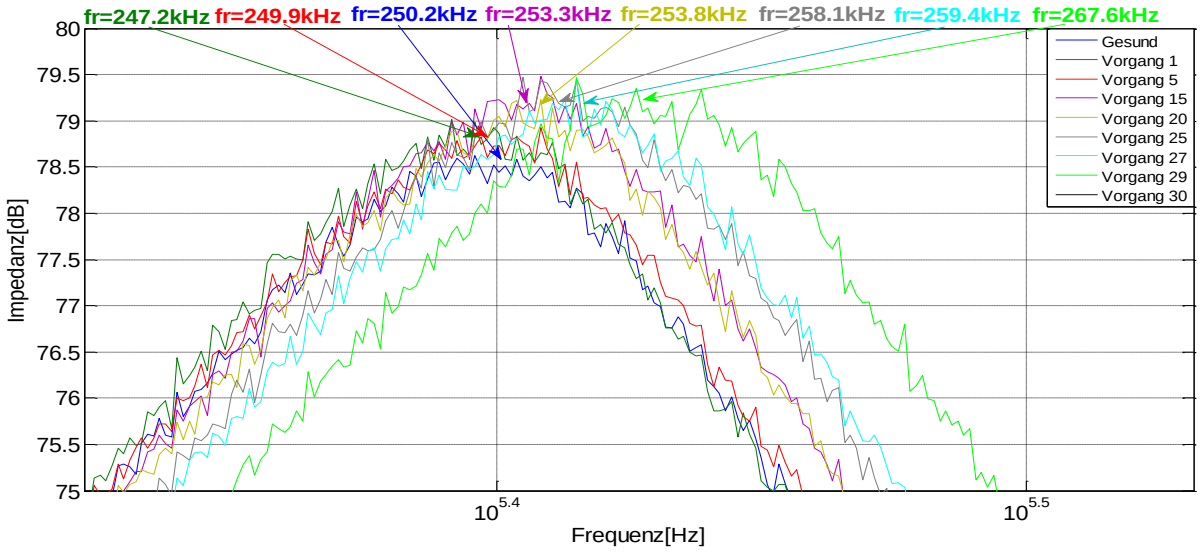

Abbildung 6.8: Resonanzspitze des Impedanzspektrums der Phase W

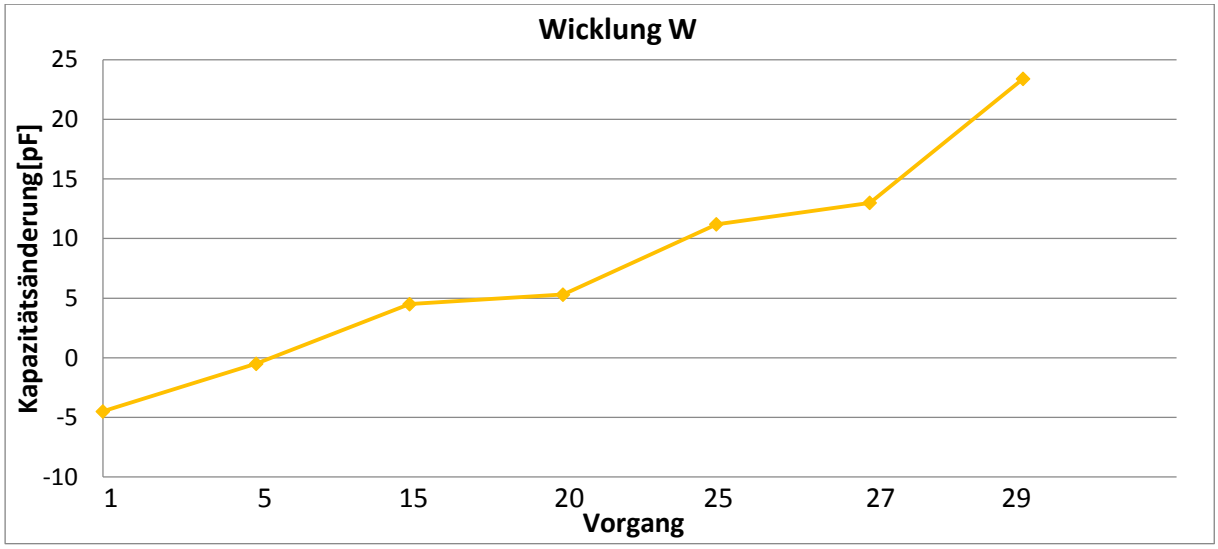

Abbildung 6.9:Kapazitätsänderungen der Isolierung von der Wicklung W

- **Phase U zu Phase V Kapazitätsanalyze**

Weitere parasitäre Kapazitäten liegen zwischen zwei Phasen. Wie erwähnt, sind diese Impedanzmessungen mit offenem Sternpunkt zwischen den Wicklungen der Phasen durchgeführt worden. Wie in der folgenden Abbildung 6.10 klar ist, verhalten sich die Messverläufe aus der Impedanzberechnung $|\boldsymbol{Xc}| = \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{s}*\boldsymbol{C}}$ kapazitiv mit -20dB/Dekade, bis eine Antiresonanz und Resonanz auftritt. Obwohl die Kapazitätsänderungen aus dem Resonanzbereichen deutlich sichtbar sind, kann für eine genauere Untersuchung der Alterung der Phasenisolation, der untere Frequenzbereich genutzt werden (siehe Abbildung 6.12).

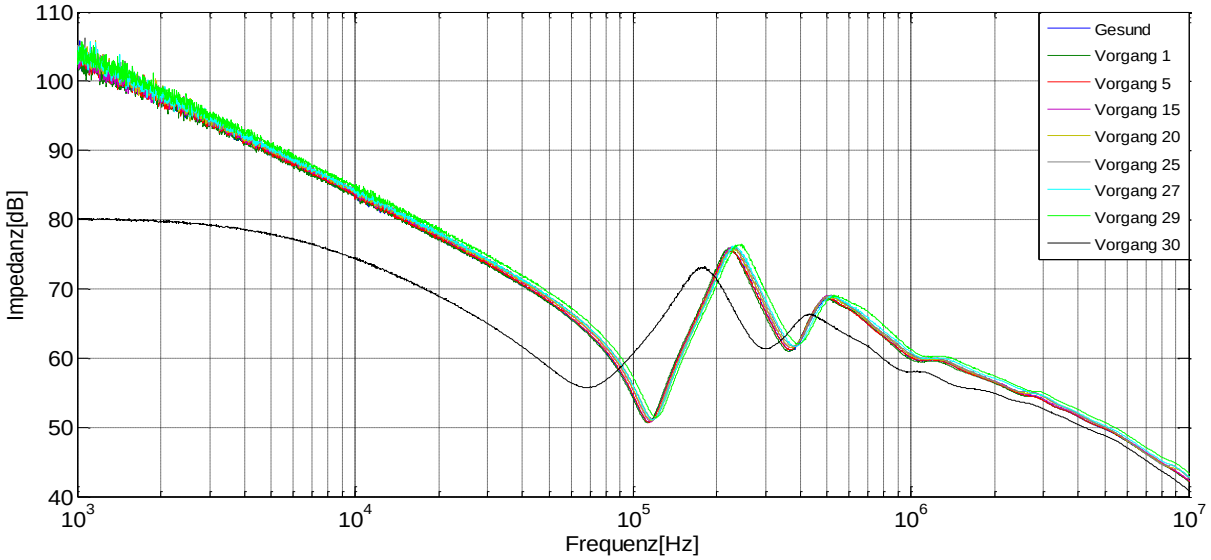

Abbildung 6.10: Impedanz-Messung zwischen Phase U und Phase V

Die Antiresonanzfrequenz verschiebt sich am Anfang der Alterung erst nach links und dann in den nachfolgenden Vorgängen wieder nach rechts und tendiert bis zum letzten Vorgang in die gleichen Richtung. Es könnte vermutlich durch den Wechsel der Bode Messgeräte passiert sein, da das Gerät getauscht werden musste. Obwohl die Kalibrierungen jedesmal vor dem Wechsel der Geräte durchgeführt wurde, kann ein Einfluss nicht ausgeschlossen werden.

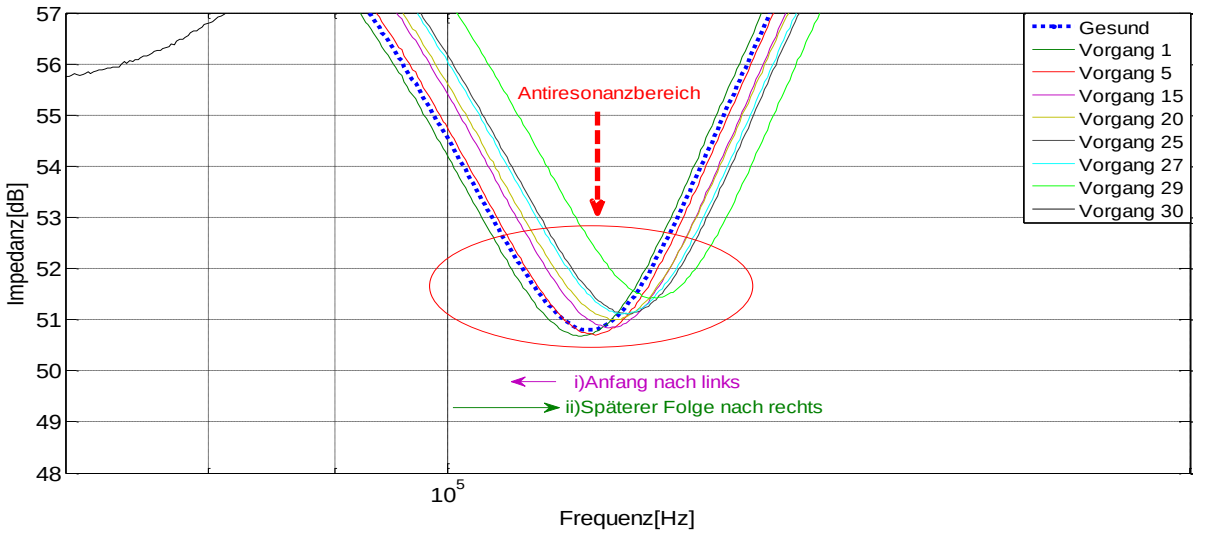

Abbildung 6.11:Antiresonanzbereich einer Impedanz-Messung zwischen den Phasen U und V

Aus den gemessenen Werten bei 10kHz lässt sich die Kapazität im gesunden Zustand mit $82.96 = 20 * \log(\frac{1}{w*C})$ zu **C=1.13nF** berechnen. Die vorletzte gealterte Kapazität bei Vorgang 29 nimmt den Wert $84.44 = 20 * \log(\frac{1}{w*C})$ mit **C=0.954nF** an. Wie aus der Verschiebung Resonanz ersichtlich, verringert sich die Isolierungskapazität zwischen Phase U und V um **176 pF** im vorletzten

Vorgang der gealterten Wicklung. Nach dem Zyklus 30 ist der Kapazitätswert auf **C= 3.06 nF** angestiegen. Da es teilweise Kontaktstellen der Wicklungen mit dem Blechpaket gibt, wurde dieser Kapazitätswert stark beeinflusst.

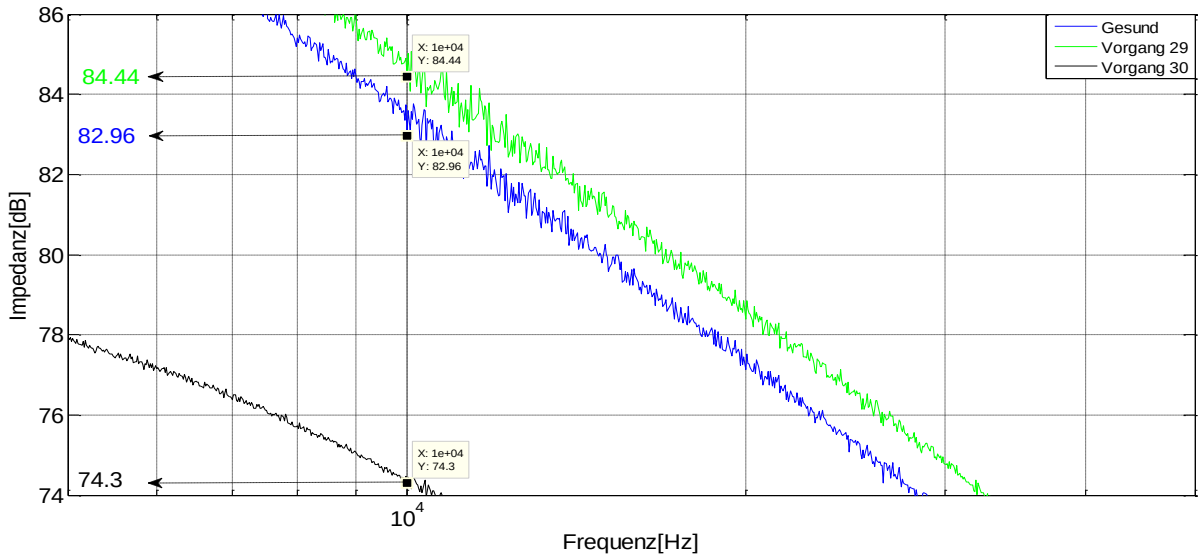

Abbildung 6.12:Ansicht des niederfrequenten Bereichs der Impedanz-Messung zwischen U und V bei 10kHz

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde die Messung zwischen U und W und zwischen V und W weggelassen, da die Werte und Tendenzen der Ergebnisse ähnlich sind.

- **Erdkapazitätsmessung zwischen Phase U und Gehäuse**

Es wird die Veränderung der Erdkapazität zwischen der Phase U und dem Maschinengehäuse untersucht. Wie in der folgenden Abbildung 6.13 sichtbar ist, hat der Verlauf zu Beginn wieder ein kapazitives Verhalten mit -20dB/Dekade Abfall.

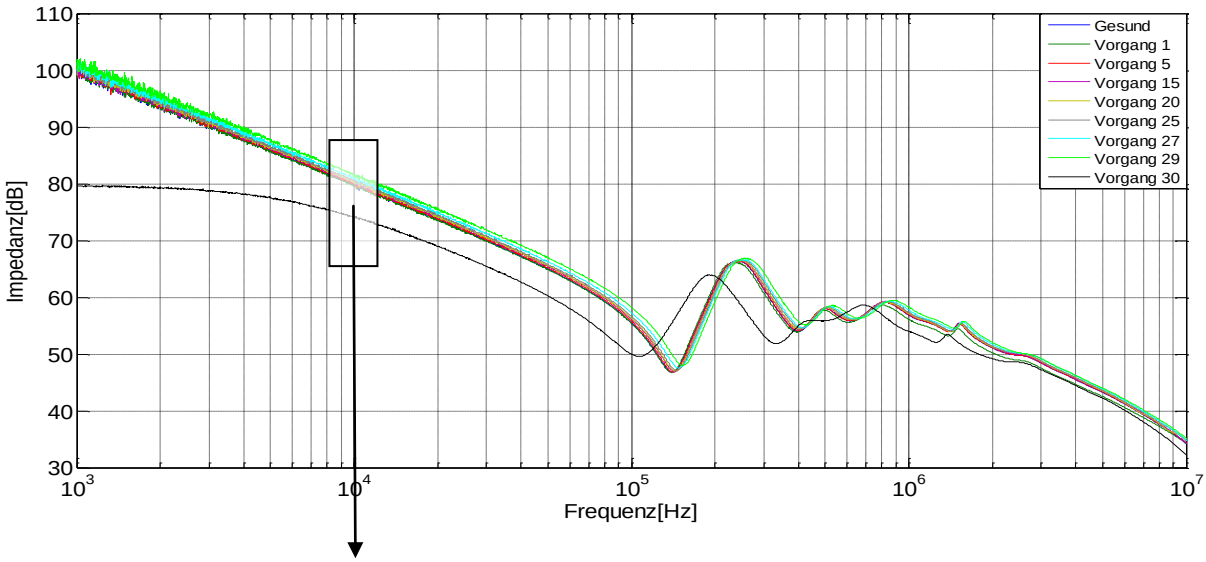

Abbildung 6.13: Impedanz-Messung zwischen Phase U und Maschinengehäuse

Da sowohl die Antiresonanzfrequenz sich erhöht und auch der Betrag der Impedanz sich vergrößert hat, siehe Abbildung 6.14, hat sich der kapazitive Wert aus der $|\boldsymbol{Xc}| = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}*\boldsymbol{\pi}*\boldsymbol{f}*\boldsymbol{C}}$ stark verringert.

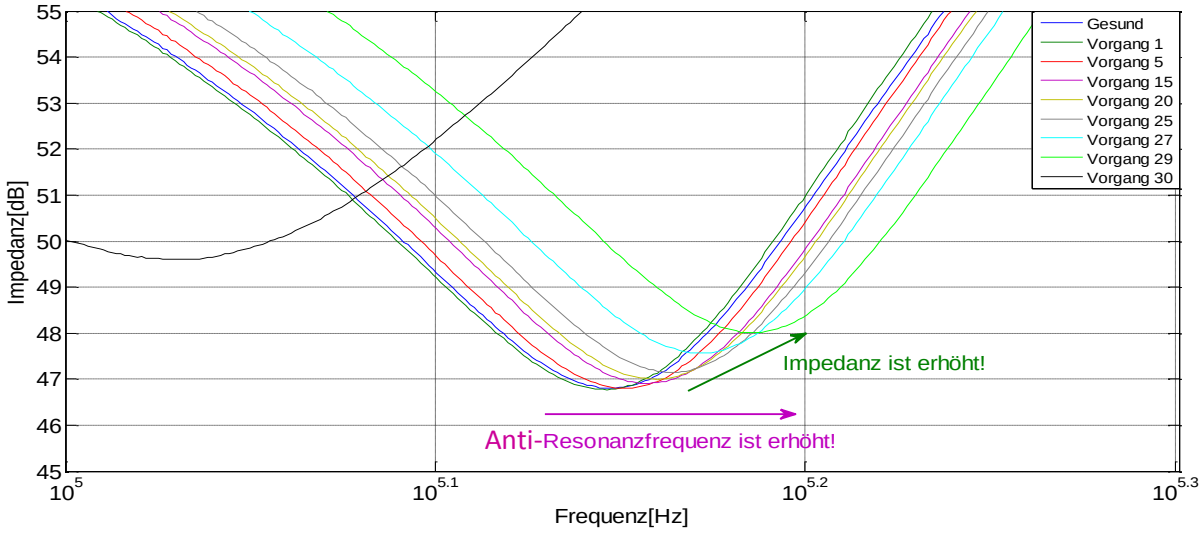

Abbildung 6.14:Antiresonanzspektrum der Impedanzmessung zwischen Phase U und Maschinengehäuse

In der nächsten Abbildung 6.15 lässt sich die Berechnung der Kapazitätsänderungen zeigen. Der gesunde Kapazitätswert ergibt sich zu Wert **C=1.64nF** und der Kapazitätswert der vorletzten Alterung zu **C=1.38nF**. Also hat sich anscheinend infolge der thermischen Alterung, die Erdkapazität um **260pF** bis zum vorletzten Vorgang der gealterten Wicklungen verringert. Im Falle eines Erdfehlers nimmt die Kapazität einen Wert von C=3.14nF an.

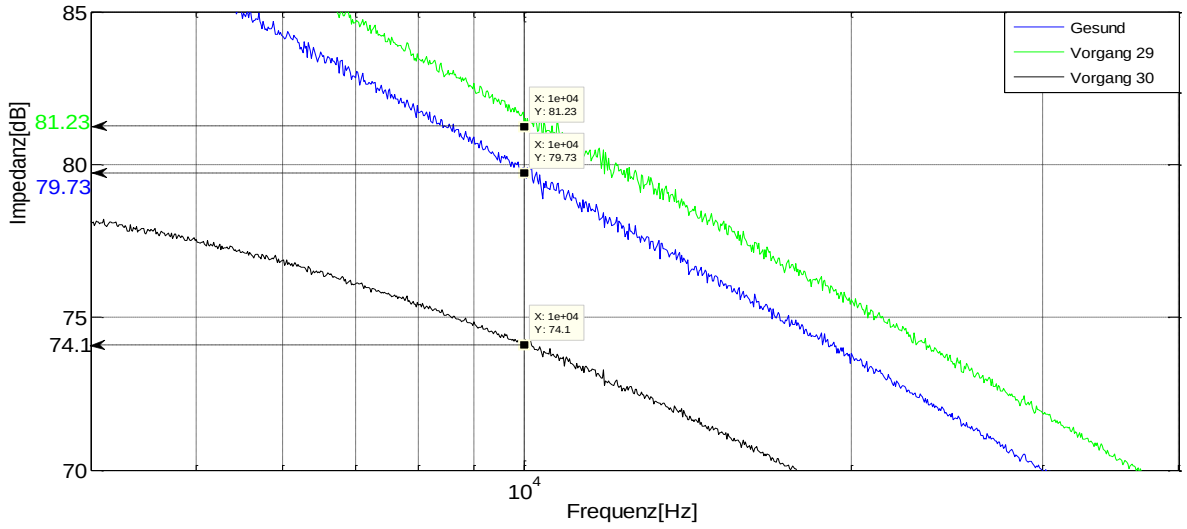

Abbildung 6.15: Ansicht des niederfrequenten Bereichs der Impedanz-Messung zwischen U und Maschinengehäuse bei 10kHz

Die bisherigen untersuchten Impedanz-Messungen gehören zu der nicht getränkten Statorwicklung.

Als Ergebnis zeigen alle Messungen die Änderung der Isolierungskapazitäten infolge der thermischen Alterung. Die Kapazitätswerte wurden aus dem angenommenen *RLC Parallelschwingkreis* berechnet. Da dies ein vereinfachtes Modell darstellt, können die exakten Werte von diesen abweichen.

6.2.1.2 Messungen der getränkten Wicklungen

In diesem Abschnitt der Arbeit werden die Untersuchungen der Änderungen der Isolationskapazitäten der getränkten Wicklung gezeigt. Da von den vorherigen Messungen die Bode Diagramme schon gezeigt wurden, sind nur die zu untersuchenden Resonanzbereiche der Messungen genauer gezeigt.

- **Analyse Wicklung U**

In der folgenden Abbildung 6.16 sieht man die Verschiebung der Resonanzfrequenzen mit steigender Tendenz. Die künstliche Veränderung mit einem Kondensator parallel zu Phase U bewirkt, dass sich die entsprechende Resonanzfrequenz wegen der Erhöhung des Kapazitätswerts um 100pF nach links verschoben hat. Anhand der Messergebnisse sieht man aus den Werten von der Abbildung 6.17, dass die Kapazitätsänderung etwa 400pF-330pF=70 pF beträgt. Die fehlenden 30pF könnten wegen des nicht idealen Kondensators (Anschlussleitungen etc.) entstehen.

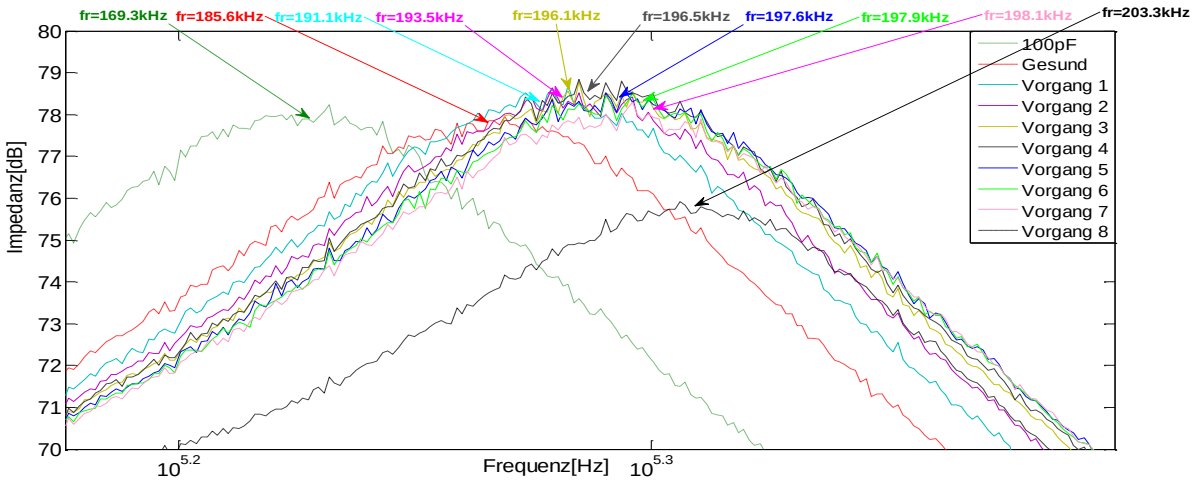

Abbildung 6.16: Resonanzspitze des Impedanzspektrums der Phase U

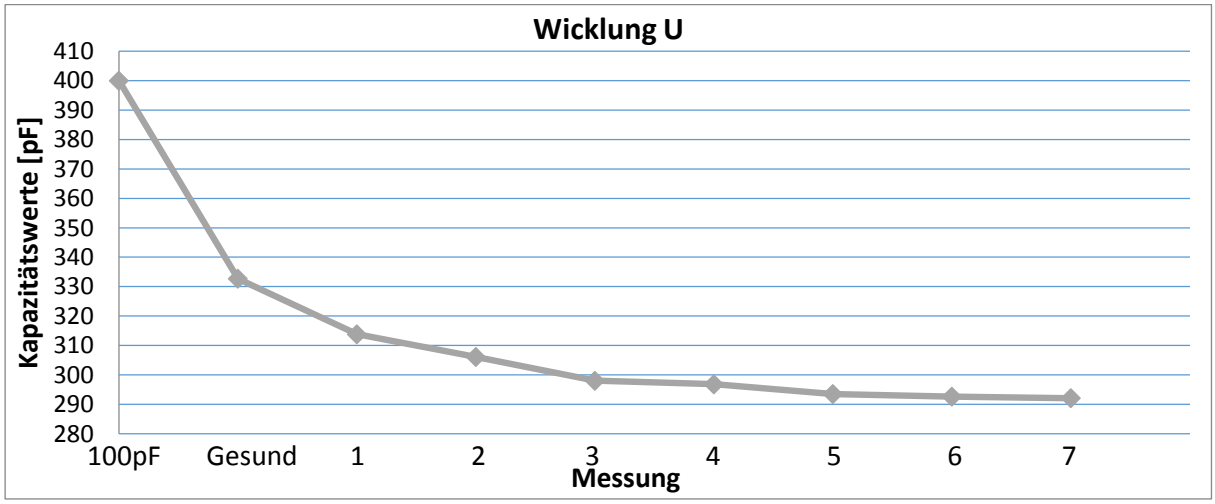

Abbildung 6.17: Kapazitätswerte der Isolierung von der Wicklung U

In der folgen Abbildung 6.18 sieht man wie stark sich die Wicklungsisolierung U verändert hat.

Am Anfang der Alterung sieht man die größte Änderung der Wicklungsisolation, da sich das Tränkmaterial von den Wicklungen gelöst hat. Nachfolgend ändern sich die Werte während den Alterungsvorgängen immer weniger und die Wicklungsisolierungen scheinen sich langsamer zu verändern.

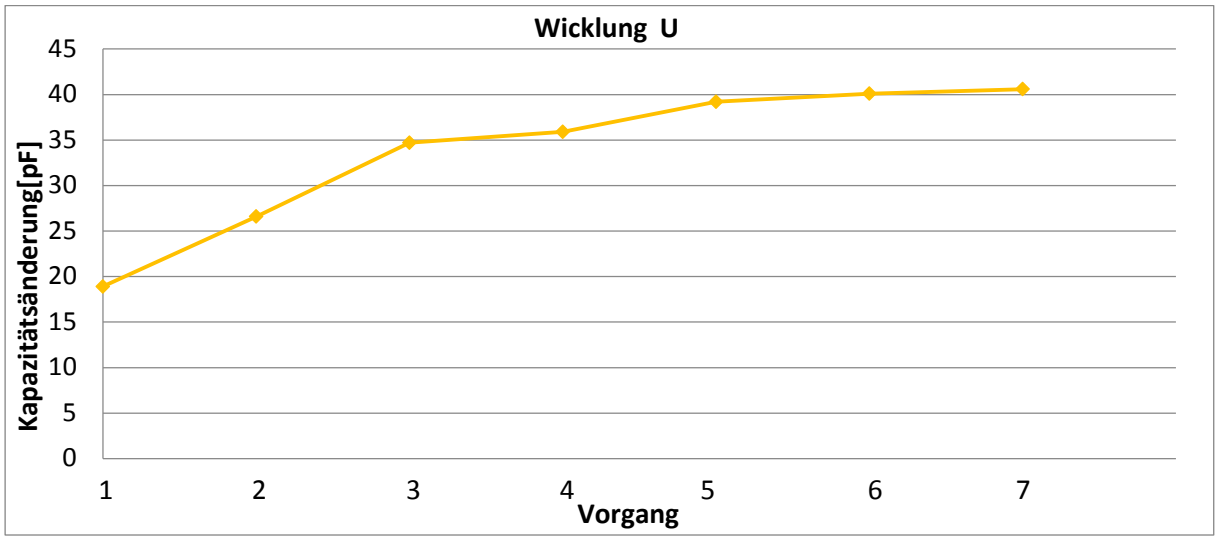

Abbildung 6.18: Kapazitätsänderungen der Isolierung von der Wicklung U

- **Analyse Wicklung W**

Die Verschiebung der Resonanzfrequenzen wird wieder deutlich in der Abbildung 6.19 gezeigt. Im Zustand nach dem „Vorgang 8“ sind die Kapazitätswerte der Isolierungen extrem erhöht, weil es zu einem Kurzschluss zwischen Wicklungen und Maschinengehäuse gekommen ist. Das sieht man in der folgenden Abbildung im schwarz gestrichelten Signalverlauf bei einer Resonanzfrequenz fr=144.2 kHz.

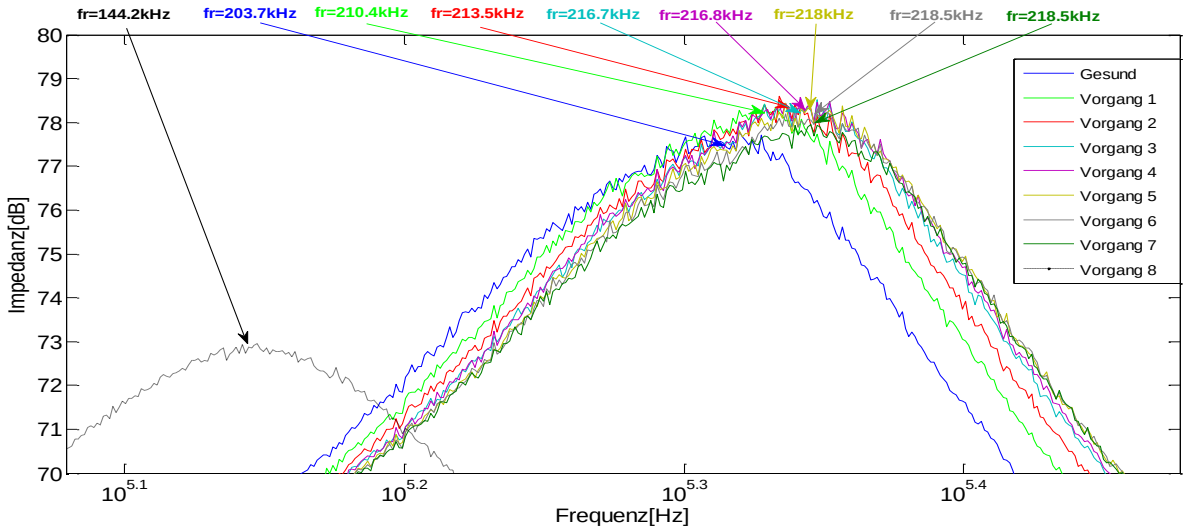

Abbildung 6.19: Resonanzspitze des Impedanzspektrums der Phase W

Die Werte der Kapazitätsänderungen werden bis zum Vorletzten Alterungsvorgang 7 in der Abbildung 6.20 gezeigt.

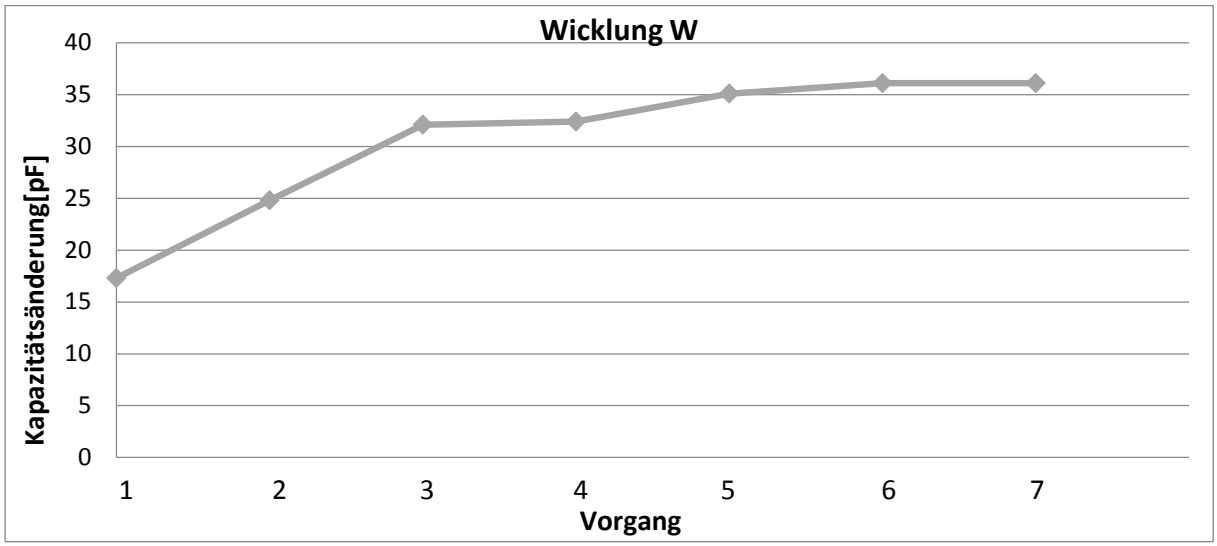

Abbildung 6.20: Kapazitätsänderungen der Isolierung von der Wicklung W

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde die Phase V weggelassen, da die Werte und Tendenzen der Phase U und W ähnlich sind.

- **Phase U zu Phase V Kapazitätsanalyse**

Die Phasenkapazitäten wurden ebenfalls bei der getränkten Wicklung untersucht. Infolge der thermischen Alterung ändert sich die parasitäre Kapazität der Phasenisolation zwischen zwei Wicklungen.

In der folgenden Abbildung 6.21 sieht man die Bodemessung zwischen Phasenanschluss U und V bei offenem Sternpunkt.

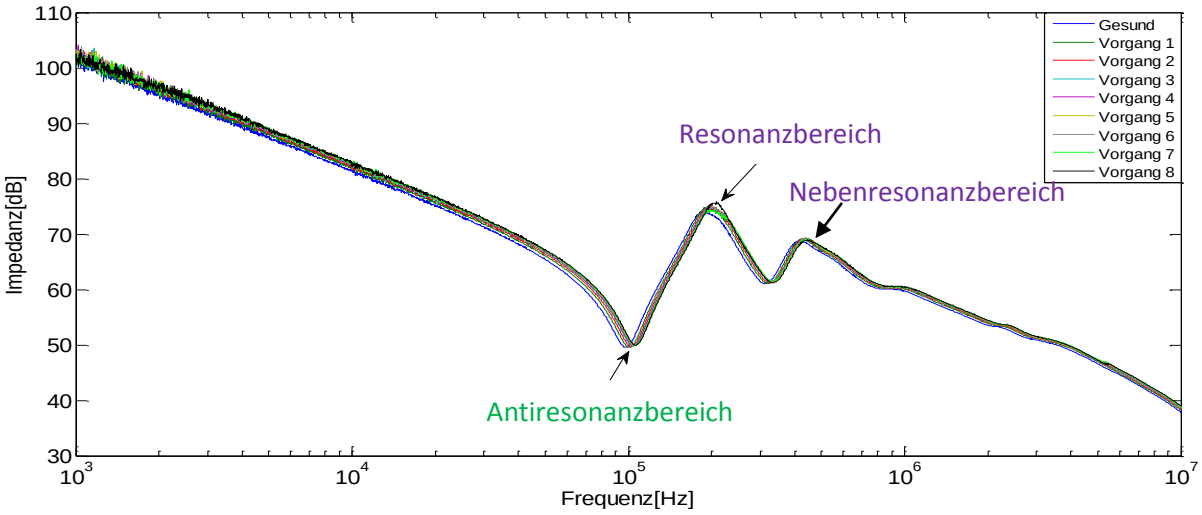

Abbildung 6.21: Impedanz-Messung zwischen Phase U und Phase V

Bei niederem Frequenzbereich dominiert das kapazitive Verhalten, bis die Resonanz und Antiresonanz auftritt. Im ersten Fall verläuft das Signal mit -20dB/Dekade Abfall.

In der Abbildung 6.22 ist der Resonanzbereich dargestellt und man sieht die Änderungen der Kapazitätswerte der Phasenisolierungen.

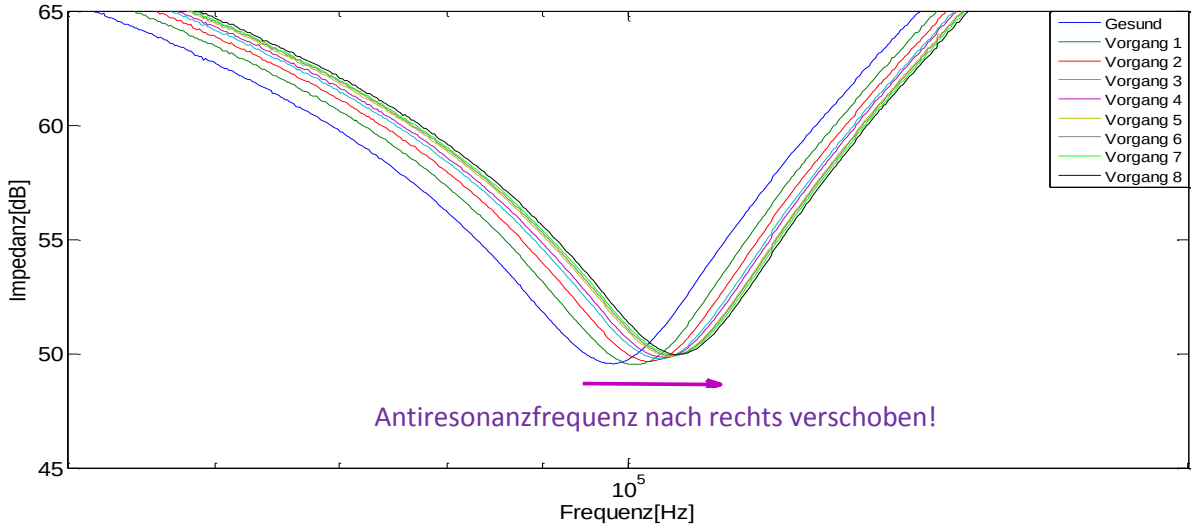

Abbildung 6.22: Antiresonanzspektrum der Impedanz-Messung zwischen Phase U und Phase V

Um die genauere Berechnung der Kapazitätswertänderungen zu erhalten, nehmen wir die gemessenen Werte der Impedanzen bei f=10kHz in der Abbildung 6.23. Die Phasenisolierung zwischen der Wicklungsgruppe U und V hat sich basierend auf den berechneten Werten von C0=1.34nF und C8=1.23nF, um **110 pF** durch die Alterung reduziert, wobei der Kapazitätswert C0 die gesunde Wicklung repräsentiert und C8 die bis zum Ende gealterte Wicklung.

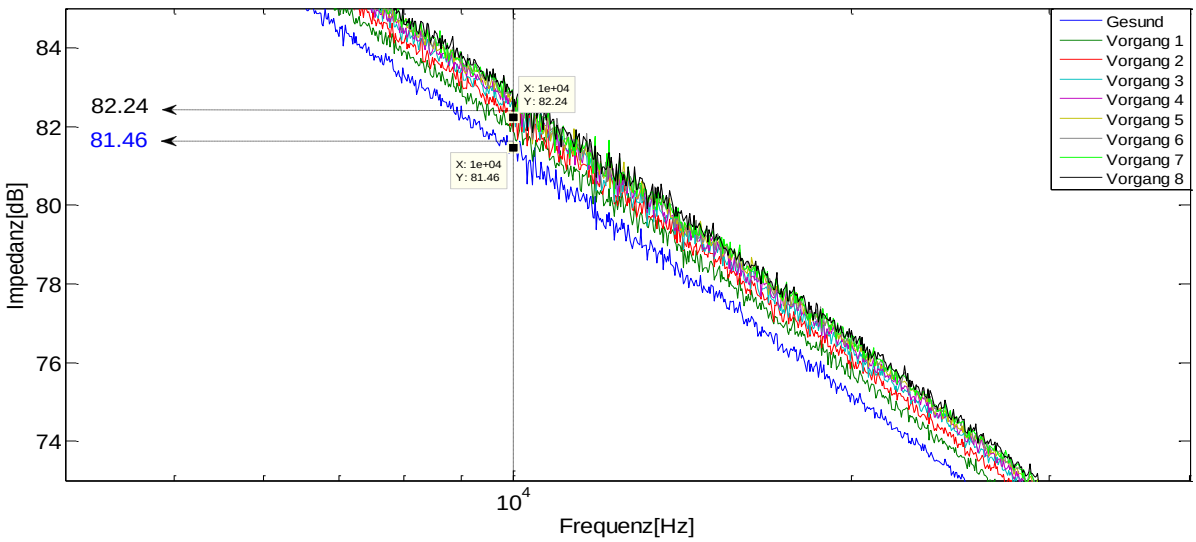

Abbildung 6.23: Ansicht des niederfrequenten Bereichs der Impedanz-Messung zwischen U und V bei 10kHz

7 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Diplomarbeit war es, mit Hilfe eines Umrichters unterschiedlich frequente Pulsfolgen an zwei unterschiedlich isolierte Statorwicklungen einer Asynchronmaschine zu testen, um die durch thermische Alterung verursachte Statorisolatonsveränderungen mit Hilfe des am Institut entwickelten Online-Messverfahrens zu detektieren und mit einem anderen Offline- Verfahren zu bestätigen.

Im Institutslabor wurde die beschleunigte Alterung so durchgeführt, dass die Maschine in einem kleinen Ofen gelegt wurde. Weiters wurden die Messdaten in einem definierten Messaufbau aufgenommen um eine bessere Reproduzierbarkeit zu ermöglichen. Neben dem robusten Messaufbau wurden noch die Schirmaßnahmen verbessert und eine eigens für die Messungen entworfene Sensorbox gefertigt. Die Isolationsveränderungen wurden mittels zwei verschiedenen Verfahren überwacht. Dadurch konnte die Tendenz beider Messergebnisse miteinander verglichen werden.

Als Resultat des eingesetzten Onlineverfahrens kann gesagt werden, dass hochfrequente Pulsfolgen mehr Isolationsänderungen infolge thermische Altrung feststellen können. Andererseits konnten mit dem Offline Verfahren die Isolationsänderungen bei beiden Maschinen klar erkannt werden. Messergebnisse mit einer künstlichen Veränderung mittels parallel geschalteter Kapazität, liefern einen Anhaltspunkt über mögliche Veränderungen.

Schließlich soll hier noch gesagt werden, dass eine allgemeine Aussage über die Isolationsveränderungen bzw. Indikatoren, welche einen möglichen Ausfall aufgrund der thermische Alterung vorhersagen sollen, nicht möglich sind und es zusätzlicher Testreihen an Maschinen gleichen Typs bedarf. Die hier präsentierten Untersuchungen dienen als Anhaltspunkt für weitere Arbeiten in diesem Gebiet.

8 Bibliography

[1] M. H. W.McDermid, „Insulation Svstems and Monitoring for StatorWindings of large Rotating Machines," *IEEE Electrical Insulation Magazine,Vol.9, No.4,* pp. 7-15, 1993.

[2] Z. Peroutka, „Requirements for insulation system of motors fed by modern voltage source converters.," *IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference,PESC,vol.6,* pp. 4383-4389, 2004.

[3] E. Persson, „Transient effects in application of PWM inverters to induction motors.," *IEEE Transactions on Industry Applications,vol 28 no.5,* pp. 1095-1101, 1992.

[4] G. C. Stone, E. A. Boulter, I. Clubert und H. Dhirani, Electrical Insulation for Rotation Machines - Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair, Piscataway: IEEE Press, 2004.

[5] F. Perisse, P. Werynski und D. Roger, „A New Method for AC Machine Turn Insulation Diagnostic Based on High Frequency Resonances," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,* Nr. 5, pp. 1308-1315, 2007.

[6] --, „Motor insulation breakdowns due to operation of frequency converters.," *IEEE Power Tech Conference Proceedings,* 2003.

[7] IEEE_Committee, „Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installation, Part I," *IEEE Transactions on Industry Applications, vol.21, no.4,* pp. 853-864, 1985.

[8] --, „Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installation, Part II," *IEEE Transactions on Industry Applications, vol.21, no.4,* pp. 865-872, 1985.

[9] B. Baptista, A. Mendes, S. Cruz und A. Cardoso, „Temperature Distribution Inside a Three-Phase Induction Motor," *Electrical Review,ISSN 0033-2097 R. 88 NR 1a,* 2012.

[10] J. L. Oslinger und L. C. Castro, „Correlation between Capacitance and Dissipation Factor used for Assessment of Stator Insulation," *International Conference on Electrical Machines and Power Electronics,* pp. 365-371, 2012.

[11] Electrical Machinery Committee, „IEEE Recommended Practice for Thermal Evaluation of Sealed Insulation Systems for AC Electric Machinery Employing Random-Wound Stator Coils".*IEEE Std 1107-1996.*

[12] P. Nussbaumer, C. Santin und T. Wolbank, „Analysis of current reaction on inverter-switching to detect changes in electrical machine's high-frequency behavior," *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society,* pp. 1678-1683, 2012.

[13] A. Mitteregger, *Online Isolationszustandsüberwachung von umrichtergespeisten Drehstrommaschinen*

basierend auf hochfrequenter Stromabtastung, Wien: Diplomarbeit, 2011.

[14] P. Nussbaumer, T. Wolbank und M. A. Vogelsberger, „Sensitivity Analysis of Insulation State Indicator in Dependence of Sampling Rate and Bit Resolution to Define Hardware Requirements," *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT),* pp. 392-397, 2012.

[15] C. Santin, *Entwicklung eines Mess- und Regelsystems zur Erforschung transienter Vorgänge in elektrischen Antrieben,* TU Wien: Diplomarbeit, 2012.

[16] P. Nussbaumer, T. Wolbank, C. Zöller und T.Winter, „Seperation of Fundamental Wave and Transient Components of the Current Signal Induced by Inverter Switching for Machine Insulation State Detection".*Austrian Research Promotion Agency;838478.*

[17] „http://www.lem.com/hq/en/component/option,com_catalog/task,displaymodel/id,90.13.25.001.0/," SA, LEM Holding, 12 2015. [Online].

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Seitenansicht einer Stator -Nut.Siehe [4]-Seite 14 4
Abbildung 3.1:Lebensdauer der Isolationsmaterialien der elektrischen Maschine nach Klassen [9]..... 6
Abbildung 3.2:Erwärmungs-Kurve der Wicklungen der Maschine und Maschinengehäuse 9
Abbildung 4.1: Prinzipskizze des Prüfstandes 12
Abbildung 4.2:li. Foto ASM und re. leeres Statorgehäuse 14
Abbildung 4.3: Aufbau des Messbox 15
Abbildung 4.4:Frequenzspektrum von 10µs Pulse, mit und ohne geschirmte Kabeln 16
Abbildung 4.5: Foto des LEMs [17] 16
Abbildung 4.6:Foto der verwendeten Rogowski Spule 17
Abbildung 4.7: Foto des NI Systems 18
Abbildung 4.8:Abbildungen von Zwischenplatine (li.) und Messprint (re.) 18
Abbildung 4.9: Prinzipschaltbild eines Spannungszwischenkreisumrichter 19
Abbildung 4.10:Pulsfolge in Phase U und resultierende Ströme der Wicklungen 19
Abbildung 4.11:Pulsmuster-Dateien von +U/-U Anregungen für 6µs Pulsfolge 21
Abbildung 5.1: Mit Rogowski Spulen aufgezeichnete Stromantwortmessungen der Wicklungen bei 50kHz Anregung 23
Abbildung 5.2: Pulssignale am Ausgang des Ansteuerprints und gemessen an der Maschinenwicklung mit 20µs Pulsfile 24
Abbildung 5.3: FRD-Tool 25
Abbildung 5.4: Bearbeitete Zeitsignale aller drei Phasen 25
Abbildung 5.5: Zeitsignale mit einer Dauer von 10µs in allen Phasen 26
Abbildung 5.6:Amplitudenspektrum der konvertierten Signale in allen Phasen in einem Frequenzbereich bis 6MHz 27
Abbildung 5.7: Amplitudenspektrum der konvertierten Signale in allen Phasen in einem Frequenzbereich bis 1MHz 27
Abbildung 5.8: SFRD Werte dargestellt in der komplexen Gauß`schen Ebene 28
Abbildung 5.9: Absolute FRD Werte der getränkten Wicklungen von Phase U 29
Abbildung 5.10: Absolute FRD Werte der getränkten Wicklungen von Phase V 29
Abbildung 5.11: Absolute FRD Werte der getränkten Wicklungen von Phase W 29
Abbildung 5.12: Zeitsignale Phase U der Alterungsvorgänge 13, 21, 26 und 29 31
Abbildung 5.13: Amplitudenspektrum der Stromsignale von Phase U in einem Frequenzbereich bis 6MHz 32
Abbildung 5.14: FRD Werte dargestellt auf der komplexen Gauß`schen Ebene 32
Abbildung 5.15:Absolute FRD Werte der nicht getränkten Wicklungen von 3µs Pulsfolge 33
Abbildung 5.16: Absolute FRD Werte der nicht getränkten Wicklungen von 10µs Puslfolge vor dem Kabeländerung 33
Abbildung 5.18: Absolute FRD Werte der nicht getränkten Wicklunge -10µs Pulsfolge 34
Abbildung 5.17: FRD Werte dargestellt auf der komplexen Gauß`schen Ebene ab 3. Vorgang 34
Abbildung 5.19: Amplitudenspektrum der Common-Mode Signale in Phase U in einem Frequenzbereich bis 450kHz 35

Abbildung 5.20: Absolute FRD Werte der nicht getränkten Wicklung – Common-Mode Versuch 35
Abbildung 5.21: Amplitudenspektrum der Signale in Phase U- Frequenzbereich bis 400 kHz 36
Abbildung 5.22: FRD Werte dargestellt auf der komplexen Gauß`schen Ebene 36
Abbildung 5.23: Absolute FRD Werte der nicht getränkten Wicklungen von 3µs Pulsfolge 37
Abbildung 5.24: Amplitudenspektrum der Signale in Phase U Frequenzbereich um 250kHz 37
Abbildung 5.25: Amplitudenspektrum der konvertierten Signale in Phase U bei einem Frequenzbereich etwa 44kHz 38
Abbildung 5.26:Absolute ISI Werte der nicht getränkten Wicklungen von 10µs Pulsfolge 38
Abbildung 5.27: Zeitsignale mit einer Dauer von 1.1 µs in Phase V 40
Abbildung 5.28: Amplitudenspektrum Signale in Phase U Frequenzbereich etwa 150kHz 40
Abbildung 5.29: Absolute FRD Werte der getränkten Wicklungen von 3µs Pulsfolge 41
Abbildung 5.30: Zeitsignale mit einer Dauer von 6µs in Phase U 41
Abbildung 5.31: Amplitudenspektrum der Signale in Phase U Frequenzbereich bis 1MHz 42
Abbildung 5.32: Absolute FRD Werte der getränkten Wicklungen von 10µs Pulsfolge 42
Abbildung 5.33: Absolute FRD Werte der getränkten Wicklungen von 20µs Pulsfolge 43
Abbildung 5.34: Zeitsignale der Phase U mit einer Dauer von 2µs in Phase U 43
Abbildung 5.35: Absolute FRD Werte der getränkten Wicklungen von Common-Mode Versuch 44
Abbildung 5.36: Amplitudenspektrum der Signale in Phase U- Frequenzbereich bis 6MHz 44
Abbildung 5.37: Amplitudenspektrum der Signale in Phase U Frequenzbereich bis 150kHz 45
Abbildung 5.38: Absolute FRD Werte der getränkten Wicklungen von 3µs Pulsfolge 45
Abbildung 5.39:Zeitsignale der gesunden Maschine und im Fall einer künstlichen Veränderung mit parallelem Kondensator -Pulsdauer 20µs in PhaseU 46
Abbildung 5.40:Absolute FRD Werte der getränkten Wicklungen von 10µs Pulsfolge 46
Abbildung 5.41: Zeitsignale mit einer Dauer von 20µs in Phase V 47
Abbildung 5.42: Absolute FRD Werte der getränkten Wicklungen von 20µs Pulsfolge 47
Abbildung 5.43: Zeitsignale der Common-Mode Versuch in Phase V mit einer Dauer von 15µs 48
Abbildung 5.44: Absolute FRD Werte der getränkten Wicklungen des Common-Mode Versuch 48
Abbildung 6.1: Impedanzmodell einer Statorwicklung 51
Abbildung 6.2:Betrag und Phasendiagramme einer Impedanz-Messung der einzelnen Wicklung 52
Abbildung 6.3:Impedanz-Messung der Wicklung U 53
Abbildung 6.4:Resonanzspitze des Impedanzspektrums der Phase U 54
Abbildung 6.5:Kapazitätswerte der Isolierung von der Wicklung U 54
Abbildung 6.6: Kapazitätsänderung der Isolierung von der Wicklung U 55
Abbildung 6.7: Impedanz-Messung der Wicklung W 55
Abbildung 6.8: Resonanzspitze des Impedanzspektrums der Phase W 56
Abbildung 6.9:Kapazitätsänderungen der Isolierung von der Wicklung W 56
Abbildung 6.10: Impedanz-Messung zwischen Phase U und Phase V 57
Abbildung 6.11:Antiresonanzbereich einer Impedanz-Messung zwischen den Phasen U und V 57
Abbildung 6.12:Ansicht des niederfrequenten Bereichs der Impedanz-Messung zwischen U und V bei 10kHz 58
Abbildung 6.13: Impedanz-Messung zwischen Phase U und Maschinengehäuse 59
Abbildung 6.14:Antiresonanzspektrum der Impedanzmessung zwischen Phase U und Maschinengehäuse 59

Abbildung 6.15: Ansicht des niederfrequenten Bereichs der Impedanz-Messung zwischen U und Maschinengehäuse bei 10kHz 60
Abbildung 6.16: Resonanzspitze des Impedanzspektrums der Phase U 61
Abbildung 6.17: Kapazitätswerte der Isolierung von der Wicklung U 61
Abbildung 6.18: Kapazitätsänderungen der Isolierung von der Wicklung U 62
Abbildung 6.19: Resonanzspitze des Impedanzspektrums der Phase W 62
Abbildung 6.20: Kapazitätsänderungen der Isolierung von der Wicklung W 63
Abbildung 6.21: Impedanz-Messung zwischen Phase U und Phase V 63
Abbildung 6.22: Antiresonanzspektrum der Impedanz-Messung zwischen Phase U und Phase V 64
Abbildung 6.23: Ansicht des niederfrequenten Bereichs der Impedanz-Messung zwischen U und V bei 10kHz 64
Abbildung 11.1:Ansicht der Laborplatz mit Mess- und Steuergeräten 72
Abbildung 11.2: Abbildung von verwendeten Ofen und Zwischenstecker zum Heizprozess der Wicklungen 72
Abbildung 11.3: Abbildung von Einspeisung der zusätzliche Bestromung der Wicklungen 73
Abbildung 11.4:Seiten Ansicht der nicht getränkten Wicklungen bei li. 2. Vorgang,re. 20. Vorgang... 73
Abbildung 11.5: Seitenansicht der nicht getränkten Wicklungen bei 29. Vorgang 74
Abbildung 11.6: Seitenansicht der nicht getränkten Wicklungen nach elektrischen Bestromung bei 30. Vorgang 74
Abbildung 11.7:Seitenansicht der getränkten Wicklungen vor dem Alterung 75
Abbildung 11.8: Seitenansicht der getränkten Wicklungen nach dem gealteten Wicklungen..... 75
Abbildung 11.9: Abbildung der Gain-Versuch der ASM 75
Abbildung 11.10:Wicklungsschema der verwendeten Versuchsmaschine..... 76

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Isolierstoffklassen und höchstzulässige Dauertemperatur(nach VDE 0530,Teil 1) 2
Tabelle 2:Arten von Ständerwicklungen 3
Tabelle 3:Empfohlene Temperatur und Belastungszyklusdauer nach Norm [11] 8
Tabelle 4:Heizvorgangsdauer der nicht getränktisolierte Maschine mit eingestellte Temperaturen 9
Tabelle 5: Heizvorgangsdauer der getränkten Maschine mit eingestellte Temperaturen 10
Tabelle 6: Kenndaten der Asynchronmaschine für Sternschaltung und serielle Wicklungen 13
Tabelle 7: Kenndaten des Umrichters 15
Tabelle 8: Zur Codierung des Spannungsraumzeigers. 21
Tabelle 9:Frequenz Durchlauf Einstellungen in der Bode Analyzer Software 50

11 Anhang

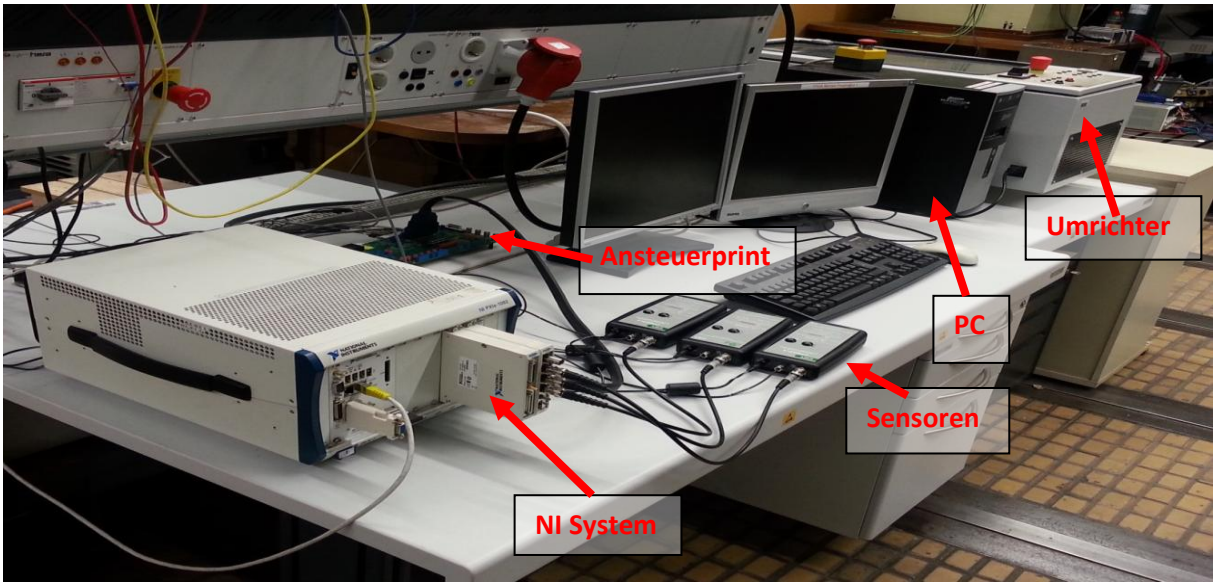

Abbildung 11.1:Ansicht der Laborplatz mit Mess- und Steuergeräten

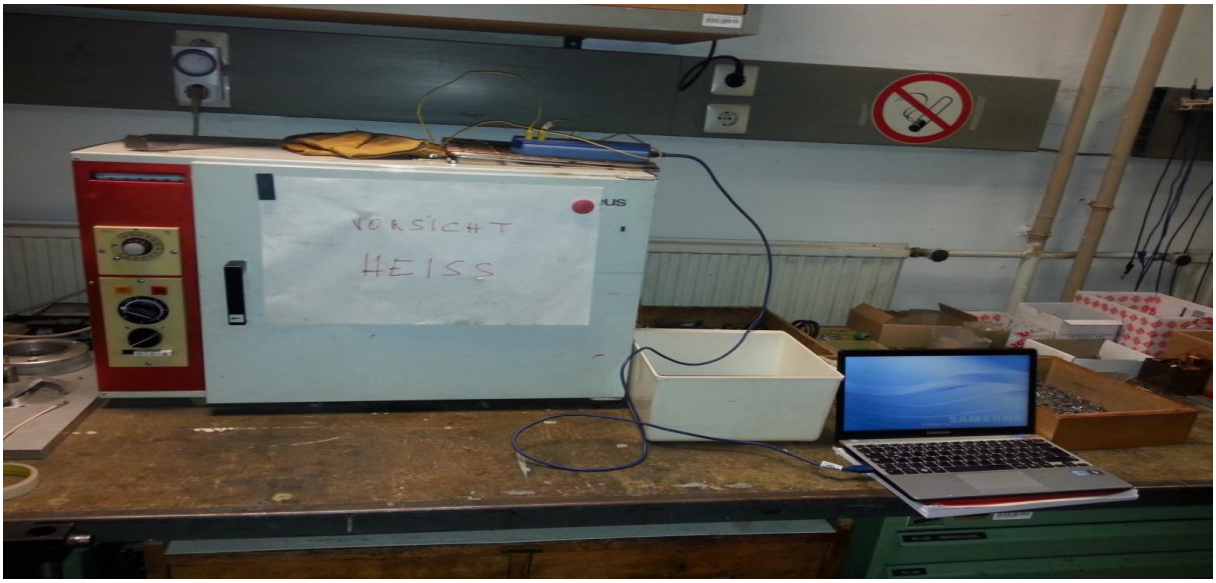

Abbildung 11.2: Abbildung von verwendeten Ofen und Zwischenstecker zum Heizprozess der Wicklungen

Abbildung 11.3: Abbildung von Einspeisung der zusätzliche Bestromung der Wicklungen

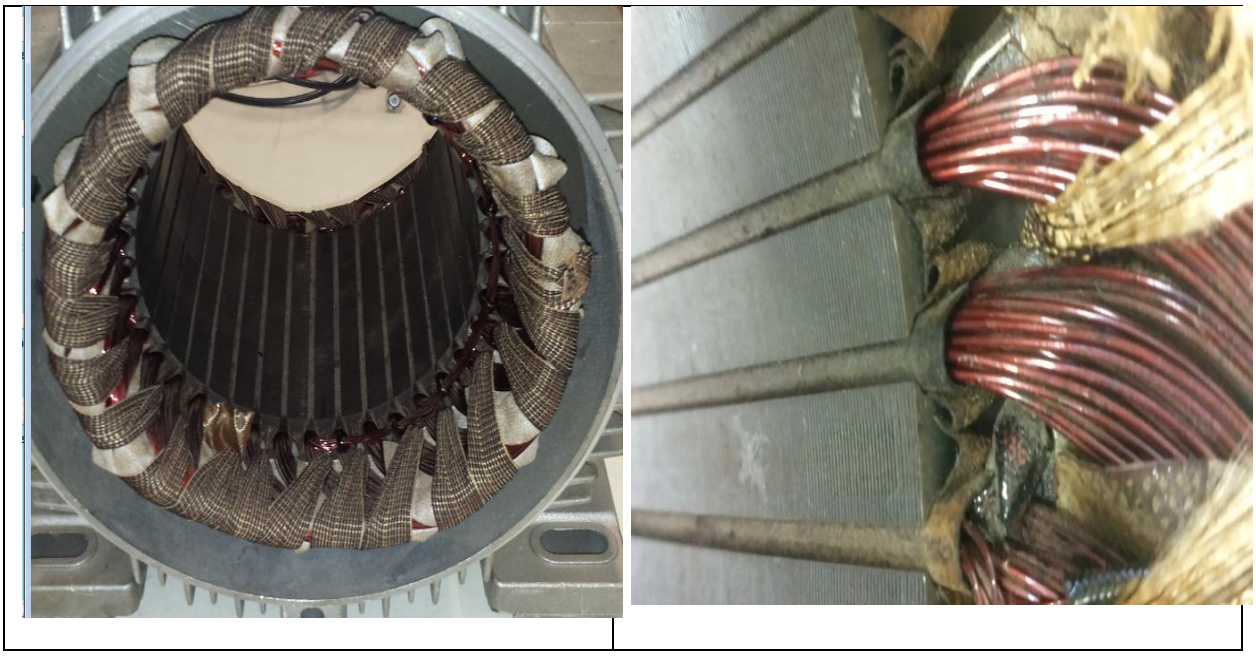

Abbildung 11.4:Seiten Ansicht der nicht getränkten Wicklungen bei li. 2. Vorgang,re. 20. Vorgang

Abbildung 11.5: Seitenansicht der nicht getränkten Wicklungen bei 29. Vorgang

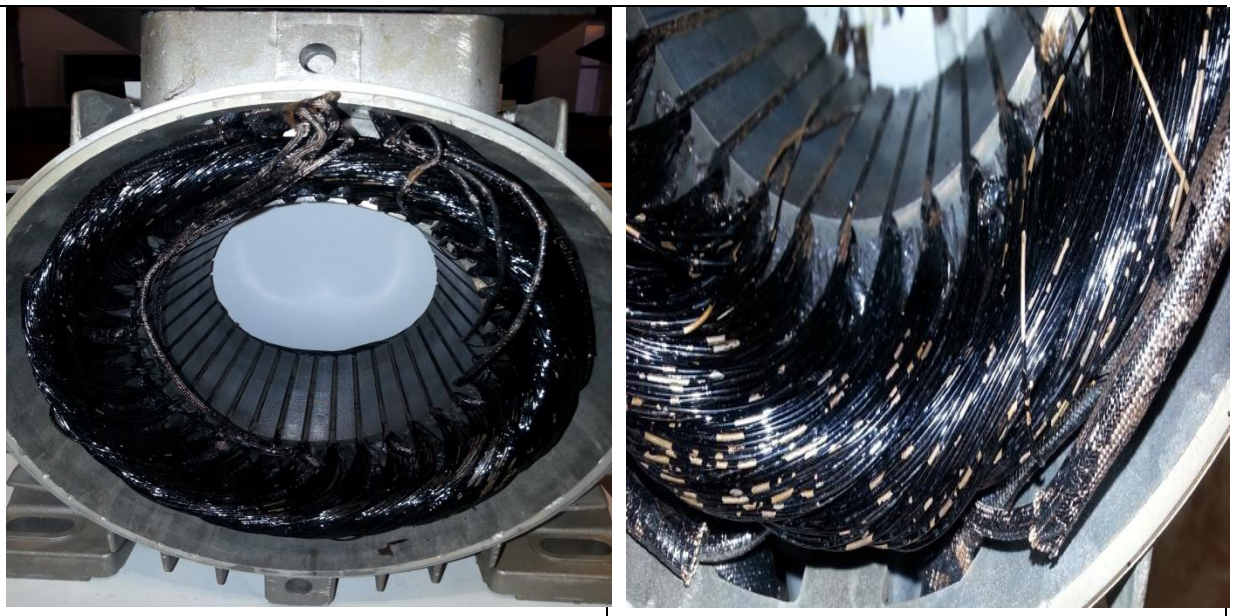

Abbildung 11.6: Seitenansicht der nicht getränkten Wicklungen nach elektrischen Bestromung bei 30. Vorgang

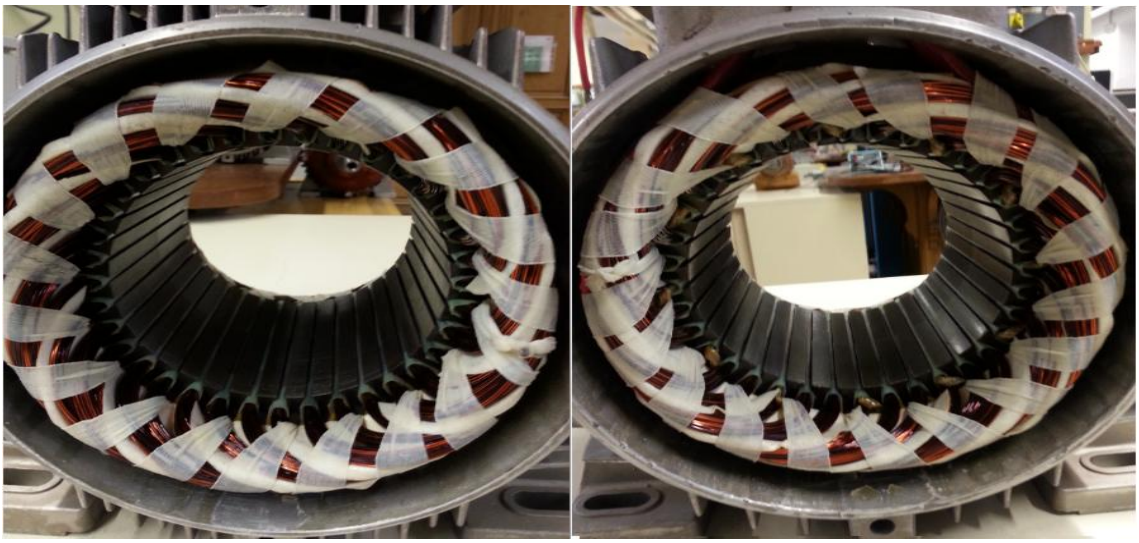

Abbildung 11.7:Seitenansicht der getränkten Wicklungen vor dem Alterung

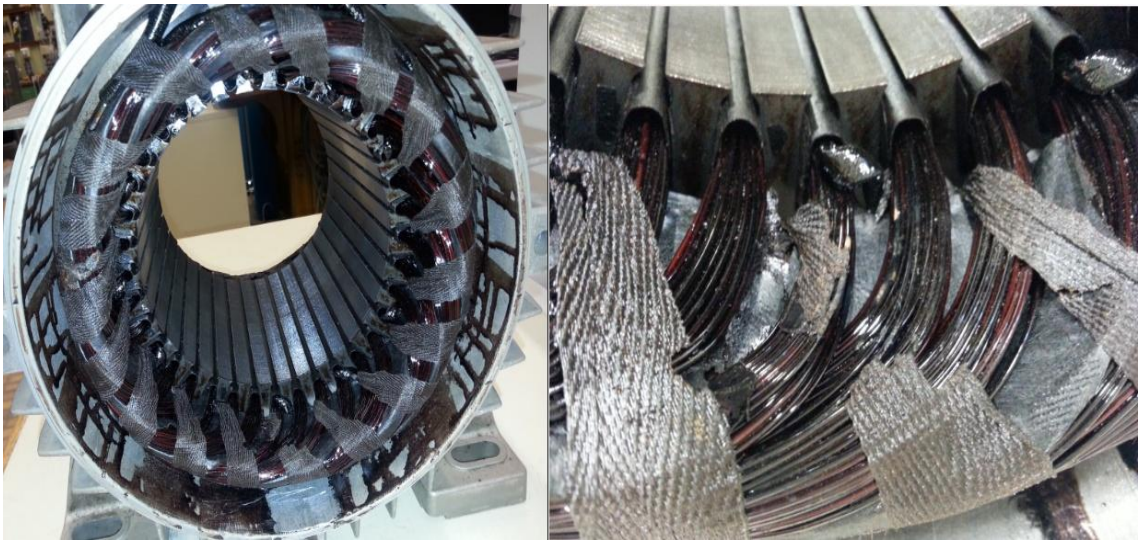

Abbildung 11.8: Seitenansicht der getränkten Wicklungen nach dem gealteten Wicklungen

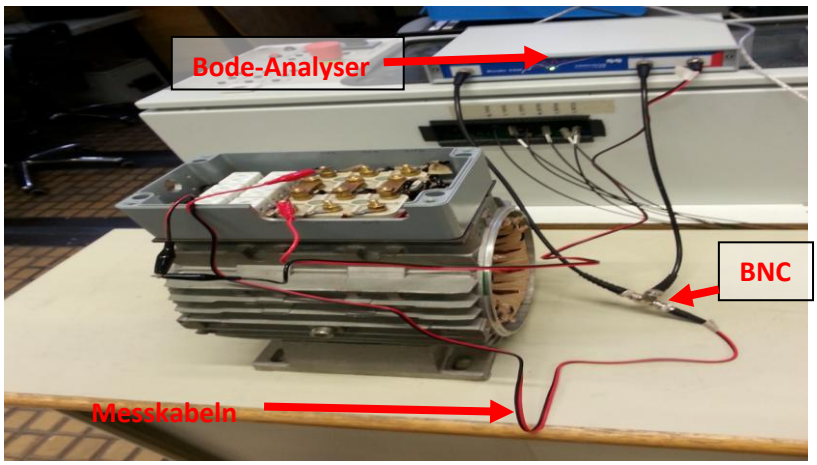

Abbildung 11.9: Abbildung der Gain-Versuch der ASM

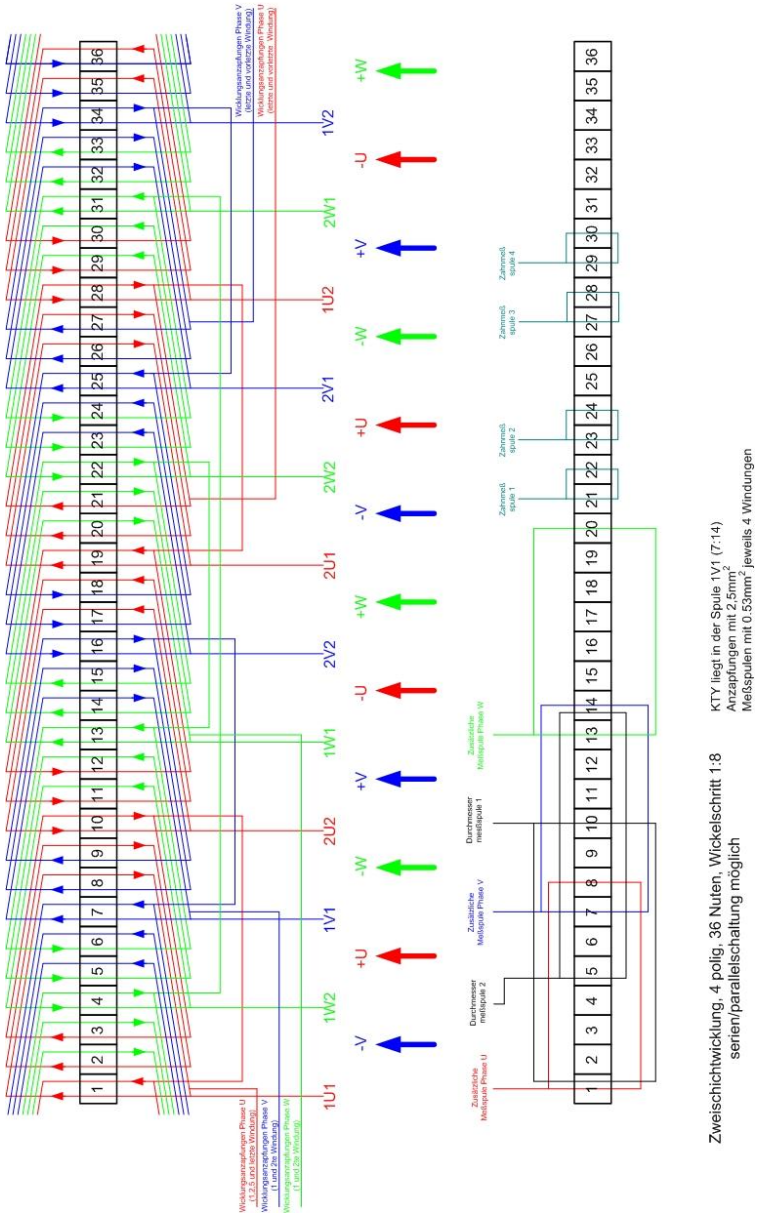

Abbildung 11.10:Wicklungsschema der verwendeten Versuchsmaschine