

Kai Chmieleffski, Fachhochschule Frankfurt am Main

# Entwickeln eines Messverfahrens zum Erfassen von nichtlinearen Effekten und des Sättigungsverhaltens bei Leistungsdrosseln als Netzimpedanznachbildung für EN 61000-3-3 Flickermessungen

**Bachelorarbeit**

Wissenschaftliche Arbeit

zur Erlangung des akademischen Grades Bachelor of Engineering

1. Gutachter: Professor Dr.-Ing. Sven Kuhn  
2. Gutachter: Professor Dr. Manfred Jungke  
vorgelegt von: Kai Chmieleffski  
vorgelegt am: 10.02.2020

## Einleitung

Die Firma ZES ZIMMER Electronic Systems GmbH (im Folgenden „ZES“ genannt) ist ein mittelständisches High-Tech-Unternehmen für innovative, zukunftsweisende Präzisionsmesstechnik für elektrische Leistung, Harmonische und Flicker.

Für Prüfsysteme nach EN61000-3-3 wird eine Netzimpedanznachbildung benötigt, die nach Norm unter anderem eine Induktivität enthält, die jedoch nicht als Induktivität beschrieben ist, sondern als Blindwiderstand bei 50 Hz. Im Fall von Anlaufströmen und bei Stromspitzen könnte eine reale Spule mit Eisenkern beispielsweise in die Sättigung geraten.

Im Vertiefungsprojekt (Chmieleffski, 2019-11) wurde bereits der Auswahlprozess der entsprechenden Induktivitäten beschrieben. In dieser Arbeit soll ein Messverfahren zur Untersuchung des nichtlinearen Verhaltens der Induktivitäten über einen großen Strombereich erarbeitet werden. Dies dient einerseits der abschließenden Beurteilung der ausgewählten Induktivitäten, des Weiteren ermöglicht ein solches Verfahren eine schnelle Beurteilung neuer Induktivitäten, welche für kommende Gerätegenerationen eingesetzt werden könnten. Es wird daher angestrebt einen einfachen Versuchsaufbau zu entwickeln, welcher eine schnelle aber dennoch präzise Beurteilung des Prüflings erlaubt.

## Vorwort

Als das Thema dieser Arbeit vorgeschlagen wurde war ich anfangs irritiert, wirkte es doch wie eine sehr überschaubare Aufgabenstellung, welche vom Umfang her nicht für eine Bachelorarbeit angemessen erschien – So soll doch lediglich eine Spule ausgemessen werden.

Nach verschiedenen Unterhaltungen mit Ingenieuren der Firma ZES ergab sich dann aber recht schnell der Eindruck, dass die Thematik weit tiefer greifend ist, als es erst den Anschein hat. Dies motivierte mich sehr, mich intensiv mit der Materie zu befassen, nicht zuletzt um das bereits in der Zusammenfassung genannte Projekt Netzimpedanznachbildung zu einem erfolgreichen Abschluss zu verhelfen.

An dieser Stelle möchte ich mich herzlichst bedanken bei:

**Dr. Conrad Zimmer**, Geschäftsführer, für sein Vertrauen in meine Fähigkeiten und das hervorragende Arbeitsklima, welches nicht zuletzt durch seine stets freundliche, zuvorkommende Art der Geschäftsleitung zuzuschreiben ist,

**Thomas Jäckle**, ppa., für seine Unterstützung bei der Themenfindung und die guten Tipps in Bezug auf die Herangehensweise an diverse Themenbereiche,

**Dipl.-Ing. Mario Schönecker-Baußmann** für die Betreuung meiner Arbeit in der Firma ZES, die guten Fachgespräche und seine Hilfe bei der Ermittlung verschiedener Arbeitsmethoden,

**Dipl.-Bioinf. (FH) Aaron Ruhs und B.Eng. (FH) Georg Schneider** fürs Korrekturlesen und die anhaltend guten Tipps,

sowie meiner **Lebensgefährtin Kelly** und meiner **Mutter Sabine** für die stete Unterstützung und anhaltende Hilfe.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
2	Theoretische Betrachtung einer Spule .....	4
2.1	Reale Spulen .....	5
2.1.1	Der Leitungswiderstand $R_{CU}$ .....	5
2.1.2	Die parasitäre Kapazität $C_{Wind}$ .....	7
2.2	Spulen mit magnetisierbarem Kernmaterial .....	8
2.2.1	Ummagnetisierungsverluste (Hysterese).....	9
2.2.2	Wirbelstromverluste (Eddy Currents) .....	10
2.2.3	Die Sättigung und das Verhalten von Luftspalten .....	10
3	Methodik .....	13
4	Ergebnisse und Interpretation.....	18
4.1	Vorüberlegungen .....	19
4.2	Praktische Umsetzung des Messaufbaus.....	22
4.3	Erfassen der Sättigungscharakteristik .....	24
5	Zusammenfassung.....	26
6	Nachwort .....	28
7	Anhang .....	31
	A1: Python Script zur Erfassung der Messwerte aus dem LMG .....	31
	A2: Beispiel einer Datei mit Messwerten (Auszug) .....	33
	A3: Octave Script zur Auswertung der Messwerte (Beispiel) .....	34
	A4: Überlegungen zum Feinabgleich.....	36
	Sonstige Anhänge .....	39

## Abkürzungs- und Fachwortverzeichnis

<b><u>Abkürzung</u></b>	<b><u>Beschreibung</u></b>
EMI	<b>Electromagnetic Interference</b> , siehe EMV
EMV	<b>Elektromagnetische Verträglichkeit</b> (engl.: EMI) beschreibt die Robustheit eines Gerätes gegen Störungen von außen sowie das Aussenden von Störungen durch das Gerät selbst.
Ferrit	Ein keramischer, magnetischer aber meist elektrisch schlecht leitender Werkstoff, welcher durch Sintern in Form gebracht wird
Geom.	Geometrisch. Die vorherige Aussage bezieht sich auf eine geometrische Angabe, etwa die Länge einer Spule.
Shunt	Ein (meist niederohmiger) Widerstand, welcher zur Strommessung in einen Stromkreis eingebracht wird.
Trafoblech	Blechmaterial für die Herstellung von Eisenpaketen, bestehend hauptsächlich aus Eisen und Silizium

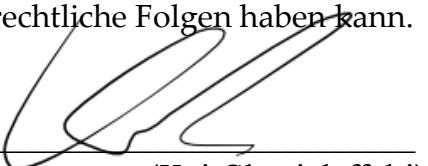
## Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich diese wissenschaftliche Arbeit selbstständig, ohne Hilfe Dritter und ohne andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt zu haben verfasst habe. Alle den benutzten Quellen wörtlich oder sinngemäß entnommenen Stellen sind als solche einzeln kenntlich gemacht.

Diese Arbeit ist keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht worden.

Ich bin mir bewusst, dass eine falsche Erklärung rechtliche Folgen haben kann.

Frankfurt am Main, den 10.02.2020



(Kai Chmieleffski)

# 1 Einleitung

Die Prüfung nach IEC/EN61000-3-3 ist eine wichtige Prüfung, welche ein Hersteller zum Erlangen einer Zertifizierung eines elektrisch betriebenen Gerätes für die Nutzung am öffentlichen Stromnetz durchführen kann. In dieser Norm, häufig auch als „Flickernorm“ betitelt, finden sich die Grenzwerte für Langzeit- und Kurzzeitflickerwerte welche elektrisch betriebene Geräte einhalten sollen.

Um diese Grenzwerte einzuhalten ist es erforderlich, die Flickerwerte mit einem adäquaten Messgerät, einem sogenannten Flickermeter, zu erfassen. Dieses benötigt zusätzlich einen Laboraufbau zur Nachbildung der Netzimpedanz und idealerweise eine elektronische Wechselspannungsquelle, um nicht unbeabsichtigte Einwirkungen des Netzflickers in die Messung einfließen zu lassen. Testaufbauten wie eben beschrieben gehören mit zum Portfolio der ZES ZIMMER Electronic Systems GmbH. Im Sinne einer Anpassung der bisherigen Produkte an den aktuellen Stand der Normen ist es nötig, auf geänderte Anforderungen dieser Normschriften ein zu gehen und eine regelmäßige Produktpflege zu betreiben.

Leider zeigte sich in der Vergangenheit eine gewisse Unsicherheit bei der Auslegung der Normen innerhalb des Normenkomitees, weswegen die Vorschriften für den Messaufbau, insbesondere der Netzimpedanznachbildung, eher vage formuliert sind.

Herr Thomas Jäckle der ZES GmbH ist Ausschussmitglied des entsprechenden Gremiums, wodurch bekannt wurde, dass auch in Zukunft nicht damit gerechnet werden kann, dass eine dauerhafte Einigkeit über die Auslegungsempfehlungen für die Messapparatur erwartet werden darf.

Aus diesem Grunde scheint es angebracht, nach Möglichkeiten zu suchen, zukünftig schneller auf Änderungen der entsprechenden Schriften reagieren zu

können, die Entwicklungszeit zu reduzieren und die Kosten für umfangreiche Versuchs- und Musteraufbauten auf einem Minimum zu halten.

Um dieses Ziel zu erreichen ist es sinnvoll, einen einfachen Versuchsaufbau zu entwerfen, welcher das Messen und Auswerten von Spulenmustern auf schnelle und einfache Art ermöglicht und eine Auswertungsmethodik beinhaltet, welche die Beurteilung der Auswirkungen des Sättigungsverhaltens von ausgewählten Musterspulen auf das Messergebnis aufzeigt.

Zur Verdeutlichung der Relevanz dieses Projektes soll eine kurze Erläuterung der Thematik „Flicker“ sowie das Messverfahren umrissen werden.

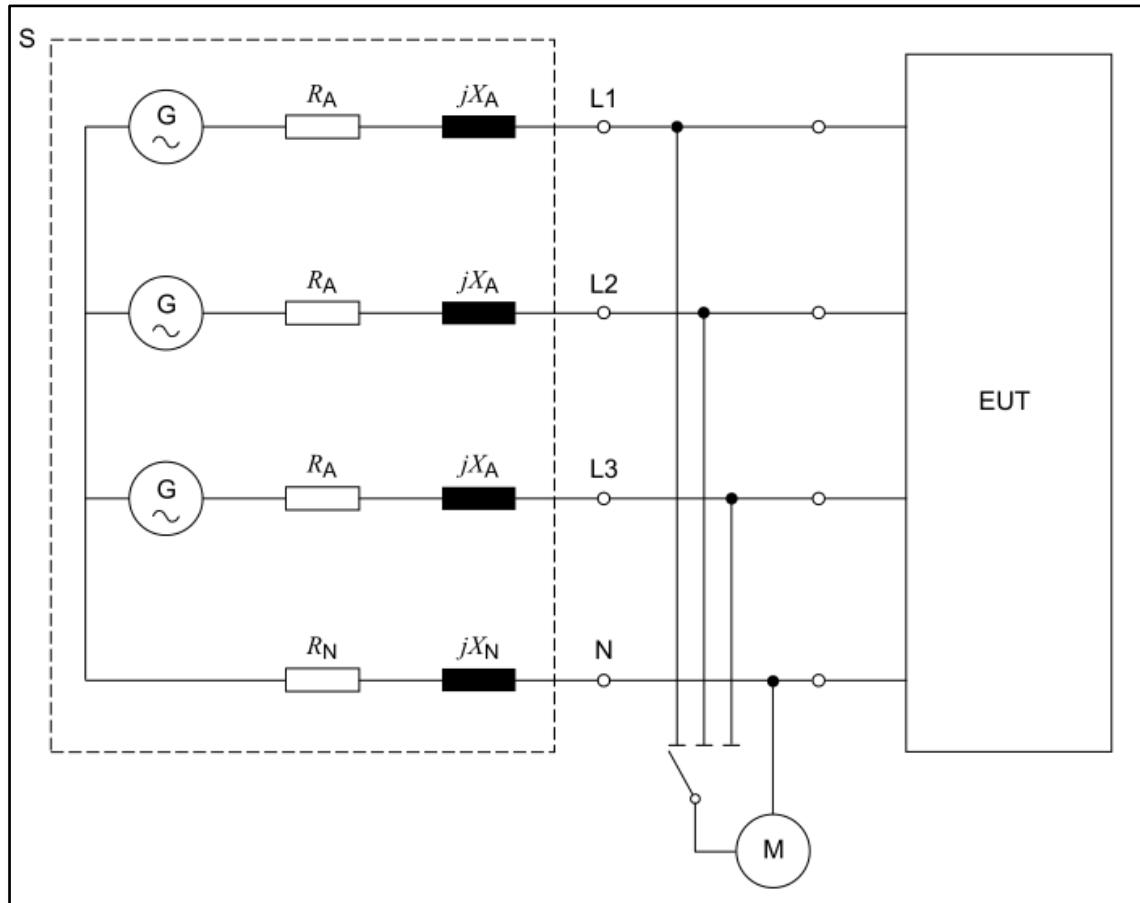


Abbildung 1 - Schematischer Aufbau der Flickermessung<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Bildquelle: IEC61000-3-3 ed. 3.0, 2013, Figure 1, Seite 17

Als Flicker (engl.: Flackern) werden kurzzeitige, mitunter starke, Spannungsschwankungen bezeichnet, welche natürlicherweise im Stromnetz vorkommen. Diese entstehen beispielsweise durch An-/Abschaltvorgänge von großen Industriemaschinen, aber auch durch Stromspitzen vieler kleiner Verbraucher wie etwa von Schweiß- oder Kühlgeräten.

Dieses „Flackern“ kann vom Menschen durch die Betrachtung von ungeregelten Leuchtmitteln, wie etwa einer regulären Glühfadenlampe, wahrgenommen werden und entsteht durch Spannungsabfälle, welche über die Leitungsimpedanzen des Stromnetzes bei hohen Impulsströmen entstehen, sodass eine sichtbare Reduktion der Leuchtkraft auftritt<sup>2</sup>. Diese Störungen können mittels des in

Abbildung 1 gezeigten Aufbaus gemessen werden. Der Spannungsabfall tritt über die Leitungsimpedanzen  $R_x + jX_x$  auf, welche vom Flickermeter „M“ erfasst werden.

Im Rahmen der immer weiter steigenden Anforderungen an Energieeffizienz, der Qualität des Stromnetzes und den gestiegenen Anforderungen zur Verbesserung der EMV ist es zu erwarten, dass die Grenzwerte für Flicker auch zukünftig eher enger als weiter spezifiziert werden. Entsprechend steigt die Wichtigkeit dieser Beurteilungen sukzessive an, weswegen der Bedarf an derartigen Mess- und Prüfständen auch in Zukunft steigen wird. Ein Ansatz um schnell und methodisch Anpassungen an die entsprechenden Normen vorzunehmen ist daher von essentieller Wichtigkeit.

---

<sup>2</sup> Da  $P = (U^2 / R)$  gilt, geht die Spannungsänderung quadratisch in die aufgenommene Leistung (und damit auch in der abgegebenen Lichtleistung) eines ungeregelten Leuchtmittels ein.

## 2 Theoretische Betrachtung einer Spule

Bevor mit dem Messen der Spulenmuster begonnen werden kann, ist es notwendig, einige Vorüberlegungen zu starten um zu verstehen, welche für den vorliegenden Verwendungszweck relevanten Charakteristika einer Spule existieren und wie diese sich auf die Kennlinie des Bauteils bei verschiedensten Betriebsparametern auswirken können. Dies soll im Folgenden ausgearbeitet werden.

Eine Spule kann auf verschiedene Arten aufgebaut sein. Grundsätzlich muss unterschieden werden zwischen Luftspulen und Spulen, welche auf einem (magnetisierbaren) Kern aufgebracht sind.

Da Luftspulen sich grundsätzlich eher wie ideale Induktivitäten verhalten ist ein Sättigungsvorgang hier eher nicht zu erwarten. Durch außenliegende Metallteile, etwa vom Gehäuse oder dem Befestigungsmaterial der Spulen, käme es allerdings zu, vom Streufeld der Induktivitäten erzeugten, magnetischen Flüssen durch besagte Metallteile, weswegen sich grundsätzlich gegen diese Bauform entschieden wurde.

Es wird daher hier nur auf Eisenkernspulen eingegangen. Die Grundsätzlichen Wirkprinzipien von Magnetfeldern sowie das Verhalten von idealen Spulen werden hierbei als bekannt angenommen.

## 2.1 Reale Spulen

Um eine Eisenkernspule zu analysieren ist es notwendig, die für die hier betrachtete Anwendung relevanten Störgrößen zu betrachten. Diese ergeben sich aus dem Ersatzschaltbild einer realen Spule, wie in Abbildung 2 dargestellt.

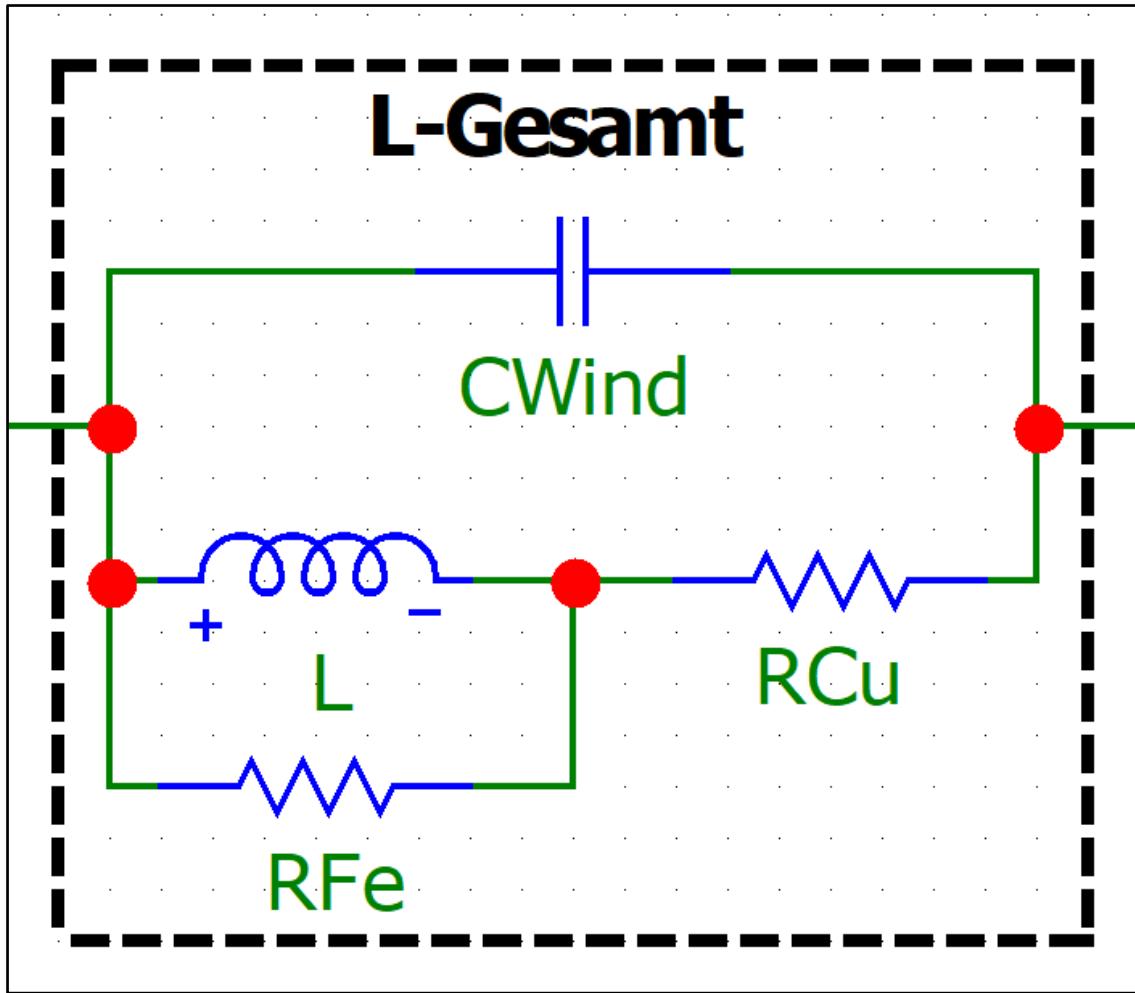


Abbildung 2 - Prinzipschaltbild einer realen, verlustbehafteten Spule

### 2.1.1 Der Leitungswiderstand $R_{Cu}$

Ein beliebiger Leiter ändert seinen Widerstand in Abhängigkeit von seiner Länge und seinem Durchmesser. Verlängert sich der Leiter so steigt der Widerstand, bei einer Verkürzung verringert er sich entsprechend, aufgrund des kürzeren bzw. längeren Elektronenwegs. Invers verhält es sich beim Leiterquer-

schnitt. Wird dieser vergrößert, so verringert sich der Widerstand, da eine größere Fläche für den Elektronenfluss zur Verfügung steht.

Der Leitungswiderstand eines Drahtes berechnet sich entsprechend aus der Länge des Leiters, dem Drahtquerschnitt und einem Faktor, dem spezifischen Widerstand des Drahtmaterials. In folgenden Kapiteln wird der Drahtwiderstand aufgrund der Ausführung mit Kupferdraht weiterhin mit  $R_{CU}$  bezeichnet, für die folgende Betrachtung ist allerdings  $R_{Draht}$  gewählt, da diese Betrachtung für alle Materialien gültig ist.

Es gilt  $R_{Draht} = \rho \frac{l}{A}$  mit dem spezifischen Widerstand  $\rho$  in  $\Omega \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$ , der Drahlänge  $l$  in m und dem Drahtquerschnitt  $A = 0.25 \cdot \pi \cdot d^2$  ( $d$  = Drahdurchmesser) in mm. Dieser Widerstand ist zudem stark temperaturabhängig. Es gilt

$$\Delta R_{Draht} = \frac{\Delta \vartheta \cdot \alpha \cdot R_{CU}}{K} \quad (1)$$

mit dem materialspezifischen Temperaturkoeffizienten  $\alpha$  (in  $K^{-1}$ ). Dieser beträgt bei Kupfer  $3,93 \cdot 10^{-3} \cdot K^{-1}$ .

Des Weiteren tritt im Wickeldraht ein Phänomen auf, welches unter dem Begriff des Skin-Effekts bekannt ist. Bei hohen Frequenzen tritt eine Stromverdrängung durch die Felder von Wirbelströmen auf, wodurch der effektiv genutzte Leiterquerschnitt kleiner als der tatsächliche Querschnitt ist. Dieser Effekt tritt erst bei Frequenzen weit über den für diese Anwendung notwendigen signifikant auf, weshalb er bei den hier zur Anwendung kommenden Frequenz von 50 Hz nicht weiter betrachtet wird - die äquivalente Leitschichtdicke in Kupfer beträgt laut (Nührmann, 1998) 9.38 mm, was weitaus größer als der verwendete Drahtquerschnitt ist.

### 2.1.2 Die parasitäre Kapazität $C_{Wind}$

Die Windung einer Spule besteht aus mehreren parallel und häufig auch aufeinander gelegenen Kupferdrähten, welche in sich geringe Kapazitäten bilden. Diese Kapazitäten werden auch parasitäre Kapazitäten,  $C_p$ , genannt. Da es sich um eine unendlich große Anzahl von sehr kleinen Kondensatoren handelt liegt es nahe, diese über die komplette Windung zu approximieren. Dennoch ist es schwierig, diesen sehr kleinen kapazitiven Anteil korrekt zu berechnen, weswegen zu dessen Bestimmung regulär ein experimenteller Ansatz Anwendung findet.

Die parasitäre Kapazität bildet mit den induktiven und resistiven Anteilen einen Parallelschwingkreis mit einer spezifischen Resonanzfrequenz  $f_{Res}$ .

$$f_{Res} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad (2)$$

Ist diese bekannt, etwa durch das Datenblatt oder eine Messung, so kann auf die parasitäre Kapazität durch umformen von Gleichung (2) geschlossen werden:

$$2\pi \cdot f_{Res} = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \equiv (2\pi \cdot f_{Res})^2 \cdot L = \frac{1}{C} \equiv C = \frac{1}{(2\pi \cdot f_{Res})^2 \cdot L} \quad (3)$$

Eine Abschätzung ergibt, dass der Einfluss der Kapazität bei den vorliegenden Spulen (unter 30 Windungen mit sehr geringen Abständen) erst in sehr hohen Frequenzbereichen zum Tragen kommt, in welchen die Kernverluste bereits übermäßig stark auftreten. Es gelang zudem nicht, mit den vorliegenden Messapparaturen (Frequenzbereich bis 200 kHz) die Resonanzfrequenz zu bestimmen, was diese Abschätzung unterstützt. Daher wird der Einfluss dieser parasitären Größe vernachlässigt.

## 2.2 Spulen mit magnetisierbarem Kernmaterial

Häufig ist die mit kernlosen Spulen erreichbare Induktivität für den Anwendungsfall nicht ausreichend, oder aber die resultierende Spule würde unverhältnismäßig groß werden. Zusätzliche Probleme können durch die wesentlich höheren Windungszahlen bei kernlosen Spulen durch den starken Anteil des Leiterwiderstandes entstehen, da dieser temperaturabhängig ist und entsprechend die thermische Stabilität der Spule negativ beeinflusst. Zusätzlich erhöht sich entsprechend auch der Gleichstromwiderstand.



Abbildung 3 - Eisenkernspule mit Luftspalt

Aus diesem Grunde setzt man in vielen Fällen Induktivitäten mit Kernen aus magnetisierbarem Material ein, häufig handelt es sich dabei um geschichtete Platten aus „Trafoblech“, um verpresste oder verklebte Eisenpulverkerne oder um gesinterte Kernblöcke aus Ferritmaterialien. Für den vorliegenden Anwendungsfall, hohe Ströme bei mittleren bis kleinen Induktivitäten und einer Frequenz von 50 Hz, werden Spulen mit Kernen aus geschichteten Blechmaterialien verwendet. Abbildung 3 zeigt eine solche Spule mit zusätzlichem Luftspalt (gelb markiert).

Diese Kerne erhöhen die erreichbare Induktivität bei Verringerung der Baugröße, fügen allerdings eine weitere nichtlineare Komponente in das Ersatzschaltbild der Spule, in Form eines der Induktivität parallel geschalteten resistiven Anteils  $R_{Fe}$ , ein (Siehe Abbildung 2). Die Berechnung des Leitungswiderstands und der parasitären Kapazitäten ändern sich dadurch nicht, wohl aber das Verhalten der Induktivität, welche auch als komplexe Impedanz betrachtet werden kann:

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad (4)$$

Es wird ersichtlich, dass die Parallelschaltung des induktiven Blindwiderstandes  $X_L$  und der Eisenverluste  $R_{Fe}$  bei steigenden Kernverlusten (= sinkendem  $R_{Fe}$ ) gemäß Formel (4) zu einer Verringerung der Impedanz führt.

Der resistive Anteil  $R_{Fe}$  besteht dabei aus den einzelnen Verlustfaktoren des Kernmaterials, welche sich mitunter auch gegenseitig beeinflussen und teilweise aufheben können. Im Folgenden werden die entsprechenden Verluste näher beschrieben.

### 2.2.1 Ummagnetisierungsverluste (Hysterese)

Ummagnetisierungsverluste sind auf die Trägheit der Elementarmagnete zurückzuführen. Wird ein magnetisches Material mit einem wechselnden Magnetfeld beaufschlagt so versuchen die Elementarmagnete diesem Feld möglichst schnell zu folgen. Die Energie, die für diese Neuausrichtung aufgebracht werden muss, wird in Verlustwärme umgewandelt. Weichmagnetische Stoffe sind hier, aufgrund der geringeren nötigen Feldstärken für die Neuanordnung der Elementarmagnete, verlustärmer als hartmagnetische.

### **2.2.2        Wirbelstromverluste (Eddy Currents)**

Magnetisierbare Materialien, welche von magnetischen Strömen durchflossen werden, bilden unkontrollierte, ungerichtete Leckströme aus, welche sich kreisförmig im Material bewegen (entsprechend die Bezeichnung „Wirbelstrom“). Diese ungerichteten Ströme induzieren im Material Spannungen, welche gemeinsamer mit den Wirbelströmen im Kern Verlustleistung in Form von Wärme erzeugen. Zur Reduzierung dieser Verluste ist es üblich, neben der Wahl eines Blechmaterials mit hohem spezifischen Widerstand, isolierende Schichten zwischen den einzelnen Blechschichten des Eisenpakets aufzubringen. So verringert sich der „Leiter“querschnitt und die fließenden Ströme treffen entsprechend auf höhere Leiterwiderstände, was den Strom begrenzt und die Verluste verringert.

### **2.2.3        Die Sättigung und das Verhalten von Luftspalten**

Eine sehr wichtige, meist unerwünschte Eigenschaft von Spulen mit magnetisierbaren Kernmaterialien ist die Sättigung. Sie ist vorrangig dafür verantwortlich, dass der Einsatz von Eisenkernspulen in der Netzimpedanznachbildung häufig kritisch betrachtet wird, bringt sie doch eine spontan eintretende Veränderung des Nutzsignals mit sich, welche die Kennwerte stark außerhalb der Spezifikation treiben könnte.

Ab einer materialspezifischen Magnetisierung, also ab einer bestimmten magnetischen Flussdichte ausgelöst durch einen Strom durch die Spule, ist es dem Kern nicht weiter möglich die magnetische Leitfähigkeit des Materials und damit den magnetischen Fluss aufrecht zu erhalten.

Die in ihm gespeicherte Energie hat damit ihren Maximalpunkt erreicht, jede weitere hinzugeführte Energie beeinträchtigt die Charakteristik der Spule. Entsprechend fällt die Induktivität der Spule im Bereich der Sättigung rapide ab,

der Strom steigt stark an und wird lediglich noch durch den Leitungswiderstand  $R_{Cu}$  begrenzt.

Dies ist ein Zustand, welcher in den meisten Anwendungen zu vermeiden ist, so auch in der auszulegenden Spule für die Netzimpedanznachbildung.

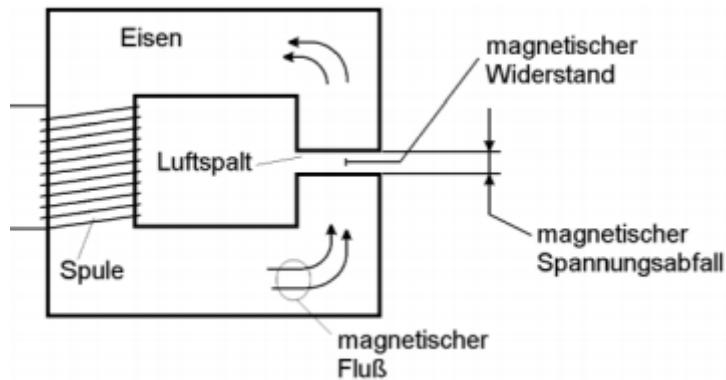


Abbildung 4 - Schematische Darstellung einer Eisenkernspule mit Luftspalt<sup>3</sup>

Eisenkernspulen können komplexe Magnetsysteme mit mehreren Knoten und Maschen darstellen, je nachdem, wie der Eisenkern aufgebaut ist, was Unterschiede in der Berechnungsgrundlage für die Spulenparameter hervorruft und entsprechend viele Möglichkeiten bietet, die Sättigungscharakteristik eines induktiven Bauelementes in Grenzen anzupassen. Zusätzlich ist es möglich, einen Luftspalt einzufügen (siehe Abbildung 4), welcher die Charakteristik der fertigen Spule mitunter stark beeinflussen kann.

<sup>3</sup> Abbildung: (Matthes), Elektronik für Embedded Systems (neue Version), Teil 1, Abschnitt 4, Seite 7, Abb. 1.4.5

Trotz dieser Komplexität ist es möglich, die Induktivität der Spule mit einer grundsätzlichen Formel, bestehend aus der Windungszahl und einem Faktor, zu beschreiben:

$$L = N^2 \cdot \Lambda \quad (5)$$

Der Faktor Lambda ( $\Lambda$ ) entspricht dabei dem magnetischen Leitwert, dem Kehrwert des gesamten magnetischen Widerstandes  $R_m$  des magnetischen Kreises. Es ergibt sich somit:

$$\Lambda = \frac{1}{R_m} = \frac{\Phi}{\Theta} = \sum \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot A}{l} \quad (6)$$

Um den magnetischen Widerstand adäquat bestimmen zu können muss dabei die mittlere Wegstrecke ( $l$ ) der magnetischen Feldlinien sowie der Querschnitt ( $A$ ) der dabei durchwanderten Fläche bekannt sein. Sollten Luftspalte vorhanden sein, so sind diese als zusätzlicher Widerstand, diesmal allerdings ohne den Faktor  $\mu_r$ , in Reihe zum Eisenwiderstand anzusehen. Ebenso verhält es sich mit sämtlichen weiteren magnetischen Widerständen, welche sich im magnetischen Kreis befinden, wie etwa durch Streufelder eingefangene Metallteile der Befestigung oder des Gehäuses.

Es werden zwei entscheidende Dinge deutlich:

- Die Größe des Luftspaltes wirkt sich maßgeblich auf die Induktivität aus.
- Ein größerer Luftspalt führt zu einer verbesserten Strombelastbarkeit.

Es wird ersichtlich, dass die Auswirkung des Luftspaltes gravierend sind – Die Sättigungsmagnetisierung steigt an, wodurch die Spule einen höheren Strom verträgt, bevor ihre Kennwerte sinken, gleichzeitig werden mehr Windungen benötigt, da durch das Einfügen des Luftspaltes die Induktivität verringert wird. Es handelt sich bei den Spulen also um einen gut abgestimmten Kompromiss.

### 3 Methodik

Um die angeführten Ziele zu erreichen ist es notwendig, eine klare und präzise Methodik zu entwickeln, um ein Messverfahren zur Erfassung der nichtlinearen Effekte der Muster zu erhalten. Dabei ist es notwendig das Verhalten der Muster bei verschiedenen Betriebszuständen zu analysieren, da die angedachte Verwendung keinen festen Betriebszustand sondern nur parametrische Grenzen vorschreibt. Entsprechend müssen die Messungen umfangreich und möglichst mit vollständiger Abdeckung aller möglichen Betriebszustände durchgeführt werden. Zu beachten ist dabei, dass die vorherrschenden Temperaturen während der Messungen ebenfalls aufgenommen werden müssen, um einen eventuellen Drift aufgrund veränderter Umgebungsparameter zu erkennen. Dies ist insbesondere notwendig, da davon ausgegangen wird, dass die Aufnahme der Messungen nicht innerhalb eines Tages abgeschlossen sein wird, weswegen mit schwankenden thermischen Effekten zu rechnen ist. Alle folgenden Messergebnisse haben diese bereits berücksichtigt, sofern nötig.

Um die genannte Abdeckung der Betriebszustände zu erreichen wird ein Versuchsaufbau entwickelt, welcher die Einflüsse variierender Ströme auf die Muster erfassen kann und ein Octave Script wird geschrieben, um die erfassten Rohdaten auszuwerten.

Zudem werden 10 Musterspulen gemessen, um Schwankungen in der Fertigungsqualität zu erfassen. Zusätzlich liegen drei unvergossene Muster vor, um etwa die Luftspaltgrößen zu variieren und Experimente bezüglich der maximal möglichen Abweichungen zu machen.

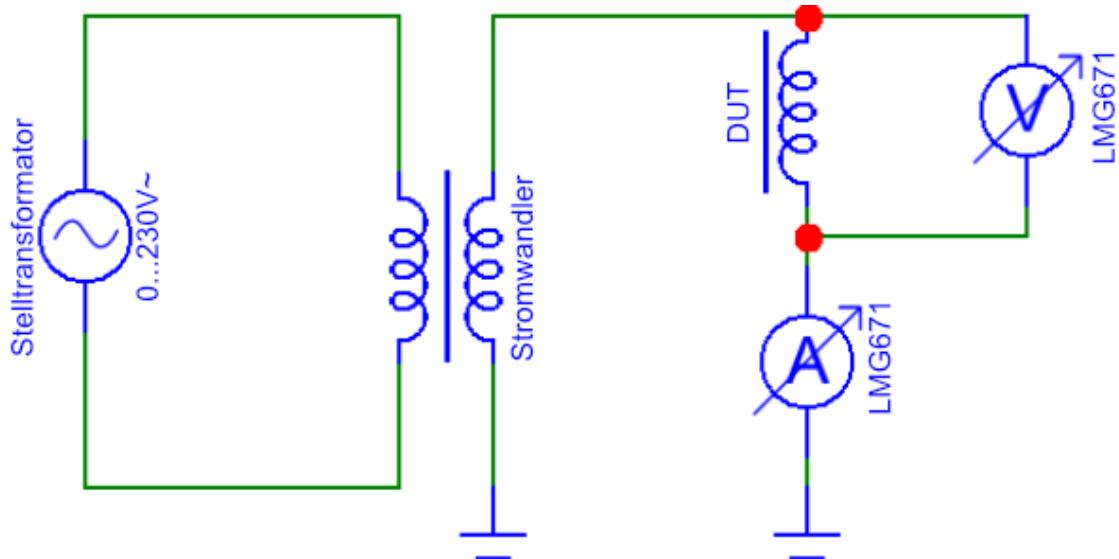


Abbildung 5 - Messaufbau zur Aufnahme des Verhaltens über den Strom

Das eigentliche Ziel des analytischen Teils dieser Arbeit wird in der Aufnahme des Sättigungsverhaltens verschiedener Spulenmuster liegen. Hierfür wird der in Abbildung 5 gezeigte Messaufbau genutzt werden. Der gezeigte Stromwandler<sup>4</sup> ist ein selbst bewickelter 360VA Ringkerンtransformator, bei welchem eine neue Sekundärwicklung mit dickem Draht aufgebracht wurde. Es entsteht somit ein Transformator mit einem Übersetzungsverhältnis von 1:20. Als Messgerät soll ein hauseigenes Leistungsmessgerät verwendet werden. Die Verwendung der Baureihe LMG6x1 empfiehlt sich an dieser Stelle, da es mit einer A-Kanal Bestückung breitbandig und mit hoher Genauigkeit Signale erfassen kann.

---

<sup>4</sup> Die Bezeichnung „Stromwandler“ ist hier nicht als Messwandler zur Strommessung zu verstehen, sondern als Transformator, welcher nicht zur Spannungs- sondern zur Stromanpassung gedacht ist.



Abbildung 6 - ZES Leistungsmessgerät Typ LMG641

Während der Messung wird mittels des Stelltransformators die Versorgungsspannung für den Stromwandler und damit der durch das Messgerät und die zu messende Spule fließende Strom langsam erhöht. Zeitgleich wird der Spitzenstrom, welcher durch das Muster fließt, auf dem Display des Leistungsmessgerätes beobachtet und die Messung bei  $I_{pk} = 60 \text{ A}$  beendet. Dieser Wert, der weitaus höher liegt als der in der Norm vorgeschriebene Wert von  $I_{pk} = 40 \text{ A}$  wurde gewählt, um sicher zu stellen, dass die Spulen nicht knapp über den vorgegebenen Grenzwerten stark abfallen und so gegebenenfalls Serienstreuungen problematisch werden könnten.

Um eine gute Übersicht über die vorherrschenden Parameter zu erhalten wurde das in Abbildung 7 gezeigte Custom Menu erstellt, welches alle signifikanten Informationen auf einen Blick bereitstellt.

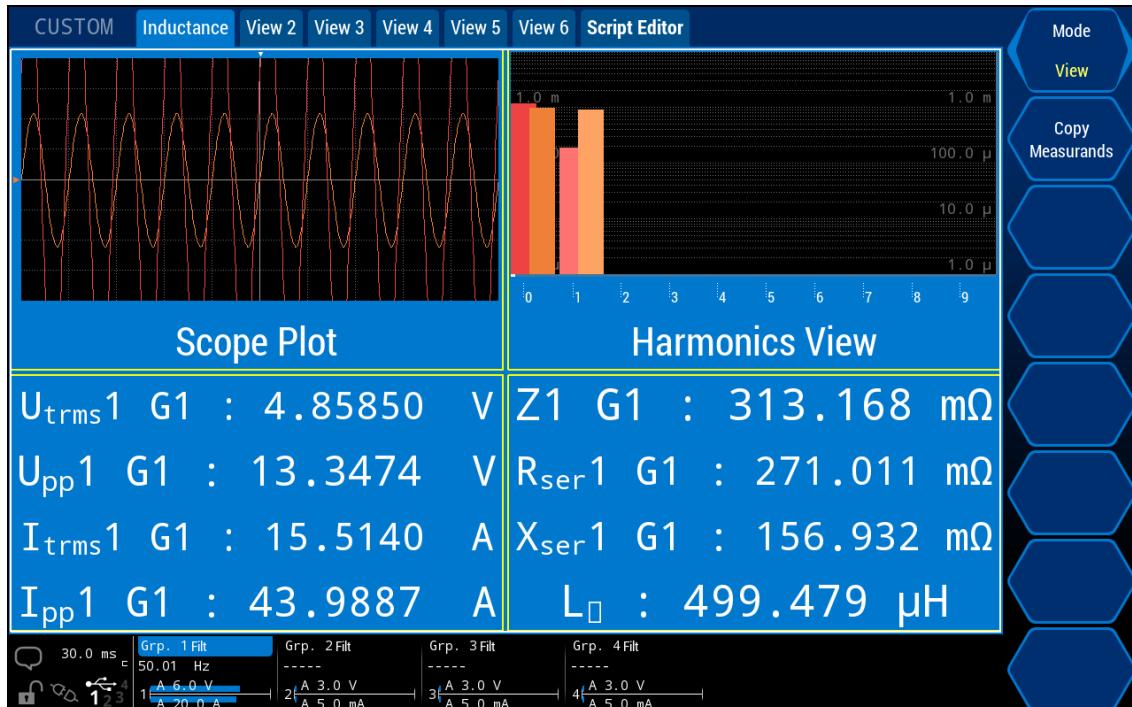


Abbildung 7 - erstelltes Custom Menü

Währenddessen das Messgerät die Werte aufnimmt werden über die Netzwerkschnittstelle mittels eines Python Scripts (Siehe A1: Python Script zur Erfassung der Messwerte aus dem LMG) die Echtzeitwerte aus dem LMG an den PC übertragen und in einer .csv Datei gespeichert. Diese Dateien sind digital beigefügt, ein Beispiel findet sich unter A2: Beispiel einer Datei mit Messwerten (Auszug).

Dort ist ersichtlich, dass neben den Messwerten für Spannung und Strom zusätzlich noch die Wirk- und Blindleistung sowie die entsprechenden Werte nur für die erste Harmonische ( $U_{h1}$ ,  $I_{h1}$ ,  $P_{h1}$ ,  $Q_{h1}$ ), der Serienwiderstand, der Serienblindwiderstand, der Phasenwinkel und die Frequenz aufgenommen werden, wobei die Werte für  $P$ ,  $P_{h1}$ ,  $Q$ ,  $Q_{h1}$ ,  $R_{ser}$  und  $X_{ser}$  vom LMG berechnete Werte sind.

Die Werte für die Harmonischen wurden aufgenommen, um zu überprüfen, ob die vom LMG gelieferten Werte für den Blindwiderstand für diesen Anwendungsfall angewandt werden dürfen, oder ob sie auf eine andere Art ermittelt

werden müssen. Dies ist notwendig, da das Leistungsmessgerät den Blindwiderstand wie folgt berechnet:

$$Z^2 = R^2 + X^2$$

$$X^2 = Z^2 - R^2$$

$$X^2 = Z^2 - \frac{P^2}{I^4}$$

$$X^2 = \frac{U^2}{I^2} - \frac{P^2}{I^4} \quad (7)$$

$$I^4 X^2 = I^2 U^2 - P^2$$

$$I^4 X^2 = S^2 - P^2$$

$$I^4 X^2 = Q^2$$

$$X = \frac{Q}{I^2}$$

Dieser Zusammenhang ist nur für rein sinusförmige Signale gültig, was über die erste harmonische des zu messenden Signals nachgebildet werden kann:

$$X_{[h1]} = \frac{Q_{[h1]}}{I_{[h1]}^2} \quad (8)$$

Ein Gültigkeitsnachweis für verzerrte Signale, wie sie im Stromnetz naturgemäß vorliegen, besteht nicht. Entsprechend muss in einem ersten Test geprüft werden, ob die Werte für  $X_{ser}$  von manuell berechneten Werten aus den Harmonischen von U, I und P gemäß (8) von den aus den breitbandwerten gemäß (7) gewonnenen Werten stark abweichen, oder ob der zu erwartende Messfehler für die Interpretation des Induktivitätsverlaufs toleriert werden kann.

Ein weiterer Aspekt dieser Messung ist die Eigenerwärmung der Spulen. Diese ist bei langsamem Erhöhen auf mehr als den dreifachen Nennstrom der Spulenmuster signifikant, sodass sie vor allem bei der Betrachtung der realen Se-

rienwiderstände bei den Auswertungen der gewonnenen Graphen berücksichtigt werden muss.

Die Verarbeitung der großen Datenmenge geschieht hierbei zur Auswertung am PC mittels Octave (Watson, 1998).

## 4 Ergebnisse und Interpretation

Die Messung der Muster wurde in mehreren Etappen über verschiedene Tage und über verschiedene Iterationsschritte zur Verbesserung des Messaufbaus durchgeführt. So wurde etwa der Stromtransformator mehrfach neu bewickelt um ihn an die gegebenen Lasten anzupassen und die Filterparameter des Leistungsmessgerätes sukzessive verfeinert, um Rauschen und externe Störquellen zu unterdrücken. Hier wurde sich schlussendlich für einen Tiefpass mit Bessel Charakteristik und 2 kHz Grenzfrequenz entschieden, in Kombination mit einem RC Hochpass mit  $f_g = 1\text{Hz}$ , um DC Anteile und hochfrequentes Rauschen aus dem Signal zu filtern. Die Synchronisation wurde mit einer Hysterese von 1 % und einem Low Pass Filter von 100 Hz sowie einem Highpass Filter von 10 Hz auf den Strompfad eingestellt.

Die gewählte Filterung ist zulässig da die zu untersuchenden Verzerrungen, welche von den Sättigungseffekten hervorgerufen werden, in niedrigeren Frequenzbereichen ihr Maximum haben und bei steigender Frequenz rapide abfallen. Hier erwartet man die Auswirkungen der Sättigungseffekte im Bereich der dritten, fünften und siebten Harmonischen, bei einer Filterung ab 2 kHz werden Signale bis zur vierzigsten Harmonischen verlustfrei erfasst.

## 4.1 Vorüberlegungen

Vor der ersten gewerteten Messung musste sichergestellt werden, dass die vom Leistungsmessgerät für den Blindwiderstand angegebenen Werte auch für verzerrte Kurvenformen korrekt sind. Es wurde daher ein Vergleich erstellt, welcher den vom LMG berechneten Blindwiderstand mit manuell berechneten Blindwiderstandsverläufen, erhalten ausschließlich aus den Werten der ersten Harmonischen, darstellt. Gemessen wurden dabei drei verschiedene Muster-spulen um zufällige Ergebnisse zu vermeiden und mehr Beurteilungsmöglichkeiten zu erhalten.

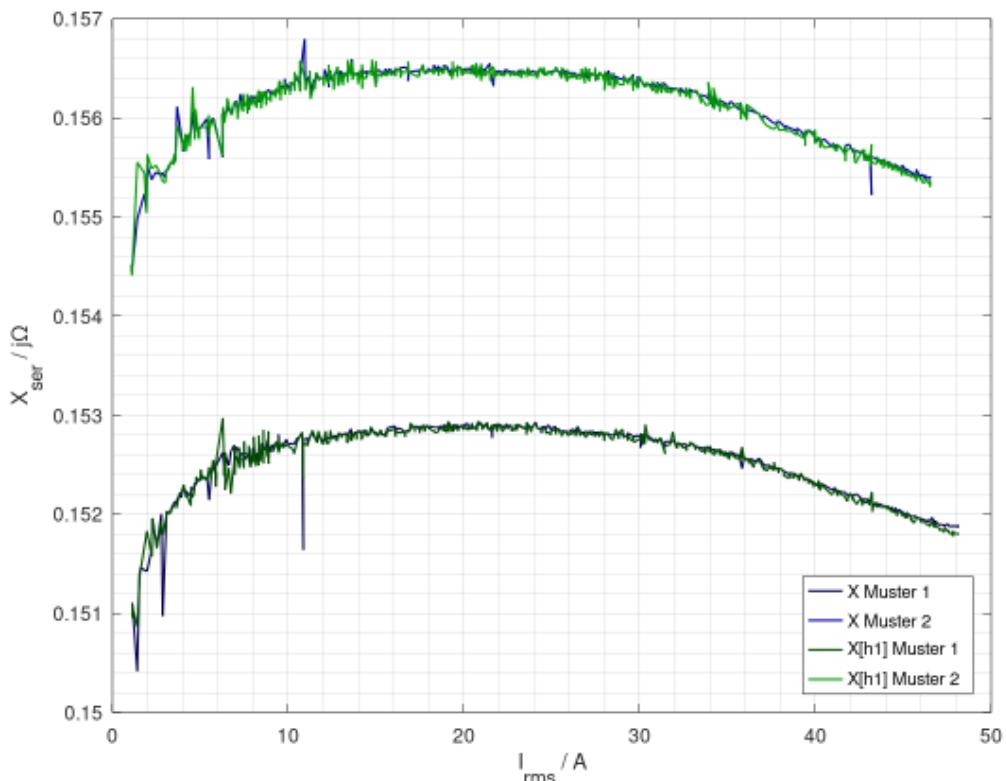


Abbildung 8 - Vergleich der verschiedenen Berechnungsmethoden

Es zeigen sich, wie in Abbildung 8 und der folgenden Ausschnittsvergrößerung in Abbildung 9 zu sehen ist, nur sehr geringe Abweichungen der Werte, signifikante Abweichungen sind lediglich anstellen zu finden, welche aufgrund ihrer plötzlichen starken Abweichung von der nominellen Kurvenform eher als Stö-

rung angesehen werden können. Der grundsätzliche Kurvenverlauf hingegen ähnelt sich bei beiden Berechnungsmethoden stark.

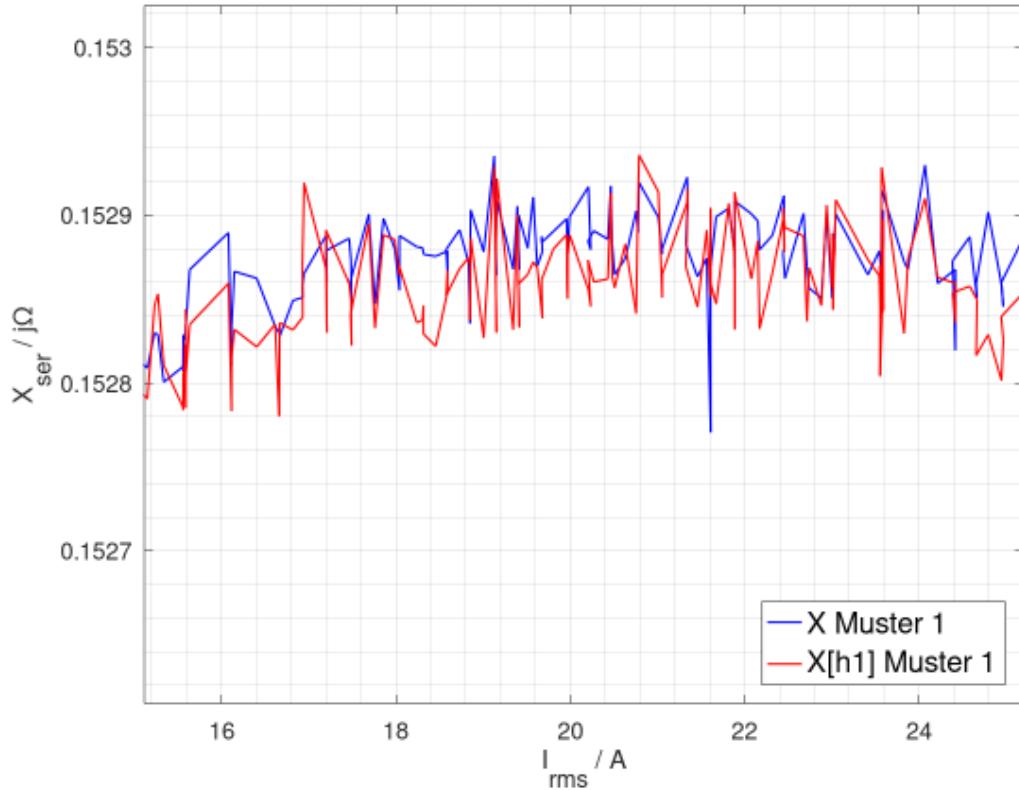


Abbildung 9 – Ausschnittsvergrößerung

Zusätzlich wurde die Abweichung zwischen den aus der ersten Harmonischen berechneten Werten und den aus den Breitbandwerten gewonnenen Blindwiderständen in Prozent ermittelt. Das Ergebnis, wie in Abbildung 10 zu sehen ist, zeigt eine maximale prozentuale Abweichung von (über alle Werte gemittelt) unter 0.06 %, was für die Beurteilung als ausreichend genau anzusehen ist.

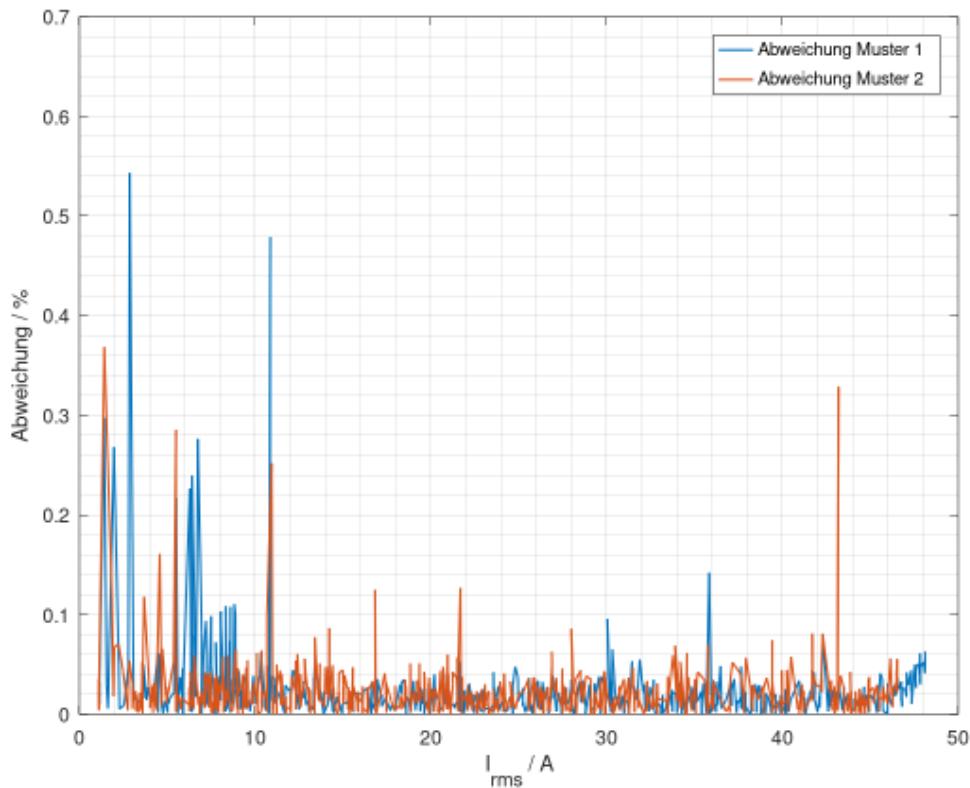


Abbildung 10 - Abweichung der Messwerte in Prozent

Die vereinzelten größeren Peaks lassen sich überwiegend einem Punkt auf dem Graphen zuordnen an welchem ein unerwarteter starker Ausschlag auftritt, welcher vermutlich durch eine Störung im Messablauf entstand – Beispielsweise durch Umgreifen und „ruckeln“ am Regeltransformator.

Es lässt sich zusammenfassen, dass die auf rein sinusförmige Signale ausgelegte Methodik bei den vorliegenden leicht verzerrten Signalformen im Rahmen der erlaubten Unsicherheiten zulässig ist, um eine Bewertung der Spulen durchzuführen.

## 4.2 Praktische Umsetzung des Messaufbaus

Der Messaufbau wurde grundsätzlich genauso umgesetzt wie in Kapitel 3 beschrieben und in Abbildung 5 gezeigt umgesetzt. Verwendung fand ein Regeltransformator, Typ 2422-530-05411 vom Hersteller „Uden“ sowie der bereits beschriebene neu bewickelte Transformator.

Das Messen des Musters (In Abbildung 5 bezeichnet mit „DUT“ – „Device Under Test“) geschah mittels eines kalibrierten und justierten ZES Leistungsmessgerätes der LMG671 Baureihe mit A-Kanal Bestückung. Es weist eine Messunsicherheit von 0.025 % bei einer Bandbreite von 10 MHz auf. Die Spannungsmessung wird direkt, die Strommessung über einen Messwandler, Typ PCT200 (Übersetzungsverhältnis 1:500, 0.01 % Messunsicherheit bei DC bis 5 kHz), spannungsrichtig durchgeführt.

In den folgenden Abbildungen (Abbildung 11, Abbildung 12 und Abbildung 13) ist der Aufbau bildlich dokumentiert.

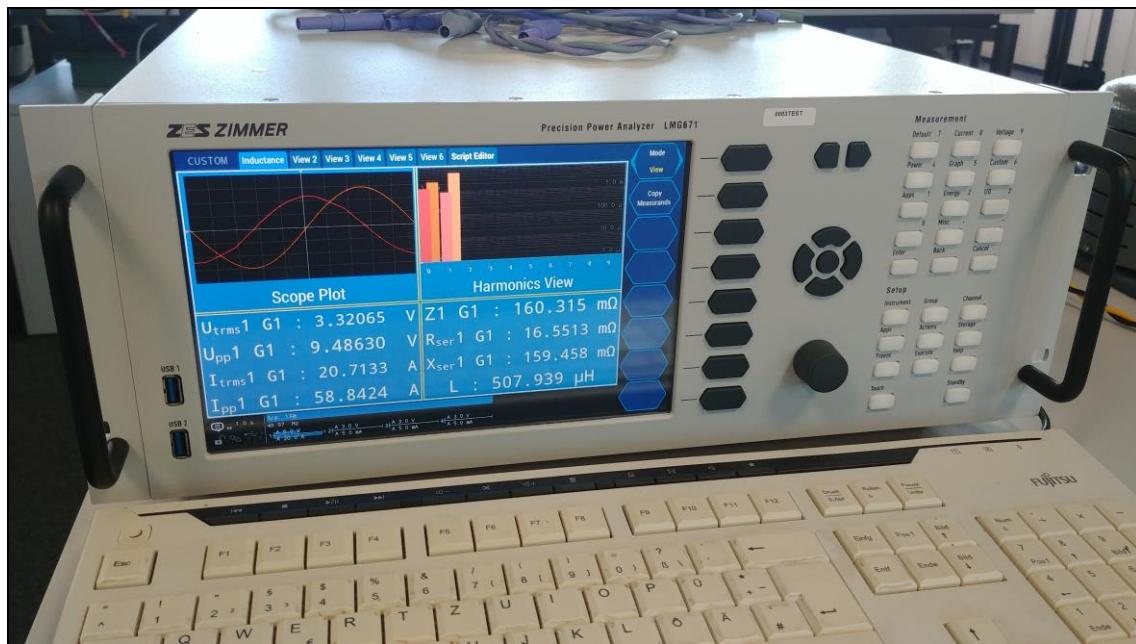


Abbildung 11 - Leistungsmessgerät während der Messung

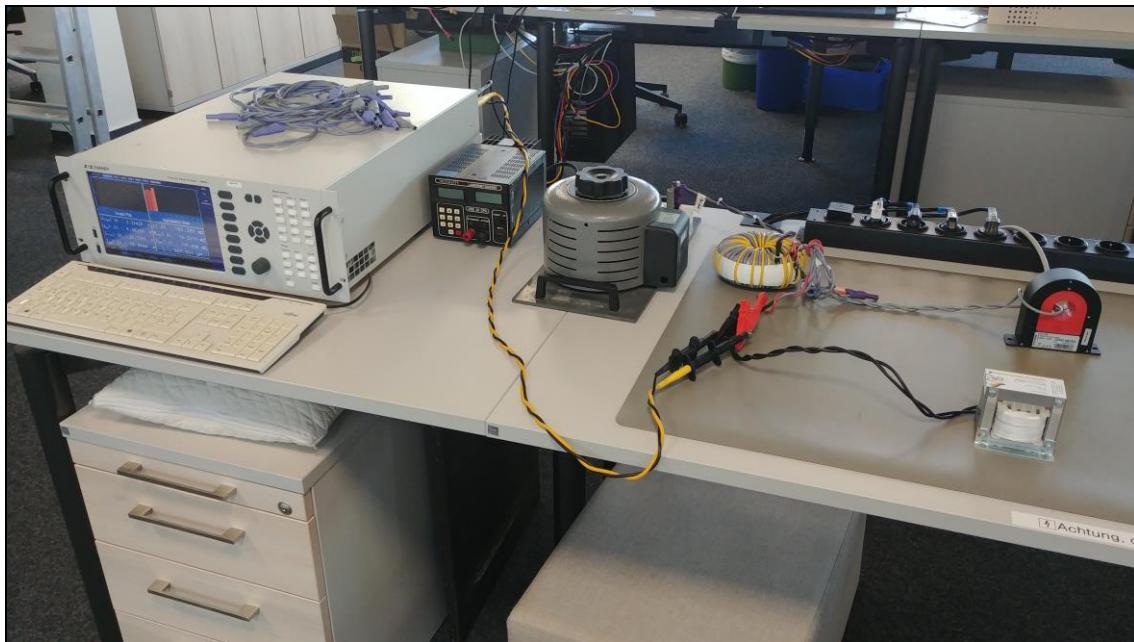


Abbildung 12 - Messaufbau Übersicht

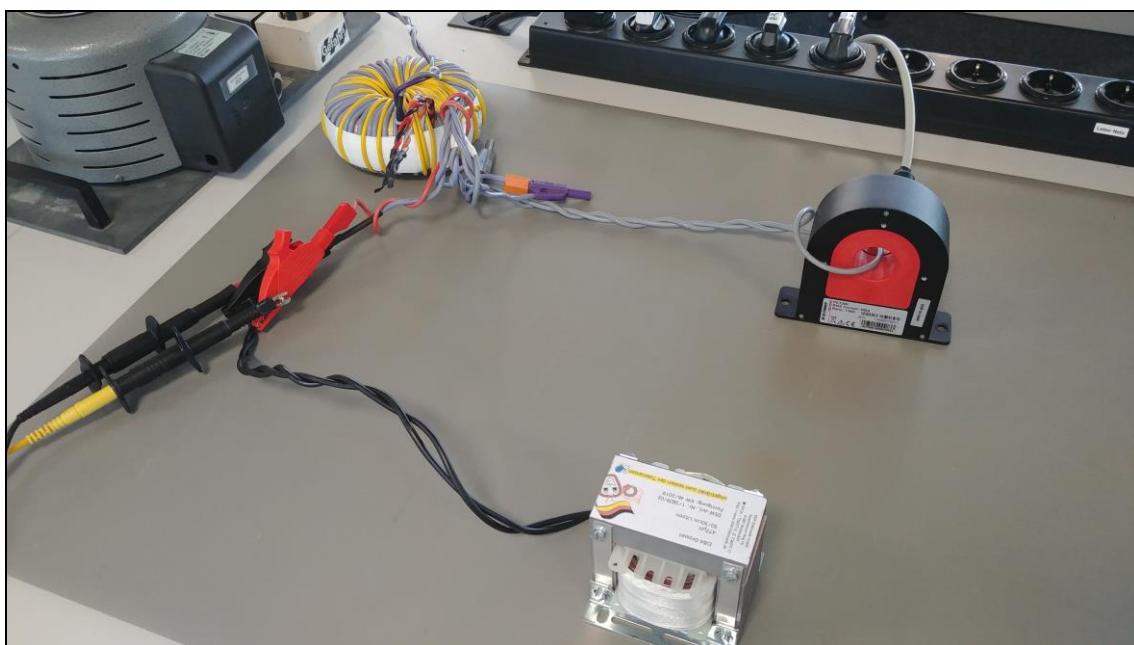


Abbildung 13 - Detailansicht der Messung mit DUT, Transformator und PCT

### 4.3 Erfassen der Sättigungscharakteristik

Als nächstes wurde eine der bisher verwendeten Spulen mit den zuvor bereits für die Vorüberlegung verwendeten zwei zufällig gegriffenen Mustern der neuen Induktivitäten in verschiedenen Punkten verglichen. Zur Auswertung wurde dabei ein Octave Script verwendet, welches den Blindwiderstand über den Strom darstellt. Das Script ist in Anhang A3: Octave Script zur Auswertung der Messwerte (Beispiel) dargestellt. Bei der Messung der Spulenmuster wurde dabei festgestellt (siehe Abbildung 14), dass die bisher verwendeten Spulen ein deutlich sichtbares Sättigungsverhalten ab einem Spitzenstrom von  $I_{peak} \approx 32$  A aufweisen, die neuen Spulen hingegen über den gesamten Stromverlauf merklich bessere Kennwerte aufweisen und eine für Eisenkernspulen unerwartet lineare  $X_{ser}/I$  Charakteristik besitzen. Zudem zeigt die alte Spule einen unerwarteten, sehr starken Abfall des Blindwiderstands in kleinen Strombereichen unter  $I_{peak} \approx 14$  A, dessen Ursache nicht abschließend geklärt werden konnte. Da diese Spulen allerdings nicht weiter eingesetzt werden wären Nachforschungen an dieser Stelle nicht zielführend. Auch die neuen Induktivitäten fallen über  $I_{peak} \approx 34$  A und unter  $I_{peak} \approx 6$  A erkennbar ab, allerdings in weit geringerem Maße als bei der zuvor genutzten Spule.

Zudem wurde auch der Wirkwiderstand geplottet, wie in Abbildung 15 ersichtlich wird. Hier punkten die neuen Induktivitäten erneut, weisen sie doch einen recht linearen Widerstandsverlauf auf, der zudem deutlich niedriger ist als der der vorherigen Spulen. Auffällig sind an dieser Stelle der markante Knick der alten Spule bei niedrigem Strom sowie der wannenförmige Verlauf der neuen Spulen. Letztere lassen sich im durch den Einfluss der Kernverluste auf den Realteil der Gesamtimpedanz erklären, der im höheren Strombereich durch die Erwärmung des Kupfers relativiert wird. Diese Vermutung ließe sich auch auf die alte, allerdings nicht im Detail untersuchte Spule anwenden.

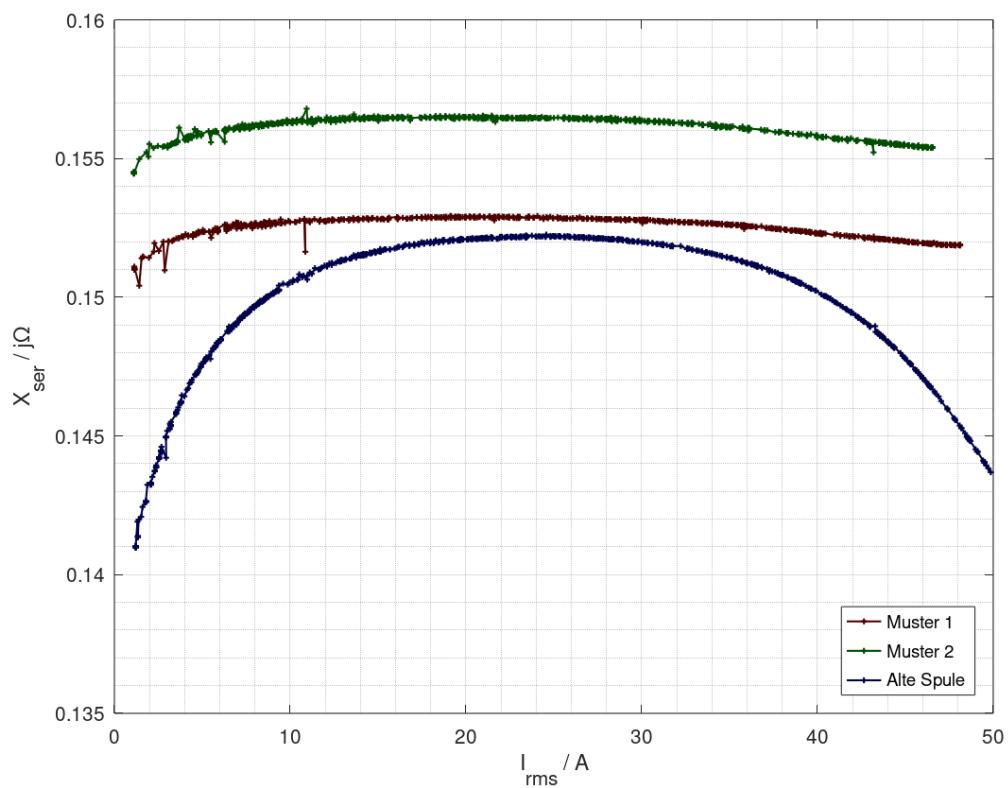


Abbildung 14 - Blindwiderstand der Muster

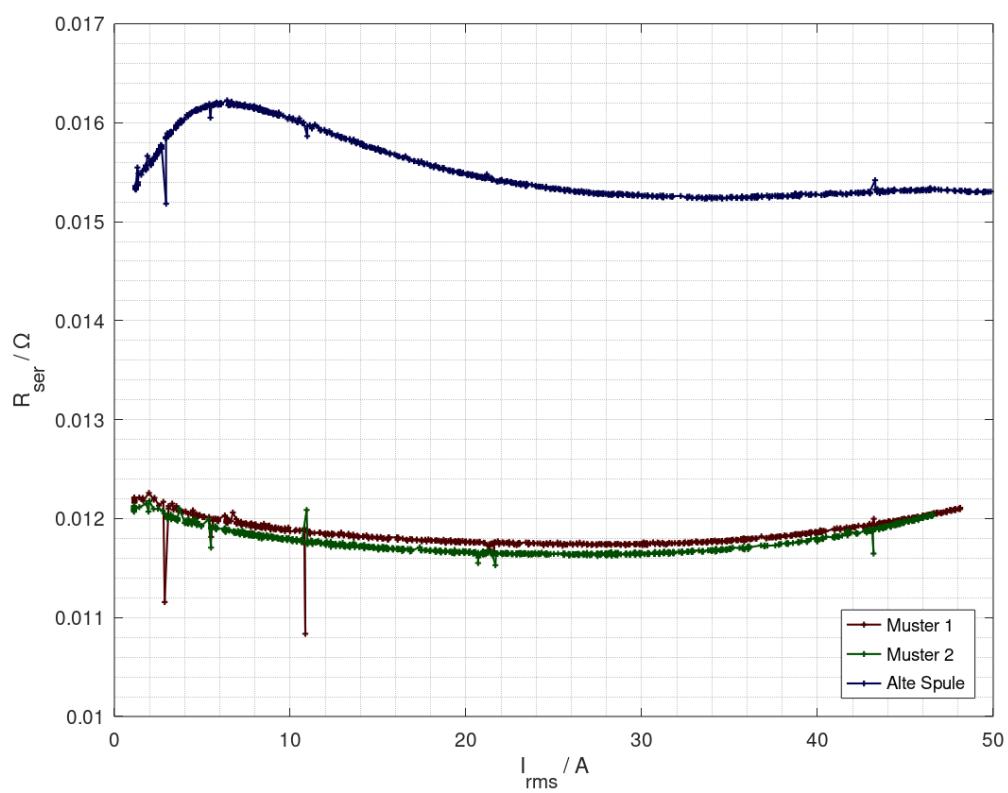


Abbildung 15 - Wirkwiderstand der Muster

## 5 Zusammenfassung

Es lässt sich zusammenfassen, dass die erarbeitete Messmethodik einwandfrei funktioniert. Durch beliebig langsames hochdrehen des Regeltransformators lässt sich eine beliebig aufgelöste Kurve aufnehmen, welche den Verlauf des Blindwiderstandes und des Wirkwiderstandes eines Prüflings aufnehmen kann. Die Auswertung erfolgt anschließend gemäß den projektspezifischen Anforderungen durch Vergleich der Kurvenform mit vorgegebenen Grenzwerten.

Es ist denkbar, dass diese Methodik auch für andere Messaufgaben, in welchem Impedanzverläufe über variierende Ströme aufgenommen werden müssen, Anwendung finden kann – etwa zur Charakterisierung von Kondensatoren.

Durch Automatisierung mittels Python- und Octave Scripten ist der Prüfablauf als halbautomatisch einzustufen, durch Verwendung eines motorisierten Regeltransformators und Integration eines solchen in- sowie ein Ausführen der Octave Berechnungen durch das Python Script wäre es möglich, die Messwertaufnahme komplett zu automatisieren. Es würde lediglich noch eine Beurteilung der Messwerte und das Anschließen der Prüflinge händisch durchgeführt werden müssen.

Zusätzlich wird es durch das entwickelte Messverfahren einfach ermöglicht, einen Feinabgleich der Spulen durchzuführen, welcher aufgrund der auftretenden Serienstreuungen erstrebenswert ist. Hier empfiehlt es sich, zusätzliche Abfragen in die Automatisierung einzubauen, welche etwa die anzuwendenden Abgleichparameter (Menge an zusätzlicher Windungen, Variation des Luftspalts,...) ausgeben könnten.

Eine Verbesserung ließe sich zudem noch durch einen vollständig aufgebauten Prüfplatz erreichen, um Störeinflüsse, welche durch die freie Verdrahtung des

Versuchsaufbaus eingekoppelt werden könnten, zu reduzieren und die Wiederholgenauigkeit sicher zu stellen.

Zudem wurde während der Arbeit an diesem Messsystem ein Prinzip zum Feinabgleich der Spulen entwickelt, da aufgefallen ist, dass merkliche Exemplarstreuungen in den Induktivitäten auftreten können. Ein Beispiel für diese Streuung findet sich im Anhang in Abbildung 16.

Da dieser Feinabgleich nicht das eigentliche Thema dieser wissenschaftlichen Arbeit ist und der Umfang nicht übermäßig anwachsen soll werden die Abgleichprinzipien im Anhang A4 lediglich kurz umrissen.

## 6 Nachwort

Als erste wissenschaftliche Arbeit weist die Bachelorarbeit natürlich immer einige Hürden auf, welche es zu überwinden gilt. Dies fiel mir unerwartet leicht, vermutlich nicht zuletzt durch die gute Unterstützung durch die Kollegen im Hause ZES Zimmer.

Trotz umfangreicher Planung und mehrfachen Meetings gab es allerdings auch einige Ansätze, welche nicht von Erfolg gekrönt waren. In zukünftigen Arbeiten erhoffe ich mir die Weitsicht, solcherlei Ansätze schneller zu erkennen und entsprechend angepasst darauf eingehen zu können. Dies hätte einiges an Bearbeitungszeit gespart und es ermöglicht, diese Ressourcen für andere Zwecke zu verwenden.

Alles in allem war dieses Projekt ausgesprochen interessant und zudem eine Bereicherung für die Firma und meine persönlichen Kenntnisse. Gerade durch die Umfangreiche Recherche für die Grundlagenbetrachtungen gelang es mir, das Verständnis für Induktivitäten weiter zu vertiefen und die vorliegenden Effekte zu verstehen. Überdies konnte ich meine Anwendungserfahrung mit den Hauseigenen Leistungsmessgeräten vertiefen, was für meine angestrebte berufliche Laufbahn im Hause ZES nur zuträglich sein kann.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Schematischer Aufbau der Flickermessung.....	2
Abbildung 2 - Prinzipschaltbild einer realen, verlustbehafteten Spule ..	5
Abbildung 3 - Eisenkernspule mit Luftspalt .....	8
Abbildung 4 - Schematische Darstellung einer Eisenkernspule mit Luftspalt .....	11
Abbildung 5 - Messaufbau zur Aufnahme des Verhaltens über den Strom.....	14
Abbildung 6 - ZES Leistungsmessgerät Typ LMG641 .....	15
Abbildung 7 - erstelltes Custom Menü .....	16
Abbildung 8 - Vergleich der verschiedenen Berechnungsmethoden ....	19
Abbildung 9 – Ausschnittsvergrößerung.....	20
Abbildung 10 - Abweichung der Messwerte in Prozent.....	21
Abbildung 11 - Leistungsmessgerät während der Messung .....	22
Abbildung 12 - Messaufbau Übersicht .....	23
Abbildung 13 - Detailansicht der Messung mit DUT, Transformatorm und PCT.....	23
Abbildung 14 - Blindwiderstand der Muster.....	25
Abbildung 15 - Wirkwiderstand der Muster.....	25
Abbildung 16 - Streuung des Blindwiderstandes von 10 Mustern.....	36
Abbildung 17 - Abgleichvorgang der Induktivität.....	38

## Literaturverzeichnis

**Chmieleffski, Kai.** **2019-11.** Auslegung einer Spule für eine Netzimpedanznachbildung nach EN61000-3-3. *Vertiefungsprojekt*. Frankfurt am Main : s.n., 2019-11.

**Grimsehl.** **1954.** *Lehrbuch der Physik, Bd. II.* Leipzig : s.n., 1954.

**International Electrotechnical Commission.** **2014-03-01.**

Begrenzung von Spannungsänderungen, Spannungsschwankungen und Flicker in öffentlichen Niederspannungs-Versorgungsnetzen [...]. *Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) - Teil 3-3: Grenzwerte.* s.l. : DKE, 2014-03-01. 61000-3-3 (VDE 0838-3):2014-03.

—. **2009-10.** General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation. *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-7: Testing and measurement techniques.* 2009-10. Ed. 2.1 2009-10. 61000-4-7.

—. **2017-11.** Limits for harmonic current emissions. *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits.* s.l. : DKE, 2017-11. f1 Ed.5.0. 61000-3-2 77A/986/FDIS:2017-11.

**Klein, Dr.-Ing. Paul E.** **1975.** *Netztransformatoren und Drosseln.* München : Franzis, 1975. ISBN 3-7723-1064-8.

**Matthes, Prof. Dr. Wolfgang.** Controllers and PCs. [Online] [Zitat vom: 19. 12 2019.] <http://www.controllersandpcs.de>.

**Nührmann, Dieter.** **1998.** *Das große Werkbuch Elektronik.* s.l. : Franzis, 1998. ISBN 9783772365478.

**Reichel, Dr.-Ing. Karl.** **1980.** *Praktikum der Magnettechnik.* München : Franzis-Verlag GmbH, 1980. ISBN 3-7723-6661-9.

**Snelling, E. C. und Butterworths.** **1988.** Soft Ferrites, 2nd ed. Chicago, Illinois : Magnetic Materials Producer Association, 1988.

**Watson, John E.** **1998.** GNU Octave. [Online] 1998. [Zitat vom: 06. 02 2020.] <https://www.gnu.org/software/octave/>.

**Wheeler, Harold A.** **1928.** Proceedings of the Institute of Radio Engineers - Simple Inductance Formulas for Radio Coils. s.l. : IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1928. Bde. Volume 16, Number 10, S. 1398-1400. DOI: 10.1109/JRPROC.1928.221309.

## 7 Anhang

### A1: Python Script zur Erfassung der Messwerte aus dem LMG

```
# -*- coding: iso-8859-15 -*-
import codecs
import time
import sys
import rs_gpib_lib
import csv
import string
import os.path
from os import system, name

# Initialisation
#=====
rs_gpib_lib.init("de_DE", True)

# Check if File is already existing, increase index if neccessary
i = 0
while os.path.exists("Messwerte%s.csv" % i):

    i += 1

dateiname = "Messwerte%s.csv" % i

LOGHANDLE = codecs.open("interface_trans.log", "w", "UTF-8")
def write_log(text):
    timestamp = time.strftime("%Y-%m-%d %H:%M:%S") +
    ".%03d" % ((time.time() * 1000) % 1000)
    LOGHANDLE.write("%s %s\r\n" % (timestamp, text))

# Connect PC to LMG
LMG670 =
rs_gpib_lib.instr_factory(write_log).create("LMG671", "Nupsi")
LMG670.set_if("LAN")
LMG670.set_para("172.20.81.17", 5025)
LMG670.open(False)      # Connect to LMG without reset

print "Geraet: \\""+LMG670.request("*IDN?")+"\\\" # Req. Id.
LMG
print "Sensor: "+LMG670.request("IDNI?")      # Request identification PCT

.
.
.
```

```
#=====
# Readout
print "Erstelle Datei "+dateiname+"..."
file=open(dateiname, "wb", buffering=1) # in die dateiname.csv schreiben (binärmodus, anhängend, gepuffert)
writer=csv.writer(file, dialect='excel', delimiter=';')
    # choose file type and separator
headerrow =
["Urms","Irms","P","Q","Uh1","Ih1","Ph1","Qh1","Rser","Xser",
",phi","f"] # write header
writer.writerow(headerrow)      # write header to file

print "Beginne mit Abfrage...."
while (1):      # do forever:
    u, i, uh, ih, p, ph, q, qh, r, x, phi, f =
LMG670.request('inim "mc";utrms1111?;itrms1111?;buam1111?
1;biam1111? 1;p1111?;bpam1111? 1;q1111?;bqam1111?
1;rser1111?;xser1111?;phil1111?;fcyc1111?').split(";");
request values and save to variables
    outputrow = [u,i,p,q,uh,ih,ph,qh,r,x,phi,f] # create
output array
    writer.writerow(outputrow) # write array to file
    file.flush() # flush file to prevent data loss
pass

LMG670.close()
LOGHANDLE.close()
```

## A2: Beispiel einer Datei mit Messwerten (Auszug)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Urms	Irms	P	Q	Urmsh1	Irmsh1	Ph1	Qh1	Rser	Xser	phi	f
2	0.1721	1.1362	0.0157	0.1949	0.1722	1.1367	0.0157	0.1951	0.0122	0.1510	85.3990	49.9968
3	0.1721	1.1359	0.0157	0.1949	0.1721	1.1364	0.0157	0.1950	0.0122	0.1510	85.3873	49.9968
4	0.1722	1.1362	0.0157	0.1950	0.1722	1.1367	0.0158	0.1951	0.0122	0.1510	85.3782	49.9968
5	0.1721	1.1362	0.0157	0.1949	0.1722	1.1365	0.0157	0.1950	0.0122	0.1510	85.3907	50.0050
6	0.1721	1.1358	0.0157	0.1948	0.1721	1.1362	0.0157	0.1949	0.0122	0.1510	85.3891	49.9968
7	0.1720	1.1353	0.0157	0.1946	0.1720	1.1357	0.0157	0.1947	0.0122	0.1510	85.3983	49.9968
8	0.1717	1.1336	0.0157	0.1940	0.1718	1.1341	0.0157	0.1942	0.0122	0.1510	85.3903	49.9968
9	0.1717	1.1325	0.0156	0.1938	0.1717	1.1326	0.0157	0.1938	0.0122	0.1511	85.3786	50.0050
10	0.1710	1.1278	0.0155	0.1922	0.1709	1.1277	0.0155	0.1921	0.0122	0.1511	85.3783	50.0298
11	0.2133	1.4132	0.0244	0.3004	0.2147	1.4186	0.0240	0.3036	0.0122	0.1504	85.4777	49.6527
12	0.2347	1.5448	0.0291	0.3613	0.2350	1.5478	0.0292	0.3626	0.0122	0.1514	85.3920	49.9968
13	0.2461	1.6193	0.0320	0.3971	0.2465	1.6223	0.0321	0.3986	0.0122	0.1515	85.3906	49.9720
14	0.2497	1.6434	0.0329	0.4091	0.2503	1.6473	0.0331	0.4111	0.0122	0.1515	85.3986	50.0050
15	0.2984	1.9643	0.0473	0.5843	0.2993	1.9652	0.0470	0.5864	0.0123	0.1514	85.4191	49.8241
16	0.3412	2.2428	0.0613	0.7628	0.3425	2.2526	0.0615	0.7691	0.0122	0.1516	85.4288	49.9391
17	0.3475	2.2799	0.0635	0.7898	0.3508	2.3012	0.0648	0.8047	0.0122	0.1520	85.3957	50.0133
18	0.3849	2.5295	0.0776	0.9705	0.3848	2.5296	0.0772	0.9705	0.0121	0.1517	85.4534	49.9555
19	0.4246	2.7844	0.0943	1.1784	0.4274	2.8043	0.0955	1.1948	0.0122	0.1520	85.4309	49.9803
20	0.4329	2.8597	0.0912	1.2347	0.4368	2.8691	0.0980	1.2495	0.0112	0.1510	85.5177	50.5219
21	0.4700	3.0816	0.1152	1.4436	0.4701	3.0833	0.1152	1.4450	0.0121	0.1520	85.4408	49.9968
22	0.4693	3.0775	0.1146	1.4396	0.4693	3.0770	0.1146	1.4394	0.0121	0.1520	85.4481	50.0050
23	0.5016	3.2891	0.1315	1.6446	0.5044	3.3081	0.1325	1.6635	0.0122	0.1520	85.4442	49.9309
24	0.5131	3.3636	0.1368	1.7204	0.5135	3.3668	0.1371	1.7235	0.0121	0.1521	85.4526	50.0050
25	0.5381	3.5261	0.1508	1.8914	0.5429	3.5578	0.1538	1.9253	0.0121	0.1521	85.4337	49.9638
26	0.5589	3.6623	0.1621	2.0403	0.5590	3.6638	0.1622	2.0417	0.0121	0.1521	85.4566	49.9885
27	0.5586	3.6603	0.1618	2.0383	0.5586	3.6609	0.1619	2.0387	0.0121	0.1521	85.4599	50.0050
28	0.5567	3.6481	0.1606	2.0247	0.5566	3.6490	0.1607	2.0247	0.0121	0.1521	85.4629	50.0215
29	0.5841	3.8258	0.1766	2.2276	0.5869	3.8435	0.1786	2.2487	0.0121	0.1522	85.4601	50.0133
30	0.5964	3.9071	0.1842	2.3229	0.5974	3.9124	0.1850	2.3298	0.0121	0.1522	85.4591	49.9885
31	0.6188	4.0513	0.1982	2.4993	0.6205	4.0613	0.1991	2.5120	0.0121	0.1523	85.4672	50.0050
32	0.6413	4.2003	0.2125	2.6852	0.6416	4.2033	0.2131	2.6885	0.0120	0.1522	85.4686	49.9885
33	0.6421	4.2045	0.2130	2.6911	0.6423	4.2065	0.2131	2.6932	0.0120	0.1522	85.4754	50.0050
34	0.6816	4.4650	0.2409	3.0339	0.6844	4.4863	0.2419	3.0610	0.0121	0.1522	85.4824	49.9226
35	0.6842	4.4795	0.2416	3.0552	0.6844	4.4810	0.2419	3.0571	0.0120	0.1523	85.4752	49.9968
36	0.6836	4.4751	0.2409	3.0495	0.6836	4.4762	0.2407	3.0504	0.0120	0.1523	85.4875	50.0133
37	0.6933	4.5393	0.2484	3.1374	0.6989	4.5787	0.2531	3.1901	0.0121	0.1523	85.4643	49.9638
38	0.7099	4.6485	0.2597	3.2898	0.7096	4.6477	0.2594	3.2879	0.0120	0.1522	85.4895	49.9968
39	0.7133	4.6684	0.2625	3.3195	0.7158	4.6852	0.2643	3.3432	0.0120	0.1523	85.4792	49.9968

### A3: Octave Script zur Auswertung der Messwerte (Beispiel)

```
clear auswertung;
[file] = "Messwerte1.csv";
data = dlmread(file, ";");                      # Import csv data
u1 = data(:,1);
i1 = data(:,2);
p1 = data(:,3);
q1 = data(:,4);
uh1 = data(:,5);
ih1 = data(:,6);
ph1 = data(:,7);
qh1 = data(:,8);
r1 = data(:,9);
x1 = data(:,10);
phil = data(:,11);
f1 = data(:,12);

[...]          # Wie zuvor für alle gewünschten Mess-
werttabellen

#####
# Xser über I
#
#####
graphics_toolkit ('qt');
h=figure(1);
plot(i1, x1, "+-r;Neu 1;", "linewidth", 1, "markersize", 3,
      i2, x2, "+-b;Neu 2;", "linewidth", 1, "markersize", 3,
      i3, x3, "+-y;Alt;", "linewidth", 1, "markersize", 3)
ylabel("X_{ser} / j\Omega")
xlabel("I_{rms} / A")
grid minor on;
grid on;
legend (h, "location", "southeast", "orientation", "verti-
cal");
hleg = findobj(gcf(), "type", "axes", "Tag", "legend");
```

```
hax = findobj(gcf(), "type", "axes");
set(hax, 'fontsize', 15);
set(hleg, 'fontsize', 10);
print(h, "-dsvg", "-S1920,1080", "xser.svg")

#####
# Rser über I
#
#####
graphics_toolkit ('qt');
h2=figure(2);
plot(i1, r1, "+-r;Neu 1;", "linewidth", 1, "markersize", 3,
      i2, r2, "+-b;Neu 2;", "linewidth", 1, "markersize", 3,
      i3, r3, "+-y;Alt;", "linewidth", 1, "markersize", 3)
ylabel("R_{ser} / \Omega")
xlabel("I_{rms} / A")
grid minor on;
grid on;
legend (h2, "location", "southeast", "orientation", "vertical");
hleg2 = findobj(gcf(), "type", "axes", "Tag", "legend");
hax2 = findobj(gcf(), "type", "axes");
set(hax2, 'fontsize', 15);
set(hleg2, 'fontsize', 10);
print(h2, "-dsvg", "-S1920,1080", "rser.svg")
```

## A4: Überlegungen zum Feinabgleich

Während den Messungen wurde festgestellt, dass die neuen Spulen von einer messbaren Exemplarstreuung betroffen sind. (Siehe Abbildung 16)

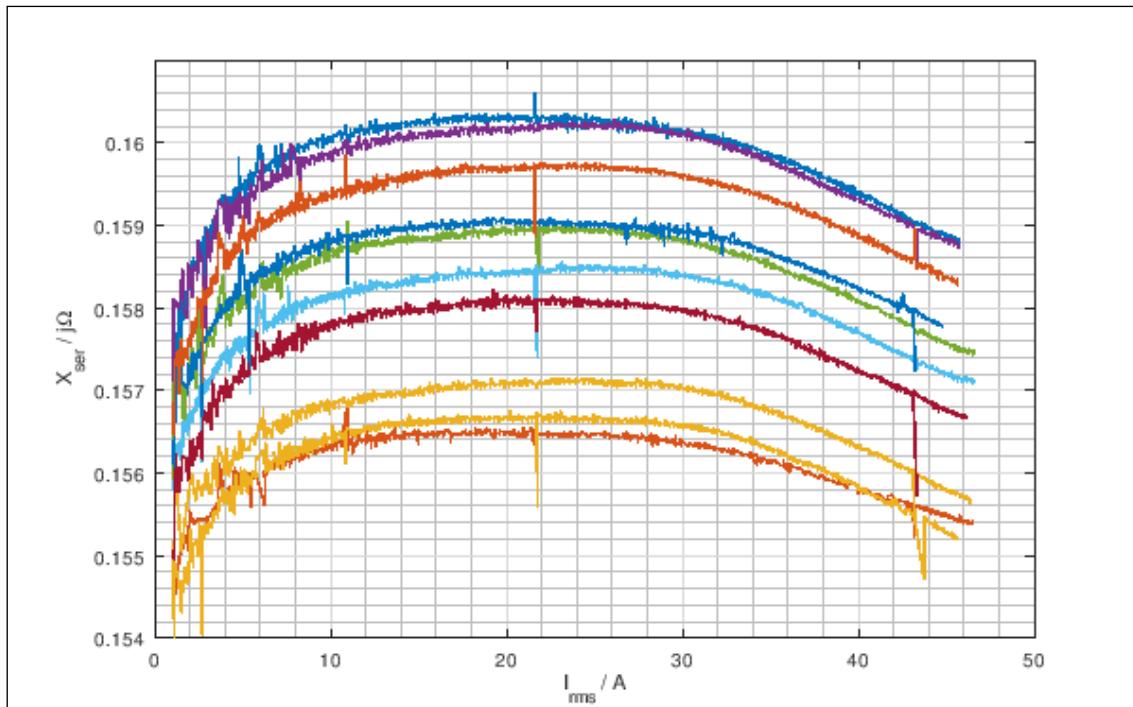


Abbildung 16 - Streuung des Blindwiderstandes von 10 Mustern

Diese Streuungen wurden untersucht und eine Methode entwickelt, um sie während der Fertigung der Netzimpedanznachbildungen zu justieren. Die Kalibrierung der Abweichung ist problemlos mit der in dieser Arbeit entwickelten Methodik durchführbar.

Während der Untersuchung dieser Abweichungen wurde festgestellt, dass sie Prinzip bedingt (Die Drahtlänge und -querschnitt, Windungszahl und das Eisenmaterial sind konstant und unveränderlich) lediglich durch Variationen des Luftspaltes hervorgerufen werden kann. Da diese Drosseln händisch gestopft und verschraubt werden liegt es nahe, dass leichte Variationen im Druck auf den I-Schenkel des EI-Kerns eine geringe aber messbare Varianz der Induktivität und damit des induktiven Blindwiderstandes nach sich ziehen.

Da diese Abweichungen in der Fertigung der Spulen auftreten und diese nach dem verschrauben Getränkt werden ist es für ZES nicht mehr möglich, händisch den Luftspalt zu variieren, um hier etwaige Korrekturen vorzunehmen. Daher ist es nötig, einen Ansatz zu finden, welcher das Problem „von außen“ zu beheben versucht.

Der gewählte Ansatz macht sich das Streufeld, welches um eine Stromdurchflossene Induktivität entsteht, zu nutze. Experimentell wurden die Anschlussdrähte der Spulen verlängert und als zusätzliche Windung um den Wickelkörper gelegt. Die Induktivität (und damit der Blindwiderstand) konnte auf diese Weise wahlweise erhöht oder verringert werden. Es wurden mehrere Versuche durchgeführt, um den Effekt der Nähe der zusätzlich aufgebrachten Wicklung auf die Gesamtinduktivität zu beurteilen. Dabei wurde festgestellt, dass wie erwartet eine nahe am Kern angebrachte Wicklung die Gesamtinduktivität stärker beeinflusst, als eine mit etwa einem Zentimeter Abstand angebrachte Windung.

Ebenso wurde die Wiederholgenauigkeit dieses Prinzips überprüft. Es wurde dabei festgestellt, dass bei den vorliegenden Spulen eine nahe Wicklung den Blindwiderstand um etwa  $\pm 0.9 \text{ m}\Omega$  verändert. Eine lockere Wicklung hingegen ist schwer zu beurteilen, da die Abstände nur schwerlich definiert gehalten werden können. Eine Auswertung dieser Ergebnisse zeigt die folgende Abbildung 17.

Zur besseren Lesbarkeit ist diese, wie auch alle anderen Graphen dieser Arbeit, in digitaler Form erneut beigefügt.

Es zeigt sich deutlich, dass die Wicklungsrichtung eine Variation der Induktivität bzw. des Blindwiderstandes in beide Richtungen ermöglicht. Dadurch wird es möglich die Spulen an die vorgesehenen Blindwiderstände anzupassen, während der Abgleichvorgänge einfach mittels des in dieser Arbeit thematisierten Prinzips überprüft werden kann.

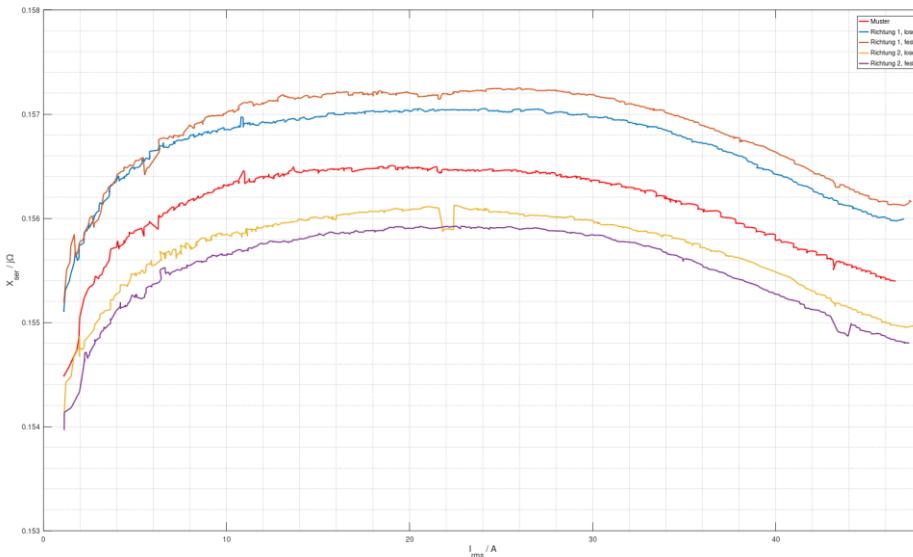


Abbildung 17 - Abgleichvorgang der Induktivität

Es bleibt zu erwähnen, dass diese Abgleichprozedur mit  $\pm 0.9 \text{ m}\Omega$  je Wicklung gültig ist für die erste Wicklungslage um den Wickelkörper herum. Verlässt man diesen oder bringt eine zweite Lage auf, so verringert sich dieser Wert sukzessive. Ein derart starker Abgleich sollte allerdings bei der vorliegenden Fertigungsgüte nicht notwendig sein.

Es ist zu beachten, dass etwaige auf diese Weise in den magnetischen Kreis eingebrachte Metallteile, wie etwa die Befestigungsschenkel der Drossel oder die Spannblecht, welche die E- und I-Bleche zusammen halten, nun im magnetischen Kreis wirken können – inklusive ihrer vermutlich nicht idealen Eigenschaften etwa in Bezug auf die Sättigungscharakteristik.

Experimentell konnte hier allerdings gezeigt werden, dass die Auswirkungen in den für die Netzimpedanznachbildung interessanten Strombereichen vernachlässigbar sind.

## Sonstige Anhänge

In digitaler Form sind, abrufbar unter <http://tinkertubes.de/urls/ba> , folgende Anhänge beigefügt:

- Alle Graphen in hoher Auflösung, teils als Vektorgrafik
- Beispieldateien, welche die ausgelesenen Messwerte enthalten
- Beispielscripte zur Verarbeitung dieser Daten