

IFAN



© fotopro

Design eines Modell-Transformators

Masterarbeit von
Abedin Bytyqi, BSc

Betreuer
Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Herwig Renner**

Februar 2020

Graz University of Technology

Institute of Electric Power Systems

Inffeldgasse 18/I

8010 Graz

Austria

Head of Institute

Schürhuber, Robert, Univ.-Prof. DDipl.-Ing. Dr.techn.

Supervisor

Renner, Herwig, Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn.

A Dissertation by

Bytyqi Abedin BSc

Februar 2020

Statutory Declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz, February 2020

Abedin Bytyqi

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, Februar 2020

Abedin Bytyqi

Danksagung

Im Namen Gottes der Wohltätigste und Barmherzigste, der über die ganze Erde, den Himmel und alles, was dazwischen ist, herrscht. Alles Lob und Aller Preis gebührt Gott für all seine Macht, seinen Segen und alles, was mit ihm zu tun hat, ob wir es wissen oder nicht.

Für die freundliche Unterstützung bedanke ich mich zunächst bei meinem betreuenden Professor Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Herwig Renner für die notwendigen Hilfestellungen, hilfreichen Anregungen und die konstruktive Kritik bei der Erstellung dieser Arbeit.

Ein besonderes Dankeschön geht an meine Familie, die stets ein offenes Ohr für mich hatten, meine Frau, die mich moralisch unterstützt und motiviert hat nicht nur während des Studiums, sondern zu jeder Zeit tatkräftig geholfen und ermutigt hat.

Graz 2020

Abedin Gafurr Bytyqi

Abstract

The Institute of Electrical Power Systems at the Graz University of Technology operates an analog electrical network model in the voltage and current scaled to 1000:1. To expand the network model a new transformer needs to be designed. The properties of the model transformer should replicate a real power transformer in terms of scale. In particular, the no-load current and the relative short-circuit voltage should be adapted as closely as possible to real conditions. Measurements are carried out at existing transformers of the institute for a basic type selection. After that, based on the literature research, a theoretical dimensioning of the iron core and the windings should take place. With these specifications, a prototype is built. Afterwards the theoretical results are compared with the measured values of the prototype and, if necessary, adapted to the new design.

Kurzfassung

Das Institut für Elektrische Anlagen und Netze der Technischen Universität Graz betreibt ein analoges Netzmodell im Spannungs- und Strommaßstab 1000:1. Für die Erweiterung des Netzmodells soll ein neuer Transformator entworfen werden. Der Modelltransformator soll in seine Eigenschaften maßstabsgerecht einen realen Leistungstransformator nachbilden. Insbesondere der Leerlaufstrom und die relative Kurzschlussspannung sollen so nah wie möglich an reale Verhältnisse angepasst werden. Messungen am Institut für Elektrische Anlagen und Netze an Transformator-Exemplaren werden durchgeführt und eine prinzipielle Entscheidung hinsichtlich des Transformatortyps getroffen. Ausgehend von der Literaturrecherche folgt eine theoretische Dimensionierung des Eisenkerns und der Wicklungen. Auf Basis dieser Spezifikationen wird ein Prototyp gefertigt. Anschließend werden die theoretisch dimensionierten Spezifikationen mit den gemessenen Werten des Prototyps verglichen und je nach Ergebnis wird der Designentwurf angepasst.

Inhaltsverzeichnis

ABSTRACT	V
KURZFASSUNG	VI
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	IX
TABELLENVERZEICHNIS	IX
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	X
1 EINFÜHRUNG	1
1.1 AUSGANGSLAGE UND MOTIVATION	1
1.2 FORSCHUNGSFRAGEN	1
1.2.1 AUSLEGUNG UND ANFORDERUNGEN	1
2 ALLGEMEINE GRUNDLAGEN ZU TRANSFORMATOREN	3
2.1 GESCHICHTE	3
2.2 TECHNISCHE REALISIERUNG UND ANWENDUNGEN	3
2.3 GRUNDPRINZIP	4
2.3.1 GRUNDGLEICHUNG EINES IDEALEN TRANSFORMATORS	5
2.3.2 REALE TRANSFORMATOREN	7
2.3.3 DER WIRKUNGSGRAD	9
3 KONSTRUKTIVE EINFLUSSGRÖßEN FÜR DEN TRANSFORMATOR	10
3.1 KERNMATERIALIEN DES TRANSFORMATORS	10
3.1.1 EIGENSCHAFTEN DER MATERIALIEN	11
3.2 DIE WICKLUNGEN UND IHRE MATERIALIEN	13
3.3 WACHSTUMSGESETZE – BAULEISTUNG, FREQUENZ UND BAUGRÖßE	13
3.4 GLEICHUNGEN ZUR BERECHNUNG DES TRANSFORMATORS	15
4 MESSUNGEN AN AUSGEWÄHLTEN TRANSFORMATOREXEMPLAREN	17
4.1 LEERLAUFVERSUCH	20
4.2 KURZSCHLUSSVERSUCH	21
4.3 MESSERGEBNISSE	22
4.3.1 ERGEBNISSE AUS DEM LEERLAUFVERSUCH AM RINGKERNTRANSFORMATOR 1	24
4.3.2 ERGEBNISSE AUS DEM KURZSCHLUSSVERSUCH AM RINGKERNTRANSFORMATOR 1	24
SCHLUSSFOLGERUNGEN	25
4.4 25	
4.4.1 EIGENSCHAFTEN DES RINGKERNTRANSFORMATORS GEGENÜBER ANDEREN BAUFORMEN	26
4.5 ZWISCHENZUSAMMENFASSUNG	27

5	ENTWURF EINES RINGKERNTRANSFORMATORS	28
5.1	BENÖTIGTE BERECHNUNGEN	28
5.1.1	LEISTUNG DES TRANSFORMATORS	28
5.1.2	EISENQUERSCHNITT	28
5.1.3	WINDUNGSZAHLEN	29
5.1.4	DRAHTDURCHMESSER	30
5.1.5	WICKELQUERSCHNITTFLÄCHE	30
5.1.6	WIDERSTAND DER WICKLUNGEN	31
5.2	PARAMETER DES MODELLTRANSFORMATOREN	31
5.2.1	EINFLUSSPARAMETER FÜR DEN TRANSFORMATORENTWURF	32
5.3	BERECHNUNG DES LEERLAUFSTROMS UND UNTERSUCHUNG DER EINFLUSSPARAMETER	32
5.4	ALLGEMEINE ASPEKTE ZUR BERECHNUNG DER KURZSCHLUSSSPANUNG	37
6	BAU UND ANALYSE EINES PROTOTYPS	39
6.1	AUFBAU	40
6.2	LEERLAUFMESSUNG	41
6.3	KURZSCHLUSSMESSUNG	43
7	ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION	44
8	LITERATURVERZEICHNIS	46

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau eines Transformators.....	5
Abbildung 2: Ersatzschaltbild mit realen Transformator Kenngrößen.....	8
Abbildung 3: Vielfältigkeit der Kernbauformen für Transformatoren.....	12
Abbildung 4: Vielfältigkeit der Bauformen für Ringkern-Transformatoren.....	12
Abbildung 5: Baugröße des Transformators in Abhängigkeit der Frequenz [10].....	15
Abbildung 6: Ringkerntransformator Nummer 1.....	18
Abbildung 7: Ringkerntransformator Nummer 2.....	18
Abbildung 8: Dreiphasiger Transformator Nummer 3 mit Ansicht auf den Innenaufbau I.....	19
Abbildung 9: Dreiphasiger Transformator Nummer 3 mit Ansicht auf den Innenaufbau II.....	19
Abbildung 10: Dreiphasiger Transformator Nummer 4 in der Dreischenkelausführung.....	20
Abbildung 11: Ersatzschaltbild für den Leerlaufversuch.....	21
Abbildung 12: Ersatzschaltbild für den Kurzschlussversuch.....	22
Abbildung 13: Sättigungskennlinie des Ringkerntransformators Nummer 1.....	35
Abbildung 14: Beeinflussung der Streureaktanzen bei Anordnung der Wicklungen [15].....	37
Abbildung 15: Modell des Ringkerntransformators I.....	40
Abbildung 16: Modell des Ringkerntransformators II.....	41
Abbildung 17: Sättigungskennlinie des Ringkerntransformatormodells.....	42

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Eigenschaften der Kernmaterialien von Transformatoren.....	11
Tabelle 2: Daten aus Typenschild von Transformatoren.....	17
Tabelle 3: Messergebnisse der Leerlauf- und Kurzschlussversuche.....	23
Tabelle 4: Leerlauf und Kurzschlussversuche an verschiedenen Transformatoren.....	25
Tabelle 5: Abmessungen und Eigenschaften von Kupferdrähten.....	30
Tabelle 6: Änderung der Parameter für den passenden Magnetisierungsstrom.....	36
Tabelle 7: Theoretisch dimensionierte Parameter für Ringkerntransformatoren.....	36
Tabelle 8: Gemessene und abgeleitete Werte der Leerlaufmessung.....	42
Tabelle 9: Gemessene und abgeleitete Werte der Kurzschlussmessung.....	43

Abkürzungsverzeichnis

A_{Cu}	Leiterquerschnitt
A_{Fe}	Eisenquerschnitt eines Magnetkernes
A_w	Fensterquerschnitt der Wicklungen
A_{weff}	Effektive Fensterquerschnittfläche der Wicklungen
\hat{B}	Maximale magnetische Flussdichte
d	Leiterdurchmesser
f	Frequenz
h	Ringkernhöhe
I_0	Leerlaufstrom
I_1	Primärstrom
I_{10}	Primärer Leerlaufstrom
I_{1N}	Primärer Nennstrom
I_2	Sekundärstrom
I_{Fe}	Eisenverluststrom
I_μ	Magnetisierungsstrom
J	Stromdichte
k_{Fe}	Eisenfüllfaktor
k_w	Zuschlag für Isolationsbedarf
l_{Cu}	Mittlere Windungslänge einer Wicklung
l_{Fe}	Mittlere Eisenweglänge
L	Induktivität
N_1	Primäre Windungszahl
N_2	Sekundäre Windungszahl
n_{Fi}	Einheitswindungszahl pro cm^2
P_{Fe}	Eisenverluste
P_{vCu}	Kupferverluste
P_μ	Magnetisierungsverluste
R_1	Primärer Wicklungswiderstand
R_{Cu}	Kupferwiderstand
R_{Fe}	Eisenwiderstand
R_m	Magnetische Widerstand
S	Scheinleistung
U_1	Primärspannung
U_2	Sekundärspannung
u_k	Relative Kurzschlussspannung

X_h	Hauptreaktanz
$X_{\sigma 1}$	Streureaktanz
ID	Innere Diameter
OD	Äußere Diameter
μ	Magnetische Permeabilität
μ_0	Magnetische Feldkonstante
μ_r	Relative magnetische Permeabilität
η	Wirkungsgrad
θ	Durchflutung
ρ	Spezifische elektrische Widerstand der Leiter
ϕ	Magnetische Fluss
ω	Kreisfrequenz

1 Einführung

1.1 Ausgangslage und Motivation

Das Institut für Elektrische Anlagen und Netze betreibt ein analoges Netzmodell im Spannungs- und Strommaßstab von 1000:1. Für die Erweiterung des Netzmodells soll ein Transformator mit variabler Schaltgruppe (Y, YN, D) der Ober- und UnterSpannungsseite entworfen werden. Zudem soll noch eine Tertiärwicklung, die je nach Beschaltung als Regelwicklung für einen Regeltransformator (Längs-, Quer- oder Schrägregeltransformator) oder als Ausgleichswicklung verwendet wird, vorgesehen werden.

Die maximale Nennspannung (Leiter-Leiter) soll 400 Volt betragen, der maximale Nennstrom soll dauerhaft ein Ampere – auch kurzzeitig bis zu fünf Ampere – halten.

Ausgehend von der Literaturrecherche soll eine theoretische Dimensionierung des Eisenkerns und der Wicklungen erfolgen. Da im Labor des Institutes für Elektrische Anlagen und Netze ein paar Transformatoren vorhanden sind, werden an diesen Messungen durchgeführt. Anschließend werden die theoretisch dimensionierten Spezifikationen mit den gemessenen Werten verglichen. Wenn die resultierenden Ergebnisse übereinstimmen, wird der Transformator als Sonderexemplar vorerst nur für eine Phase bestellt.

An diesem Objekt werden Messungen zur Ermittlung der realen Transformator Kenngrößen für unterschiedliche Schaltgruppen durchgeführt und gegebenenfalls das Design angepasst.

1.2 Forschungsfragen

Der Modelltransformator soll in seinen Eigenschaften maßstabsgerecht einen realen Leistungstransformator nachbilden und allen Anforderungen des Originals nachempfunden sein. Insbesondere der Leerlaufstrom und die relative Kurzschlussspannung sollen so nah wie möglich an reale Verhältnisse angepasst werden. Dazu sind eine entsprechende Dimensionierung des Kerns und der Wicklungen vorzunehmen.

1.2.1 Auslegung und Anforderungen

- a. Hauptwicklungen
 - Die Wicklungen erfolgen primär und sekundär für 230 V Phasenspannung.

- Es wird Strom von 1 A und eine kurzzeitige Belastbarkeit (etwa eine Sekunde lang) bis 5 A benötigt.
- Der Leerlaufstrom soll möglichst klein gehalten werden. Die Wunschhöhe liegt unter einem Prozent.
- Die relative Kurzschlussspannung u_k liegt im Referenzbereich zwischen 10 und 15 %.

b. Regelwicklungen

- Die verwendete Spannungshöhe ist 30 V, die Stromstärke 1 A.
- Die variable Einschaltung erfolgt durch fünf Anzapfungen.
- Die Regelwicklung soll auch als Ausgleichwicklung verwendbar sein.

c. Kernbauform

- Es werden Fünf-Schenkelkerntransformatoren oder
- drei einphasigen Ringkerntransformatoren untersucht.

2 Allgemeine Grundlagen zu Transformatoren

2.1 Geschichte

Der Physiker Hans Christian Oersted entdeckte im Jahr 1820, dass elektrischer Strom, der in einem Leiter fließt, ein Magnetfeld erzeugt. André Marie Ampère definierte im Jahr 1826 die Beziehung zwischen Strom und Magnetfeld. Michael Faraday, ein englischer Experimentalphysiker, erkannte im Jahr 1831, dass ein änderndes Magnetfeld den Stromfluss in einem geschlossenen Stromkreis bewirkt, welcher durch das Magnetfeld verbunden ist. Carl Friedrich Gauß stellte wiederum fest, dass Magnetpole nicht isoliert existieren können. Diese Phänomene stellten die Beziehung zwischen Elektrizität und Magnetismus her und wurden zur Grundlage für die Wissenschaft des Elektromagnetismus. [1]

Das Jahr 1885 gilt als das Geburtsjahr des Transformators. Die drei ungarischen Ingenieure Ottó Titusz Blathy, Miksa Deri und Károly Zipernowsky gelten als seine Erfinder [2]. Die Grundidee des Transformators basiert im Induktionsgesetz. Dieses wurde 1831 von Michael Faraday ermittelt, welcher von 1791 bis 1867 lebte.

2.2 Technische Realisierung und Anwendungen

Transformatoren bestehen aus einem geschlossenen Eisenkern und mindestens zwei darauf sitzenden Wicklungen. Die eine Wicklung, die Eingangswicklung, nimmt elektrische Leistung auf, und die andere, die Ausgangswicklung, gibt elektrische Leistung ab.

Da zwischen Eingangs- und Ausgangswicklung keine leitende Verbindung besteht, wird diese Leistungsübertragung induktiv übertragen. Die Voraussetzung dafür ist Wechselspannung.

Transformatoren dienen zur Übertragung elektrischer Energie von Systemen einer Spannung in Systemen anderer Spannungen.

Das Hauptanwendungsgebiet des Transformators liegt in der Elektrotechnik und in der Leistungsübertragung der Energieversorgung auf verschiedenen Spannungsebenen. Die Transformatoren ermöglichen die wirtschaftliche Übertragung, die flexible Verteilung und die sichere Anwendung elektrischer Energie.

Eine wirtschaftliche Energieübertragung über große Entfernungen ist – wegen der quadratischen, mit dem Strom steigende Verlustleistung – nur bei kleinen Strömen möglich. Das setzt bei vorgegebener Übertragungsleistung eine hohe Spannung voraus. Transformatoren lassen die Spannungen beliebig vergrößern und verkleinern. Die elektrischen Energieversorgungsnetze sind weltweit fast ausschließlich Drehstrom, mit unterschiedlichen Spannungsebenen. Zwischen dem Generator und der Übertragungsleitung wird ein Transformator geschaltet, der die Generatorspannung in die gewünschte

Übertragungsspannung umwandelt. Am Ende der Übertragung setzt ein Transformator die Spannung auf die Verbraucherspannung herab.

Transformatoren unterscheiden sich durch die Verwendungsart. Es wird zwischen

- Transformatoren für die Energieversorgung, wie Verteil- oder Netztransformatoren, Maschinentransformatoren und Netzkoppeltransformatoren,
- Industrietransformatoren, wie Schweiß-, Ofen-, Anlass- und Stromrichtertransformatoren,
- Bahntransformatoren und
- Sondertransformatoren, wie beispielsweise Prüf-, Schutz-, und Steuertransformatoren [3]

unterschieden.

Der Transformator findet auch in der Stromversorgung von elektrischen und elektronischen Geräten Anwendung, beispielsweise ist der Transformator in Netzteilen zu finden. Der Transformator dient ebenso zur Bereitstellung von elektrischer Gleichspannung in unterschiedlicher Höhe. Dies geschieht entweder durch Transformatoren in Verbindung mit Gleichrichterschaltung oder die heute oft verwendeten Netzteile, die ein Schaltnetzteil mit einer höheren Frequenz betreiben.

Der Transformator bedient sich auch in der Messtechnik, um Spannungen und Ströme bei der Galvanischen Trennung von Messobjekten auf die einheitlichen praktischen Werte zu transformieren.

2.3 Grundprinzip

Die Wirkungsweise eines Transformators lässt sich grundsätzlich durch die im Folgenden aufgelisteten Mechanismen beschreiben.

- Eine Wechselspannung auf der Primärseite des Transformators bewirkt, entsprechend dem Induktionsgesetz, einen wechselnden magnetischen Fluss im Kern. Der wechselnde magnetische Fluss wiederum induziert auf der Sekundärseite des Transformators eine Spannung. Dies wird als Spannungstransformation bezeichnet.
- Ein Wechselstrom in der Sekundärwicklung bewirkt, dem Ampèreschen Gesetz entsprechend, einen Wechselstrom in der Primärwicklung. Hier kommt es zur Stromtransformation.

Der Magnetisierungsstrom wird zum Aufbau des magnetischen Feldes benötigt, zusätzlich zu Magnetisierungsstrom fließt noch in der Regel wesentlich größer als diese der Wirkstrom.

2.3.1 Grundgleichung eines idealen Transformators

Der Transformator besteht aus dem Eisenkern und der Kupferwicklung. Der Eisenkern dient zur magnetischen Kopplung der elektrischen Kreise und die Wicklung zur Erzeugung des magnetischen Flusses. Die zugeführte elektrische Energie von der Primärwicklung mit der Windungszahl N_1 und Spannung U_1 wird zunächst in magnetische Energie umgesetzt und ist schließlich wieder an der Sekundärwicklung mit der Windungszahl N_2 und Spannung U_2 als elektrische Energie abgreifbar. Abbildung 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Transformators.

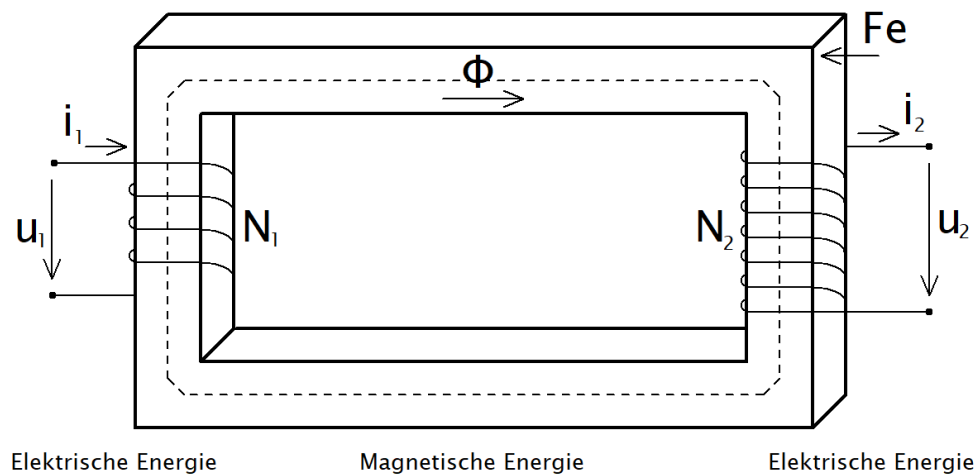


Abbildung 1: Aufbau eines Transformators.

Der ideale Transformator ist verlustlos, weist sowohl keine Ohm'schen als auch keine Magnetisierungsverluste auf. Daraus folgt der von der Primärwicklung erzeugte magnetische Fluss ϕ , verlustlos auch durch die Sekundärwicklung fließt.

Beim Leerlaufbetrieb erzeugt der Strom durch die Primärwicklung (Leerlaufstrom I_0 , Magnetisierungsstrom I_μ) einen sinusförmigen magnetischen Fluss der Form.

$$\phi(t) = \hat{\phi} \cos \omega t \quad (1)$$

Den Zusammenhang zwischen dem magnetischen Fluss ϕ im Eisenkern und der in der Wicklung mit der Windungszahl N induzierte Spannung u beschreibt das Faraday'sche Induktionsgesetz.

$$u(t) = -N \frac{d\phi}{dt} = N\hat{\phi} \omega \sin \omega t \quad (2)$$

Die Spannungsamplitude ist $\hat{u} = 2\pi f N \hat{\phi}$. Für sinusförmige Größen gilt der Zusammenhang $U = \hat{u}/\sqrt{2}$. Damit kann Formel (2) folgendermaßen umgeformt werden:

$$U = \sqrt{2} \pi f N \hat{\phi} = 4,44 f N \hat{\phi} \quad (3)$$

Die Spannung, die an die Wicklung gelegt wird, ist proportional mit dem Scheitelwert des magnetischen Flusses, der sich im Eisenkern ausgebildet hat.

$$U \sim \phi \quad (4)$$

Daraus folgt, dass eine Erhöhung der Spannung eine Erhöhung des magnetischen Flusses und eine Verkleinerung der Spannung eine Verkleinerung des Flusses zur Folge hat. Zu bemerken ist auch, dass die Größe des Flusses unabhängig von dem magnetischen Widerstand ist, in den der Fluss vorzufinden ist.

Zur Erzeugung des magnetischen Flusses ist ein Magnetisierungsstrom nötig. Seine Größe hängt von dem magnetischen Widerstand ab. Je größer der Widerstand, desto größer ist auch der Magnetisierungsstrom. Die Durchflutung θ , entsteht aus dem Produkt von Magnetisierungsstrom i_μ und Windungszahl N , sowie auch durch das Produkt von magnetischem Fluss ϕ und magnetischem Widerstand R_m [4].

$$\theta = i_\mu N = \phi R_m \quad (5)$$

Unter der Voraussetzung, dass beide Wicklungen von dem gleichen magnetischen Fluss ϕ durchsetzt werden, gelten diese Formeln für die Effektivwerte der Spannungen.

$$U_1 = 4,44 f N_1 \hat{\phi} \quad (6)$$

$$U_2 = 4,44 f N_2 \hat{\phi} \quad (7)$$

Der ideale Transformator hat keine Verluste, keinen Leerlaufstrom und keine Streuverluste. Im Leerlauf verhalten sich die Klemmenspannungen gleich wie die Windungszahlen [5].

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (8)$$

Wenn an die zweite Wicklung ein Verbraucher angeschlossen wird, verursacht dies den Strom i_2 . Es ändert sich dadurch der magnetische Fluss im Kern. Dadurch ist das Spannungsgleichgewicht auf der ersten Wicklung gestört. Zum Magnetisierungsstrom i_μ fließt ebenfalls noch der Zusatzstrom i_1 , der die Wirkung des Verbraucherstromes kompensiert.

Aus dem Durchflutungsgleichgewicht und den Effektivwerten ist die folgende Gleichung festzuhalten.

$$I_1 N_1 = I_2 N_2 \quad (9)$$

Die Ströme in den Wicklungen verhalten sich umgekehrt proportional – wie die zugehörigen Windungszahlen – nur dann, wenn der Zusatzstrom I_1 sehr groß ist im Vergleich zum Magnetisierungsstrom I_μ . Somit wird der Transformator auch als Stromwandler und (8) als Spannungswandler bezeichnet.

Durch die entsprechende Wahl der Windungszahlen N_1 und N_2 können mit einem Transformator Wechselspannungen und Strom sowohl hoch-, als auch heruntertransformiert werden.

2.3.2 Reale Transformatoren

Der reale Transformator unterscheidet sich vom idealen Transformator durch die verschiedenen Verlustmechanismen.

- In den Leitungen der beiden Wicklungen treten Wärmeverluste auf.
- Es gibt Eisenverluste, die das Eisen durch Hysterese und Wirbelstromverluste erwärmen.
- Magnetisierungsverluste, die zum Aufbau der Magnetischen Feld im Kern notwendig ist.
- Ebenso gibt es Streuverluste. Nicht der gesamte magnetische Fluss, der in der Primärwicklung erzeugt wird, erreicht die Sekundärwicklung. Dasselbe gilt für den Gegenfluss, der infolge der Durchflutung der Sekundärwicklung entsteht.

Die Verlustkenngröße eines realen Transformators ist bei der Ersatzschaltungen ersichtlich.

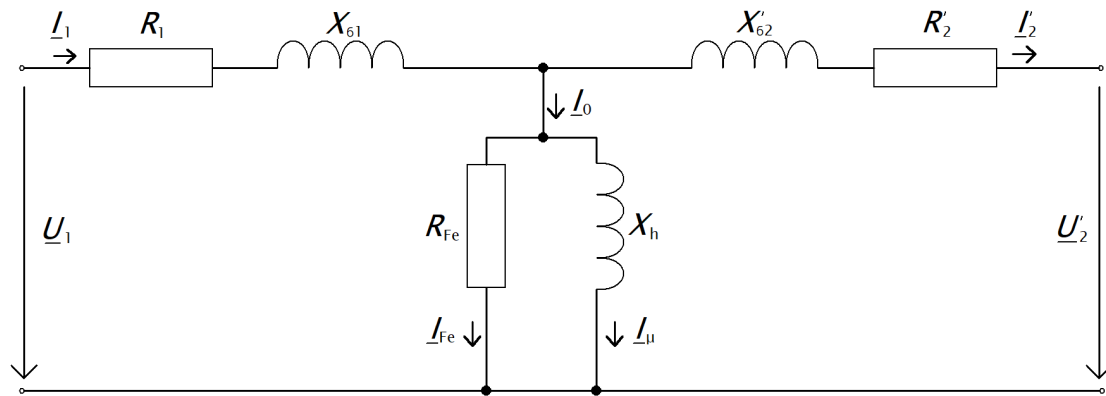


Abbildung 2: Ersatzschaltbild mit realen Transformator Kenngrößen.

Die realen Verhältnisse werden dann durch die vorgeschalteten Ohm'schen Wicklungswiderstände R_1 und R_2 und Streublindwiderstände $X_{\sigma 1}$ und $X_{\sigma 2}$ erfasst. Eisenverluste werden durch R_{Fe} und die Magnetisierungsverluste durch X_h dargestellt.

Wicklungsverluste stellen unerwünschte Verluste der Stromwärmeleistung dar. Da die Wicklungen in den meisten Fällen aus Kupfer sind, nennt man dies Kupferverlustleistung. Die Kupferverlustleistung ist belastungsabhängig und wächst mit dem Quadrat des Stromes. Deshalb ist der Belastung des Transformators Grenzen gesetzt. Durch Überlastung ist der Isolierstoff der Wicklung gefährdet. Bei kleiner Überschreitung wird die Lebensdauer des Transformators herabgesetzt.

Wenn sich der magnetische Fluss ändert, wird in den, den Fluss der umschließenden, elektrischen Leitern eine elektrische Spannung induziert. Auf Grund der Leitfähigkeit des Eisens, führt diese Spannung zu Wirbelströmen, welche das Eisen erwärmen. Die induzierte Spannung ist abhängig von der Eisenquerschnittfläche, der magnetischen Flussdichte und der Frequenz. Die Wirbelstromverluste nehmen mit der induzierten Spannung quadratisch zu.

Aufgrund der Unterteilung der Eisenfläche in elektrisch voneinander isolierte Bleche, wird durch die geringere Fläche in den einzelnen Elementen weniger Spannung induziert. Der Ohm'sche Widerstand für den Wirbelstrom wird größer. Durch diese Aufteilung des Eisens in gestapelte und isolierte Bleche werden die Wirbelstromverluste stark reduziert [6].

Die Flussänderung bewirkt die ständig wechselnde Ausrichtung der Elementarstrukturen im Eisen. In diesem Fall entstehen magnetische Dipole durch mikroskopische Reibung. Es entstehen Magnetisierungsverluste, welche Hysterese-Verluste genannt werden. Wirbelstrom- und Hysterese-Verluste werden gemeinsam als Eisenverluste P_{Fe} bezeichnet. Diese treten bereits im Leerlauf in voller Höhe auf und ändern sich kaum mit der Belastung. Der Magnetisierungsstrom I_μ dient zum Aufbau des Magnetfeldes im Kern. Die Querschnittfläche des Kernes ist ein Maß dafür, wie viele Weiss-Bezirke vom gegebenen Magnetfeld der Primärspule ausgerichtet werden können.

In der Primärwicklung fließt der Leerlaufstrom. Dieser bestehend aus dem Magnetisierungsstrom I_μ [7]. Der Magnetisierungsstrom dient zur Erzeugung des Flusses, gekennzeichnet durch Magnetisierungsverluste P_μ , der Eisenverluststrom dient zur Deckung der Eisenverlustleistung.

$$I_0 = \sqrt{I_\mu^2 + I_{Fe}^2} \quad (10)$$

Da der Eisenkern eine endlose magnetische Leitfähigkeit hat, fließt ein Teil des Flusses auch außerhalb des Eisenkerns. Da die den Kern umgebende Luft – ähnlich wie Vakuum – eine relativ schlechte magnetische Leitfähigkeit aufweist, kann ein Großteil des magnetischen Flusses in das magnetische gut leitfähige Kernmaterial geführt werden. Durch konstruktive Maßnahmen stellt der Streufluss ein wesentliches Kriterium zur Maximierung des Wirkungsgrades bei der Leistungsübertragung dar. Der Streufluss soll so klein wie möglich gehalten werden.

Je nach geometrischer Gestaltung des Kerns und den Anordnungen der Wicklungen kann der Streufluss sehr klein gehalten werden. Transformatoren werden so gebaut, dass die Wicklungen nicht auf getrennten Schenkeln sitzen, sondern übereinander positioniert werden. Aus Isolationsgründen liegt die Oberspannungswicklung über der Unterspannungswicklung - wobei der Streufluss kleiner wird, wenn alle Windungen der Wicklungen gleichmäßig auf dem gesamten Kern verteilt sind [4].

2.3.3 Der Wirkungsgrad

Jeder Energieumformungsprozess ist mit Leistungsverlusten behaftet. Je kleiner die im Kapitel 2.3.2 erwähnten Verluste, desto besser ist der Wirkungsgrad des Transformators.

Der Wirkungsgrad eines Transformators ist - wie bei jeder anderen Maschine – als Verhältnis von Ausgangsleistung zu Eingangsleistung definiert. Ein genauerer Ansatz in Bezug auf den Wirkungsgrad beim Transformator, wenn der Wirkungsgrad anhand der gemessenen Verlustwerte im Leerlauf- und Kurzschlussversuch ermittelt wird. Der Wirkungsgrad ist dann wie folgt gegeben.

$$\eta = \frac{\text{Ausgangsleistung}}{\text{Eingangsleistung}} = \frac{\text{Ausgangsleistung}}{\text{Ausgangsleistung} + \text{Verluste}} \quad (11)$$

Der prozentuale Wirkungsgrad eines Transformators liegt im Bereich von 70 bis 99 Prozent, je nach Transformatorgröße. Bei großen Leistungstransformatoren mit geringen Verlusten kann der Wirkungsgrad bis zu 99,7 Prozent betragen, während der Wirkungsgrad von Kleintransformatoren - beispielsweise 100 Voltampere – um 80 Prozent liegt und Kleinsttransformatoren – um einen Voltampere – kaum einen 50-prozentigen Wirkungsgrad kommen [8].

3 Konstruktive Einflussgrößen für den Transformator

Obwohl alle Transformatoren auf dem gleichen Prinzip arbeiten – sowohl für die Signalübertragung eines Mikrophons, als auch für Energieübertragung in der Energietechnik von mehreren Megawatt an Leistung - müssen trotzdem für die unterschiedlichen Zwecken verschiedene Faktoren berücksichtigt werden, um die jeweilige Anforderung zu erfüllen. Es gibt verschiedene Ausführung von Wicklungen und eine Vielzahl an Transformator-kernen. Außerdem müssen ab einer gewissen Größe auch die Wärmeverluste durch geeignete Kühlungssysteme abgeführt werden.

Einer der grundlegenden Schritte beim Transformatorenentwurf ist die Auswahl des richtigen Kernmaterials und der richtigen Kernbauform. Silizium-, Nickeleisen-, Amorphe- und Ferritmaterialien - jedes dieser Materialien hat positive Argumente in Hinblick auf den jeweiligen Kosten-, Größe-, Frequenz- und Wirkungsgrad. Ist diese Auswahl geschehen, wird versucht, an der vorgegebenen Wickelquerschnittfläche des Kerns die Wicklungen unterzubringen. Dies geschieht unter der Beobachtung, dass der maximal zulässige Strom durch den ausgewählten Querschnitt des Drahtes gewährleistet wird.

Abhängig von Anwendung und Anforderung überwiegen bestimmte der aufgelisteten Eigenschaften. Aufgrund ihrer Interaktion und gegenseitigen Abhängigkeit ist es schwierig, alle Parameter in einem Designentwurf zu optimieren. Wenn Volumen und Gewicht von großer Bedeutung sind, kann der Transformator mit einer höheren Frequenz betrieben. Dies hat jedoch eine Verschlechterung des Wirkungsgrades zur Folge. Wenn die Frequenz nicht erhöht werden kann, kann eine Verringerung des Gewichts und des Volumens durch Auswahl eines effizienteren Kernmaterials möglich sein. Das führt jedoch zu erhöhten Anschaffungskosten. Daher müssen vernünftige Kompromisse eingegangen werden, um die gewünschten Entwurfsziele zu erreichen. Die Ausgangsleistung ist ebenso zu beachten. Damit ist die Nennspannung multipliziert mit dem maximalen Strombedarf gemeint. Die Sekundärwicklung muss in der Lage sein, die Last innerhalb der festgelegten Grenze zu versorgen. Ein weiterer Punkt, der zu beachten ist, ist der maximal zulässigen Temperaturanstieg für den Transformator, wenn dieser in einer bestimmten Temperaturumgebung verwendet wird. [9]

3.1 Kernmaterialien des Transformators

In der Elektrotechnik verwendeten magnetischen Materialien werden in weichmagnetische Materialien und hartmagnetische Materialien eingeteilt. Das Hauptkriterium für die Klassifizierung ist die Hysterese-Schleife. Hartmagnetische Materialien werden üblicherweise zur Erzeugung des

Magnetfeldes in Elektromotoren und Generatoren verwendet. Weichmagnetische Materialien können bei einem relativ geringen Wert der Magnetfeldstärke einen hohen Wert der Flussdichte erreichen. Dies bedeutet, dass weiche Materialien leicht magnetisiert und entmagnetisiert werden können. Kernmaterialien wie Silizium-Eisen, Nickeisen, Amorphe, Nanokristalline und Ferritmaterialien sind am öftesten in Verwendung für Transformatorkerne. [10]

3.1.1 Eigenschaften der Materialien

Jedes Material verfügt über positive und negative Eigenschaften. Die Hauptmerkmale jedes Materials lassen sich wie folgt zusammenfassen.

Tabelle 1: Eigenschaften der Kernmaterialie von Transformatoren

Material	Eigenschaften	Vorteil	Nachteil
Silizium Eisen	<i>Silizium-Legierungen werden meistens für Netztransformatoren angewendet.</i>	<ul style="list-style-type: none"> - breiter Anfangspermeabilitätsbereich - hohe Sättigungsflussdichte - relativ niedrige Kosten - mechanisch robust - verschiedene Verfügbarkeit der Kernbauformen 	<ul style="list-style-type: none"> - hoher Hysterese-Verlust - hoher Wirbelstromverlust - hohe elektrische Leitfähigkeit - Akustisches Rauschen (Magnetostriktion)
Amorphe Legierung	<i>Eisenbasislegierung aus Silizium ohne Kristallstruktur</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Sättigungsflussdichte - Niedriger Hysterese-Verlust - Niedriger Wirbelstromverlust - Mechanisch robust 	<ul style="list-style-type: none"> - Sehr hoher Schallpegel (Magnetostriktion) - Geringe Kernbauform verfügbar - relativ teuer - Kernbauformen schwierig zu formen
Nano- kristalline Legierung	<i>Eisenbasislegierung von Silizium mit einem geringen Anteil an Kristallstruktur</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Sättigungsflussdichte - niedriger Hysterese-Verlust - sehr niedrigere Schallpegel 	<ul style="list-style-type: none"> - Wirbelstromverlust - Mechanisch zerbrechlich - Verfügbarkeit der Kernbauformen gering (schwierig zu formen) - relativ teuer.
Ferrite	<i>Keramikmaterial aus Pulver mit verschiedenen Oxiden und Kohlenstoffen</i>	<ul style="list-style-type: none"> - niedriger Hysterese-Verlust - sehr kleine Wirbelstromverluste - sehr niedrigere Schallpegel 	<ul style="list-style-type: none"> - niedrige Sättigungsflussdichte - magnetische Eigenschaften verschlechtern sich mit

- | | |
|--|---------------------------|
| - relativ günstig | zunehmender |
| - verschiedene Kernbauformen verfügbar | Temperatur |
| | - mechanisch zerbrechlich |
-

Für kleine Transformatoren gibt es eine enorme Vielfalt an Kernbauformauführungen (siehe Abbildung 3 und 4). Bei den großen Transformatoren ist Silizium-Eisen mit der E-I-Kernbauform am häufigsten in Verwendung [11].

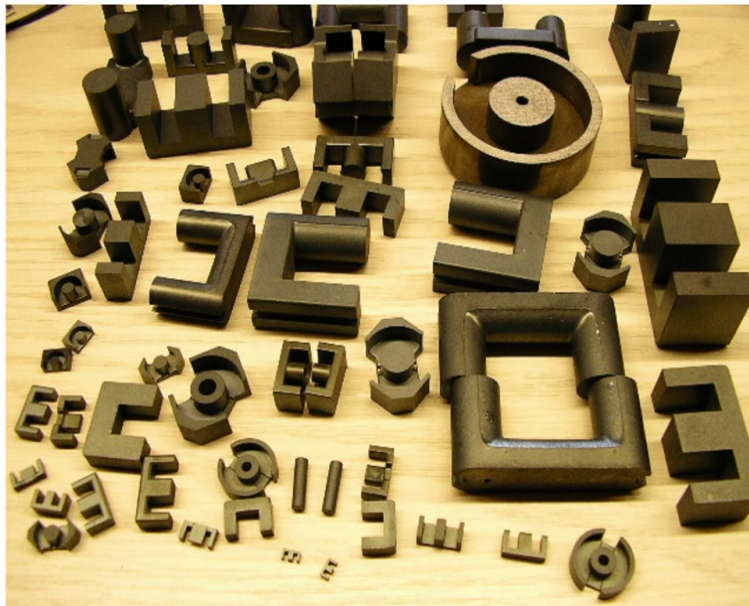


Abbildung 3: Vielfalt der Kernbauformen für Transformatoren.



Abbildung 4: Vielfalt der Bauformen für Ringkern-Transformatoren.

3.2 Die Wicklungen und ihre Materialien

Am häufigsten wird massiver Kupferdraht verwendet, bei Großtransformatoren auch Aluminium. Aluminiumdraht ist zwar leichter und im Allgemeinen preiswerter als Kupferdraht, es muss jedoch ein größerer Leiterquerschnitt verwendet werden, um den gleichen Strom wie bei Kupfer führen zu können. Die Wicklungen bilden den elektrischen Teil des Transformators. Das Ziel bei der Konstruktion ist es, auf dem durch den Kern vorgegebenen Wickelquerschnitt möglichst viele Windungen unterzubringen. Um die Streuverluste und Kurzschlussspannung gering zu halten werden die Primär- und Sekundärwicklungen übereinander gewickelt. Da die Unterspannungswicklung mit weniger Spannung betrieben wird, ist es sinnvoll, diese aus Isolationsgründen nahe dem Kern zu platzieren. Die Drähte sind mit einer Kunstharzlackierung zwischen einander isoliert. Wicklungen werden gemäß ihrer Anordnung in zwei Arten unterschieden. Es gibt die Zylinder- und die Scheibe-Wicklung. Ebenso wird bei der Konstruktionsart durch Lagenwicklung und Wendewicklung differenziert. Als Schirmungsfunktion kommen auch Folien und Bänder zum Einsatz.

3.3 Wachstumsgesetze – Bauleistung, Frequenz und Baugröße

Die Leistung eines Transformators ist durch das Produkt aus Nennspannung und Nennstrom gegeben. Für die vorgegebenen Werte der Spannung, der Frequenz und der maximale magnetische Flussdichte die über die Sättigung des Kernmaterials begrenzt ist, folgt, dass die Windungszahl und der Querschnittfläche des Eisens einen wesentlichen Raum und Materialbedarf eines Transformators bestimmen.

Wenn die Windungszahl gering ist, wird ein größerer Fluss und damit ein großer Eisenquerschnitt benötigt, um die erforderliche Spannung zu induzieren. Demgegenüber genügt bei einer großen Windungszahl ein kleiner Fluss und damit kleiner Eisenquerschnitt. Ist der Transformator mit wenig Eisen entworfen, hat er viel Wicklungsmaterial. Bei Transformatoren mit viel Eisenanteil ist dies umgekehrt. [12].

Wenn der Raumbedarf für die Primär- und Sekundärwicklung untersucht wird, wird der Fensterquerschnitt der Wicklung A_w aus dem Produkt der Windungszahl N dem Leiterquerschnitt A_{Cu} der beiden Wicklungen erhoben.

Angenommen, dass die beide Wicklung die gleiche Stromdichte J haben, ergeben sich die nachstehenden Überlegungen.

$$A_{Cu1} = \frac{I_1}{J} ; A_{Cu2} = \frac{I_2}{J} \quad (12)$$

und

$$A_w = \frac{I_1 N_1}{J} + \frac{I_2 N_2}{J} \quad (13)$$

Unter Berücksichtigung des Durchflutungsgleichgewichtes und der Vernachlässigung des Leerlaufstroms, $I_1 N_1 \sim I_2 N_2$ folgt für Erhebung der Wicklungsquerschnittfläche.

$$A_w = \frac{2 I_1 N_1}{J} \quad (14)$$

Aus der Leistung des Transformators durch die Multiplikation der Gleichung (14) mit der Gleichung (18) kann eine direkte Relation zur übertragbaren Leistung S und der Frequenz f hergestellt werden [13].

$$A_w A_{Fe} = \frac{2 I_1 U_1}{4,44 J f \hat{B}} \sim \frac{S}{f} \quad (15)$$

Wird bei gleicher Ausgangsleistung die Betriebsfrequenz erhöht, erniedrigt sich demzufolge das Produkt der Flächen. Wird etwa ein Transformator bei fünf Kilohertz statt bei 50 Hertz betrieben, kann bei der Errechnung des Produkts ein Faktor um 100 Einheiten kleiner gewählt werden. Dies hat eine entsprechende Verkleinerung des Transformators zur Folge. Abbildung 5. zeigt wie niedrigere Frequenzen zwingend mit höherer Baugröße einhergehen.

Aus der Gleichung (15) werden die einfache Gesetzmäßigkeiten zwischen den elektrischen Kenngrößen und der Baugrößen abgeleitet. Die Scheinleistung ist die folgende.

$$A_w A_{Fe} 2,22 J f \hat{B} = I_1 U_1 \sim S \quad (16)$$

Bei konstanter Stromdichte und magnetischer Flussdichte ist die Scheinleistung der vierten Potenz der linearen Abmessung proportional. $A_w A_{Fe} [m^4] \sim S \sim k^4$.

Da das Gewicht proportional zum Volumen ist, gilt für das Gewicht $[m^3] \sim k^3$.

Die Gesamtverluste, bestehend aus Kupfer- und Eisenverlusten, wachsen nur volumenproportional, das heißt mit der dritten Potenz der linearen Abmessung k^3 .

Bei der Erhöhung der Bauleistung ergeben sich als Vorteile eine größere spezifische Leistung und einen besseren Wirkungsgrad. Hierfür müssen jedoch Kühlungsverfahren angewendet werden.

Die kühlende Oberfläche wächst nur mit dem Quadrat der linearen Abmessung.

Bei einer Vergrößerung der Einheitsleistung nehmen die Verluste rascher zu als die Oberfläche, womit sich die Wärmeabgabe erschwert. Aus Rücksicht auf die zulässige Erwärmung der Isolierstoffe sind immer intensivere und aufwendigere Kühlmethoden anzuwenden.

Dies ist in Bezug auf die Energiesysteme ein vielfacher ausgenutzter Vorteil. Mit größeren Einheiten hinsichtlich der Bauleistung kann der relative Aufwand verringert werden [13].

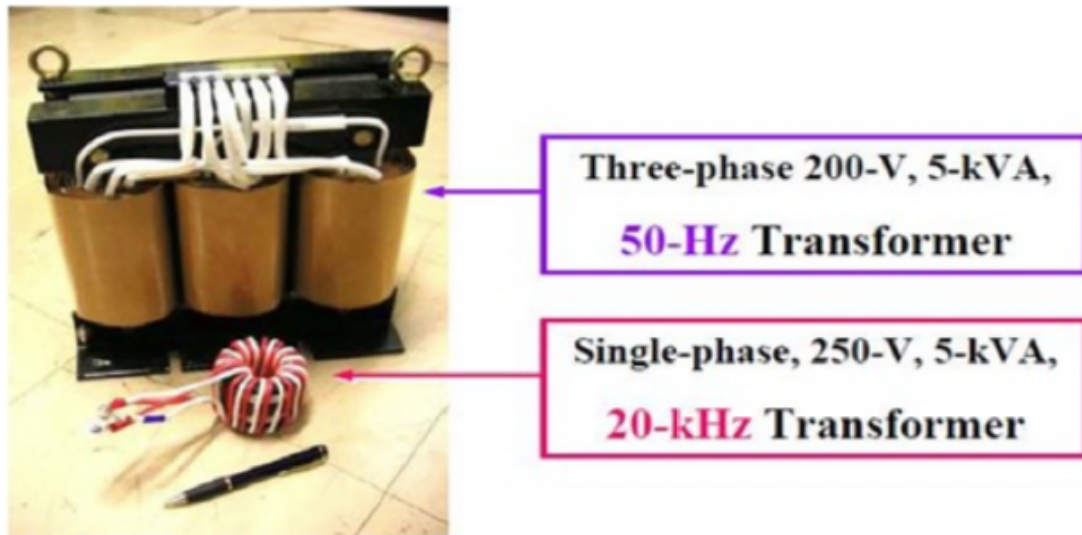


Abbildung 5: Baugröße des Transformators in Abhängigkeit der Frequenz [10].

3.4 Gleichungen zur Berechnung des Transformators

Zur Berechnung der Transformator-Parameter werden als erster Schritt die benötigten Gleichungen hergeleitet. Die Magnetisierung des Eisens berechnet sich aus der maximalen magnetischen Flussdichte \hat{B} und dem Eisenquerschnitt mit der Fläche A_{Fe} .

$$\hat{\phi} = \hat{B} A_{Fe} \quad (17)$$

Wird dies in die Gleichung (3) eingesetzt und umgeformt, entsteht die Gleichung (18), die als Transformatorhauptgleichung geführt wird.

$$U = 4,44 f N \hat{B} A_{Fe} \quad (18)$$

Eine weitere Transformatorgleichung entsteht aus der Gleichung (5), woraus der Wert des Magnetisierungsstroms i_{μ} entsteht.

$$i_{\mu} = \frac{\phi R_m}{N} = \frac{\hat{B} A_{Fe} R_m}{N} \quad (19)$$

Der magnetische Widerstand errechnet sich aus dieser Gleichung.

$$R_m = \frac{l_{Fe}}{A_{Fe}\mu} \quad (20)$$

Daraus folgt der Magnetisierungsstrom eines Transformators. Dieser lässt sich mit dieser Gleichung errechnen.

$$i_\mu = \frac{\hat{B}l_{Fe}}{N\mu} \quad (21)$$

4 Messungen an ausgewählten Transformatorexemplaren

Am Institut für Elektrische Anlagen und Netze sind verschiedene Transformatoren vorhanden, angefangen vom kleinen einphasigen Ringkerntransformator bis hin zu dreiphasigen Transformatoren in unterschiedlichen Größen und Formen. Für die Messungen werden Exemplare gesucht, die ungefähr der Größe des Modelltransformators entsprechen. Anhand der Messungen wird ersichtlich, wie der Modelltransformator ungefähr aussehen wird und welche Kernbauform am besten für die Anforderungen geeignet ist. In den Abbildungen 6 bis 10 sind die ausgewählten Transformatoren dargestellt, bei denen die Messungen durchgeführt werden. In der angeführten Tabelle sind die Nenndaten der Typenschilder von den Transformatoren dargestellt.

Die Ringkerntransformatoren – Nummer 1 und 2 – wurden jeweils von der gleichen Firma produziert. Ihr Kern, die Wickelmaterialien und die Abmessungen sind identisch. Der einzige Unterschied liegt in der Anzapfung.

Der Transformator Nummer 3 wurde geöffnet, damit der innere Aufbau ersichtlich wird. Dieser Transformator ist auf drei einphasigen Mantelkerntransformatoren aufgebaut (siehe Abbildung 9). An der Verzapfung der Kernbleche wurde oben und unten geschweißt. Ebenso wurde an den vier Ecken des Kernes geschraubt, um das Kernblechpaket zusammenzuhalten.

Der dreiphasige Transformator Nummer 4 ist eine Ausführung eines Dreischenkelkerntransformators. Hier sind die Kernbleche auch mit Schrauben zusammengesetzt. Die Schrauben dienen unter anderem, um die Transformatoren einfach im Gehäuse zu befestigen.

Tabelle 2: Daten aus Typenschild von Transformatoren.

<i>Nenndaten aus Typenschild für Ringkerntransformatoren</i>				
	<i>Eingang Spannung</i>	<i>Ausgang Spannung</i>	<i>Frequenz</i>	<i>Primär- und sekundäre Nennstrom</i>
	<i>In Volt</i>	<i>In Volt</i>	<i>In Herz</i>	<i>In Amper</i>
<i>Ringkern Trafo 1</i>	100; $100\sqrt{3}$	100; 50; 25; 12,5; 6,25	50	2
<i>Ringkern Trafo 2</i>	100; $100\sqrt{3}$	100; $100\sqrt{3}$	50	2
<i>Nenndaten aus Typenschild für Dreiphasigen Transformatoren</i>				
<i>Drehstrom Trafo 3</i>	100 + 100 + + 100 + 100	200 + 55 + + 115 + 35	50	4
<i>Drehstrom Trafo 4</i>	100; $100\sqrt{3}$	100	50	2

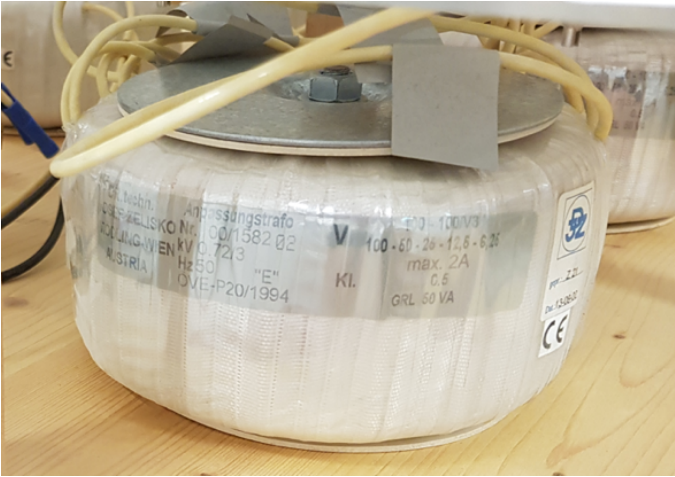


Abbildung 6: Ringkerntransformator Nummer 1.



Abbildung 7: Ringkerntransformator Nummer 2.



Abbildung 8: Dreiphasiger Transformator Nummer 3 mit Ansicht auf den Innenaufbau I.



Abbildung 9: Dreiphasiger Transformator Nummer 3 mit Ansicht auf den Innenaufbau II.



Abbildung 10: Dreiphasiger Transformator Nummer 4 in der Dreischenkelausführung.

Aus den Leerlauf- und Kurzschlussmessungen werden die Kenndaten des Transformators bestimmt. Beim Leerlaufversuch können der Leerlaufstrom, die Eisenverluste und die Magnetisierungsverluste ermittelt werden. Im Kurzschlussversuch werden die Wärmeverlustleistung in den Wicklungen und die Streuverluste ermittelt. Aus beiden Daten der Messversuche werden die Elemente der Ersatzschaltung des Transformators bestimmt.

4.1 Leerlaufversuch

Der Leerlaufbetrieb findet dann statt, wenn der Transformator an der Ausgangswicklungen keine Last angeschlossen hat. Der Leerlaufstrom I_{10} , welcher in die Primärwicklung fließt, ist wesentlich kleiner als der Nennstrom I_{1N} – nämlich zwischen 0,5 und 5 Prozent, abhängig vom Kernmaterial und der Baugröße des Transformators. Da der Leerlaufstrom relativ klein ist, können die Kupfer- und Streuverluste vernachlässigt werden. Um genaue Ergebnisse zu bekommen ist es sinnvoll, die Kupferverluste mit $P_{vCu} = R_{Cu} \cdot I_{10}^2$ von der Leerlaufleistung abzuziehen. Bei der offenen sekundären Seite ist der I_{20} praktisch gleich null. Daraus folgt, dass die Leerlaufverluste P_{10} den Eisenverlusten P_{Fe} des Transformators gleichzusetzen sind [6].

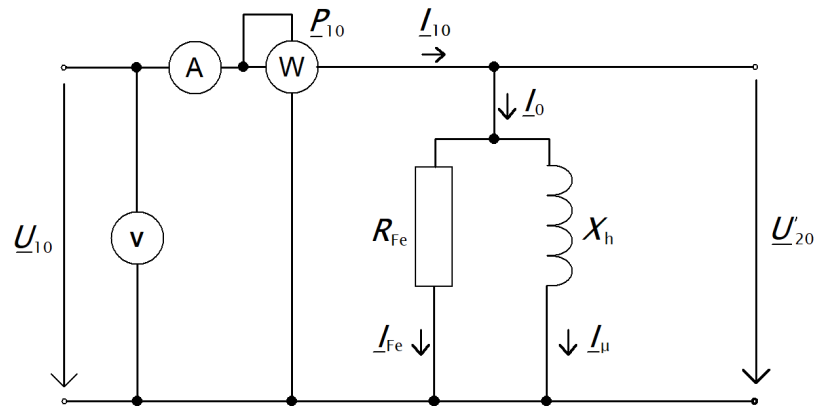


Abbildung 11: Ersatzschaltbild für den Leerlaufversuch.

Der aufgenommene Leerlaufstrom $I_{10} = \sqrt{I_{\mu}^2 + I_{Fe}^2}$ teilt sich auf in den Magnetisierungsstrom I_{μ} und den Strom für die Eisenverluste I_{Fe} .

Der Phasenverschiebungswinkel ergibt sich aus dieser Gleichung.

$$\cos \varphi_{10} = \frac{P_{10}}{U_{10} \cdot I_{10}} = \frac{I_{Fe}}{I_{10}} \quad (22)$$

Für die Verlustströme in Bezug auf die Eisen- und Magnetisierungsverluste wird das Folgende festgehalten.

$$I_{Fe} = I_{10} \cos \varphi_{10} ; I_{\mu} = I_{10} \sin \varphi_{10} \quad (23)$$

Der Eisenwiderstand, die Hauptreaktanz und die Induktivität berechnen sich wie hier dargestellt.

$$R_{Fe} = \frac{U_{10}}{I_{Fe}} ; X_h = \frac{U_{10}}{I_{\mu}} ; L_h = \frac{X_h}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (24)$$

4.2 Kurzschlussversuch

Bei kurzgeschlossener Ausgangswicklung wird die Eingangsspannung so lange langsam erhöht, bis der Nennstrom des Transformators im Eingang fließt. Beim realen Transformatoren entstehen Kupferverluste und magnetische Streuverluste, die man als Kurzschlussimpedanz zusammenfasst ($R_k = R_1 + R_2'$; $X_k = X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2}'$). Die dazu notwendige Kurzschlussspannung U_{1k} ist kleiner als die Nennspannung U_{1N} , wird als relative Kurzschlussspannung u_k ausgedrückt ($u_k = U_{1k}/U_{1N}$) und in Prozent angegeben. Die Kurzschlussspannung ist das Maß für den Innenwiderstand Z_k – ein

Scheinwiderstand – des Transformators im Kurzschlussbetrieb $Z_k = U_{1k}/I_{1N}$. Dieser Innenwiderstand ist maßgebend für den Dauerkurzschlussstrom I_{kN} mit $I_{kN} = I_{1k}/u_k$.

Die aufgenommene Leistung beim Kurzschlussversuch entspricht praktisch den in den Wicklungen umgesetzten Stromwärmeverlusten $P_k \approx P_{Cu}$ [6].

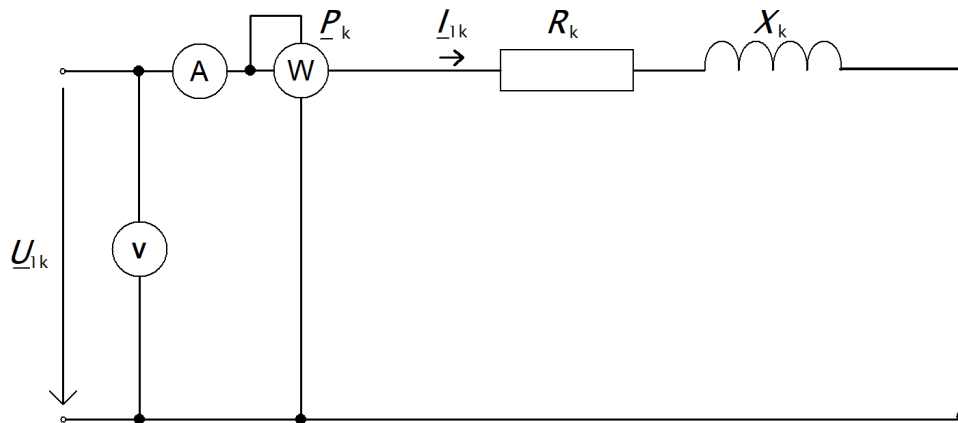


Abbildung 12: Ersatzschaltbild für den Kurzschlussversuch.

$$P_k = P_{Cu} = I_{1k}^2 \cdot R_k \quad (25)$$

Für den Phasenverschiebungswinkel gilt diese Gleichung.

$$\cos \varphi_{1k} = \frac{P_{1k}}{U_{1k} \cdot I_{1N}} \quad (26)$$

4.3 Messergebnisse

Gemessen wurde mit dem Messgerät Dewetron 3020, welches die Spannung direkt und den Strom über einem Shunt mit 0,1 Ohm misst. In der Software Dewesoft wurden dann die Spannung, der Strom sowie die Wirkleistung und die Blindleistung zur Messanzeige gebildet. Auf zwei Ringkerntransformatoren und zwei unterschiedlichen dreiphasigen Transformatoren wurden der Leerlauf und der Kurzschluss durchgeführt und gemessen.

Die Messresultate der einzelnen Transformatoren werden in der Tabelle 3 ersichtlich. Die Messung an dem Transformator 3 wurde nur auf einer Phase und anstatt mit 400 Volt nun mit 200 Volt Spannung versorgt, da der Regelbare Spannung Transformator zu dem Zeitpunkt der Messungen

nur bis maximal 200 Volt zur Verfügung war. Auf die anderen Transformatoren (Trafo 1, 2 und 4) wurden die Messungen auf die 100 Volt ausgelegte Spannung Anzapfungen durchgeführt.

Tabelle 3: Messergebnisse der Leerlauf- und Kurzschlussversuches.

<i>Messergebnisse der Leerlaufversuches</i>				
	I_{10}	U_{10}	P_{10}	Q_{10}
	<i>in A</i>	<i>in V</i>	<i>in W</i>	<i>in VAR</i>
<i>Trafo 1</i>	<i>0,011</i>	<i>100</i>	<i>1,0</i>	<i>0,9</i>
<i>Trafo 2</i>	<i>0,012</i>	<i>100,1</i>	<i>1,0</i>	<i>0,9</i>
<i>Trafo 3</i>	<i>0,41</i>	<i>200,3</i>	<i>31</i>	<i>77</i>
<i>Trafo 4</i>	<i>0,43</i>	<i>100,4</i>	<i>25</i>	<i>35</i>
<i>Messergebnisse der Kurzschlussversuches</i>				
	I_{1k}	U_{1k}	P_{1k}	Q_{1k}
	<i>in A</i>	<i>in V</i>	<i>in W</i>	<i>in VAR</i>
<i>Trafo 1</i>	<i>2,09</i>	<i>3,7</i>	<i>7</i>	<i>3</i>
<i>Trafo 2</i>	<i>2,025</i>	<i>4,321</i>	<i>8,68</i>	<i>1,104</i>
<i>Trafo 3</i>	<i>4</i>	<i>34,5</i>	<i>79</i>	<i>113</i>
<i>Trafo 4</i>	<i>2,07</i>	<i>2,9</i>	<i>6</i>	<i>1</i>

Die Messergebnisse der Ringkerntransformatoren sind fast identisch. Da die Geometrie, die Spannung und der Strom bei beiden Transformatoren gleich sind, ist ausschließlich an der Anzapfung ein Unterschied zu erkennen. Dies beeinflusst die Ergebnisse des Leerlaufversuchs jedoch nur im sehr geringen Ausmaß. An den dreiphasigen Transformatoren ist ein sehr großer Leerlaufstrom im Verhältnis zu den Ringkerntransformatoren zu erkennen. Der Grund dafür ist die Kernbauform zu. Bei dem Kurzschlussversuch des dreiphasigen Transformator Nummer 3 dominieren – aufgrund der hohen Streuung – die Blindleistungsverluste über die Wirkleistungsverluste, die wiederum mit der Kernbauform zu begründen sind. Bei dem Ringkerntransformator und dem dreiphasige Transformator Nummer 4 überwiegen im Gegensatz die Wirkleistungsverluste an den Wicklungen gegenüber den Blindleistungsverlusten.

Aus den Messergebnissen werden die jeweiligen Transformatoren-Parameter des Ersatzschaltbildes abgeleitet.

4.3.1 Ergebnisse aus dem Leerlaufversuch am Ringkerntransformator 1

Die Leerlaufverluste sind gleich den Eisenverlusten $P_0 = P_{Fe}$. Für den Strom I_{Fe} ergibt sich diese Gleichung.

$$I_{Fe} = \frac{P_{10}}{U_{10}} = \frac{1 \text{ W}}{100 \text{ V}} = 0,01 \text{ A} \quad (27)$$

Der Magnetisierungsstrom berechnet sich wie hier ersichtlich.

$$I_{\mu} = \sqrt{I_{10}^2 - I_{Fe}^2} = \sqrt{0,011^2 - 0,01^2} = 0,00458 \text{ A} \quad (28)$$

Hier ist das Ergebnis der Hauptinduktivität.

$$X_h = \frac{U_{10}}{I_{\mu}} = \frac{100 \text{ V}}{0,00458 \text{ A}} = 21,83 \text{ k}\Omega \quad (29)$$

Der Eisenwiderstand wird hier aufgezeigt.

$$R_{Fe} = \frac{U_{10}}{I_{Fe}} = \frac{100 \text{ V}}{0,01 \text{ A}} = 10 \text{ k}\Omega \quad (30)$$

Ebenso wurde der Phasenverschiebungswinkel gemessen.

$$\cos \varphi_{10} = \frac{P_{10}}{I_{10} \cdot U_{10}} = \frac{1,0 \text{ W}}{0,011 \text{ A} \cdot 100 \text{ V}} = 0,909; \quad \varphi_{10} = 24,62^\circ \quad (31)$$

4.3.2 Ergebnisse aus dem Kurzschlussversuch am Ringkerntransformator 1

Bei kurzgeschlossenen Sekundärklemmen kann der Einfluss des hochohmigen Querzweiges vernachlässigt werden. Es gilt das folgende Ergebnis.

$$\cos \varphi_k = \frac{P_{1k}}{I_{1k} \cdot U_{1k}} = \frac{7 \text{ W}}{2,09 \text{ A} \cdot 3,7 \text{ V}} = 0,905; \quad \varphi_k = 25,14^\circ \quad (32)$$

Die gesamte Längsimpedanz ergibt diese Werte.

$$Z_k = \frac{U_{1k}}{I_{1k}} = \frac{3,7 \text{ V}}{2,09 \text{ A}} = 1,77 \Omega \quad (33)$$

$$R_1 + R'_2 = R_k = Z_k \cdot \cos \varphi = 1,602 \Omega; R_1 = R'_2 = 0,801 \Omega \quad (34)$$

$$X_{1\sigma} + X'_{2\sigma} = X_k = Z_k \cdot \sin \varphi = 0,75 \Omega; X_{1\sigma} = X'_{2\sigma} = 0,375 \Omega \quad (35)$$

Der Kurzschlussspannung ergibt den Wert von 3,7 Prozent.

$$u_k = \frac{U_{1k}}{U_{1N}} = \frac{3,7 \text{ V}}{100 \text{ V}} = 0,037 \text{ V}; u_k = 3,7\% \quad (36)$$

Gemessene und abgeleitete Messwerte der Transformatoren sind in der Tabelle 4 dargestellt. Aufgrund der sehr ähnlichen Ergebnisse der beide Ringkerntransformatoren wird ab sofort nur noch mit dem Ringkerntransformator 1 weitergearbeitet.

Tabelle 4: Leerlauf und Kurzschlussversuche an verschiedenen Transformatoren

	Gemessen				Abgeleitete Werte aus den Messungen			
Leerlaufmessung	I_{10} in A	U_{10} in V	P_{10} in W	Q_{10} in VAR	I_{μ} in A	I_{Fe} in A	R_{Fe} in Ω	X_h in Ω
Trafo 1	0,011	100	1,0	0,9	0,00458	0,01	10000	21830
Trafo 3	0,41	200,3	31	77	0,379	0,154	1300	528
Trafo 4	0,43	100,4	25	35	0,35	0,25	401,6	286,8
Kurzschlussmessung	I_{1k} in A	U_{1k} in V	P_{1k} in W	Q_{1k} in VAR	u_k in %	I_{kN} in A	$R_1 + R'_2$ in Ω	$X_{1\sigma} + X'_{2\sigma}$ in Ω
Trafo 1	2,09	3,7	7	3	3,7	54,05	1,602	0,75
Trafo 3	4	34,5	79	113	17,25	23,18	4,916	7,06
Trafo 4	2,07	2,9	6	1	2,9	68,96	1,399	0,044

4.4 Schlussfolgerungen

Prinzipiell unterscheiden sich die Transformatorexemplare durch die Kernbauform, durch die übertragbare Leistung, durch die Geometrie – und dementsprechend durch das Volumen – sowie auch durch die Wicklungen.

Gestapelte Blechkerne sind weit verbreitet. Sie werden wegen der einfachen Anfertigung verwendet, dadurch ergeben sich auch niedrige Herstellungskosten. Im Gegensatz zeichnen sich

die Ringkerne durch den höheren Wirkungsgrad und die kleinere Baugröße aus. Ringkerne sind aber sehr aufwendig anzufertigen besonderes in Hinblick auf die Wicklung der Windungen. Aus den gemessenen und abgeleiteten Werten im Vergleich zu den anderen Kernbauformen ist ersichtlich, dass der Leerlaufstrom bei den Ringkerntransformatoren am geringsten ist. Dies hat zur Folge, dass der magnetische Fluss – gleich dem Aufbau des Ringkerns – kreisförmig verläuft. Da es keinen Luftspalt im Kern gibt, sind weniger Kernverluste ersichtlich, was einen effizienten Ringkerntransformator kennzeichnet.

4.4.1 Eigenschaften des Ringkerntransformators gegenüber anderen Bauformen

Der Hauptvorteil des ringkernförmigen Transformators gegenüber den anderen Kernkonfigurationen liegt in seinem nahezu idealen magnetischen Flussverlauf. Dieser Flussverlauf führt zu einem geringeren Streumagnetfeld, zu weniger Volumen und Gewicht, weniger hörbarem Brummen und einer höheren Effizienz. Die Vorteile sind für bestimmte Anwendungen relevant, die von der Art der Einsätze und der Empfindlichkeit anderen Schaltungen gegenüber und den Streumagnetfeldern abhängen. Diese Vorteile müssen mit den etwas höheren Anschaffungskosten und dem höherem Einschaltstrom abgewogen werden. [14].

4.4.1.1 Geringere Streumagnetfelder

Die Wicklung der Ringkerntransformatoren ist auf den ganzen Umfang aufgeteilt. Dies unterscheidet sie von anderen Bauformen, wo sich die Wicklung nur konzentriert auf eine Region befinden. Es ist bewiesen [15], dass die Anordnung der Wicklung einen sehr großen Einfluss auf das Streufeld des Ringkerntransformators hat. Wenn ein geringes Streufeld erwünscht ist, wird das beste Ergebnis erzielt, wenn die Wicklung auf den ganzen Umfang des Kerns verteilt ist.

Ein anderer Einfluss auf das geringe Streufeld ist, dass der Kern keinen Luftspalt besitzt. Der Kern ist, wie ein Wickelfeld aus einem durchgehenden Stahlband, fest gewickelt, indem der Anfang und das Ende des Bandes geschweißt werden.

4.4.1.2 Weniger Volumen und Gewicht

Aufgrund des hohen Wirkungsgrades der Ringkerntransformatoren sind diese im Vergleich zu herkömmlichen Transformatoren in Gewicht und Größe viel kleiner. Ringkerntransformatoren sind etwa halb so groß und halb so schwer wie Standardtransformatoren. Ein 90 VA E-I laminiertes Transformator kann durch einen Ringkerntransformator mit der gleichen Leistung aber mit dem halben Volumen und Gewicht ersetzt werden.

4.4.1.3 Weniger Brummen

Hörbares Brummen in Transformatoren wird durch Vibrationen der Wicklungen und Kernschichten aufgrund von Kräften zwischen Spulenwindungen und Kernblechen verursacht. Klemmen, Bänder, Nieten und Schweißnähte können nicht die gesamte Struktur binden. Laminierungen neigen dazu, sich im Laufe der Zeit zu lockern und ein zunehmendes Brummen zu erzeugen. Die Art der Konstruktion des Ringkerntransformators kann dazu beitragen, die akustischen Geräusche zu dämpfen. Der Kern ist wie eine Wickelfeder fest gewickelt, punktgeschweißt, geglüht und mit Epoxidharz beschichtet. Unmittelbar nach dem Anlegen der Spannung ist ein kurzes Brummen zu hören, welches nach einige Sekunden auf ein leiseres Niveau abklingt. Dies ist aufgrund des größeren Einschaltstroms des Ringkerns.

4.4.1.4 Höhere Effizienz

Der ideale Magnetkreis des Ringkerns und die Fähigkeit, mit einer höheren Flussdichte als bei anderen Kernbauformen zu arbeiten, verringern die Anzahl der erforderlichen Drahtwindungen und/oder die Größe der Kernquerschnittsfläche. Beide Parameter reduzieren die Verluste.

4.5 Zwischenzusammenfassung

Schlussfolgernd ist festzuhalten, dass der Ringkerntransformator zur Erreichung eines geringeren Leerlaufstroms am bestens geeignet ist und dadurch die besten Ergebnisse erzielt werden können. Für die relative Kurzschlussspannung erfüllt der Transformator Nummer 3 die Anforderungen. Bei dem Entwurf des Prototyps muss ein Kompromiss zwischen dem Leerlaufstrom und der relativen Kurzschlussspannung getroffen werden.

Um eine relative Kurzschlussspannung $u_k = 10 - 15\%$ zu erreichen, ist man zwangsmäßig auf passive externe Induktivitäten in Serie angewiesen.

5 Entwurf eines Ringkerntransformators

Mit den Erkenntnissen aus der Literaturrecherche und den Messungen wird versucht einen theoretischen Entwurf eines Ringkerntransformators zu konfigurieren. Für die Berechnung der Transformatorckenngößen, wie etwa der Leistung, dem Querschnitt des Eisens und der Windungszahl, werden die benötigten Formeln hergeleitet und dargestellt.

Das Entwurfsverfahren ist einem im Vorhinein überlegten Konzept nach aufgebaut. Zuerst werden die benötigten Berechnungen aufgelistet. Danach erfolgen die Spezifikationen. Die Parameter der Anforderungen an den Transformator werden erhoben - Eingangsspannung und Strom, Ausgangsspannung und Strom, die Betriebsfrequenz und die dadurch erforderliche gesamte Leistung. Darauf folgt ein Kernentwurf, der die Kernmaterialien, die maximale Flussdichte und die verfügbare Wickelquerschnittfläche beinhaltet. Ist dies geschehen, kommt es zum Wicklungsentwurf mit Berücksichtigung der Windungszahl, der Stromdichte und des Drahtquerschnittes. Abschließend werden die Verluste – in dem Fall die Kupferverluste – aufgezeigt.

5.1 Benötigte Berechnungen

5.1.1 Leistung des Transformators

Die Ausgangsleistung des Transformators wird ermittelt.

$$P_s = \frac{100 \%}{\eta \text{ in } \%} (U_s \cdot I_s) \quad (37)$$

Wobei zu beachten ist, dass η der Wirkungsgrad des Transformators ist. Je größer der Transformator ist, desto idealer kann der Wirkungsgrad sein. Bei der Durchsicht der Datenblättern der Kernbauformen von verschiedenem Hersteller ist aufgefallen, dass die Kerne ab etwa 300 Watt einen besseren Wirkungsgrad haben, der über 95 Prozent erreichen kann.

5.1.2 Eisenquerschnitt

Normalerweise kann der Eisenquerschnitt direkt aus dem Datenblatt des Herstellers entnommen werden. Im Datenblatt scheint der Wert auf, der für einen bestimmten Eisenquerschnitt ermittelt wurde. Für die Berechnung genügen bei Kleintransformatoren Faustformel. Die Darstellung im Datenblatt ist auch mit der Faustformel möglich, die aber nur für die Bemessung des

Eisenquerschnitts angegeben wird, im Übrigen ist der genaue Zahlenwert nicht kritisch da sowieso auf der nächst höherem verfügbarem Ausmaß zugegriffen werden muss. Unter der Voraussetzung für einen bestimmten magnetischen Flussdichte, Frequenz und stromdichte gilt die Faustformel für die genannten zusammenhänge [16].

$$A_{Fe} = \sqrt{\frac{14 \cdot P_s}{\frac{f}{10} \cdot \frac{\hat{B} \cdot J}{10000}}} \quad (38)$$

Abhängig vom Kernmaterial setzt sich die magnetische Flussdichte aus Werten zwischen 0,8 T bis zu 1,7 T (1 T = 10000 Gauss) zusammen.

Angenommen $f = 50$ in [Hz]; A_{Fe} in [cm^2]; $J = 2,55$ in [$\frac{A}{mm^2}$]; P_s in [W]; $\hat{B} = 1,2$ T dann ergibt sich die folgende Gleichung.

$$A_{Fe} = \sqrt{\frac{14 \cdot P_s}{5 \cdot 1,2 \cdot 2,55}} \sim \sqrt{P_s} \quad (39)$$

5.1.3 Windungszahlen

Die Gleichung (18) kann einfach auf Windungszahlen umgeformt werden.

$$N = \frac{U}{4,44 \cdot f \cdot \hat{B} \cdot A_{Fe}} \quad (40)$$

Die Frequenz und die maximale Flussdichte werden zusammengefasst in eine Konstante. Praktischerweise wird der Eisenquerschnitt A_{Fe} in cm^2 angegeben.

$$N = \frac{38}{k_{Fe}} \cdot \frac{U}{A_{Fe}} \quad (41)$$

Der tatsächliche Eisenquerschnitt des Transformators mit Berücksichtigung der Blechisolation und der Schichtung ist niedriger, deswegen muss bei der Gleichung (41) der Eisenfüllfaktor k_{Fe} (zw. 0.91 bis 0.98) mitberücksichtigt werden.

5.1.4 Drahtdurchmesser

Aus der Formel der Kreisfläche ergibt sich der erforderliche Drahtdurchmesser d . Der Querschnitt des Drahtes hängt von der zulässigen Strombelastung (Stromdichte J) und dem fließenden Strom I ab.

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{Cu}}{\pi}}; A_{Cu} = \frac{I}{J} \quad (42)$$

Aus A_{Cu} in $[mm^2]$; I in $[A]$; J in $\left[\frac{A}{mm^2}\right]$ ergibt sich diese Gleichung.

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot I}{\pi \cdot J}} = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{I}{J}} \quad (43)$$

5.1.5 Wickelquerschnittfläche

Die Querschnittfläche der Wicklungen [16] berechnet sich nach dieser Formel.

$$A_w = k_w \cdot \left(\frac{N_1}{n_{F1}} + \frac{N_2}{n_{F2}} + \dots + \frac{N_i}{n_{Fi}} \right) \quad (44)$$

Anzumerken ist, dass k_w der Faktor für den Zuschlag für die Isolation berücksichtigt werden muss, das n_{Fi} ist die Einheitswindungszahlen pro cm^2 . Der ist aus der folgenden Tabelle zu entnehmen.

Tabelle 5: Abmessungen und Eigenschaften von Kupferdrähten.

Draht-durchmesser	Drahtdurch-messer mit Lack	Draht-querschnitt	Gewicht	Wider-stand	Windungs-zahl je cm^2	Höchststrom $i = 2,55$
d_{Cu} in mm	d_{Cu} L in mm	A_{Cu} in mm^2	G_{Cu} in g/m	R_{Cu} in Ω/m	n_f in $1/cm^2$	I_{max} in A
0,50	0,54	0,196	1,83	0,0894	300	0,500
0,55	0,59	0,238	2,20	0,0738	250	0,605
0,60	0,64	0,283	2,62	0,0621	210	0,720
0,65	0,69	0,334	2,97	0,0526	180	0,845
0,70	0,74	0,385	3,43	0,0455	160	0,980
0,75	0,79	0,444	3,95	0,0395	140	1,125

0,80	0,84	0,504	4,48	0,0348	120	1,280
0,85	0,90	0,570	5,07	0,0308	110	1,445
0,90	0,93	0,636	5,66	0,0275	100	1,620
0,95	1,00	0,711	6,34	0,0246	90	1,805
1,00	1,05	0,786	7,00	0,0223	83	2,000

Die effektive Querschnittfläche der Wicklungen definiert, wieviel des verfügbaren Fensterplatzes der Wicklung tatsächlich für die Windungen verwendet werden kann [9].

$$A_{weff} = 0,75 \cdot (\pi) \cdot \left(\frac{ID^2}{4} \right) \quad (45)$$

ID ist der innere Durchmesser, OD ist der Außendurchmesser und h ist die Höhe des Ringkerns.

5.1.6 Widerstand der Wicklungen

Die Berechnung des Widerstands R der Wicklungen erfordert die Kenntnisse der Länge l_{Cu} und der Querschnittsfläche A_{Cu} des Leiters sowie den spezifischen Widerstand ρ des Leitermaterials, in diesem Fall Kupfer.

$$R = \left(\frac{\rho \cdot l_{Cu} \cdot N}{A_{Cu}} \right) \quad (46)$$

Es ist aufwendig, die mittlere Windungslänge eines Ringkerns zu berechnen, da es viele verschiedene Wickelmöglichkeiten gibt. Eine Näherungsformel, welche die mittlere Länge einer Windung bestimmt [17], wird hier dargestellt.

$$l_{Cu} = 0,8 \cdot (OD + 2(h)) \quad (47)$$

5.2 Parameter des Modelltransformators

Die Resultate der beiden Ringkerntransformator unterscheiden sich von einander nur im geringen Ausmaß. Aufgrund dessen wurde der Ringkerntransformator Nummer 1 ausgewählt, um weitere Parameter, wie beispielsweise die Windung und die Kernabmessung zu bestimmen. Demzufolge wurde die Windungszahl berechnet, um zu bestimmen, mit aus vielen Windungen der Ringkerntransformator bestehen soll. Primär und sekundär hat der Ringkerntransformator 400

Windungen. Aus der Geometrie des Transformators heraus wurde versucht den Eisenquerschnitt aus der Kreisflächenberechnung zu bestimmen. Die ausgenutzte Fläche für die Wicklung und Isolation wurden von der gesamten Kreisfläche abgezogen. Es ist unbekannt, wie viele Isolationsschichten verwendet wurden. Ebenso ist unklar, welche Anordnung der Wicklung vorgenommen wurde. Deshalb wurden näherungsweise die Dimensionen des Ringkerntransformators mit dem äußeren Diameter ($OD = 12cm$), dem inneren Diameter ($ID = 6cm$) und der Höhe ($h = 6cm$) geschätzt. So konnten Erkenntnisse zu den wichtigsten konstruktiven Parametern eines Transformators gesammelt werden, nämlich der Kernabmessung und der Anzahl der Wicklungen.

5.2.1 Einflussparameter für den Transformatorentwurf

Aus der Tabelle 4 geht hervor, dass ein Ringkerntransformator am besten für die Anforderungen zum Leerlaufstrom $I_0 < 1\%$ ist, obwohl der Ringkerntransformator mit einer niedrigeren Eingangsspannung ($U_1 = 100V$) ausgelegt ist, als der Prototyp. Mit der Gleichung 4 und Gleichung 17 wird veranschaulicht, dass eine höhere Eingangsspannung einen höheren magnetischen Fluss zur Folge hat. Dies bedeutet zwingend eine höhere magnetische Flussdichte.

Aus den abgeleiteten Werten der Messungen folgt, dass der Magnetisierungsstrom betragsmäßig nahezu $I_\mu \approx 0,005A$ betragen muss, um die Anforderungen im Hinblick auf den Leerlaufstrom für das Transformatormodell erfüllen zu können.

Die Kurzschlussspannung wird einfacher durch die Längsimpedanz beeinflusst. Umso größer die Längsimpedanz desto größer wird der Kurzschlussspannung. Die Kurzschlussspannung ist auch ein Maß für den Kurzschlussstrom. Je kleiner der Kurzschlussspannung, desto größer wird der Kurzschlussstrom.

5.3 Berechnung des Leerlaufstroms und Untersuchung der Einflussparameter

Zu Beginn erfolgt die Bestimmung der Transformator-Sekundärleistung aus der Gleichung (23). Diese wird mit den Werten des Datenblatts für Ringbandkern von der Firma Karl Schupp AG verglichen. Für den Wirkungsgrad von $\eta = 95\%$ $U_2 = 230V + 30V$ und $I_2 = 1A$ gilt die folgende Gleichung.

$$P_s = \frac{100\%}{\eta \text{ in } \%} (U_s I_s) = 273,6W \quad (48)$$

Angenommen, dass $\hat{B} = 1,2 T$; $J = 2,55 \left[\frac{A}{mm^2} \right]$; und $f = 50 [Hz]$; dann ist aus der Gleichung (38) der Eisenquerschnittfäche des Kerns abzulesen.

$$A_{Fe} \sim \sqrt{P_s}; \quad A_{Fe} = 16,55 \text{ cm}^2; \text{ bzw. } A_{Fe} = 17 \text{ cm}^2 \quad (49)$$

Aus dem Datenblatt von Schupp ist zu erkennen, das die am nächsten verfügbarem passendem Größen mit $A_{Fe} = 20 \text{ cm}^2$ und den Abmessungsdaten $OD = 140 \text{ mm}$; $ID = 60 \text{ mm}$; $h = 50 \text{ mm}$; $l_{Fe} = 31,4 \text{ cm}$ verfügbar sind.

Aus der Gleichung (40) und dem Eisenfüllfaktor $k_{Fe} = 0,95$ für die Primärwicklung ergibt sich der nachstehende Wert.

$$N_1 = \frac{38}{0,95} \cdot \frac{230}{20} = 460 \text{ wdg.} \quad (50)$$

Diese Werte stehen für die Sekundärwicklung und für die 30V Tertiär (N'_2) Regelwicklung.

$$N_2 = 460 \text{ wdg.} \quad N'_2 = 60 \text{ wdg.} \quad (51)$$

Der Drahtdurchmesser für den Primär und Sekundären Strom bei $I_1 \ \& \ I_2 = 1A$ beträgt 0,706 Millimeter.

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 1A}{\pi \cdot 2,55 A/mm^2}} = 0,706 \text{ mm} \quad (52)$$

Für den Durchmesser $d = 0,706 \text{ mm}$ ist der höchst zulässige Strom $I_{max} = 0,98 A$ (siehe Tabelle 5). Dadurch muss ein höherer Durchmesser ausgewählt werden, damit der Transformator beim Betrieb nicht an seine Grenzen gestoßen wird. Der ausgewählte Durchmesser beträgt $d = 0,75 \text{ mm}$.

Der effektive Wert der Wicklungsquerschnittfläche ist definiert.

$$A_{weff} = 0,75 \cdot (\pi) \cdot \left(\frac{6^2}{4} \right) = 21,2 \text{ cm}^2 \quad (53)$$

Die Wickelquerschnittfläche berechnet sich aus der Gleichung (43). Wobei $k_w = 1,4$ als Zuschlag für die Isolation bei kleinen Transformatoren [16] zu berücksichtigen ist.

$$A_w = 1,4 \cdot \left(\frac{460}{140} + \frac{520}{140} \right) = 9,8 \text{ cm}^2 \quad (54)$$

Es ist somit theoretisch erkennbar, dass für die Wicklung und Isolation ausreichend Raum zu Verfügung steht.

Hinsichtlich dem Widerstand der Wicklungen ergibt sich die mittlere Windungslänge einer Windung.

$$l_{Cu} = 0,8 \cdot (OD + 2(h)) = 19,2 \text{ cm} \quad (55)$$

Der primäre und sekundäre Widerstand zusammen mit den tertiären Widerstand ergänzt (R_2). Wobei der spezifische Widerstand des Kupfers mit $\rho = 17,5 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$ definiert ist.

$$R_1 = \left(\frac{\rho \cdot l_{Cu} \cdot N}{A_{Cu}} \right) = 3,48 \Omega; \quad R_2 = 3,93 \Omega \quad (56)$$

Beim Ringkerntransformator wurde des weiteren ein Kernsättigungsversuch durchgeführt. Infolgedessen wurde festgestellt, dass der Ringkerntransformator erst bei sehr hoher Spannung eine Kernsättigung herbeiführen kann (siehe Abbildung 13). Der Ringkerntransformator wurde mit bis zu 1,7 der Nennspannung betrieben, bis die Sättigung des Kerns bemerkbar war. Ab diesem Wert steigt der Leerlaufstrom sehr langsam im Verhältnis zu der Spannung an. Aus Sicherheitsgründen wurde dieser Versuch bei 170 Volt abgebrochen.

Die Nennspannung ist also ein Parameter die beim Entwurf des Modells beachtet werden muss.

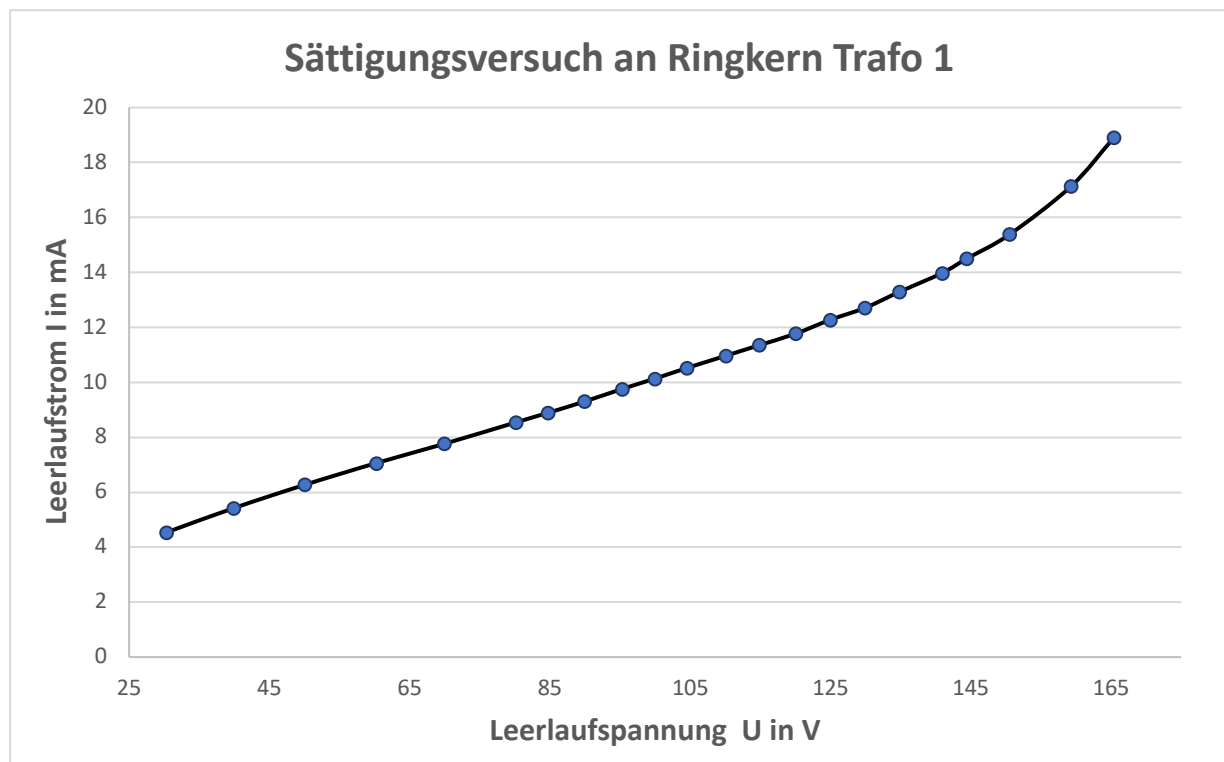


Abbildung 13: Sättigungskennlinie des Ringkerntransformators Nummer 1.

Als weiteres Ergebnis der Leerlaufmessung wurde festgestellt, dass der Eisenverluststrom größer ist als der Magnetisierungsstrom. Beim Ringkerntransformator ist der Magnetisierungsstrom betragsmäßig sehr gering. Dies hat zur Folge, dass der magnetische Fluss – gleich wie der Ringkernaufbau – kreisförmig verläuft. Ebenso ist der Weg des Eisens kürzer. Im Gegensatz dazu stehen hierbei die Eisenverluste, welche abhängig sind vom Kernmaterial und der Kernanfertigung. Diese beeinflussen den Leerlaufstrom beim Ringkerntransformator am meisten.

Im Gegensatz zu den Kernbauformen der dreiphasigen Transformatoren ist das Verhalten des Magnetisierungsstroms zum Eisenverluststrom umgekehrt. Der Weg des magnetischen Flusses ist länger mit einem unbequemen Verlauf an den Ecken. Dadurch wird ein Teil des Flusses durch die Streuung verloren. Dies geschieht im Besonderen in Bereichen des Kernes, wo sich keine Wicklungen befinden. Die höhere Streuung ist zwar gut für die Begrenzung des Kurzschlussstromes aber eben ungünstig für den Leerlaufstrom.

Es ist schwierig, die Eisenverluste (Wirbelstrom- und Hysterese-Verluste) exakt vorzuberechnen, da die lokalen Flussverhältnisse sowie die Verarbeitung des Kernes die Werte sehr stark beeinflussen.

Im Gegensatz dazu lässt sich der Magnetisierungsstrom eines Transformators durch die Gleichung (21) theoretisch einfacher bestimmen. Aus den abgeleiteten Werten der Messungen am Ringkern Transformator 1 folgt, dass der Magnetisierungsstrom betragsmäßig nahezu $I_{\mu} \approx 0,005 A$ betragen muss.

Aus der Gleichung (21) ergibt sich ein Wert von 0,0108 Amper, wobei $\mu_0 = 4 * \pi * 10^{-7} \frac{H}{m}$; $\mu_r = 60000$ für Mumetal Fe – Ni 78 – 80% aus Schupp AG. und $\hat{B} = 1,2 T$ zu beachten ist.

$$I_\mu = \frac{\hat{B} l_{Fe}}{N \mu} = 0,0108 A \quad (57)$$

Nun muss noch der Magnetisierungsstrom angepasst werden, um die Anforderung ($I_\mu \approx 0,005 A$) zu erfüllen. Aus der letzten Gleichung ist eindeutig abzulesen, dass einige Einflussgrößen angepasst oder verändert werden müssen. Die Eisenweglänge ist abhängig von der Geometrie des Kerns. Die Windungszahl ist einfach veränderbar, da aus der Gleichung (53) noch genügend Platz für mehrere Windungen vorhanden ist. Denkbar wäre auch ein Material mit höheren relativen Permeabilitätszahlen. Ebenso könnte auch die magnetische Flussdichte verringert werden.

Tabelle 6: Änderung der Parameter für den passenden Magnetisierungsstrom.

	l_{Fe} in cm	\hat{B} in T	N	μ_r	I_μ in A
Versuch 1	31,4	1,2	460	60000	0,0108
Versuch 2	31,4	1,2	600	70000	0,00714
Versuch 3	31,4	1,2	700	70000	0,00611
Versuch 4	31,4	1,0	650	70000	0,00549

Die Tabelle zeigt Variationen, um die Anforderung ($I_\mu \approx 0,005 A$) zu erfüllen. Dies sind theoretische berechnete Werte. Ob diese auch in der Realität realisierbar sind, kann nur von den Transformatorherstellern beantwortet werden.

In der nachstehenden Tabelle sind die theoretisch dimensionierten Parameter für den Entwurf eines Ringkerntransformators dargestellt. Es muss erwähnt werden, dass der Kupferquerschnitt A_{Cu} aufgrund der höheren Windungszahl größer gewählt werden soll.

Tabelle 7: Theoretisch dimensionierte Parameter für Ringkerntransformatoren.

Parameter für Ringkerntransformatoren										
A_{Fe} in cm ²	l_{Fe} in cm	OD in cm	ID in cm	h in cm	\hat{B} in T	μ_r	N_1	N_2	N'_2	A_{Cu} in mm ²
20	31,4	14	6	5	1,0	70000	650	650	85	0,504

5.4 Allgemeine Aspekte zur Berechnung der Kurzschlussspannung

Aus dem Ersatzschaltbild für den Kurzschlussversuch Abbildung 12 geht hervor, wie die Kurzschlussspannung konstruktiv beeinflusst werden kann. Der Kurzschlussspannung ist umso größer, je größer die Längsimpedanz (Wicklungswiderstand und Streureaktanz) ist. Der Wicklungswiderstand wird in Bezug auf der Wirkungsgrad des Transformators möglichst klein gehalten. Es bleibt noch die Möglichkeit, die Kurzschlussspannung über die Streureaktanz zu beeinflussen. Die Kurzschlussspannung ist ein Maß für den Kurzschlussstrom. Je kleiner der Kurzschlussspannung, desto größer wird der Kurzschlussstrom.

Im Hinblick auf den Spannungsabfall im Transformator ist eine kleine Kurzschlussspannung erwünscht, in Zusammenhang mit der Begrenzung des Kurzschlussstroms ist jedoch ein größere Kurzschlussspannung von Vorteil [4].

Die Anordnung der Wicklung um den Ringkern spielt eine wichtige Rolle. Beispielsweise kann ein gewisser Winkel des Kerns ohne Wicklung gelassen werden. Je größer diese Winkel ist, desto größer wird die Streureaktanz, dargestellt in der Abbildung 14 [15]. Ein kleiner Luftspalt im Kern würde die Streureaktanz erhöhen, dies ist für den Prototypen unerwünscht, da die Streureaktanzen einen großen Einfluss auf den Leerlaufstrom haben.

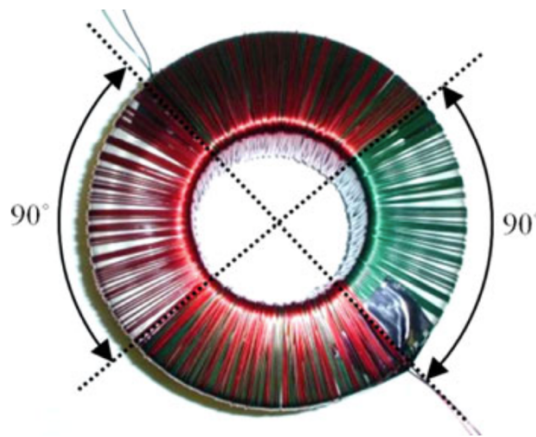


Abbildung 14: Beeinflussung der Streureaktanzen bei Anordnung der Wicklungen [15].

Wie im vorherigen Kapitel diskutiert, wird versucht die Streuverluste so klein wie möglich zu halten, um einen kleineren Leerlaufstrom zu erzielen. Es muss ein Kompromiss geschlossen werden, da auf beim Designentwurf viele Parameter voneinander abhängen und einander gegenseitig beeinflussen.

Da die Parameter der Längsimpedanz bei dem Entwurf schwer änderbar und eine Variation nicht möglich ist, ist die einfachste Lösung um eine größere, relative Kurzschlussspannung zu bekommen, externe Induktivitäten in Serie vorzuschalten.

6 Bau und Analyse eines Prototyps

Mit den theoretischen Erkenntnissen im Hintergrund wurden Hersteller befragt, ob technisch ein ähnlicher Transformator umsetzbar wäre. Der Prototyp des Transformators wurde mit folgenden Spezifikationen angefragt.

- *Nennspannung*
 - Primärwicklung 230 Volt, 650 Windungen
 - Sekundärwicklung 230 Volt, 650 Windungen
 - Tertiärwicklung 30 Volt, 85 Windungen mit Anzapfungen bei 6 / 12 / 18 / 24 Volt
- *Nennstrom*
 - alle Wicklungen auf maximalem Strom von einem Ampere
 - Drahtquerschnitt von 0,5 mm²
- *Kernabmessungen*
 - Eisenquerschnitt ca. 20 cm²
 - Eisenweglänge abhängig von dem Platzbedarf der Wicklungen; so klein wie möglich
 - Das Kernmaterial μ_r soll so groß wie möglich (> 70 000) sein.

Basierend auf unsere Anfrage wurden verschiedenen Kern- und Windungskonstruktionen angeboten. Einige Hersteller haben keine Angaben über das Kernmaterial bekannt gegeben. Das entsprechende Kernmaterial mit höherer Permeabilitätszahl ist schwer realisierbar. Nach einigen Überlegungen wurde die Kernabmessung um einen weiteren Schritt ergänzt, indem die Eisenquerschnittsfläche vergrößert wurde, weil beim konstanten magnetischen Fluss und einem größeren Eisenquerschnitt die magnetische Flussdichte kleiner wird.

Die Auswahl wurde auch wegen des Problems mit der Windung getroffen. Theoretisch wäre genug Platz aber zurzeit werden alle elektrischen Produkte maschinell angefertigt und deswegen ist ein Mindestwert für Wickelquerschnittsfläche der Windungen einzuhalten.

Eine weitere Transformatorconfiguration ist ein Prototyp aus höheren Windungszahlen, wie 940 Windungen, in einem sehr kleinen Eisenquerschnitt ($A_{Fe} = 7,5 \text{ cm}^2$). Aus der Gleichung (21) und der Tabelle Nummer 3 geht hervor, dass entweder die Eisenweglänge und/oder die magnetische Flussdichte so klein wie möglich gehalten werden soll. Eine weitere Möglichkeit ist es, die Windung und/oder die Permeabilitätszahl so groß wie möglich auszusuchen.

6.1 Aufbau

Aus den zahlreichen unterschiedlichen Angeboten und Konfigurationen wurde der Transformator mit folgenden Dimensionen ausgewählt und bestellt: Äußerer Durchmesser ($OD = 15,5\text{cm}$), innerer Durchmesser ($ID = 7,5\text{cm}$), maximale magnetische Flussdichte $\hat{B} = 0,83\text{ T}$, maximaler Strom von einem Ampere sowie Drahtquerschnitt von Kupfer mit $0,5\text{ mm}^2$, Primär- und Sekundärwicklung 230 Volt und 650 Windungen; für die Tertiärwicklung 85 Wiederholungen mit 30, 24, 18, 12 und 6 Volt. Wegen der hohen Windungszahl soll jedoch eine größere Kerndimension ausgewählt werden, um die Windung in der verfügbaren Wickelquerschnittfläche unterzubringen.

Der Prototyp wird auf der Abbildung 15 und 16 dargestellt. Es werden die Parameter des Ersatzschaltbildes durch die Leerlauf- und Kurzschlussmessung untersucht.

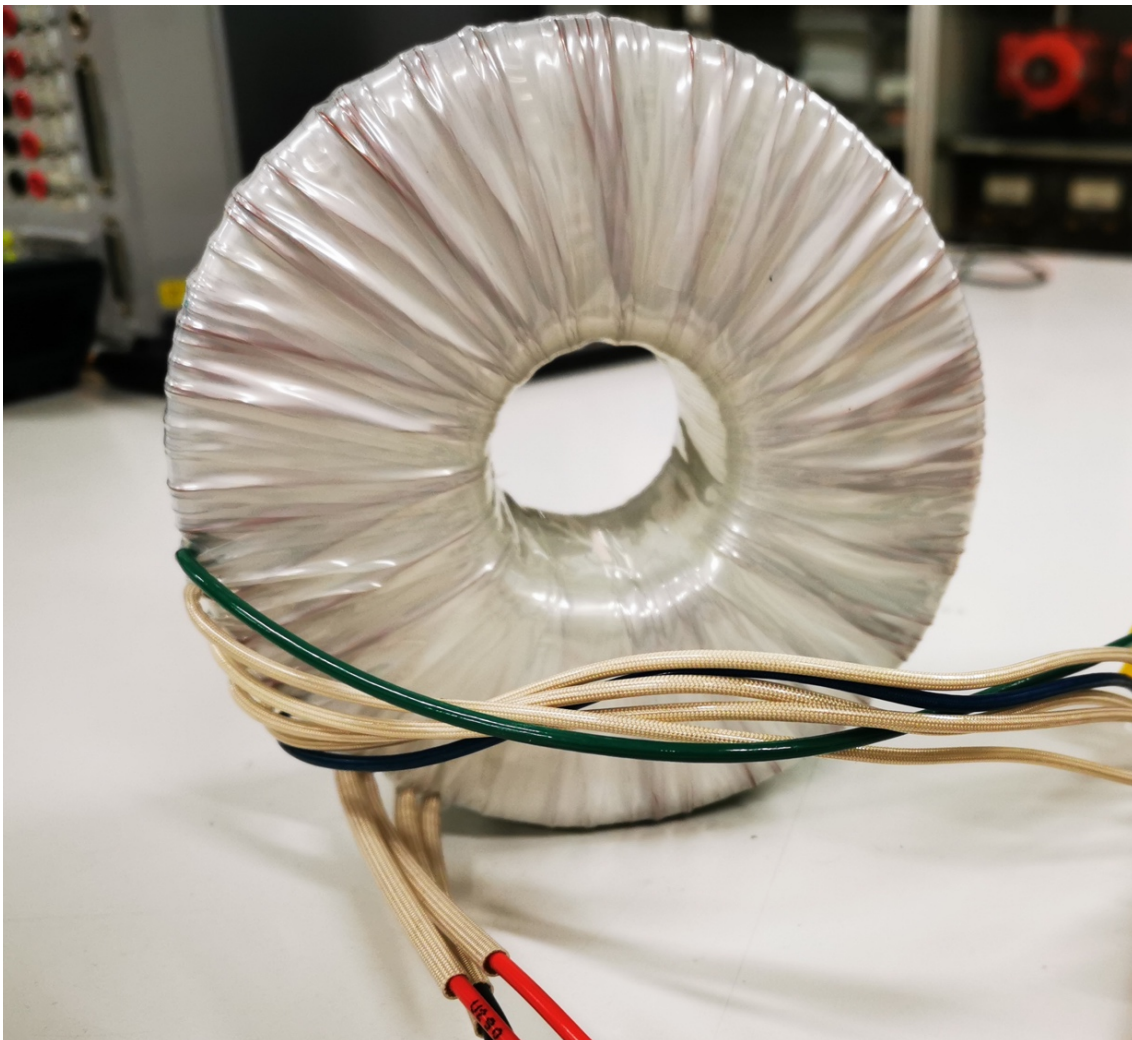


Abbildung 15: Modell des Ringkerntransformators I.

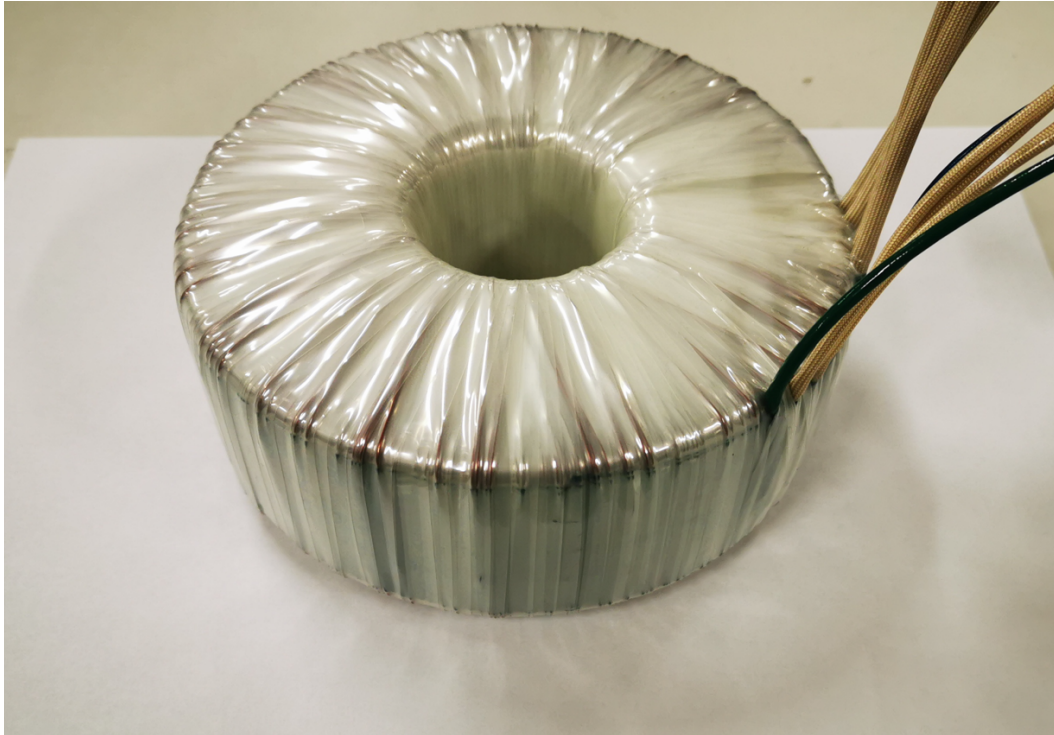


Abbildung 16: Modell des Ringkerntransformators II.

6.2 Leerlaufmessung

Die Messungen sind ebenso wie bei den Testtransformatoren mit dem Messgerät Dewetron durchgeführt worden. Es wurde auch hier ein Sättigungsversuch des Transformators durchgeführt, der leider aus Sicherheitsgründen dieser Versuch nur bis 1,156 der Nennspannung betrieben wurde. Die Kennlinie wurde interpoliert und in der Abbildung 17 dargestellt. Der Leerlaufstrom ist hier auch mit der angelegten Spannung annähernd linear gestiegen, in dem Bereich ist keine Sättigung erkennbar. Wie aus der vorherige Sättigungsversuch des Ringkerntransformators Nummer 1 wird hier auch angenommen, dass die Sättigung erst bei der nahezu doppelten Nennspannung, mit etwa 400 Volt, auftreten würde.

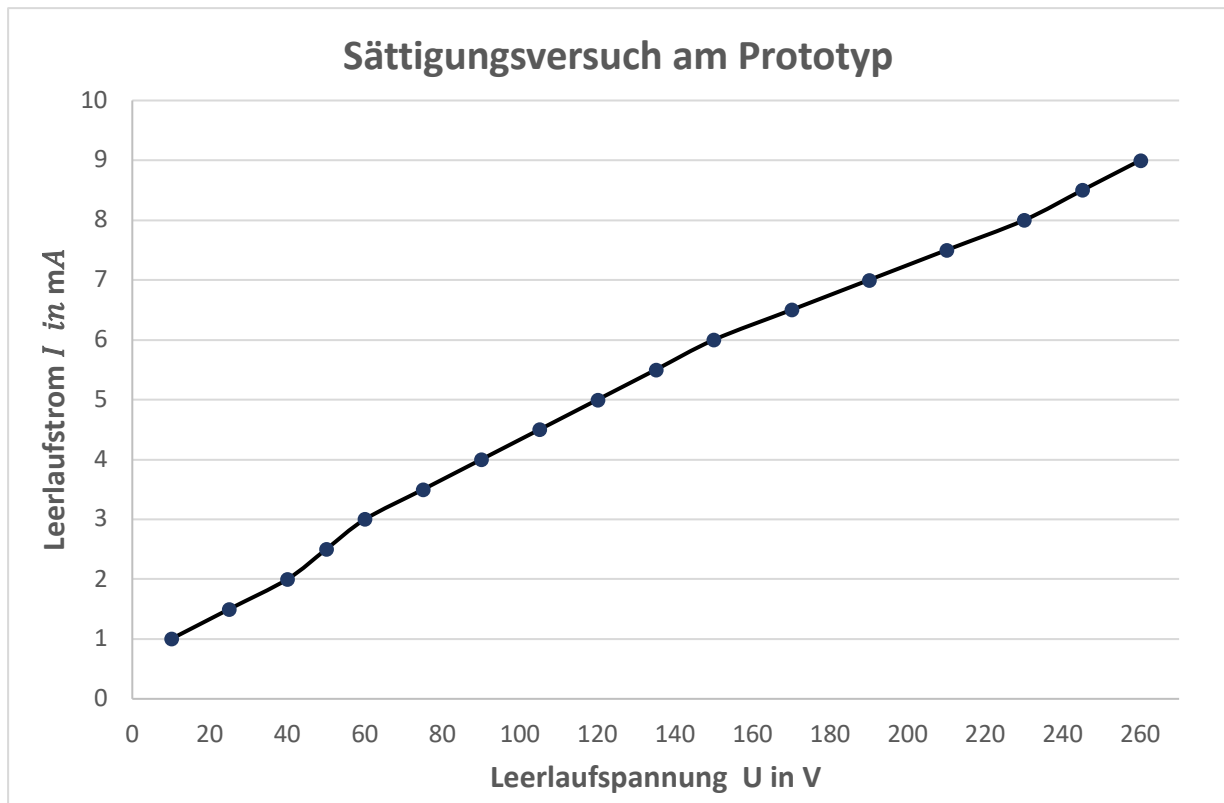


Abbildung 17: Sättigungskennlinie des Ringkerntransformatormodells.

Hinsichtlich der Leerlaufmessung sind die Ergebnisse des dimensionierten Transformators sehr zufriedenstellend (siehe Tabelle 8). Die am Anfang gestellte Anforderung von weniger als einen Prozent Leerlaufstrom wurde an diesen Prototyp vollkommen erreicht. Durch den Sättigungsversuch wird erkennbar, dass auch bei einer Eingangsspannung von 266 Volt der Leerlaufstrom immer noch unter der angeforderten Grenze liegt.

Die Eisenverluste sind deutlich größer als die Magnetisierungsverluste. Der Ringkern braucht sehr wenig Strom, um den magnetischen Fluss im Kern betreiben zu können.

Die Eisenverluste, bestehend aus Hysterese- und Wirbelstromverlusten, sind betragsmäßig dominierend an diesem Prototyp. Dies hängt von mehreren Faktoren, wie der Frequenz, der maximalen Flussdichte und dem verwendeten Kernmaterial, ab und ist unvermeidlich.

Der Magnetisierungsstrom ist sehr niedrig bei diesem Ringkerntransformator, da sich kein Luftspalt an dem magnetischen Kreis befindet. Die Kernabmessung ist geringfügig überdimensioniert, dies stellt keine Engpässe für den Verlauf des magnetischen Flusses dar.

Tabelle 8: Gemessene und abgeleitete Werte der Leerlaufmessung.

	Gemessen				Abgeleitete Werte aus den Messungen			
Leerlaufversuch	I_{10} in A	U_{10} in V	P_{10} in W	Q_{10} in VAR	I_{μ} in A	I_{Fe} in A	R_{Fe} in Ω	X_h in Ω
Ringkern Trafo	0,008	230	1,76	0,43	0,00234	0,00765	98290	30065

6.3 Kurzschlussmessung

Wie bei jeder anderen elektrischen Maschine wird auch der Transformator im Vorhinein für die jeweiligen Anforderungen konstruiert. Eine Veränderung der Parameter bei einem bereits fertiggestellten Transformator ist im Nachhinein schwer realisierbar. Bei der Anforderung von $u_k = 10\%$ für die relative Kurzschlussspannung wurde vermehrt Wert auf den Leerlaufstrom gelegt, da die Längsimpedanzen einfacher durch externe Vorschalt Elemente beeinflusst werden kann. Nichts desto trotz gab es beim Ringkern-Prototyp eine relative Kurzschlussspannung von $u_k = 5.65\%$. Die gewünschte relative Kurzschlussspannung von mindestens $u_k = 10\%$ wird durch die zusätzliche Schaltung von Induktivitäten in Serien zu der Wicklung erreicht. Induktivitäten ab 35 mH jeweils in der Primär bzw. Sekundär Wicklungen wurde diese Anforderung von relative Kurzschlussspannung erfüllen.

Aus den erhobenen Werten ist zu bemerken, dass die Streuverluste im Verhältnis zu den Wicklungsverlusten geringer sind, weil sich eben für einen kleineren Leerlaufstrom entschieden wurde. Der Ringkerntransformator ist durch die verteilte Wicklung auf dem gesamten Umfang und durch die Tatsache, dass es keinen Luftspalt im Kern gibt, sehr streuverlustarm aufgebaut. Die Wicklungsverluste sind unvermeidlich wegen der hohen Windungszahl. Die gemessenen und abgeleiteten Werte sind in der Tabelle Nummer 9 dargestellt.

Tabelle 9: Gemessene und abgeleitete Werte der Kurzschlussmessung.

	Gemessen				Abgeleitete Werte aus den Messungen			
Kurzschlussversuch	I_{1k} in A	U_{1k} in V	P_{1k} in W	Q_{1k} in VAr	u_k in %	I_{kN} in A	$R_1 + R'_2$ in Ω	$X_{1\sigma} + X'_{2\sigma}$ in Ω
Ringkern Trafo	1	13	12	1	5,65	17,69	11,99	4,99

7 Zusammenfassung und Diskussion

Das Hauptziel dieser Arbeit ist es, den Leerlaufstrom und die Kurzschlussspannung eines Leistungstransformators in einem Modelltransformator so gut wie möglich nachzubilden.

In dieser Masterarbeit werden in den ersten Kapiteln die konstruktiven Einflussgrößen des Transformators näher betrachtet. Obwohl alle Transformatoren auf dem gleichen Prinzip aufgebaut sind – sowohl für die Signalübertragung eines Mikrophons als auch für Energieübertragung von mehreren Megavoltamper-Leistungen in der Energietechnik – müssen trotzdem für unterschiedliche Zwecke verschiedene Faktoren berücksichtigt werden.

Im Kapitel 3.3 werden die Vorteile der größeren Einheiten im Energiesystem in Bezug auf die zunehmende Bauleistung und die damit verbundene Verringerung des relativen Volumens und des Gewichts aufgezeigt. Außerdem wird der bessere Wirkungsgrad dargestellt. Die Wachstumsgesetze für Transformatoren werden präsentiert und diskutiert.

Einer der grundlegenden Schritte beim Transformatorentwurf ist die Auswahl des richtigen Kernmaterials und der Kernbauform. Ebenso wird versucht, an der vorgegebenen Wickelquerschnittfläche des Kerns die Wicklungen unterzubringen. Außerdem muss darauf geachtet werden, dass der maximal zulässige Strom durch die ausgewählte Querschnittfläche des Drahtes gewährleistet ist.

Als abschließender Schritt im Vorbereitungsprozess wurden die Gleichungen für die Berechnung des Transformators hergeleitet.

Danach wurden über verschiedene Messungen am Institut für elektrische Anlagen und Netze an der Technischen Universität in Graz an ausgewählten Transformatorexemplaren weitere Erkenntnisse gesammelt. Anhand der Messversuche wurde ersichtlich, welche der Kernbauformen am besten geeignet ist und wie viele Windungen notwendig sind, um die Anforderungen zu erfüllen. Von den gemessenen und abgeleiteten Werten der Beispielstransformatoren ist ersichtlich, dass sich der Ringkerntransformator am besten für die definierten Anforderungen eignet.

Der Vorteil des ringkernförmigen Transformators gegenüber anderen Kernbauformen ist der nahezu ideale magnetische Flussverlauf. Der Ringkerntransformator charakterisiert sich mit einem geringeren Streumagnetfeld, weniger Volumen und Gewicht, weniger hörbarem Brummen und einer allgemein höheren Effizienz. Die Vorteile sind besonders für bestimmte Anwendungen gegeben, die von der Art der Einsätze und der Empfindlichkeit anderer Schaltungen gegenüber Streumagnetfeldern abhängen. Diese Vorteile müssen im Verhältnis zu den Nachteilen, wie den höheren Anschaffungskosten und dem höherem Einschaltstrom, sowie der aufwendigeren Anfertigung, abgewogen werden.

Des Weiteren wurde mit den gesammelten Erkenntnissen versucht, einen theoretischen Prototyp, der den Leerlaufstrom von weniger als 1% und eine Kurzschlussspannung von 10 - 15 Prozent aufweist, zu entwerfen.

In einem Designentwurf ist es schwierig, die kompletten gewünschten Eigenschaften von Transformatoren zu erfüllen. In diesem Fall musste ein Kompromiss zwischen den Einflussparametern für den Leerlaufstrom und der Kurzschlussspannung geschlossen werden, da sich viele Einflussparameter gegenseitig stark beeinflussen.

Generell sind Leistungstransformatoren bewusst auf einen höheren Wert hinsichtlich der Streureaktanz konstruiert, um den Kurzschlussstrom zu begrenzen.

Der Kurzschlussspannung ist umso größer, je größer die Längsimpedanz ist. Diese wird bei Leistungstransformatoren im Wesentlichen durch die Streureaktanz bestimmt. In Bezug auf den Wirkungsgrad des Transformators wird versucht, den Wicklungswiderstand möglichst klein zu halten.

Aus den gesamten Betrachtungen dieser Einflussparameter heraus, ist es einfacher über externe Serienschaltungen von Induktivitäten die Kurzschlussspannung zu erhöhen. Daher wurde bei dem Entwurf des Prototyps besonders Acht auf den Leerlaufstrom gegeben.

Die am Anfang gestellte Anforderung, dass der Leerlaufstrom weniger als 1 % betragen soll, konnte bei diesem Prototyp vollkommen erreicht werden. Außerdem konnte beim Prototyp eine relative Kurzschlussspannung von $u_k = 5.65\%$ gemessen werden, wobei allerdings der ohmsche Anteil relativ groß ist. Eine Erhöhung des induktiven Anteils kann über eine zusätzliche Induktivität in Serie erreicht werden.

Die Anforderungen dieser Arbeit wurden somit mit diesem Prototyp des Ringkerntransformators realisiert und die Forschungsfragen konnten weitgehend beantwortet werden.

8 Literaturverzeichnis

- [1] W. G. H. Werner H. Wölfle, Transformers and inductors for power electronics: theory, design and applications, John Wiley & Sons Ltd., 2013.
- [2] D.-I. Z. Ye, „Einfluss der Eisensättigung in Kraftwerkstransformatoren auf die subtransienten Generatorströme,“ Technischen Universität Dortmund, Dortmund, 2013.
- [3] ABB AG Deutschland, Schaltanlagen-Handbuch, Mannheim: Volkhardt Caruna Medien GmbH & Co. KG, Amorbach, 2011.
- [4] E. Spring, Elektrische Maschinen Eine Einführung, Darmstadt: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1998, 2006, 2009, 2009.
- [5] I. Kasikci, Planung von Elektroanlagen, Biberach, Deutschland: Springer-Verlag, 2018.
- [6] R. M. J. G. J. K. Ekbert Hering, Elektrotechnik und Elektronik für Maschinenbauer, Deutschland: Springer-Verlag GmbH, 2018.
- [7] A. J. Schwab, Elektroenergiesysteme Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie, Karlsruhe, Deutschland: Springer-Verlag GmbH, 2017.
- [8] S.A.Khparde und S.V.Kulkarni, Transformer Engineering Design and Practice, NEW YORK • BASEL: Marcel Dekker, Inc., 2004.
- [9] C. W. T. MCLYMAN, TRANSFORMER AND INDUCTOR DESIGN HANDBOOK, New York, NY 10016, U.S.A.: Marcel Dekker, Inc., 2004.
- [10] D. Dujic, „MEDIUM FREQ. TRANSFORMER DESIGN OPTIMIZATION FOR SOLID STATE TRANSFORMERS,“ EPFL scientific publications, Switzerland, 2019.
- [11] attempo, „Magnetische Bauteile und Baugruppen,“ Rottenburg, Deutschland, 2009.
- [12] B. P. Germar Müller, Grundlagen elektrischer Maschinen, Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2006.
- [13] R. M. Dierk Schröder, Leistungselektronische Schaltungen Funktion, Auslegung und Anwendung, Deutschland: Springer-Verlag GmbH, 2019.
- [14] G. J. T. J. D. Goff, „OPTIMIZING LINEAR POWER SUPPLY PERFORMANCE WITH LINE FREQUENCY TOROIDAL TRANSFORMERS,“ Talema Electronic, INC., Missouri USA.
- [15] F. d. León, P. Sujit and Q. Layth, "Leakage Inductance Design of Toroidal Transformers by Sector Winding," IEEE, January 2014.
- [16] O. Limann, „radiomuseum.org,“ 1958. [Online]. Available: https://www.radiomuseum.org/forumdata/users/5100/Drosseln_Netztrafos_Uebertrager_O_L_rm_v10.pdf. [Zugriff am 17 07 2019].
- [17] D. C. King, „Toroidal Coil Winding & Cunstruction Techniques,“ IEEE, 2005.