

Bachelorthesis

Aykut Alkan

Vermessung und Simulation eines Drehstromtransformators und Prüfung seiner Eignung im Rahmen eines Regelkonzeptes

Aykut Alkan

Vermessung und Simulation eines Drehstromtransformators
und Prüfung seiner Eignung im Rahmen eines Regelkonzeptes

Bachelorthesis eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang Informations- und Elektrotechnik
am Department Informations- und Elektrotechnik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer : Prof. Dr.-Ing. Gustav Vaupel
Zweitgutachter : Prof. Dr. Ingo Winzenick
Abgegeben am 29.01.2016

Aykut Alkan

Thema der Bachelorarbeit

Vermessung und Simulation eines Drehstromtransformators und Prüfung seiner Eignung im Rahmen eines Regelkonzeptes

Stichworte

Drehstromtransformator, Simulation, Portunus, elektrische Energietechnik

Kurzbeschreibung

Für einen Praktikumsversuch im Labor für elektrische Energietechnik soll der vorhandene sonderangefertigte Drehstromtransformator untersucht werden. Zuerst wird eine Ersatzbeschreibung angefertigt. Die klassischen Ersatzparameter sollen bestimmt und im Simulationsmodell verwendet werden. Dabei wird der Drehstromtransformator symmetrisch und unsymmetrisch in verschiedenen Schaltgruppen belastet. Außerdem wird auch der Einschaltstrom mit Hilfe eines Schaltwinkelstellers untersucht. Anschließend wird seine Eignung zu einem Regelkonzept untersucht.

Aykut Alkan

Title of the Thesis

Surveying and Simulation of a three-phase Transformer and its suitability as a phase-shifting transformer

Keywords

Three phase transformer, simulation, vector groups, equivalent circuit, portunus

Description

This paper is about a three-phase transformer, which should be measured off, and the parameter for the simulation should be determined. This thesis includes theory of three phase Transformers and vector groups. Afterwards the three-phase transformer is simulated with the software Portunus. Besides, inrush current of three-phase transformer is investigated by means of a switching angle adjuster.

Danksagung

Bevor ich mit meiner Bachelorarbeit anfangen möchte, möchte ich an dieser Stelle für die freundliche Unterstützung und Bearbeitung meiner Bachelorarbeit bei meinem betreuenden Professor Herr Prof. Dr.-Ing. Gustav Vaupel und meinem Zweitgutachter Herr Prof. Dr.- Ing. Ingo Winzenick bedanken.

Außerdem bedanke ich mich bei Herrn Dipl.- Ing. Frank Korpel für die notwendigen Hilfestellungen.

Inhalt

1. Einleitung	6
1.1 Durchflutungsgesetz.....	6
1.2 Induktionsgesetz.....	8
2 Transformatoren	10
2.1 Verwendung der physikalischen Grundlagen im Transformator.....	10
2.2 Begriffsdefinitionen.....	11
2.3 Einphasentransformator.....	11
2.4 Drehstromtransformatoren.....	12
2.5 Dreiphasenschaltgruppen.....	15
2.5.1 Stern-Stern-Schaltung (Yy0).....	17
2.5.2 Dreieck-Stern-Schaltung (Dy5).....	17
2.5.3 Stern-Zickzack-Schaltung (Yz5).....	18
3 Betriebsverhalten	19
3.1 Einschaltstrom bei leerlaufenden Drehstromtransformator.....	19
3.2 Ersatzschaltung des realen Transformators.....	27
3.2.1 Leerlaufbetrieb.....	31
3.2.2 Leerlaufbetrieb des Drehstromtransformators im Labor.....	34
3.2.3 Kurzschlussbetrieb.....	40
3.2.4 Kurzschlussversuch des Drehstromtransformators im Labor.....	44
3.2.5 Leerlaufsimulation mit der Software Portunus.....	47
3.2.6 Kurzschlussimulation mit der Software Portunus.....	50
3.3 Verluste und Wirkungsgrad.....	52
4 Belastungsversuche des Drehstromtransformators im Labor	57
4.1 Symmetrische Belastung.....	57
4.2 Unsymmetrische Belastung des Drehstromtransformators.....	60
4.2.1 Einphasige Belastung der Stern-Stern-Schaltung (Yy0).....	61
4.2.2 Simulation einer einphasigen Belastung der Stern-Stern-Schaltung mit Portunus.....	70
4.2.3 Einphasige Last der Dreieck-Stern-Schaltung (Dy5).....	72
4.2.4 Simulation der Dreieck-Stern-Schaltung in Portunus.....	75
4.2.5 Einphasige Last der Stern-Zickzack-Schaltung (Yz5).....	78
4.2.6 Einphasige Last bei Stern-Ausgleichschaltung (Yy+d).....	81
4.2.7 Dreipuls-Mittelpunktschaltung (M3).....	85
5 Regeltransformatoren	90
5.1 Längsregler.....	91
5.2 Querregler.....	92

5.3 Schrägregler	93
5.4 Möglicher Aufbau eines Querreglers im Labor.....	93
6 Zusammenfassung der Arbeit	96
7 Abbildungsverzeichnis	97
8 Tabellenverzeichnis.....	99
9 Literaturverzeichnis.....	100
Ehrenwörtliche Erklärung	101

1. Einleitung

Ein Transformator besteht im Wesentlichen aus zwei oder mehreren elektrischen Schaltungen in Form von Wicklungen, welche magnetisch miteinander durch einen gemeinsamen Magnetkreis verbunden sind.¹ Sie dienen hauptsächlich zum Verbinden von Wechselspannungsnetzen, welche gleiche Frequenzen, aber auch unterschiedliche oder auch gleiche Spannungen besitzen. Die Grundlagen der Transformatoren basieren auf das Durchflutungsgesetz (das Ampèresche Gesetz) und Induktionsgesetz (das Faraday'sche Induktionsgesetz). Mit Hilfe des magnetischen Feldes werden die Energieversorgungsnetze gekoppelt. Die Transformatoren werden heute für Spannungs- und Stromänderung, sowie Spannungs- und Stromanpassung vom Erzeuger zum Verbraucher, galvanische Trennung von Spannungsnetzen, Strom- und Spannungswandler oder für eine Leistungsanpassung angewendet.²

Für einen Praktikumsversuch im Labor für elektrische Energietechnik soll der vorhandene sonderangefertigte Drehstromtransformator untersucht werden. Zuerst wird eine Ersatzbeschreibung angefertigt. Die klassischen Ersatzparameter sollen bestimmt und im Simulationsmodell verwendet werden. Dabei wird der Drehstromtransformator symmetrisch und unsymmetrisch in verschiedenen Schaltgruppen belastet. Außerdem wird auch der Einschaltstrom mit Hilfe eines Schaltwinkelstellers untersucht. Anschließend wird seine Eignung zu einem Regelkonzept untersucht.

1.1 Durchflutungsgesetz

Die Theorie des Durchflutungsgesetzes ist aus dem Buch „ELEKTRISCHE MASCHINEN UND UMFORMER“ VON F. MOELLER/ P. VASKE³ entnommen worden.

Elektrische Maschinen verwenden, die durch die Elektronenbewegungen entstehenden magnetischen Wirkungen. Die statischen elektrischen Ladungen bilden ein elektrostatisches Feld aus. Dabei üben die bewegten Elektronen magnetische Kräfte aufeinander aus. Ein Raum, welcher magnetische Erscheinungen zeigt, wird als magnetisches Feld bezeichnet. Dieses Feld hat in jedem Punkt des Raums eine bestimmte

¹ Electrical Engineer's Reference Book, M.A. Laughton und D.J. Warne, ISBN:0750646373

² Elektrische Maschinen und Umformer, F. Moeller/ P. Vaske, B.G. Teubner Stuttgart Verlag, ISBN: 3519164019

³ Elektrische Maschinen und Umformer, F. Moeller/ P. Vaske, B.G. Teubner Stuttgart Verlag, ISBN: 3519164019

Stärke und Richtung. Die Feldgröße wird als magnetische Induktion B bezeichnet und hat die Einheit Tesla mit $1 T = 1 \frac{Vs}{m^2}$. Die Induktion wird durch die Dichte der einzelnen Feldlinien dargestellt. Die Krafrichtung wird auch durch die Feldlinien angegeben. Die kontinuierlich in sich geschlossenen Feldlinien lassen sich durch das Hüllintegral

$$\oint B_x \cdot dA = 0$$

beschreiben. Die Induktion B und das Flächenelement dA sind in diesem Fall allgemeine Vektoren. Die magnetische Feldstärke H_x ist die Ursache der magnetischen Induktion, welche ortsabhängig ist. Somit gilt die Gleichung:

$$B_x = \mu_x \cdot H_x$$

mit der ortsabhängige Permeabilität μ_x

$$\mu_x = \mu_0 \mu_r$$

wobei die Permeabilitätskonstante $\mu_0 = 0,4 \pi \cdot 10^{-6} \frac{H}{m} = 1,256 \cdot 10^{-6} \frac{Vs}{Am}$ und bei allen nicht ferromagnetischen Stoffen $\mu_r = 1$ ist.

Werden die ortsabhängigen Feldvektoren zu den Größen des magnetischen Kreises integriert, so gilt für den magnetischen Fluss:

$$\Phi = \int_A B_x dA$$

Die Einheit des magnetischen Flusses ist Weber [Wb] ($1 \text{ Wb} = V \cdot s = T \cdot m^2$). Die Gleichung des magnetischen Flusses lässt sich vereinfachen, wenn das homogene Feld mit der magnetischen Induktion senkrecht auf der Fläche liegt.

$$\Phi = B \cdot A$$

Außerdem gilt für die Durchflutung:

$$\Theta = \int_A J_x dA$$

Die Stromdichte J_x und das Flächenelement dA sind Vektoren. Mit einer Spule mit N -Windungen lässt sich die Wirkungen des Stromes vergrößern. Für elektrische Maschinen wird die Durchflutung vereinfacht zu:

$$\Theta = I \cdot N$$

Die Durchflutung erhält man, wenn das Linienintegral der magnetischen Feldstärke H über einem geschlossenen Weg s gebildet wird.

$$\Theta = \oint B_x \cdot dA$$

Der magnetische Kreis wird für die Berechnung elektrischer Maschinen in Abschnitte zerlegt. So wird die Berechnung der Durchflutung vereinfacht, und somit gilt

$$\Theta = \sum_{i=1}^{i=i} H_i s_i = \sum_{i=1}^{i=i} V_i$$

V_i ist hier die magnetische Spannung. Für die Teilspannung erhält man somit

$$V_i = H_i s_i$$

1.2 Induktionsgesetz

Die Informationen zur Theorie der Induktionsspannung stammen aus dem Vorlesungsskript „TRANSFORMATOREN“ VON PROF. DIPL. –ING. INGO SCHÜRING⁴ aus dem Jahr 2012 und dem Buch „ELEKTRISCHE MASCHINEN UND UMFORMER“ VON F. MOELLER/ P. VASKE⁵.

Das Induktionsgesetz wird auch als das Faraday'sche Gesetz genannt. Unter diesem Gesetz ist zu verstehen, dass eine Induktionsspannung durch die Änderung der magnetischen Flussdichte $\phi(t)$ entsteht. Das veränderte magnetische Feld erzeugt eine Spannung, wenn es durch eine Leiterschleife mit N Windungen durchsetzt wird.

$$u_i = - \frac{d\Psi}{dt} = \textit{induzierte Spannung}$$

$$u_L = \frac{d\Psi}{dt} = \textit{induktive Spannung}$$

Der Spulenfluss ist die Flusssumme der Windungen.

$$\Psi = \sum_{N=1}^{N=N} \phi_N = N \cdot \Phi$$

⁴ Transformator Skript zur Lehrveranstaltung AT1. Hochschule Beuth., Prof. Dipl. –Ing. Ingo Schüring, 2012

⁵ Elektrische Maschinen und Umformer, F. Moeller/ P. Vaske, B.G. Teubner Stuttgart Verlag, ISBN: 3519164019

Es wird vorausgesetzt, dass alle N Windungen der Spule mit dem gleichen Fluss ϕ verkettet sind. Für die Quellspannung folgt die folgende Gleichung

$$u_q = N \frac{d\phi_t}{dt}$$

Um eine größere induzierte Spannung zu erzeugen, müssen sowohl die Windungszahl N als auch die Flussänderungsgeschwindigkeit $d\phi_t/dt$ möglichst groß sein. Eine positive Quellspannung erhält man bei einer Flusszunahme.

Außerdem entsteht eine Spannung der Selbstinduktion

$$u_q = L di/dt$$

Die Induktivität L ist abhängig von der Windungszahl N , der geometrischen Größe des Magnetkreises und der Permeabilität μ des verwendeten Werkstoffes. Betrachtet man eine Spule, die von dem Wechselfluss $\phi_t = -\phi \cos(\omega t)$ durchsetzt wird, so ergibt sich die Quellspannung

$$u_q = -\frac{N\phi d(\cos \omega t)}{dt} = 2\pi f N \phi \sin(\omega t)$$

Der Scheitelwert der Quellspannung ist:

$$u_q = 2\pi f N \phi$$

Der Effektivwert der Quellspannung ist:

$$u_q = \frac{2\pi f N \phi}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} \pi f N \phi \approx 4,44 f N \phi$$

2 Transformatoren

2.1 Verwendung der physikalischen Grundlagen im Transformator

Für die Theorie der Verwendung der physikalischen Grundlagen wurde das Buch „PLANUNG VON ELEKTROANLAGEN“ VON ISMAIL KASIKCI⁶ als Hilfsquelle verwendet.

Aufgrund der einfachen Bauweise und Anschaulichkeit sind die physikalischen Grundlagen für den Transformator mit einem Einphasentransformator einfacher zu erklären.

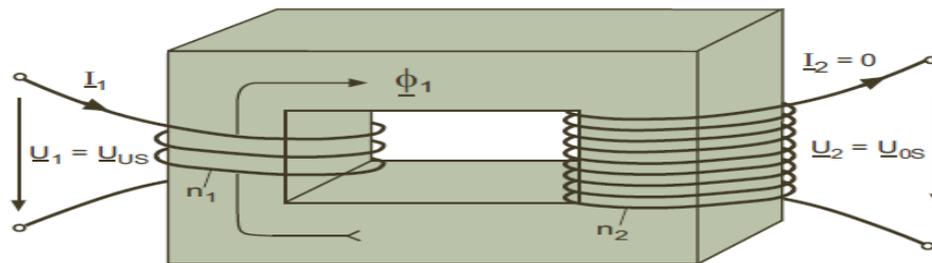


Abbildung 1: Eisenkern, Primär- und Sekundärwicklung des Einphasentransformators

Quelle: Elektroenergiesysteme von Adolf J. Schwab

Aus den physikalischen Grundlagen folgt für die induzierte Spannung

$$\phi = \phi_{max} \cdot \sin(\omega t)$$

$$u_{10} = -N \cdot \frac{d\phi}{dt} = N \cdot \omega \cdot \phi_{max} \cdot \cos(\omega t) = \sqrt{2} U_{10} \cos(\omega t)$$

$$U_{10} = \frac{\omega}{\sqrt{2}} N_1 \cdot \phi_{max} = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} N_1 \cdot \phi_{max} = 4,4 \cdot f \cdot N_1 \cdot \phi_{max}$$

$$U_{10} = 4,4 \cdot f \cdot N_1 \cdot B_1 \cdot A_{Fe}$$

Beide Wicklungen werden vom gleichen magnetischen Fluss durchgesetzt. Aus diesem Grund gilt für den Effektivwert der Ausgangsspannung

$$U_{20} = 4,4 \cdot f \cdot N_2 \cdot B_1 \cdot A_{Fe}$$

Somit folgt für einen idealen Transformator, der keine Verluste hat, folgende Gleichung

$$\frac{U_{10}}{U_{20}} = \frac{4,4 \cdot f \cdot N_1 \cdot B_1 \cdot A_{Fe}}{4,4 \cdot f \cdot N_2 \cdot B_1 \cdot A_{Fe}} = \frac{N_1}{N_2}$$

⁶ Planung von Elektroanlagen, Ismail Kasikci, Springer Vieweg Verlag, ISBN: 9783642409707

2.2 Begriffsdefinitionen

Für die Begriffe wurde das Buch „ELEKTRISCHE MASCHINEN UND UMFORMER“ VON F. MOELLER/ P. VASKE⁷ als Hilfsquelle verwendet.

Die gewickelten Teile des Eisenkerns, die über die Joche verbunden sind, werden als Schenkel bezeichnet. Für die Spannungstransformation werden mindestens zwei Wicklungen gebraucht, die im Allgemeinen ineinander gewickelt sind. Über die Eingangswicklung, auch Primärwicklung genannt, wird aus dem Netz die Spannung U_1 eingespeist. Über die Ausgangswicklung, auch Sekundärwicklung genannt, wird die Spannung U_2 erzeugt. Als Oberspannungswicklung ist die Wicklung mit der höheren Windungszahl zu verstehen und als Unterspannungswicklung wird die Wicklung mit der kleineren Windungszahl genannt. Die Anschlussklemmen der Primärseite werden mit großen Buchstaben (U, V, W), die Sekundärseite mit kleinen Buchstaben (u, v, w) gekennzeichnet. Der Nennbetrieb ist durch die Nennspannung U_{1N} auf der Primärseite und der Nennstrom auf der Sekundärseite als I_{2N} gekennzeichnet. Bei Belastung des Transformators mit dem Nennstrom entsteht die Volllastspannung U_{2N} . Die Volllastspannung ist vom Leistungsfaktor $\cos \varphi$ abhängig. Auf dem Leistungsschild angegebenen Nennspannungen beziehen sich auf den Leerlauf und bei Drehstromtransformatoren sind es Außenleiterwerte

2.3 Einphasentransformator

Die Einphasentransformatoren haben eine einfache Anordnung. Die Primärwicklungen und die Sekundärwicklungen sind auf einem Schenkel übereinander gebaut und werden durch den vorhandenen Eisenkern magnetisch gekoppelt. Da die Drehstromtransformatoren auf Einphasentransformatoren basieren, werden die einzelnen Details zum Einphasentransformator im Abschnitt 2.4 Drehstromtransformatoren behandelt.

⁷ Elektrische Maschinen und Umformer, F. Moeller/ P. Vaske, B.G. Teubner Stuttgart Verlag, ISBN: 3519164019

2.4 Drehstromtransformatoren

Für die Erklärung der Bauweise wurde das Buch „ELEKTROENERGIESYSTEME“ VON ADOLF J. SCHWAB⁸ als Hilfsquelle verwendet.

Drehstromtransformatoren, auch Dreiphasentransformator genannt, werden für die Umwandlung eines dreiphasigen Spannungssystems verwendet. Für größere Leistungen ab etwa 200 MVA werden drei Einphasentransformatoren in Stern oder Dreieck geschaltet. Die Verkleinerung der Baueinheit auf einem Einphasentransformator hat einen logistischen Hintergrund. Mit dieser Baueinheit (3*Einphasentransformator) wird der Transport einfacher und es wird nur ein weiterer Einphasentransformator als Reserve benötigt. Für kleinere Leistungen werden aufgrund von Materialkosten und des Gewichtsersparnisses, eine konstruktive Zusammenstellung der drei Einphasentransformatoren, die Dreiwicklung-Drehstromtransformatoren verwendet. Die Primär- und Sekundärwicklungen der Phasen befinden sich auf der durch die Joche verbundenen Schenkeln eines gemeinsamen Eisenkreises.

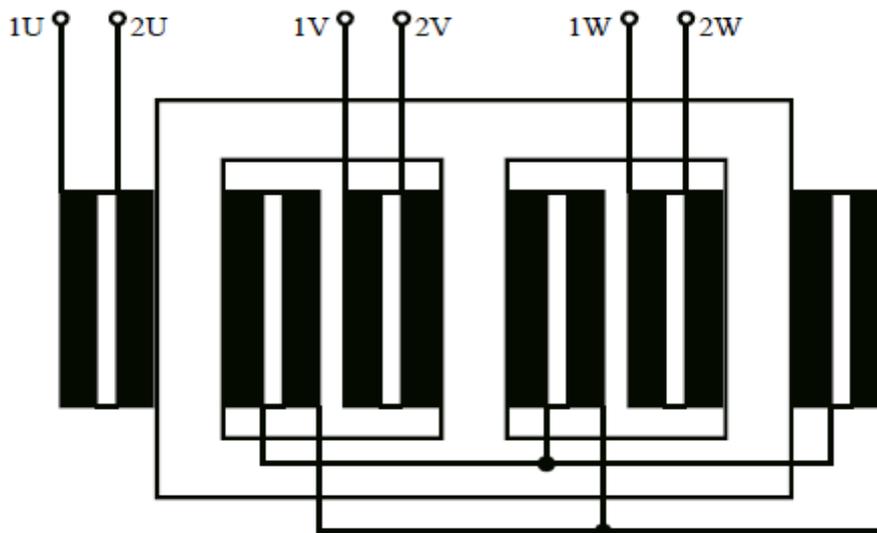


Abbildung 2: Aufbau eines Drehstromtransformators

Quelle: http://www.antriebstechnik.fh-stralsund.de/1024x768/Dokumentenframe/Kompendium/Fachvorlesungen/Drehstromsysteme/GE3_3.pdf

⁸ Elektroenergiesysteme, Adolf J. Schwab, Springer Vieweg Verlag, ISBN: 9783662468562

Die Wicklungen der Primärseite und der Sekundärseite können unabhängig voneinander in Stern oder Dreieck geschaltet werden. Bei einer symmetrischen Belastung lassen sich die Flüsse der drei Schenkel in den Jochen, zu Null aufsummieren. Da in einem Dreiphasensystem zwischen den Spannungen eine Phasenverschiebung von 120° liegt, ist auch zwischen den magnetischen Flüssen eine Phasenverschiebung von 120° und somit erfolgt die Flussverteilung zu drei verschiedenen Zeitpunkten. Alle drei Flüsse des Dreischenkeltransformators sind miteinander magnetisch gekoppelt und man spricht von einem erzwungenen magnetischen Rückschluss, wenn die Flüsse sich im Joch zu null summieren.

Falls noch zwei zusätzliche Rückschlussjochen neben den Schenkeln gebaut werden, entsteht aus einem Dreischenkel-Drehstromtransformator ein fünfschenkel-Drehstromtransformator. Sie besitzen zusätzlich zwei wicklungsfreie Schenkel.

Im Labor für elektrische Energietechnik ist ein Dreischenkel-Drehstromtransformator von der Firma Getra GmbH vorhanden. Die einzelnen Messergebnisse zu den Versuchen basieren auf diesen vorhandenen Drehstromtransformator.

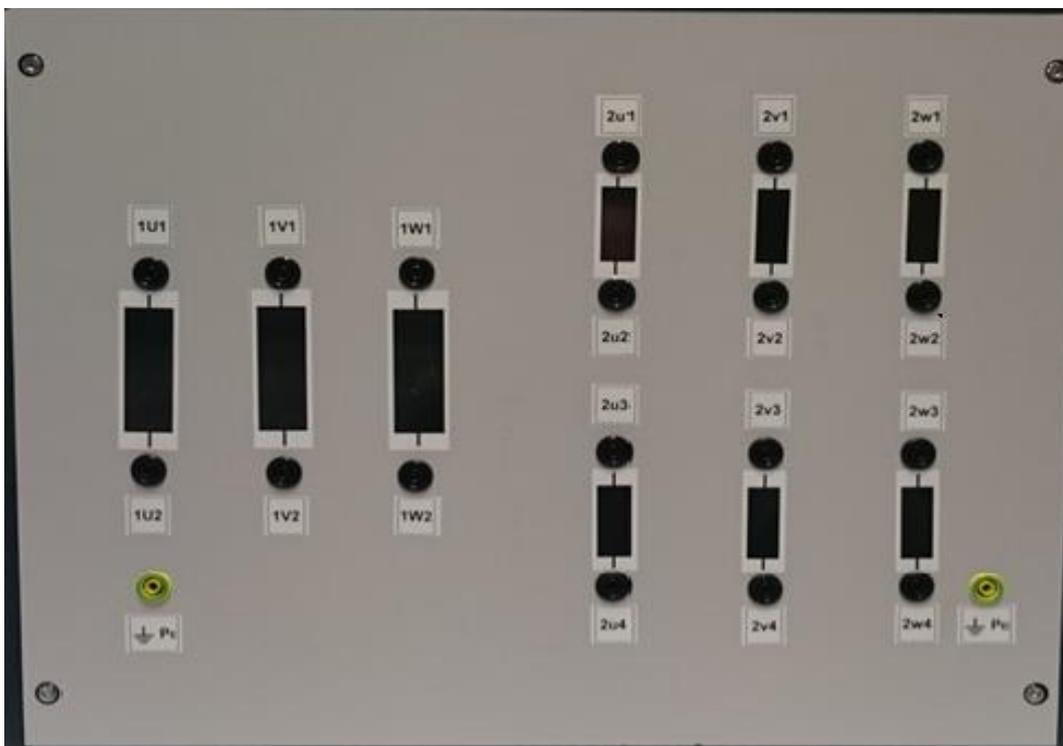


Abbildung 3: Drehstromtransformator und seine Primär- und Sekundärklemmen

Der Drehstromtransformator hat folgende Kenndaten, die vom Hersteller übermittelt wurden:

$$S_N = 5\text{kVA}; f = 50 - 60\text{Hz}; \text{ Prim.: } 3 \times 400\text{V}; \text{ Sek.: } 3 \times 400\text{V}, 7,2\text{A}$$

Folgende Wicklungswiderstände wurden von der Firma Getra GmbH bekannt gegeben. Laut dem Hersteller wurde die Wickelwiderstandsmessung unter Raumtemperatur durchgeführt.

Klemmen	R/ Ω	Klemmen	R/ Ω
1U1-1U2	0,284	2u1-2u2	0,281
1V1-1V2	0,290	2v1-2v2	0,283
1W1-1W2	0,284	2w1-2w2	0,281
2u1-2u4	Keine Angabe	2u3-2u4	0,263
2v1-2v4	Keine Angabe	2v3-2v4	0,264
2w1-2w4	Keine Angabe	2w3-2w4	0,265

Tabelle 1: Wickelwiderstandsangaben bei Raumtemperatur vom Hersteller

Quelle: Email von Fa. Getra GmbH an Herrn Gül am 27. Juni 2014

Eine direkte Messung der Wicklungswiderstände erfolgte mit dem Multimeter BBC M2036. Der Drehstromtransformator hat auf der Sekundärseite 2 gleiche Wicklungen, die auf einem Schenkel liegen. Damit sie als eine Wicklung betrachtet werden können, werden die Klemmen 2u2 mit 2u3, 2v2 mit 2v3, 2w2 mit 2w3 verbunden. Die zusammengeschlossenen Wicklungswiderstände 2w1-2w4, 2v1-2v4 und 2u1-2u4 wurden aus diesem Grund auch gemessen.

Klemmen	R/ Ω	Klemmen	R/ Ω
1U1-1U2	0,28	2u1-2u2	0,28
1V1-1V2	0,29	2v1-2v2	0,28
1W1-1W2	0,28	2w1-2w2	0,27
2u1-2u4	0,53	2u3-2u4	0,26
2v1-2v4	0,53	2v3-2v4	0,26
2w1-2w4	0,53	2w3-2w4	0,26

Tabelle 2: gemessene Wicklungswiderstände bei Raumtemperatur

Durch die vollzogene Messung der Wicklungswiderstände wurden die Herstellerangaben somit bestätigt.

Der Drehstromtransformator kann mit Hilfe der Software Portunus simuliert werden. Mit dieser Software kann ein Leerlaufversuch, Kurzschlussversuch und Lastversuch simuliert werden. Die Schaltgruppen Stern und Dreieck lassen sich ganz einfach schalten. Im Portunus-Dreiphasentransformatormodell lassen sich die Sekundärwicklungen nicht teilen. Leider ist es mit der Software Portunus nicht möglich die Sekundärseite Zickzack zu schalten, da das Simulationsmodell nicht vorhanden ist. Somit ist die Zickzackschaltung nicht mit dem Drehstrommodell zu realisieren. Dieses Problem wurde der Softwarefirma von Portunus „Adopted Solution“ geschildert. Die Empfehlung der Firma ist, dass die Phasen einzeln betrachtet werden müssen. Bei der Verschaltung mehrerer Spulen ist für jede Kopplung zwischen zwei Spulen eine Gegeninduktivität vorzusehen. Die einzelnen Gegeninduktivitäten ergeben sich beim Drehstromtransformator aus dem Aufbau des Magnetkreises und das Verhältnis der Wicklungszahlen. Die Koppelfaktoren sind nahezu „1“, da für die Kopplung nur die Streuung auf beiden Seiten zu betrachten ist. Die Kopplungen zwischen unterschiedlichen Phasen hängen von der Kern-Geometrie ab. Somit wird das Realisieren der Zickzack-Schaltung komplexer. Aus diesem Grund werden die Zickzack-Schaltung und die Ausgleichschaltung nicht simuliert.

2.5 Dreiphasenschaltgruppen

Für folgende Abschnitte 2.5.1 Stern-Stern-Schaltung, 2.5.2 Dreieck-Stern-Schaltung und 2.5.3 Stern-Zickzack-Schaltung wurden die Bücher „ELEKTRISCHE MASCHINEN UND UMFORMER“ VON F. MOELLER/ P. VASKE⁹, „ELEKTROENERGIESYSTEME“ VON ADOLF J. SCHWAB¹⁰ und „ELEKTRISCHE MASCHINEN“ VON ROLF FISCHER¹¹ als Hilfsquelle verwendet.

Die Primär- und Sekundärwicklungen der Drehstromtransformatoren können in Stern, Dreieck oder Zick-Zack geschaltet werden. Die VDE 0532 beinhaltet die zwölf gebräuchlichen Drehstromschaltungen. Außerdem wird zur Kennzeichnung der Schaltung ein Kurzzeichen für die Schaltgruppen verwendet. Bei Stern-Stern- oder Dreieck-

⁹ Elektrische Maschinen und Umformer, F. Moeller/ P. Vaske, B.G. Teubner Stuttgart ISBN: 3519164019

¹⁰ Elektroenergiesysteme, Adolf J. Schwab, Springer Vieweg Verlag, ISBN: 9783662468562

¹¹ Elektrische Maschinen, Rolf Fischer, Hanser Verlag, ISBN:3446226931

Dreieck-Schaltungen ist das Übersetzungsverhältnis der Primär- und Sekundärseite das Windungszahlenverhältnis der Primär- und Sekundärseite. Ansonsten unterscheidet sich das Übersetzungsverhältnis bei anderen Schaltkombinationen um die Faktoren $\sqrt{3}$ oder $1/\sqrt{3}$. Eine Zick-Zack-Schaltung wird meist nur auf der Sekundärseite benutzt. Es entsteht außerdem eine Phasendrehung zwischen Primär- und Sekundärseite. Wie bei der Benennung der Wicklungen eines Transformators werden auch bei den Schaltgruppen die Primärspannungsseite mit einem großen Buchstaben und die Sekundärseite mit einem kleinen Buchstaben versehen. Zusätzlich werden die Buchstaben mit einer Kennzahl verfolgt, die offenbart, um welches Vielfache von 30° der Zeiger der Sekundärseite bezogen auf Außenleiterspannung nacheilt. Z.B. die Angabe Dyn5 bedeutet, dass die Primärwicklungen in Dreieck und die Sekundärwicklungen in Stern mit zugänglichen Sternpunkt geschaltet sind, wobei die Spannungsverschiebung $5 \cdot 30^\circ = 150^\circ$ beträgt. Die wichtigsten Schaltgruppen des Dreiphasentransformators sind Yy0, Yz5, Dy5 und Yd5.

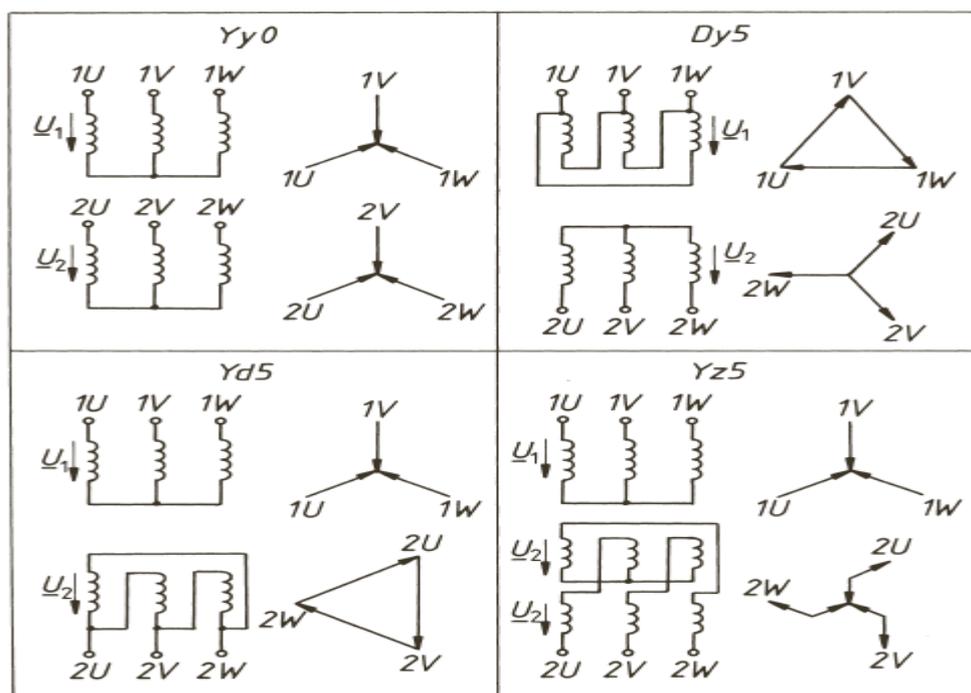


Abbildung 4: die wichtigsten Schaltungen der Dreiphasentransformatoren

Quelle: Elektrische Maschinen von Rolf Fischer

Bei Hochspannungswicklungen wird vorrangig auf der Primär- und Sekundärseite die Sternschaltung verwendet. Grund für diese Schaltung ist die Längsisolation der Wicklungen, die nur für die Spannung $U_{strang} = U_n/\sqrt{3}$ ausgelegt ist. Die Dreieckschaltung

auf der Primär- und Sekundärseite wird erst dann verwendet, wenn hohe Ströme in Frage kommen, da die Leiterquerschnitte für den Strom $I_{Strang} = I_n/\sqrt{3}$ ausgelegt ist. Außerdem gibt es noch weitere Gründe für die einzelnen Schaltungen wie z.B. Sternpunktbelastbarkeit. Aus diesem Grund wird die Zickzack-Schaltung auf der Sekundärseite eines Drehstromtransformators verwendet. Bei allen Schaltgruppen lässt sich das Übersetzungsverhältnis, wie es bei einem Einphasentransformator bekannt ist, über primärseitigen und sekundärseitigen Strangspannungen eines Schenkels, als Verhältnis der Windungszahlen berechnen. Sobald der Drehstromtransformator durch die Verschaltung eine Phasendrehung hat, ist der Übertragungsverhältnis komplex. Bei einer gleichen Phasendrehung kann man die Transformatoren parallelschalten. Um so einen Fall zu vermeiden, wird im Öfteren Stern-Stern-Schaltung gewählt. ¹²

2.5.1 Stern-Stern-Schaltung (Yy0)

Die Stern-Stern-Schaltung erfordert die kleinste Windungszahl, geringe Isolation und bei kleinen Strömen auch die niedrigsten Herstellungskosten. Aus diesen genannten Gründen wird diese Schaltgruppe für Höchstspannungswicklungen verwendet. Die Strangspannung dieser Schaltung ist $1/\sqrt{3}$ zur Außenleiterspannung. Wie bereits beschrieben, bleibt bei dieser Schaltung die Phasenlage der Spannungen auf Primär- und Sekundärseite unverändert. ^{12 13}

2.5.2 Dreieck-Stern-Schaltung (Dy5)

Die Dreieckschaltung auf der Primärseite hat einen Nachteil, dass die Isolation für die volle Netzspannung ausgelegt werden muss. Der Vorteil dieser Schaltung ist es, dass der Strangstrom $1/\sqrt{3}$ -fache zu den Außenleiterströme ist. Die Stern-Schaltung auf der Sekundärseite verursacht eine Verdrehung des Spannungssystems. Diese Schaltung kann einphasig belastet werden. Der Strom, welcher durch einer Strangwicklung der Sternschaltung fließt, ist der gleicher Strom auf der Primärseite, welcher auf der Strangwicklung auf dem gleichen Schenkel fließt. Der primäre Strangstrom fließt über

¹² Elektroenergiesysteme, Adolf J. Schwab, Springer Vieweg Verlag, ISBN: 9783662468562

¹³ Elektrische Maschinen und Umformer, F. Moeller/ P. Vaske, B.G. Teubner Stuttgart ISBN: 3519164019

zwei Außenleiter ab. Bei sehr großen Strömen und für große Verteilungstransformatoren wird die Dreieck-Stern-Schaltung häufig angewendet. Schließt man die sekundärseitige Sternschaltung an einem Nullsystem, so fließt auf der Primärseite ein Ringstrom, dementsprechend ist für jeden Schenkel das Durchflutungsgleichgewicht gewährt.¹⁴

2.5.3 Stern-Zickzack-Schaltung (Yz5)

Die Stern-Zickzack-Schaltung hat eine Anwendung bei kleineren Verteilungstransformatoren. Der Sekundärstrang hat zwei Wicklungen, die auf zwei Schenkeln verteilt sind und ist in einer Gegenreihenschaltung miteinander angeschlossen.

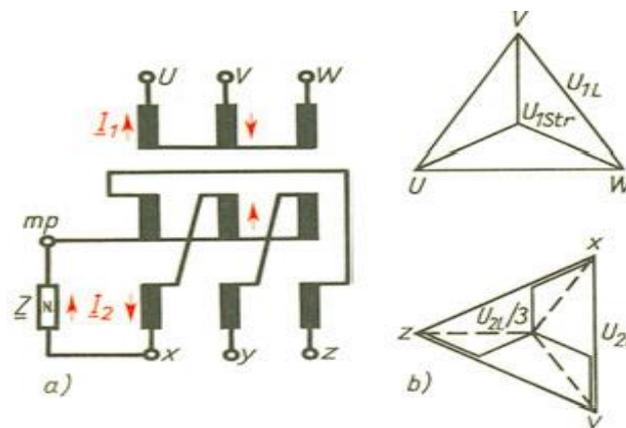


Abbildung 5: Stern-Zickzack-Schaltung des Dreiphasentransformators und Spannungszeigerdiagramm

Quelle: Elektrische Maschinen und Umformer von F. Moeller/ P. Vaske

Die Primär- und Sekundärflüsse stellen das Durchflutungsgleichgewicht her. Bei völliger Symmetrie fließt in der Sternschaltung kein Strom. Der Fluss kann sich nur im Streuraum der beiden Sekundärwicklungen auf jedem Schenkel verteilen. Die Oberschwingungen des Magnetisierungsstroms werden im Drehstromtransformator kompensiert. Die Teilspannungen auf der Sekundärseite sind phasenverschoben. Dadurch wird die Nutzung der Wicklungen vermindert. Für die Spannung pro Phase auf der Sekundärseite gilt die folgende Gleichung

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{N_2}{N_1}$$

¹⁴ Elektroenergiesysteme, Adolf J. Schwab, Springer Vieweg Verlag, ISBN: 9783662468562

3 Betriebsverhalten

3.1 Einschaltstrom bei leerlaufenden Drehstromtransformator

Für die Informationen über die Einschaltströme diene das Buch „ELEKTRISCHE MASCHINEN“ VON ROLF FISCHER¹⁵ und die Bachelorarbeit „AUFBAU EINES SCHALTWINKELSTELLERS FÜR EINPHASEN- UND DREHSTROMTRANSFORMATOREN“ VON RÜDIGER-JOACHIM BADE¹⁶ als Quelle.

Sobald ein sekundärseitig leerlaufender Transformator an das Versorgungsnetz angeschlossen wird, tritt ein Einschaltstrom auf. Die Höhe des Einschaltstroms ist ein Vielfaches von dem Nennstrom. Er verfällt in den normalen Laufpegel innerhalb weniger Perioden. Der Eisenkern des Drehstromtransformators wird beim Einschalten in die Sättigung geführt. Die Höhe der ersten Spitze des Einschaltstroms hängt von dem Einschaltmoment bezüglich des zeitlichen Verlaufs der angeschlossenen Netzspannung und dem Restmagnetismus, die so genannte Remanenz, ab. Diese Ströme können unerwünschte Effekte verursachen, wie z.B. mechanische Zerstörung der Wicklungen. Dabei wird der Drehstromtransformator unnötig sehr stark belastet. Somit wird die Zustandsbeurteilung von Drehstromtransformatoren erschwert. Der große Einschaltstrom tritt erst dann auf, wenn die angelegte Spannung auf dem Drehstromtransformator zum Nulldurchgang zugeschaltet wird. Ist die Polarität der Spannung in derselben Richtung wie die Remanenz im Kern, so entsteht der größte Einschaltstrom am Drehstromtransformator. Die starre Netzspannung auf eine Spule mit dem Wicklungswiderstand R_1 ist wie folgt:

$$u_1 = \sqrt{2} \cdot U_1 \cdot \sin(\omega t + \alpha)$$
$$u_1 = R_1 \cdot i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} = R_1 \cdot i_1 + N_1 \frac{d\Phi_1(t)}{dt}$$

Aus der Kombination beider Gleichung kann man den zeitlichen Verlauf des Flusses mit der Gleichung

$$\Phi_1(t) = -\Phi_1 \cdot \cos(\omega t + \alpha) + C - \frac{R_1}{N_1} \cdot \int i_1 dt$$

¹⁵ Elektrische Maschinen, Rolf Fischer, Hanser Verlag, ISBN: 3446226931

¹⁶ Bachelor Thesis „Aufbau eines Schaltwinkelstellers für Einphasen- und Drehstromtransformatoren“, Rüdiger-Joachim Bade, HAW Hamburg, 2012

berechnen. Dabei gilt für die Spannung

$$\sqrt{2} \cdot U_1 = \omega \cdot N_1 \cdot \Phi_1$$

Aufgrund der Anfangsbedingungen gilt, dass $i_1 = 0$ und $\Phi_1(t) = \Phi_{rem}$ ist. Deshalb lässt sich für C einzusetzen:

$$C = \Phi_1 \cdot \cos \alpha + \Phi_{rem}$$

Somit ist der Durchfluss

$$\Phi_1(t) = -\Phi_1 \cdot \cos(\omega t + \alpha) + \Phi_1 \cdot \cos \alpha + \Phi_{rem} - \frac{R_1}{N_1} \cdot \int i_1 dt$$

Die obige Formel beschreibt den Flussverlauf im Einschaltmoment des Drehstromtransformators bei $t = 0s$. Der Wicklungswiderstand hat eine dämpfende Wirkung auf die Schaltspitzen. Diese Wirkung wird durch den Integralterm berücksichtigt.

Der Nulldurchgang der Netzspannung ist der ungünstigste Schaltmoment, da die Primärwicklung bei $\omega t = \pi$ und $\alpha = 0^\circ$ den maximalen Fluss erzeugt.

$$\Phi_{max}(0) = -\Phi_1 \cdot \cos(\omega \cdot 0 + 0^\circ) + \Phi_1 \cdot \cos 0^\circ + \Phi_{rem}$$

$$\Phi_{max} = -\Phi_1 \cdot \cos(\pi + 0^\circ) + \Phi_1 \cdot \cos 0^\circ + \Phi_{rem}$$

$$\Phi_{max} = 2\Phi_1 + \Phi_{rem}$$

Es entstehen Sättigungseffekte, falls aus der früheren Nutzung des Transformators ein Restmagnetismus geblieben ist. Der Restmagnetismus ist beim Transformator aufgrund seines eisengeschlossenen Magnetkreises deutlich höher als die rotierenden Maschinen mit Luftspalt.

In Abbildung 6 wird der ungünstige Schaltmoment dargestellt. Da der magnetische Fluss Φ_1 auf der Primärseite sich nicht schnell einstellen kann, beginnt der Verlauf des magnetischen Flusses mit Φ_{rem} . Die maximale Amplitude des Flusses erreicht den Wert von $2 \cdot \Phi_1 + \Phi_{rem}$.

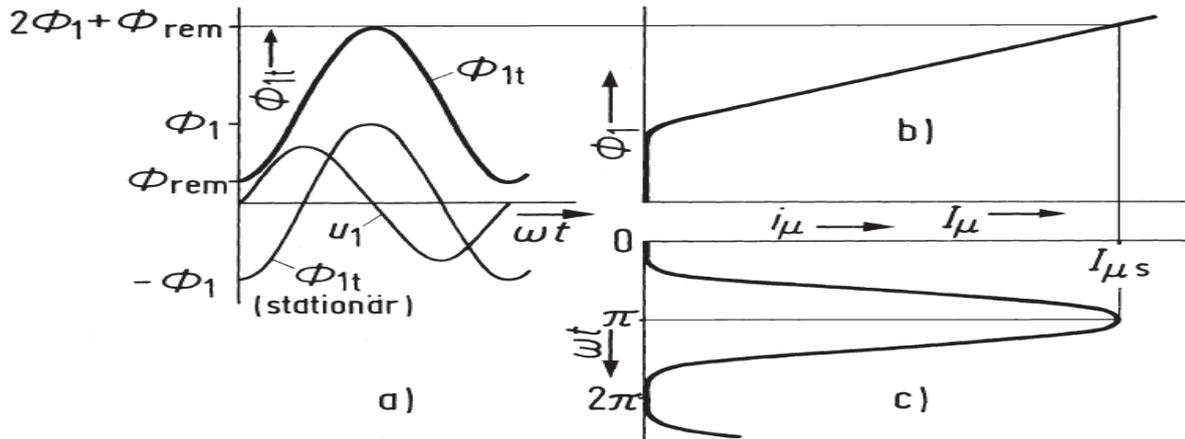


Abbildung 6: Einschaltstromstoßes a) Spannungs- und Flussverlauf b) Magnetisierungskennlinie, c) erste Spitze des Einschaltstroms

Quelle: Elektrische Maschinen von Rolf Fischer

Es gibt mehrere Ansätze um die hohen Einschaltströme zu verhindern. Eine elektronische Schaltung, welche die Nulldurchgänge der Primärspannung bestimmt und zum beliebigen Winkel der Primärspannung schaltet, der sogenannte Schaltwinkelsteller, wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit von Rüdiger-Joachim Bade an der HAW Hamburg entwickelt.



Abbildung 7: Schaltwinkelsteller

Quelle: Bachelorarbeit „Aufbau eines Schaltwinkelstellers für Einphasen- und Drehstromtransformatoren“, Rüdiger-Joachim Bade, HAW Hamburg, 2012

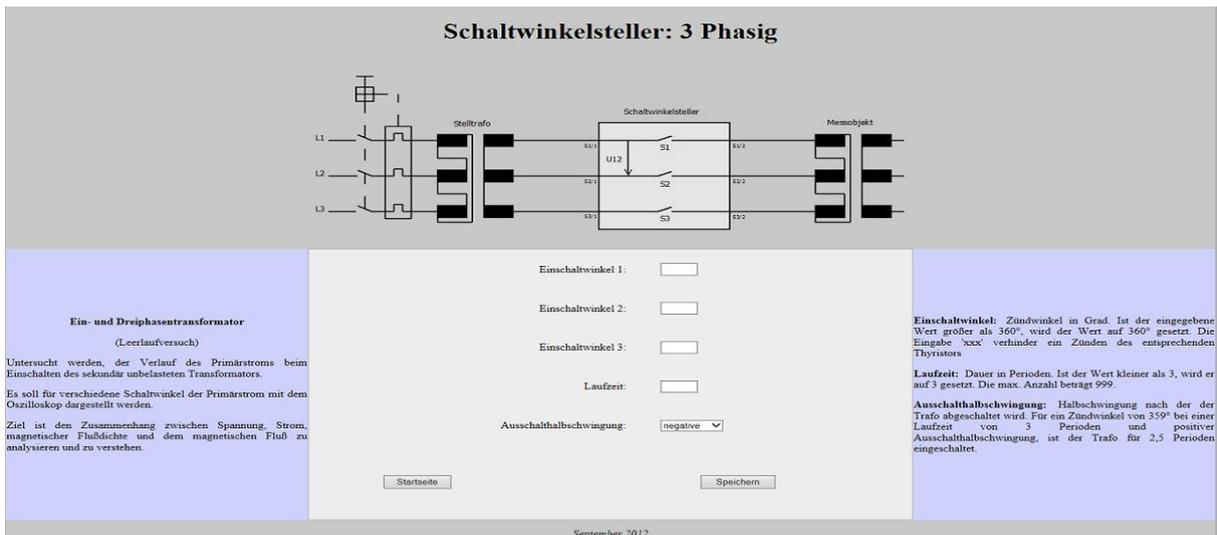


Abbildung 8 : HTML-Oberfläche des dreiphasigen Schaltwinkelstellers

Die Hardware des Schaltwinkelstellers bietet zunächst zwei Möglichkeiten. Je nach Transformatorart wird der Schaltwinkelsteller zwischen einem einphasigen oder einem dreiphasigen Transformator ausgewählt.

Der Drehstromtransformator, welcher wie in Abbildung 9 dargestellt ist, wird an den Schaltwinkelsteller angeschlossen. Er wird auf der Primärseite in Dreieck und auf der Sekundärseite in Stern geschaltet. Auf der Sekundärseite ist keine Last angeschlossen. Der Eingang des Transformators wurde mit der Spannung $U_{UV} = 230V$ versorgt.

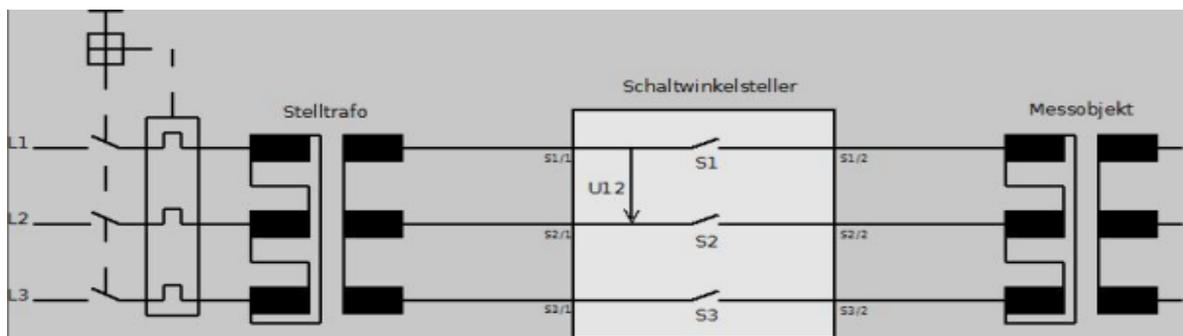


Abbildung 9: Die dreiphasige Einstellung des Schaltwinkelstellers

Wichtig ist es hierbei zu achten, dass für die Nulldurchgangserkennung die Spannung U_{UV} verwendet wird. Die Winkelangaben der Winkeleinstellung beziehen sich auf die Spannung U_{UV} . Mit Hilfe der Spannung- und Stromkennlinien in Abbildung 10 wird ein günstigster Einschaltmoment überlegt.

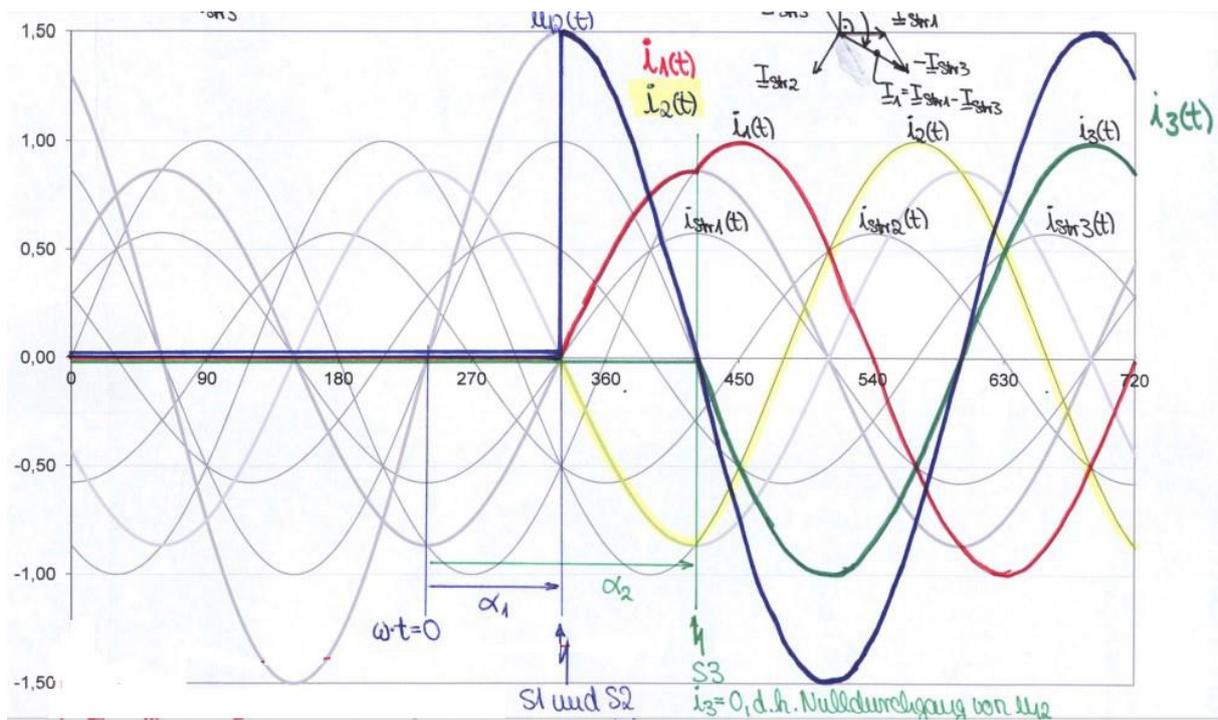


Abbildung 10: Spannung U_{UV} (blau) und Stromverläufe i_{UV} (rot), i_{VW} (gelb) und i_{WU} (grün)

Quelle: Bachelorarbeit „Aufbau eines Schaltwinkelstellers für Einphasen- und Drehstromtransformatoren“ von Rüdiger-Joachim Bade

In Abbildung 10 ist ersichtlich, dass der günstigste Einschaltzeitpunkt bei Schalter S1 bei 90° , Schalter S2 bei 90° und S3 bei 180° geschaltet wird. Die Winkelangaben sind bezogen auf die Spannung U_{UV} (U_{12}). Beim Schaltwinkel S1 bei 90° und S2 bei 90° sind die Ströme I_1 und I_2 am Nullpunkt. Im Moment des Schaltens des Schalters S3 befindet sich I_3 auch im Nullpunkt. Der schlechteste Einschaltzeitpunkt tritt erst dann auf, wenn die Ströme die maximale Amplitude haben. Dies ist der Fall, falls S1 und S2 bei 0° und S3 bei 90° bezogen auf die Spannung U_{UV} eingeschaltet werden.

Zuerst wird der Schaltwinkelsteller kontrolliert. Der Schalter S1 wird bei 90° , S2 bei 90° und S3 bei 90° bezogen auf die Spannung U_{UV} (U_{12}) eingeschaltet.

DSO-X 3014A, MY51360578: Fri Dec 11 10:06:16 2015

1 100V/ 2 100V/ 3 100V/ 4 100V/

17.40ms

5.000%/

Stopp

f

1

35.0V

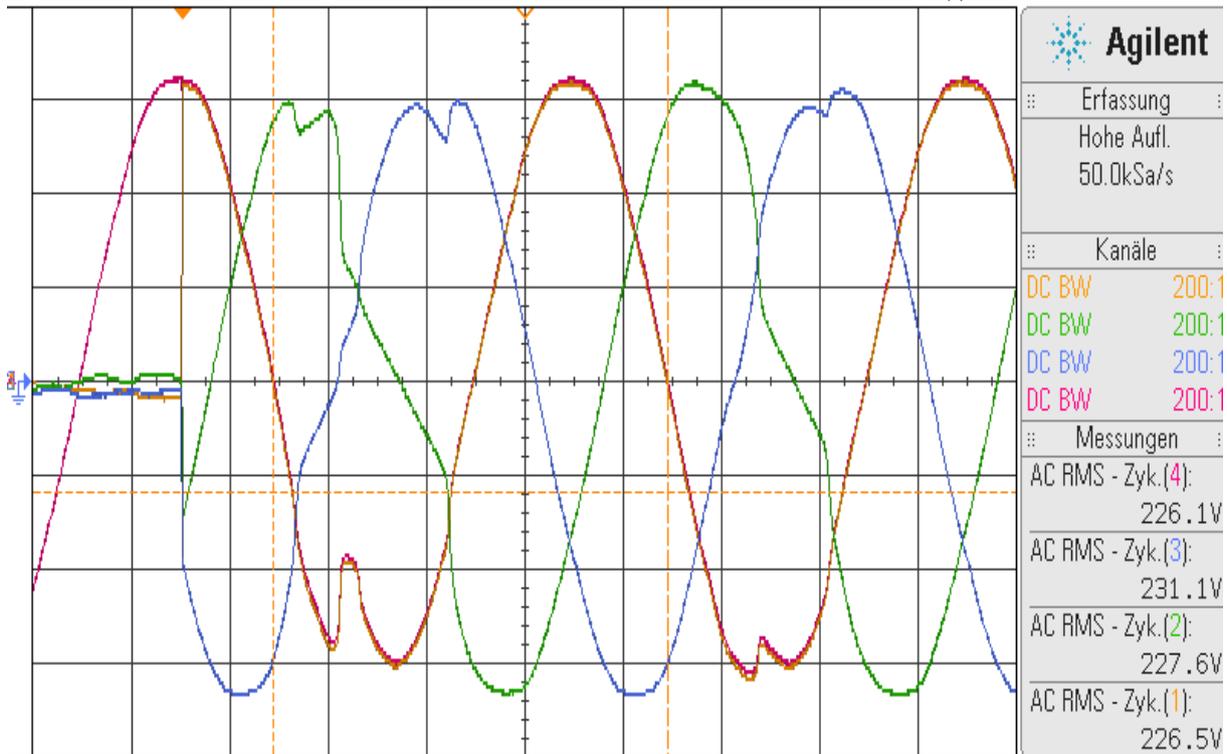


Abbildung 11: Netzspannung (U_{12} , Kanal 4, rosa) und die Primärspannungen U_{UV} (Kanal 1, gelb), U_{VW} (Kanal 2, grün), und U_{WU} (Kanal 3, blau) beim Einschaltwinkel $S_1 90^\circ$, $S_2 90^\circ$ und $S_3 90^\circ$ bezogen auf U_{12}

Um den Schaltwinkelsteller zu überprüfen, wurde mittels eines Oszilloskops Abbildung 11 aufgenommen, ob der Schaltwinkelsteller an den vorgegebenen Winkeln auch schaltet. Die Schaltwinkel entsprechen wie in Abbildung 11 gut zu erkennen den angegebenen Winkeln.

Die Einschaltwinkel 0° , 0° , 90° bezogen auf U_{12} (U_{UV}) wurde in diesem Versuch nicht durchgeführt, da in der Bachelorthesis „Untersuchungen zum Drehstromtransformator“ von Asim Gül bei diesem Versuch Einschaltströme von ca. das 25-fache des Nennstroms betrug. Die Abbildung 12, welche aus der genannten Bachelorarbeit stammt, zeigt die Spitzenwerte der Einschaltströme für die einzelnen Phasen.

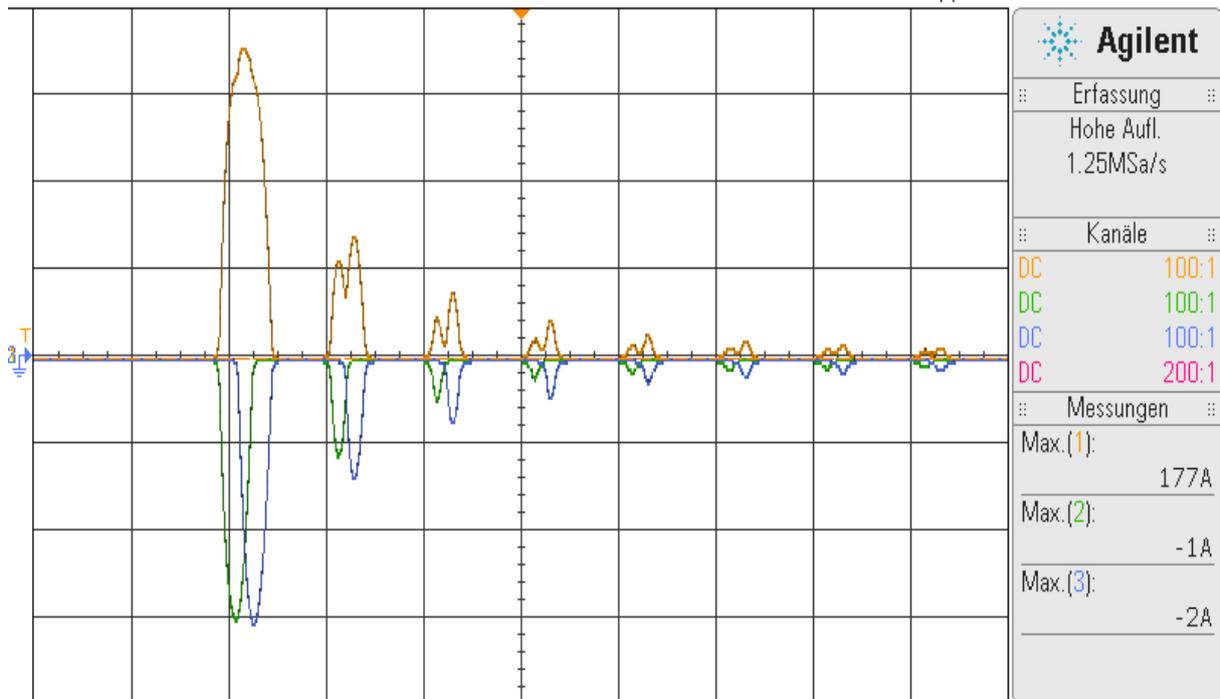


Abbildung 12: Die Einschaltströme I_U (Kanal 1, gelb), I_V (Kanal 2, grün), I_W (Kanal 3, blau) bei 0° , 0° und 90° Einstellung des Schaltwinkelstellers

Quelle: Bachelorarbeit „Untersuchungen zum Drehstromtransformator“ von Asim Gül

Die Einschaltströme erreichen einen Spitzenwert von 177 A. Dieser entspricht ca. das 25-fache des Nennstroms I_N .

In den Abbildungen 13, 14, und 15 stellen Kanal 1 (Gelb) den Strom I_U , Kanal 2 (Grün) den Strom I_V , Kanal 3 (Blau) den Strom I_W und Kanal 4 (Pink) die Netzspannung U_{12} dar. Die Skalierungen sind auf den Abbildungen unterschiedlich, sind aber gut abzulesen.

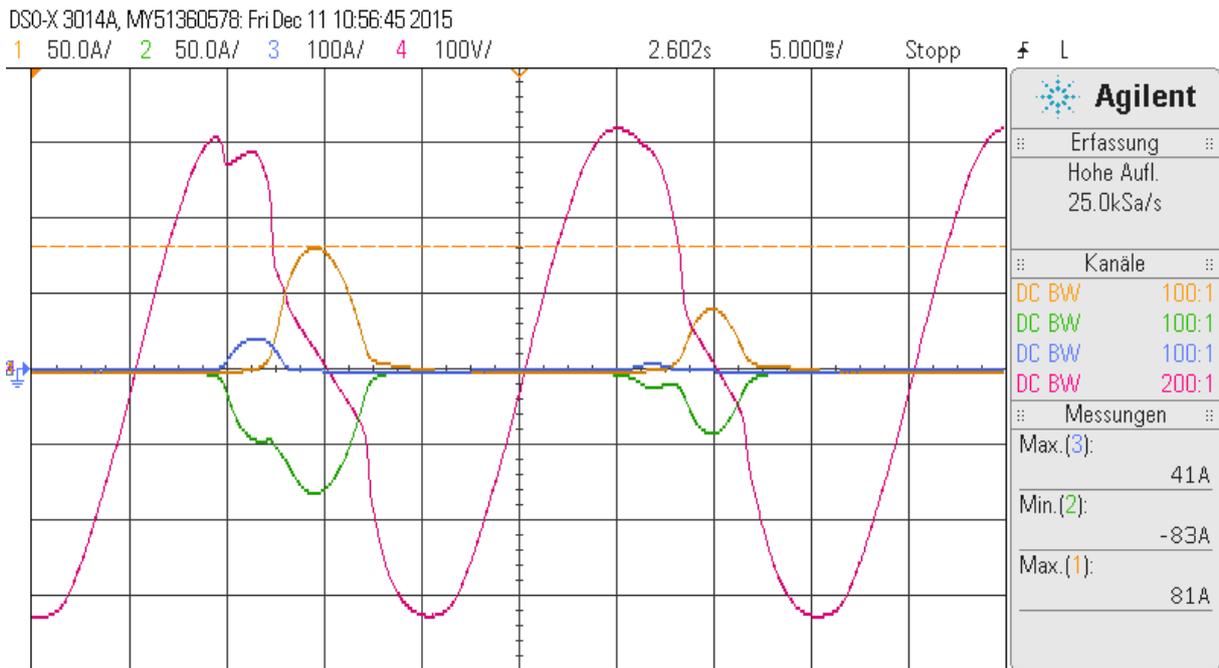


Abbildung 13: Die Einschaltströme I_U (Kanal 1, gelb), I_V (Kanal 2, grün), I_W (Kanal 3, blau) und die Spannung U_{12} (Kanal 4, rosa) bei 0° , 0° , 0° Einstellung des Schaltwinkelstellers

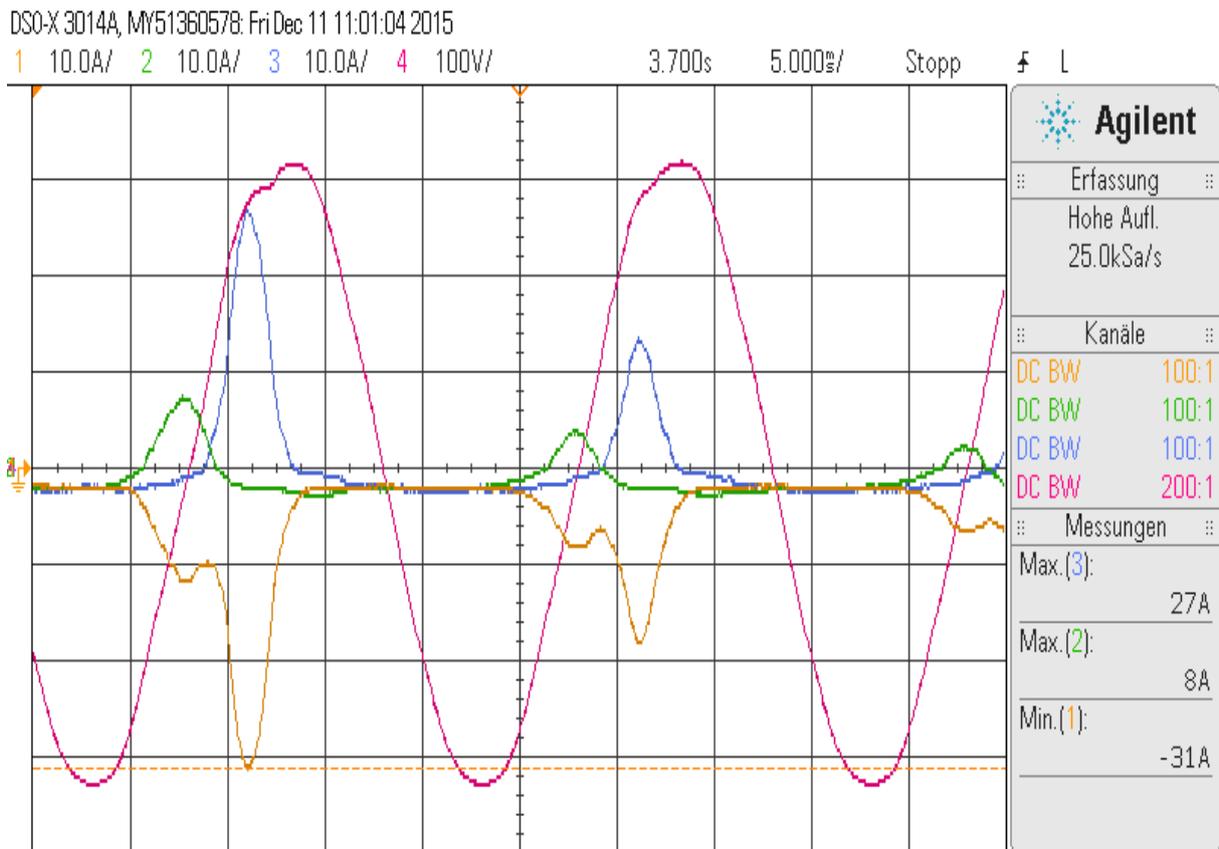


Abbildung 14: Die Einschaltströme I_U (Kanal 1, gelb), I_V (Kanal 2, grün), I_W (Kanal 3, blau) und die Spannung U_{12} (Kanal 4, rosa) bei 90° , 90° , 180° Einstellung des Schaltwinkelstellers

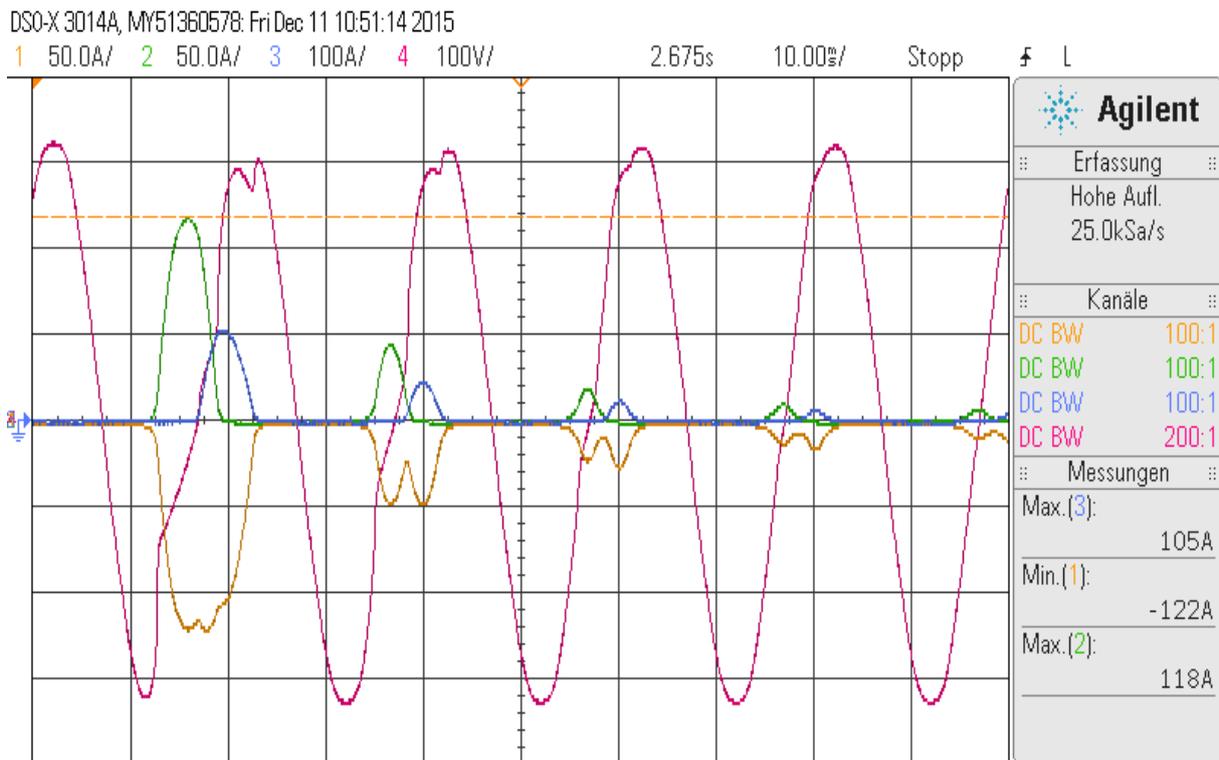


Abbildung 15: Die Einschaltströme I_U (Kanal 1, gelb), I_V (Kanal 2, grün), I_w (Kanal 3, blau) und die Spannung U_{12} (Kanal 4, rosa) bei 210° , 210° , 310° Einstellung des Schaltwinkelstellers

Man kann mit dem Schaltwinkelsteller beliebige Kombinationen des Einschaltwinkels einstellen. Man muss sich zuvor überlegen, welche Winkel am günstigsten sind. Die Winkeln 90° für Schalter S1 und S2 und 180° für Schalter S3 stellen den günstigsten Fall (Winkelangaben auf U_{UV} bezogen) Den ungünstigsten Fall (Abbildung 12) stellen die Einstellwinkeln 0° für Schalter S1 und S2 und 90° für Schalter S3 dar.

3.2 Ersatzschaltung des realen Transformators

Für die Erstellung des Ersatzschaltbildes (Abschnitte 3.2.1 Leerlaufbetrieb bis 3.2.5 Leerlaufsimulation mit der Software Portunus) wurden die Bücher „ELEKTRISCHE MASCHINEN UND UMFORMER“ VON F. MOELLER/ P. VASKE¹⁷ und „ELEKTRISCHE MASCHINEN MIT EINFÜHRUNG IN DIE LEISTUNGSELEKTRONIK“ VON HANS-ULRICH GIERSCH, HANS HARTHUS UND NORBERT VOGELSANG¹⁸ als Hilfsquellen verwendet.

¹⁷ Elektrische Maschinen und Umformer, F. Moeller/ P. Vaske, ISBN: 3519164019

¹⁸ Elektrische Maschinen mit Einführung in die Leistungselektronik, Hans-Ulrich Giersch, Hans Harthus und Norbert Vogelsang, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ISBN: 9783322927064

Da ein Drehstromtransformator auch als 3 parallelbetriebenen Einphasentransformatoren aufgebaut werden kann, dient das Ersatzschaltbild eines Einphasentransformators auch für den Drehstromtransformator zur Hilfe. Deshalb wird das Ersatzschaltbild nur von einer Phase des Drehstromtransformators gezeichnet.

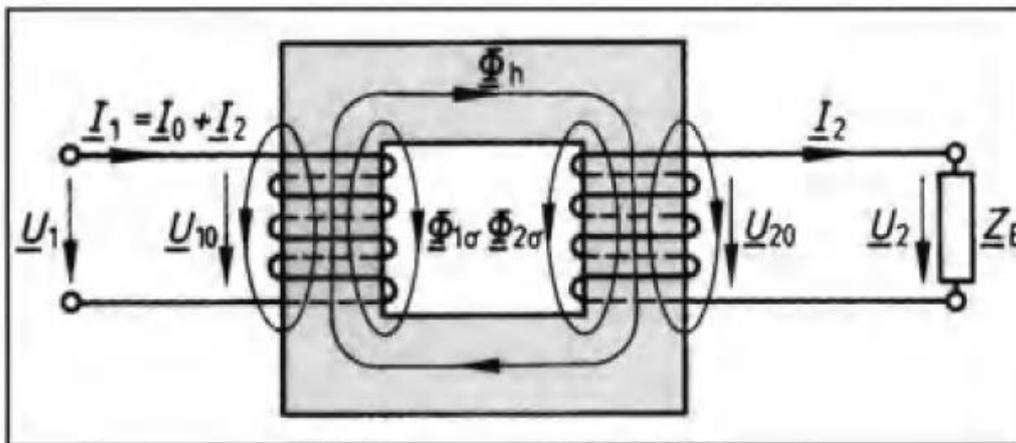


Abbildung 16: Einphasentransformator

Quelle: Elektrische Maschinen mit Einführung in die Leistungselektronik von Hans-Ulrich Giersch, Hans Harthus und Norbert Vogel

Beim Anlegen der Spannung U_1 auf der Primärseite wird die Ersatzschaltung auch belastet wie in Abbildung 16. Die Ersatzschaltung wird schrittweise erfolgen.

1. Schritt

Es wird ein Einphasentransformator betrachtet, der die gleiche Windungszahl auf der Primär- und Sekundärseite hat ($N_1 = N_2$). Solche Transformatoren sind galvanisch getrennte Transformatoren, die als Trenn- oder Schutztransformatoren verwendet werden. Auch der vorhandene Drehstromtransformator ist ein Trenntransformator und hat ein Übersetzungsverhältnis von 1.

2. Schritt

Die Primärwicklung hat einen Wicklungswiderstand R_1 und die Sekundärwicklung den Widerstand R_2 . Diese Widerstände werden als Vorwiderstand in die Zuleitungen zu den Wicklungen gezeichnet. Die Wicklungsspulen sind rein induktiv. Sie besitzen keinen Wirkwiderstand in der Überlegung.

3. Schritt

Da für die Ersatzschaltung ein realer Transformator betrachtet wird, ist die Permeabilität der Luft größer als null. Der Transformator hat zwischen den Primär- und Sekundärwicklungen einen magnetischen Streufluss Φ_σ . In Abbildung 16 wird der Primärstreufluss mit $\Phi_{1\sigma}$ und Sekundärstreufluss mit $\Phi_{2\sigma}$ gekennzeichnet. Die Streuflüsse induzieren in der Spule eine Gegenspannung. Daher wird auch die Streuinduktivität L_σ aufgeteilt. Die primäre Streuinduktivität wird als $L_{\sigma 1}$ gekennzeichnet und die sekundäre Streuinduktivität als $L_{\sigma 2}$. Da die Zerlegung willkürlich entsteht, setzt man oft

$$L_{\sigma 1} = L'_{\sigma 2} = L_\sigma/2$$

wobei $N_1 = N_2$ ist.

4. Schritt

In die Zuleitungen werden die Streuinduktivitäten als induktive Vorwiderstände gelegt. Vom Gesamtfluss wird noch der Hauptfluss Φ_h gespaltet. Er verläuft im Eisenkern und schließt beide Spulen um. Der Magnetisierungsstrom I_μ steigt mit der Zunahme des Hauptflusses. Ohne Eisenverluste sieht das Ersatzschaltbild wie folgt aus:

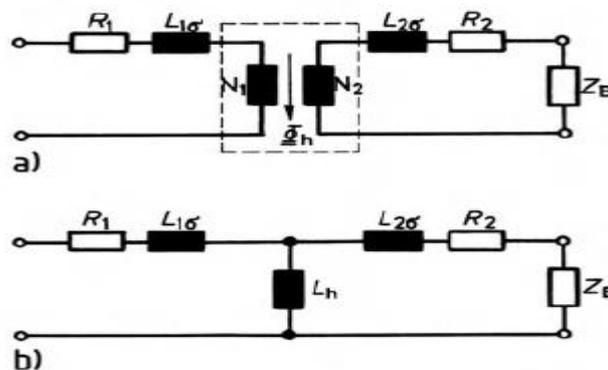


Abbildung 17: Ersatzschaltbild des Transformators ohne Eisenverlustwiderstand

Quelle: Elektrische Maschinen mit Einführung in die Leistungselektronik von Hans-Ulrich Giersch, Hans Harthus und Norbert Vogel

Verbindet man die Wicklungsanfänge und die Wicklungsenden, so induziert der Hauptfluss Φ_h in den beiden Spulen eine gleichgerichtete Spannung U_h . So erhält man eine aus zwei parallelen Leitern bestehende Spule, die den Magnetisierungsstrom $I_\mu = I_1 - I_2$ verursacht. Die Hauptinduktivität L_h lässt sich durch die Gleichung $L_h = \frac{U_h}{\omega I_\mu}$ berechnen.

5. Schritt

Für die Eisenverluste wird ein Ersatzwiderstand R_{Fe} parallel zur Hauptinduktivität geschaltet.

6. Schritt

Es wird bis zum sechsten Schritt angenommen, dass die Windungen der Primärseite und der Sekundärseite gleich sind. Im Allgemeinen haben Primär- und Sekundärseite unterschiedliche Windungen. Man kann mit dem abgeleiteten Ersatzschaltbild trotzdem rechnen, in dem man überlegt, wie sich die Sekundärgrößen bei einer Umwicklung ändern. Deshalb spricht man von einer Transformation.

Aus der Primärseite bezogene Transformation erhält man bei ungleicher Windungszahlen für

den Ausgangswicklungswiderstand

$$R'_2 = R_2 \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 = R_2 \cdot \ddot{u}^2$$

die Ausgangsstreuinduktivität

$$L'_{2\sigma} = L_{2\sigma} \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 = L_{2\sigma} \cdot \ddot{u}^2$$

die Streureaktanz

$$X'_{2\sigma} = X_{2\sigma} \cdot \ddot{u}^2$$

den Sekundärseitigen Strom

$$I'_2 = I_2 \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 = I_2 \cdot \frac{1}{\ddot{u}^2}$$

die sekundärseitige Spannung

$$U'_2 = U_2 \frac{N_1}{N_2} = U_2 \cdot \ddot{u}$$

die Belastungsimpedanz

$$Z'_2 = Z_2 \cdot \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 = Z_2 \cdot \ddot{u}^2$$

Das vollständige Ersatzschaltbild und das Zeigerdiagramm werden in Abbildung 18 dargestellt.

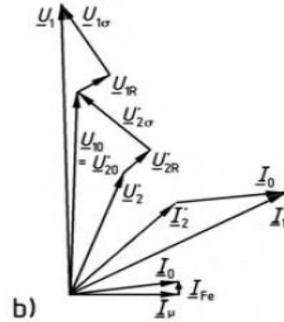
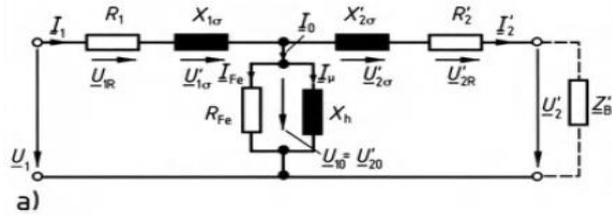


Abbildung 18: Das vollständige Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm

Quelle: Elektrische Maschinen mit Einführung in die Leistungselektronik“ von Hans-Ulrich Giersch, Hans Harthus und Norbert Vogel

Das Zeigerdiagramm und das Ersatzschaltbild werden auch für die Außenleiterspannungen und Außenleiterströme oder Strangspannungen und Strangströme der Dreiphasentransformatoren verwendet. Die übrigen Phasen unterscheiden sich nur durch eine Phasenverschiebung. Das Primär- und Sekundärspannungsverhältnis verhält sich nur im Leerlauf wie das Windungszahlverhältnis N_1/N_2 . Deshalb muss das Übersetzungsverhältnis \ddot{u} beim Leerlaufbetrieb bestimmt werden.

3.2.1 Leerlaufbetrieb

Um die Ersatzschaltbildparameter zu bestimmen, wird der Transformator zuerst im Leerlaufbetrieb untersucht. Die Sekundärseite des Transformators bleibt offen, d.h. es hängt keine Last am Transformator, somit fließt auch kein Strom. Für die Untersuchung kann die Sekundärwicklung als nicht vorhanden angesehen werden. Im Leerlaufbetrieb werden die Eingangsspannung U_{1N} , der Leerlaufstrom I_0 und die aufgenommene Leistung P_0 gemessen. Außerdem wird die Sekundärspannung U_{2N} gemessen, um das Übersetzungsverhältnis zu bestimmen. Aufgrund der Eingangsspannung ist der mag-

netische Fluss ϕ_t zeitlich sinusförmig. Auch im Leerlaufbetrieb nimmt der Transformator eine Scheinleistung ein. Die Blindleistung wird für den Aufbau des magnetischen Flusses des Transformators gebraucht. Für die Scheinleistung im Leerlauf gilt

$$S_{0N} = I_{0N} \cdot U_{1N}$$

Es wird mit Sinusgrößen gearbeitet, deshalb lässt sich der Leistungsfaktor aus den gemessenen Leerlaufwirkleistung und Leerlaufscheinleistung berechnen.

$$\lambda_0 = \frac{|P_0|}{S_0} = \cos \varphi_0$$

Durch diese Gleichung wird die Phasenverschiebung zwischen Eingangsspannung und Leerlaufstrom berechnet. Die Wirkleistung der Scheinleistung ist eine reine Verlustleistung. Sie wird im Transformator in Wärme umgewandelt. Sie deckt unter anderem den Wicklungswiderstandsverlust und aufgrund des magnetischen Kreises entstehen Hystereseverluste und Wirbelstromverluste.

$$P_0 = P_{Cu} + P_{hys} + P_{Wirbel}$$

Die Hystereseverluste sind abhängig von der magnetischen Flussdichte B und der Frequenz der Primärspannung. Sie entstehen beim Durchlaufen der Hystereseschleife und werden im Transformator in Wärme umgesetzt. Die Hystereseverluste können durch Materialien mit niedriger magnetischer Flussdichte vermindert werden.

Die Wirbelstromverluste entstehen durch das magnetische Wirbelfeld, welches der magnetischen Induktion entgegenwirkt. Der magnetische Kreis verursacht eine induzierte Spannung. Durch den vorhandenen Eisenkern wird der Wirbelstrom kurzgeschlossen und führt zu Wärmeentstehung. Die Hystereseverluste und Wirbelstromverluste werden als Eisenverluste zusammengefasst. Somit lässt sich die Gleichung

$$P_0 = P_{0Cu} + P_{Fe}$$

ableiten. Die Wicklungsverluste des Leerlaufstroms sind gegenüber den Eisenverlusten P_{Fe} vernachlässigbar. Deshalb ist die Leerlaufleistung näherungsweise der Eisenverlustleistung.

$$P_0 \cong P_{Fe}$$

Der Leerlaufstrom beträgt bei kleineren einphasigen Transformatoren bis 15% des Nennstroms I_N . Die Magnetisierungskennlinie ergibt sich aus der Messung I_0 in Abhängigkeit der primärseitigen Spannung. Er steigt mit der steigenden Eingangsspannung quadratisch an. Der Leerlaufstrom besteht aus Wirk- und Blindkomponenten.

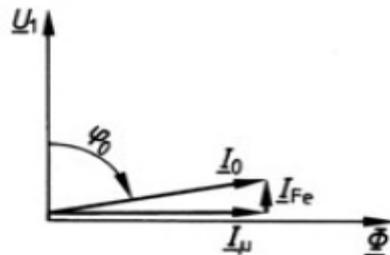


Abbildung 19: Zeigerdiagramm der Leerlaufeffektivwerte

Quelle: Elektrische Maschinen mit Einführung in die Leistungselektronik von Hans-Ulrich Giersch, Hans Harthus und Norbert Vogel

Über den Blindanteil des Leerlaufstromes lässt sich der Magnetisierungsstrom

$$I_{\mu} = I_0 \cdot \sin \varphi_0$$

berechnen. Der Eisenverluststrom lässt sich über den Wirkanteil des Leerlaufstroms

$$I_{Fe} = I_0 \cdot \cos \varphi_0$$

berechnen. Im Gegensatz zum Magnetisierungsstrom ist der Eisenverluststrom deutlich kleiner. Deshalb sind die Wicklungsverluste im Leerlauf vernachlässigbar klein. Der Eisenverlustwiderstand R_{Fe} im Ersatzschaltbild des einphasigen Transformators lässt sich über die Wirkleistung und dem Eisenverluststrom leicht berechnen.

$$R_{Fe} = \frac{P_{0N}}{I_{Fe}^2} = \frac{U_{1N}^2}{P_{0N}}$$

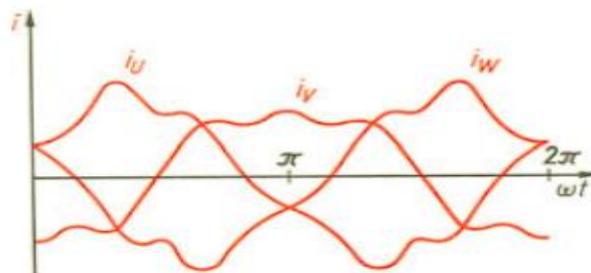


Abbildung 20: Verlauf der Magnetisierungsströme des Dreischenkeltransformators

Quelle: Elektrische Maschinen und Umformer von F. Moller/P Vaske

Der zeitliche Verlauf der magnetisierungsströme der Drehstromtransformatoren weicht aufgrund der nichtlinearen Magnetisierungskennlinie vom sinusförmigen Verlauf der Primärspannung stark ab.

Beim Dreiphasentransformator muss man darauf achten, dass aus den drei Magnetisierungsströmen den quadratischen Mittelwert (kollektiver Effektivwert) bildet und bei der Berechnung diesen Wert mit berücksichtigt.

$$I_{\mu} = \sqrt{\frac{I_U^2 + I_V^2 + I_W^2}{3}}$$

Der magnetische Fluss wird durch die Schaltung des Drehstromtransformators beeinflusst. Bei einer Sternschaltung der Primärseite des Drehstromtransformators tritt kein Flussanteil aus dem Joch heraus, deshalb müssen auch die Strangspannungen und Kernflüsse eine Sinusform haben. Der magnetische Widerstand der mittleren Schenkel ist kleiner als der vom Außenschenkel.

3.2.2 Leerlaufbetrieb des Drehstromtransformators im Labor

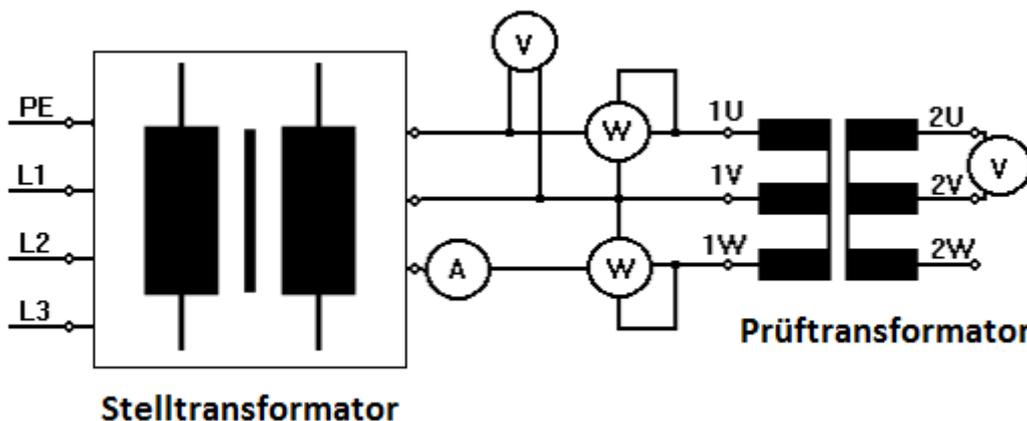


Abbildung 21: Schaltbild für den Leerlaufversuch

Der Schaltaufbau für das Leerlaufbetrieb des Drehstromtransformators wird wie in Abbildung 21 zu erkennen ist, aufgebaut. Auf der Primärseite werden die Spannungen, Ströme und die Leistungen mit dem Leistungsmessgerät HIOKI 3165 gemessen. Das Messgerät kann über die vorhandenen Stromzangen auch die Ströme messen. Mit

einem Multimeter wurde die Spannung zur Kontrolle gemessen. Über einen Stelltransformator wurde eine sinusförmige Spannung von $U_{1N} = 400\text{ V}$ pro Phase vom Netz auf die Primärseite zugeführt. Auf der Sekundärseite des Drehstromtransformators ist keine Last angeschlossen. Es werden die Primär- und Sekundärspannungen, Primärströme und die Primärleistung gemessen.

Der Leerlaufversuch wurde mit einer Yy0-Schaltung (Stern-Stern-Schaltung) des Drehstromtransformators (Prüflingstransformator) durchgeführt. Die Spannung U_{10}^* in der Tabelle 3 ist der Mittelwert der Primärspannungen U_{1U} , U_{1V} und U_{1W} . Dieser Mittelwert wird direkt über dem Leistungsmessegerät Hioki 3165 berechnet, somit wird die Messung einfacher. Der Mittelwert der Primärströme I_{10}^* in der Tabelle 3 wird ebenso direkt auf dem Display des Messgerätes abgelesen. U_{20}^* in der Tabelle 3 ist der Mittelwert der Sekundärspannung. Bei Leerlaufversuch beträgt die Frequenz der Spannung 50 Hz.

Aus dem Leerlaufversuch werden folgende Messergebnisse erhalten:

U_{1U} [V]	U_{1V} [V]	U_{1W} [V]	U_{10}^* [V]
403,4	402,3	400,6	402,2
I_{1U} [A]	I_{1V} [A]	I_{1W} [A]	I_{10}^* [A]
0,413	0,284	0,418	0,372
P_0 [kW]	S_0 [kVA]	Q_0 [kvar]	PF_0
0,050	0,259	0,254	0,196
U_{2U} [V]	U_{2V} [V]	U_{2W} [V]	U_{20}^* [V]
416,3	415,6	413,2	415,0

Tabelle 3: Aus der Leerlaufmessung ermittelte Werte

Die Ersatzschaltbildparameter werden aus den vom Leistungsmessgerät ermittelten Mittelwerten berechnen. Die Parameter wurden mit der Software Portunus mit einer Simulation überprüft. Die Parameter können unter Portunus jedoch nicht für jeden Schenkel einzeln eingegeben werden. Deshalb wurden die Ersatzschaltbildparameter aus den Mittelwerten der Ströme und Spannungen berechnet. Dabei wurden die Spannungen und Ströme als Sinusgrößen angenommen. Außerdem ist es zu beachten, dass die Leistungen für 3 Phasen gemessen wurden. So werden folgende Ersatzschaltbildparameter berechnet:

Das Übersetzungsverhältnis:

$$\ddot{u} = \frac{U_{10}^*}{U_{20}^*} = \frac{402,2V}{415,0V} = 0,97$$

Das Übersetzungsverhältnis weicht von der Herstellerangabe um 3% ab. (Herstellerangabe $\ddot{u}=1$)

Strangspannung:

$$U_{1StrN} = \frac{U_L}{\sqrt{3}} = \frac{402,2V}{\sqrt{3}} = 232,21V$$

Der relative Leerlaufstrom:

$$i_0 = \frac{I_{10}^*}{I_N} = \frac{0,372 A}{7,2 A} = 0,0516$$

Der Eisenverlust- und Magnetisierungsstrom:

$$I_{1Fe} = I_{10} \cdot \cos \varphi_0 = 0,372 A \cdot \cos(78,87^\circ) = 0,0718A$$

$$I_{1\mu} = I_0 \cdot \sin \varphi_0 = 0,372 A \cdot \sin(78,87^\circ) = 0,365A$$

Der Eisenverluststrom lässt sich auch über die Leerlaufwirkleistung berechnen.

$$I_{1Fe} = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot U_N} = \frac{50W}{\sqrt{3} \cdot 400V} = 0,072A$$

Den Magnetisierungsstrom kann man auch über die Leerlaufblindleistung berechnen:

$$I_{1\mu} = \frac{Q_0}{\sqrt{3} \cdot U_N} = \frac{254W}{\sqrt{3} \cdot 400 V} = 0,366A$$

Hier erkennen wir, dass bei unterschiedlicher Berechnung die gleichen Ergebnisse für den Magnetisierungsstrom herauskriegen.

Der Eisenverlustwiderstand

$$R_{Fe} \gg R_1$$

$$R_{Fe} = \frac{U_{1StrN}}{I_{1Fe}} = \frac{232,9 V}{0,072 A} = 3225,14\Omega$$

Oder aus der Leerlaufwirkleistung:

$$P_0 = 3 \cdot I_{Fe}^2 \cdot (R_1 + R_{Fe})$$

$$\text{da } R_{Fe} \gg R_1$$

$$R_{Fe} = \frac{P_0}{3 \cdot I_{Fe}^2} = \frac{50W}{3 \cdot 0,072^2 A^2} = 3215\Omega$$

Die Hauptreaktanz X_{1h} :

$$X_{1h} = \frac{U_{1str}}{I_{1\mu}} = \frac{232,2V}{0,365A} = 636,16\Omega$$

Zum Überprüfen der Hauptreaktanz X_{1h} mit Hilfe der Leerlaufimpedanz und Eisenwiderstand:

$$\frac{1}{X_{1h}^2} = \frac{1}{Z_0^2} - \frac{1}{R_{Fe}^2} = \frac{1}{(624,45\Omega)^2} - \frac{1}{(3215\Omega)^2} = 2,39 \cdot 10^{-6}\Omega^{-2}$$

$$X_{1h} = \sqrt{\frac{1}{2,47 \cdot 10^{-6}}} = 636,28\Omega$$

$$X_h = 2\pi \cdot 50 \frac{1}{s}$$

$$636,28\Omega = 2\pi \cdot 50 L_h \frac{1}{s}$$

$$L_h = 2,025H$$

Leerlaufimpedanz:

$$Z_0 = \frac{U_{10}^*}{I_{10}^*} = \frac{402,2V/\sqrt{3}}{0,372A} = 624,45\Omega$$

Der Leistungsfaktor λ wird direkt vom Leistungsmessgerät Hioki 3165 abgelesen. Er ist das Verhältnis vom Betrag der Wirkleistung zur Scheinleistung. Bei sinusförmigen Spannungen und Strömen wird ein Wirkfaktor definiert. Dieser Wirkfaktor ist gleich dem Kosinus des Phasenverschiebungswinkels.

$$\lambda = \frac{|P_0|}{S_0} = \frac{0,050kW}{0,259kVA} = 0,193$$

Aus dem Leistungsmesser ermittelter Leistungsfaktor (PF) oder direkt aus dem Wirkleistung-Scheinleistungsverhältnis unter der Annahme, dass die Grundschwingungsverläufe der Ströme sinusförmig sind, kann der Phasenverschiebungswinkel berechnet werden.

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{S_0} = \frac{0,050kW}{0,259kVA} = 0,193$$

$$\varphi_0 = \cos^{-1} 0,193 = 78,87^\circ$$

	Übersetzungs- verhältnis \ddot{u}	Eisenverlust- strom I_{1Fe} [A]	Magnetisie- rungsstrom $I_{1\mu}$ [A]	Leerlauf- leistung [W]
berechnet	0,97	0,72	0,365	50
Aus der Bachelor- arbeit. von Asim Gül	0,9524	0,037	0,388	26
	Leistungsfaktor	Eisenwiderstand R_{Fe} [Ω]	Leerlaufimpe- danz Z_0 [Ω]	Hauptre- aktanz X_{1h} [Ω]
berechnet	0,193	3225,14	624,45	636,28
Aus der Bachelor- arbeit. von Asim Gül	0,095	6300	584,6585	597,83

Tabelle 4: Vergleich der berechneten und gemessenen Werte mit der Bachelorarbeit von Herrn Gül

Aus dem Vergleich folgen unterschiedliche Werte. Während der Messung wurden diese Unterschiede beachtet und der Versuch wurde zweimal durchgeführt. Bei der Bachelorarbeit von Asim Gül „Untersuchungen zum Drehstromtransformator“ wurden nur die Wirkleistung und der Leistungsfaktor mit dem Leistungsmessgerät gemessen. Es kann ein Ablesefehler von Asim Gül sein, oder die Messungen wurden nicht bei Nennspannung ($U_N = 400V$) durchgeführt.

Der zeitliche Verlauf der Leerlaufströme wurde mit Hilfe eines Oszilloskops aufgenommen. Kanal 1 (Gelb) ist der zeitliche Verlauf des Stromes I_{1U} , Kanal 2 (Grün) ist der zeitliche Verlauf des Stromes I_{1V} und Kanal 3 (Blau) ist der zeitliche Verlauf des Stromes I_{1W} . Die Primärseite wird in Sternschaltung ohne Nullleiter angeschlossen.

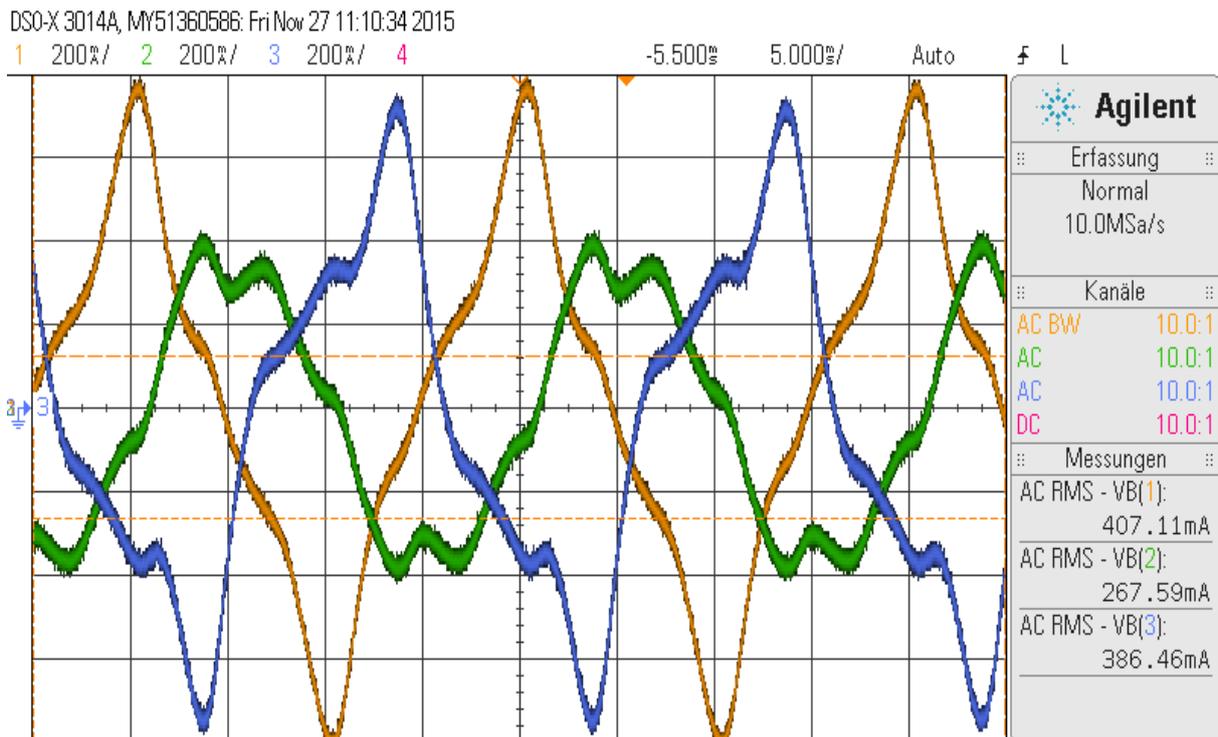


Abbildung 22: Zeitlicher Verlauf der Leerlaufströme I_u (Kanal 1, gelb), I_v (Kanal 2, grün), I_w (Kanal 3, blau)

Effektivwerte der Ströme wurden auch mit dem vorhandenen Leistungsmessgerät gemessen (siehe Tabelle 3). „Beim Dreischenkel-Drehstromtransformator findet der mittlere Fluss kürzere Eisenwege vor, aus diesem hat er auch einen kleineren Magnetisierungsbedarf“¹⁹. Wegen des kleineren Magnetisierungsbedarfes über dem mittleren Schenkel fließt ein kleinerer Strom I_v (Abb. 22, $I_v = 267,69 \text{ mA}$).

Der Strom des Mittelschenkels hat beim Leerlaufversuch einen Strom von ca. 65% des äußeren Schenkels. Dieser Fall wurde untersucht, warum hier ein kleinerer Strom vorhanden ist. Folge dessen wurde eine Untersuchung der einzelnen Phasen des Drehstromtransformators durchgeführt. Die Klemmen 1U1 und 1U2 wurden an einem Einphasenstelltransformator verbunden und der Leerlaufversuch wurde durchgeführt.

Auch wenn jeder Schenkel als einzelner Einphasentransformator betrachtet wird, fließt am mittleren Schenkel ein geringerer Leerlaufstrom als I_u und I_w .

Als Letztes wurde der Leerlaufversuch in Dreieck-Stern-Schaltung durchgeführt.

Bei einer Dreieckschaltung erhält man auf einer Wicklung mehr Leerlaufstrom als bei den anderen Wicklungen (Abbildung 23). Der zeitliche Verlauf der Leerlaufströme

¹⁹ Elektrische Maschinen und Umformer, F. Moeller/ P. Vaske, B.G. Teubner Stuttgart Verlag, ISBN: 3519164019

wurde mit Hilfe eines Oszilloskops aufgenommen. Kanal 1 (Gelb) ist der zeitliche Verlauf des Stromes I_U , Kanal 2 (Grün) ist der zeitliche Verlauf des Stromes I_V und Kanal 3 (Blau) ist der zeitliche Verlauf des Stromes I_W . Die Primärseite ist in Dreieck-Schaltung und es wurde eine Spannung von $U_N = 230\text{ V}$ eingespeist.

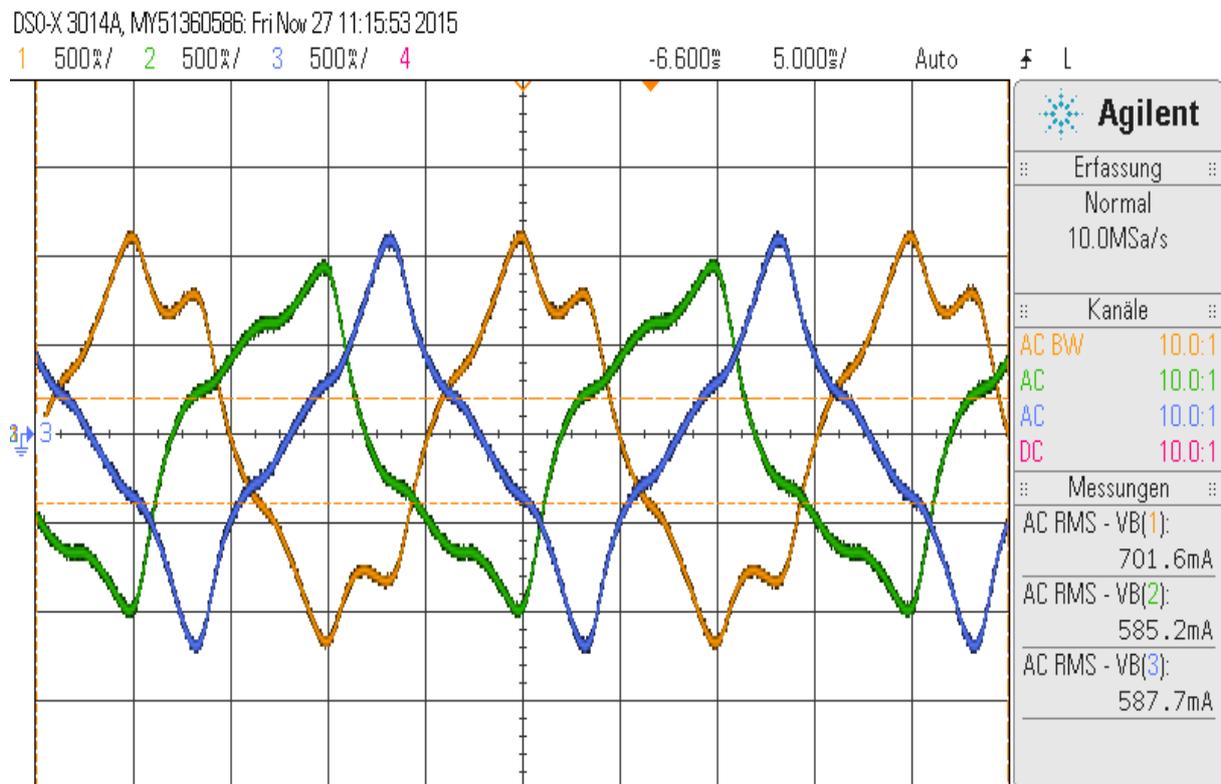


Abbildung 23: zeitlicher Verlauf der Leerlaufströme I_U (Kanal 1, gelb), I_V (Kanal 2, grün), I_W (Kanal 3, blau) bei Dreieckschaltung

Bei einer Dreieckschaltung der Primärseite ist in der Abbildung 23 zu sehen, dass beide Schenkeln I_V und I_W etwa den gleichen effektiven Stromwert besitzen. Der Effektivwert des Leerlaufstroms I_U der Phase U ist mit 200 mA größer als die anderen beiden Ströme. Auch hier wurden die Effektivwerte über Leistungsmessgerät Hioki 3165 gemessen.

3.2.3 Kurzschlussbetrieb

Beim Kurzschlussversuch wird der Drehstromtransformator auf der Sekundärseite kurzgeschlossen. Die Spannung auf der Sekundärseite ist gleich null. Auf der Primärseite erhöht man die Spannung bis der Strom I_1 auf der Sekundärseite den Nennstrom I_{1N} erreicht. In diesem Versuch wird die Eingangsspannung U_1 , der Strom I_{1N} und die

aufgenommene Wirkleistung gemessen. Der Effektivwert des Dauerkurzschlussstroms ist

$$I_k = \frac{U_N}{Z_k} = \frac{U_N}{\sqrt{R_k^2 + X_k^2}}$$

Bei Kleintransformatoren ist der Kurzschlusswirkwiderstand R_k größer als der Kurzschlusscheinwiderstand. Deshalb ist der Kurzschlussstrom 15- bis das 30-fache des Nennstroms I_N . Bei Großtransformatoren ab 200 MVA ist aufgrund des kleineren Wirkwiderstandanteils das Kurzschlussstromverhältnis $\frac{I_k}{I_N}$ dementsprechend kleiner.

Bei Großtransformatoren ist der Stoßkurzschlussstrom i_s mehr von Bedeutung als der Dauerkurzschlussstrom i_d . Der Stoßkurzschluss kommt zustande, wenn ein in Betrieb leerlaufender Transformator kurzgeschlossen wird. Nach diesem Ausgleichsvorgang wird der Betriebszustand elektromagnetisch ausgeglichen und der Dauerkurzschlussstrom erreicht. Der Stoßkurzschluss ist ein ähnlicher Vorgang wie das Einschalten des Transformators. Der Wirkwiderstand R_k verursacht ein schnelles Abklingen des Kurzschlussstromes i_k . Die Abklingzeitkonstante lässt sich mit der Gleichung

$$\tau = \frac{L_\sigma}{R_k} = \frac{X_k}{\omega \cdot R_k} = \frac{u_\sigma}{\omega \cdot u_r}$$

berechnen. Der Stoßkurzschluss lässt sich mit der Gleichung

$$i_s = \sqrt{2} \cdot I_k \cdot \left[\sin(\omega t - \varphi_k) + \sin \varphi_k \cdot e^{\frac{-t}{\tau_k}} \right]$$

berechnen. Für den Stoßkurzschlussstrom gilt es im Nulldurchgang der Spannung

$$i_s = \sqrt{2} \cdot I_k$$

Bei großen Transformatoren erreicht der Stoßkurzschlussstrom um den 1,86-Fache des Dauerkurzschlussstromes.

Die relative Kurzschlussspannung bildet das Verhältnis zwischen Kurzschlussspannung und Nennspannung in Prozent. Sie wird nach der Gleichung

$$u_{KN} = \frac{U_{KN}}{U_{1N}} \cdot 100\%$$

bestimmt. Sie beträgt bei kleineren und mittleren Transformatoren zwischen 3 bis 6 %. Die Transformatoren dürfen nur parallel geschaltet werden, wenn sie ähnliche relative Kurzschlussspannung besitzen. Um den Spannungsabfall möglichst klein zu halten, werden in kleineren Verteilungsnetzen Transformatoren gewählt, die eine kleine relative Kurzschlussspannung haben.

Im Kurzschlussfall wird keine Energie vom Transformator entnommen. Die gemessene Scheinleistung ist die im Transformator umgesetzte Wicklungs- und Eisenverluste. Sie wird im inneren Widerstand R_k verbraucht. Der innere Widerstand setzt sich aus den Wicklungswiderständen R_1 und R_2 zusammen. Für die Wicklungsverlusten P_{VCu} gilt im Kurzschlussbetrieb

$$P_{VCu} = I_{1N}^2 R_1 + I_{1N}^2 R_2$$

Da die Kurzschlussspannung zum Vergleich der Nennspannung sehr klein ist, wird im Transformator ein sehr kleines Magnetfeld aufgebaut. Da die Eisenverluste somit gegenüber der Kurzschlussleistung sehr klein sind, werden sie vernachlässigt. Deshalb gilt näherungsweise für die Kurzschlussleistung

$$P_k \approx P_{VCu} = I_{1N}^2 R_1 + I_{1N}^2 R_2$$

Die Kurzschlussphasenverschiebung φ_k zwischen Kurzschlussleistung und Nennstrom wird über das Verhältnis von Kurzschlusswirkleistung und Kurzschlussleistung bestimmt.

$$\cos \varphi_k = \frac{P_K}{S_{KN}} = \frac{P_K}{I_{1N} \cdot U_{KN}}$$

Die Kurzschlussleistung besteht aus Wirk- und Blindleistungskomponenten.

$$U_{Wirk} = U_K \cdot \cos \varphi_K$$

$$U_{Blind} = U_K \cdot \sin \varphi_K$$

Mit der Blindleistungskomponente U_{Blind} wird der Streuspannungsabfall bezeichnet. Die Streuspannungen werden in der Primärwicklung und Sekundärwicklung erzeugt.

Der Ersatzwiderstand für die Wicklungswiderstände R_1 und R_2 , die auch als Kurzschlussresistenz bezeichnet wird, lässt sich mit Hilfe folgender Gleichung berechnen:

$$R_K = \frac{P_K}{I_{1N}^2}$$

Die Wirkspannung lässt sich mit der Gleichung

$$U_R = I_1 \cdot R_1 + I'_2 \cdot R'_2 = I_1 \cdot (R_1 + R'_2) = I_1 \cdot R_K$$

berechnen.

Für die Streuspannung ergibt sich

$$U_\sigma = I_1 \cdot X_{1\sigma} + I'_2 \cdot X'_{2\sigma} = I_1 \cdot (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma}) = I_1 \cdot X_{K\sigma}$$

Mit dem Kurzschlussversuch werden die Ersatzschaltbildparameter $X_{K\sigma}$ und R_K bestimmt. Daraus ergibt sich auch der Kurzschlussimpedanz Z_K

$$Z_K = \sqrt{X_{K\sigma}^2 + R_K^2}$$

Kurzschlussspannung:

$$U_K = I_1 \cdot \sqrt{X_{K\sigma}^2 + R_K^2} = I_1 \cdot Z_K$$

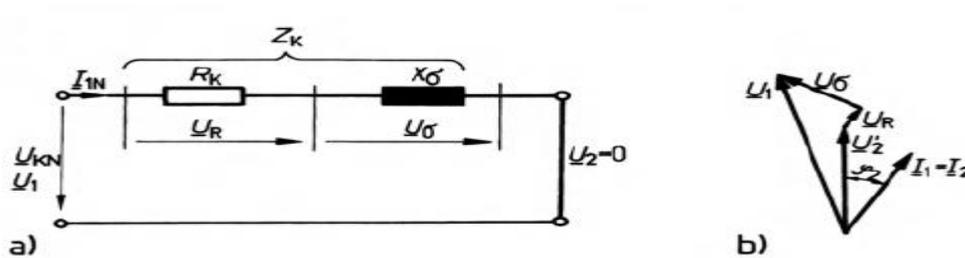


Abbildung 24: Kurzschlussersatzschaltbild des Transformators und Zeigerdiagramm

Quelle: Elektrische Maschinen mit Einführung in die Leistungselektronik von Hans-Ulrich Giersch, Hans Harthus und Norbert Vogel

3.2.4 Kurzschlussversuch des Drehstromtransformators im Labor

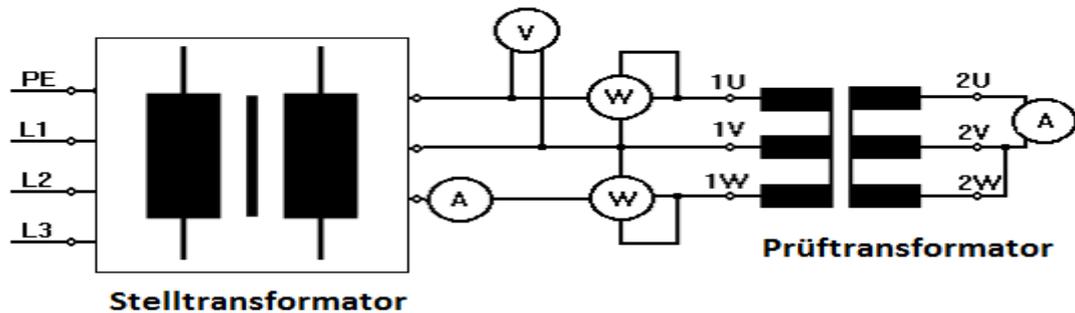


Abbildung 25: Schaltbild des Kurzschlussversuches

Quelle: Als einphasiges Schaltbild aus dem Buch „Elektromaschinen in Theorie und Praxis“ von Ali Farschtschi

Für das Kurzschlussbetrieb wird der Drehstromtransformator wie oben in der Abbildung 25 gezeichnet ist, zusammengeschaltet. Dieser Versuch wird auch in Yy0-Schaltung (Stern-Stern-Schaltung) des Drehstromtransformators durchgeführt. Beim Kurzschlussversuch gilt es zu beachten, dass der Strom I_{2N} an der Sekundärseite nicht den Nennstrom $I_N = 7,2A$ überschreitet. Die Sekundärwicklungen werden kurzgeschlossen, deshalb wird der Magnetisierungsstrom I_μ vernachlässigt. Mit dem Kurzschlussversuch können die Größen des Kurzschlussersatzschaltbildes bestimmt werden. Bei diesem Versuch wurden die beiden vorhandenen Leistungsmessgeräte von der Firma Hioki verwendet, welche beim Leerlaufversuch in Betrieb waren. Auch hier sind U_{1K}^* und I_{1K}^* vom Leistungsmessgerät abgelesene Mittelwerte von den einzelnen Phaseneffektivwerte. Die Berechnungen werden auch mit den Mittelwerten durchgeführt und der Drehstromtransformator wird auch als einphasiger Transformator betrachtet.

Mit dem Leistungsmessgerät wurden folgende Messergebnisse ermittelt.

U_{1U} [V]	U_{1V} [V]	U_{1W} [V]	U_{1K}^* [V]
11,0	11,3	11,3	11,2
I_{1U} [A]	I_{1V} [A]	I_{1W} [A]	I_{1K}^* [A]
7,193	7,148	7,257	7,199
P_K [kW]	S_K [kVA]	Q_K [kvar]	PF_K
0,130	0,140	0,051	0,93
I_{2U} [V]	I_{2V} [V]	I_{2W} [V]	I_{2K}^* [V]
6,87	6,87	7,06	6,93

Tabelle 5: Messergebnisse des Kurzschlussversuches

Aus den Messergebnissen werden folgende Ersatzschaltbildparameter berechnet:

Das Stromübersetzungsverhältnis

$$\ddot{u} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{6,93}{7,199A} = 0,963$$

Das Übersetzungsverhältnis stimmt mit dem, welches bei dem Leerlaufversuch berechnet wurde, überein.

Die relative Kurzschlussspannung u_k

$$u_k = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{1K}^*}{\sqrt{3} \cdot U_{1N}} \cdot 100\% = \frac{11,2V}{400V} \cdot 100\% = 2,8\%$$

Die Wirkspannung:

$$U_{1R} = U_{kN} \cdot \cos \varphi_k = 11,2 \cdot 0,93 = 10,42V$$

Die Streuspannung:

$$U_{1\sigma} = U_{kN} \cdot \sin \varphi_k = 4,16V$$

Relativwerte:

$$u_{1R} = \frac{U_{1R}}{U_{1N}} = \frac{10,42V}{400V} = 0,026$$

$$u_{1\sigma} = \frac{U_{1\sigma}}{U_{1N}} = \frac{4,16V}{400V} = 0,0104$$

Bei diesem Drehstromtransformator überwiegt der Wirkspannungsanteil erheblich.

Der Kurzschlussleistungsstrom:

$$I_{1N} = I_{1K} = \frac{P_k}{\sqrt{3} \cdot U_k \cdot \cos \varphi_k} = \frac{130W}{\sqrt{3} \cdot 11,2V \cdot 0,93} = 7,1A$$

Die Kurzschlussimpedanz Z_{1k}

$$Z_{1k} = \frac{U_{1K}}{I_{1k}} = \frac{11,2V}{7,199A} = 1,556\Omega$$

Der Kurzschlussleistungsfaktor $\cos \varphi_k$

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{S_k} = \frac{130W}{140VA} = 0,93$$

$$\varphi_k = \cos^{-1}(0,93) = 21,79^\circ$$

Ohmscher Kurzschlusswiderstand R_{1k}

$$R_{1k} = Z_k \cdot \cos(\varphi_k) = 1,556\Omega \cdot 0,93 = 1,447\Omega$$

Oder auch aus der Wirkspannung:

$$R_{1k} = \frac{U_{1R}}{I_N} = \frac{10,42V}{7,2A} = 1,447\Omega$$

Die Kurzschlussreaktanz X_k

$$X_{1k} = Z_k \cdot \sin(\varphi_k) = 1,556\Omega \cdot \sin(21,79^\circ) = 0,578\Omega$$

Da das Übersetzungsverhältnis $\ddot{u}=1$ ist, gilt:

$$R'_2 = R_2 = R_1 = 0,5 \cdot R_k = 0,5 \cdot 1,447\Omega = 0,725\Omega$$

$$X'_{2\sigma} = X_{1\sigma} = X_{2\sigma} = 0,5 \cdot X_k = 0,5 \cdot 0,578\Omega = 0,289\Omega$$

Der Dauerkurzschlussstrom I_{kd}

$$I_{kd} = \frac{U_N}{Z_k} = \frac{400V}{1,556\Omega} = 257,07A$$

Der Stoßkurzschlussstrom i_s

$$I_s = 2,55 \cdot I_{kd} = 2,55 \cdot 257,07A = 655,53A$$

Die Kupferverluste P_{CuN} :

$$P_{CuN} = P_k = 130W$$

Die Abkling-Zeitkonstante:

$$\tau = \frac{L_\sigma}{R_k} = \frac{\omega \cdot L_\sigma \cdot I_N}{\omega \cdot R_k \cdot I_N} = \frac{u_{1\sigma}}{\omega \cdot u_{1R}} = \frac{0,0104s}{50 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,026} = 1,27s$$

	\ddot{u}	U_k [V]	u_k [%]	R_k [Ω]	X_k [Ω]	Z_{1k} [Ω]	I_{kd} [A]
berechnet	0,963	11,2	2,8	1,447	0,578	1,556	255,07
Aus Bachelor-thesis von Gül	1,06	11,8	3,034	0,792	0,398	1,012	237,31
	i_s [A]	R_1 [Ω]	R_2 [Ω]	$X_{1\sigma}$ [Ω]	$X_{2\sigma}$ [Ω]	φ_k [°]	P_k [W]
berechnet	655,53	0,725	0,725	0,289	0,289	21,79	130
Aus Bachelor-thesis von Gül	605,14	0,396	0,396	0,199	0,199	21,4	128

Tabelle 6: Vergleich der berechneten Werte mit Bachelorarbeit von Herrn Gül

Es sind leider Unterschiede vorhanden. Asim Gül hat bei seiner Bachelorarbeit bei der Kurzschlussmessung die mittlere Phase nicht berücksichtigt. Es wurde der Mittelwert über die äußeren Schenkel gebildet (Bachelorarbeit „Untersuchungen zum Drehstromtransformator“ von Herrn Gül, Seite 62).

3.2.5 Leerlaufsimulation mit der Software Portunus

Die berechneten Größen des Ersatzschaltbildes werden in die Parameterliste der Simulation-Software Portunus eingegeben. Außerdem soll auch die Streuziffer σ berechnet werden.

$$\sigma = \frac{\text{Streuintduktivität}}{\text{Hauptinduktivität}}$$

Da das Übersetzungsverhältnis 1 ist, gilt für die Streuziffer auf der Sekundär- und Primärseite.

$$\sigma_{1,2} = \frac{\text{Streuintduktivität}}{\text{Hauptinduktivität}} = \frac{0,289 \Omega}{636,28 \Omega} = 0,0005$$

Die Wicklungswiderstände wurden im Abschnitt 3.2.4 Kurzschlussversuch des Drehstromtransformators berechnet.

Parameter		Anzeige/Ausgaben	
Übersetzungsverhältnis [V]	Widerstand Primärseite [Ohm]	Widerstand Sekundärseite [Ohm]	
1.04	0.725	0.725	
Hauptinduktivität [H]	Streuzyfffer Primärseite [V]	Streuzyfffer Sekundärseite [V]	
2.03	0.0005	0.0005	
Magnetische Kopplung			
Kopplfaktor Außen - Mittelschenkel	0.5		
Anfangswerte der Wicklungsströme [A]			
Primär L1	Primär L2	Primär L3	
0.0	0.0	0.0	
Sekundär L1	Sekundär L2	Sekundär L3	
0.0	0.0	0.0	

Abbildung 26: Eingabe der berechneten Parameter in Portunus

Mit einem Multimeter aus der Software-Bibliothek werden die einzelnen Leiterspannungen und Leiterströme gemessen.

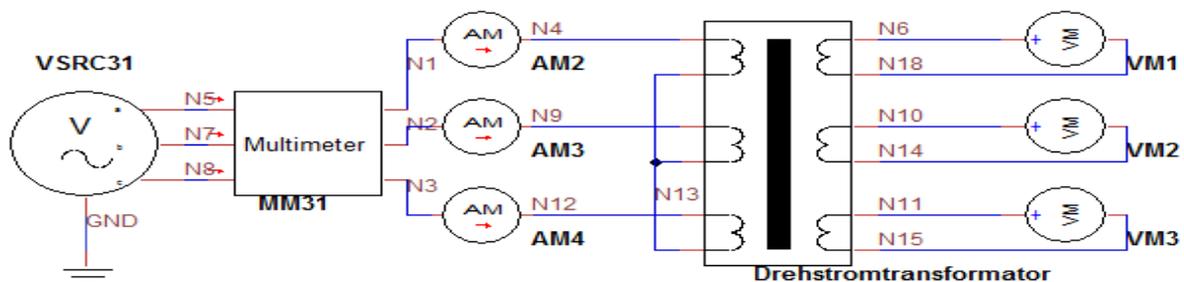


Abbildung 27: Leerlaufsimulation mit Stern-Sternschaltung

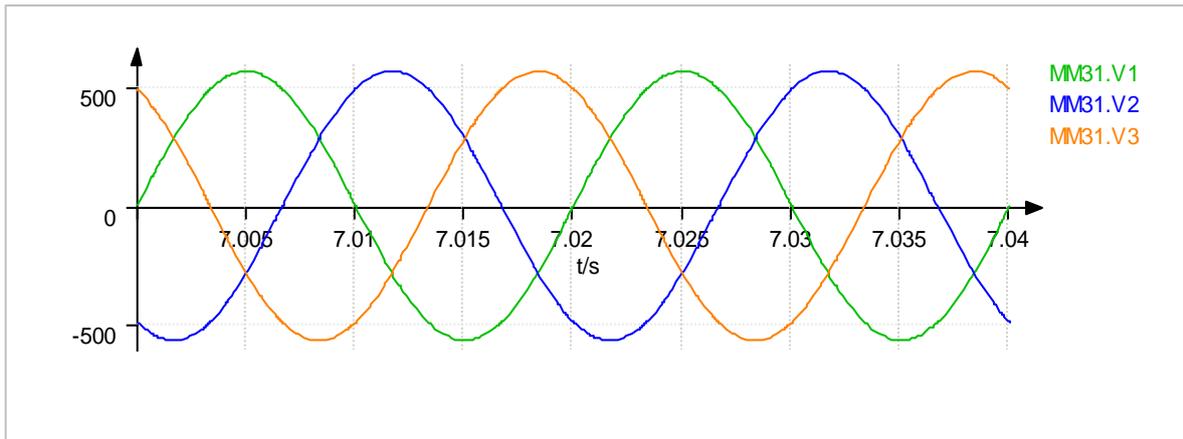


Abbildung 28: Primärseitige Spannungen U_{1U} (grün), U_{1V} (blau), U_{1W} (gelb) bei Leerlaufsimulation

Die Effektivwerte der Primärspannungen sind genau $U_1 = 400 \text{ V}$. Im Leerlaufversuch des Drehstromtransformators im Labor konnten die $U_N = 400 \text{ V}$ nicht in allen Phasen erreicht werden.

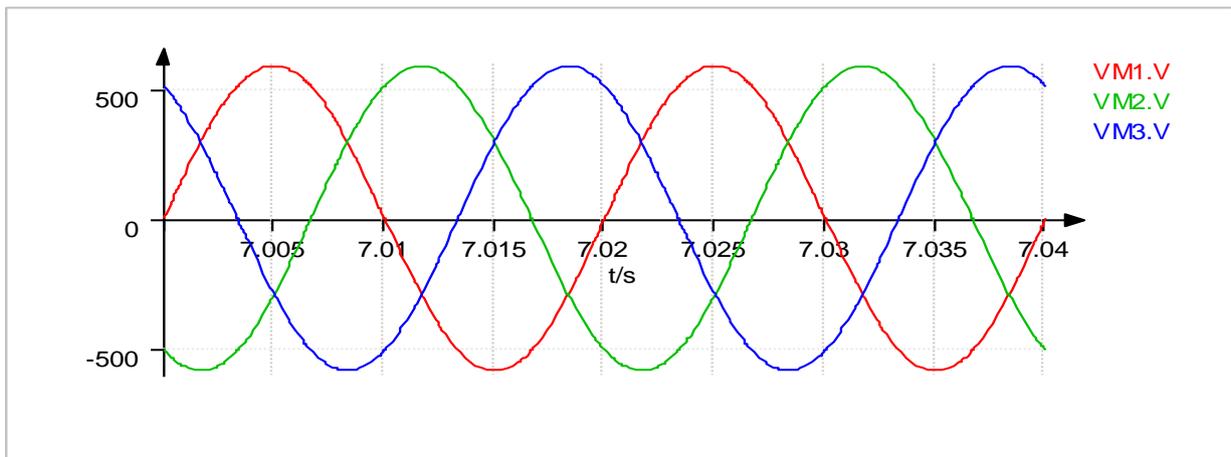


Abbildung 29: Sekundärseitige Leerlaufspannungen U_{2U} (rot), U_{2V} (grün), U_{2W} (blau) bei der Simulation

Der Effektivwert der Sekundärspannung beträgt $U_2 = 416 \text{ V}$. Im Gegensatz zum Leerlaufversuch ist der Effektivwert der Spannungen in allen Phasen gleich.

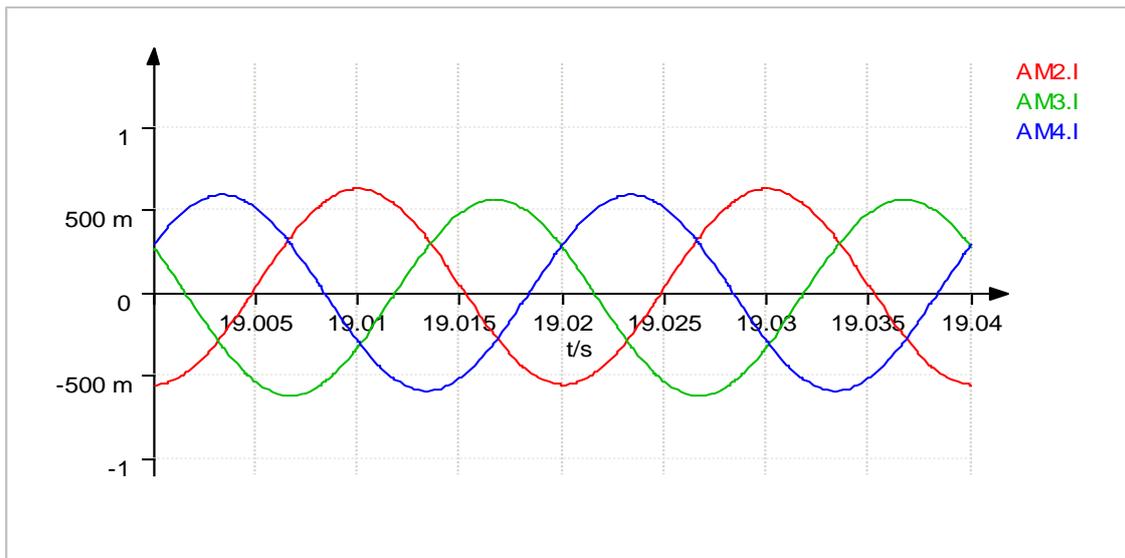


Abbildung 30: Leerlaufströme I_{1U} (rot), I_{1V} (grün), I_{1W} (blau) bei der Simulation

Der quadratische Mittelwert der Ströme liegt bei 438 mA. Man kann die Effektivwerte direkt im Programm Portunus zeigen lassen. Der Mittelwert der Ströme lag beim Drehstromtransformator bei 372 mA. Die Leerlaufströme sind etwas höher als erwartet. Außerdem ist der Strom im Mittelschenkel gleich groß wie bei den äußeren Schenkeln. Das liegt an dem Koppelfaktor vom mittleren zum äußeren Schenkeln, welcher in der Software immer 0,5 ist. In einem realen Drehstromtransformator sind die Kopplungen unterschiedlich. Das Drehstromtransformatormodell im Portunus verhält sich ideal. Außerdem lässt die Software mit den gängigen Ersatzschaltbildern die Hysterese-Effekte und die Sättigung nicht anzeigen. Daraufhin wurde die Softwarefirma Adopted-Solutions gefragt, wie diese Effekte realisiert werden können. Die Erklärung der Firma lautet, dass die Abbildung der Hysterese- und Sättigungseffekte mit dem Drehstromtransformatormodell nicht möglich ist.

3.2.6 Kurzschlussimulation mit der Software Portunus

Im Ersatzschaltbild des Drehstromtransformators wird die Sekundärseite kurzgeschlossen. Die Kurzschlussspannung $U_K = 11,2$ V, die aus der Kurzschlussmessung erhalten wurde, wird in die Phasen des Drehstromtransformatormodells eingespeist.

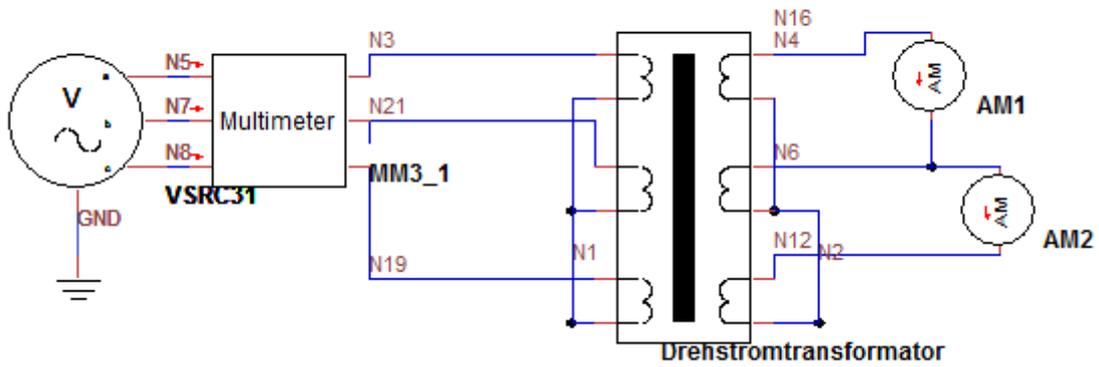


Abbildung 31: Kurzschlussimulationsschaltbild

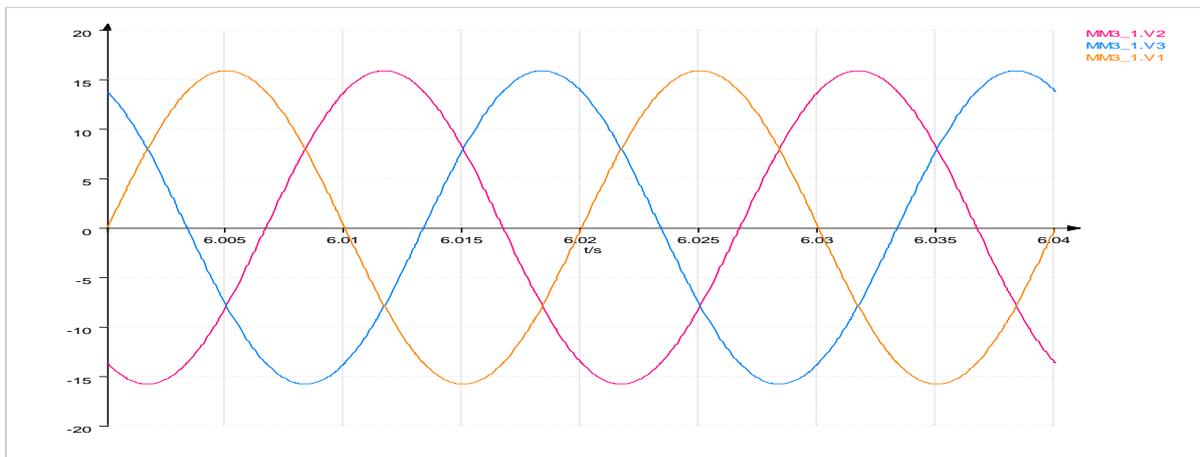


Abbildung 32: Kurzschlussspannungen U_{1U} (rot), U_{1V} (blau), U_{1W} (gelb) im Portunus

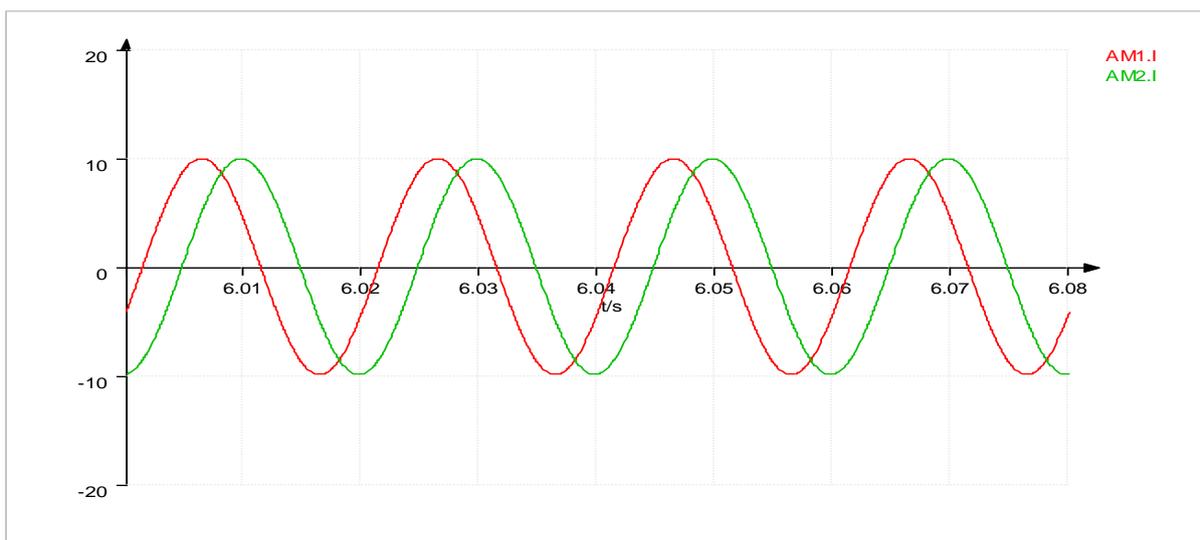


Abbildung 33: Sekundärseitige Kurzschlussströme I_{2uv} (rot), I_{2vw} (grün) in Portunus

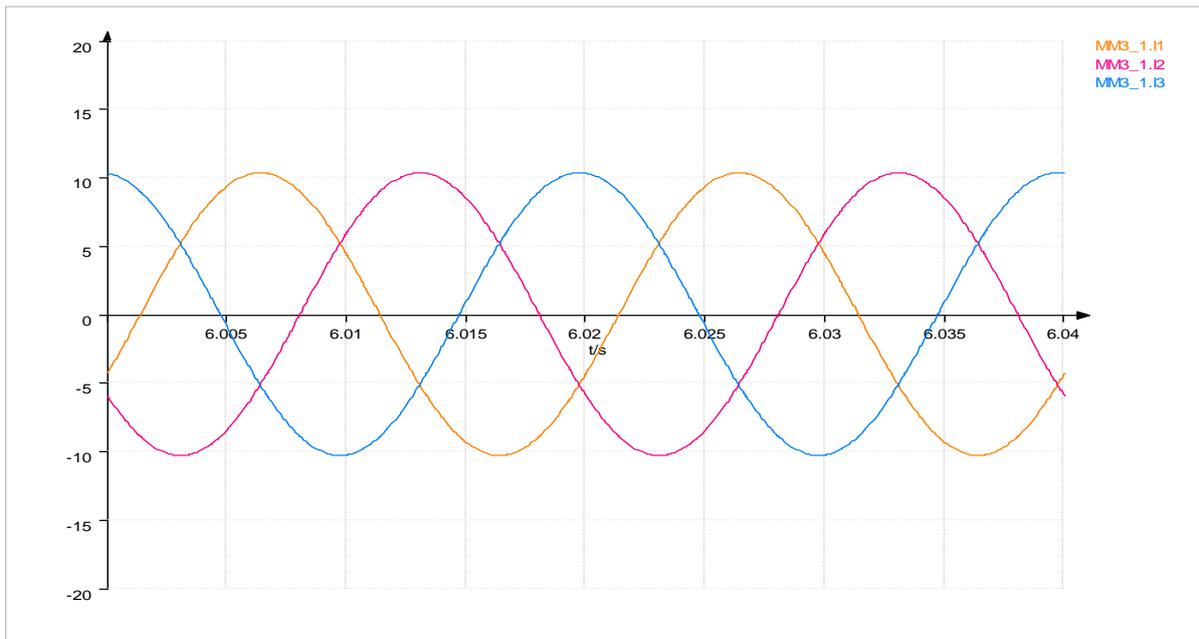


Abbildung 34: Primärseitige Ströme I_{1U} (gelb), I_{1V} (rosa), I_{1W} (blau) im Kurzschlussversuch in Portunus

Mit den berechneten Werten lässt sich der Drehstromtransformator leicht simulieren. Die realen Werte und die simulierten Werte entsprechen bis auf die Leerlaufströme mit den vorhandenen Messergebnissen überein. Bei der Leerlaufsimulation lassen sich die Hysterese und die Sättigungseffekte mit der Software leider nicht darstellen. Die Transformatoren werden im Programm als ideale Transformatoren behandelt.

3.3 Verluste und Wirkungsgrad

Für diesen Abschnitt wurden die Bücher „ELEKTRISCHE MASCHINEN UND UMFORMER“ VON F. MOELLER/ P. VASKE²⁰ und „ELEKTRISCHE MASCHINEN MIT EINFÜHRUNG IN DIE LEISTUNGSELEKTRONIK“ VON HANS-ULRICH GIERSCH, HANS HARTHUS UND NORBERT VOGELSANG²¹ als Hilfsquelle verwendet.

Wie bei allen elektrischen Maschinen haben auch die Transformatoren Verluste. Diese Verluste sind, wie schon im Leerlaufbetrieb und Kurzschlussbetrieb beschrieben, sind Kupferverluste P_{Cu} , Eisenverluste P_{Fe} und einige Zusatzverluste P_Z wie z.B. Wirbelstromverluste. Für die Transformatorverluste gilt:

$$P_V = P_{Cu1,2} + P_{Fe} + P_Z$$

²⁰ Elektrische Maschinen und Umformer, F. Moeller/ P. Vaske, ISBN: 3519164019

²¹ Elektrische Maschinen mit Einführung in die Leistungselektronik, Hans-Ulrich Giersch, Hans Harthus und Norbert Vogelsang, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ISBN: 9783322927064

Bei Drehstromtransformatoren muss man auf die Phasen achten, deshalb gilt bei Drehstromtransformatoren für die Verluste

$$P_V = 3 \cdot (P_{Cu1,2} + P_{Fe} + P_Z)$$

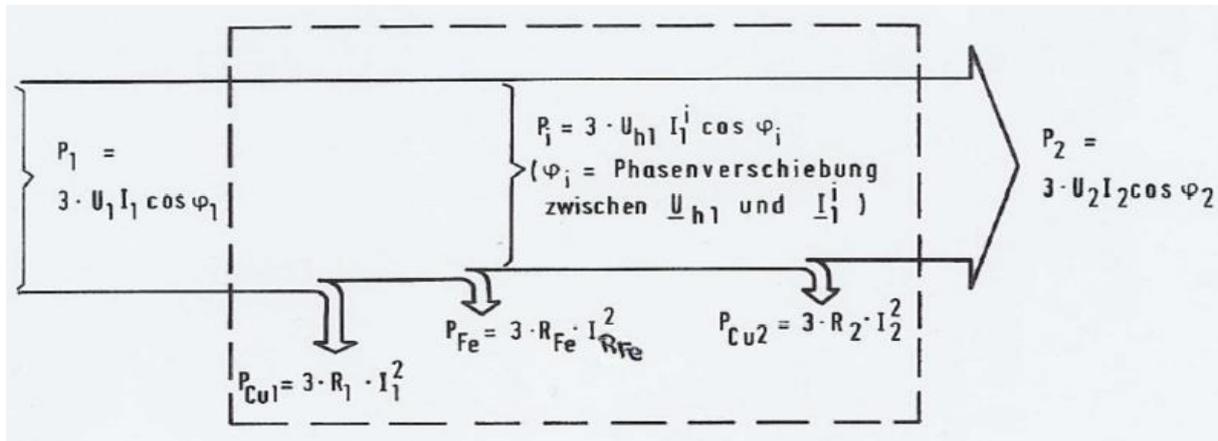


Abbildung 35: Energieverluste und Leistungsfluss im Drehstromtransformator

Quelle: Energietechnik-Handout von Prof. Dr. –Ing. Vaupel

Man spricht in der Praxis, dass die Verluste von zwei Komponenten abhängen. Die Eisenverluste P_{Fe} , die im Leerlaufbetrieb bemessen wurde, hängen von der Spannung ab. Die Kupferverluste P_{Cu} , die im Kurzschlussbetrieb gemessen wurden, sind stromabhängig. Somit kann man die Gleichung

$$P_V = P_{FeN} + P_{CuN} = P_{0N} + P_{KN}$$

aufstellen. Aus wirtschaftlichen Gründen sind die relativen Verluste interessanter als bei den absoluten Werten. Die relativen Verluste sind die prozentualen Verluste des Transformators, welche von der Scheinleistung abhängt.

$$p_{VN} = \frac{P_{0N}}{S_N} + \frac{P_{KN}}{S_N} = p_{0N} + p_{KN}$$

Die oben aufgestellten Gleichungen gelten nur bei Nennströmen. Wird ein Transformator nicht mit Nennstrom belastet, ändert sich auch dementsprechend die Verlustkomponenten. Die Spannungsabhängige Verluste bleiben gleich, da es nach wie vor $U_1 = U_N$ ist. Die stromabhängigen Verluste verändern sich. Die Kurzschlussverluste P_K

„muss auf den betriebswarmen Zustand umgerechnet werden“ (Zt. Elektrische Maschinen und Umformer, F. Moeller/P. Vaske, 12. Auflage, Seite 117). Bei einer Teilbelastung lässt sich die Verlustleistung eines Transformators mit der Gleichung

$$P_V = P_{0N} + P_{KN} \cdot \left(\frac{I}{I_{1N}}\right)^2$$

berechnen.

Der Wirkungsgrad, der für die Wirtschaftlichkeit des Transformators von großer Bedeutung ist, ist das Verhältnis von der Leistungsabgabe P_2 zur aufgenommenen Leistung P_1 des Transformators. Die Transformatoren zeichnen sich durch den hohen Wirkungsgrad aus. Die Angabe des Wirkungsgrads erfolgt öfter in Prozent.

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = \frac{P_{ab}}{P_{ab} + P_v} = 1 - \frac{P_v}{P_{zu}}$$

Transformatoren haben öfters teilweise kapazitive oder induktive Belastungen. Dabei ändert sich auch der Leistungsfaktor λ und der Phasenverschiebungswinkel φ . Die Wirkleistung ist in diesem Fall vom Phasenverschiebungswinkel φ abhängig.

$$P_{ab} = S_{ab} \cdot \cos \varphi_2$$

Für die Berechnung der Verluste bei einer beliebigen Last bildet man zuerst das Verhältnis zwischen der Scheinleistung des Transformators bei Teilbelastung und der Scheinleistung im Nennbetrieb.

$$a = \frac{S}{S_N}$$

Somit folgt es für die Verluste bei beliebiger Last die Gleichung

$$P_V = P_{FeN} + a^2 \cdot P_{CuN} = P_{0N} + a^2 \cdot P_{KN}$$

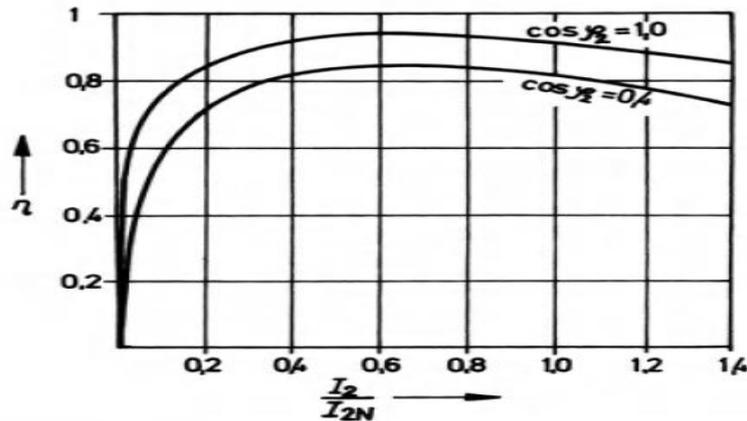


Abbildung 36: Wirkungsgrad bei verschiedenen Leistungsfaktoren

Quelle: Elektrische Maschinen mit Einführung in die Leistungselektronik von Hans-Ulrich Giersch, Hans Harthus und Norbert Vogel

In Abbildung 36 wird der Wirkungsgrad in Abhängigkeit des Leistungsfaktors φ_2 und des Belastungsfaktors dargestellt. Den höchsten Wirkungsgrad am Transformator erhält man bei $\cos \varphi = 1$ und $\frac{I_2}{I_{2N}} = 0,5$. Die gleich großen Wärme- und Eisenverluste werden am Punkt des maximalen Wirkungsgrades erreicht.

Aus den Messergebnissen wurden die folgenden Wirkungsgrade für die unterschiedlichen Schaltgruppen berechnet:

Schaltgruppe	Yy0	Yz5	Dy5
Belastungsart	Sym. ohmsche Belastung (3x76Ω)	Sym. ohmsche Belastung (3x76Ω)	Sym. ohmsche Belastung (3x76Ω)
Wirkungsgrad η	0,95	0,96	0,93
Belastung	Einphasige Belastung (76Ω)	Einphasige Belastung (76Ω)	Einphasige Belastung (76Ω)
Wirkungsgrad η	0,70	0,74	0,74

Tabelle 7 :Wirkungsgrad des Drehstromtransformators

Für die Berechnung des Wirkungsgrads bei einer einphasigen Belastung wurde der Drehstromtransformator mit 76Ω belastet. Der Versuch wurde auch in Portunus durchgeführt. Bei einphasiger Belastung mit 76 Ω wurde in Portunus bei Stern-Stern-Schaltung der Wirkungsgrad 0,78 erreicht. Bei Dreieck-Sternschaltung wird der Wirkungsgrad von 0,77 erreicht. In Portunus werden bessere Wirkungsgradwerte erreicht als im realen Versuch. Ein Grund dafür ist, dass der Drehstromtransformator in Portunus idealerweise dargestellt ist und keinen Sternpunktverschiebung aufzeigt. Außerdem ist

der Wirkungsgrad bei einphasiger Belastung so gering, weil zwei Phasen des Drehstromtransformators im Leerlaufbetrieb sind und der Wirkungsgrad dieser Phasen auf null absinkt.

4 Belastungsversuche des Drehstromtransformators im Labor

Die Bücher „ELEKTRISCHE MASCHINEN UND UMFORMER“ VON F. MOELLER/ P. VASKE²², „ELEKTRISCHE MASCHINEN MIT EINFÜHRUNG IN DIE LEISTUNGSELEKTRONIK“ VON HANS-ULRICH GIERSCHE, HANS HARTHUS UND NORBERT VOGELSANG²³, „ELEKTROENERGIESYSTEME“ VON ADOLF J. SCHWAB²⁴.UND „ELEKTRISCHE MASCHINEN“ VON THEODOR BÖDEFELD UND HEINRICH SEQUENZ²⁵ und der Skript „GRUNDLAGEN DER ELEKTROTECHNIK 3“ VON G. SCHENKE²⁶ wurden für dieses Kapitel als Hilfsquelle verwendet.

4.1 Symmetrische Belastung

Man spricht von einer symmetrischen Belastung, wenn alle Stränge des Drehstromtransformators mit einer gleichen Impedanz belastet werden. Die Verbraucherstränge können in Stern oder Dreieck geschaltet werden. In einem symmetrischen Belastungsfall darf man den Drehstromtransformator als ein Einphasentransformator behandeln. Kein Strang ist gegenüber dem anderen Strang bevorzugt und die Vorgänge wiederholen sich lediglich Phasenverschoben aber in gleicher Art. Die Effektivwerte der Spannungen und Ströme für jede Phase weisen den gleichen Wert auf.

²² Elektrische Maschinen und Umformer von F. Moeller/ P. Vaske, ISBN: 3519164019

²³ Elektrische Maschinen mit Einführung in die Leistungselektronik von Hans-Ulrich Giersch, Hans Harthus und Norbert Vogelsang, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ISBN: 9783322927064

²⁴ Elektroenergiesysteme von Adolf J. Schwab, Springer Vieweg Verlag, ISBN: 9783662468562

²⁵ Elektrische Maschinen von Theodor Bödefeld und Heinrich Sequenz, Wien Springer Verlag, ISBN: 9783709197288

²⁶ http://www.et-inf.fho-emden.de/~elmalab/gde3/download/GE3_3.pdf, Skript zur Vorlesung“ Grundlagen der Elektrotechnik, G. Schenke, 2004, gelesen am 10.12.2015

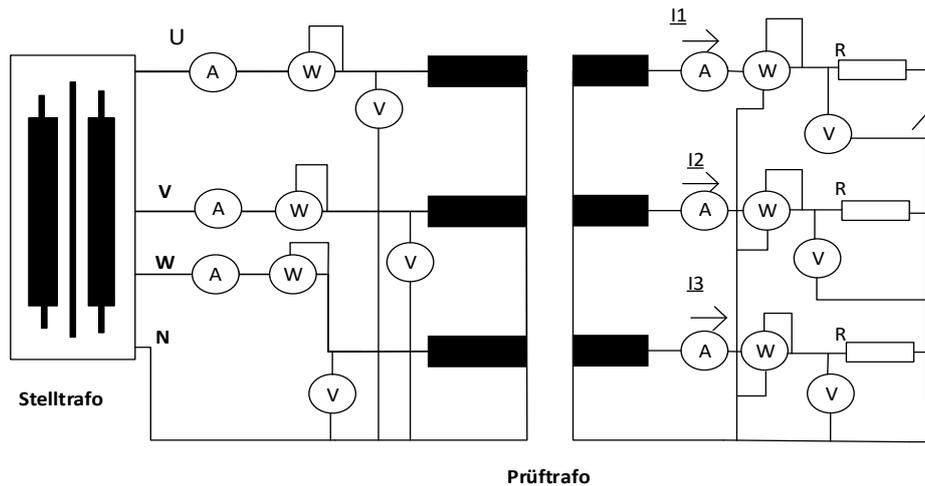


Abbildung 37: symmetrische Belastung mit Neutralleiter bei Sternschaltung

Nach dem 1. Kirchhoffschen Gesetz wird für den Sternpunkt des Verbrauchers folgende Gleichung abgeleitet:

$$\underline{I_{2N}} = \underline{I_1} + \underline{I_2} + \underline{I_3}$$

Die Außenleiterströme weisen zueinander eine Phasenverschiebung von 120° auf, deshalb löst man die Gleichung vektoriell.

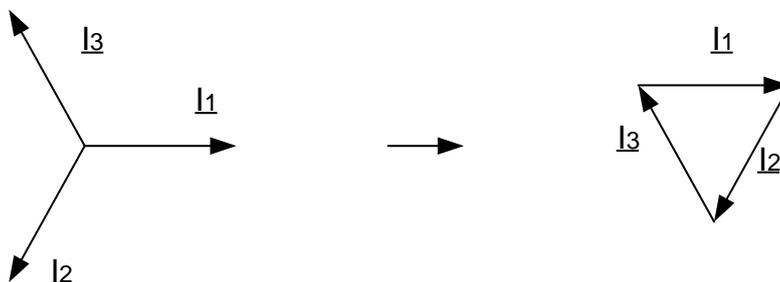


Abbildung 38: Zeigerdiagramm für Sternschaltung

Aus der vektoriellen Addition der Ströme folgt, dass der Neutralleiter keinen Strom hat. Somit ist auch beim Nichtanschießen des Neutralleiters keine Veränderung gegenüber mit einem Anschluss des Neutralleiters erwartet, da dieser keinen Strom hat.

Da bei Dreieckschaltung ein Neutralleiter fehlt, wird es keine Veränderung geben.

Der symmetrische Belastungsversuch wurde mit einem Drehstromwiderstand durchgeführt, in dem man alle drei Phasen gleichzeitig belastete. Vor dem Versuch wurde der Widerstand mit einem Messgerät BBC M 2036 pro Phase mit $76,7 \Omega$ gemessen. Der Belastungsversuch wurde mit verschiedenen Schaltungen der Primär- und Sekundärseite durchgeführt. Die Versuche wurden mit der Schaltung Stern-Stern-Schaltung

(Yy0), Dreieck-Stern-Schaltung (Dy5), Stern-Zickzack (Yz5) und Stern-Ausgleich-Schaltung durchgeführt. In allen Schaltungsarten wurde das elektrische und magnetische Gleichgewicht gehalten. Die Ströme in der Sekundärwicklung üben eine gleichstarke Stromaufnahme auf allen drei Primärwicklungen aus. Da die Ergebnisse bei einzelnen Schaltgruppen bei symmetrischer Belastung wie erwartet, gleich sind, wurde in dieser Arbeit nur die Stern-Stern-Schaltung behandelt.

Die Effektivwerte der Ströme und Spannungen wurden mit Hilfe des Leistungsmessgerätes Hioki 3165 überprüft und diese stimmen mit dem vom Oszilloskop angezeigten Effektivwerten überein.

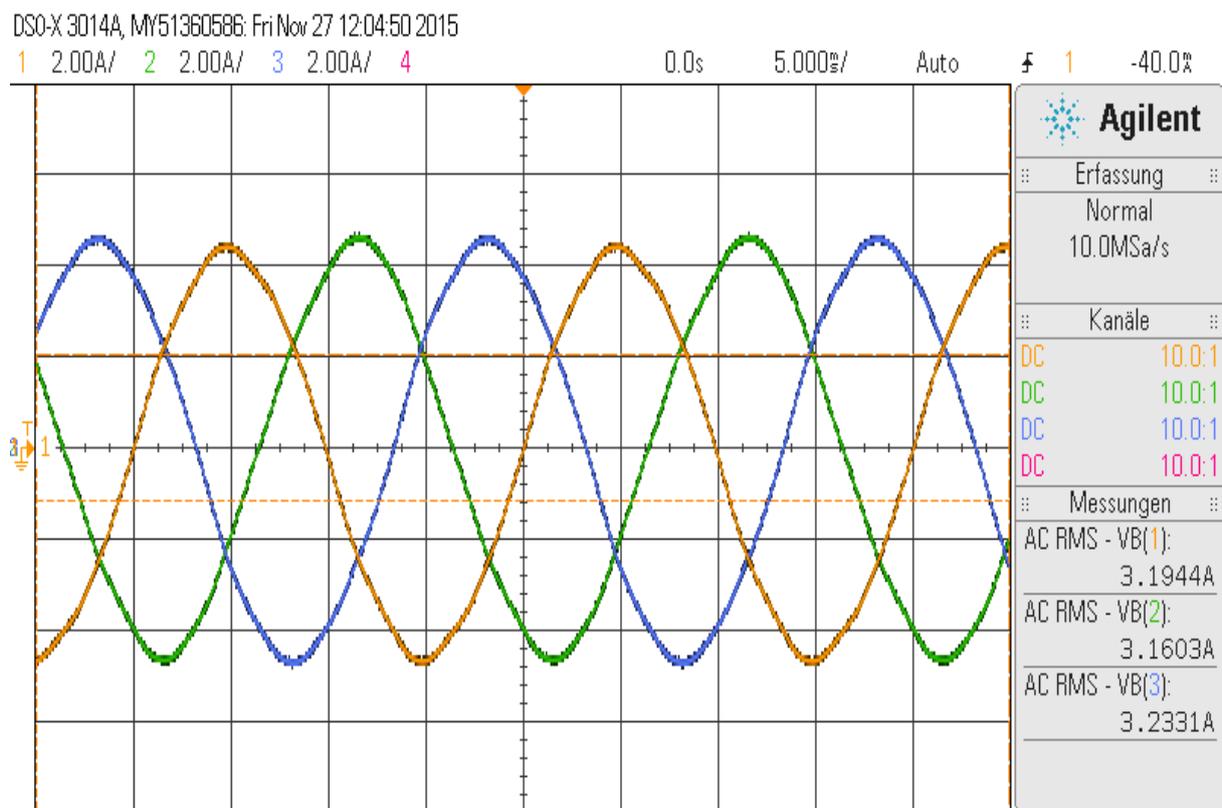


Abbildung 39: primärseitige Stromverläufe I_{1U} (Kanal 1, gelb), I_{1V} (Kanal 2, grün), I_{1W} (Kanal 3, blau) bei Stern-Stern-Schaltung und die Effektivwerte der Ströme

Die Ströme sind sinusförmig. Alle drei Phasen weisen dem gleichen effektiven Strom. Die beim Leerlaufversuch erkennbaren Unterschiede sind nicht mehr zu erkennen.

Von allen drei Phasen fließen nahezu die gleichen Ströme. In der mittleren Phase fließt ein geringerer Strom von ca. 34 mA gegenüber der anderen Phasen. Außerdem sind

die Oberschwingungen, die beim Leerlaufversuch zu sehen waren, nicht mehr zu erkennen. Der Drehstromwiderstand wurde mit zugenommener Wärme größer, als er eingestellt wurde.

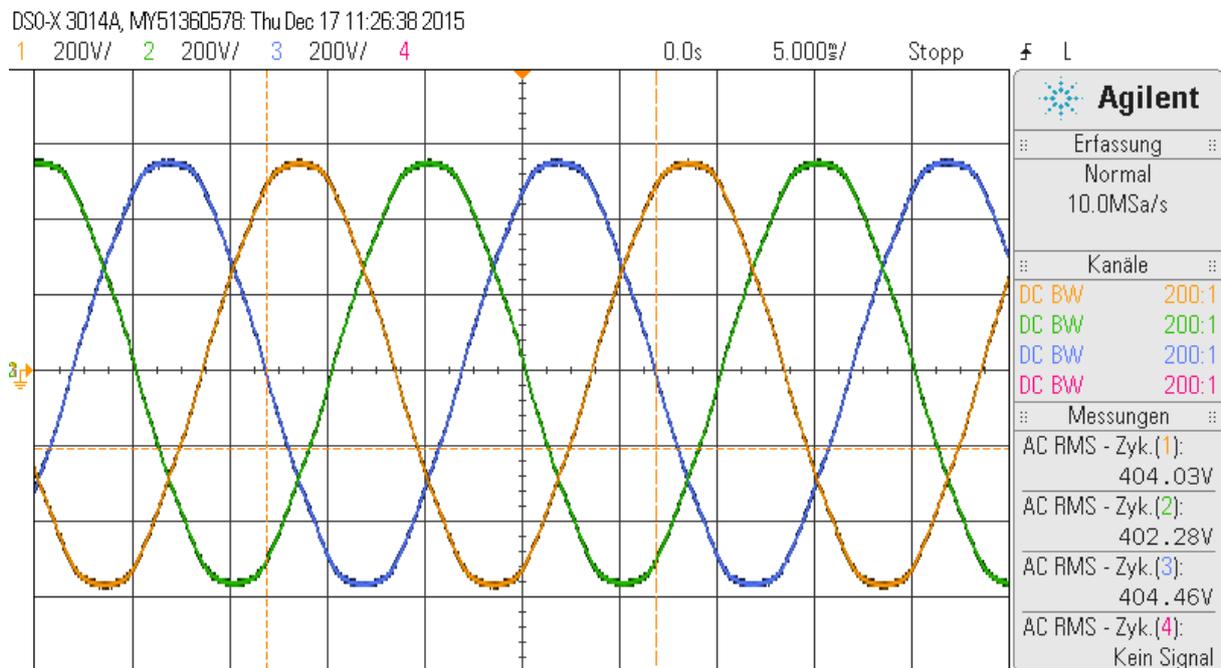


Abbildung 40: Spannungen U_{UV} (Kanal 1, gelb), U_{VW} (Kanal 2, grün), und U_{WU} (Kanal 3, blau) auf der Primärseite bei symmetrischer Belastung

Die zeitlichen Verläufe der Primärspannungen sind sinusförmig. Der Wirkungsgrad ist somit:

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = \frac{2,087 \text{ kW}}{2,15 \text{ kW}} = 0,97$$

Bei der symmetrischen Belastung wird das magnetische Gleichgewicht gehalten. Somit ist der Wirkungsgrad auch nahe zu „1“. Der magnetische Fluss des Drehstromtransformators wird durch die Durchflutung der Belastungsströme nicht gestört.

4.2 Unsymmetrische Belastung des Drehstromtransformators

Bestimmte Schaltgruppen stören das magnetische Gleichgewicht im Drehstromtransformator, falls der Belastungsstrom durch die unbelasteten Stränge zurückfließt. Die magnetische Flussdichte am betroffenen Schenkel steigt stark an. So kann der Transformator das magnetische Gleichgewicht nicht halten. Der Netzfluss wird von den Durchflutungen der Belastungsströme gestört. Bei Dreiwicklung-Drehstromtransfor-

motoren können ungleichmäßige Belastungen der Stränge zur Störung des elektrischen bzw. magnetischen Gleichgewichts führen²⁷. So entstehen magnetische Streufelder, die zu den zusätzlichen Energieverlusten, Spannungsfälle und Spannungsymmetrien führen. In den folgenden Abschnitten wird das Betriebsverhalten des Drehstromtransformators bei einphasiger Belastung untersucht.

Von den vielen möglichen Kombinationen werden hier vier Schaltgruppen Yy0, Dy5, Yd5 und Yz5 vorgestellt.

4.2.1 Einphasige Belastung der Stern-Stern-Schaltung (Yy0)

Der Drehstromtransformator wird zunächst, wie in Abbildung 41 dargestellt ist, in Stern-Stern geschaltet. Der Sekundärstrom fließt bei dieser Art der Belastung nur zwischen einem Außenleiter und dem Neutralleiter. Die Stern-Stern-Schaltung führt bei unsymmetrischer Belastung zu Sternpunktverlagerung. Der Primärstrom fließt über alle Wicklungen der Kerne. Die Messung erfolgte mit zwei Leistungsmessgeräten Hioki 3165, Mithilfe der Stromzangen wurden auch die Ströme ermittelt. Die Leistungsmessung erfolgte somit direkt mit dem Leistungsmessgerät. Im Versuch wurde der Lastwiderstand auf $34,5 \Omega$ eingestellt. Dieser Wert wurde mit einem Strom von $5,75A$ (entspricht 80% von I_N) ermittelt. Eine 100% Belastung könnte bei dieser Schaltung den Dreiphasentransformator schaden. Über einem Stelltransformator wird der Drehstromtransformator eine Spannung mit $400V$ pro Phase eingespeist. Außerdem wurden die Zeitverläufe der Ströme und Spannungen mithilfe eines Oszilloskops aufgenommen.

²⁷ Elektrische Maschinen mit Einführung in die Leistungselektronik von Hans-Ulrich Giersch, Hans Harthus und Norbert Vogelsang, 4. Auflage Teubner Stuttgart Verlag, ISBN: 9783322927071

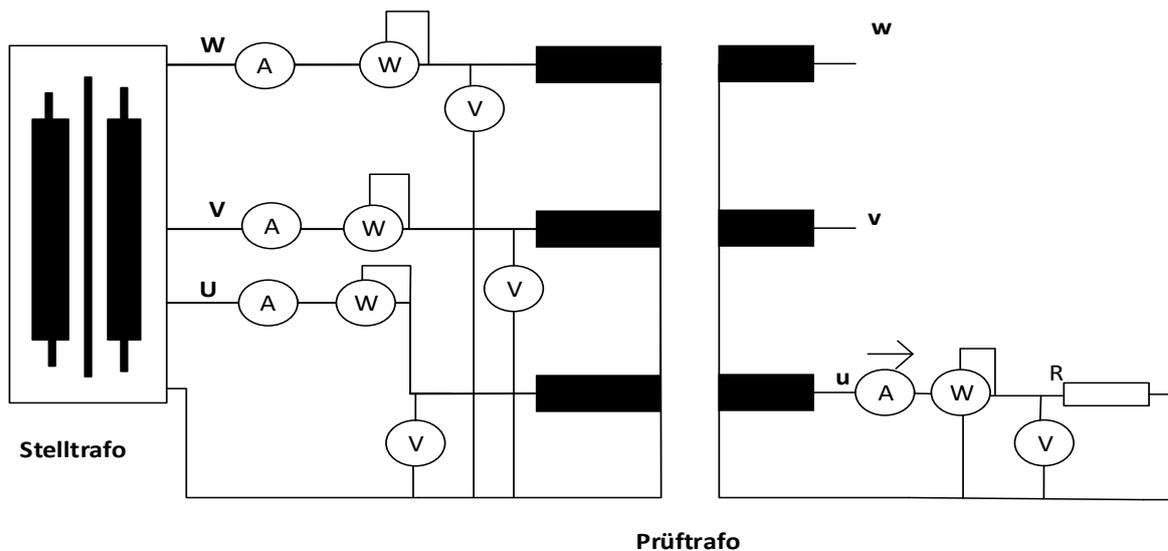


Abbildung 41: Aufbau der einphasigen Belastung bei Stern-Stern-Schaltung

Da sich der Fluss eines Schenkel über die beiden anderen schließen muss, muss das magnetische Gleichgewicht der Belastungsströme für jeden der drei magnetischen Kreise in jedem Augenblick bestehen. Das magnetische Gleichgewicht wird erreicht, wenn die Durchflutung der Belastungsströme bei vernachlässigtem Magnetisierungsstrom in jedem Fenster des Drehstromtransformators Null ist. Das Durchflutungsgesetz wird hier benutzt, um den Strom I_{2u} zu berechnen.

$$\underline{-I_{1U}} + \underline{I_{1V}} + \underline{I_{1W}} = 0$$

$$\underline{-I_{1U}} + \underline{I_{1V}} + \underline{I_{2W}} = 0$$

$$\underline{+I_{1U}} - \underline{I_{1V}} - \underline{I_{2W}} = 0$$

Daraus folgt:

$$\underline{I_{1W}} = \underline{I_{1V}} = \frac{I_{2u}}{3}$$

$$\underline{I_{1U}} = \frac{2}{3} \underline{I_{2u}}$$

Bei Drehstromtransformatoren bezieht sich das magnetische Gleichgewicht auf die gesamte Durchflutung eines Fensters und nicht auf einen einzelnen Schenkel. Ein nichtkompensierter Fluss herrscht in allen Schenkeln. Dies hat folgende Schlussfolgerungen:

- Wirbelströme führen zur Erwärmung des Eisenkernes und zur zusätzlichen Eisenverlusten
- Die nicht kompensierten Flüsse in den Phasen U und V induzieren in den Sekundärwicklungen Spannungen. Diese Spannungen addieren sich zu den im Leerlauf herrschenden Strangspannungen.
- In der Phase U wird eine Spannung $-\Delta U_u$ induziert, welche die Spannung U_{uN} verkleinert. Es kommt zur Verlagerung des Sternpunktes.

Nach Abbildung 41 fließen die Ströme $I_v = I_w = 0A$. Die Nullkomponente ist somit

$$\underline{I}_0 = \frac{1}{3}(\underline{I}_u + \underline{I}_v + \underline{I}_w) = \frac{1}{3}(\underline{I}_u + 0 + 0) = \frac{1}{3} \underline{I}_u$$

Die komplexe Mitkomponente

$$\underline{I}_m = \frac{1}{3}(\underline{I}_u + a\underline{I}_v + a^2\underline{I}_w) = \frac{1}{3}(\underline{I}_u + 0 + 0) = \frac{1}{3} \underline{I}_u$$

Und die Gegenkomponente

$$\underline{I}_g = \frac{1}{3}(\underline{I}_u + a\underline{I}_v + a^2\underline{I}_w) = \frac{1}{3}(\underline{I}_u + 0 + 0) = \frac{1}{3} \underline{I}_u$$

Für die Beträge gilt $I_0 = I_m = I_g = \frac{1}{3} I_u$

$$I_u = \frac{U}{R} = \frac{230V}{34,5\Omega} = 6,67A$$

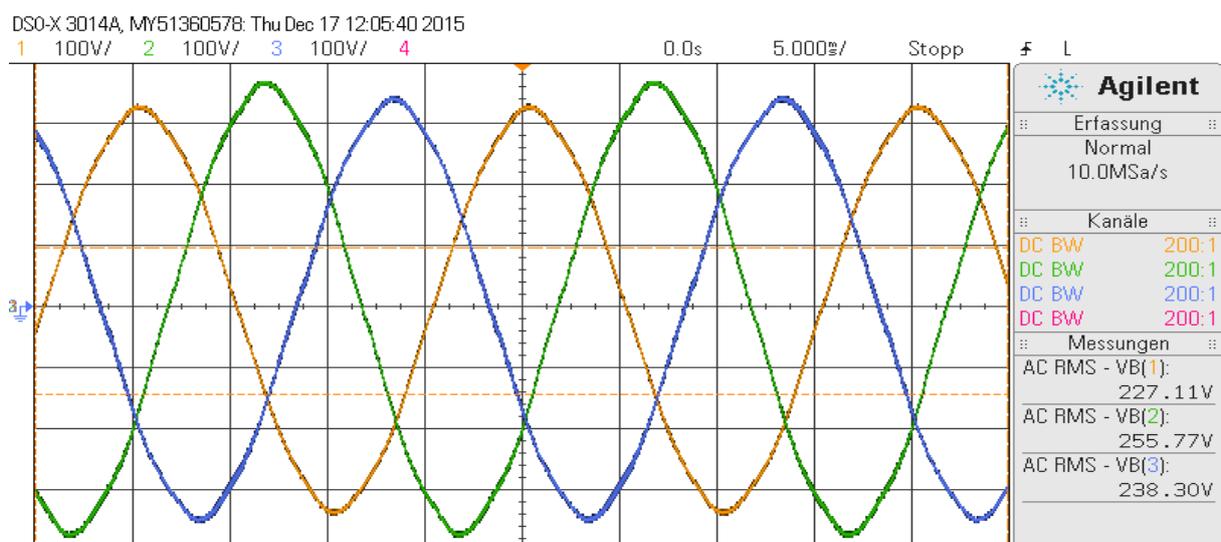


Abbildung 42: Sekundärspannungen U_{2u} (Kanal 1, gelb), U_{2v} (Kanal 2, grün), U_{2w} (Kanal 3, blau) bei Stern-Stern-Schaltung

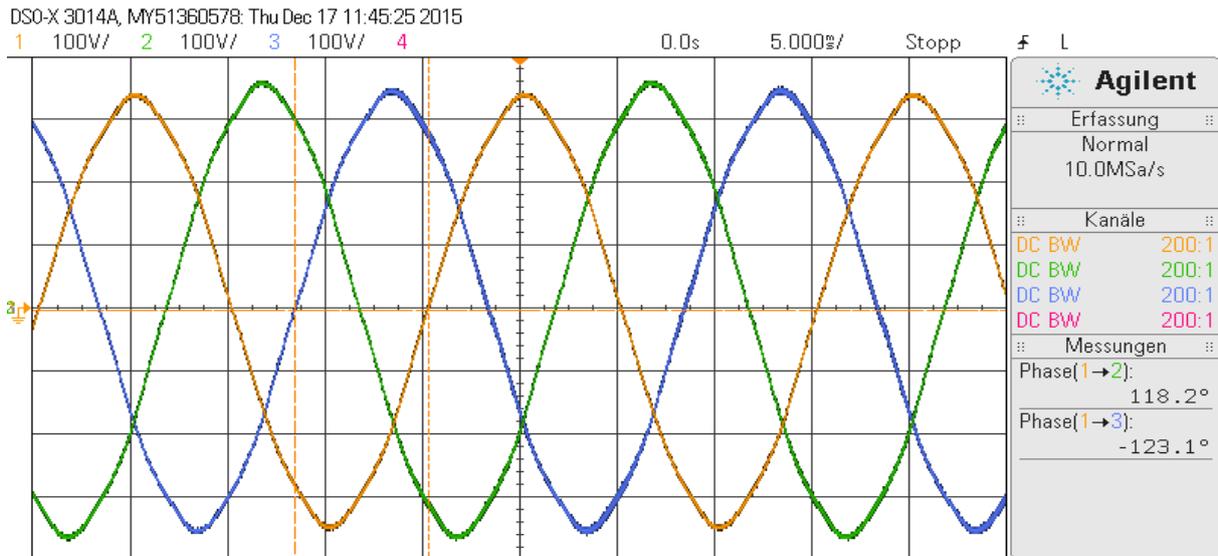


Abbildung 43: Phasenverschiebung der Sekundärspannungen U_{2u} (Kanal 1, gelb), U_{2v} (Kanal 2, grün), U_{2w} (Kanal 3, blau)

In den obigen Abbildungen 42 und 43 handelt es sich um die sekundärseitigen Spannungen. Die Skalierungen sind im oberen Bereich der Abbildung zu sehen. In der Abbildung 42 ist es zu erkennen, dass die Phase V (U_V) deutlich höhere Effektivspannung hat als bei den anderen Phasen. Die Phasenverschiebung von 118° zwischen U_{2U} und U_{2V} ist auch in Abbildung 43 zu erkennen. Der nicht kompensierte Fluss in der Phase U induziert eine Spannung auf der Sekundärseite, die sich zu der im Leerlauf herrschenden Strangspannung addiert.

Im Symmetrischen Fall folgt für U_{2N}

$$U_N = U_U + U_V + U_W$$

und

$$U_U = 230 \text{ V}$$

$$U_V = 230 \angle -120^\circ$$

$$U_W = 230 \angle +120^\circ$$

$$U_N = 230 + 230 \angle -120^\circ + 230 \angle +120^\circ = 0 \text{ V}$$

Für den einphasig belasteten Fall:

$$\begin{aligned} U_{N'} &= 227,11 \text{ V} + (255,77 \angle -118,2^\circ) \text{ V} + (238,3 \angle +123,1^\circ) \text{ V} = (-23,89 - 25,78j) \text{ V} \\ &= (35,15 \angle -132,81^\circ) \text{ V} \end{aligned}$$

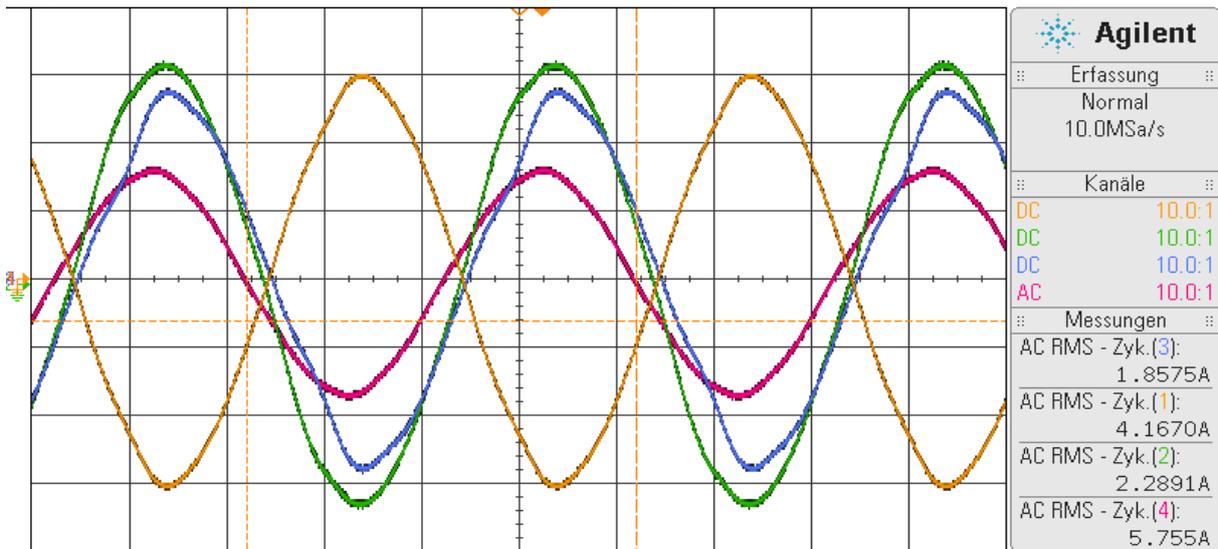


Abbildung 44: Die Eingangsströme I_{1U} (gelb), I_{1V} (grün), I_{1W} (blau) und der Belastungsstrom I_{2U} (rosa) der Stern-Stern-Schaltung

In Abbildung 44 sind die Zeitverläufe der Eingangsströme I_U (Kanal 1, Gelb), I_V (Kanal 2, Grün), I_W (Kanal 3, Blau). Wie es aus der Abbildung zu entnehmen ist, sind die Stromkurven von den Phasen V und W etwas verformt und weichen von einer Sinuskurve ab. Die Stromkurve von der Phase U (belastete Phase) behält die Sinuskurve. Die Effektivwerte wurden mit dem Leistungsmessgerät auch gemessen und weisen denselben Effektivwert wie in der Oszilloskopaufnahme auf.

Setzt man die gemessenen Strommesswerte in die Gleichung ein

$$4,167A - 2,29A - 1,86A = -0,017 A \approx 0A$$

Somit wird für I_{1W} erhalten:

$$I_{1W} = I_{1V} = \frac{I_{2U}}{3} = \frac{5,755A}{3} = 1,92A \approx \frac{I_{1V} + I_{1W}}{2} = \frac{2,29A + 1,86A}{2} = 2,08A$$

Aufgrund der magnetisierungsströme sind in diesem Fall Strom I_V 0,3A größer als der Strom I_W .

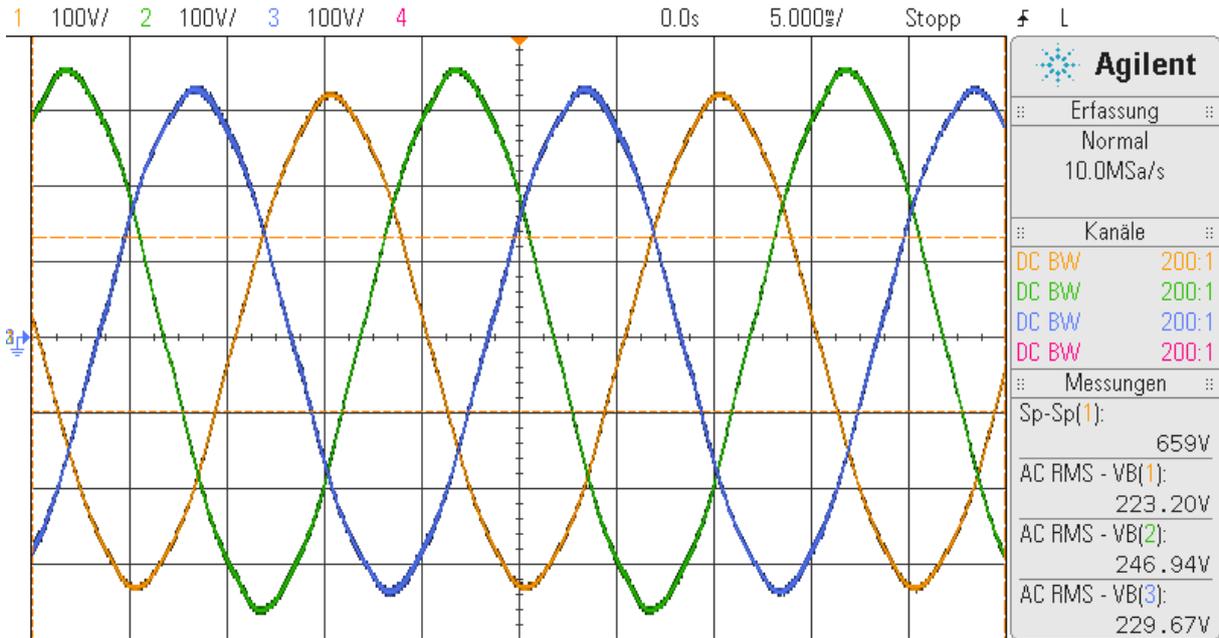


Abbildung 45: Primärspannungen U_{1U} (Kanal 1, gelb), U_{1V} (Kanal 2, grün), U_{1W} (Kanal 3, blau) der Stern-Stern-Schaltung

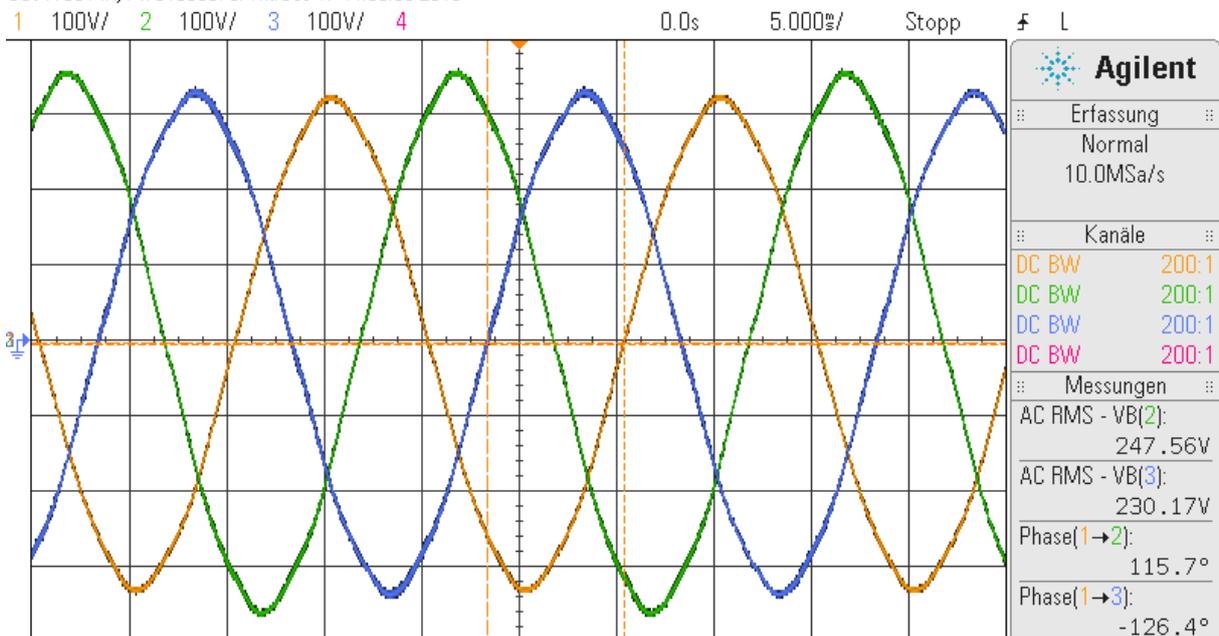


Abbildung 46: Phasenverschiebung der Primärspannungen bei Stern-Stern-Schaltung

Es ist in Abbildung 46 zu erkennen, dass die Spannungsunterschiede deutlich werden. Die Sternpunktverschiebung wird größer. Auf der Sekundärseite erreicht die Phase V eine Spannung von 255V.

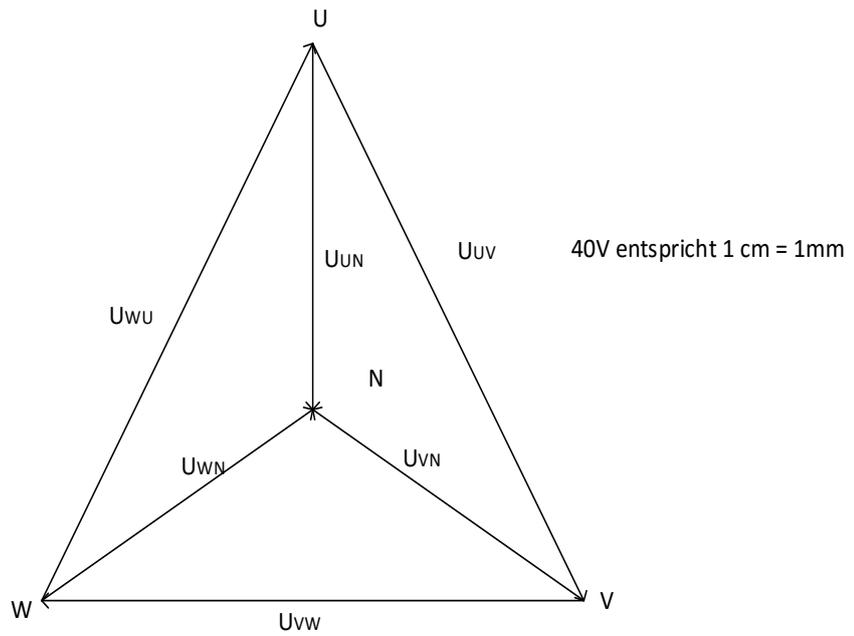
Bei dieser Schaltung wurde der Neutralleiter auf der Primärseite nicht benutzt, auf der Sekundärseite jedoch mitgeführt. Somit wurde ein Wicklungsstrang deutlich stärker

belastet als die beiden anderen. Deshalb wird diese Schaltung als Unsymmetrie bezeichnet. Die Neutralleiter auf der Unterspannungsseite darf nach VDE 0532 nur mit 10% des Nennstroms belastet werden. Ansonsten entstehen zusätzliche Wärmeverluste²⁸.

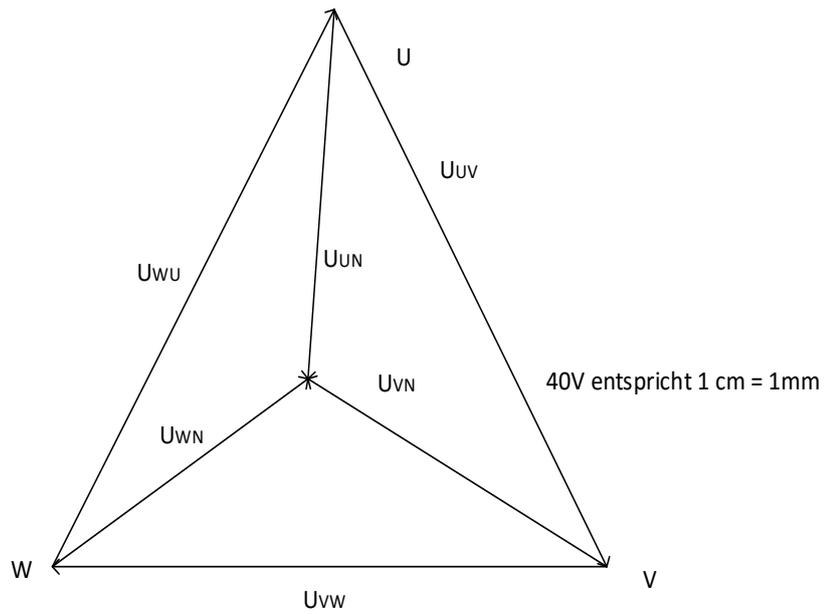
²⁸ Elektrische Maschinen von Hans-Ulrich Giersch, Hans Harthus, Norbert Vogelsang , Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH ISBN: 3519468212

Zeigerdiagramm für Primärseite:

Primärseite bei symmetrischer Last



Primärseite bei einphasiger Belastung



Aufgrund einer galvanischen Trennung zwischen der Primär- und Sekundärseite, ist eine direkte Messung der Sternpunktverschiebung nicht möglich. Aus diesem Grund wurden die Zeigerdiagramme erstellt. Aus dem Zeigerdiagramm ist es zu erkennen, dass es hier zu einer Sternpunktverschiebung gekommen ist. Bei diesem Drehstromtransformator, welcher für kleinere Leistungen hergestellt wurde, sind extreme Sternpunktverschiebungen nicht zu sehen.

4.2.2 Simulation einer einphasigen Belastung der Stern-Stern-Schaltung mit Portunus

Die einphasige Belastung der Stern-Stern Schaltung wird im Programm wie folgt aufgebaut. Der Widerstand R1 beträgt 35Ω

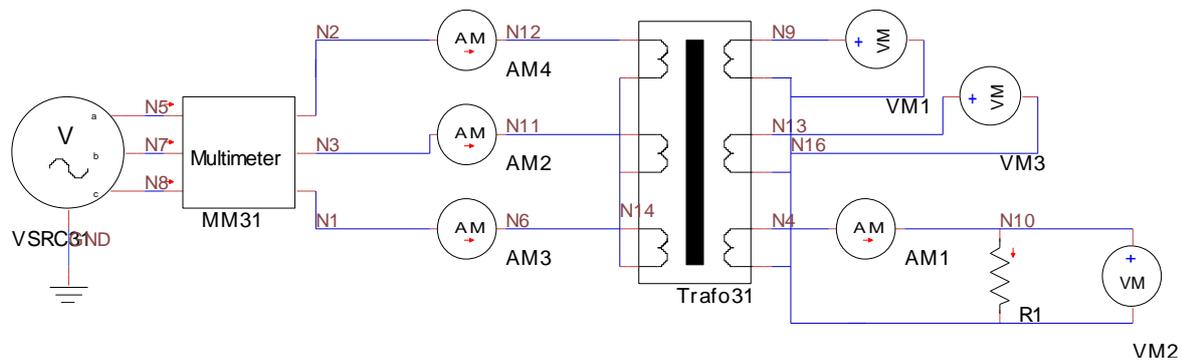


Abbildung 47: Simulation der Stern-Stern-Schaltung im Portunus

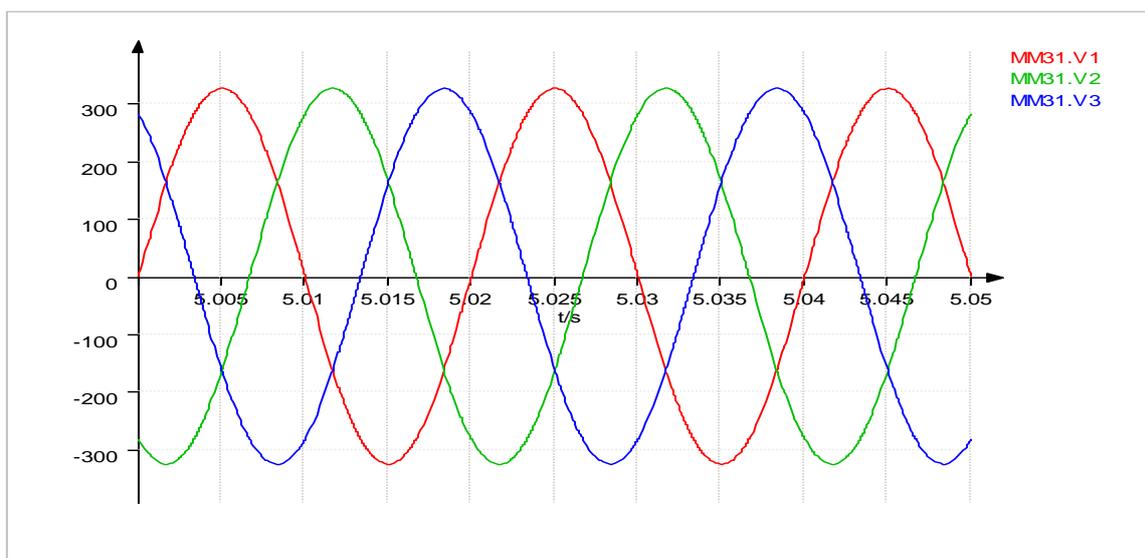


Abbildung 48: Primärseitige Spannungen U_{1u} (rot), U_{1v} (grün), U_{1w} (blau) der Stern-Stern-Schaltung in Portunus

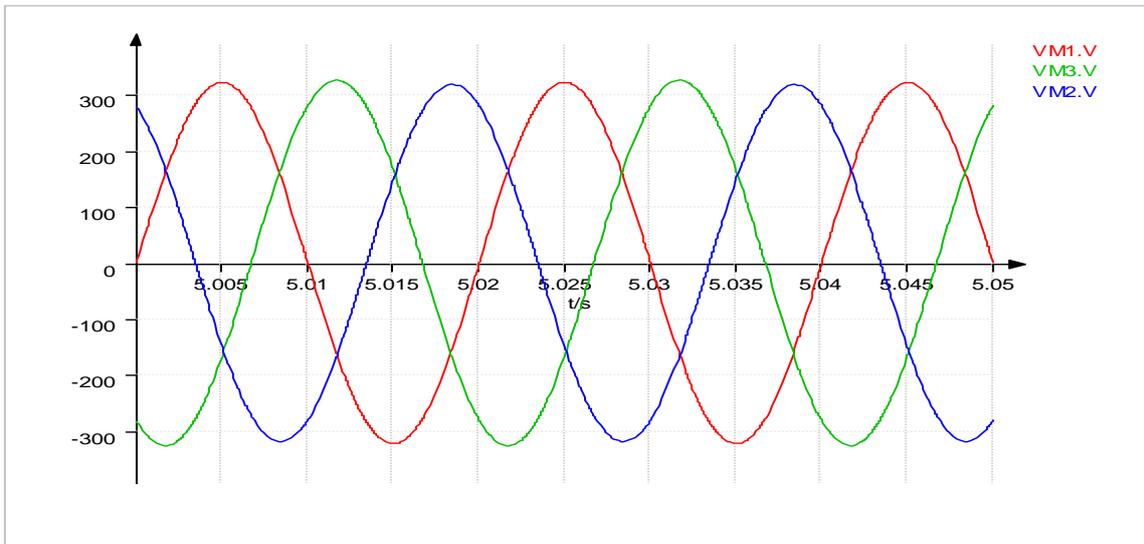


Abbildung 49: sekundärseitige Spannungen U_{1U} (rot), U_{1V} (grün), U_{1W} (blau) der Stern-Stern-Schaltung in Portunus

In Abbildung 49 ist es zu erkennen, dass eine einphasige Belastung in Stern-Stern-Schaltung im Programm zu minimalen Spannungsunterschiede führt. Die Spannungsunterschiede sind bei 7V (Anzeige des Effektivwerts in Portunus). In der Realität führte eine Stern-Stern-Schaltung vor allem auf der Sekundärseite zur deutlichen Spannungsunterschiede.

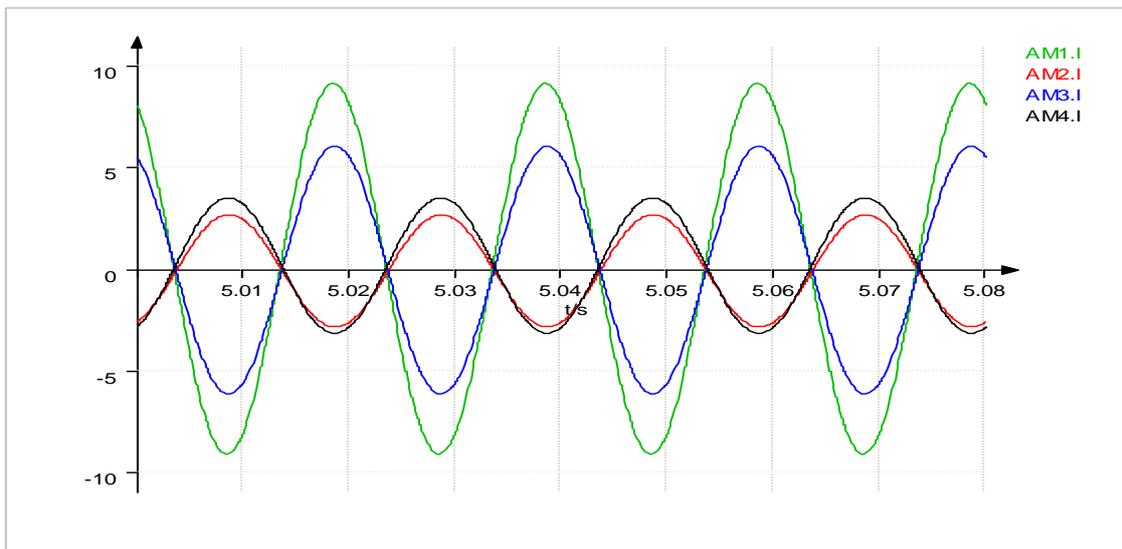


Abbildung 50: Primärströme I_{1U} (blau), I_{1V} (rot), I_{1W} (schwarz) und der Belastungsstrom I_{2U} (grün) der Stern-Stern-Schaltung in Portunus

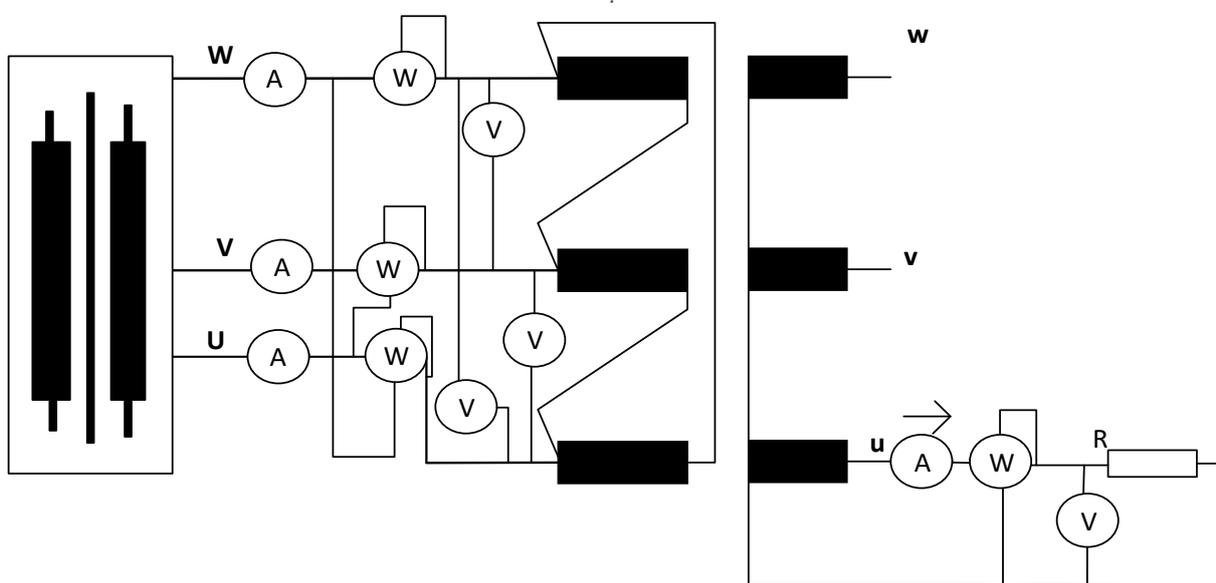
An den zeitlichen Verläufen der Ströme ist keine Verformung zu sehen. Die Effektivwerte der Primärströme betragen $I_W = 2,35 \text{ A}$, $I_V = 1,95 \text{ A}$ und $I_U = 4,3 \text{ A}$. Der Belastungsstrom hat einen Effektivwert von $I_{Belas} = 6,4 \text{ A}$. Auch wenn der Widerstand auf 10

Ω verkleinert wird, ist auf der Primärseite kein Spannungsunterschied zwischen den Phasen zu sehen. Dieses Programm stellt einen idealen Drehstromtransformator dar.

4.2.3 Einphasige Last der Dreieck-Stern-Schaltung (Dy5)

Das Schaltbild Dy5 für den Drehstromtransformator sieht wie in Abbildung 51 aus. Die Primärseite des Drehstromtransformators wird in Dreieck und die Sekundärseite in Stern geschaltet. Die Nullleiterlast ruft keine Störung des magnetischen Gleichgewichts hervor, da die Durchflutung der Sekundärwicklung des belasteten Stranges durch die Durchflutung seiner Primärwicklung aufgehoben wird. In den beiden Phasen V und W treten keine Zusatzflüsse auf. Die Drehstromtransformatoren, welche in Dreieck-Stern geschaltet sind, können 100% belastet werden. Die Sekundärspannung eilt der Primärspannung um 150° nach. Es gilt hier für den Strom $I_{1U} = I_{2u}$.²⁹

Der Widerstand R beträgt $31,8\Omega$. Die Spannungen und die Ströme sind mithilfe einer Stromzange über dem Leistungsmessgerät Hioki 3165 gemessen. Die zeitlichen Verläufe der Ströme und Spannungen werden außerdem mit dem Oszilloskop dargestellt.



Prüftrafo

Abbildung 51: Dreieck-Stern-Schaltung des Drehstromtransformators

²⁹ Elektrische Maschinen von Hans-Ulrich Giersch, Hans Harthus, Norbert Vogelsang, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH ISBN: 3519468212,

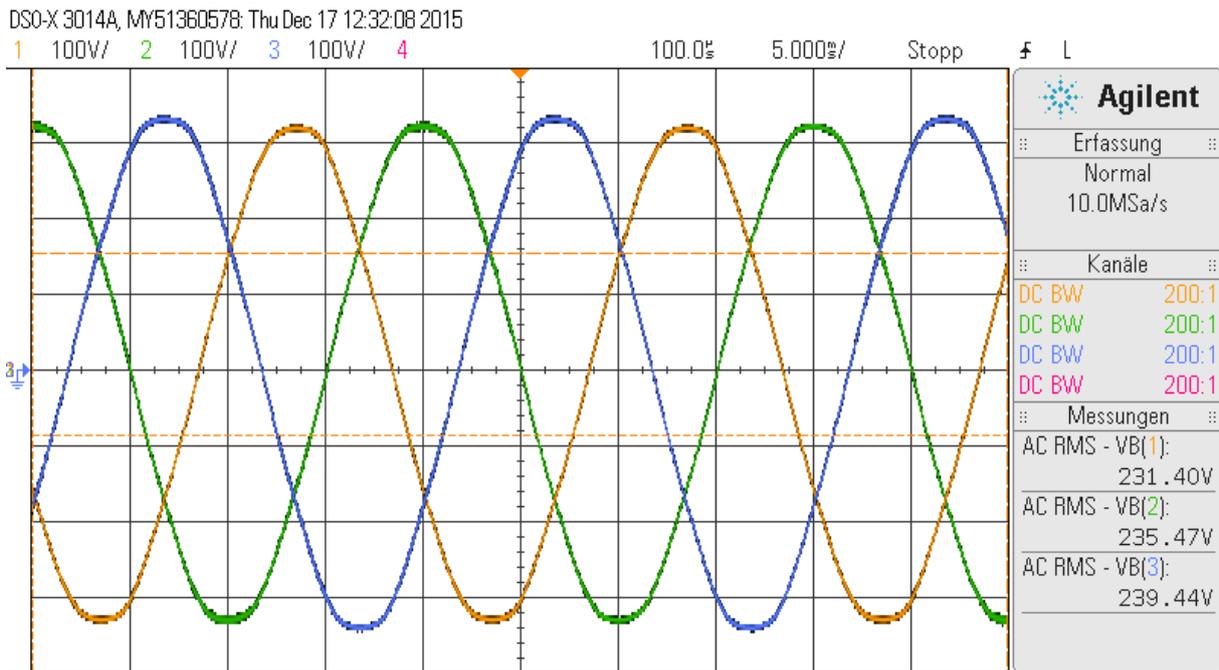


Abbildung 52: Der Verlauf der Primärspannungen U_{1U} (Kanal 1, gelb), U_{1V} (Kanal 2, grün) und U_{1W} (Kanal 3, blau) bei Dreieck-Sternschaltung

In Abbildung 52 werden die zeitlichen Verläufe der Primärspannungen U_U (Kanal 1, gelb), U_V (Kanal 2, grün), U_W (Kanal 3, blau) dargestellt. Die Phasenverschiebung einzelner Stränge bleiben unverändert und betragen 120° .

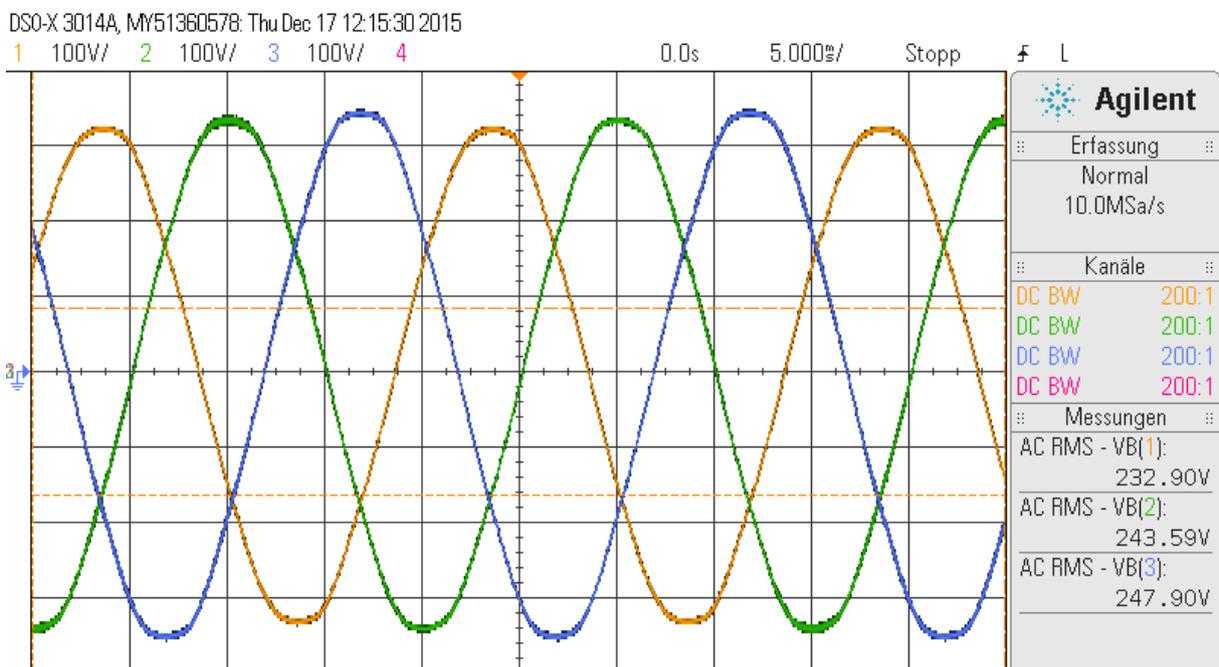


Abbildung 53: Sekundärspannungen U_{2u} (Kanal 1, gelb), U_{2v} (Kanal 2, grün) und U_{2w} (Kanal 3, blau) der Dreieck-Stern-Schaltung

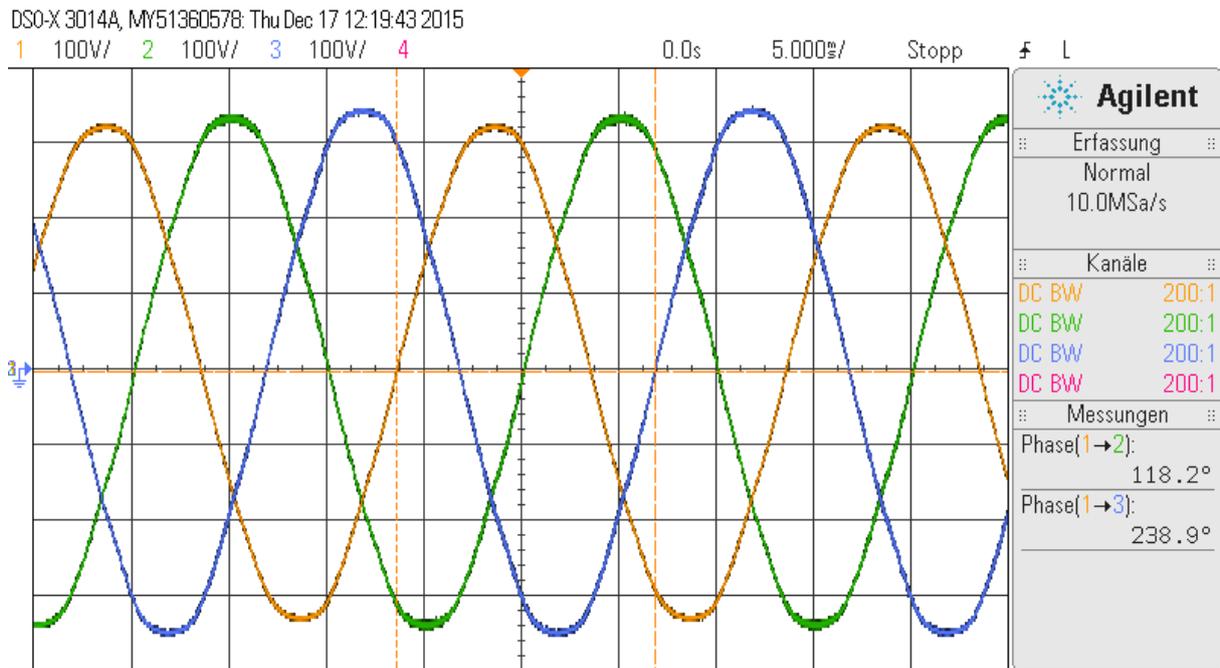


Abbildung 54: Phasenverschiebung der Sekundärspannungen der Dreieck-Stern-Schaltung bezogen auf U_{2u}

Wie es aus der Abbildung 54 zu entnehmen ist, hat sich die Phasenverschiebung trotz 100%iger Belastung nur um 2° verringert. Es ist außerdem zu erkennen, dass der belastete Strang einen kleineren Spannungseffektivwert als die beiden anderen Strangspannungen hat.

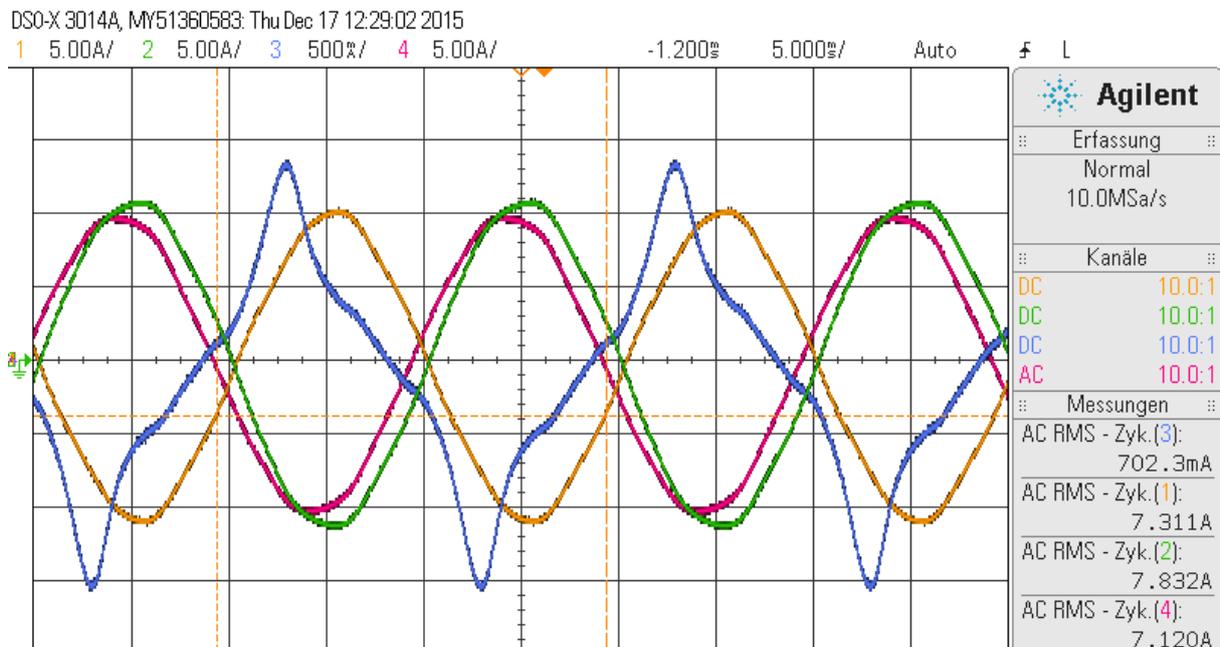


Abbildung 55: Eingangsströme I_{1U} (Kanal 1, gelb), I_{1V} (Kanal 2, grün), $10 \cdot I_{1W}$ (Kanal 3, blau) und der Belastungsstrom (Kanal 4, rosa) der Dreieck-Stern-Schaltung

Aus den Messergebnissen ist es zu entnehmen, dass mit der Vernachlässigung des Magnetisierungsstroms der Strom $I_{1U} = I_{2U}$ ist. Der Strom I_W ist in Abbildung 55 10-fach vergrößert dargestellt. Außerdem gilt für die Ströme bei Dreieckschaltung:

$$I_V = I_U + I_W = 7,311 \text{ A} + 0,702 \text{ A} = 8,013 \text{ A} \approx 7,832 \text{ A}$$

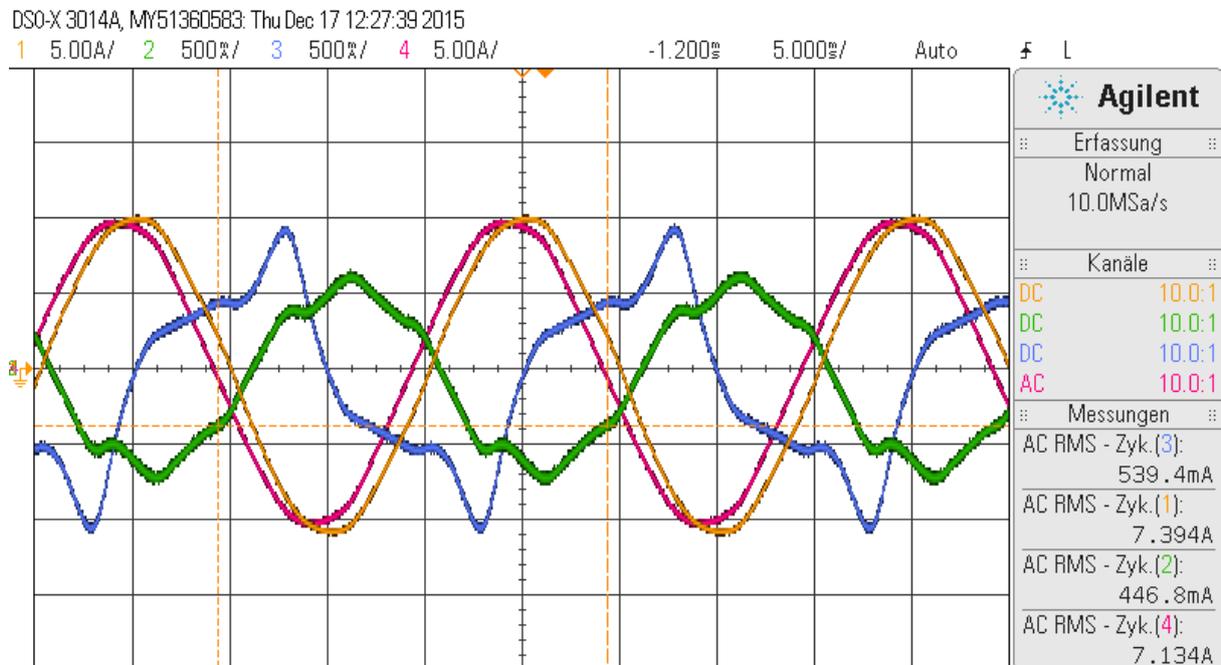


Abbildung 56: Ströme zwischen U2-V1 (Kanal 1, gelb), V2-W1 (Kanal 2, grün), W2-U1 (Kanal 3, blau) und der Belastungsstrom (Kanal 4, rosa) der Dreieck-Stern-Schaltung

Aus beiden Abbildungen 55 und 56 ist es zu erkennen, dass der Strom zwischen Wicklungen U2-V1 (7,394A) und I_U (7,311A) den gleichen Effektivwert besitzen. Die Ströme I_W und I_V sind in Abbildung 56 10-fach vergrößert. Da auf der Primärseite auf dem Strang nur über die belastete Phase Strom fließt, wird keine Störung des magnetischen Gleichgewichtes durch die Sternpunktbelastung hervorgerufen.

4.2.4 Simulation der Dreieck-Stern-Schaltung in Portunus

Die Dreieck-Stern-Schaltung des Drehstromtransformators wurde wie folgt mit der Software Portunus realisiert. Der Widerstand R1 beträgt 55Ω. Im realen Versuch wurde ein 31,8 Ω Widerstand verwendet. Im Portunus hat man das Problem, dass bei der Verbindung mit dem Sternpunkt der Voltmeter die Außenleiterspannung angezeigt werden.

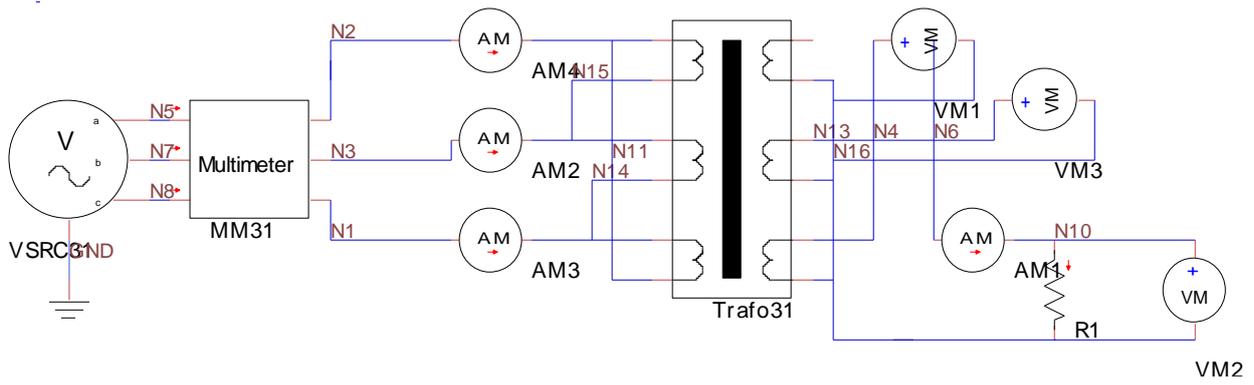


Abbildung 57: Simulationsschaltung für Dreieck-Stern-Schaltung in Portunus

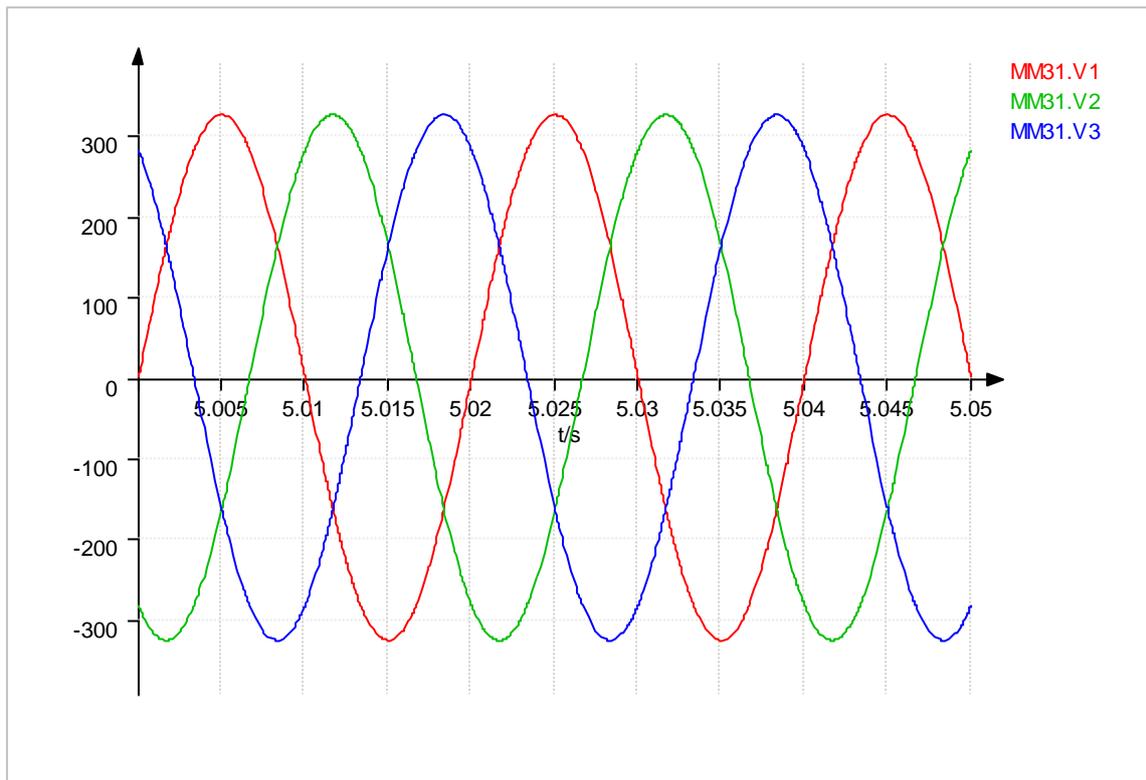


Abbildung 58: Primärspannungen der Dreieck-Stern-Schaltung in Portunus

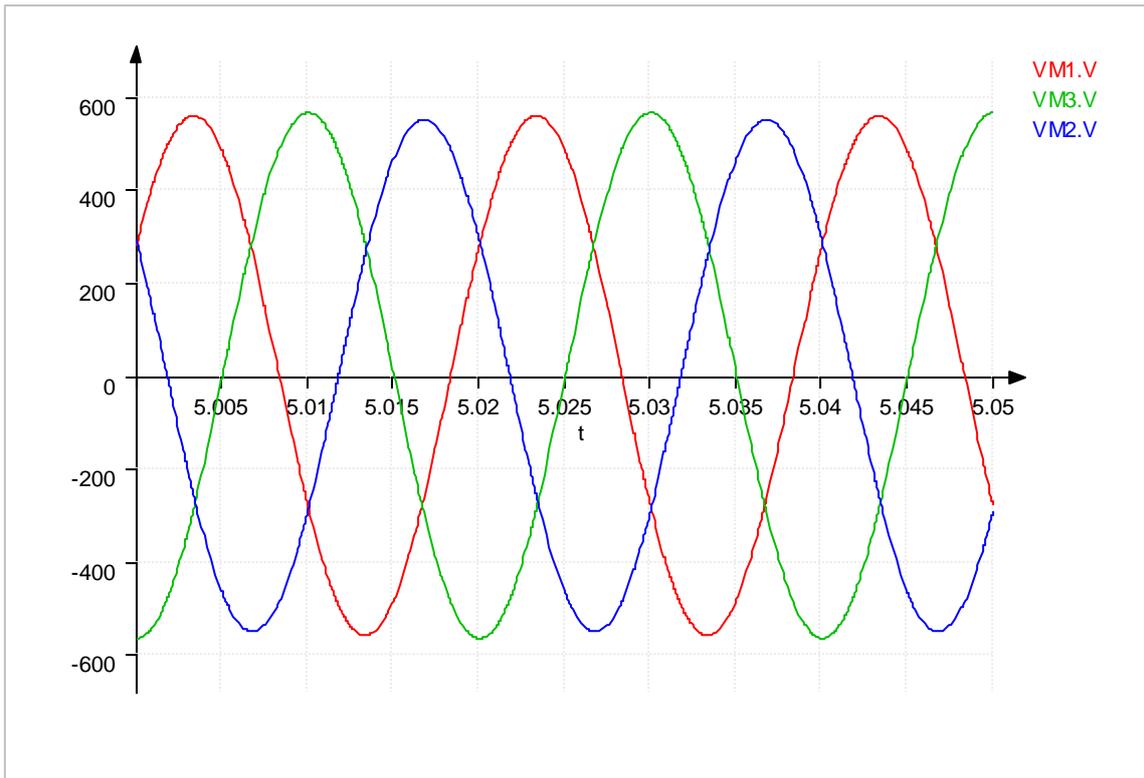


Abbildung 59: Sekundärspannungen der Dreieck-Stern-Schaltung in Portunus

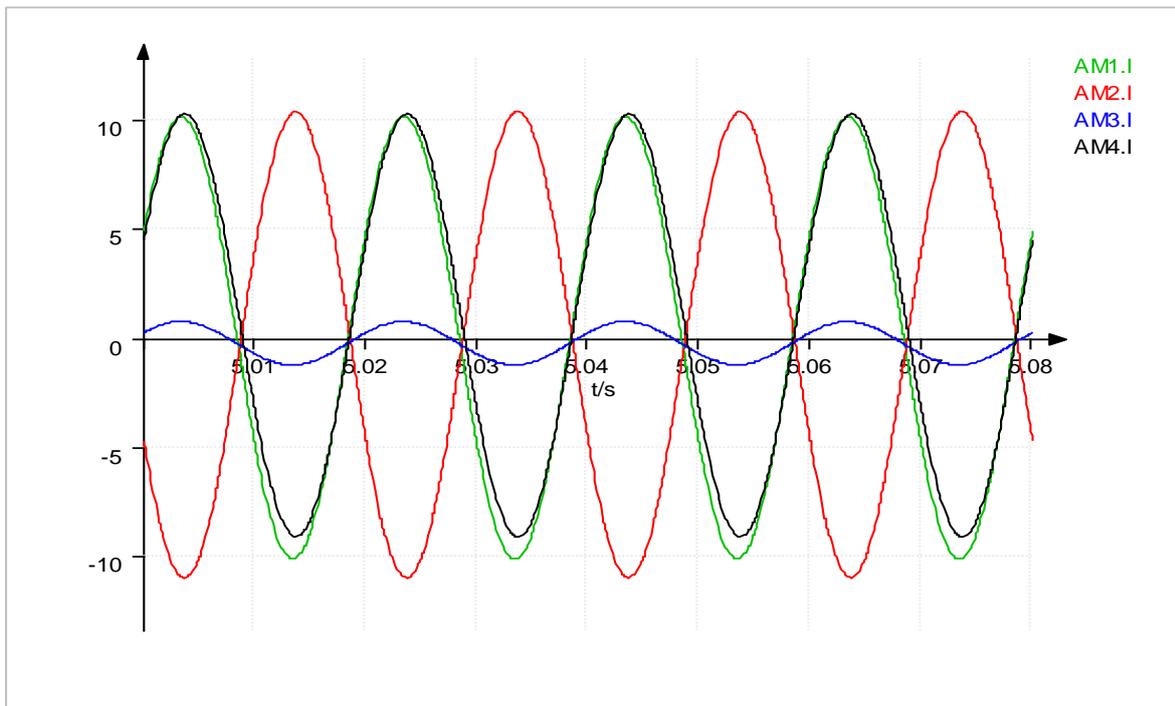


Abbildung 60: Primärströme I_{1U} (schwarz), I_{1V} (rot), I_{1W} (blau) und der Belastungsstrom I_{2U} (grün) der Dreieck-Stern-Schaltung in Portunus

In der Phase W fließt kein Strom außer Magnetisierungsströme. Somit bestätigt die Simulation den realen Versuch.

4.2.5 Einphasige Last der Stern-Zickzack-Schaltung (Yz5)

Diese Schaltung wird des Öfteren als Zick-Zack-Schaltung bezeichnet. Diese Art von Schaltungen wird bei kleineren Verteilertransformatoren eingesetzt. Die Einphasenlast verteilt sich auf zwei Phasen U und V. Die Sekundärströme in den beiden Schenkeln sind gleich der Primärströme in den Primärwicklungen der beiden Schenkel. Die Primär- und Sekundärflüsse ergänzen sich in jedem Schenkel zu null. Das magnetische Gleichgewicht wird für jeden Schenkel gewährt. Daher findet hier keine Sternpunktverlagerung statt. Die Oberschwingungen der 3. Ordnung des Magnetisierungsstroms stellen kein Problem dar, da sie im Drehstromtransformator kompensiert werden. Die Sekundärspannung eilt der Primärspannung um 150° nach. Die Schaltung wird nach Abbildung 61 realisiert. Der Lastwiderstand beträgt in diesem Versuch 24Ω .

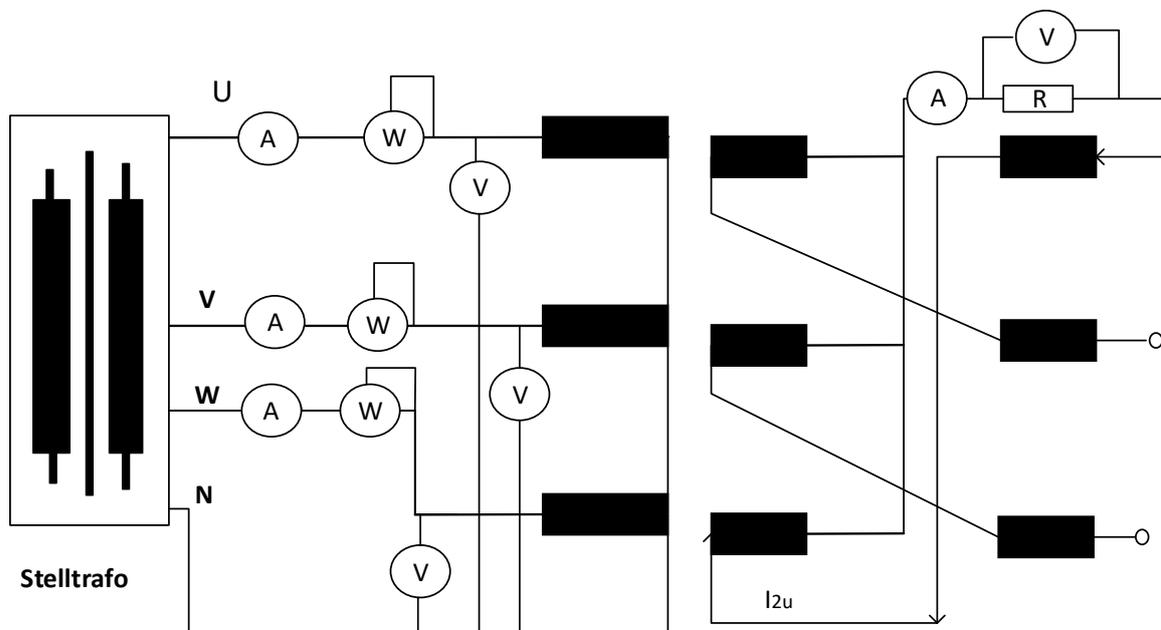


Abbildung 61: Stern-Zickzack-Schaltung des Drehstromtransformators

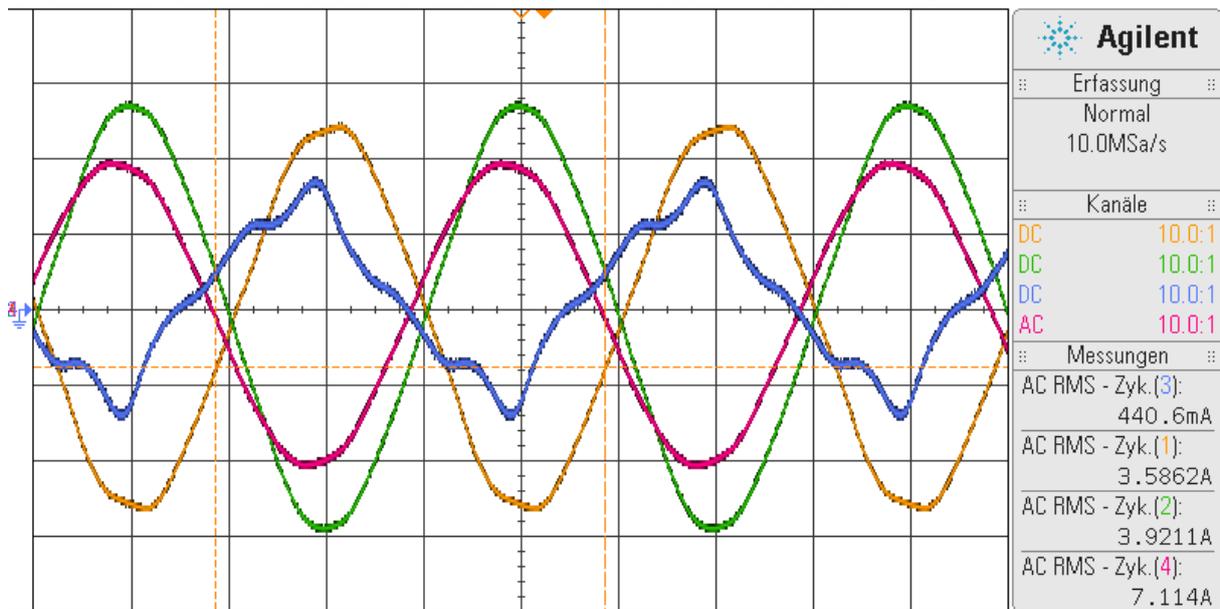


Abbildung 62: Eingangsströme I_{1U} (Kanal 1, gelb), I_{1V} (Kanal 2, grün), $5 \cdot I_{1W}$ (Kanal 3, blau) und der Belastungsstrom (Kanal 4, rosa) der Stern-Zickzack-Schaltung

In Abbildung 62 sind die Primärströme und der Belastungsstrom zu sehen. Die Skalierung des Stroms I_W ist gegenüber der Ströme I_V und I_U vierfach vergrößert.

Aus den Messergebnissen folgt, dass die Primär- und Sekundärwicklungen der Phase W abgesehen von dem Magnetisierungsstrom keinen Stromfluss haben. Der Strom I_{2U} ist der Laststrom aus beiden Wicklungen U und V. Die Addition von den Strömen I_{1U} und I_{1V} sind abgesehen von den Magnetisierungsströmen der beiden Phasen gleich dem Strom I_{2U} .

$$I_{2u} = I_{1U} + I_{1V} = 3,59 \text{ A} + 3,92 \text{ A} = 7,51 \text{ A} \approx 7,11 \text{ A}$$

Aus den Kurvenverläufen ist es zu erkennen, dass der Strom I_W nur einen Magnetisierungsstrom von 0,44A hat. Die Verläufe der Ströme I_{1U} und I_{1W} sind leicht verzerrt.

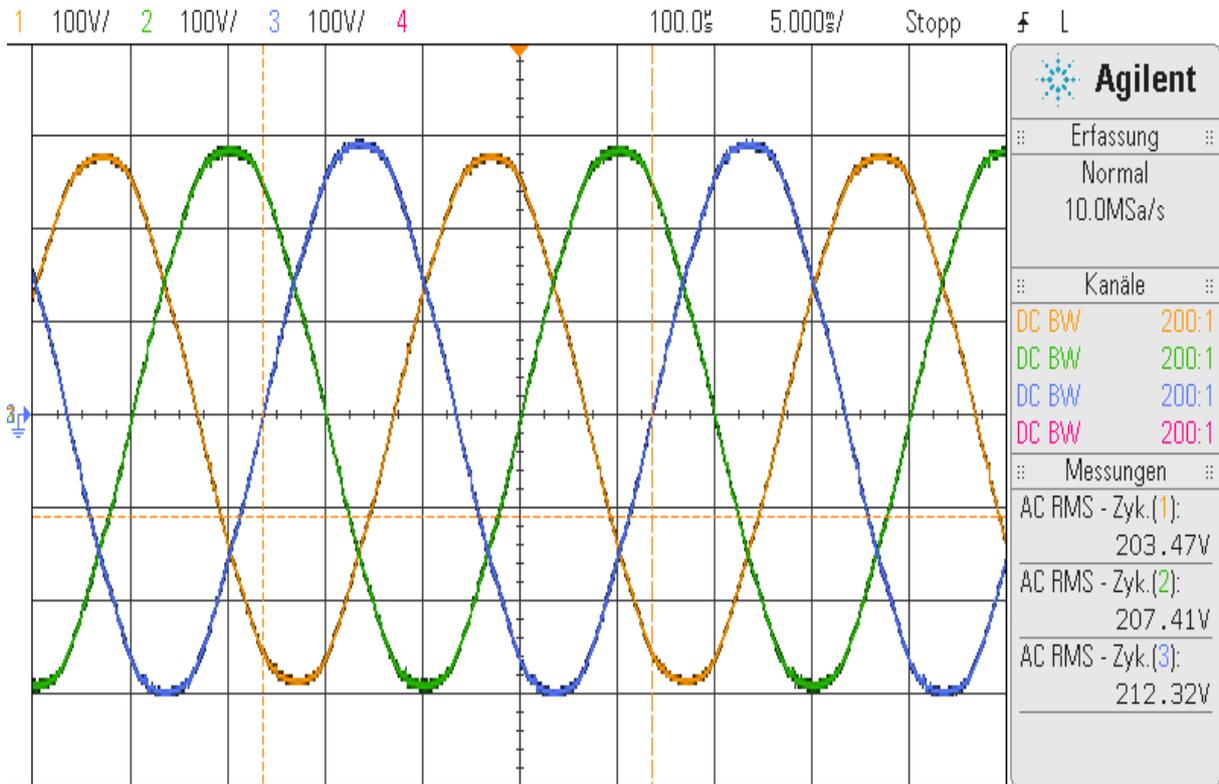


Abbildung 63: Sekundärspannungen U_{2u} (Kanal 1, gelb), U_{2v} (Kanal 2, grün) und U_{2w} (Kanal 3, blau) der Stern-Zickzack-Schaltung bei einphasiger Last

Auf der Sekundärseite haben die Spannungen nur minimale Unterschiede. Der Phasenwinkel zwischen den Strängen beträgt wie erwartet 120° . Für die Spannung auf der Sekundärseite gilt:

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \ddot{u} = 230 \text{ V} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot 0,96 = 207,5 \text{ V}$$

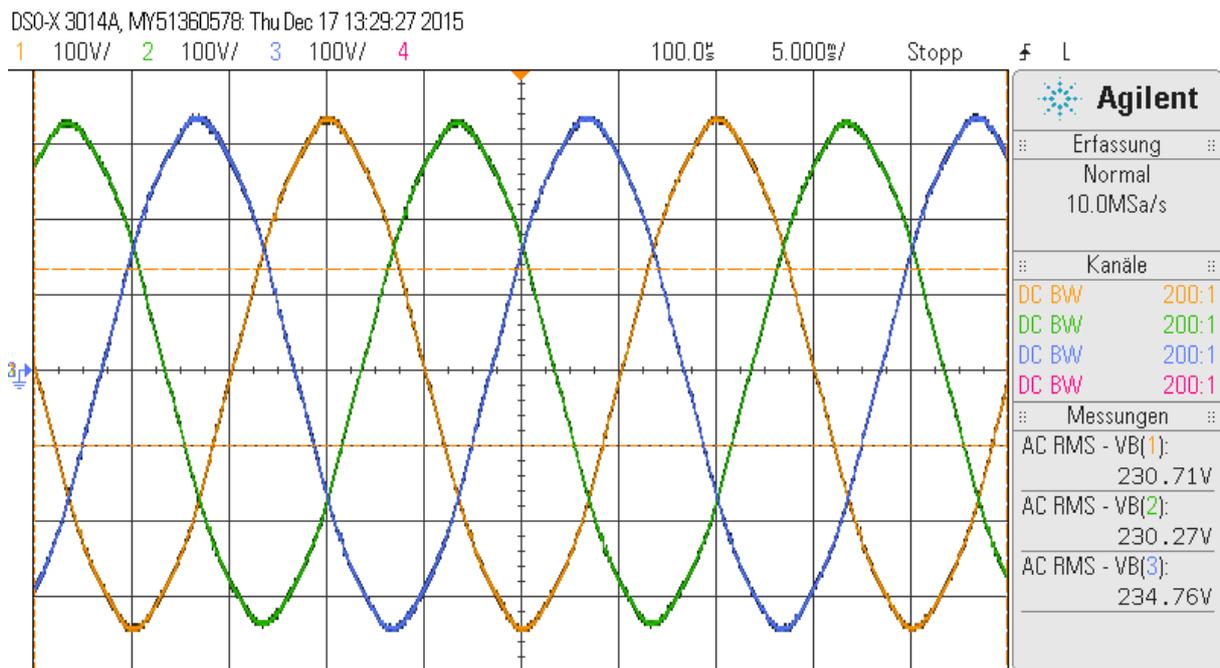


Abbildung 64: Primärspannungen U_{1u} (Kanal 1, gelb), U_{1v} (Kanal 2, grün), U_{1w} (Kanal 3, blau) der Stern-Zickzack-Schaltung bei einphasiger Last

Auf der Primärseite sind die Spannungen einzelner Stränge fast identisch. Es sind nur minimale Unterschiede vorhanden, welche sich aufgrund des Stelltransformators nicht verhindern lässt. Der Phasenwinkel wurde auch mithilfe des Oszilloskops bestimmt und beträgt 120° . Somit wird auf der Primärseite keine Sternpunktverschiebung verursacht.

4.2.6 Einphasige Last bei Stern-Ausgleichschaltung ($Yy+d$)

Es gibt die Möglichkeit den Drehstromtransformator einphasig zu belasten, der sogenannte Dreiwicklungstransformator oder auch die Tertiärwicklung (Abbildung 65). Dieser Schaltung ist eine modifizierte Schaltgruppe $Yy0+d$. Die Ausgleichswicklung wird in Dreieck geschaltet und hat keine Verbindung nach außen. Sie erzeugt bei reiner Einphasenlast ein Drittel der Durchflutung. Im Fall einer unsymmetrischen Belastung fließen durch alle drei Stränge Ausgleichströme. Die Ausgleichsströme schaffen die Symmetrie und das Durchflutungsgleichgewicht wird gewahrt.³⁰

³⁰ Elektrische Maschinen und Umformer, F. Moeller/ P. Vaske, B.G. Teubner Stuttgart Verlag, ISBN: 3519164019

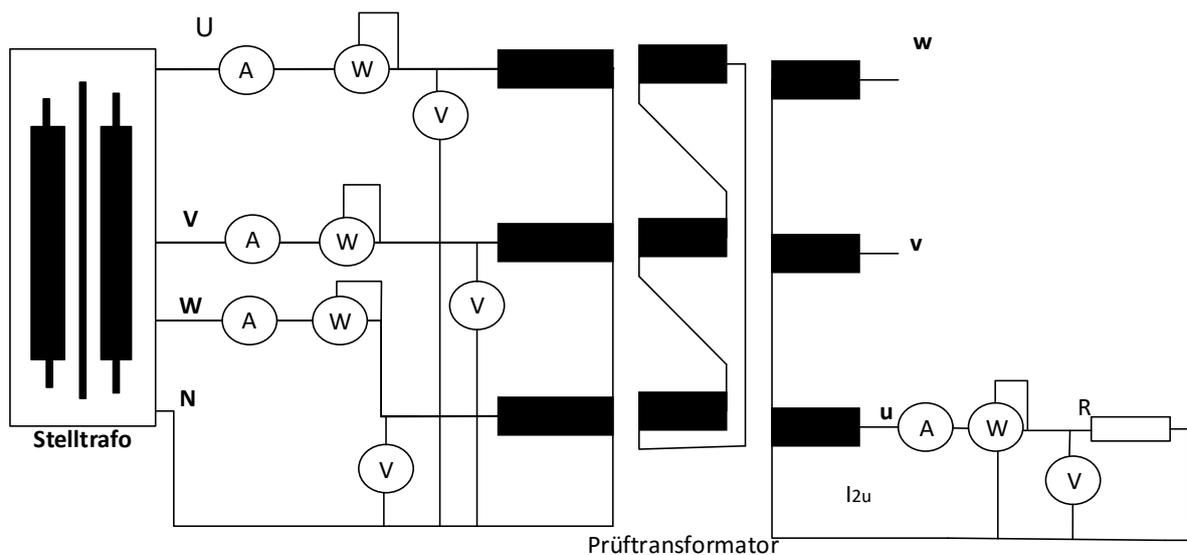


Abbildung 65: Stern-Ausgleich-Schaltung

Primär- und Sekundärdurchflutungen heben sich gegenseitig auf, sodass nur der Magnetisierungsstrom übrig bleibt. Dieser Strom wird vernachlässigt. Für den Strom I_{2u} gilt:

$$I_{1U} - I'_{2u} + \frac{I_{1u}}{2} = 0$$

$$I_{1U} = \frac{2 \cdot I'_{2u}}{3}$$

Aufgrund der Dreieckwicklung heben sich die Flüsse in jedem Schenkel auf, damit eine 100 prozentige Sternpunktbelastbarkeit ermöglicht wird³¹. Aufgrund der in Dreieck geschalteten Ausgleichwicklung eilt der Primärspannung die Sekundärspannung um 150° nach.

³¹ Elektrische Maschinen mit Einführung in die Leistungselektronik von Hans-Ulrich Giersch, Hans Harthus und Norbert Vogelsang, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ISBN: 9783322927064

DSO-X 3014A, MY51360578: Thu Dec 17 14:12:31 2015

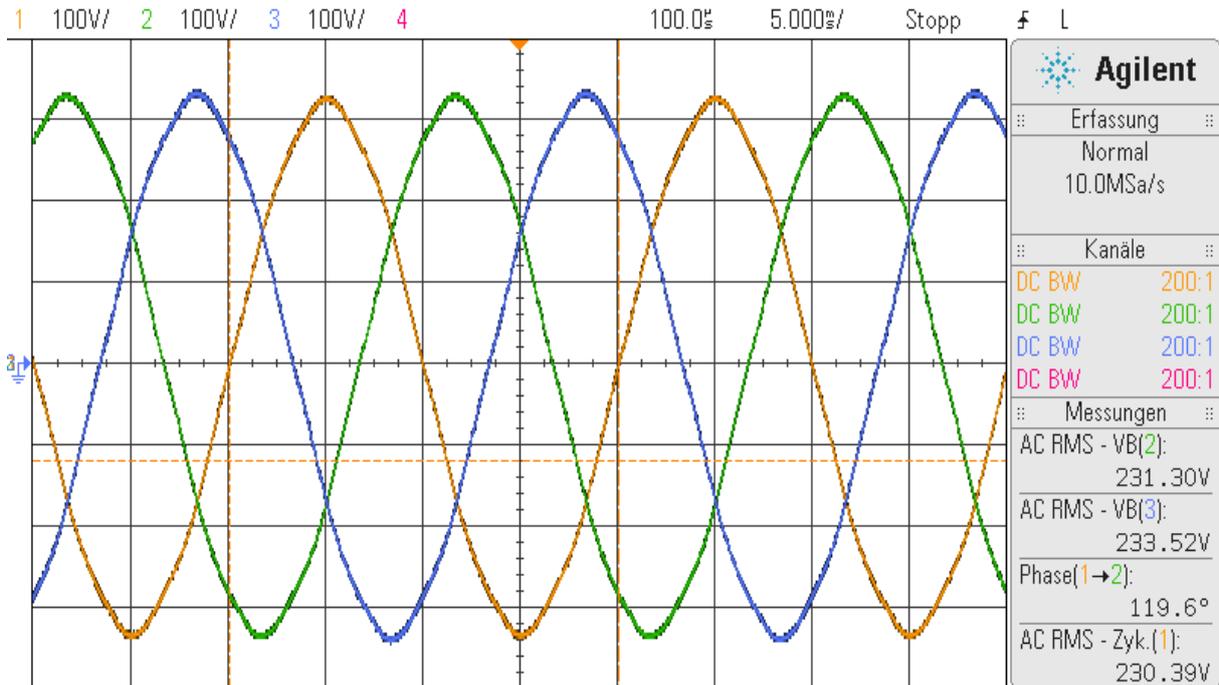


Abbildung 66: Primärspannungen U_{1U} (Kanal 1, gelb), U_{1V} (Kanal 2, grün), U_{1W} (Kanal 3, blau) der Stern-Ausgleichschaltung bei einphasiger Last

DSO-X 3014A, MY51360578: Thu Dec 17 13:54:43 2015

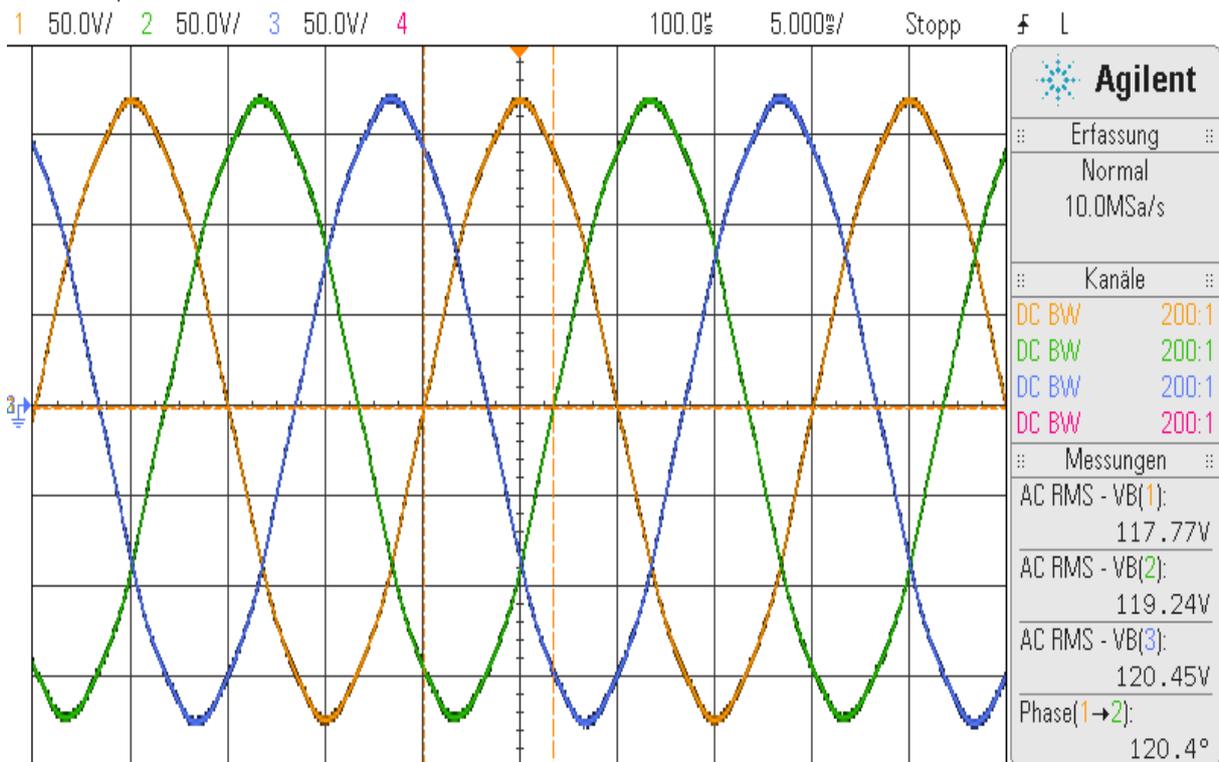


Abbildung 67: Sekundärspannungen U_{2u} (Kanal 1, gelb), U_{2v} (Kanal 2, grün), U_{2w} (Kanal 3, blau) bei Stern-Ausgleich-Schaltung

In den Abbildungen 66 und 67 handelt es sich um die Strangspannungen der Primär- und der Sekundärseite des Drehstromtransformators. Die Skalierungen sind im oberen Bereich der Abbildungen zu sehen. Dabei wurde der Drehstromtransformator bis um 83% belastet. Eine 100%ige Belastung wurde aufgrund des Drehstromwiderstands nicht erreicht. Der Belastungswiderstand in dieser Versuchsdurchführung beträgt $19,2\Omega$. Die Effektivwerte der Strangspannungen sind gleich. Die Phasenverschiebungen der einzelnen Phasen bleiben bei 120° . Obwohl die Stern-Stern-Schaltung schon bei einer 10%igen Belastung eine Sternpunktverschiebung verursacht, ist es bei einem Dreiwicklungstransformator nicht der Fall.

Bei dieser Schaltung hat sich das Übersetzungsverhältnis geändert.

$$\ddot{u} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{205 \text{ V}}{400 \text{ V}} = 0,5125$$

Der Wirkungsgrad ist

$$\eta_{Vdy} = \frac{P_{Ab}}{P_{Zu}} = \frac{118 \cdot 5,96 \text{ W}}{(230 \cdot 2,16 + 231 \cdot 1,3 + 233 \cdot 0,89) \text{ W}} = 0,70 = 70\%$$

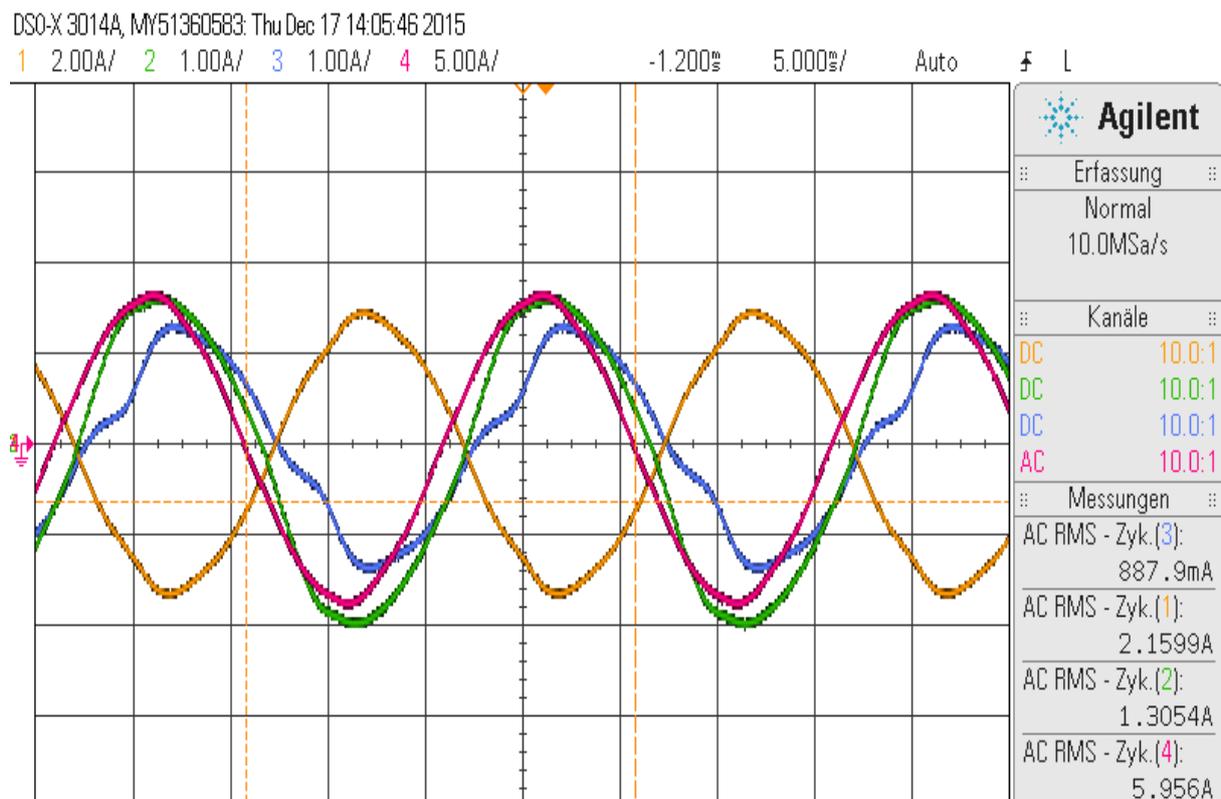


Abbildung 68: Effektivwerte der Primärströme I_{1u} (gelb), I_{1v} (grün), I_{1w} (blau) und der Belastungsstrom I_{2u} (rosa) der Stern-Ausgleich-Schaltung bei einphasiger Last

Setzt man den gemessenen Wert in die Gleichung ein:

$$I_{1U} = \frac{2 \cdot I'_{2u}}{3} = \frac{2 \cdot 5,956 \text{ A} \cdot 0,5125}{3} = 2,035 \text{ A} \approx 2,16 \text{ A}$$

Die Primärdurchflutung und die Sekundärdurchflutung heben sich gegenseitig auf. Der Magnetisierungsstrom wird dabei vernachlässigt. Außerdem ist es zu erkennen, dass die Stromverläufe nicht sinusförmig sind. Der Verlauf des Stromes I_w ähnelt sich dem Magnetisierungsstrom aus dem Leerlaufversuch. Die Primärströme können nicht über den fehlenden Neutralleiter fließen, somit führen sie zu einer Verzerrung beim Verlauf.

4.2.7 Dreipuls-Mittelpunktschaltung (M3)

Die Theorie der Dreipuls-Mittelpunktschaltung ist aus dem Vorlesungsskript des Faches Grundlagen der Leistungselektronik von Oliver Kettenbaum³² entnommen worden.

Die Dreipuls-Mittelpunktschaltung sogenannte M3-Gleichrichterschaltung besteht aus 3 parallelgeschalteten Dioden. Die Strangspannungen haben gleiche Amplituden, wobei sie 120° phasenverschoben sind. In diesem Versuch wurden die Dioden vom Typ BY329 angeschlossen. Der Lastwiderstand beträgt 76Ω . Bei einem 50 Hz-Netz ist die Stromführungsdauer pro Ventil:

$$\lambda = \frac{120^\circ}{360^\circ} \cdot \frac{1}{50} \text{ Hz} = 6,67 \text{ msec}$$

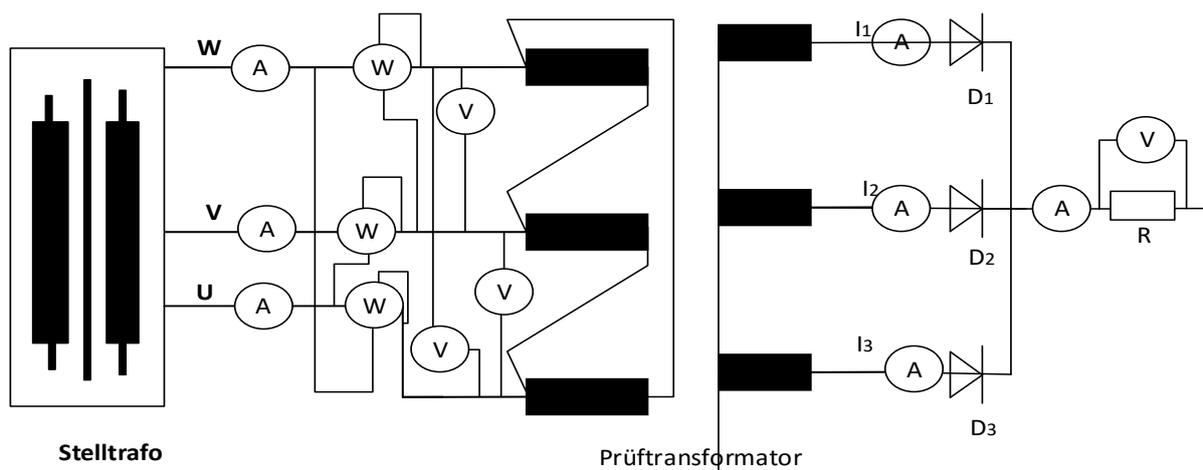


Abbildung 69: Dreipuls-Mittelpunktschaltung

³² <http://www.antriebstechnik.fh-stralsund.de/1024x768/Dokumentenframe/Kompndium/Fachvorlesungen/Leistungselektronik/le1.pdf> , gelesen am 13.12.2015

Die Dioden sind leitend, wenn die Anode der Dioden mindestens um die Dioden-Schwellspannung positiver als der von der Kathode ist. Die Außenleiterspannungen sind bei $\omega t = 30^\circ$ gleich. Danach wird U_u größer als U_w . Somit wird die Diode D_1 leitend. Über den Widerstand R fließt ein Strom I_d . Nach 120° wird $u_v > u_u$. In diesem Fall wird die Diode D_2 leitend und die Diode D_1 sperrend. Dieser Vorgang wird als Kommutierung bezeichnet. Der Stromfluss ist kontinuierlich. Diese Gleichrichterschaltung wird auch als netzgeführte Stromrichter bezeichnet, da die Stromübernahme durch den Drehstromtransformator erfolgt. Es führt jeweils immer nur eine Diode den Strom, während die anderen beiden Dioden den Stromfluss sperren. Die Dioden werden mit verketteter Spannung vom Drehstromtransformator aus belastet.

Diese verkettete Spannung lässt sich wie folgt berechnen:

$$U_V = \sqrt{3} \cdot U_S$$

Die maximale Sperrspannung ist:

$$U_{Vmax} = \sqrt{2} \cdot U_V = \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot U_S \approx 2,45 \cdot U_S$$

Die ideale Gleichspannung lässt sich durch

$$U_{di} = \frac{3}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} \sqrt{2} \cdot U_S \cdot \sin \omega t \, d\omega t = \frac{3\sqrt{6}}{2\pi} U_S = 1,17 \cdot U_S$$

oder

$$U_{di} = \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} U_V = 0,68 \cdot U_V$$

berechnen.³³

³³ Lehrstuhlskript für Elektrische Antriebssysteme und Leistungselektronik von Prof. Dr.-Ing. Ralph Kennel

Die Leistungsmesser haben folgende Ergebnisse ermittelt:

U_{2U} [V]	U_{2V} [V]	U_{2W} [V]	
239,2	239,2	238,0	
I_{1U} [A]	I_{1V} [A]	I_{1W} [A]	
3,389	3,223	3,416	
I_{2U} [A]	I_{2V} [A]	I_{2W} [A]	
3,370	3,200	3,394	
P [kW]	S [kVA]	Q [kvar]	PF
1,116	1,348	0,756	0,828

Tabelle 8: die ermittelte Messwerte der M3-Schaltung

Mit einem Oszilloskop wurden die Zeitverläufe aufgenommen.

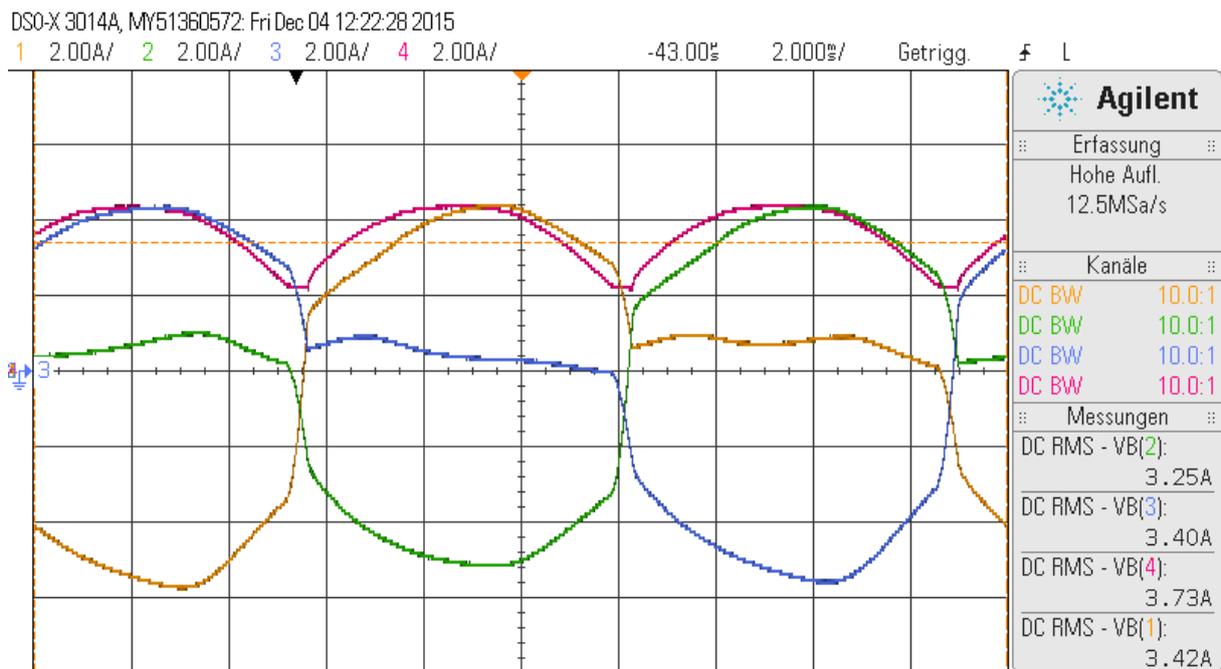


Abbildung 70: Eingangsströme I_{1U} (Kanal 1, gelb), I_{1V} (Kanal 2, grün), I_{1W} (Kanal 3, blau) und der Belastungsstrom I_{2U} (Kanal 4, rosa)

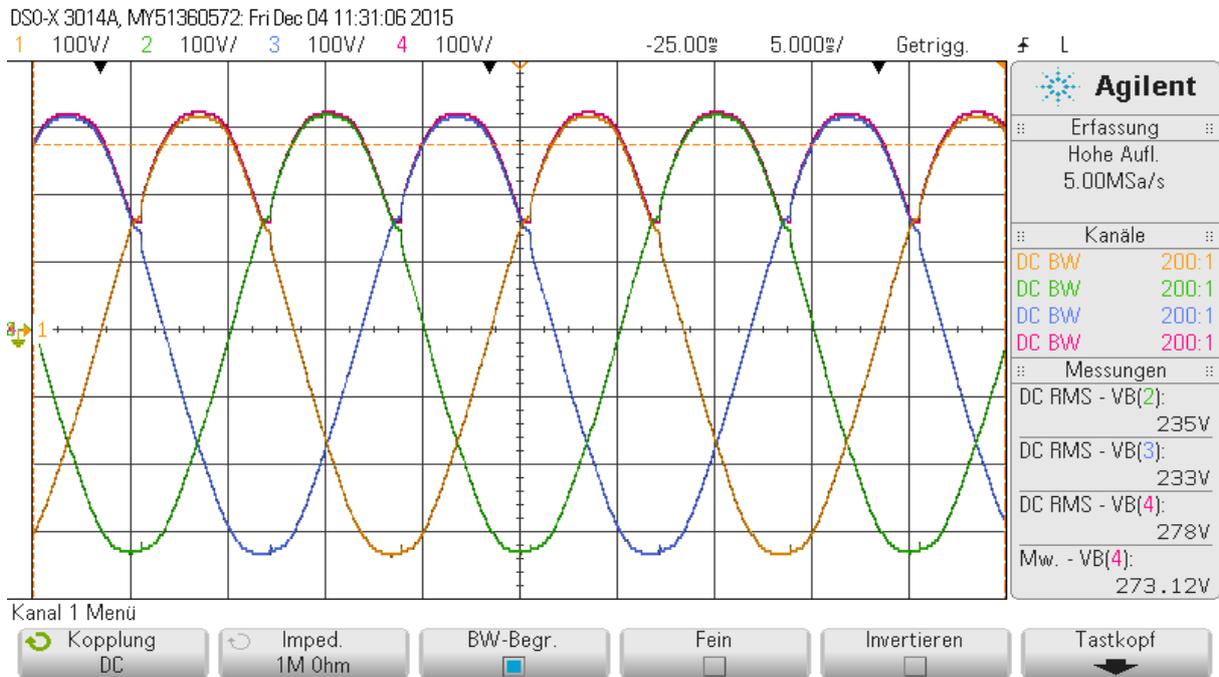


Abbildung 71: Primärspannungen U_{1U} (Kanal 1, gelb), U_{1V} (Kanal 2, grün), U_{1W} (Kanal 3, blau) und ideale Gleichspannung auf der Sekundärseite

Aus der Formel heraus kann die ideale Gleichspannung berechnet werden:

$$U_{di} = \frac{3}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} \sqrt{2} \cdot U_S \cdot \sin \omega t \, d\omega t = \frac{3\sqrt{6}}{2\pi} U_S = 1,17 \cdot U_S = 1,17 \cdot 232,9 \text{ V} = 272,5 \text{ V}$$

Die theoretisch berechneten und gemessenen Werte (273,12V) stimmen somit überein.

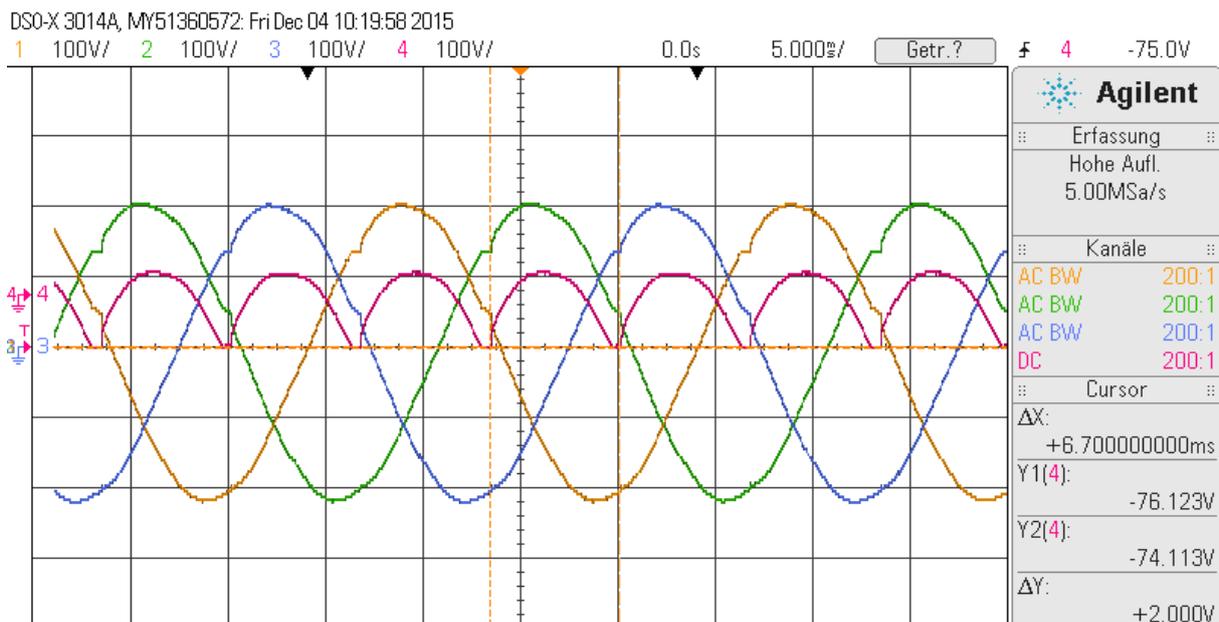


Abbildung 72: Stromführungsdauer pro Ventil

Die Stromführungsdauer λ pro Ventil (6,7ms) entspricht den berechneten Wert von 6,7ms

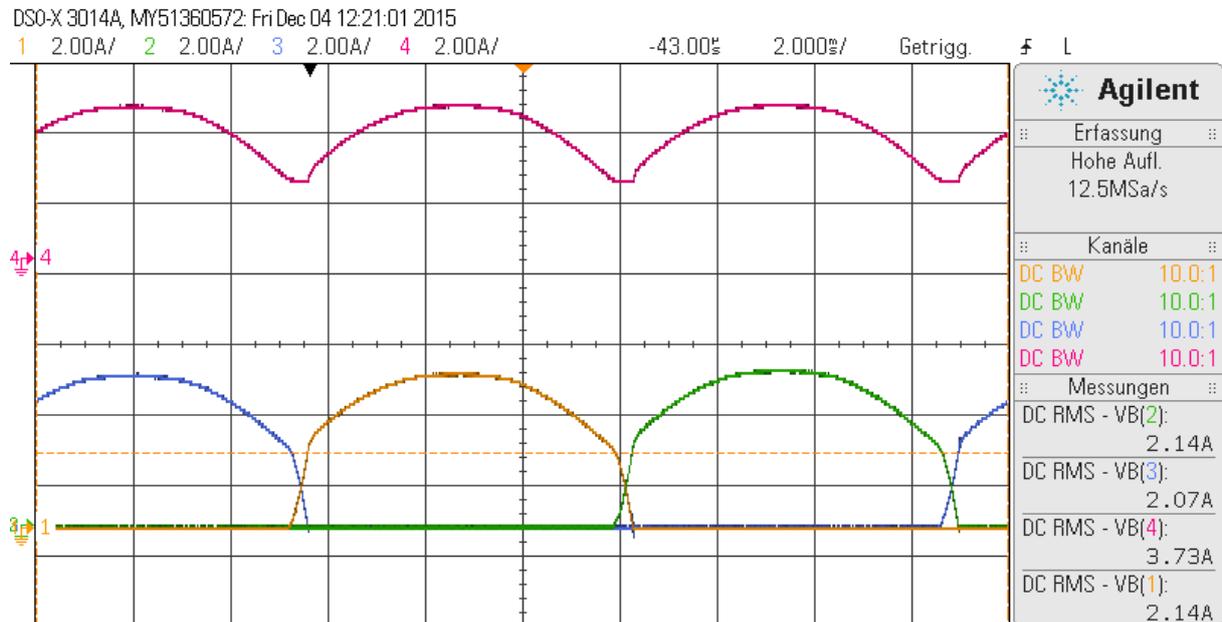


Abbildung 73: Diodenströme I_{D1} (Kanal 1, gelb), I_{D2} (Kanal 2, grün), I_{D3} (Kanal 3, blau) und der Laststrom I_L (Kanal 4, rosa) der M3-Schaltung

Auf der Abbildung 73 ist es zu erkennen, dass über die Dioden gleicher Strom fließt. Die Effektivwerte wurden mit dem Leistungsmessgerät überprüft und weisen den gleichen Effektivwert auf.

5 Regeltransformatoren

Die Theorie der Regeltransformatoren ist aus dem Buch „ELEKTROENERGIESYSTEME“ VON ADOLF J. SCHWAB³⁴ aus der Internetseite WIKIPEDIA-PHASENSCHIEBERTRANSFORMATOR³⁵ und aus der Dissertation „MODELING AND PROTECTION OF PHASE SHIFTING TRANSFORMERS“ VON UMAR KHAN³⁶ entnommen worden.

Die Kontrolle der Wirkleistung spielt mit dem Wachstum der Energiesystemnetze eine wichtige Rolle bei parallelen Energieübertragungslinien. Aufgrund der Deregulierung des elektrischen Energiemarktes sind heute die Energietransfersysteme nicht so einfach wie in der Vergangenheit. Die Belastungsbedingungen der Transferleitungen sind in einem Vertrag der Energieversorger bestimmt. Für die Energieübertragung werden heute Flusststeuerungsgeräte benötigt. Diese Geräte übertragen den Energiefluss auf die Leitungen, die freie Übertragungskapazitäten haben. Die Regeltransformatoren stellen in diesem Fall für den Energiefluss eine kostengünstige und zuverlässige Lösung dar³⁷. Die Regeltransformatoren werden zur Verbesserung der transienten Stabilität der Stromversorgungssysteme verwendet. Sie werden heute zur Kontrolle und Erhöhung des Energieflusses zwischen zwei großen Systemen benutzt. Sie steuern die Blind- und Wirkleistungsflüsse in Hochspannungsnetzen mit dem Ziel der Spannungshaltung und der gleichmäßigen Leistungsaufteilung bei parallelen Übertragungsleitungen. Die Blindleistung lässt sich durch den Unterschied im Betrag der Knotenspannungen, die Wirkleistung durch den Phasenwinkel zwischen den Knotenspannungen am Anfang und am Ende einer Leitung beeinflussen³⁸. Es werden drei Arten der Regelung unterschiedet: Längsregelung, Querregelung und Schrägregelung.

³⁴ Elektroenergiesysteme, Adolf J. Schwab, Springer Vieweg Verlag, ISBN: 9783662468562

³⁵ <https://de.wikipedia.org/wiki/Phasenschiebertransformator>, gelesen am 21.01.2016

³⁶ <https://de.wikipedia.org/wiki/Phasenschiebertransformator>, gelesen am 21.01.2016

³⁷ Modeling and Protection of Phase Shifting Transformers, Umar Khan, University of Western Ontario, 2013, <http://ir.lib.uwo.ca/etd/1701/>

³⁸ Transformer Engineering von S.V. Kulkarni/ S.A. Khaparde, Marcel Dekker Verlag ISBN : 0824756533

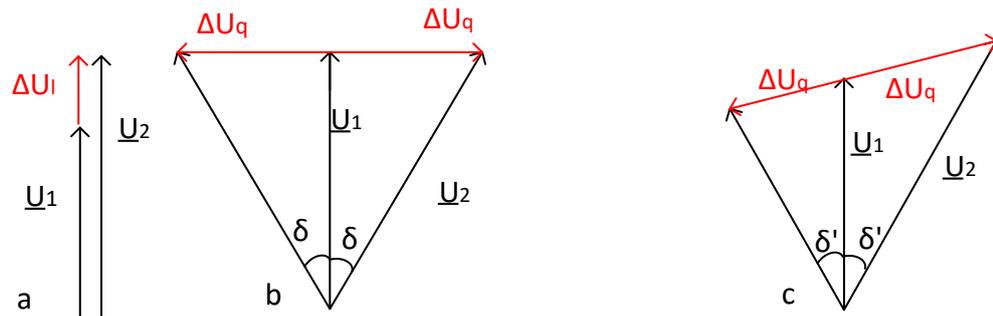


Abbildung 74: a) Längsregler, b) Querregler, c) Schrägregler

Quelle: *Elektroenergiesysteme* von A. J. Schwab.

Die Wirkleistung, welche über die Übertragungslinien fließt, ergibt sich wie folgt:

$$P = \frac{|U_2| \cdot |U_1|}{Z_L} \cdot \sin(\delta)$$

Dabei sind U_1 die Eingangsspannung, U_2 die Ausgangsspannung, δ die Phasenverschiebung zwischen der Eingangs- und Ausgangsspannung, Z_L die Reaktanz der Übertragungslinie. Die Wirkleistung über die Übertragungslinie kann über das Steuern der Spannung erreicht werden, diese stellt leider nicht die brauchbare Lösung aufgrund des Blindleistungseinflusses dar. Die Regelung des Energieflusses kann durch die Verringerung des Blindwiderstandes der Übertragungsleiter erfolgen. Dazu werden Kapazitäten in Reihe geschaltet. Außerdem kann dieser Energiezufluss auch durch Variieren der Phasenverschiebung unter Verwendung von Phasenschiebertransformatoren geregelt werden. Man spricht bei einem Einsatz von einem Zusatztransformator von einer indirekten Regelung.

5.1 Längsregler

Bei einem Längsregler wie schon in Abbildung 74 zu erkennen ist, ändert sich die Phasenlage bei einer Zusatzspannung nicht. Diese Zusatzspannung wirkt in die Längsrichtung zur Spannung U_1 der Hauptwicklung. Durch den Längsregler werden Knotenspannung und Blindstromverteilung in den parallelen Leitungen beeinflusst³⁹. Die Längsregelung erfolgt mit einem Zusatztransformator (indirekte Regelung), welche

³⁹]: http://ront.info/systemwirkung-ront/probleme_loesungen/ront-vs-spannungsregler/ gelesen am 10.01.2016

in die Tertiärwicklung des Leistungstransformators oder in Stern oder Dreieck geschaltete Wicklung einspeist. Bei Verteilertransformatoren gibt es Spannungsabfälle beim Verbraucher. Um diese Spannungsabfälle zu kompensieren, werden Stelltransformatoren verwendet. Durch diese Art der Regelung werden die Blindleistungseinflüsse beliebig geändert⁴⁰

5.2 Querregler

Im Gegensatz zum Längsregler wird beim Querregler (Engl.: Phase Shifting Transformers Abk. PST, oder auch Quad booster) der Energiezufluss mit einer Phasenverschiebung gesteuert. Der Phasenverschiebungswinkel wird von der Schaltwahl des Zusatztransformators und des Haupttransformators eingestellt⁴¹. Im Stromnetzwerk sieht ein Querregler wie in der Abbildung 75 aus.



Abbildung 75: 600 MVA Querreglertransformator von der Firma Siemens

Quelle: <http://www.energy.siemens.com/hq/en/power-transmission/transformers/phase-shifting-transformers/phase-shifting-transformers.htm#content=References>

⁴⁰ Elektroenergiesysteme, Adolf J. Schwab, Springer Vieweg Verlag, ISBN: 9783662468562

⁴¹ Elektroenergiesysteme, Adolf J. Schwab, Springer Vieweg Verlag, ISBN: 9783662468562

Die Stelltransformatoren lassen sich nicht mit der Software Portunus oder auch MATLAB/Simulink simulieren. Eine Möglichkeit wäre z.B. die Stufen des Stelltransformators einzeln zu betrachten und die Ersatzschaltbildparameter für jede Stufe einzeln zu berechnen. Diese Arbeit würde ca. 40 bis 50 Arbeitsstunden dauern. Aus zeitlichen Gründen konnte diese Überlegung nicht umgesetzt werden.

5.3 Schrägregler

Mit einer Schrägregelung (Engl. Asymmetric Phase Shifting Transformers) werden die Längs- und Querspannung beeinflusst. Zu der Hauptspannung wird eine um 60° bzw. um 120° verschobene Spannung addiert. Die Realisierbarkeit mit einem Zusatztransformator folgt wie beim Querregler durch die Wahl der Transformatorschaltgruppen.⁴²

43

5.4 Möglicher Aufbau eines Querreglers im Labor

In Abbildung 76 ist ein Schaltplan abgebildet, welches im Labor der elektrischen Energietechnik zur Realisierung eines Querreglers dienen könnte. Für die Messung werden folgende Geräte benötigt:

- Drehstromtransformator mit Stufenwicklungen (Stelltransformator)
- Drehstromtransformator
- Drehstromwiderstand
- Leistungsmesser mit Phasenmessfunktion
- Oszilloskop

Mit dem Leistungsmessgerät Hioki 3165 ist es möglich, dass die Phase, die Spannung und der Strom gleichzeitig gemessen werden können.

⁴² Energietechnisches Praktikum II, Versuch 8, Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Uni.-Prof. Dr. -Ing. J. Haubrich

⁴³ Elektroenergiesysteme, Adolf J. Schwab, Springer Vieweg Verlag, ISBN: 9783662468562

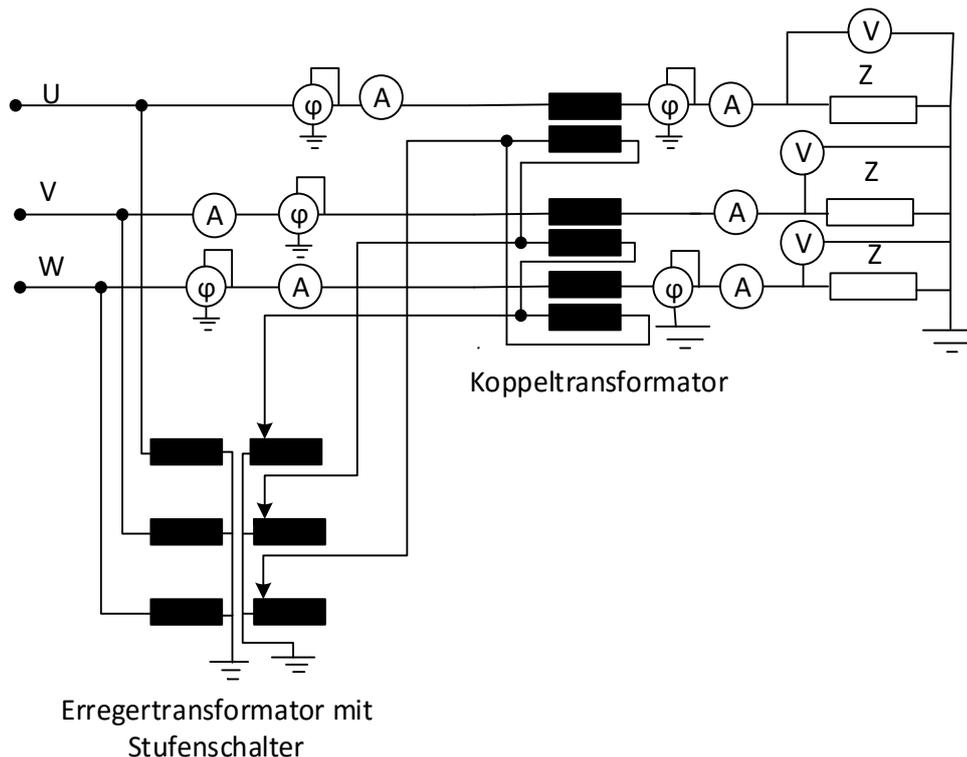


Abbildung 76: Aufbau eines Querreglers mit einem Stelltransformator

Quelle: Elektroenergiesysteme von Adolf J. Schwab

Der Querregeltransformator wird mit einem Koppeltransformator und einem Erregertransformator mit Stufenschalter zusammenschaltet. Die bestimmte Phasenverschiebung wird über die Stufensteller eingestellt. Im Labor für elektrische Energietechnik wird für den Erregertransformator mit Stufenschalter der vorhandene Stelltransformator verwendet. Als Koppeltransformator wird der in dieser Arbeit behandelnde Drehstromtransformator von der Firma Getra GmbH verwendet.

Die Wechselspannung wird über die Anschlüsse U, V, W eingespeist. Über den Stelltransformator wird pro Phase eine Spannung abgegriffen, welche über den Koppeltransformator zu einer phasenverschobenen Spannung führt. Die Sekundärwicklung des Koppeltransformators liegt in Serie mit einem Außenleiter des zu steuernden Drehstromsystems. Die Schaltgruppe des Erregertransformators und Koppeltransformators soll gewählt werden, dass die gewünschte Größe und die Phasenlage erreicht wird. Für die Spannung der einzelnen Phasen gilt auf der Verbraucherseite: ^{44 45}

$$\underline{U}_U' = \underline{U}_U + \underline{\Delta U}$$

⁴⁴ Elektroenergiesysteme, Adolf J. Schwab, Springer Vieweg Verlag, ISBN: 9783662468562

⁴⁵ <https://de.wikipedia.org/wiki/Phasenschiebertransformator>, gelesen am 21.01.2016

$$\underline{U_V'} = \underline{U_V} + \underline{\Delta U}$$

$$\underline{U_W'} = \underline{U_W} + \underline{\Delta U}$$

Der Erregertransformator kann auch am Ausgang angeschaltet werden.

Außerdem soll untersucht werden, dass die Tertiärwicklung des gemessenen Drehstromtransformators für die Querregelung gebraucht werden könnten. Aus zeitlichen Gründen konnte dieser Fall ebenso nicht untersucht werden. Eine genauere Untersuchung des Drehstromtransformators hatte bei dieser Arbeit den Vorrang.

Diesen Schaltaufbau kann man in 2 bis 3 Stunden stellen. Jedoch die Messung kann aufgrund mehrerer Schaltuntersuchungen länger dauern. Außerdem soll ein Zeigerdiagramm vor der Messung gezeichnet werden, damit die Spannungsregelung verdeutlicht wird. Die Arbeit für diese Messung wird mindestens auf eine Woche geschätzt, ebenso die anschließende Auswertung sowie die Bearbeitung der Messung.

6 Zusammenfassung der Arbeit

In dieser Bachelorarbeit wurde der Drehstromtransformator von der Firma Getra GmbH, welcher für das Labor der elektrischen Energietechnik in Sonderform fertiggebaut wurde, untersucht. Folgende Kenndaten sind bekannt: 5 KVA Leistung, Primärspannung 400V Sekundärspannung 400V und der Nennstrom pro Phase beträgt 7,2A. Für diesen Drehstromtransformator wurde ein Ersatzschaltbild erstellt, der Leerlaufversuch und Kurzschlussversuch durchgeführt. Die einzelnen Ersatzschaltbildkomponenten wurden berechnet. Die Kurzschluss und Leerlaufverluste wurden gemessen und der Wirkungsgrad des Drehstromtransformators berechnet.

Außerdem wurde der Drehstromtransformator unter symmetrischer und unsymmetrischer Last getestet. Dabei wurde auch auf die Schaltgruppen geachtet. Bei symmetrischem Belastungsfall liefert der Drehstromtransformator sinusförmige Spannungen und Ströme. Beim unsymmetrischen Belastungsfall spielen die Schaltgruppen eine große Rolle. Die Stern-Sternschaltung lieferte schlechte Ergebnisse für das magnetische Gleichgewicht und führte zu einer Sternpunktverschiebung. Außerdem lieferte der Drehstromtransformator verzerrte Stromverläufe für die Phasen, die bei einphasiger Belastungsversuch nicht belastet wurden.

Auch die Einschaltströme wurden in dieser Arbeit untersucht. Je nach Einschaltwinkel treten ca. das 20-fache der Nennströme pro Phase auf. Um die großen Einschaltströme zu verhindern, wurden ebenso die Einschaltwinkel untersucht.

Die Simulation mit der Software Portunus konnte weniger gut laufen, da das abgebildete Drehstromtransformatormodell in der Bibliothek der Software ideal ist und die Magnetisierungseffekte beim Leerlaufversuch nicht zu erkennen sind. Aus diesem Grund konnte man auch die verzerrten Stromkurven bei einphasiger Belastungssimulation nicht sehen. Die Software Portunus ermöglicht unter anderem auch bei diesem Drehstromtransformatormodell die Zickzackschaltung nicht.

Aus zeitlichen Gründen konnte die Regeltransformatoren nicht untersucht werden.

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Eisenkern, Primär- und Sekundärwicklung des Einphasentransformators	10
Abbildung 2: Aufbau eines Drehstromtransformators	12
Abbildung 3: Drehstromtransformator und seine Primär- und Sekundärklemmen	13
Abbildung 4: die wichtigsten Schaltungen der Dreiphasentransformatoren	16
Abbildung 5: Stern-Zickzack-Schaltung des Dreiphasentransformators und Spannungszeigerdiagramm	18
Abbildung 6: Einschaltstromstoßes a) Spannungs- und Flussverlauf b) Magnetisierungskennlinie, c) erste Spitze des Einschaltstroms	21
Abbildung 7: Schaltwinkelsteller	21
Abbildung 8 : HTML-Oberfläche des dreiphasigen Schaltwinkelstellers	22
Abbildung 9: Die dreiphasige Einstellung des Schaltwinkelstellers	22
Abbildung 10: Spannung U_{UV} (blau) und Stromverläufe i_{UV} (rot), i_{VW} (gelb) und i_{WU} (grün)	23
Abbildung 11: Netzspannung (U_{12} , Kanal 4, rosa) und die Primärspannungen U_{UV} (Kanal 1, gelb), U_{VW} (Kanal 2, grün), und U_{WU} (Kanal 3, blau) beim Einschaltzeitpunkt S1 90°, S2 90° und S3 90° bezogen auf U_{12}	24
Abbildung 12: Die Einschaltströme I_U (Kanal 1, gelb), I_V (Kanal 2, grün), I_W (Kanal 3, blau) bei 0°, 0° und 90° Einstellung des Schaltwinkelstellers	25
Abbildung 13: Die Einschaltströme I_U (Kanal 1, gelb), I_V (Kanal 2, grün), I_W (Kanal 3, blau) und die Spannung U_{12} (Kanal 4, rosa) bei 0°, 0°, 0° Einstellung des Schaltwinkelstellers	26
Abbildung 14: Die Einschaltströme I_U (Kanal 1, gelb), I_V (Kanal 2, grün), I_W (Kanal 3, blau) und die Spannung U_{12} (Kanal 4, rosa) bei 90°, 90°, 180° Einstellung des Schaltwinkelstellers	26
Abbildung 15: Die Einschaltströme I_U (Kanal 1, gelb), I_V (Kanal 2, grün), I_W (Kanal 3, blau) und die Spannung U_{12} (Kanal 4, rosa) bei 210°, 210°, 310° Einstellung des Schaltwinkelstellers	27
Abbildung 16: Einphasentransformator	28
Abbildung 17: Ersatzschaltbild des Transformators ohne Eisenverlustwiderstand	29
Abbildung 18: Das vollständige Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm	31
Abbildung 19: Zeigerdiagramm der Leerlaufeffektivwerte	33
Abbildung 20: Verlauf der Magnetisierungsströme des Dreischenkeltransformators	33
Abbildung 21: Schaltbild für den Leerlaufversuch	34
Abbildung 22: Zeitlicher Verlauf der Leerlaufströme I_U (Kanal 1, gelb), I_V (Kanal 2, grün), I_W (Kanal 3, blau)	39
Abbildung 23: zeitlicher Verlauf der Leerlaufströme I_U (Kanal 1, gelb), I_V (Kanal 2, grün), I_W (Kanal 3, blau) bei Dreieckschaltung	40
Abbildung 24: Kurzschlussersatzschaltbild des Transformators und Zeigerdiagramm	43
Abbildung 25: Schaltbild des Kurzschlussversuches	44
Abbildung 26: Eingabe der berechneten Parameter in Portunus	48
Abbildung 27: Leerlaufsimulation mit Stern-Sternschaltung	48
Abbildung 28: Primärseitige Spannungen U_{1U} (grün), U_{1V} (blau), U_{1W} (gelb) bei Leerlaufsimulation	49
Abbildung 29: Sekundärseitige Leerlaufspannungen U_{2U} (rot), U_{2V} (grün), U_{2W} (blau) bei der Simulation	49
Abbildung 30: Leerlaufströme I_{1U} (rot), I_{1V} (grün), I_{1W} (blau) bei der Simulation	50
Abbildung 31: Kurzschlussimulationsschaltbild	51
Abbildung 32: Kurzschlussspannungen U_{1U} (rot), U_{1V} (blau), U_{1W} (gelb) im Portunus	51
Abbildung 33: Sekundärseitige Kurzschlussströme I_{2UV} (rot), I_{2VW} (grün) in Portunus	51
Abbildung 34: Primärseitige Ströme I_{1U} (gelb), I_{1V} (rosa), I_{1W} (blau) im Kurzschlussversuch in Portunus	52
Abbildung 35: Energieverluste und Leistungsfluss im Drehstromtransformator	53

Abbildung 36: Wirkungsgrad bei verschiedenen Leistungsfaktoren	55
Abbildung 37: symmetrische Belastung mit Neutralleiter bei Sternschaltung	58
Abbildung 38: Zeigerdiagramm für Sternschaltung	58
Abbildung 39: primärseitige Stromverläufe I_{1U} (Kanal 1, gelb), I_{1V} (Kanal 2, grün), I_{1W} (Kanal 3, blau) bei Stern-Stern-Schaltung und die Effektivwerte der Ströme	59
Abbildung 40: Spannungen U_{UV} (Kanal 1, gelb), U_{VW} (Kanal 2, grün), und U_{WU} (Kanal 3, blau) auf der Primärseite bei symmetrischer Belastung	60
Abbildung 41: Aufbau der einphasigen Belastung bei Stern-Stern-Schaltung	62
Abbildung 42: Sekundärspannungen U_{2u} (Kanal 1, gelb), U_{2v} (Kanal 2, grün), U_{2w} (Kanal 3, blau) bei Stern-Stern-Schaltung	63
Abbildung 43: Phasenverschiebung der Sekundärspannungen U_{2u} (Kanal 1, gelb), U_{2v} (Kanal 2, grün), U_{2w} (Kanal 3, blau)	64
Abbildung 44: Die Eingangsströme I_{1U} (gelb), I_{1V} (grün), I_{1W} (blau) und der Belastungsstrom I_{2u} (rosa) der Stern-Stern-Schaltung	65
Abbildung 45: Primärspannungen U_{1U} (Kanal 1, gelb), U_{1V} (Kanal 2, grün), U_{1W} (Kanal 3, blau) der Stern-Stern-Schaltung	66
Abbildung 46: Phasenverschiebung der Primärspannungen bei Stern-Stern-Schaltung	66
Abbildung 47: Simulation der Stern-Stern-Schaltung im Portunus	70
Abbildung 48: Primärseitige Spannungen U_{1U} (rot), U_{1V} (grün), U_{1W} (blau) der Stern-Stern-Schaltung in Portunus	70
Abbildung 49: sekundärseitige Spannungen U_{1U} (rot), U_{1V} (grün), U_{1W} (blau) der Stern-Stern-Schaltung in Portunus	71
Abbildung 50: Primärströme I_{1U} (blau), I_{1V} (rot), I_{1W} (schwarz) und der Belastungsstrom I_{2u} (grün) der Stern-Stern-Schaltung in Portunus	71
Abbildung 51: Dreieck-Stern-Schaltung des Drehstromtransformators	72
Abbildung 52: Der Verlauf der Primärspannungen U_{1U} (Kanal 1, gelb), U_{1V} (Kanal 2, grün) und U_{1W} (Kanal 3, blau) bei Dreieck-Sternschaltung	73
Abbildung 53: Sekundärspannungen U_{2u} (Kanal 1, gelb), U_{2v} (Kanal 2, grün) und U_{2w} (Kanal 3, blau) der Dreieck-Stern-Schaltung	73
Abbildung 54: Phasenverschiebung der Sekundärspannungen der Dreieck-Stern-Schaltung bezogen auf U_{2u}	74
Abbildung 55: Eingangsströme I_{1U} (Kanal 1, gelb), I_{1V} (Kanal 2, grün), $10 \cdot I_{1W}$ (Kanal 3, blau) und der Belastungsstrom (Kanal 4, rosa) der Dreieck-Stern-Schaltung	74
Abbildung 56: Ströme zwischen $U2-V1$ (Kanal 1, gelb), $V2-W1$ (Kanal 2, grün), $W2-U1$ (Kanal 3, blau) und der Belastungsstrom (Kanal 4, rosa) der Dreieck-Stern-Schaltung	75
Abbildung 57: Simulationsschaltung für Dreieck-Stern-Schaltung in Portunus	76
Abbildung 58: Primärspannungen der Dreieck-Stern-Schaltung in Portunus	76
Abbildung 59: Sekundärspannungen der Dreieck-Stern-Schaltung in Portunus	77
Abbildung 60: Primärströme I_{1U} (schwarz), I_{1V} (rot), I_{1W} (blau) und der Belastungsstrom I_{2u} (grün) der Dreieck-Stern-Schaltung in Portunus	77
Abbildung 61: Stern-Zickzack-Schaltung des Drehstromtransformators	78
Abbildung 62: Eingangsströme I_{1U} (Kanal 1, gelb), I_{1V} (Kanal 2, grün), $5 \cdot I_{1W}$ (Kanal 3, blau) und der Belastungsstrom (Kanal 4, rosa) der Stern-Zickzack-Schaltung	79
Abbildung 63: Sekundärspannungen U_{2u} (Kanal 1, gelb), U_{2v} (Kanal 2, grün) und U_{2w} (Kanal 3, blau) der Stern-Zickzack-Schaltung bei einphasiger Last	80
Abbildung 64: Primärspannungen U_{1u} (Kanal 1, gelb), U_{1v} (Kanal 2, grün), U_{1w} (Kanal 3, blau) der Stern-Zickzack-Schaltung bei einphasiger Last	81
Abbildung 65: Stern-Ausgleich-Schaltung	82

Abbildung 66: Primärspannungen U_{1U} (Kanal 1, gelb), U_{1V} (Kanal 2, grün), U_{1W} (Kanal 3, blau) der Stern-Ausgleichschaltung bei einphasiger Last	83
Abbildung 67: Sekundärspannungen U_{2u} (Kanal 1, gelb), U_{2v} (Kanal 2, grün), U_{2w} (Kanal 3, blau) bei Stern-Ausgleich-Schaltung	83
Abbildung 68: Effektivwerte der Primärströme I_{1U} (gelb), I_{1V} (grün), I_{1W} (blau) und der Belastungsstrom I_{2u} (rosa) der Stern-Ausgleich-Schaltung bei einphasiger Last	84
Abbildung 69: Dreipuls-Mittelpunktschaltung	85
Abbildung 70: Eingangsströme I_{1U} (kanal 1, gelb), I_{1V} (Kanal 2, grün), I_{1W} (Kanal 3, blau) und der Belastungsstrom I_{2u} (Kanal 4, rosa)	87
Abbildung 71: Primärspannungen U_{1U} (Kanal 1, gelb), U_{1V} (Kanal 2, grün), U_{1W} (Kanal 3, blau) und ideelle Gleichspannung auf der Sekundärseite	88
Abbildung 72: Stromführungsdauer pro Ventil	88
Abbildung 73: Diodenströme I_{D1} (Kanal 1, gelb), I_{D2} (Kanal 2, grün), I_{D3} (Kanal 3, blau) und der Laststrom I_L (Kanal 4, rosa) der M3-Schaltung	89
Abbildung 74: a) Längsregler, b) Querregler, c) Schrägeregler	91
Abbildung 75: 600 MVA Querreglertransformator von der Firma Siemens	92
Abbildung 76: Aufbau eines Querreglers mit einem Stelltransformator	94

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wickelwiderstandsangaben bei Raumtemperatur vom Hersteller	14
Tabelle 2: gemessene Wicklungswiderstände bei Raumtemperatur.....	14
Tabelle 3: Aus der Leerlaufmessung ermittelte Werte	35
Tabelle 4: Vergleich der berechneten und gemessenen Werte mit der Bachelorarbeit von Herrn Gül38	
Tabelle 5: Messergebnisse des Kurzschlussversuches	44
Tabelle 6: Vergleich der berechneten Werte mit Bachelorarbeit von Herrn Gül	47
Tabelle 7 :Wirkungsgrad des Drehstromtransformators	55
Tabelle 8: die ermittelte Messwerte der M3-Schaltung	87

9 Literaturverzeichnis

- [1] Elektrische Maschinen und Umformer Teil 1 Aufbau, Wirkungsweise und Betriebsverhalten, F. Moeller/ P.Vaske (Bd. 12). B.G. Teubner Stuttgart, ISBN: 3519164019
- [2] Transformator Skript zur Lehrveranstaltung AT1, Ingo Schüring (08. August 2012).. Hochschule Beuth.
- [3] Planung von Elektroanlagen, Ismail Kasikci, Springer Vieweg, ISBN: 9783642409707.
- [4] Elektroenergiesysteme. Adolf J. Schwab, Springer Vieweg, ISBN: 9783662468562.
- [5]: Elektrische Maschinen, Rolf Fischer , Hanser Verlag, ISBN: 3446226931
- [6]: Bachelorthesis „Aufbau eines Schaltwinkelstellers für Einphasen- und Drehstromtransformatoren“, Rüdiger-Joachim Bade, 2012, HAW Hamburg
- [7]: Elektrische Maschinen mit Einführung in die Leistungselektronik von Hans-Ulrich Giersch, Hans Harthus und Norbert Vogelsang, 4. Auflage Teubner Stuttgart Verlag, ISBN: 9783322927071
- [8]: Elektrische Maschinen von Theodor Bödefeld und Heinrich Sequenz, 2. Auflage, ISBN: 9783709197288
- [9]: Die Regulierung elektrischer Netze von Ulrich Steger, Ulrich Büdenbender, Eberhard Fess, Dieter Nelles, Springer Verlag, ISBN: 9783540684176
- [10]: Energietechnisches Praktikum II, Versuch 8, Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Uni.-Prof- Dr. – Ing. J. Haubrich
- [11]: http://ront.info/systemwirkung-ront/probleme_loesungen/ront-vs-spannungsregler/ gelesen am 10.01.2016
- [12]: Electronic Thesis and Dissertation “Modelling and Protection of Phase Shifting Transformers” von Umar Khan The University of Western Ontario , 2013
- [13]: Transformer Engineering, S.V. Kulkarni/ S.A. Khaparde ISBN : 0824756533
- [14]: <http://www.antriebstechnik.fh-stralsund.de/1024x768/Dokumentenframe/Kompendium/Fachvorlesungen/Leistungselektronik/le1.pdf> gelesen am 15.12.15
- [15]: https://www.eal.ei.tum.de/fileadmin/tueieal/www/courses/LGUS/tutorial/02_-_Netzgefuehrte_Stromrichter.pdf : Elektrische Antriebssysteme und Leistungselektronikskript von Prof. Dr.-Ing. Ralph Kennel, gelesen am 15.12.15
- [16] <https://de.wikipedia.org/wiki/Phasenschiebertransformator>, gelesen am 21.01.2016

Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit versichere ich, Aykut Alkan, dass ich die vorliegende Arbeit gemäß der Prüfungsordnung nach §16 (5) ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen habe ich unter Angaben der Quellen kenntlich gemacht.

Ort, Datum

Unterschrift