

Bachelorthesis

Asim Gül

Untersuchungen zum Drehstromtransformator

Asim Gül

Drehstromtransformator

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. Henry Reetmeyer
Abgegeben am 02.06.2015

Asim Gül

Thema der Bachelorthesis

Untersuchungen zum Drehstromtransformator

Stichworte

Drehstromtransformatoren, unsymmetrische Belastung, Schaltgruppen, Ersatzschaltbild

Kurzzusammenfassung

Hinsichtlich des Praktikumsversuchs für Lehrveranstaltung in Energietechnik beschreibt diese Arbeit den theoretischen Hintergrund von Drehstromtransformatoren, Leerlauf- und Kurzschlussversuchen, Schaltgruppen der Drehstromtransformatoren, unsymmetrischen Belastungen, sowie Einschaltverhalten. Mit gerechneten Ersatzparametern bezüglich des Ersatzschaltbildes des Einphasentransformators werden Simulationen für Kurzschluss, Leerlauf, unsymmetrische Belastung und M3-Brücke in PORTUNUS ausgeführt.

Asim Gül

Title of the paper

Analysis of Three Phase Transformers

Keywords

Three phase transformers, unbalanced loading, connection groups, equivalent circuit,

Abstract

This study describes theoretical background of three phase transformers, open circuit and short circuit experiments, connection groups of transformers, balanced and unbalanced loading conditions. Equivalent circuit parameters were calculated by using the open circuit and short circuit experiments. Simulation of short circuit, open circuit, unbalanced loading and 3 phase rectifier connection in PORTUNUS-Software were done by using transformer parameters which were obtained in experiment. Then, experimental results for different connection groups, unbalanced loading condition and rectifier were obtained.

Danksagung

Für die freundliche Unterstützung bedanke ich mich zunächst bei meinem betreuenden Professor Dr.- Ing. Gustav Vaupel und Herrn Dipl. Ing. Frank Korpel für die notwendigen Hilfestellungen.

Ferner bedanke ich mich bei meinem Zweitgutachter Prof. Dr.-Ing. Henry Reetmeyer.

Ein besonderes Dankeschön geht an meine Familie, meine Frau, meine Freunde und natürlich auch an Havva und Yusuf Cengiz, die mich moralisch unterstützt und motiviert haben und auf die ich mich immer verlassen kann.

Diese Abschlussarbeit widme ich meinen Eltern, die mich so gut es ging, unterstützen...

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	4
Inhaltsverzeichnis	5
Bilderverzeichnis	7
Tabellenverzeichnis	9
1. Einleitung	10
2. Allgemeine Gesetze	11
2.1. Durchflutungsgesetz (Ampère'sches Gesetz)	11
2.2. Elektromagnetische Induktion (Faraday'sches Gesetz)	12
2.3. Anwendung der Durchflutung	14
3. Aufgabenstellung	16
4. Transformatoren	16
4.1. Einphasentransformatoren	16
4.2. Dreiphasentransformatoren (Drehstromtransformatoren)	17
4.3. Aufbau und Bauformen	17
4.4. Schaltgruppen	20
4.5. Betriebsverhalten	23
4.5.1. Einschaltstrom	23
4.5.2. Wirkungsgrad	24
4.5.3. Streu- und Hauptfeld	26
4.5.4. Vollständiges ESB	28
4.5.5. Bestimmung der Ersatzparameter des einphasigen ESB	30
4.5.6. Leerlauf	30
4.5.7. Magnetisierungsstrom	33
4.5.8. Kurzschluss	35
4.5.9. Stoßkurzschlussstrom	39
4.5.10. Dauerkurzschluss	40
4.5.11. Kurzschlussspannung	41
4.6. Unsymmetrische Belastung	42
4.6.1. Einphasige Belastung in Yy- Schaltung	43
4.6.2. Zweiphasige Belastung in Yy-Schaltung	45
4.6.3. Einphasige Belastung in Dy-Schaltung	46
4.6.4. Einsträngige Belastung in Yz-Schaltung	46
4.6.5. Yy-Schaltung mit Ausgleichswicklung	47
4.6.6. Sternpunktverschiebung	48
4.6.7. Symmetrische Komponenten	49
5. Praktische Versuchsdurchführung	52
5.1. Aufgabenstellung zu Versuchsdurchführung	53
5.2. Simulationsergebnisse	84
6. Zusammenfassung / Fazit	88
7. Literaturverzeichnis	89

Ehrenwörtliche Erklärung90

Bilderverzeichnis

Bild 2-1: Darstellung des Ampère'schen Gesetzes	11
Bild 2-2: Darstellung des Faraday'schen Gesetzes	13
Bild 2-3: Magnetische Flüsse im Transformator am Leerlauf. Φ_h : Hauptfluss, Φ_σ : Streufluss., w : Wicklungen, Z : Belastung	15
Bild 4-1: Aufbau Drehstrom-Dreischenkeltransformator	17
Bild 4-2: a) Dreischenkelkern; b) Fünfschenkelkern	17
Bild 4-3: Drehstromtransformator zur Testdurchführung, Offenes Gehäuse	19
Bild 4-4: Drehstromtransformator, Offenes Gehäuse mit Anzapfungen	19
Bild 4-5: Bestimmung der Kennzahl bei Schaltgruppe Dy5	20
Bild 4-6: Schaltzeichen von Drehstromtransformatoren, li. Anschlusszeichen und Wicklungsdarstellung, re. Schaltkurzeichen	21
Bild 4-7: Schaltgruppen der Drehstromtransformatoren	22
Bild 4-8: Bestimmung des Einschaltstromstoßes $I_{\mu s}$ a) Spannungs- und Flussverlauf bei $R_1 = 0$, b) Magnetisierungskennlinie, c) Erste Spitze des Einschaltstromes	24
Bild 4-9: Leistung-Wirkungsgrad-Verhältnis	26
Bild 4-10: Aufbau und Felder eines Transformators	26
Bild 4-11: Idealer Transformator mit vorgeschalteten Ohmschen- und Induktiven Widerständen	27
Bild 4-12: Vollständiges Ersatzschaltbild einer Phase	29
Bild 4-13: Ersatzschaltbild für Leerlauf	30
Bild 4-14: Vereinfachtes Ersatzschaltbild für Leerlauf	30
Bild 4-15: Zeigerdiagramme für Leerlauf, I- vollständig, II-vereinfacht, $\varphi > 70^\circ$	32
Bild 4-16: Bestimmung der Kurvenform des Magnetisierungsstromes i_μ a) zeitlich sinusförmiger Flussverlauf b) Magnetisierungskennlinie c) zeitlicher Verlauf des Magnetisierungsstromes i_μ	34
Bild 4-17: Magnetisierungsstrom bei sinusförmiger Erregung	34
Bild 4-18: Ersatzschaltbild für Kurzschluss	35
Bild 4-19: Vereinfachtes Ersatzschaltbild für Kurzschluss	36
Bild 4-20: Zeigerdiagramm der Ohmschen Belastung	37
Bild 4-21: Vereinfachtes Kappsches Dreieck bei Ohmsch-Induktiver Belastung	37
Bild 4-22: Zeigerdiagramm Ohmsch-Induktive Belastung	38
Bild 4-23: Ortskurve der Sekundärspannung mit Kappschem Dreieck	38
Bild 4-24: Verlauf des Stoßkurzschlussstromes i_s bei Kurzschluss im Spannungsnulldurchgang	40
Bild 4-25: Vektordarstellung Dauerkurzschluss	40
Bild 4-26: Ausgleich des Belastungsstroms	42
Bild 4-27: Schaltbild Einphasige Belastung	43
Bild 4-28: Der von der einphasigen Belastung verursachte Zusatzfluss eines Dreischenkelkerns	43
Bild 4-29: Zeigerdiagramm des belasteten Wicklungsstrangs bei einphasiger Belastung Yy-Schaltung	45
Bild 4-30: Schaltbild Zweiphasige Belastung	45
Bild 4-31: Schaltbild Einphasige Belastung in Dy-Schaltung	46
Bild 4-32: Schaltbild Einsträngige Belastung in Yz-Schaltung	46
Bild 4-33: Spannungsvektoren in Yz5-Schaltung	47
Bild 4-34: Schaltbild Einphasige Belastung in Yy-Schaltung mit Ausgleichwicklung	48
Bild 4-35: Sternpunktverschiebung bei einphasiger Belastung in Yy-Schaltung	48
Bild 4-36: Darstellung Symmetrische Komponenten, a) Mitsystem, b) Gegensystem, c) Nullsystem	49
Bild 5-1: Drehstromtransformator Vorderansicht	53
Bild 5-2: Schaltbild Leerlaufversuch	54
Bild 5-3: Spannungsübersetzungsverhältnis	55
Bild 5-4: Leerlaufströme bei $U_1 = 0,25 \cdot U_N$	56
Bild 5-5: Leerlaufströme bei $U_1 = 0,5 \cdot U_N$	56

Bild 5-6: Leerlaufströme bei $U_1 = U_N$	57
Bild 5-7: Kurve $I_0 = f(U_0)$	58
Bild 5-8: Schaltbild Kurzschlussversuch	59
Bild 5-9: Stromübersetzungsverhältnis, mit $I_1 \triangleq 11,7 \text{ V} \quad I_3 = 6,755 \text{ A}$	60
Bild 5-10: Kurzschlussspannung und –ströme	61
Bild 5-11: Einphasige Belastung bei Yy , $I_2 = I_L = 2,703 \text{ A}$, $U_L = 238,85 \text{ V}$, $R_L = 90 \Omega$	63
Bild 5-12: Eingangsspannung, sowie Belastungsspannung und –Strom	64
Bild 5-13: Netzströme im Vergleich zu Laststrom $I_L = 2670 \text{ A}$	65
Bild 5-14: Zweiphasige Belastung bei Yy , Strom- und Spannungskurven bei $R_L = 90 \Omega$	66
Bild 5-15: Netzströme im Vergleich zu Laststrom bei zweiphasiger Belastung	67
Bild 5-16: Einphasige Belastung bei Dy , Strom- und Spannungskurven bei $R_L = 90 \Omega$	68
Bild 5-17: Netzströme im Vergleich zu Belastungsstrom bei Belastung in Dy	68
Bild 5-18: Primärseitige Ströme bzw. Netzströme	69
Bild 5-19: Netzströme und Belastungsspannung und –strom	69
Bild 5-20: Einphasige Belastung bei Yz , Strom- und Spannungskurven, $R_L = 90 \Omega$	70
Bild 5-21: Spannungsverhältnisse bei Belastung in Yz	70
Bild 5-22: Kurven von I_V , I_W , $I_2 = I_L$, $U_{2V} = U_L$ bei Belastung in Yz	71
Bild 5-23: Netzströme verglichen mit Belastungsstrom in Yz	71
Bild 5-24: Strom- und Spannungskurven mit Phasenverschiebung bei Ausgleichswicklung	72
Bild 5-25: Belastungsstrom und -spannung bei Ausgleichwicklung	73
Bild 5-26: Netzströme verglichen mit Laststrom $I_L = I_2$	73
Bild 5-27: Netzströme verglichen mit Dreieckstrom $I_3 = I_{UW}$	74
Bild 5-28: Netzströme verglichen mit Dreieckstrom I_3 mit Gleichem Maßstab	74
Bild 5-29: Dreieckströme der Ausgleichwicklung	75
Bild 5-30: Schaltplan Dy -Transformator mit M3-Brücke	76
Bild 5-31: Netz- und Belastungsspannungen bei M3-Brücke	76
Bild 5-32: Dioden- und Belastungsströme bei M3-Brücke	77
Bild 5-33: Netzseitige Ströme und Spannung bei M3-Brücke	77
Bild 5-34: Netzseitige Ströme M3-Brücke	78
Bild 5-35: Netzseitige Ströme M3-Brücke	78
Bild 5-36: Netzseitige Ströme bei $U_1 = 0,5 \cdot U_N$ M3-Brücke	79
Bild 5-37: Auswahl zur Phasenzahl des Schaltwinkelstellers	80
Bild 5-38: Dreiphasiger Betrieb des Schaltwinkelstellers	80
Bild 5-39: Schaltplan Einschaltverhalten	81
Bild 5-40: Einschaltströme mit Einschaltwinkel 0° – 90°	81
Bild 5-41: Schaltströme mit Schaltwinkel 90° – 90° – 180°	81
Bild 5-42: Schaltströme mit Schaltwinkel von je 180°	82
Bild 5-43: Schaltströme mit Schaltwinkel von je 0°	82
Bild 5-44: Schaltströme in Yy_0 mit Winkel von je 60°	83
Bild 5-45: Schaltströme in Yy_0 mit Winkel von je 120°	83
Bild 5-46: Kurzschluss, Eingangsstrom I_1 , $eff = 2,55 \text{ A}$	84
Bild 5-47: Bild 5.2-4: Leerlaufströme, I_1 , $eff = 280 \text{ mA}$	85
Bild 5-48: Einphasige Belastung in Yy , $R_L = 90 \Omega$, U_L , $eff = 230 \text{ V}$, I_L , $eff = 2,55 \text{ A}$	85
Bild 5-49: Einphasige Belastung in Yy , $R_L = 90 \Omega$, Netzstrom I_1 , max , $eff = 4,2 \text{ A}$	86
Bild 5-50: M3-Schaltung in Yy , $R_L = 90 \Omega$, Netzstrom I_1 , max , $eff = 4,80 \text{ A}$	86
Bild 5-51: Gleichgerichtete Spannungen U_L , $eff = 270 \text{ V}$	87
Bild 5-52: Gleichgerichtete/r Spannung, Strom I_L , $eff \cong 3,02 \text{ A}$. U_L , $eff \cong 270 \text{ A}$	87

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1: Einzelne Effektivwerte bei $B=1,6 T$	33
Tabelle 5-1: Widerstandsangaben vom Hersteller	52
Tabelle 5-2: Widerstandmessung	54
Tabelle 5-3: Wirkungsgrad-Vergleich bei Belastung.....	84

1. Einleitung

Elektrische Maschinen, Transformatoren, Spulen sowie Elektromagnete basieren auf zwei Grundgesetze, Faraday'sches Induktionsgesetz und Ampère'sche Gesetz.

Motoren und Generatoren haben dynamische Systeme, wohingegen Transformatoren statische Systeme haben.

Transformatoren sind eine direkte Umsetzung des Faraday'schen Induktionsgesetzes, welches die Elektromagnetische Kraft beschreibt und die Berechnungen bei elektrische Maschinen, Induktoren und Generatoren definiert. Alle elektrischen Maschinen und Transformatoren und Gleichrichter sind Energieumwandlungssysteme. Ein Generator wandelt die mechanische Energie in elektrische Energie und ein Elektromotor hingegen die elektrische Energie in mechanische Energie um. Der Transformator wandelt die elektrische Energie mit Wechselspannung und einer Frequenz in unterschiedliche Wechselspannung mit gleicher Frequenz. Ein Gleichrichter dagegen richtet die Wechselspannung in Gleichspannung. Es ist also möglich, mit Transformatoren die elektrische Energie mit Wechselspannung in Wechselspannungssystem umzuändern, wobei die Frequenz gleich bleibt.

2. Allgemeine Gesetze

2.1. Durchflutungsgesetz (Ampère'sches Gesetz)

Allgemein lässt sich das Ampère'sche Gesetz durch das Integral um das magnetische Feld, das die Summe der im magnetischen Feld fließenden Ströme ist, beschreiben.

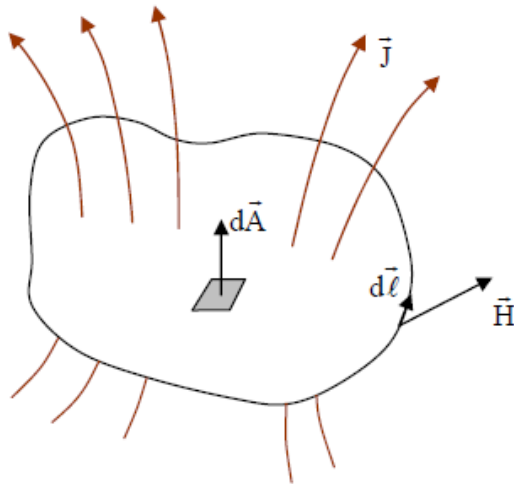


Bild 2-1: Darstellung des Ampère'schen Gesetzes

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum H \cdot l = N \cdot I$$

Das Ampère'sche Gesetz bezieht sich auf den Zusammenhang zwischen der Durchflutung Θ und die daraus resultierende magnetische Feldstärke H .

$$\int H \cdot dl = \Theta$$

$$\Theta = \sum I = N \cdot I$$

$$\Theta = \oint \vec{J} \cdot d\vec{A} = \int J \cdot \cos \alpha \cdot dA$$

Das Produkt $N \cdot I$ ist die eigentliche Größe des magnetischen Feldes und diese ergibt die Durchflutung, die auch *Gesamtdurchflutung*, bzw. *Magnetfeld* genannt wird. Die Durchflutung einer Wicklung wird berechnet, indem praktisch der Strom mit der Wicklungszahl multipliziert wird. Das Flächenintegral der Stromdichte ist der allgemeine Ausdruck der Durchflutung. Die Stromdichte J und der Flächenanteil dA sind vektorielle Größen. Das Skalar-Produkt von J und A ergibt Θ in Skalarform. Falls die Stromdichte J konstant und senkrecht zu der Fläche A ist, dann vereinfacht sich die Formel. Wird der Schnitt eines Leiters durch die Bezeichnung A dargestellt, so gilt dieselbe Formel für den Strom I .

$$\Theta = J \cdot A$$

$$I = J \cdot A$$

Im geschlossenen Kreis, in dem das Integral des magnetischen Feldes berechnet wird, wird der Strom I in konstante Teilströme, wie I_1, I_2, I_3 , usw., aufgeteilt. Die Summe der Skalar-Produkte $H_1 \cdot I_1, H_2 \cdot I_2, H_3 \cdot I_3 \dots$ dieser Aufteilung ergibt das gesuchte Integral.

$$\sum_{i=1}^{i=n} H_i \cdot I_i = H_1 \cdot I_1 + H_2 \cdot I_2 + H_3 \cdot I_3 + \dots = \Theta$$

Die magnetische Feldstärke H der jeweiligen Aufteilung wird hier aus der Magnetisierungskurve des magnetischen Materials entnommen. Ist die magnetische Feldstärke auf der gewählte geschlossene Integralkurve konstant, so erhält man die einfachste Form des Ampère'schen Gesetzes.

$$H \cdot I = \Theta = N \cdot I$$

Falls kein Strom auf der geschlossenen Integralkurve fließt oder die numerische Summe der fließenden Ströme gleich Null ist, ist die Durchflutung gleich Null.

$$\int H \cdot dI = \Theta = 0$$

Die Richtung des magnetischen Feldes ist nach den magnetischen Polen der Erde frei gewählt worden und lässt sich mit der sogenannten „Rechte Hand Regel“ praktisch feststellen.

2.2. Elektromagnetische Induktion (Faraday'sches Gesetz)

Das zeitveränderliche magnetische Feld erzeugt ein elektrisches Potenzial in der entgegengesetzten Richtung. Das Faraday'sche Gesetz definiert im Allgemeinen die Quellenspannung, welche durch der Änderung des magnetischen Flusses erzeugt wird.

$$u = -\frac{d\Psi}{dt} = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt}$$

$$\Psi = \sum \Phi = N \cdot \Phi$$

$$\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

$$d\Phi = \vec{B} \cdot d\vec{J} = B \cdot \cos \alpha \cdot dA$$

Der Strom, der von der induzierten Spannung verursacht wird, liegt stets gegen die Flussänderung. Es ist hier zu beachten, dass der Strom nicht gegen den Fluss, sondern gegen die Flussänderung liegt

Das Flächenintegral der Induktion ist allgemeiner Ausdruck des magnetischen Flusses. Auch hier gilt, dass die Induktion B und der Flächenanteil dA vektorielle Größen sind. Das Skalar-Produkt von Induktion und Fläche ergibt den Fluss in Skalar-Form. Der Flächenvektor ist stets senkrecht zur Flächenoberfläche. Falls die Flussdichte B konstant ist und ein Winkel von α mit der Flächensenkrechte bildet, dann verkürzt sich die Formel. Ist die Flussdichte B senkrecht zu der Flächenebene, ist der Fluss gleich der Multiplikation von der Induktion und der Fläche.

$$\Phi = B \cdot A \cdot \cos \alpha$$

$$\Phi = B \cdot A, \text{ mit } \alpha = 0$$

Der magnetische Fluss in einem Schnitt oder der elektrische Strom hängt von der vektoriellen Lage dieses Schnitts ab.

$$q = \vec{v} \cdot \vec{A}$$

$$I = \vec{j} \cdot \vec{A}$$

$$\Phi = \vec{B} \cdot A$$

Diese drei Flächen haben immer geschlossene Flächenlinien, d.h. diese Feldlinien haben keinen Anfang und kein Ende. Die magnetische Flussdichte B ergibt sich aus der Multiplikation von der magnetischen Leitfähigkeit μ , auch *Permeabilität*, bzw. *Magnetismus* genannt, und der magnetischen Feldstärke H .

Magnetisches Feld hat zwei wichtige Auswirkungen:

- Die Kraft auf den Strom $F = \frac{B}{I}$ und
- die magnetische Induktion

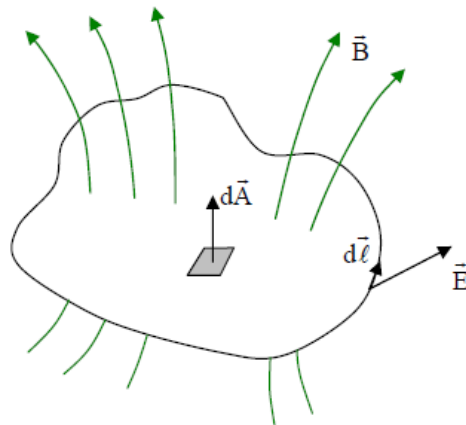


Bild 2-2: Darstellung des Faraday'schen Gesetzes

Die Ursache dieser Auswirkungen ist nicht die Feldstärke H , sondern die Flussdichte B . Die Leitfähigkeit μ (*Permeabilität, Magnetismus*) ist eine Skalar-Größe.

$$B = \mu \cdot H$$

$$\mu = \frac{B}{H}$$

Die magnetische Feldkonstante μ_0 definiert das Verhältnis von der magnetischen Flussdichte B zu der magnetischen Feldstärke H . Die Permeabilitätszahl μ_r , auch relative Permeabilität genannt, ist eine dimensionslose Größe und stellt das Verhältnis von der magnetischen Leitfähigkeit einer Materie zu der magnetischen Feldkonstante dar.

$$\left(\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2} = 12,5664 \cdot 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2}, \quad \text{mit N: Newton,} \quad \text{A: Ampere} \right)$$

2.3. Anwendung der Durchflutung

Um überhaupt funktionieren zu können, brauchen Elektrische Maschinen und Transformatoren einen bestimmten magnetischen Fluss Φ_h . Dass dieser magnetische Fluss von der Durchflutung $\Theta = N \cdot I$ verursacht wird, ist oben bereits erwähnt. Da der magnetische Kreis des Transformators sehr einfach ist, ist die Anwendung dieses Gesetzes auf Transformatoren ist relativ unkompliziert. In den konstanten Flächen bleibt die Induktion entlang des magnetischen Kreises unverändert. Der Luftspalt an den Verbindungspunkten des Eisenblechs kann vernachlässigt werden. Im Folgenden wird die Formel für den Erregerstrom am magnetischen Kreis mit der konstanten Fläche A und der Länge l eines Transformators angegeben: (s. Bild 2-2)

$$\sum H_i \cdot l_i = \Theta$$

$$H \cdot l = \frac{B}{\mu} \cdot l = \frac{\Phi_h \cdot l}{\mu \cdot A} = N \cdot I_h$$

$$I_h = \frac{\Phi_M \cdot l}{\sqrt{2} \cdot N \cdot \mu \cdot A}$$

Der Erreger- bzw. Magnetisierungsstrom ist proportional zu der Länge des magnetischen Kreises und ist umgekehrt proportional zu der Fläche.

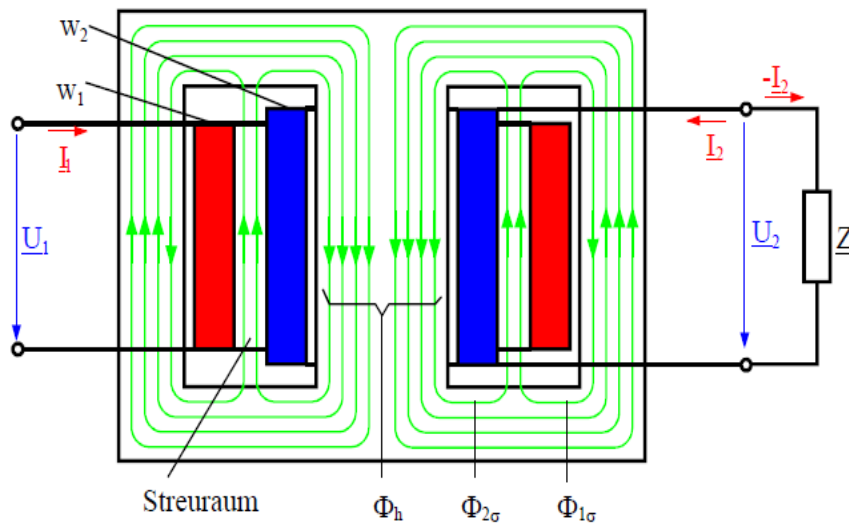


Bild 2-3: Magnetische Flüsse im Transformator am Leerlauf. Φ_h : Hauptfluss, Φ_σ : Streufluss., w : Wicklungen, Z : Belastung

Die Leitfähigkeit $\mu = B/H$ kann mit der bekannten Magnetisierungskurve des verwendeten Eisenblechs berechnet werden. Die Magnetisierungskurve zeigt die Funktion $B = f(H)$ für ein bestimmtes Material an und lässt sich stets mit Gleichstrom gemessen. Sie gilt auch für die Maximalwerte bei Wechselstrom. Um das genauere Ablesen zu ermöglichen, werden die Werte der magnetischen Feldstärke in einigen Katalogen logarithmisch angegeben. Da die magnetische Feldkonstante μ_0 konstant ist, ist die Magnetisierungskurve der Luft bzw. des Vakuums eine Gerade, die durch den Nullpunkt verläuft. Das Durchflutungsgesetz wird in der Praxis folgendermaßen angewendet:

- Ein Magnetischer Kreis wird aufgeteilt, in dem die die Flussdichte B und die magnetische Feldstärke H annähernd konstant sind.
- Die Flussdichte B wird mit bestimmtem Fluss auf der jeweiligen Abschnitten berechnet:

$$B = \frac{\Phi}{A}$$

Die für jede Induktion B erforderliche magnetische Feldstärke H wird aus der Magnetisierungskurve des Eisenblechs genommen und für die Luft wird mit der Grundgleichung $H = B/\mu_0$ berechnet.

- Die magnetische Spannung auf den jeweiligen Teilschnitten mit konstanter Flussdichte wird berechnet und sämtliche magnetische Spannungen auf der Gesamtfläche werden addiert, womit der magnetische Durchfluss berechnet ist.

$$\sum H_i \cdot I_i = H_1 \cdot I_1 + H_2 \cdot I_2 + H_3 \cdot I_3 + \dots = U_1 + U_2 + U_3 + \dots = \Theta$$

Die magnetische Spannung U ist eine skalare Größe, die das Skalar-Produkt von den vektoriellen Größen, magnetische Feldstärke H und der Strom I , erhalten wird. Es ist auch möglich beide Größen H und I auch arithmetisch zu multiplizieren, da sie praktisch vektoriell in gleicher Richtung sind.

3. Aufgabenstellung

Im Rahmen der Bachelorarbeit werden folgende Punkte hinsichtlich der Labordurchführungen parallel zu der Lehrveranstaltung im Fachbereich Energietechnik untersucht:

- Bestimmung der Ersatzparameter der einphasigen Ersatzschaltbilder
- Unterschiedliche Schaltgruppen
- Einschaltverhalten in Abhängigkeit von Phasenwinkel
- Wirkungsgrad
- Unsymmetrische Belastung abhängig von Schaltgruppen
- Theorie der symmetrischen Komponenten

4. Transformatoren

Transformatoren, auch Umspanner genannt, sind eine Art von elektrischen Maschinen, welche die elektrische Energie mit der Spannung U_1 auf der Primärseite in die Spannung U_2 auf der Sekundärseite umwandelt. Dabei ändert sich nicht die Frequenz f . Diese Energieübertragung erfolgt über ein magnetisches Feld. Die Kerngröße der Transformatoren ist der magnetische Fluss und die Analyse eines Transformators basiert auch im Allgemeinen auf dieser Größe.

4.1. Einphasentransformatoren

Einphasentransformatoren haben keine Schaltgruppen. Aus dem Grund, dass die Drehstromtransformatoren auf Einphasentransformatoren basieren, wird hier nicht in die Details eingegangen. Die im Kapitel 4.5 und 4.6 bearbeiteten Themen gelten auch für einen Einphasentransformator.

4.2. Dreiphasentransformatoren (Drehstromtransformatoren)

In Drehstromnetzen werden für die Umwandlung des dreiphasigen Spannungssystems Drehstromtransformatoren verwendet. Die Primär- und Sekundärwicklungen, bzw. Ober- und Unterspannungswicklungen sind auf drei Schenkeln, die mit Jochen in einem Eisenkreis miteinander verbunden sind, bewickelt. Diese Wicklungen der Drehstromtransformatoren können in Stern (Y) oder Dreieck (Δ) geschaltet werden. Die Verbindungsform der Primär- und Sekundärwicklungen werden unabhängig voneinander gewählt.

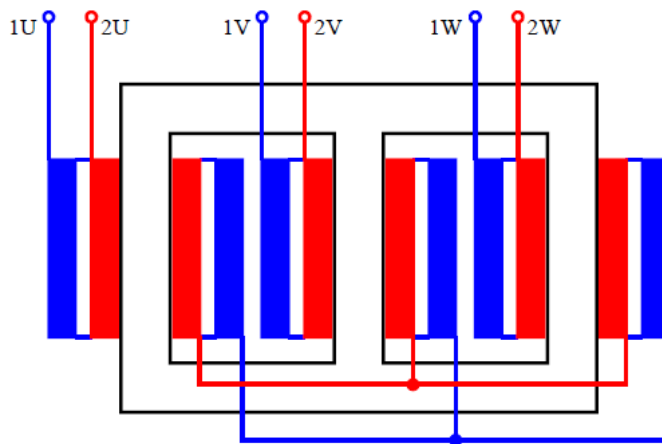


Bild 4-1: Aufbau Drehstrom-Dreischenkeltransformator

Da der magnetischer Fluss jeder einzelnen Phase des Drehstromtransformators, der aus drei gleichen Einphasentransformatoren zusammengeführt wurde, einen getrennten magnetischen Kreis bildet, werden die getrennten magnetischen Flüsse voneinander nicht beeinflusst. Aus diesem Grunde gibt es keine magnetische Kopplung zwischen den Phasen. In Dreiphasensystemen liegt zwischen den Spannungen eine Phasenverschiebung von 120° . Daraus folgt, dass auch zwischen magnetischen Flüssen eine Phasenverschiebung von 120° liegt.

4.3. Aufbau und Bauformen

In der folgenden Abbildung sind zwei unterschiedliche Bauformen der Drehstromtransformatoren dargestellt. Der Dreischenkelkern- Transformator ist eine weitverbreitete Bauform. Fünfschenkelkerntransformatoren sind für sehr große Leistungen ausgeführt.

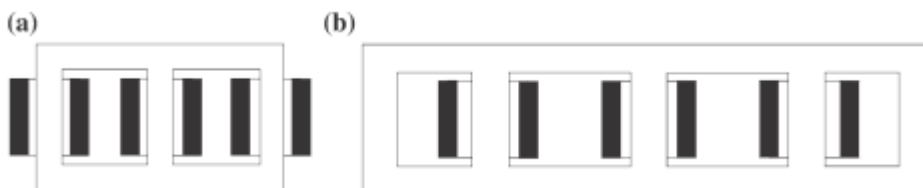


Bild 4-2: a) Dreischenkelkern; b) Fünfschenkelkern

Im Fünfschenkelkern- Transformator sind die äußersten zwei Schenkel ohne Wicklung. Und es wird ein freier magnetischer Rückschluss zwischen diesen Schenkeln und den Jochen gebildet. Aus diesem Grund ist dieser nicht für die Belastung zwischen einer Phase und dem Nullpunkt geeignet. Die Summe der Flüsse auf den Schenkeln des Transformators mit Dreischenkelkern ist in den Jochen Null. Die Dreiecksspannung ist das $\sqrt{3}$ -fache von der Strangspannung der Stern-Schaltung. Daher wird bevorzugt, die Primärwicklung in Stern und die Sekundärwicklung in Dreieck zu verschalten.

$$U_Y = \sqrt{3} \cdot U_{Str}$$

$$U_{\Delta} = U_{Str}$$

Außerdem werden Fünfschenkeltransformatoren mit kleinerem Eisenquerschnitt im Joch hergestellt. Die Ober- und Unterspannungswicklungen eines Drehstromtransformators werden allgemein in Stern (Y) und Dreieck (Δ) geschaltet. Unter Umständen, wo eine stark unsymmetrische Belastung auftritt, wird an der Unterspannungsseite eine dritte Schaltungsform, die man Zick-Zack-Schaltung (Z) nennt, verwendet. Die Sternschaltung (Y) sorgt dafür, dass es sich auch eine Spannung zwischen eine Phase und Nullpunkt erzeugt, in dem ein so genannter Nullpunkt durch die Sternschaltung realisiert wird. Dieser Nullpunkt wird auch Sternpunkt genannt und er wird im Verteilungsnetz an den Neutralleiter bzw. an die Masse geschaltet.

Eine Schaltung mit Dreieckswicklung lässt einen Fluss mit der Frequenz von einem Vielfachen von drei durch den Wicklungskreis laufen, wodurch der sinusförmige Fluss des Transformators erzeugt wird. Dieser ist der wichtigste Vorteil einer Dreieckswicklung.

Die Dreieckswicklung hat neben den Vorteilen auch Nachteile. In dieser Wicklungsform muss eine Spannung zwischen Phasen anstelle der Leiterspannung erzeugt werden. Für gleichen Leiterspannungswert der Sternwicklung wird ein entsprechender Spannungswert zwischen den Phasen der Dreieckswicklung benötigt. Um in einer Dreieckswicklung die gleiche Spannung zwischen den Phasen so wie in der Sternschaltung realisieren zu können, wird 73% mehr Wicklung benötigt. Auch wenn der Wicklungsquerschnitt dem entsprechend verkleinert wird, besitzt die Wicklung mehr Fläche und benötigt mehr Material. Andererseits wenn die Anfangs- und Endpunkte der Phasen dieser Wicklungsart mit dem Netz gebunden werden, führt dies dazu, dass die netzseitigen Hochspannungen beidseitig beeinflusst werden. Daher müssen die Wicklungen gegen diese netzseitigen Hochspannungen beidseitig isoliert sein. Das hat zur Folge, dass sich dann die Transformatorbaukosten erhöhen. Aus diesen Kostengründen werden bei Hochspannungen Dreieckwicklungen vermieden [1].

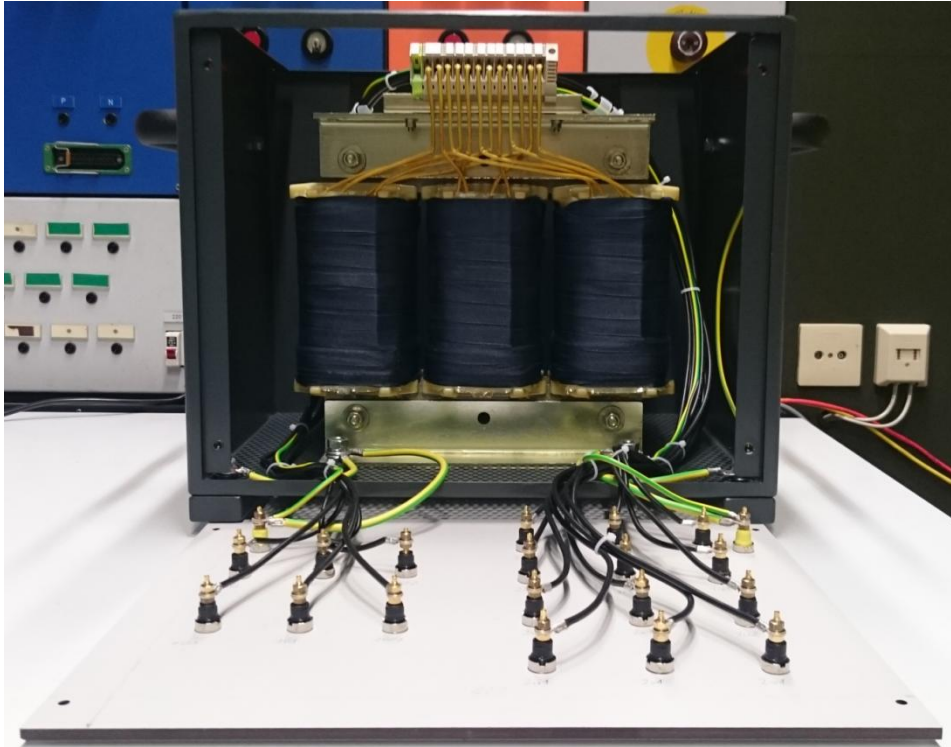


Bild 4-3: Drehstromtransformator zur Testdurchführung, Offenes Gehäuse

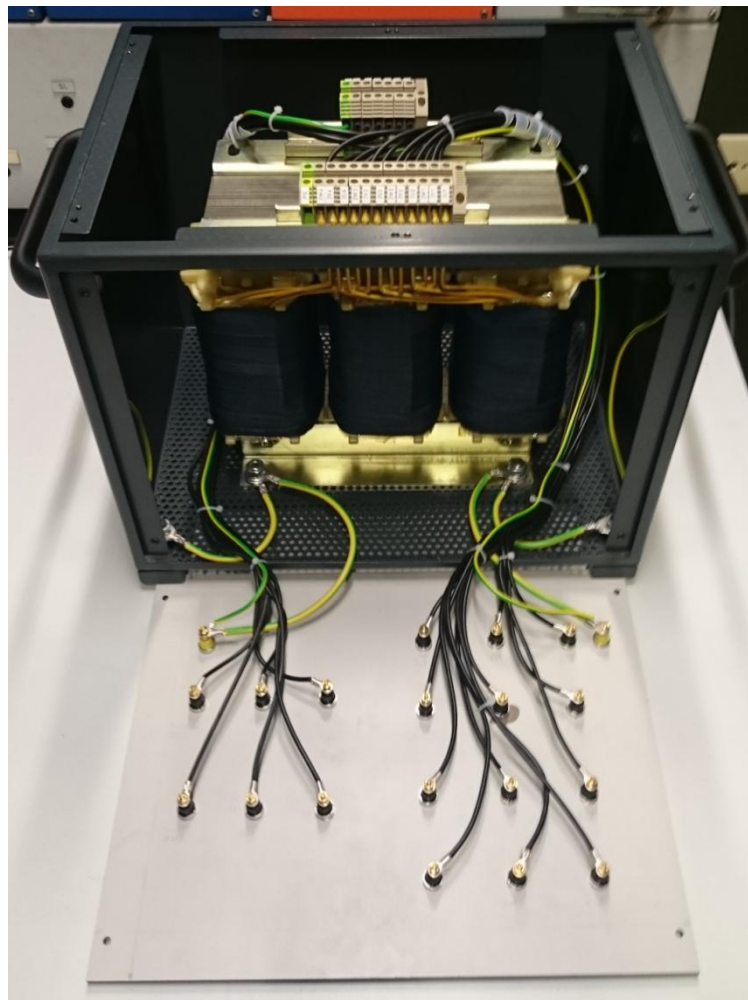


Bild 4-4: Drehstromtransformator, Offenes Gehäuse mit Anzapfungen

Für Transformatoren gelten unter DIN VDE 0532 bestimmten Normen.

4.4. Schaltgruppen

In Ober- und Unterspannungswicklungen der Drehstromtransformatoren können beidseitig Stern- (Y) und Dreieckswicklungen (Δ) verwendet werden. Zick-Zack-Schaltungen wird in der Unterspannungsseite geschaltet. Die Schaltungsanordnung gibt die Schaltgruppen an, wobei diese bei dem Parallelbetrieb mehrerer Transformatoren wichtige Rolle spielen.

Die Schaltgruppen der Drehstromtransformatoren teilen sich in vier Hauptgruppen auf, denen die Kennzahlen 0, 5, 6 und 11 zuzuordnen sind. Diese Kennzahlen geben die Gruppenwinkel an. In der Schaltgruppe 0 ist die Phasenverschiebung zwischen den primär- und sekundärseitigen Phasen gleich Null. Das heißt, die jeweiligen Phasenwicklungen an den Primär- und Sekundärseiten liegen in der gleichen Phase. Dem Entsprechend ist der Gruppenwinkel gleich 150° für die Schaltgruppe mit der Kennzahl 5. Für die Schaltgruppe 6 ist der Gruppenwinkel gleich 180° und 330° für die Schaltgruppe mit der Kennzahl 11. Es deutet also darauf hin, dass der Gruppenwinkel berechenbar ist, in dem die entsprechenden Gruppenkennzahlen mit 30° multipliziert werden. Daraus folgt, dass die Kennzahlen den Gruppenwinkel angeben.

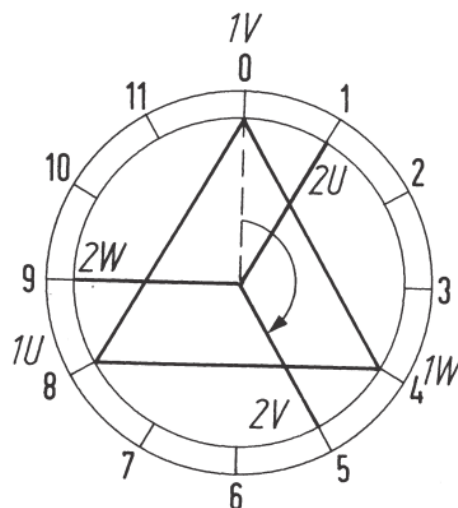


Bild 4-5: Bestimmung der Kennzahl bei Schaltgruppe Dy5

[2]

Die Schaltgruppen mit den Kennzahlen 0 und 5 sind praktisch in der Lage alle Anforderungen erfüllen zu können.

Yy0: Kleine Verteilungstransformatoren. Der Sternpunkt kann nicht voll belastet werden.

Yz5: Kleine Verteilungstransformatoren. Der sekundärseitige Sternpunkt kann voll belastet werden.

Dy5: Werden in Kraftwerken und Trafo-Stationen verwendet. Nicht für Verteilung geeignet.

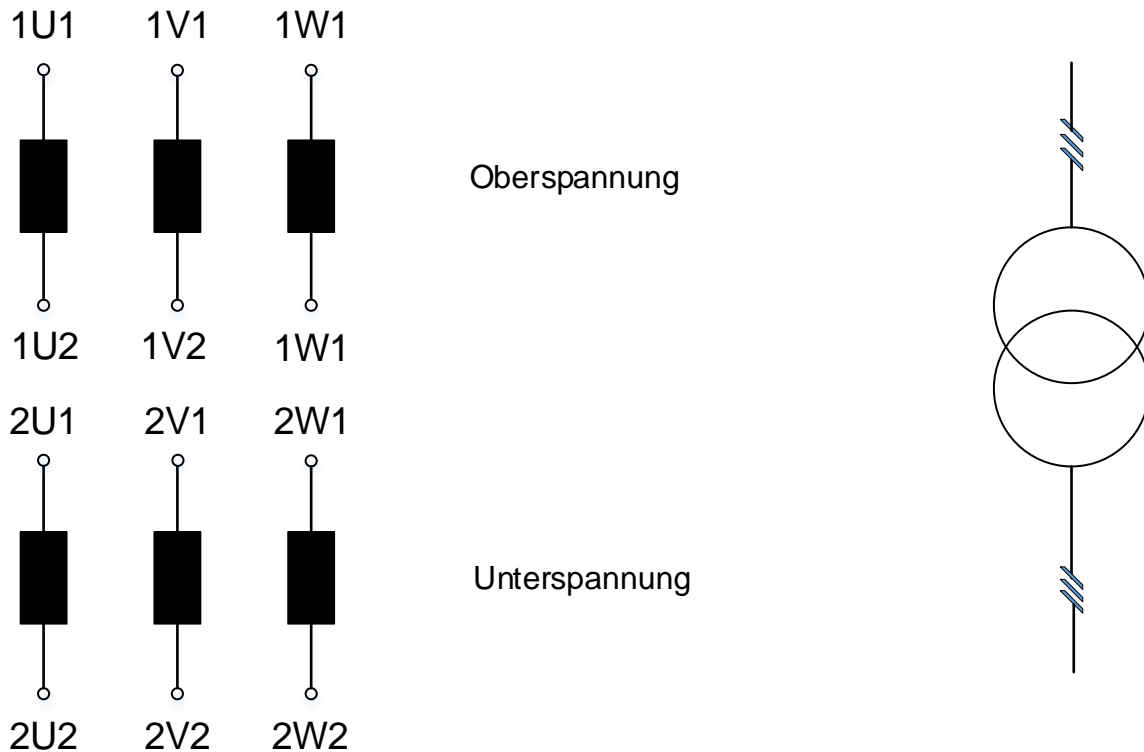


Bild 4-6: Schaltzeichen von Drehstromtransformatoren, li. Anschlusszeichen und Wicklungsdarstellung, re. Schaltkurzeichen

[2]

Die Zulässigkeit einer einphasigen Belastung von Drehstromtransformatoren verschiedener Schaltgruppen ist in VDE 0532, Teil 10 geregelt. Danach dürfen Transformatoren in Stern-Stern-Schaltung ohne Ausgleichwicklung in den Bauarten als Mantel- und als Fünfschenkelkern sowie als Transformatorenbank nicht und Dreischenkeltransformatoren nur bis 10 % des Bemessungsstromes einphasig belastet werden. Bei allen übrigen Schaltungen ist eine Sternpunktbelastung bis zum vollen Strom zulässig. Für die Anwendung der in „Schaltgruppen der Drehstromtransformatoren“ angegebenen Schaltgruppen bedeutet dies: Die Schaltgruppe Yyn0 ist ohne Ausgleichwicklung für Verteilertransformatoren nicht geeignet. Da man jedoch Wicklung und Isolation nur für die Strangspannung $U_1 / \sqrt{3}$ auslegen muss, wird die Stern-Stern-Schaltung mit Ausgleichwicklung bei Hochspannungstransformatoren für Fernleitungen angewandt. Kleine Verteilertransformatoren in Ortsnetzen erhalten mit Rücksicht auf die gute Sternpunktbelastbarkeit oft die Schaltung Yzn5, größere Einheiten dagegen die Schaltung Dyn5, die ebenfalls voll einphasig belastet werden darf. Die Verbindung der Kraftwerksgeneratoren mit dem Hochspannungsnetz erfolgt vielfach über Maschinentransformatoren der Schaltgruppe Yd5. Die Dreieckswicklung liegt auf der Generatorseite und ermöglicht eine freie Magnetisierung, während die Sternschaltung der Oberspannungsseite wieder isoliertechnische Vorteile bringt. [2]

Bezeichnung		Zeigerbild		Schaltungsbild		U _{L1} : U _{L2}
Kennzahl	Schaltgruppe	OS	US	OS	US	
0	D d 0					$\frac{w_1}{w_2}$
	Y y 0					$\frac{w_1}{w_2}$
	D z 0					$\frac{2 w_1}{3 w_2}$
5	D y 5					$\frac{w_1}{\sqrt{3} w_2}$
	Y d 5					$\frac{\sqrt{3} w_1}{w_2}$
	Y z 5					$\frac{2 w_1}{\sqrt{3} w_2}$
6	D d 6					$\frac{w_1}{w_2}$
	Y y 6					$\frac{w_1}{w_2}$
	D z 6					$\frac{2 w_1}{3 w_2}$
11	D y 11					$\frac{w_1}{\sqrt{3} w_2}$
	Y d 11					$\frac{\sqrt{3} w_1}{w_2}$
	Y z 11					$\frac{2 w_1}{\sqrt{3} w_2}$

Bild 4-7: Schaltgruppen der Drehstromtransformatoren

[3]

Yy0, Dy5, Yd5, Yz5 sind die am meisten verwendeten Schaltgruppen.

4.5. Betriebsverhalten

4.5.1. Einschaltstrom

Wenn ein Transformator, ohne Belastung an seinen Sekundärklemmen, primärseitig an das Netz geschlossen wird, wird der konstante Leerlaufstrom erst nach dem Einschwingen des Schaltvorgangs erreicht. Dieser Schaltvorgang schwingt wieder ein, in dem der Betriebszustand elektromagnetisch ausgeglichen wird. Die auf eine Spule mit dem Widerstand R_1 zugeschaltete starre Netzspannung, wie folgt,

$$u_1 = \sqrt{2} \cdot U_1 \cdot \sin(\omega t + \alpha)$$

$$u_1 = R_1 \cdot i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} = R_1 \cdot i_1 + N_1 \frac{d\Phi_1(t)}{dt}$$

Der zeitliche Fluss an der Primärwicklung

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

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

In dem Moment $t = 0$ wird die Integrationskonstante C mit dem Anfangsstrom $i_1 = 0$ und dem $\Phi_1(t) = \Phi_{rem}$ berechnet.

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

Daraus folgt der zeitabhängige Durchfluss

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

Durch diese Gleichung von $\Phi_1(t)$ wird das zeitliche Verhalten des Durchflusses im Einschaltmoment des Transformators bei $t = 0$ definiert. Der Integral-Anteil dieser Gleichung beschreibt das Einschwingen der Spitzenwerte mit Hilfe des dämmenden Effekts des Ohmschen Wicklungswiderstandes R_1 . Mit dem Nulldurchgang $\alpha = 0$ wird der ungünstigste Schaltmoment erhalten. Sollte es zu diesem ungünstigsten Schaltmoment kommen, dann muss die Primärwicklung den maximalen Fluss $\Phi_{max} = 2 \cdot \Phi_1 + \Phi_{rem}$ bei einer halben Periode $\omega t = \pi$ nach dem Schaltvorgang induzieren. Die Kernflussdichten existieren beim Fluss Φ_1 schon von ca. 1,5 T. Aus diesem Grund bilden sich hohe Sättigungen bei Φ_{max} , besonders wenn positiver Remanenz-Fluss Φ_{rem} vom vorherigen Einschalten übrig bleibt [2]. Dies ist außerdem im Eisenmagnetkreis eines Transformators ziemlich höher als bei rotierenden Maschinen mit Luftspalt. Der maximale Fluss Φ_{max} benötigt die Stromspitzen $I_{\mu s}$. Diese Stromspitzen können abhängig von Aufbau und Leistung von Transformator bis auf 15-fache der Amplitude des Nennstroms belaufen [2].

Der sogenannte Einschaltstromstoß, auch *Rusheffekt* genannt, der Kleintransformatoren schwingt in weniger als einer Sekunde ein. Bei Größeren dauert dies aufgrund des verhältnismäßig kleineren Wicklungswiderstandes R_1 mehr als einer Sekunde. In Bild 4-8 ist der ungünstigster Schaltmoment mit $u_1 = 0$ bei $t = 0$ ist abgebildet. Der konstante Fluss Φ_1 kann sich nicht schlagartig einrichten. Die zeitliche Entwicklung von $\Phi_1(t)$ fängt bei Φ_{rem} an und steigt bis auf den Wert von $2 \cdot \Phi_1 + \Phi_{rem}$ an.

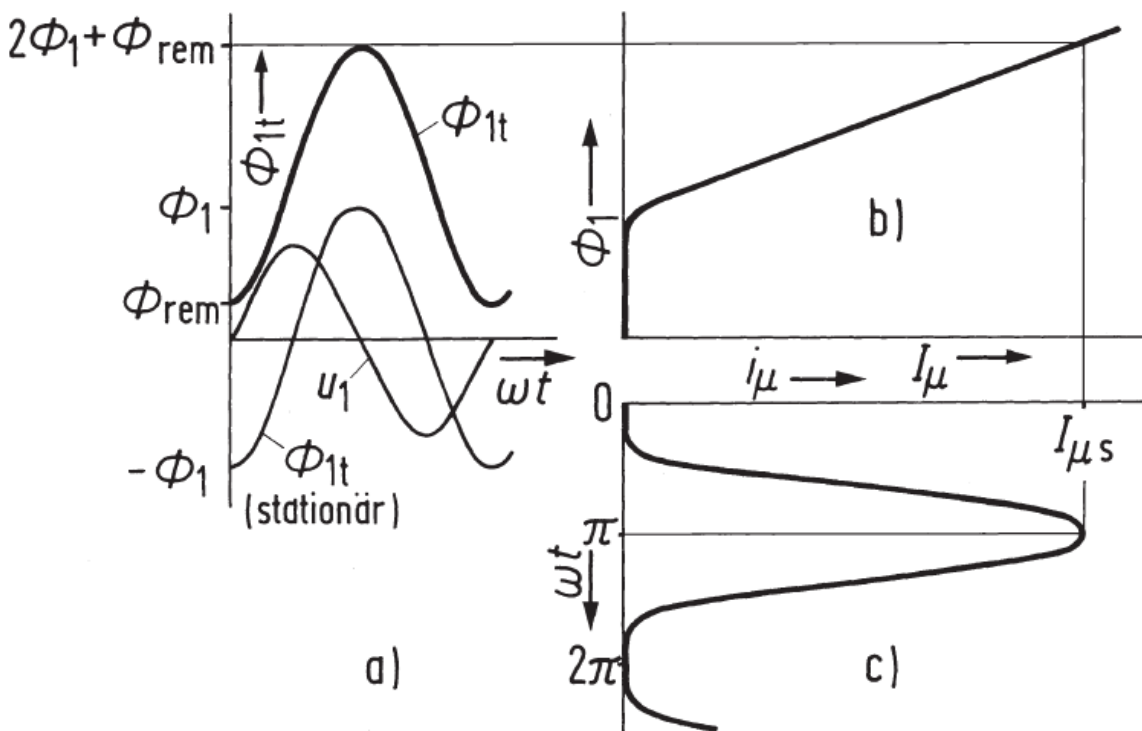


Bild 4-8: Bestimmung des Einschaltstromstoßes $I_{\mu s}$ a) Spannungs- und Flussverlauf bei $R_1 = 0$, b) Magnetisierungskennlinie, c) Erste Spitze des Einschaltstromes

4.5.2. Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad η wird definiert durch das Verhältnis von abgegebener Leistung P_{ab} zu zugeführter Leistung P_{zu}

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}}$$

In sämtlichen Maschinen kann die Energieumwandlung nur noch mit Verlusten geschehen. Aus diesem Grund ist die abgegebene Leistung stets kleiner als die aufgenommene (zugeführte) Leistung. Der Wirkungsgrad der Transformatoren ist jedoch höher als der mechanischen elektrischen Maschinen. Die Transformatoren (100kW-100MW) mit Bauform nach DIN 42 500-510 belaufen auf 97,7-99,5% bei guter Wirkbelastung [2].

Im Transformatorbetrieb kommen Eisenverluste P_{Fe} und Kupferverluste P_{Cu} (auch Wärme- bzw. Kurzschlussverluste genannt) vor. Es ist erwünscht den Anteil P_{FeN} zu minimieren. Die Leistungstransformatoren werden mit einem Verhältnis von

$$\frac{P_{FeN}}{P_{CuN}} = a = 0,17 - 0,25$$

hergestellt. Das Verlustverhältnis a legt die Position und Maximalwert von Wirkungsgradkurve $\eta = f(P)$ fest. Für Beliebige Belastung gelten

die zugeführte Leistung

$$P_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1$$

die Verluste

$$P_V = P_{FeN} + P_{CuN} \cdot \left(\frac{P_1}{P_{1N}}\right)^2$$

Für die Wirkungsgradkurve gilt die Gleichung

$$\eta = 1 - \frac{a + \left(\frac{P_1}{P_{1N}}\right)^2}{P_1} \cdot P_{CuN}$$

Wenn diese Gleich nach P_1 abgeleitet und gleich Null gesetzt wird, dann wird die zugeführte Leistung erhalten, die den maximalen Wirkungsgrad hervorbringt.

$$P_{1,max} = \sqrt{a} \cdot P_{1N}$$

$$S_{1,max} = \sqrt{a} \cdot S_{1N}$$

$$\eta_{max} = 1 - 2 \cdot \frac{\sqrt{P_{FeN} \cdot P_{CuN}}}{P_{1N}}$$

Für die zugeführt Leistung im Nennpunkt gilt

$$\eta_N = 1 - \frac{P_{FeN} + P_{CuN}}{P_{1N}}$$

Beim maximalen Wirkungsgrad sind die Kupfer- und Eisenverluste des Transformators gleich. Die nächstliegende Grafik stellt die Einwirkung des Verlustverhältnisses a auf die *Teillastverluste* P_V/P_{VN} und die Wirkungsgradkurve

dar [2]. In dieser Darstellung ist $a = P_{FeN}/P_{CuN}$ und $\eta_N = 0,98$. Und es gilt für die

Grafik:

- - - := $a = 0,1$
- - - := $a = 0,3$
- _____ := $a = 0,3$

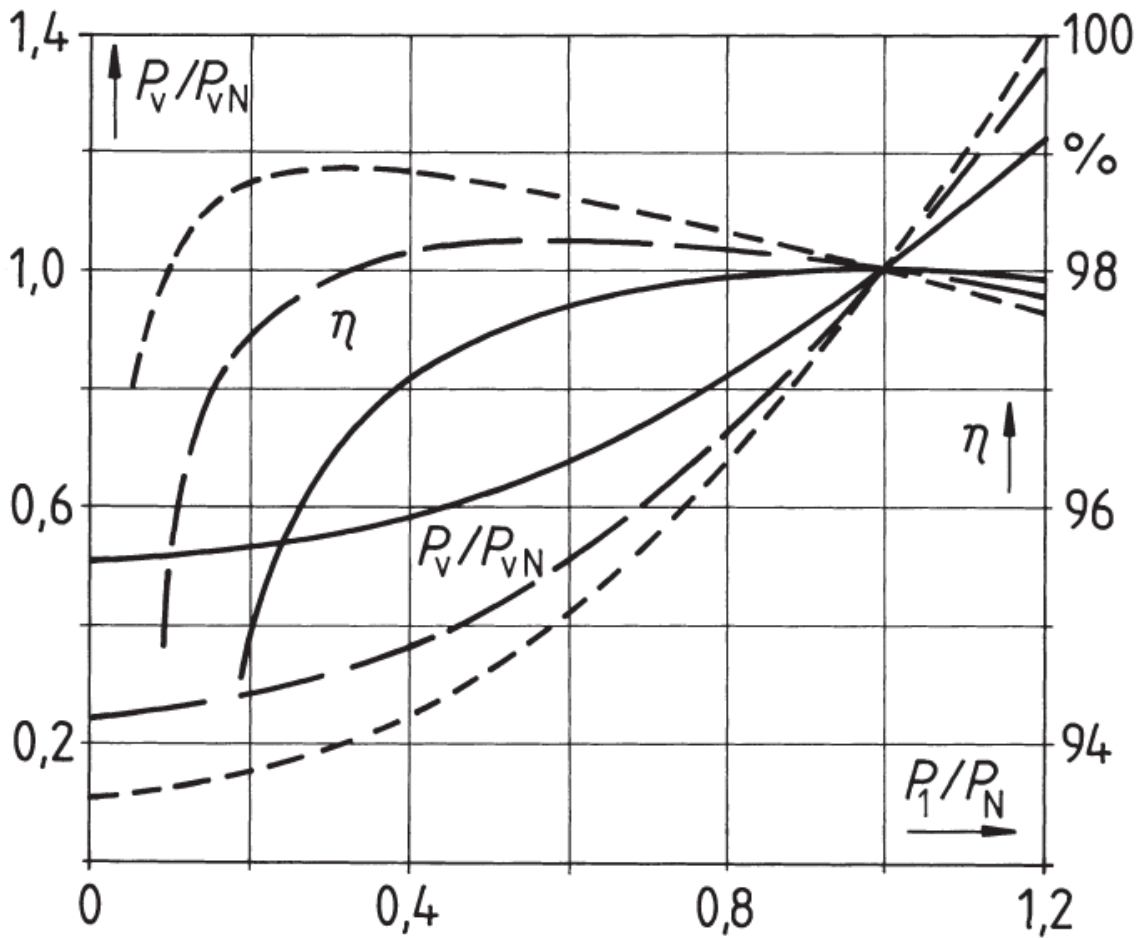


Bild 4-9: Leistung-Wirkungsgrad-Verhältnis

[2]

4.5.3. Streu- und Hauptfeld

Die Primär- und Sekundärwicklungen mit Windungszahlen N_1 und N_2 über einen Eisenschenkel, wie in Bild 4-10 abgebildet, magnetisch verknüpft. Wenn Ströme, wie I_1 , I_2 , über diese Wicklungen fließen, dann tauchen die Durchflutungen θ_1 und θ_2 auf und werden die magnetische Felder $\Phi_{1\sigma}$ und $\Phi_{2\sigma}$ mit diesen Durchflutungen nach der Gleichung $\Phi = \theta \cdot \Lambda$ gebildet. Mit dem magnetischen Leitwert Λ_h über die Wicklungen werden der Hauptfluss Φ_h und der Streufluss Φ_σ erzeugt. Für den Streufluss gilt $\Lambda_\sigma \ll \Lambda_h$

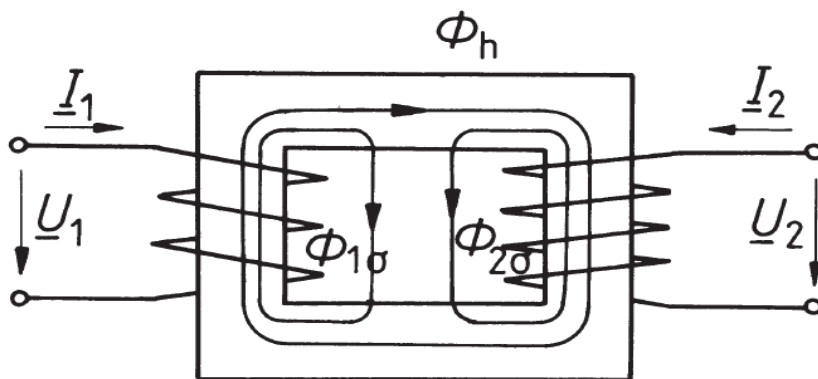


Bild 4-10: Aufbau und Felder eines Transformators

Jede Wicklung hat eigene Feldlinien und damit die Streuflüsse. Diese Feldlinien erzeugen eine Spannung der Selbstinduktion.

$$u_{\sigma} = N \cdot \frac{d\Phi_{\sigma}}{dt} = L_{\sigma} \cdot \frac{di}{dt}$$

Jede Transformatorwicklung hat Ohmschen Widerstand R und einen sogenannten Streublindwiderstand $X_{\sigma} = 2\pi \cdot L_{\sigma}$. Ein idealer Transformator, dessen Wicklungen widerstand- und streuungslos sind., ist in Bild 4-11 abgebildet. Für praktische Zusammenhänge werden mit vorgeschalteten Ohmschen Widerständen und induktiven Widerständen X_{σ} berechnet.

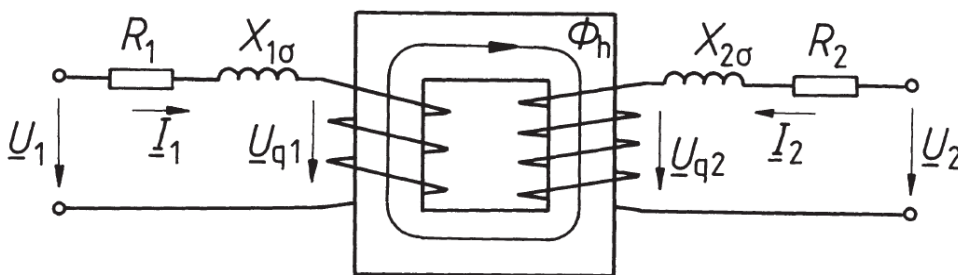


Bild 4-11: Idealer Transformator mit vorgeschalteten Ohmschen- und Induktiven Widerständen

Die Streuinduktivitäten L_{σ} für die Streuwege

$$L_{1\sigma} = N_1^2 \cdot \Lambda_{1\sigma} \quad \text{und} \quad L_{2\sigma} = N_2^2 \cdot \Lambda_{2\sigma}$$

Die Hauptinduktivitäten und die Gegeninduktivität

$$L_{1h} = N_1^2 \cdot \Lambda_{1h}$$

$$L_{2h} = N_2^2 \cdot \Lambda_{2h}$$

$$L_{12} = N_1 \cdot N_2 \cdot \Lambda_h$$

Damit ergeben sich die folgenden Spannungsgleichungen

$$u_1 = R_1 \cdot i_1 + L_{1\sigma} \frac{di_1}{dt} + L_{1h} \frac{di_1}{dt} + L_{12} \frac{di_2}{dt}$$

$$u_2 = R_2 \cdot i_2 + L_{2\sigma} \frac{di_2}{dt} + L_{2h} \frac{di_2}{dt} + L_{12} \frac{di_1}{dt}$$

Wenn das Verhältnis $i_2' = i_2 \cdot \frac{N_2}{N_1}$ in die Gleichungen eingesetzt wird, dann gelten

$$u_1 = R_1 \cdot i_1 + L_{1\sigma} \frac{di_1}{dt} + L_{1h} \frac{di_1}{dt} + L_{12} \cdot \frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{di_2'}{dt}$$

$$u_2 \cdot \frac{N_1}{N_2} = R_2 \cdot \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \cdot i_2' + L_{2\sigma} \cdot \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \cdot \frac{di_2'}{dt} + L_{2h} \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \cdot \frac{di_2'}{dt} + L_{12} \cdot \frac{N_1}{N_2} \cdot \frac{di_1}{dt}$$

Mit den oben definierten Induktivitätsgleichungen gilt auch

$$L_{12} \cdot \frac{N_1}{N_2} = L_{1h} = L_h$$

$$L_{2h} \cdot \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 = L_{1h} = L_h$$

Die mit dem Übersetzungsverhältnis $\ddot{u} = \frac{N_1}{N_2}$ umgeschriebenen Terme werden nun mit einem Strich (') versehen. Damit sind die Spannungsgleichungen von beiden Wicklungen:

$$u_1 = R_1 \cdot i_1 + L_{1\sigma} \frac{di_1}{dt} + L_h \cdot \left(\frac{di_1}{dt} + \frac{di'_2}{dt}\right)$$

$$u'_2 = R'_2 \cdot i'_2 + L'_{2\sigma} \frac{di'_2}{dt} + L_h \cdot \left(\frac{di_1}{dt} + \frac{di'_2}{dt}\right)$$

Bei konstanten Betriebszuständen mit Effektivwerten gelten die Formeln in komplexer Form für die momentanen Werte der differenzialen Gleichungen

$$\underline{U}_1 = R_1 \cdot \underline{I}_1 + jX_{1\sigma} \cdot \underline{I}_1 + jX_h \cdot (\underline{I}_1 + \underline{I}'_2)$$

$$\underline{U}'_2 = R'_2 \cdot \underline{I}'_2 + jX'_{2\sigma} \cdot \underline{I}'_2 + jX_h \cdot (\underline{I}_1 + \underline{I}'_2)$$

4.5.4. Vollständiges ESB

Für den Drehstromtransformator wird das Ersatzschaltbild eines Einphasentransformators angewendet. Wenn das Phasendiagramm für eine Phase des Drehstromtransformators gezeichnet wird, müssen für die weiteren Phasen keine Phasendiagramme gezeichnet werden, da das Phasendiagramm einer Phase auch für andere Phasen gilt. Denn es handelt sich um gleiche Diagramme mit je 120° Phasenverschiebung.

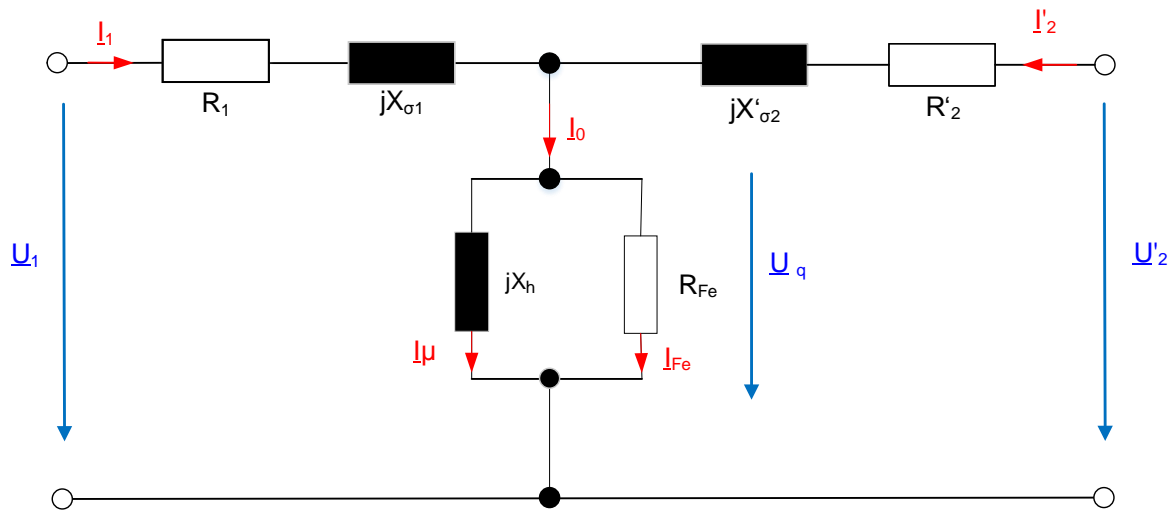


Bild 4-12: Vollständiges Ersatzschaltbild einer Phase

Für Vollständiges Ersatzschaltbild einer Phase des Transformators gelten die folgenden Formeln

$$\underline{U}_1 = R_1 \cdot \underline{I}_1 + jX_{1\sigma} \cdot \underline{I}_1 + jX_h(\underline{I}_1 + \underline{I}'_2)$$

$$\underline{U}'_2 = R'_2 \cdot \underline{I}'_2 + jX'_{2\sigma} \cdot \underline{I}'_2 + jX_h(\underline{I}_1 + \underline{I}'_2)$$

$$\underline{I}_0 = \underline{I}_1 + \underline{I}'_2$$

$$\ddot{u} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U'_2}{U_2} = \frac{I_2}{I'_2}$$

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

$$\frac{N_1}{N_2} \cong \frac{U_1}{U_2}$$

$$R_1 \cong R'_2$$

$$X_{1\sigma} \cong X'_{2\sigma}$$

\underline{U}_1 : Eingangsspannung, \underline{U}'_2 : Auf die Sekundärseite übersetzte (Ausgangs-) Spannung, \underline{I}_0 : Leerlaufstrom, \ddot{u} : Übersetzungsverhältnis, R_1, R_2 : Wicklungswiderstände, R'_2 : Auf die Sekundärseite übersetzter Wicklungswiderstand, $X_{1\sigma}, X_{2\sigma}$: Streureaktanzen, $X'_{1\sigma}, X'_{2\sigma}$: Übersetzte Streureaktanzen. N_1, N_2 : Windungszahlen, \underline{I}_1 : Eingangsstrom, \underline{I}'_2 : Auf die Sekundärseite übersetzter Strom

4.5.5. Bestimmung der Ersatzparameter des einphasigen ESB

Die Leerlauf- und Kurzschlussberechnungen eines Drehstromtransformators werden auch nach Ersatzschaltbild des Einphasentransformators durchgeführt.

4.5.6. Leerlauf

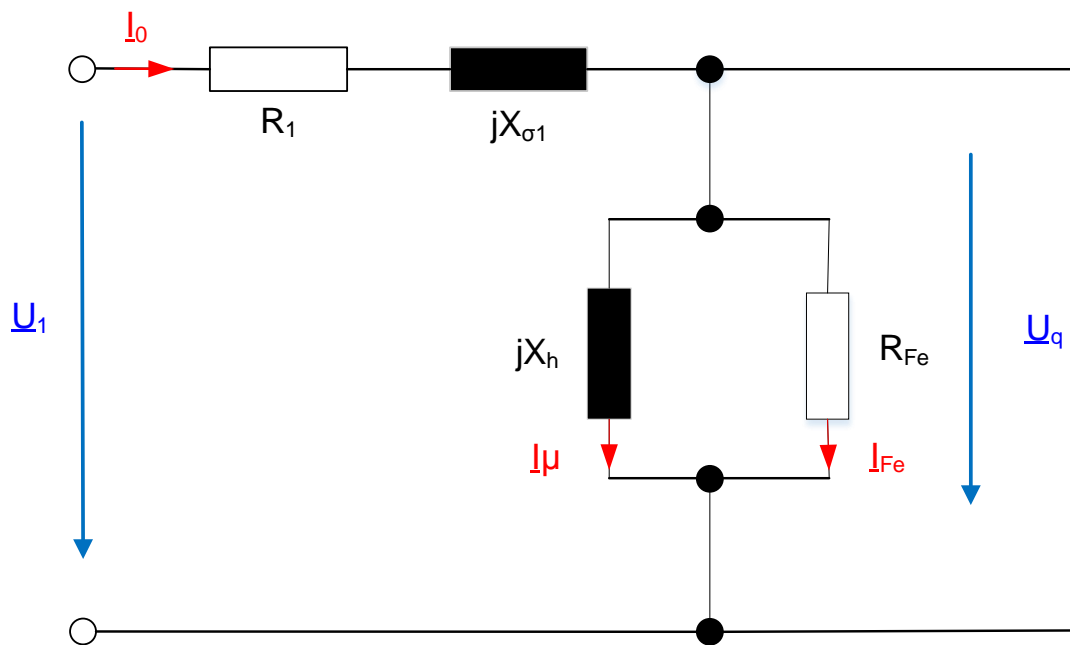


Bild 4-13: Ersatzschaltbild für Leerlauf

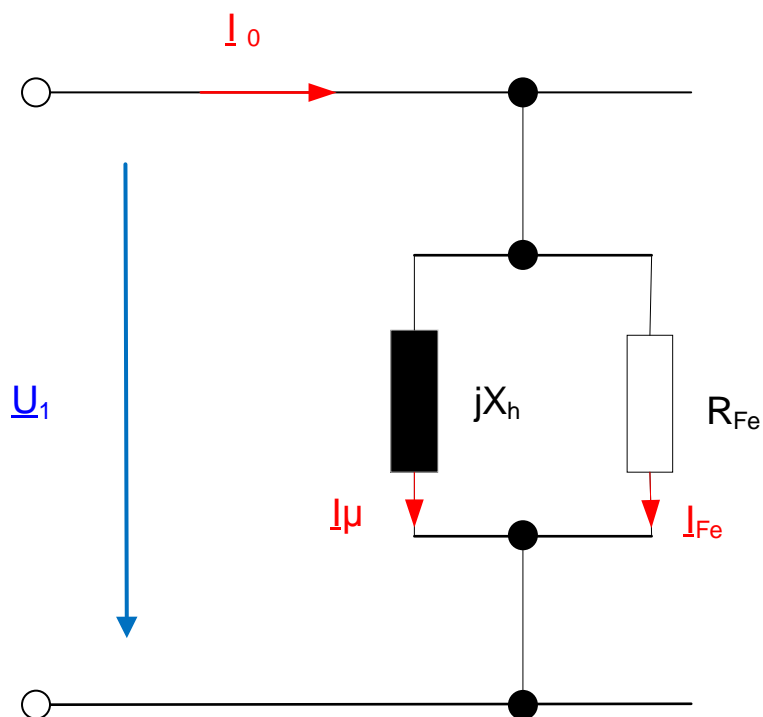


Bild 4-14: Vereinfachtes Ersatzschaltbild für Leerlauf

Nach dem vereinfachten Ersatzschaltbild werden die Formeln aufgestellt.

$$\underline{I}_0 = \underline{I}_\mu + \underline{I}_{Fe}$$

$$\underline{U}_1 = R_1 \cdot \underline{I}_0 + jX_{1\sigma} \cdot \underline{I}_0 + U_q$$

$$U_{q1} = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot N_1 \cdot \Phi_h$$

$$U_{q1} = 4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot \Phi_h$$

$$U_{q2} = 4,44 \cdot f \cdot N_2 \cdot \Phi_h$$

$$\Phi_h(t) = \Phi_h \cdot \sin(\omega t)$$

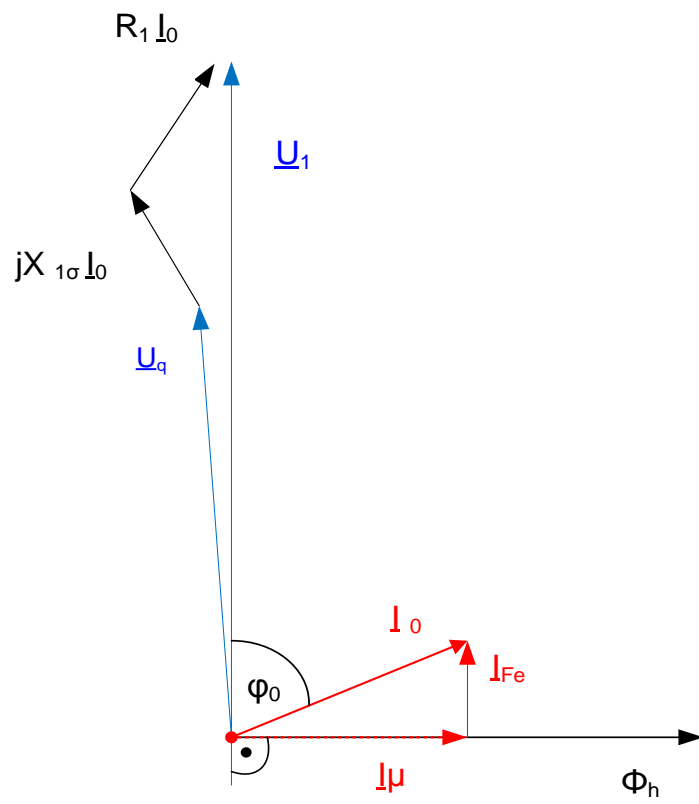
Im Leerlauf ist die primärseitige Spannung U_1 annähernd gleich der primärseitigen Klemmenspannung U_{q1} . Das gilt auch für die sekundärseitigen Spannungen.

$$U_1 \cong U_{q1}$$

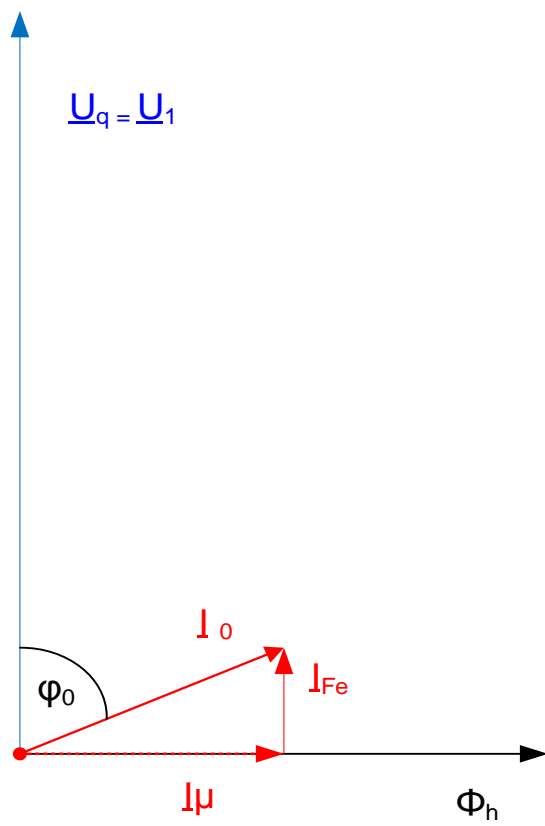
$$U_2 \cong U_{q2}$$

Der Leerlaufstrom I_0 ist im Vergleich zu Nennstrom I_0 sehr klein. Er verursacht durch seine Induktivität die Magnetisierung und ergibt mit dem Ohmschen Anteil I_{Fe} die Eisenverluste.

$$I_0 \ll I_N$$



I)



II)

Bild 4-15: Zeigerdiagramme für Leerlauf, I- vollständig, II-vereinfacht, $\varphi > 70^\circ$

Die primärseitige Spannung wird mit dem Leerlaufstrom I_0 vom Netz aufgenommen. Der Leerlaufstrom bewirkt einen Spannungsabfall am Ohmschen Widerstand R_1 und an der Streureaktanz $X_{1\sigma}$. Dies hat zur Folge, dass eine sogenannte Selbstinduktion mit der Spannung U_q , im Magnetfeld Φ_h erzeugt wird. Der Blindanteil I_μ , auch Magnetisierungsstrom genannt, von Leerlaufstrom I_0 sorgt für die Durchflutung der Magnetisierung. Der Magnetisierungsstrom ist ungefähr gleich dem Leerlaufstrom, da der Ohmsche Anteil von Leerlaufstrom etwa 10% beträgt.

$$I_{Fe} \cong 0,1 \cdot I_0 \Rightarrow I_0 \cong I_\mu$$

4.5.7. Magnetisierungsstrom

Mit der Kennlinie $B = f(H)$ werden Spannung und Magnetisierungsstrom verkoppelt. Aufgrund der magnetischen Sättigung gibt es keine lineares Verhältnis zwischen Φ_{ht} und i_μ bei Flussdichten im Eisenkern von 1,5 T bis 1,7 T (Die Einheit $[T] = \frac{[Weber]}{m^2}$ ist die Einheit der magnetischen Flussdichte. Die Einheit des magnetischen Flusses ist $[Weber] = \frac{kg \cdot m^2}{A \cdot sec^2} = V \cdot sec$; mit V: Volt, A: Amper, und sec: Sekunde). Die zeitliche Entwicklung des Magnetisierungsstromes bei gegebener sinusförmiger Änderung des Flusses ist in Bild 4-16 abgebildet, in dem die Hysterese vernachlässigt ist. Abgesehen von der Grundschwingung werden die Oberschwingungen ungerader Zahlen durch die Untersuchung der Stromkurve ermittelt. Die Amplituden der Magnetisierungsströme nehmen nach den Ordnungszahlen ab. In I_μ betrachteten Vorzeichen folgt die Gleichung von

$$i_\mu = \sqrt{2} \cdot I_{\mu 1} \cdot \sin \omega t + \sqrt{2} \cdot I_{\mu 3} \cdot \sin 3\omega t + \sqrt{2} \cdot I_{\mu 5} \cdot \sin 5\omega t + \dots + \sqrt{2} \cdot I_{\mu v} \cdot \sin v\omega t$$

mit $v = 2 \cdot n + 1, n = 0, 1, 2, 3, \dots$

Die Untersuchung für Elektrobleche liefert die folgenden einzelnen Effektivwerte bei $B = 1,6 \text{ T}$ bezogen auf den Gesamtwert [2].

$$I_\mu = \sqrt{I_{\mu 1}^2 + I_{\mu 3}^2 + I_{\mu 5}^2 + \dots + I_{\mu v}^2}$$

Ordnungszahl v	1	3	5	7	9
$I_{\mu v} / I_\mu$	0,86	0,40	0,23	0,12	0,07

Tabelle 4-1: Einzelne Effektivwerte bei $B=1,6 \text{ T}$

Alle Stromanteile der Untersuchung müssen sich, um einen zeitlichen sinusförmigen Fluss zu induzieren, nach den Magnetisierungskennlinien bilden. Wenn die einzelne Harmonische dabei blockiert wird, dann wird der Fluss mit Oberschwingung und damit auch eine verzerrte Spannung induziert. In diesem Fall heißt es eine *erzwungene Magnetisierung*. [2]

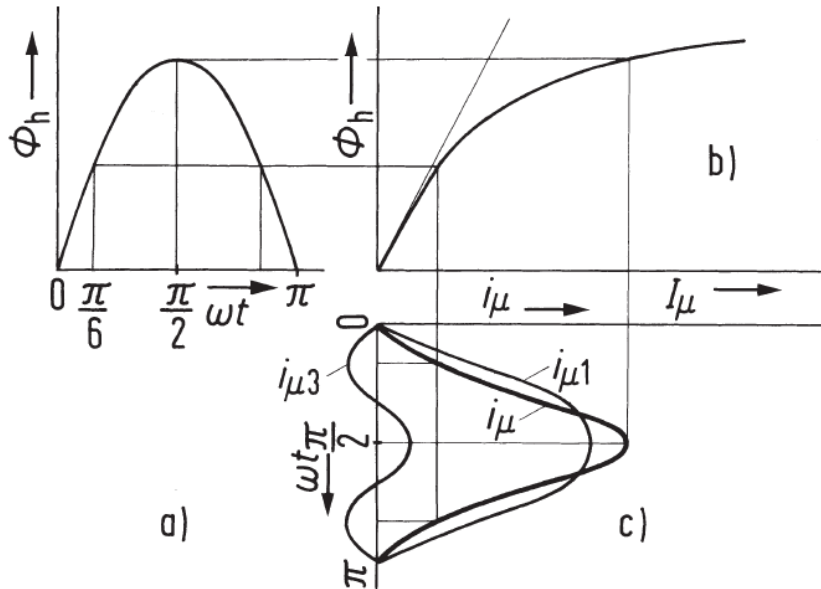


Bild 4-16: Bestimmung der Kurvenform des Magnetisierungsstromes i_μ a) zeitlich sinusförmiger Flussverlauf b) Magnetisierungskennlinie c) zeitlicher Verlauf des Magnetisierungsstromes i_μ

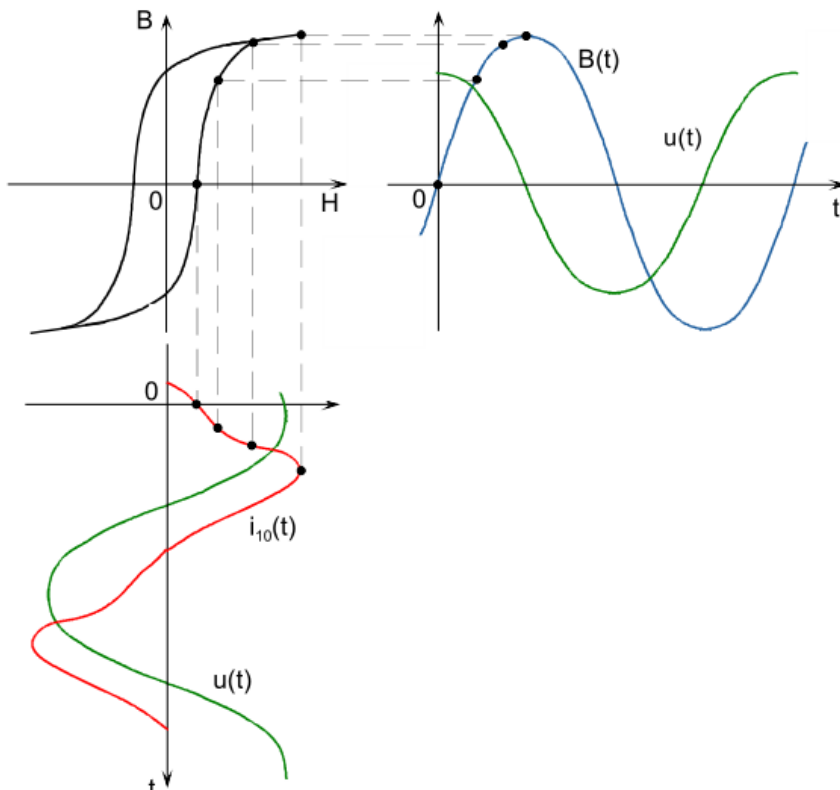


Bild 4-17: Magnetisierungsstrom bei sinusförmiger Erregung

4.5.8. Kurzschluss

Der Kurzschluss eines Transformators ist eine Art von Ohmsch-Induktiver Belastung. Der Transformator nimmt die Energie vom Netz auf, aus diesem Grund ist die Vektor-Darstellung des Primärstromes liegt im 1. Quadrant (Bild 4-22). Der Wirkanteil von I'_2 ist der Sekundärspannung entgegen gesetzt. Das bedeutet, dass Energie an der Sekundärseite abgegeben wird. Die Stromvektoren bilden ein Dreieck, mit dem der Durchflutungsgrundsatz des Transformators dargestellt wird. Mit $I_1 + I'_2 = I_0 \approx I_\mu$ folgt

$$I_1 + \frac{N_2}{N_1} \cdot I_2 \approx I_1 \approx I_\mu$$

$$\Rightarrow I_1 \cdot N_1 + I_2 \cdot N_2 \approx I_\mu \cdot N_1$$

Die Magnetisierungsdurchflutung, mit der das Hauptfeld induziert wird, wird von Primär- und Sekundärwicklungen zusammen hergestellt. Wenn der I'_2 durch die Belastung verändert wird, dann hat die Primärseite den Effekt, dass daraus entstehende Durchflutung ein Feld beibehält, das der Spannung U_q proportional ist. Die Spannungsabfälle an den Ohmschen Widerständen und Streureaktanzen unterscheiden die Spannung des quer liegenden Feldes von den Ein- und Ausgangsspannungen. Für $I'_2 = 0$ wird $U'_2 = U_q$ und $I_1 = I_0$

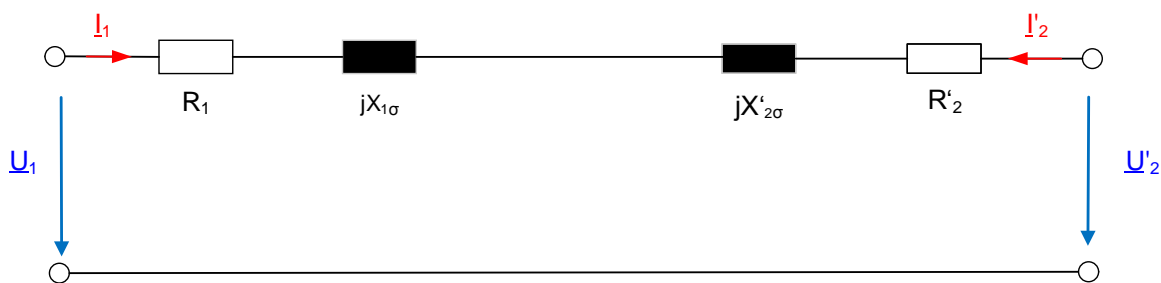


Bild 4-18: Ersatzschaltbild für Kurzschluss

Für die Analyse der Spannungsverhältnisse bei beliebiger Belastung bzw. beim Kurzschluss kann das quer liegende Feld, das hochohmig ist und dadurch der Magnetisierungsstrom vernachlässigt werden. Daraus stellt sich die Schaltung wie in Bild 4-19 dar.

$$\underline{I}_1 = -\underline{I}'_2 = \underline{I}$$

$$R_k = R_1 + R'_2$$

$$X_k = X_{1\sigma} + X'_{2\sigma}$$

$$\underline{Z}_k = R_k + jX_k$$

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

$$R_{Fe} \gg R'_2$$

$$X_h \gg X'_{2\sigma}$$

Die Ein- und Ausgangsspannungen unterscheiden sich durch das Spannungsdreieck, auch *Kappsches Dreieck* genannt. (Bild 4-21). Dieses Dreieck hat eine konstante Größe und bewegt sich für einen bestimmten Stromwert um die Spitze der Primärspannung je nach Phase des Stromes. Bei konstanter Belastung und beliebigem Leistungsfaktor $\cos \varphi$ bildet sich ein Kreis als Ortskurve des Vektors \underline{U}'_2 um die Primärspannung mit dem Radius $Z_k \cdot I_k$ [2], (Bild 4-23).

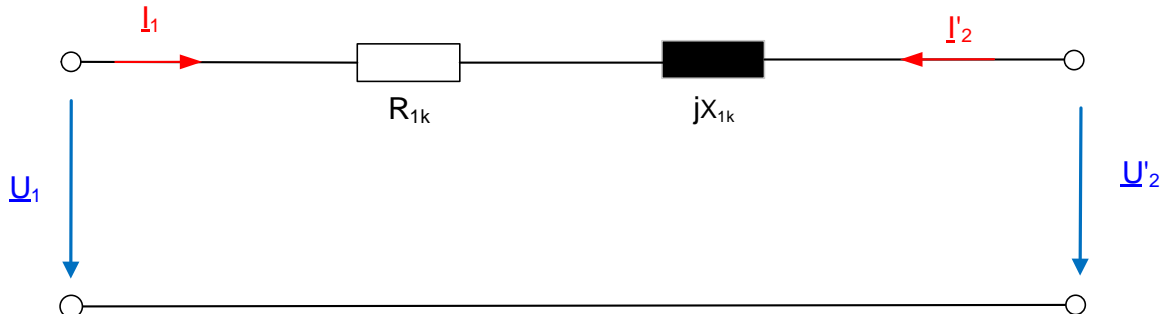


Bild 4-19: Vereinfachtes Ersatzschaltbild für Kurzschluss

Die Seiten des Kappschen Dreiecks können aus $P_k = I_{1N} \cdot Z_k$ berechnet werden.

$$u_R = \frac{R_k \cdot I_{1N}}{U_1}$$

$$u_X = \frac{X_k \cdot I_{1N}}{U_1}$$

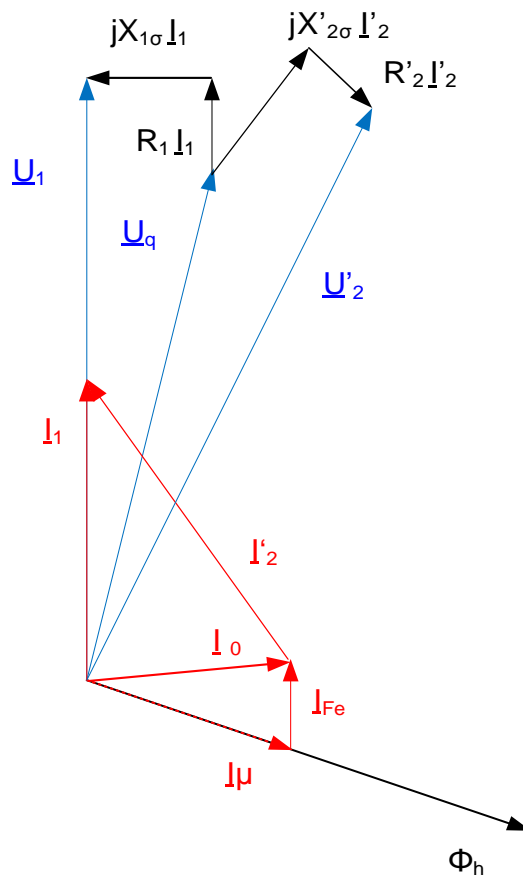


Bild 4-20: Zeigerdiagramm der Ohmschen Belastung

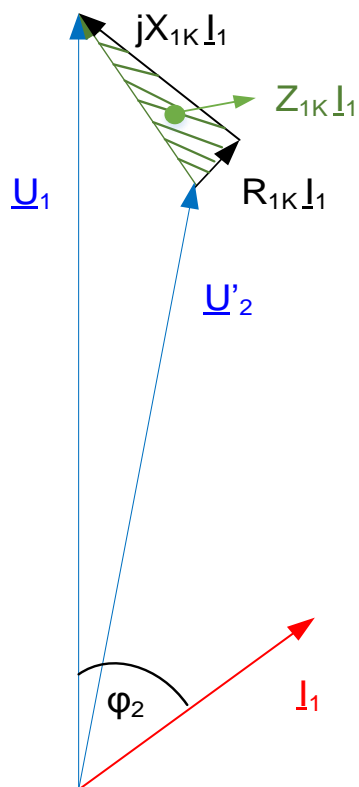


Bild 4-21: Vereinfachtes Kappsches Dreieck bei Ohmsch-Induktiver Belastung

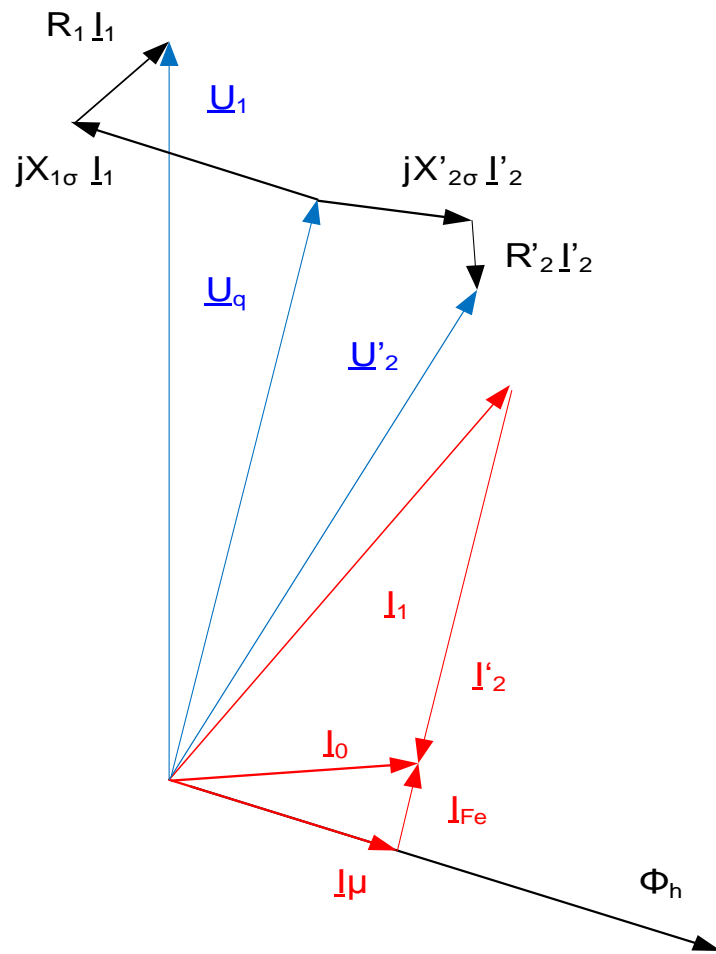


Bild 4-22: Zeigerdiagramm Ohmsch-Induktive Belastung

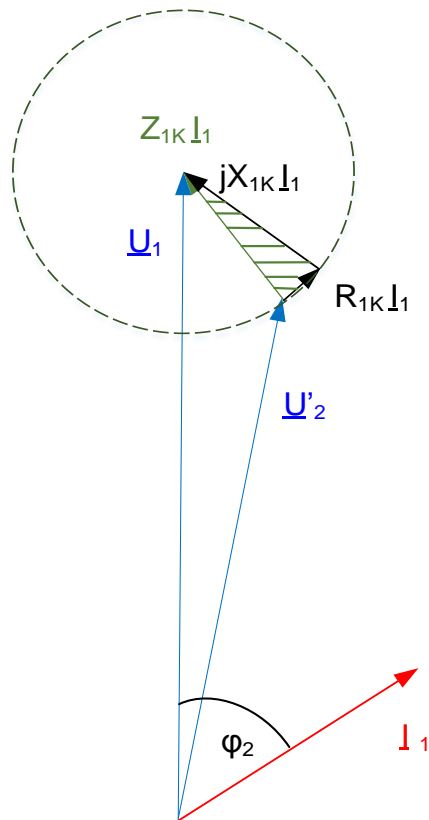


Bild 4-23: Ortskurve der Sekundärspannung mit Kappschem Dreieck

4.5.9. Stoßkurzschlussstrom

Wenn ein im Leerlauf betriebener Transformator sekundärseitig kurzgeschlossen wird, kommt es zum sogenannten Stoßkurzschlussstrom. Dieser Schaltvorgang schwingt nach einer gewissen Zeit wieder ein, in dem der Betriebszustand elektromagnetisch ausgeglichen wird. So wird der Dauerkurzschlussstrom erreicht. Die Oberspannungsseite kann diesen Dauerkurzschlussstrom nicht direkt erreichen, da der Stoßkurzschlussstrom $i_s = 0$ in dem Moment $t = 0$ ist. Dies wird durch die Kompensation mit

$$T_k = \frac{X_k}{\omega \cdot R_k}$$

ermöglicht. Der Dauerkurzschlussstrom steht im Zusammenhang von der Klemmenspannung u_1

$$u_1 = \sqrt{2} \cdot U_1 \cdot \sin \varphi_k$$

$$i_k = \sqrt{2} \cdot I_k \cdot \sin(\omega t - \varphi_k)$$

Wenn der Kurzschluss im Nulldurchgang von Spannung ($\omega t = 0$), vorkommt, dann lautet der eingeschwungener Gleichstromanteil

$$i_{gl} = \sqrt{2} \cdot I_k \cdot \sin \varphi_k \cdot e^{\frac{-t}{T_k}}$$

$$i_s = i_k + i_{gl} = 0$$

und der Stoßkurzschlussstrom

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

$$\varphi_k = \arctan \frac{X_k}{R_k}$$

Der maximale Wert des Stoßkurzschlussstroms, bzw. Stromspitze I_s tritt bei $\omega t = \varphi_k + \pi/2$ auf. Das heißt, in dem Moment einer Halbperiode nach dem Kurzschluss.

$$\frac{t}{T_k} = \frac{X_k}{R_k} \cdot \omega t$$

$$I_s = \sqrt{2} \cdot I_k \cdot \left[1 + \sin \varphi_k \cdot e^{\frac{-R_k}{X_k} \cdot \left(\frac{\pi}{2} + \varphi_k \right)} \right]$$

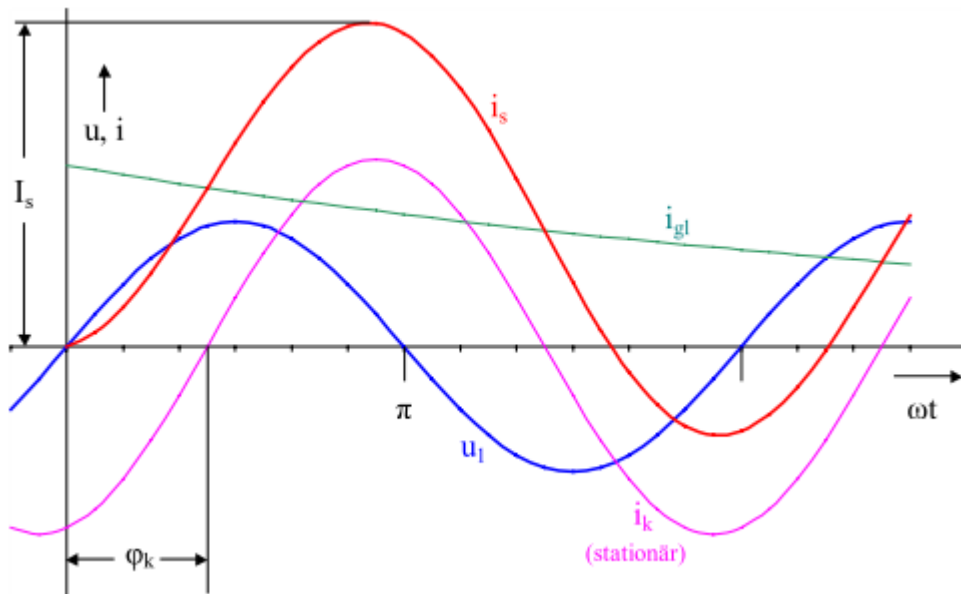


Bild 4-24: Verlauf des Stoßkurzschlussstromes i_s bei Kurzschluss im Spannungsnulldurchgang

Die Stromspitze des Stoßkurzschlussstroms kann bis auf 1,9-fache des Dauerkurzschlussstroms belaufen. Der Stoßkurzschluss hat zur Folge, dass der Transformator mechanisch beansprucht wird [5].

4.5.10. Dauerkurzschluss

Mit dem vereinfachten Ersatzschaltbild und den Formeln für Kurzschluss stellt die Vektordarstellung folgendermaßen dar. Aufgrund dessen, dass Die Eisenverluste im Kurzschluss sehr klein sind, werden die Wirkanteile des Stromes zum Begleichen von Kupferverluste erforderlich.

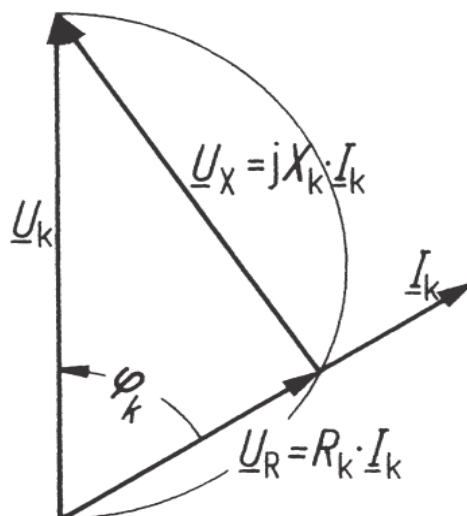


Bild 4-25: Vektordarstellung Dauerkurzschluss

4.5.11. Kurzschlussspannung

Die Kurzschlussspannung U_k ist maßgeblich, um den an der kurzgeschlossenen Sekundärseite den Nennstrom zustande zu bringen und liegt primärseitig an.

$$U_k = I_{1N} \cdot Z_k$$

Das Verhältnis von Kurzschlussspannung zur Nennspannung gibt die relative Kurzschlussspannung an.

$$u_k = \frac{U_k}{U_{1N}} \cdot 100\%$$

Relative Kurzschlussspannung liegt bei 4-12% nach DIN 42 500-508 und proportional zur Leistung [2]. Wenn die rechte Seite von

$$u_R = \frac{R_k \cdot I_{1N}}{U_1}$$

mit I_N erweitert wird, ergeben sich die folgende Formeln, die für die Vektordarstellung des Dauerkurzschlusses relevant sind

$$u_R = \frac{P_k}{S_N} ; u_X = \sqrt{u_k^2 - u_R^2}$$

Dauerkurzschlussstrom I_{kN} beim Nennstrom kann aus der relativen Kurzschlussspannung erhalten werden

$$I_{kN} = \frac{U_1}{Z_k} = \frac{U_1 \cdot I_{1N}}{Z_k \cdot I_{1N}} = I_{1N} \cdot \frac{U_1}{U_k}$$

$$I_{kN} = \frac{I_{1N}}{u_k} \cdot 100\%$$

$$\Rightarrow u_k = \frac{I_{1N}}{I_{kN}} \cdot 100\%$$

Damit ist Stoßkurzschlussstrom

$$i_s = 2,55 \cdot I_{kN}$$

4.6. Unsymmetrische Belastung

Das Durchflutungsgleichgewicht wird durch unsymmetrische Belastung beeinträchtigt und wird mit der folgenden Formel wieder ausgeglichen.

$$\underline{I}_1 + \underline{I}'_2 = \underline{I}_0 \approx \underline{I}_\mu$$

In Bild 4-26 ist der Ausgleich des Belastungsstroms für einen Einphasentransformator dargestellt. Diese Darstellung gilt auch für einen Schenkel bzw. einen Strang eines Drehstromtransformators. Wenn der Leerlaufstrom annähernd Null ist, dann gleicht der primärseitige Strom \underline{I}_1 den Durchfluss mit sekundärseitigem Belastungsstrom \underline{I}'_2 aus.

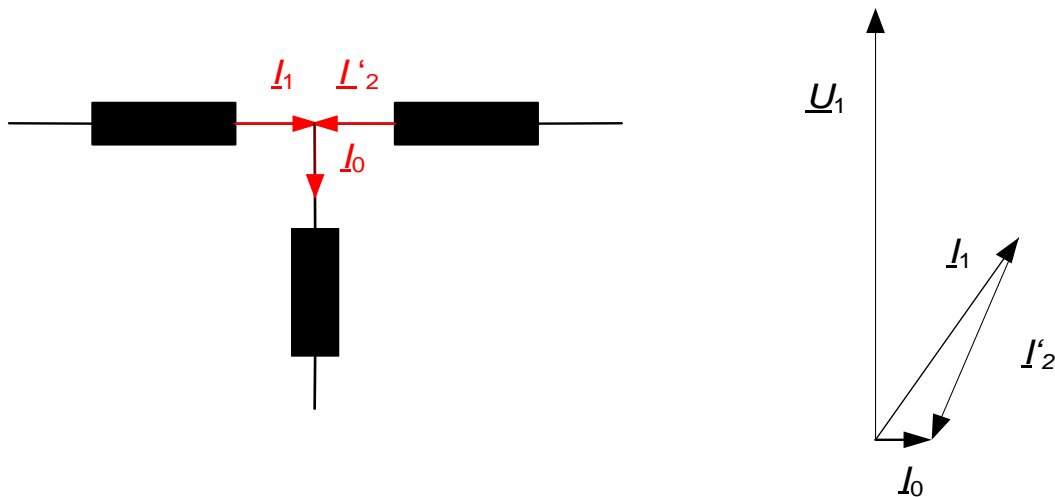


Bild 4-26: Ausgleich des Belastungsstroms

Der Belastungsstrom bei unsymmetrischer Belastung zeigt allerdings unterschiedliche Charakteristik mit unterschiedlicher Belastung, da die Stränge des Drehstromtransformators beliebig belastet werden können.

4.6.1. Einphasige Belastung in Yy- Schaltung

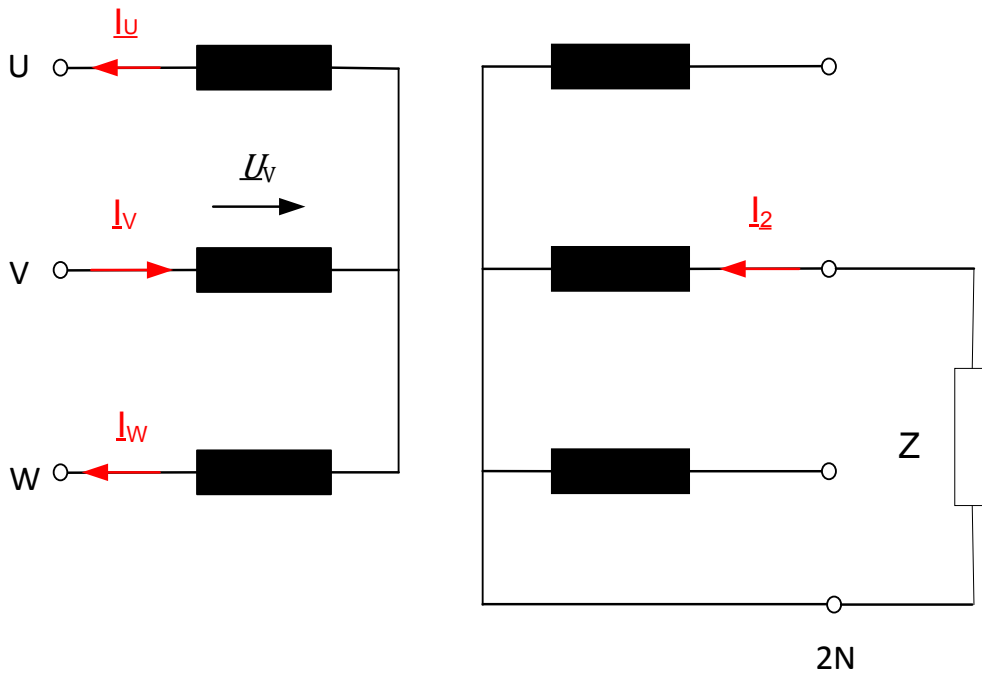


Bild 4-27: Schaltbild Einphasige Belastung

Die mittlere Phase des Transformators wird, wie in Bild 4-27, gegen den sekundärseitigen Neutralleiter belastet. Durch die Belastung Z fließt der Strom I_2 . An der Oberspannungsseite ist kein Neutralleiter verschaltet. Damit wird auch kein Eingangsstrom bezogen. Dadurch bilden sich die im Schaltbild gezeichneten Ströme.

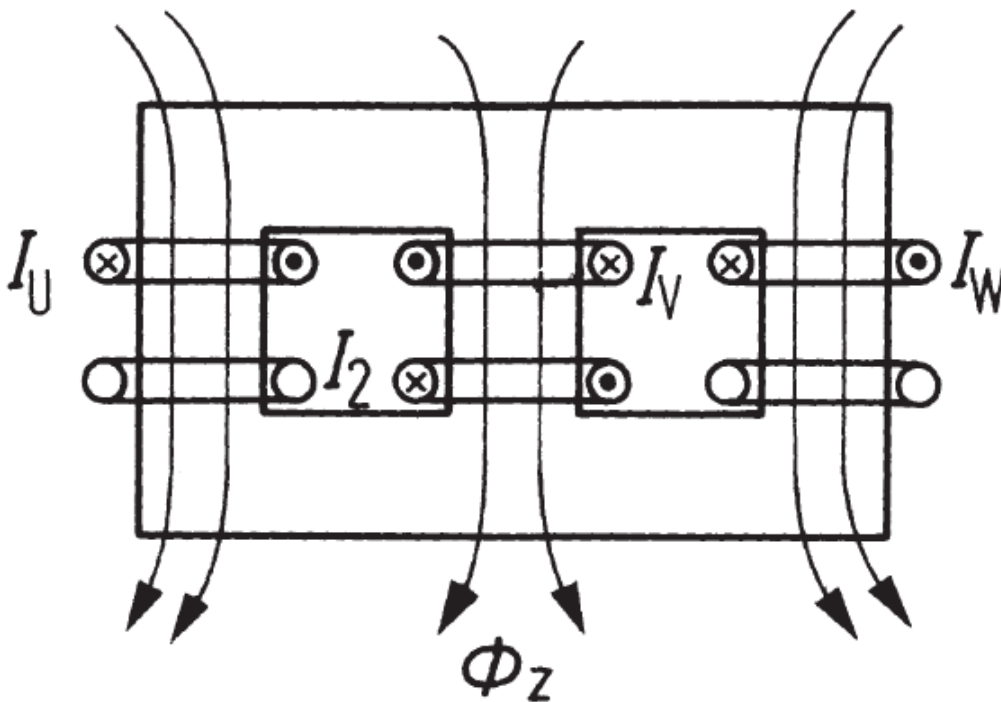


Bild 4-28: Der von der einphasigen Belastung verursachte Zusatzfluss eines Dreischenkels

Der von der einphasigen Belastung verursachte Durchfluss ist in Bild 4-28 abgebildet. Um die Ströme an der Oberspannungsseite herauszufinden, werden das erste Kirchhoffsche Gesetz bzw. Knotenpunktsatz nach Bild 4-27 und die Durchflutungsgleichungen nach Bild 4-28 aufgestellt. Die gesamte Summe der Durchflutungsgleichungen im Transformator ist gleich Null, da an der Oberspannungsseite die Netzspannungen mit gleicher Phase anliegen und diese Netzspannungen weitere Durchflüsse verursachen.

$$\underline{I}_U - \underline{I}_V + \underline{I}_W = 0$$

$$\underline{I}_U + \underline{I}_V - \underline{I}'_2 = 0$$

$$\underline{I}_U + \underline{I}_W - \underline{I}'_2 = 0$$

Daraus folgt:

$$I_U = I_W = \frac{1}{3} \cdot I'_2$$

$$I_V = \frac{2}{3} \cdot I'_2$$

Und die Formeln für Durchflutungen auf jedem Schenkel, die vom Belastungsstrom bewirkt werden, werden folgendermaßen aufgestellt:

$$\Theta_{z,U,W} = N_1 \cdot I_{U,W} = \frac{1}{3} \cdot N_1 \cdot I'_2$$

$$\Theta_{z,V} = N_1 \cdot (I'_2 - I_V) = \frac{1}{3} \cdot N_1 \cdot I'_2$$

Wie in Bild 4-28 dargestellt, kommen in Strängen die Flüsse Φ_z durch diese weiteren Flutungen zustande. Dadurch werden Spannungen ΔU_z in den Wicklungen erzeugt. Für den mittleren Schenkel werden die Vektordarstellungen in Bild 4-29 geschildert. Der Magnetisierungsstrom I_μ ist sehr klein als der Strom I'_2 . Diesbezüglich wird er nicht betrachtet. ($I_\mu \ll I'_2$). Er ruft jedoch den Hauptfluss Φ_h und die Strangspannung \underline{U}' hervor.

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

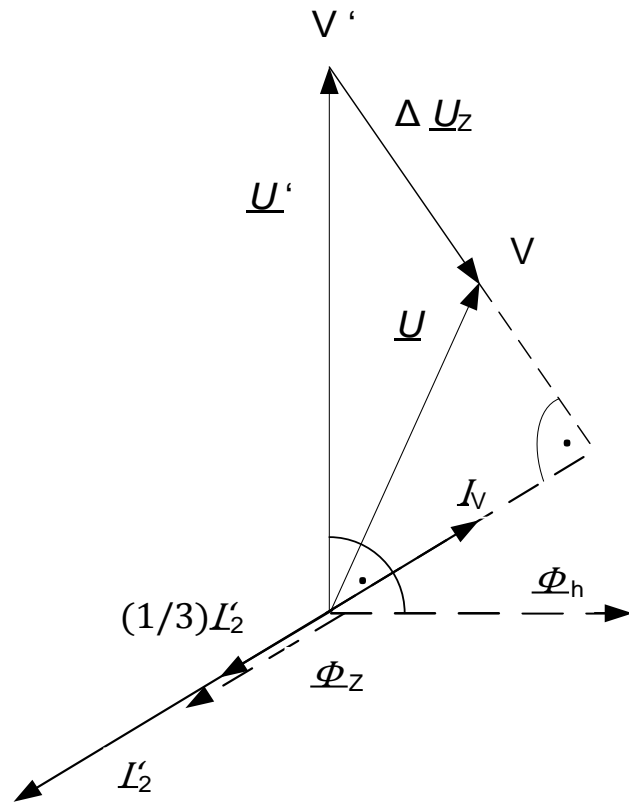


Bild 4-29: Zeigerdiagramm des belasteten Wicklungsstrangs bei einphasiger Belastung Yy-Schaltung

4.6.2. Zweiphasige Belastung in Yy-Schaltung

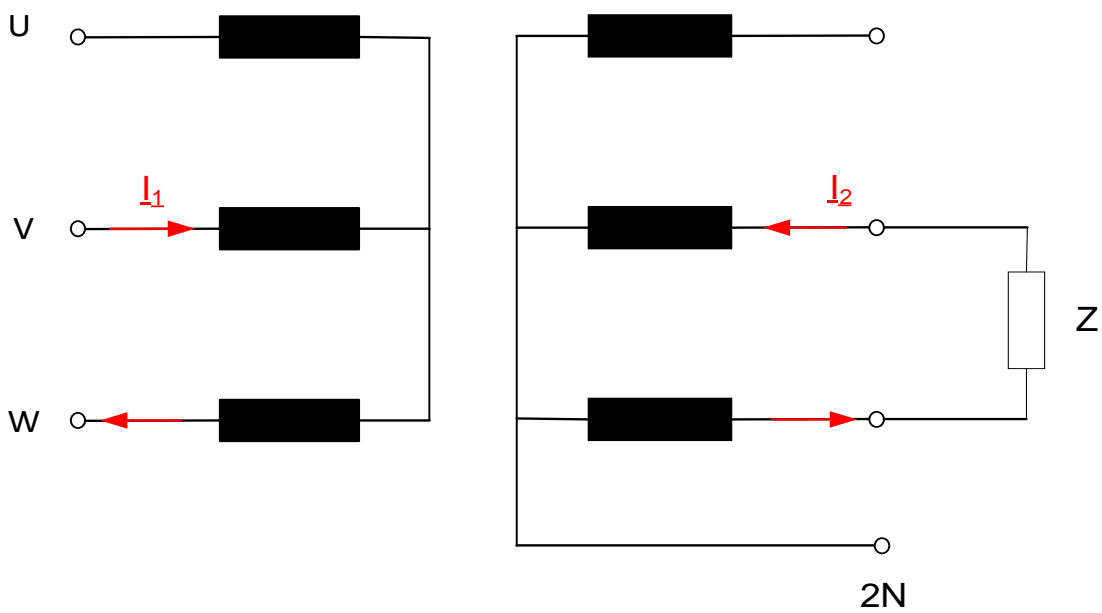


Bild 4-30: Schaltbild Zweiphasige Belastung

Der Drehstromtransformator wird sekundärseitig zwischen zwei Anschlüssen, zwischen v und w, belastet. Das Durchflutungsgleichgewicht wird nicht durch diese Belastung beeinflusst. Der Belastungsstrom bzw. Sekundärstrom I_2 wird durch den primärseitigen Strom I_1 ausgeglichen. Durch den restlichen Strang fließt kein Strom.

4.6.3. Einphasige Belastung in Dy-Schaltung

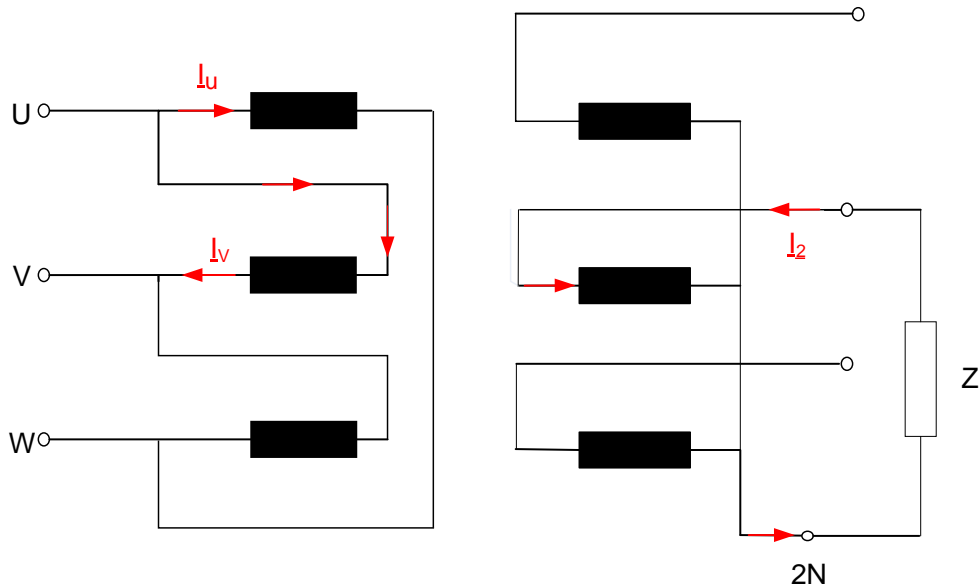


Bild 4-31: Schaltbild Einphasige Belastung in Dy-Schaltung

Wie in Schaltbild 4-31 abgebildet, fließt der Strom an der Primärseite ausschließlich über den belasteten Strang. Das magnetische Gleichgewicht wird dadurch nicht von der Belastung des Sternpunktes beeinträchtigt.

4.6.4. Einsträngige Belastung in Yz-Schaltung

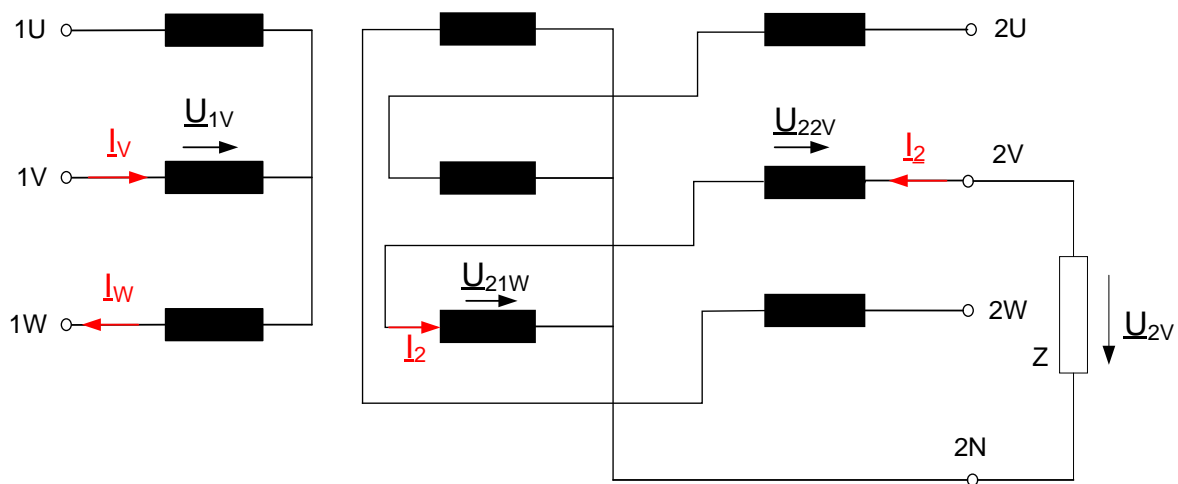


Bild 4-32: Schaltbild Einsträngige Belastung in Yz-Schaltung

Die Sekundärwicklungen werden hier jeweils in zwei gleiche Wicklungen geteilt. Wenn der mittlere Strang wie in Bild 4-32 gegen Neutralleiter belastet wird, fließt der Belastungsstrom I_2 durch die Stränge 2v4 und 2w2. Er wird von primärseitigen Strömen I_V und I_W ausgeglichen. Die Vektoren \underline{U}_{21W} und \underline{U}_{1W} sind mit gleicher Phasenlage gerichtet, wie \underline{U}_{22V} und \underline{U}_{1V} .

Mit dem Maschensatz wird die Spannung \underline{U}_{2V} berechnet.

$$\underline{U}_{2V} - \underline{U}_{21W} + \underline{U}_{22V} = 0$$

$$\underline{U}_{2V} = \underline{U}_{21W} - \underline{U}_{22V}$$

Mit dieser Gleichung werden die Spannungsvektoren wie in Bild 4-33 dargestellt.

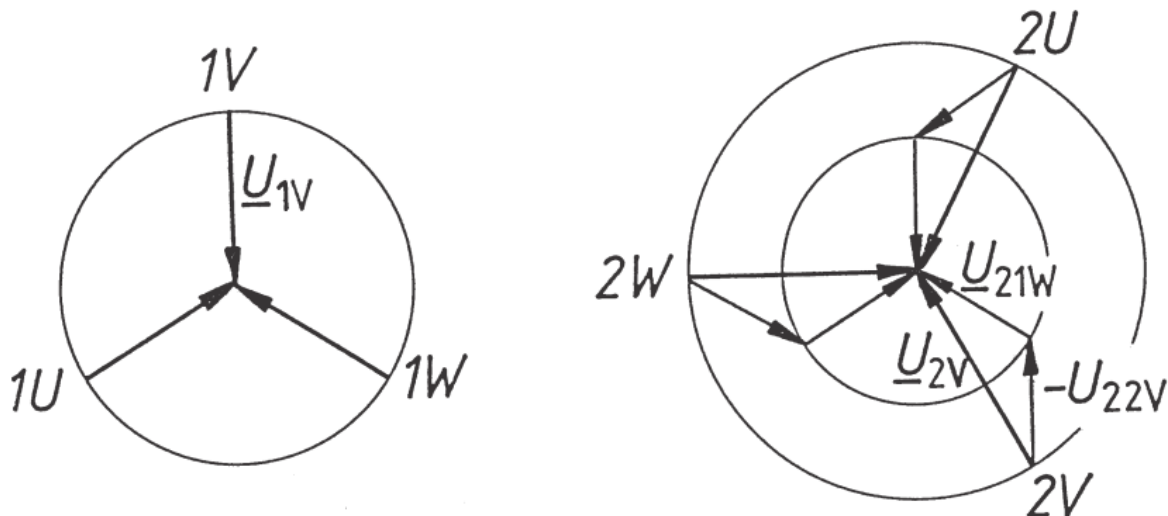


Bild 4-33: Spannungsvektoren in Yz5-Schaltung

Aufgrund dieser Phasenlage ergibt sich die Spannung U_2 folgender Maßen:

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

4.6.5. Yy-Schaltung mit Ausgleichwicklung

Zum Ausgleich des Durchflusses bei Belastung wird der in Yy geschalteter Transformator mit einer Dreieckschaltung, wie in Bild 4-34, ausgebaut. Der zunächst nicht ausgeglichene Strom $\underline{I}'_3 = \underline{I}'_2/3$ wird mit Ausgleichsschaltung als Kreisstrom geleitet. Der Durchfluss mit den Belastungsströmen für die belastete Phase

$$\theta_V = N_1 \cdot (\underline{I}'_2 - \underline{I}'_3 - \underline{I}_V) = N_1 \cdot \left(\underline{I}'_2 - \frac{1}{3} \cdot \underline{I}'_2 - \frac{2}{3} \cdot \underline{I}'_2 \right) = 0$$

Es kommt hier nicht zu einer Sternpunktverschiebung bei der Belastung des Sternpunktes.

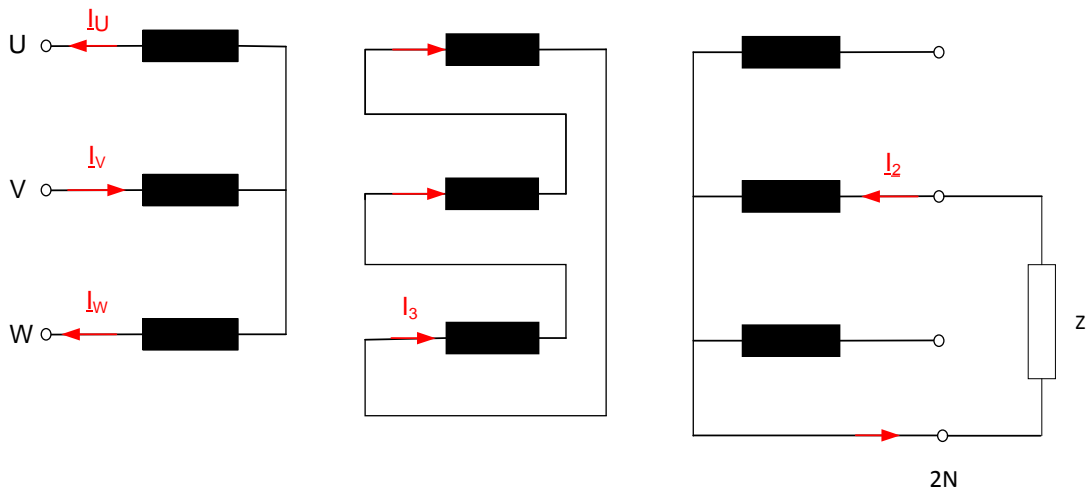


Bild 4-34: Schaltbild Einphasige Belastung in Yy-Schaltung mit Ausgleichswicklung

4.6.6. Sternpunktverschiebung

Wenn der zusätzliche Betrag ΔU_z zu allen Strangspannungen wie in Bild 4-35 summiert wird, dann werden die Strangspannungen zwischen $0'U$, $0'V$, $0'W$ erzeugt. In dem Fall heißt es Sternpunktverschiebung von 0 nach $0'$, aufgrund dessen, dass die Außenleiterwerte und gleichzeitig das Dreieck UVW mit dem Netz verbunden sind. Die Strangwicklung, die einphasig unter Belastung steht, stürzt in ihrer Strangspannung zum Teil ab. Das Ausmaß dieses Absturzes wird nach der Definition $\Phi_z = \theta_z \cdot \Lambda_z$ bei vorhandener Belastung und damit θ_z vom magnetischen Leitwert Λ_z bestimmt, mit dem der Zusatzfluss zusammenhängt. Der Zusatzfluss ist auf den Streukreis, bzw. von Joch zu Joch bauformabhängig begrenzt. Er wird dahingegen bei drei zusammengeführten Einphasentransformatoren oder dem Fünfschenkelkern auf dem Eisenwege über den freien Rückschluss erzeugt. Hier wird bei Belastung des Sternpunkts eine große Nullpunkt-, bzw. Sternpunktverschiebung abgesehen. [2]

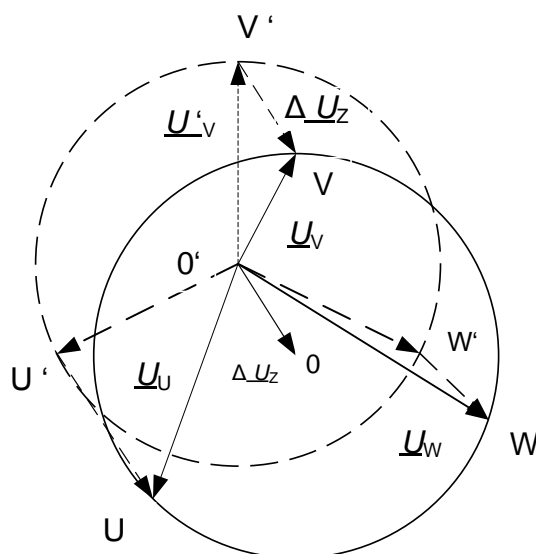


Bild 4-35: Sternpunktverschiebung bei einphasiger Belastung in Yy-Schaltung

4.6.7. Symmetrische Komponenten

Die mathematische Definition der unsymmetrischen Strömen und Spannungen wird *Symmetrische Komponenten* genannt. Mit dieser Definition wird die Berechnung der Ströme und Spannungen einfacher gemacht. Zur Vereinfachung der Berechnung kann ein symmetrisches Drehstromsystem mit seinen Ersatzschaltbildern und Vektoren auf eine einphasige Darstellung umgeformt werden. Dies ist bei unsymmetrischem Drehstromsystem nicht der Fall. Jede Phase bzw. jeder Strang ist in diesem System mit verschiedenen Strömen, Spannungen und Impedanzen verschaltet. Aus diesem Grund sind die Berechnungen bei diesem System schwieriger als bei symmetrischem Drehstromsystem.

Diese unerwünschte Situation der Berechnung der unsymmetrischen Belastung wird mit symmetrischen Komponenten behoben. Das unsymmetrische Drehstrombelastungssystem mit dieser Vorgehensweise in drei symmetrische Komponententeile umgeformt. Darin wird das unsymmetrische Strom- und Spannungssystem als Überlappung von drei symmetrischen Komponenten, wie Null- Mit- und Gegensystem, nachgebildet (Bild 4-36 [5]). So kann ein irgendein Drehstromsystem mit höchstens drei symmetrischen Drehstromsystemen nachgebildet werden.

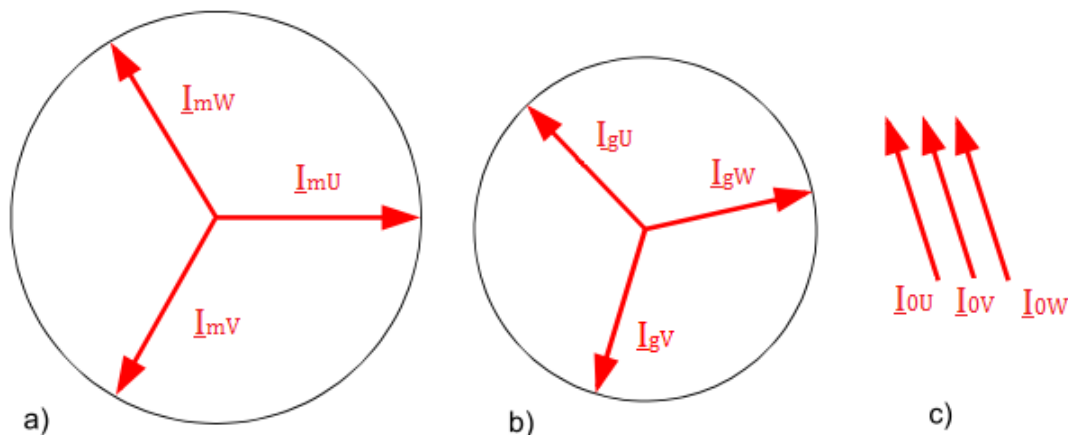


Bild 4-36: Darstellung Symmetrische Komponenten, a) Mitsystem, b) Gegensystem, c) Nullsystem

Die Leitergrößen mit gleichem Betrag und gleicher Richtung bilden das Nullsystem

$$\underline{I}_{0U} = \underline{I}_{0V} = \underline{I}_{0W}$$

Beim Mitsystem haben die Leitergrößen in Bild 4-36 gleichen Betrag jedoch um 120° verschobene Richtung.

$$I_{mU} = I_{mV} = I_{mW}$$

$$\underline{I}_{mU} + \underline{I}_{mV} + \underline{I}_{mW} = 0$$

Das Gegensystem hat sowie Mitsystem die Leitergrößen mit gleichem Betrag und ebenso einer Phasenverschiebung um 120° . Das Gegensystem stellt ein umgekehrtes System mit umgekehrter Phasenfolge.

$$I_{gU} = I_{gV} = I_{gW}$$

$$\underline{I}_{gU} + \underline{I}_{gV} + \underline{I}_{gW} = 0$$

Da es von Generatoren im Normalbetrieb mit einem echten symmetrischen Drehstromsystem, das ein Mitsystem ist, versorgt wird, tritt eine anregende Spannung \underline{U}_1 ausschließlich im Mitsystem auf. Der Winkelwert von $120^\circ = \frac{2}{3}\pi$ wird durch die Bezeichnung \underline{a} ersetzt.

$$\underline{a} = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{1}{2} \cdot \sqrt{3}$$

$$\underline{a}^2 + \underline{a} + 1 = 0$$

Mit der Bezeichnung \underline{a} , auch gelten nun die folgenden Matrix-Gleichungen für die Symmetrie

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_0 \\ \underline{I}_m \\ \underline{I}_g \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_U \\ \underline{I}_V \\ \underline{I}_W \end{bmatrix}$$

und die Unsymmetrie

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_U \\ \underline{I}_V \\ \underline{I}_W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_0 \\ \underline{I}_m \\ \underline{I}_g \end{bmatrix}$$

Entsprechend können die Gleichungen für die symmetrischen Elemente U_0 , U_m und U_g sowie für die Strangspannungen U_U , U_V und U_W aufgestellt werden. Mit den Leiterströmen und der unsymmetrischen Impedanz-Matrix wird die ursprüngliche Matrixgleichung zur Berechnung der Strangspannungen folgendermaßen aufgestellt

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_U \\ \underline{U}_V \\ \underline{U}_W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{UU} & \underline{Z}_{UV} & \underline{Z}_{UW} \\ \underline{Z}_{VU} & \underline{Z}_{VV} & \underline{Z}_{VW} \\ \underline{Z}_{WU} & \underline{Z}_{WV} & \underline{Z}_{WW} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_U \\ \underline{I}_V \\ \underline{I}_W \end{bmatrix}$$

Wenn diese Gleichung durch den symmetrischen Elementen ersetzt wird, ergibt sich die folgende Matrixgleichung für symmetrische Spannungen

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_0 \\ \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{00} & \underline{Z}_{0m} & \underline{Z}_{0g} \\ \underline{Z}_{m0} & \underline{Z}_{mm} & \underline{Z}_{mg} \\ \underline{Z}_{g0} & \underline{Z}_{gm} & \underline{Z}_{gg} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_0 \\ \underline{I}_m \\ \underline{I}_g \end{bmatrix}$$

Für zusammengeführte Leitungen mit Längsimpedanzen mit der Symmetriebedingung wird das Gleichungssystem in einfachster Form mit folgender Matrixgleichung ermittelt

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_0 \\ \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_0 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_m & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_g \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_0 \\ \underline{I}_m \\ \underline{I}_g \end{bmatrix}$$

mit Nullimpedanz Z_0 , Mitimpedanz Z_m , Gegenimpedanz Z_g , und symmetrischen Null-, Mit- und Gegetrömen I_0, I_m, I_g .

5. Praktische Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung wurde mit einem Drehstromtransformator von Firma Getra GmbH mit folgenden Daten (mit einem Gehäuse in Bild 5-1 abgebildet) durchgeführt:

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

Neben den Werten auf dem Typenschild wurden nur noch Widerstandsmessungen vom Hersteller angegeben. Er weigerte sich, die restlichen Daten über den Transformator, wie z.B. Reaktanzen, Windungszahlen usw., bekannt zu geben bzw. mitzuliefern. Vom Hersteller angegebene Wicklungswiderstandswerte:

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 5-1: Widerstandsangaben vom Hersteller

Während des Versuchs wurde festgestellt, dass die Widerstandsangaben vom Hersteller mit den gemessenen Widerstandswerten nahezu übereinstimmen.

Die Kurzschlusswiderstände weichen jedoch von obigen Angaben ab. Dies liegt vermutlich daran, dass zwei Sekundärwicklungen, wie in Bild 5-1 dargestellt, pro Schenkel gewickelt sind.

Für alle Aufnahmen vom Oszilloskop gilt, dass alle Messwerte Effektivwerte sind



Bild 5-1: Drehstromtransformator Vorderansicht

5.1. Aufgabenstellung zu Versuchsdurchführung

I. Widerstandsmessung:

Die Wicklungswiderstände R_{1U1_1U2} , R_{1V1_1V2} , R_{1W1_1W2} , R_{2u1_2u2} , R_{2v1_2v2} , R_{2w1_2w2} , R_{2u3_2u4} , R_{2v3_2v4} , R_{2w3_2w4} sind mit dem Multimeter zu messen. Da es sekundärseitig 2 gleiche Wicklungen auf einem Schenkel liegen, müssen die Anzapfungen 2u2, 2u3, 2v2, 2v3, 2w3, 2w4 folgendermaßen verbunden werden, um die Widerstände R_{2u1_2u4} , R_{2v1_2v4} , R_{2w1_2w4} zu messen,:

$$2u2 \rightarrow 2u3, 2v2 \rightarrow 2v3, 2w2 \rightarrow 2w3$$

U, V, W beschreiben Primär- und u, v, w die Sekundärwicklungen. Die Zahl links vom Kennbuchstaben gibt den Anfangspunkt der Spule und die Zahl rechts den Endpunkt der Spule an.

Messergebnisse:

Die Wicklungswiderstände wurden mit dem Multimeter *ABB Metrawatt M2036* gemessen. Diese Messung kann auch mit einem ähnlichen Multimeter durchgeführt werden. Die Messungen liefern folgende Ergebnisse:

Klemmen	R/Ω	Klemmen	R/Ω
1U1-1U2	0,27	2u1-2u2	0,27
1V1-1V2	0,30	2v1-2v2	0,29
1W1-1W2	0,26	2w1-2w2	0,26
2u1-2u4	0,51	2u3-2u4	0,25
2v1-2v4	0,50	2v3-2v4	0,25
2w1-2w4	0,51	2w3-2w4	0,25

Tabelle 5-2: Widerstandmessung

Es ist zu beachten, dass die Ergebnisse eventuell korrigiert werden müssen, da die Messungskabel auch einen Kabelwiderstand R_{Kabel} haben, mit dem am Display des Messgerätes ein höherer Wert angezeigt wird.

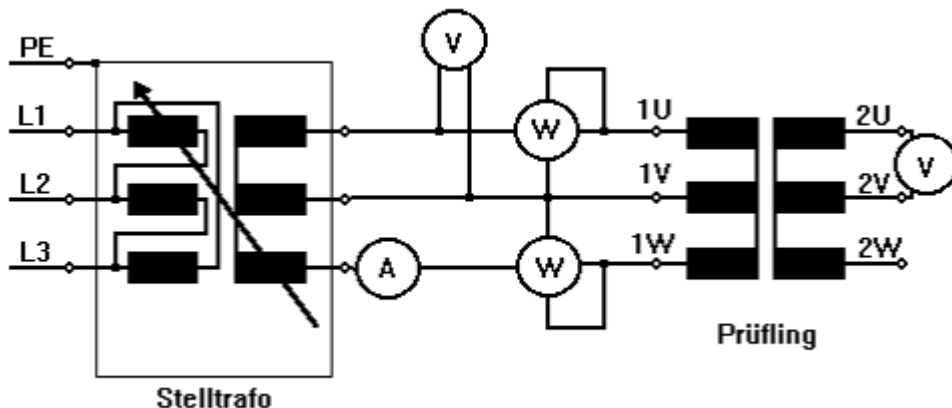
II. Leerlaufversuch:

Bild 5-2: Schaltbild Leerlaufversuch

[6]

Der Schaltkreis nach dem nach dem Schaltbild in Bild 5-2 aufzubauen. Die Primärspannungen an Primärwicklungen werden vom Netz über einen Stelltransformator mit der Spannung $U_{1N} = 400$ (Effektivwert pro Phase) zugeführt. Mit dem Leerlaufversuch können folgende Elemente bestimmt werden:

Das Übersetzungsverhältnis \ddot{u} :

$$\ddot{u} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{U_1}{U_q}, \text{ hier } U_2 = U_q$$

Leerlaufstrom

$$I_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot \cos \varphi_0}$$

den Widerstand R_{Fe} zum Prüfen von den Eisenverlusten P_{Fe}

$$R_{Fe} = \frac{U_1^2}{P_{Fe}}, \quad \text{mit } P_{Fe} = P_0$$

die Leerlaufimpedanz

$$Z_0 = \frac{U_1}{I_0} = \frac{Q_0}{3 \cdot I_\mu^2} = X_{1\sigma} + X_h$$

und die Hauptreaktanz X_h

$$X_h^2 = Z_0^2 \cdot R_{Fe}^2 / R_{Fe}^2 - Z_0^2$$

den Leistungsfaktor $\cos \varphi_0$

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_0}$$

Messergebnisse:

Der Leerlaufversuch wurde mit der Yy0-Schaltung des Transformators durchgeführt. Zum Übersetzungsverhältnis wurden folgende Kurven am Oszilloskop aufgenommen

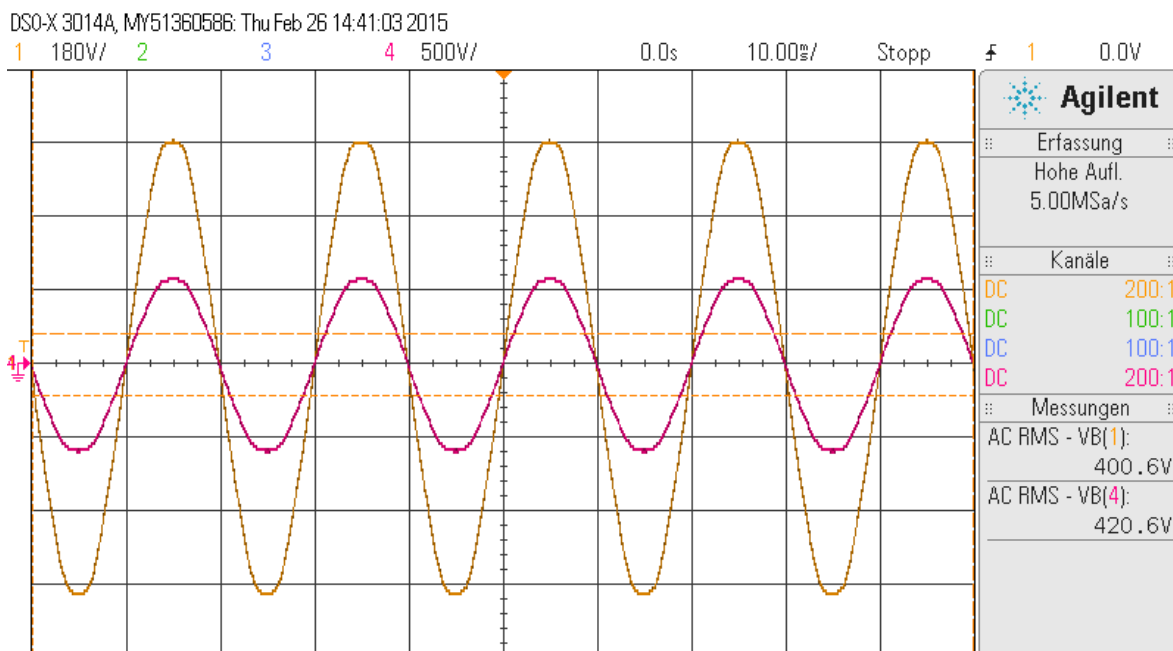


Bild 5-3: Spannungsübersetzungsverhältnis

Mit den Spannungen an Primär- und Sekundärseiten ergibt sich

$$\ddot{u} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{400,6V}{420,6V} = 0,9524$$

Die Windungszahl der Sekundärwicklung ist vermutlich um 5% größer als die Windungszahl der Primärwicklung, sodass die Sekundärspannung um etwa 20V mehr ist als die Primärspannung.

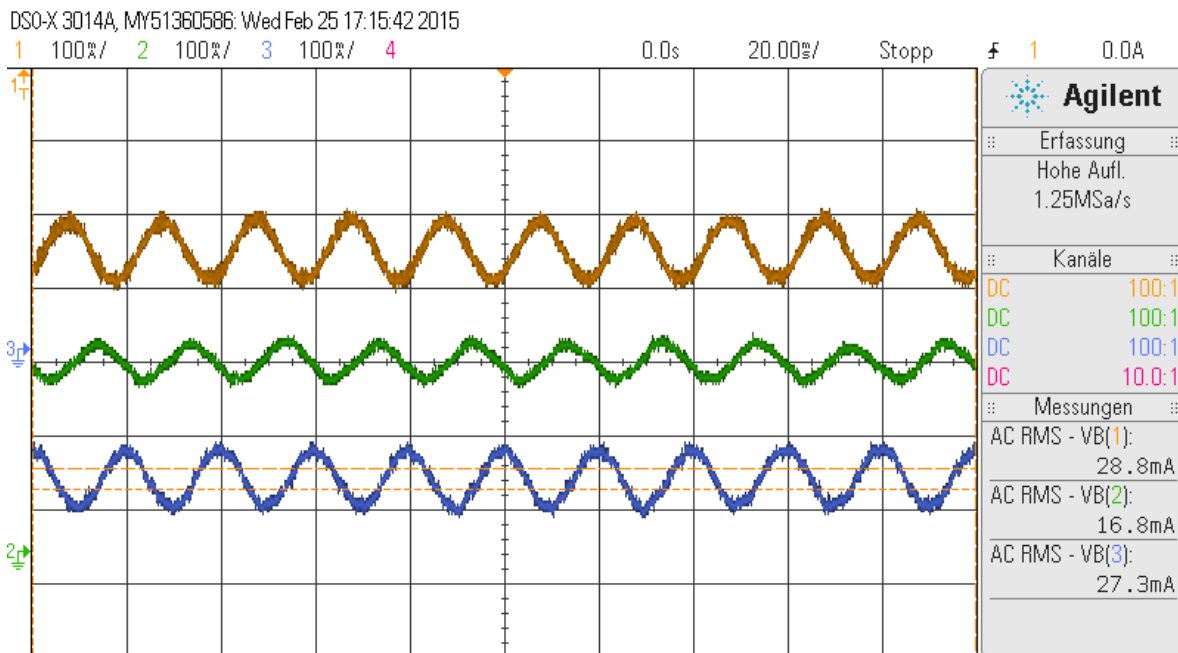


Bild 5-4: Leerlaufströme bei $U_1 = 0,25 \cdot U_N$

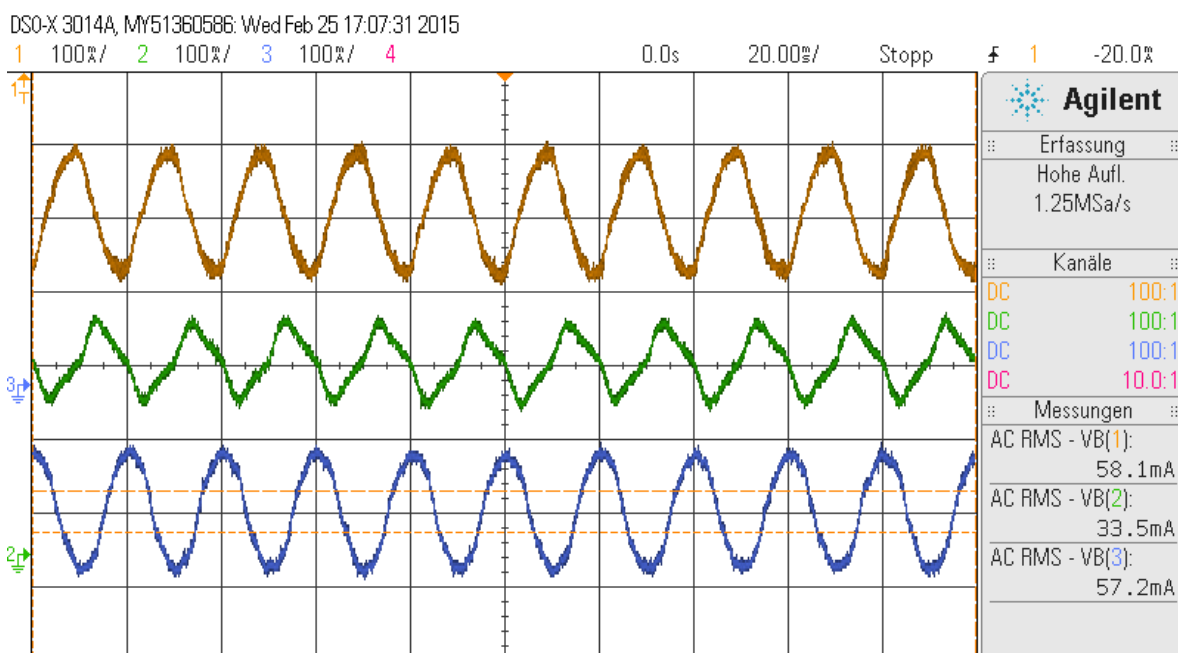


Bild 5-5: Leerlaufströme bei $U_1 = 0,5 \cdot U_N$

Die Kennlinien von Leerlaufstrom nähern der Form einer Sinuskurve erst bei halber Nennspannung $U_1 = 0,5 \cdot U_N$. Eine relative Sinusform für Leerlaufstrom liefert der Leerlauf bei der $U_1 = 0,25 \cdot U_N$. Der Leerlaufstrom bei Nennspannung ist um ca. 7-Fache größer als der Leerlaufstrom bei halber Nennspannung und ca. 15-Fache größer als bei $0,25 \cdot U_N$.

Der Strom, der am mittleren Schenkel fließt, ist in allen drei Fällen ca. 55-65% der Ströme, die an äußeren Schenkeln fließen. Dieser Strom hat den Wert von 0,2755 A (0,3 A am Leistungsmesser) und nicht mehr die Sinusform (Bild 5-6). Die Verformung liegt am Hysterese-Verhalten des Transformators, das mit z.B. Aufbau, Herstellungsmaterialien und Isolation des Transformators zusammenhängt.

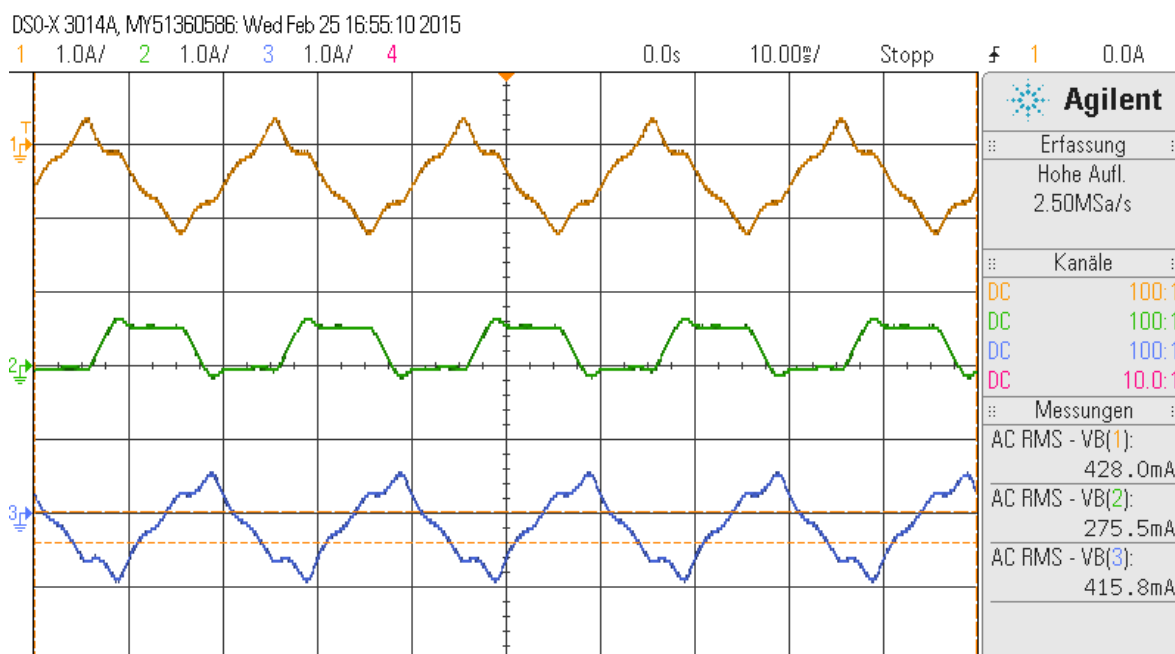


Bild 5-6: Leerlaufströme bei $U_1 = U_N$

Am Leistungsmessgerät wurde abgelesen

$$P_0 = 26W, \quad \cos \varphi_0 = 0,095$$

Damit ist der Leerlaufstrom

$$I_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot \cos \varphi_0} = \frac{26 W}{\sqrt{3} \cdot 400 V \cdot 0,095} \Rightarrow I_0 = 0,395 A$$

Der Eisen- und Magnetisierungsstrom

$$I_{Fe} = I_0 \cdot \cos \varphi_0 = 0,39 A \cdot 0,095 \Rightarrow I_{Fe} = 0,037 A$$

$$I_{\mu} = I_0 \cdot \sin \varphi_0 \Rightarrow I_{\mu} = 0,388 A$$

Und der Eisenwiderstand

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

$$R_1 + R_{Fe} = \frac{P_0}{3 \cdot I_{Fe}^2} \cong 6,3 \text{ k}\Omega \Rightarrow R_{Fe} \cong 6,3 \text{ k}\Omega \text{ da } R_{Fe} \gg R_1$$

Leerlaufimpedanz

$$Z_0 = \frac{U_1}{I_0} = \frac{400 \text{ V}/\sqrt{3}}{0,395 \text{ A}} \cong 584,6585 \Omega$$

Die Leerlaufimpedanz kann auch über die Blindleistung, die vom Leistungsmessgerät abgelesen wird, ermittelt werden

$$Q_0 = 3 \cdot I_{\mu}^2 \cdot (X_{1\sigma} + X_h)$$

$$270 \text{ var} = 3 \cdot (0,388 \text{ A})^2 \cdot (X_{1\sigma} + X_h)$$

$$X_{1\sigma} + X_h = 597,83 \Omega$$

$$X_h \cong 597,83 \Omega \text{ da } X_h \gg X_{1\sigma}$$

$$X_h = 2\pi \cdot 50 \frac{1}{s} \cdot \Rightarrow L_h = 1,90 \text{ H}$$

Der Leistungsfaktor

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_0} = \frac{26 \text{ W}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 0,395 \text{ A}} \Rightarrow \cos \varphi_0 = 0,095 \Rightarrow \varphi_0 = 84,5483^\circ$$

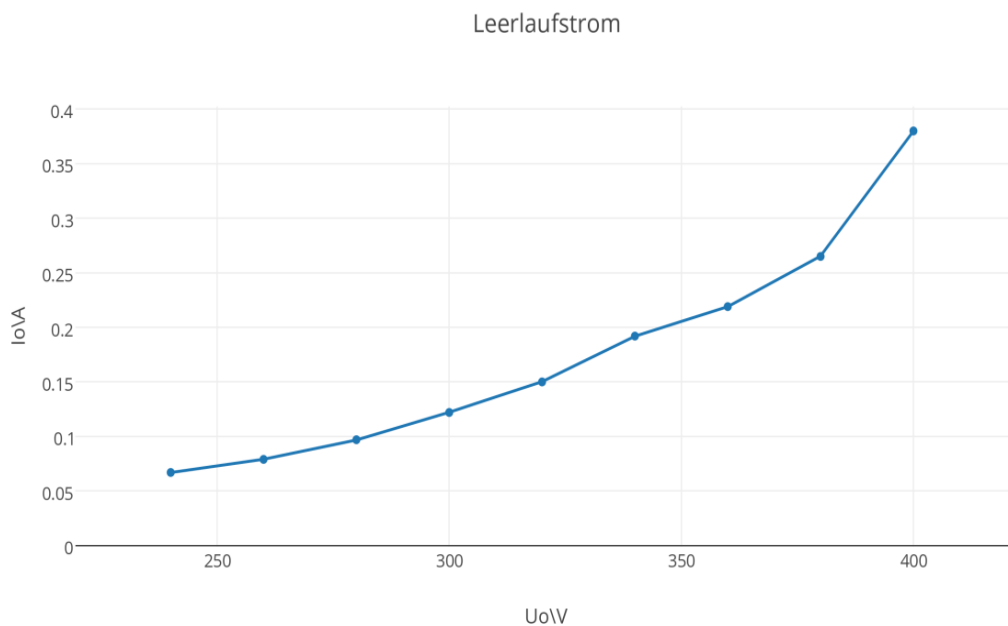


Bild 5-7: Kurve $I_0 = f(U_0)$

III. Kurzschlussversuch:

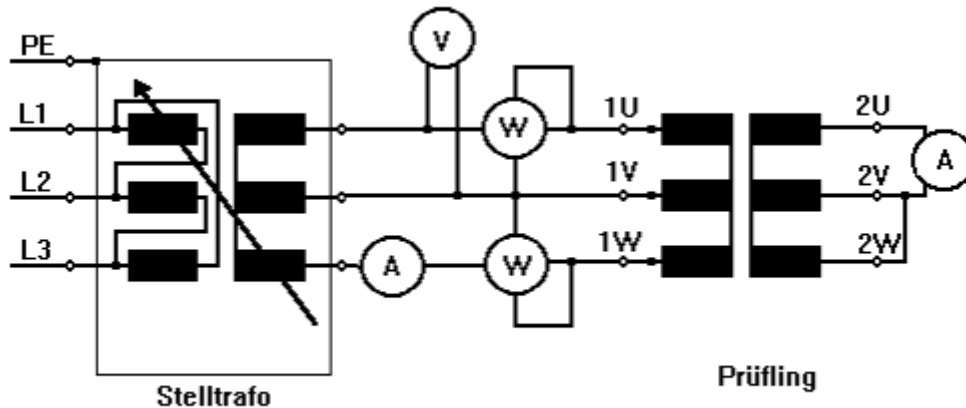


Bild 5-8: Schaltbild Kurzschlussversuch

[6]

Der Kurzschlussversuch wird auch in Yy0-Schaltung des Transformators durchgeführt. Der Schaltkreis nach dem in Bild 5-8 dargestellten Schaltbild aufzubauen.

Beim Kurzschlussversuch wird die Spannung $U_{1k} = U_1$ so eingestellt, dass der Nennstrom I_{2N} (hier: $I_{2N} = I'_2 = I_2 \cong 7,2 \text{ A}$) an der Sekundärseite erreicht wird. Der Magnetisierungsstrom I_μ kann bei diesem Versuch vernachlässigt werden, da die Sekundärwicklungen kurzgeschlossen werden. Damit ist $I_1 = I'_2$. Da die Kurzschlussspannung kleiner ist als die Nennspannung, werden die Eisenverluste beim Kurzschlussversuch vernachlässigt. Die aufgenommene Kurzschlusswirkleistung $P_k = P_{CuN}$. Sie gibt auch die Stromwärmeverluste des Transformators an. Mit einem Leistungsmesser, der primärseitig angeschlossen wird, werden die Kupferverluste gemessen. Mit dem Kurzschlussversuch können folgende Elemente bestimmt werden:

Stromübersetzungsverhältnis

$$\ddot{u} = \frac{I_2}{I_1}$$

die relative Kurzschlussspannung u_k

$$u_k = \frac{\sqrt{3} \cdot U_1}{\sqrt{3} \cdot U_N} \cdot 100\% = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{1k}}{\sqrt{3} \cdot U_{1N}} \cdot 100\% = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{2k}}{\sqrt{3} \cdot U_{2N}} \cdot 100\%$$

ohmschen Kurzschlusswiderstand R_k

$$R_k = R_1 + R'_2 + R'_{kabel} = \frac{P_{CuN}}{3 \cdot I_1^2} = \frac{P_k}{3 \cdot I_{1N}^2}$$

die Kurzschlussimpedanz Z_k

$$Z_k = |R_k + jX_k| = \frac{U_1}{I_1}; Z_k < Z_0.$$

den Kurzschlussleistungsfaktor $\cos \varphi_k$

$$\cos \varphi_k = \frac{R_k}{Z_k}$$

die Kurzschlussreaktanz X_k

$$X_k = X_{1\sigma} + X'_{2\sigma} = Z_k \cdot \sin \varphi_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}$$

$$\frac{R_1}{R'_2} \approx \frac{X_{1\sigma}}{X'_{2\sigma}}$$

den Dauerkurzschlussstrom I_{kd}

$$I_{kd} = \frac{I_N}{u_k} \cdot 100\%$$

Stoßkurzschlussstrom i_s

$$I_s = 2,55 \cdot I_{kd}$$

Messergebnisse:

Übersetzungsverhältnis

$$\ddot{u} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{7,2 \text{ A}}{6,755 \text{ A}} \cong 1,06590$$

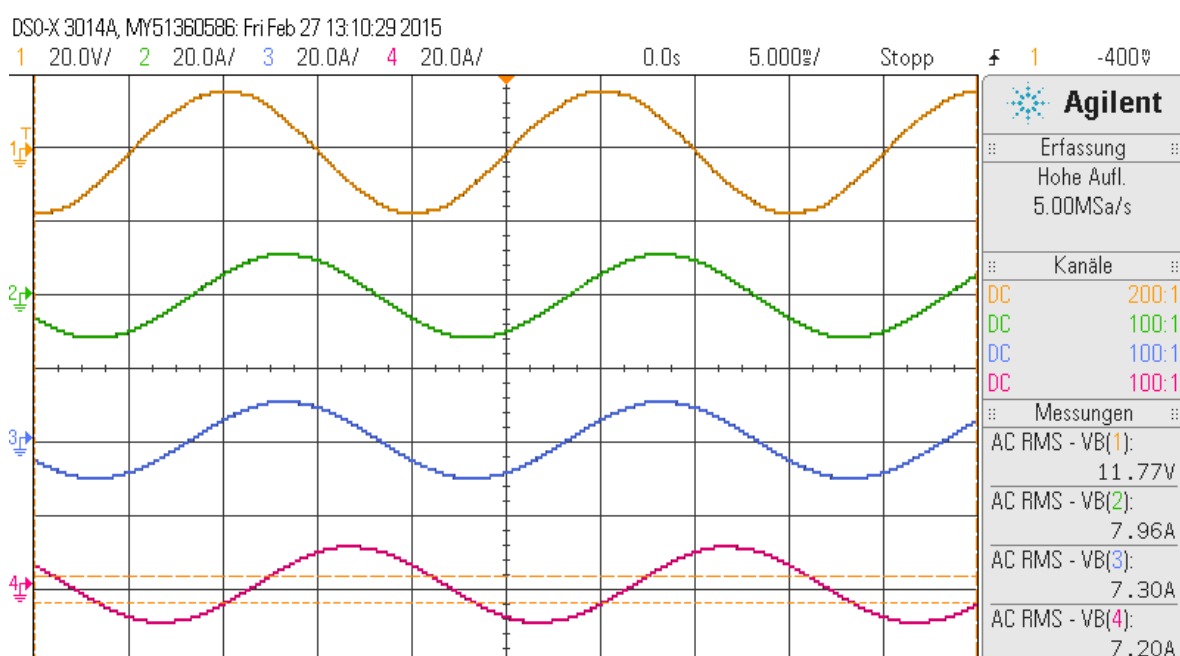


Bild 5-9: Stromübersetzungsverhältnis, mit $I_1 \triangleq \frac{(11,7 \text{ V})}{\sqrt{3}} = 6,755 \text{ A}$

Nachdem der Sekundärstrom auf Nennwert eingestellt wurde, wurden die folgenden Strom- und Spannungskurven mit dem Oszilloskop aufgenommen.

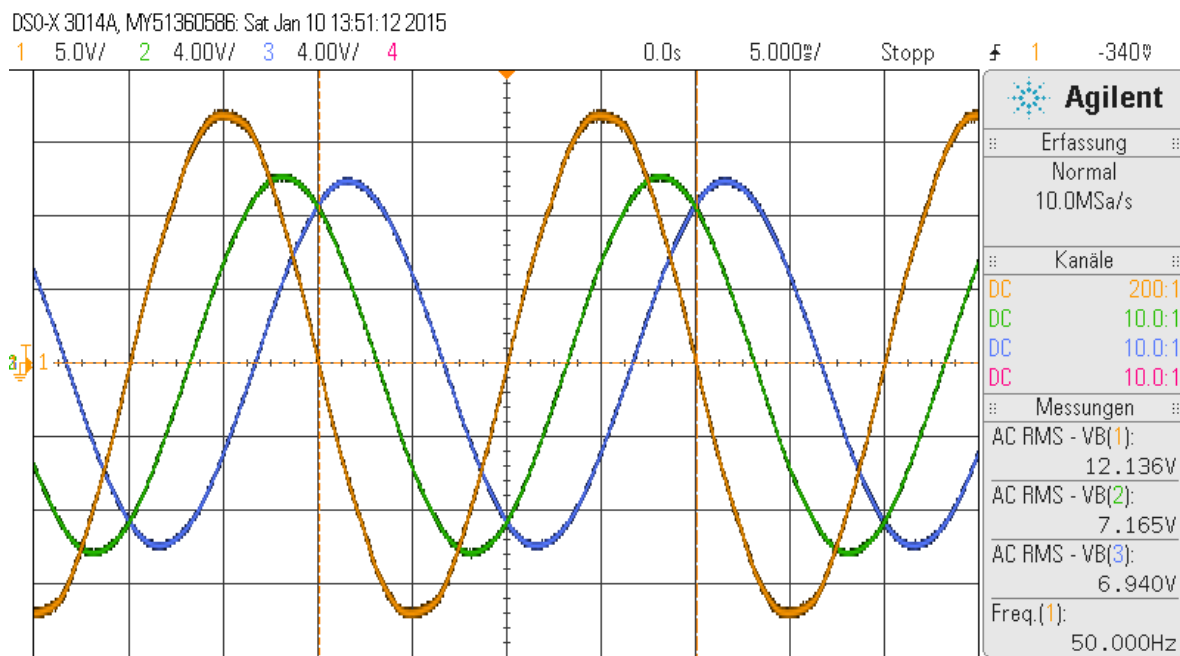


Bild 5-10: Kurzschlussspannung und -ströme

$$U_{1U1-1V1} = 12,136 \Rightarrow U_{1U1-N} = U_1 = \frac{12,136}{\sqrt{3}} \text{ V} \Rightarrow U_1 \cong 7 \text{ V}$$

$$I_{2u4-2v4} = 7,165 \text{ A} \cong 7,165 \text{ V in Abb.}; \quad I_{2v4-2w4} = 6,940 \text{ A} \cong 6,940 \text{ V in Abb.}$$

$$I_2 = \frac{7,165 + 6,940}{2} \text{ A} \cong 7 \text{ A}$$

Die vom Leistungsmesser angezeigten Werte:

$$P_k = 128 \text{ W}, \quad S_k = 138 \text{ VA}, \quad Q_k = 50 \text{ var}, \quad \text{PF} = \cos \varphi_k = 0,931$$

$$U_U = U_V = 11,8 \text{ V}, \quad U_W = 11,3 \text{ V}$$

$$I_U = 7,34 \text{ A}, \quad I_V = 5,98 \text{ A}, \quad I_W = 7,2 \text{ A}$$

Relative Kurzschlussspannung

$$u_k = \frac{U_1}{U_N} \cdot 100\% = \frac{12,136 \text{ V}}{400 \text{ V}} \cdot 100\% = 3,034$$

Eingangsstrom

$$I_1 = I_k = \frac{P_k}{\sqrt{3} \cdot U_k \cdot \cos \varphi_k} = \frac{128 \text{ W}}{\sqrt{3} \cdot 11,8 \text{ V} \cdot 0,931} \cong 6,73 \text{ A}$$

Der Ohmsche Widerstand

$$R_{k_mit_kabel} = R_1 + R'_2 + R'_{kabel} = \frac{P_{CuN}}{3 \cdot I_1^2}$$

$$R_{k_mit_kabel} = R_1 + R'_2 + R'_{kabel} = \frac{P_{CuN}}{3 \cdot I_1^2} = \frac{128 \text{ W}}{3 \cdot (6,73 \text{ A})^2} \cong 0,942 \Omega$$

$$R_1 + R'_2 = R_{k_mit_kabel} - R'_{kabel} = (0,942 - 0,15 \cdot \ddot{u}^2) \Omega$$

$$R_k = R_1 + R'_2 = 0,792 \Omega, \text{ mit } \ddot{u} \cong 1$$

$$\Rightarrow R_1 = R'_2 = 0,396 \Omega$$

Die Kurzschlussimpedanz

$$Z_k = |R_k + jX_k| = \frac{U_1}{I_1} = \frac{(11,8/\sqrt{3}) \text{ V}}{6,73 \text{ A}} \cong 1,0123 \Omega$$

und damit sind die Kurzschlussreaktanzen

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = (1,0123^2 - 0,792^2) \Omega = 0,3975 \Omega$$

$$X_{1\sigma} = X'_{2\sigma} = 0,19875 \Omega$$

Der Dauerkurzschlussstrom

$$I_{kd} = I_{kN} = \frac{I_N}{u_k} \cdot 100\% = \frac{7,2 \text{ A}}{0,03034} = 237,31 \text{ A}$$

damit ist der Stoßkurzschlussstrom

$$i_s = 2,55 \cdot I_{kd} = 2,55 \cdot 237,31 \text{ A} = 605,14 \text{ A}$$

und der Kurzschlussleistungsfaktor $\cos \varphi_k$

$$\cos \varphi_k = \frac{R_k}{Z_k} = \frac{0,792 \Omega}{1,0123 \Omega} \cong 0,7824$$

IV. Unsymmetrische Belastung

Einphasige Belastung des Transformators mit Yy-Schaltung

Der Transformator ist einphasig an der Sekundärsite zu belasten. Die mittlere Phase wird dabei mit einem Ohmschen Widerstand $R_L = 90 \Omega$ gegen den Sternpunkt, wie in Bild 4-27, belastet. Die Eingangsspannung $U_1 = 400 \text{ V}$ einzustellen.

Messergebnisse:

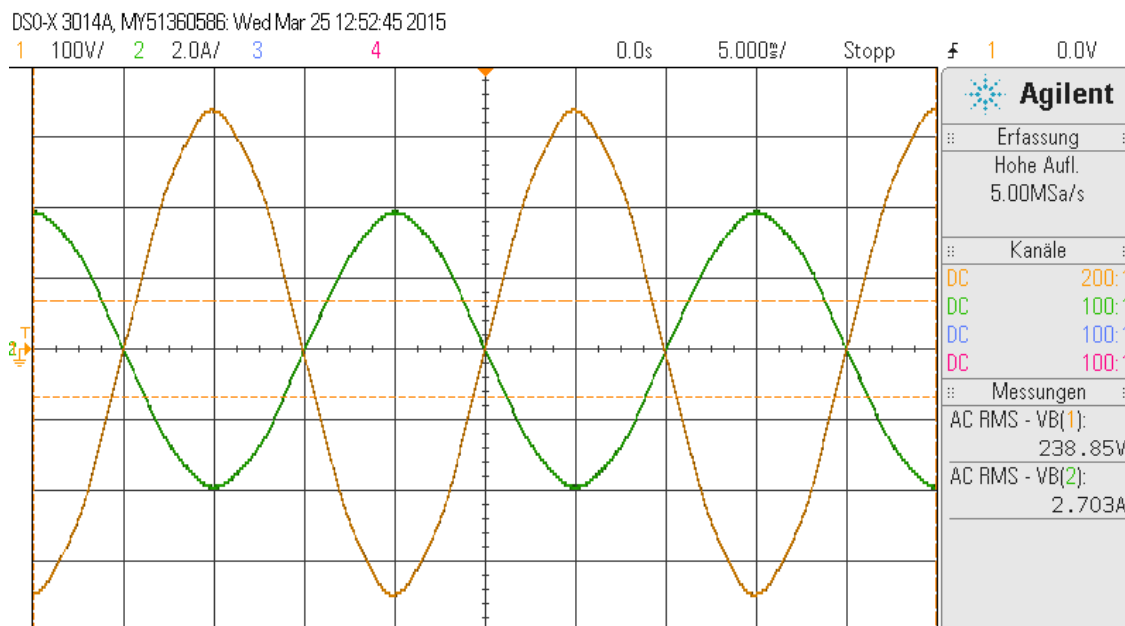


Bild 5-11: Einphasige Belastung bei Yy, $I_2 = I_L = 2,703 \text{ A}$, $U_L = 238,85 \text{ V}$, $R_L = 90 \Omega$

Am Leistungsmessgerät abgelesen:

$$P = 681 \text{ W}, \quad S = 885 \text{ VA}, \quad Q = 566 \text{ var}, \quad \text{PF} = \cos \varphi = 0.769$$

$$U_1 = 401,2 \text{ V}, \quad I_U = 0,612 \text{ A}, \quad I_V = 1,896 \text{ A}, \quad I_W = 1,276 \text{ A}$$

Die Theorie besagt

$$\underline{I}_U - \underline{I}_V + \underline{I}_W = 0$$

$$\underline{I}_U + \underline{I}_V - \underline{I}'_2 = 0$$

$$\underline{I}_U + \underline{I}_W - \underline{I}'_2 = 0$$

Damit

$$\underline{I}_U + \underline{I}_W = \underline{I}_V$$

$$(0,612 + 1,276) \text{ A} = 1,888 \text{ A} \cong 1,896 \text{ A}$$

$$\underline{I}_U + \underline{I}_V = \underline{I}'_2$$

$$(0,612 + 1,896) \text{ A} = 2,508 \text{ A} \cong 2,703 \text{ A}, \quad \text{mit } \ddot{u} = 1$$

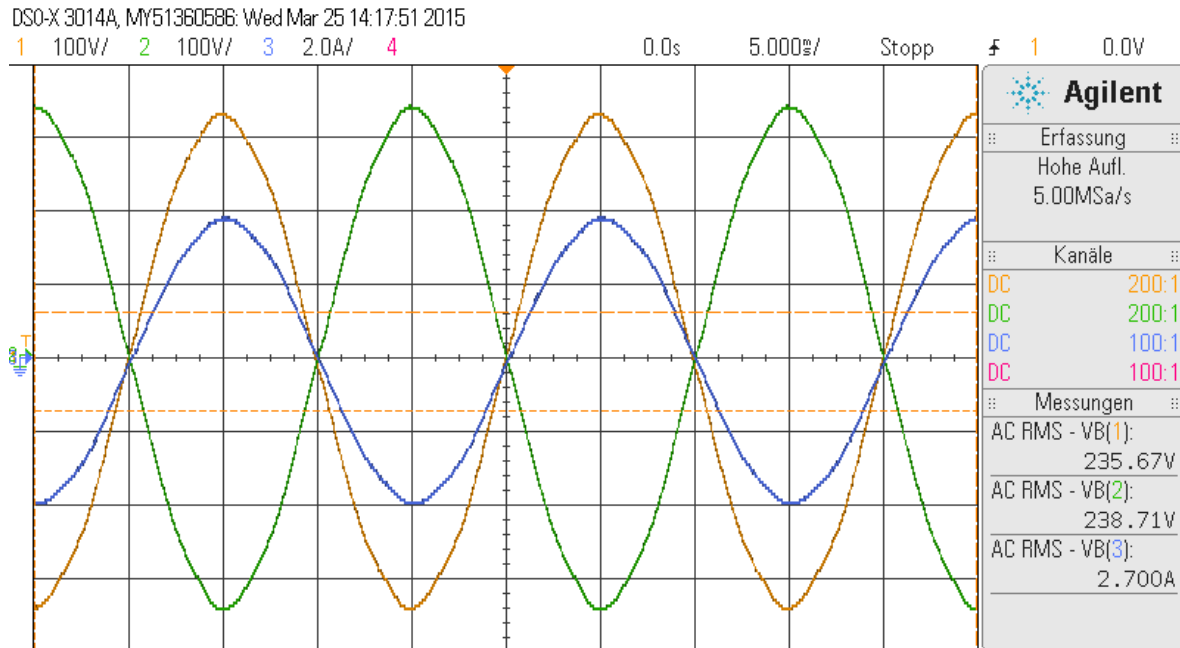
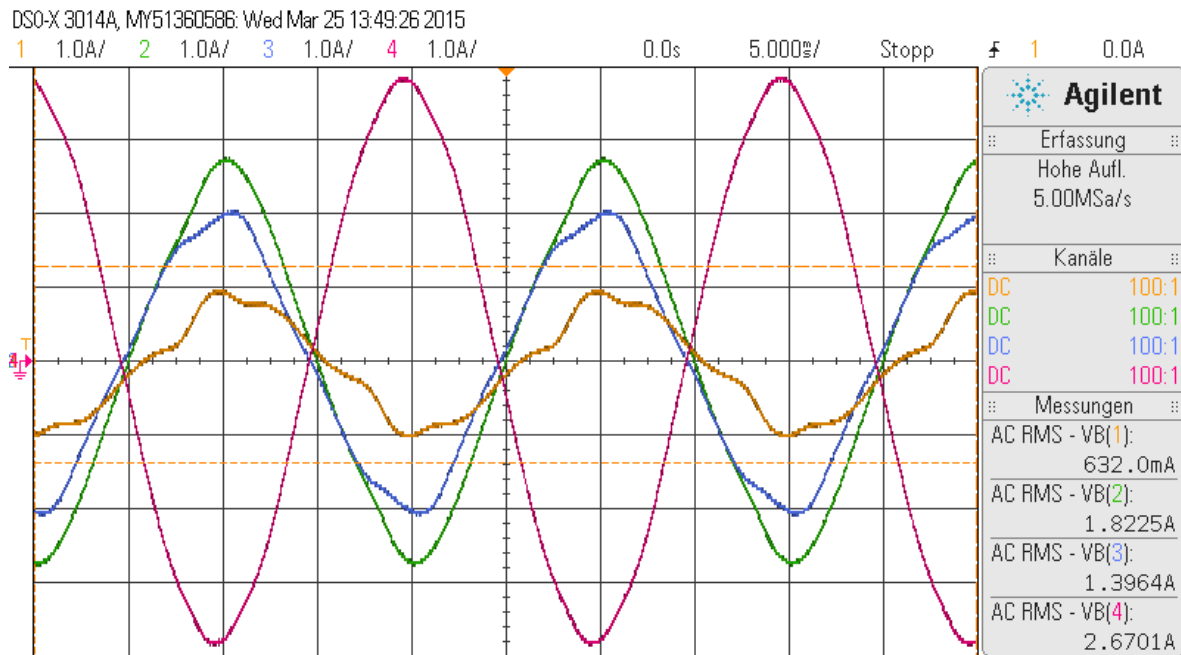


Bild 5-12: Eingangsspannung, sowie Belastungsspannung und –Strom

In Bild 5-13 a) und b) ist das Verhalten der Netzströme im Vergleich zu Belastungsstrom dargestellt. Der Unterschied der Kurven in a) und b) liegt an der Skalierung. Die im Kanal (4) aufgenommene Stromkurve gehört dem Belastungsstrom. Die Kurven der durch die Phasen U und W fließenden Ströme sind verformt und weichen sie von einer Sinuskurve ab. Nur der durch die Phase V fließende Strom liefert die Form einer Sinuskurve, hier grüne Farbe im Kanal (2). Die Phase V liegt am gleichen Schenkel wie die Phase v, die sekundärseitig belastet ist.

a) Für alle Kanäle gilt: 1 Kästchen $\hat{=} 1 \text{ A}$



b) Für Kanal gilt: 1 Kästchen $\hat{=} 0,3 \text{ A}$

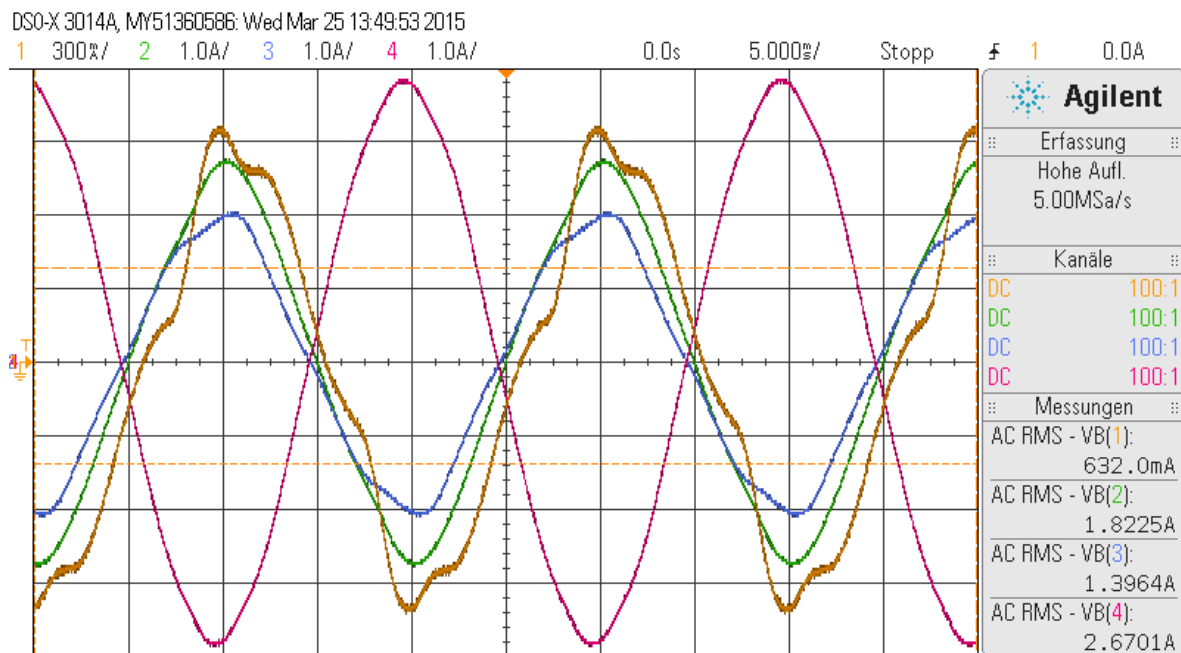


Bild 5-13: Netzströme im Vergleich zu Laststrom $I_L = 2670 \text{ A}$

Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = \frac{U_L \cdot I_L}{P_{zu}} = \frac{238,85 \text{ V} \cdot 2,703 \text{ A}}{681 \text{ W}} = 0,948 \hat{=} 94,8\%$$

Zweiphasige Belastung des Transformators mit Yy-Schaltung

Die Sekundärphase v gegen die Sekundärphase w mit einem Ohmschen Widerstand $R_L = 90 \Omega$ zu belasten. Die Schaltung wie in Bild 4-30 aufzubauen. Die Eingangsspannung $U_1 = 400 \text{ V}$ einzustellen.

Messergebnisse:

Die am Leistungsmessgerät abgelesenen Werte:

$$P = 1869 \text{ W}, \quad S = 2247 \text{ VA}, \quad Q = 1246 \text{ var}, \quad \text{PF} = \cos \varphi = 0.832$$

$$U_1 = 398,7 \text{ V}, \quad I_U = 0,407 \text{ A}, \quad I_V = 4,510 \text{ A}, \quad I_W = 4,906 \text{ A}$$

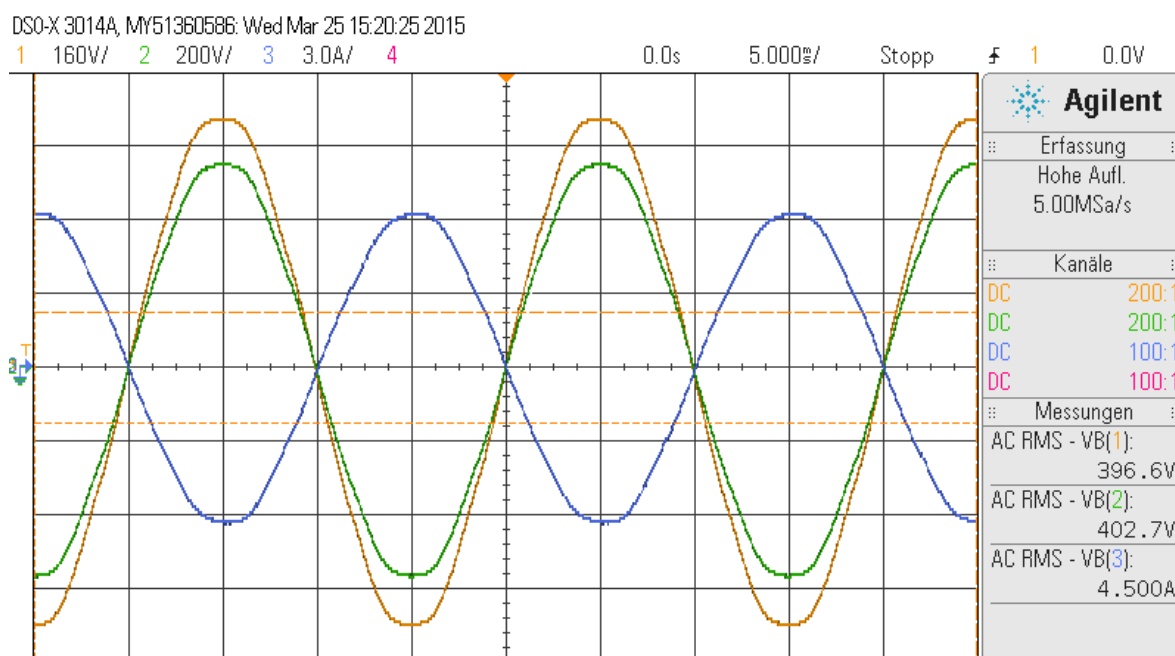


Bild 5-14: Zweiphasige Belastung bei Yy, Strom- und Spannungskurven bei $R_L = 90 \Omega$

In Bild 5-14 sind die Strom- und Spannungskurven bei Belastung $R_L = 90 \Omega$ aufgenommen. Im Kanal (1) ist die Eingangsspannung $U_1 = 396,6 \text{ V}$ zwischen den Phasen V und W dargestellt. Belastungsspannung $U_L = 402,7 \text{ V}$ ist im Kanal (2) und der Belastungsstrom Belastungsspannung $I_L = 4,5 \text{ A}$ abgebildet.

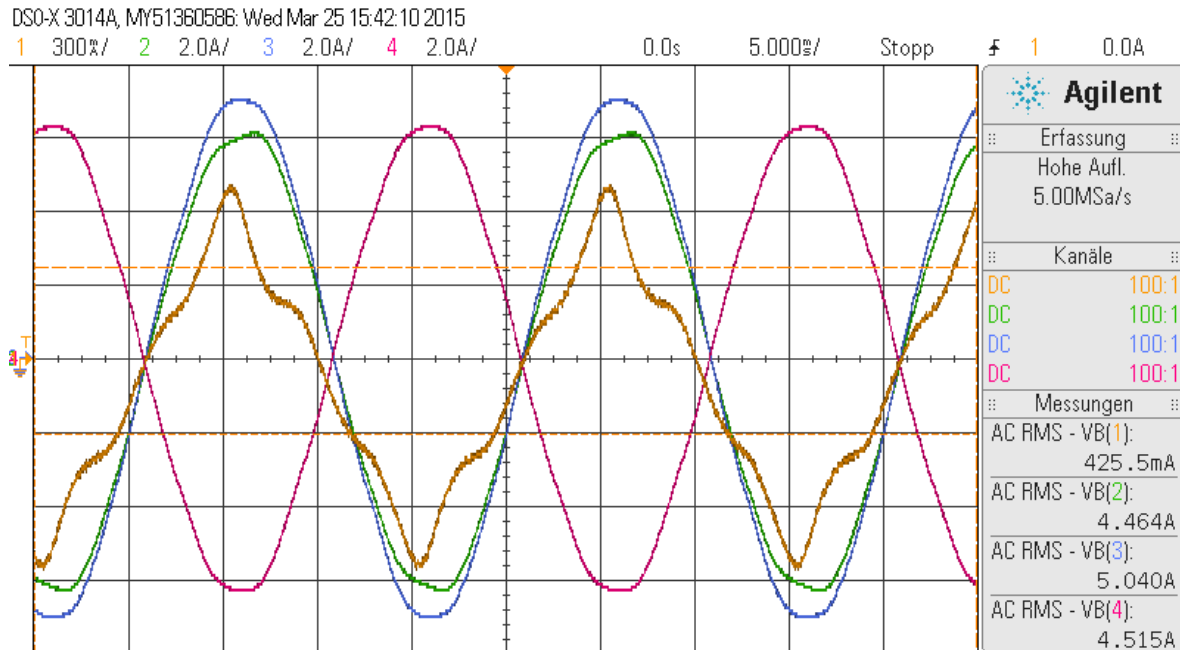


Bild 5-15: Netzströme im Vergleich zu Laststrom bei zweiphasiger Belastung

Es ist in Bild 5-15 erkennbar, dass die Netzströme I_U (braun) und $I_V = I_1$ (grün) verformten Verlauf aufweisen, wobei die Verformung von I_V geringer ist. Nur der im Kanal (3) blau dargestellte Strom I_W verläuft sinusförmig, wie der Belastungsstrom $I_L = I_2$.

$$I_W = I_U + I_V = (0,407 + 4,510)A = 4,917 A \cong 4,906 A$$

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = \frac{402,7 V \cdot 4,5 A}{1869 W} = 0,9696 \cong 96,96\%$$

Einphasige Belastung des Transformators mit Dy-Schaltung

Der Transformator mit Schaltgruppe Dy5 ist sekundärseitig mit einem Ohmschen Widerstand $R_L = 90 \Omega$ einphasig zu belasten. Die Schaltung wie das Schaltbild in Bild 4-31 aufzubauen. (Mittlere Phase v gegen Sternpunkt zu belasten). Die Eingangsspannung $U_1 = 230 V$ einzustellen.

Messergebnisse:

Die am Leistungsmessgerät abgelesenen Werte:

$$P = 679 W, \quad S = 863 VA, \quad Q = 532 var, \quad PF = \cos \varphi = 0.787$$

$$U_1 = 231,2 V, \quad I_U = 2,503 A, \quad I_V = 3,202 A, \quad I_W = 0,764 A$$

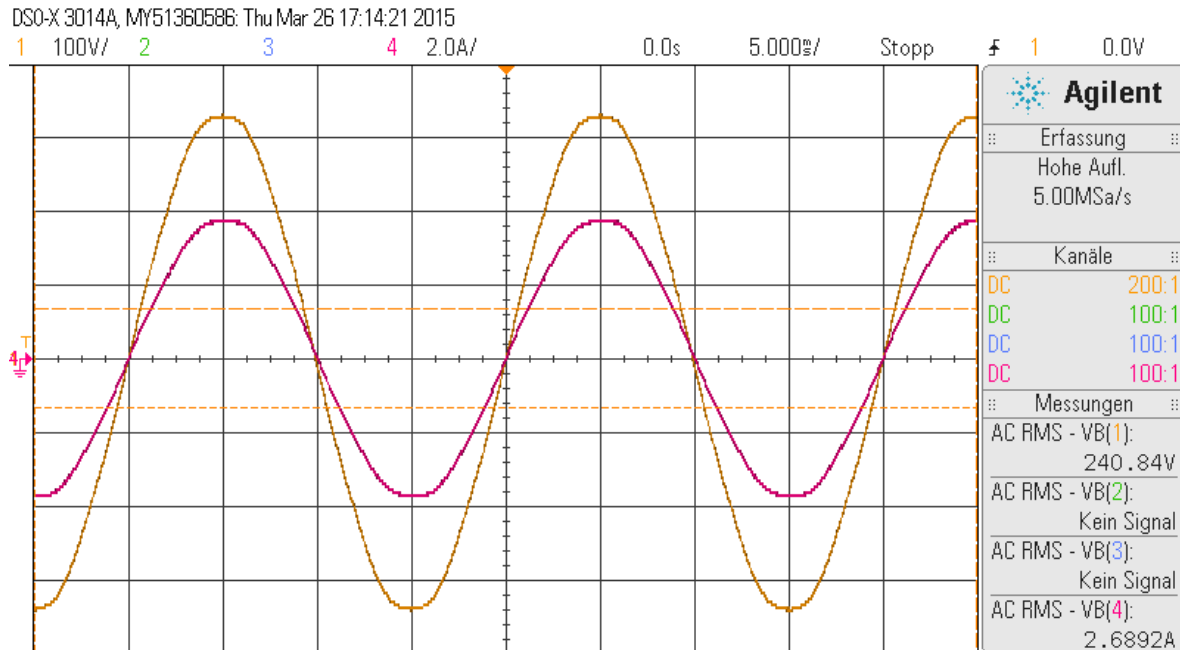


Bild 5-16: Einphasige Belastung bei D_y , Strom- und Spannungskurven bei $R_L = 90 \Omega$

In Bild 5-16 sind Spannungs- und Stromkurven der Ohmschen Belastung abgebildet. Der Belastungsstrom beträgt $I_L = I_2 = 2,6892 \text{ A}$ und die Belastungsspannung beträgt $U_L = U_2 = 240,84 \text{ V}$.

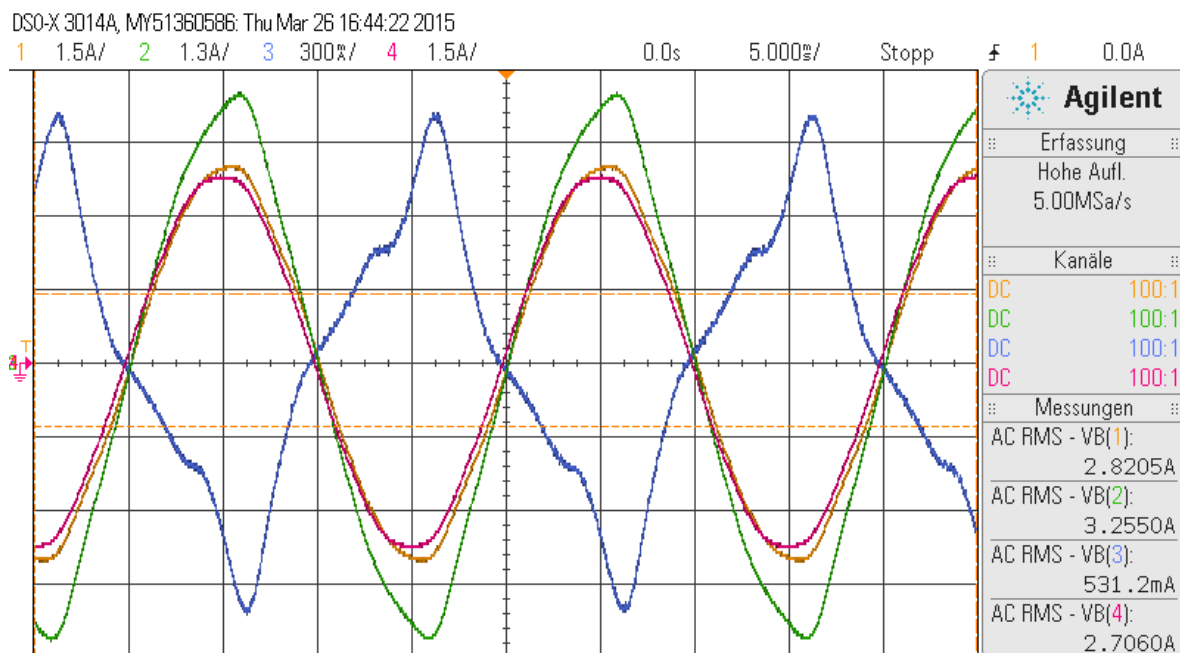


Bild 5-17: Netzströme im Vergleich zu Belastungsstrom bei Belastung in D_y

In Bild 5-17 wurden Netzströme im Vergleich zu Belastungsstrom dargestellt. Der Kanal (4) zeigt den Belastungsstrom $I_L = I_2$. In Bild 5-18 dahingegen nur Netzströme I_{UV} braun im Kanal (1), I_{VW} grün im Kanal (2), I_{WU} blau im Kanal (3) und $I_{V_{Netz}}$ rot im Kanal (4) aufgenommen. Auch in diesen Abbildungen ist es ersichtlich, dass die Netzströme angeschlagene Kurve aufweisen. Mit Kanal (1) in Bild 5-17 aufgenommener Netzstrom $I_U = I_{UV}$ ist einigermaßen sinusförmig. Der Belastungsstrom I_L (rot) hat einen ganz sinusförmigen Verlauf.

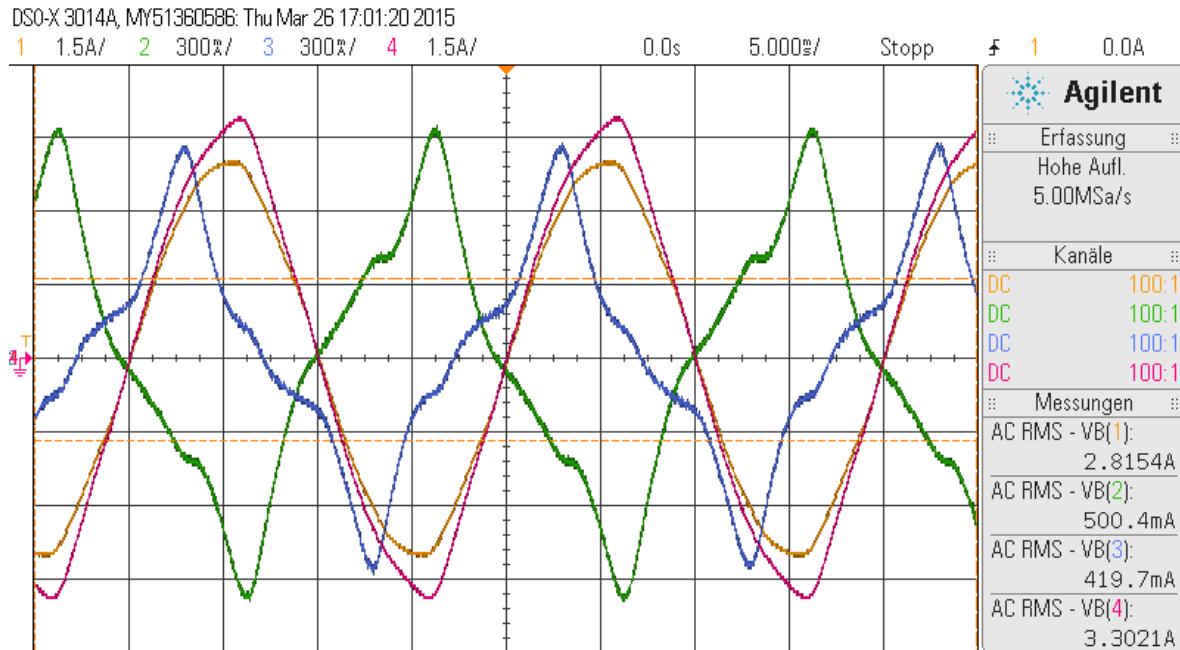


Bild 5-18: Primärseitige Ströme bzw. Netzströme

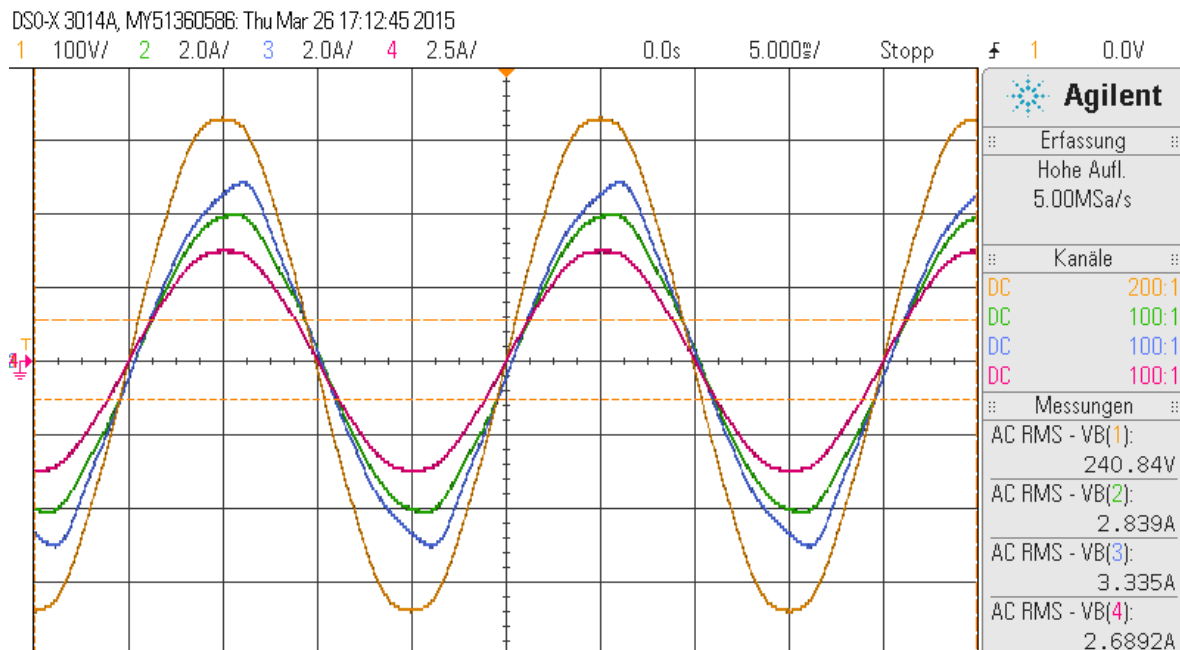


Bild 5-19: Netzströme und Belastungsspannung und -strom

In Bild 5-19 ist Belastungsspannung U_1 braun im Kanal (1) und -strom I_L rot im Kanal (4) gezeichnet. Die Netzströme I_{UV} und $I_{V\text{Netz}}$ sind entsprechend dem Schaltbild im Kanal (2) grün und im Kanal (3) blau

Nach den Angaben vom Leistungsmesser ergibt sich der Netzstrom

$$I_V = I_U + I_W = (2,503 + 0,764)\text{A} = 3,267 \text{ A} \cong 3,202\text{A}$$

$$\eta = \frac{P_{\text{ab}}}{P_{\text{zu}}} = \frac{240,84 \text{ V} \cdot 2,6892 \text{ A}}{679 \text{ W}} = 0,9539 \cong 95,39\%$$

Einphasige Belastung des Transformators mit Yz-Schaltung

Der Transformator mit Schaltgruppe Yz5 sekundärseitig mit einem Ohmschen Widerstand $R_L = 90 \Omega$ an der mittleren Phase gegen Sternpunkt zu belasten und der Schaltung nach Schaltplan in Bild 4-34 aufzubauen. Die Eingangsspannung $U_1 = 400 \text{ V}$ einzustellen.

Messergebnisse:

Am Leistungsmessgerät abgelesen:

$$P = 529 \text{ W}, \quad S = 718 \text{ VA}, \quad Q = 485 \text{ var}, \quad \text{PF} = \cos \varphi = 0.737$$

$$U_1 = 402,1 \text{ V}, \quad I_U = 0,421 \text{ A}, \quad I_V = 1,140 \text{ A}, \quad I_W = 1,540 \text{ A}$$

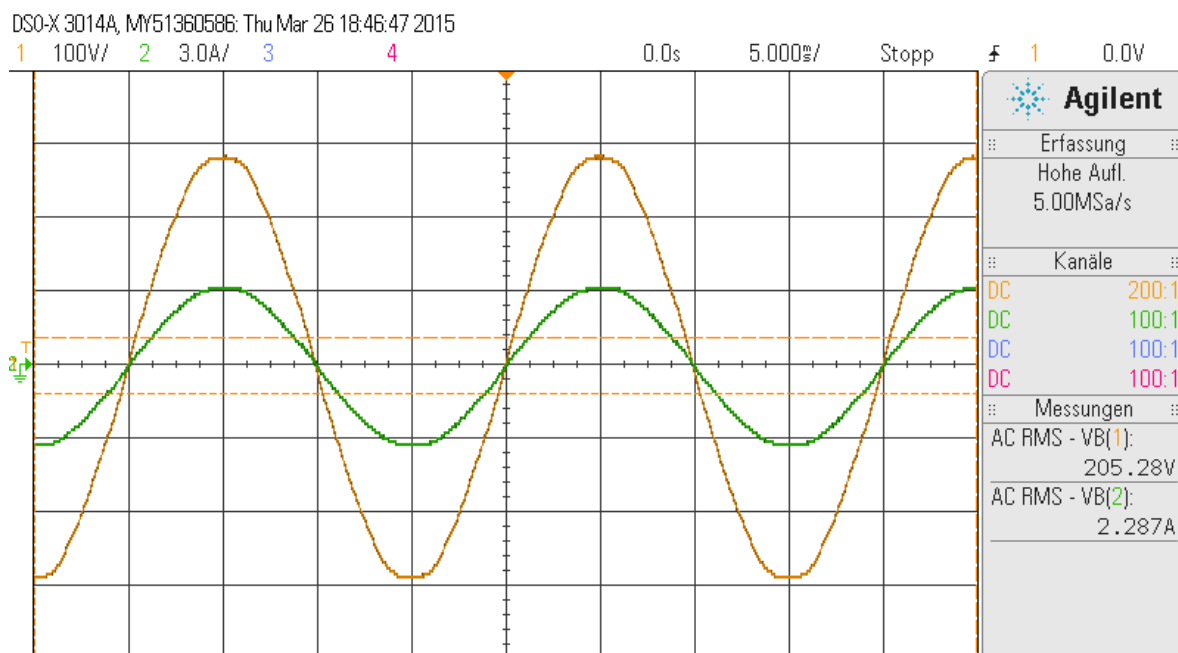


Bild 5-20: Einphasige Belastung bei Yz, Strom- und Spannungskurven, $R_L = 90 \Omega$

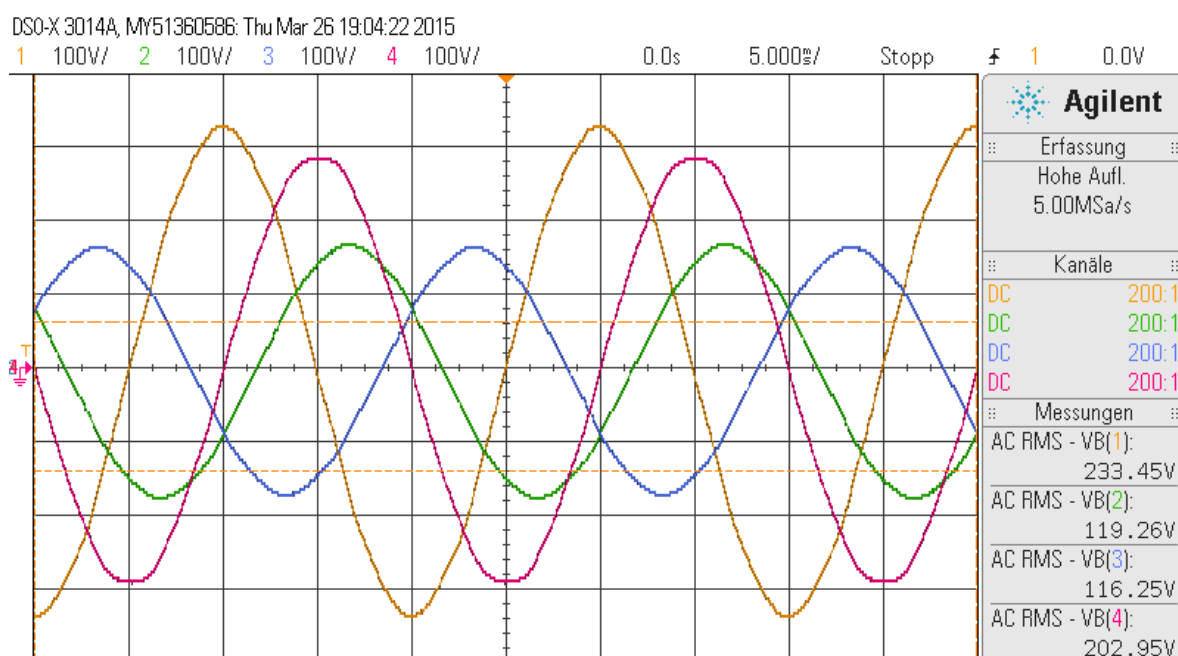


Bild 5-21: Spannungsverhältnisse bei Belastung in Yz

In Bild 5-21 sind die sekundärseitigen Spannungen aufgenommen. Die gegen Neutralleiter bzw. Sternpunkt gemessene Eingangsspannung im Kanal (1) ist $U_{1V_{Netz}} = 233,45 \text{ V}$ (damit $U_1 = 400 \text{ V}$) blau dargestellt.

$$U_L = U_{2V} \cong \sqrt{3} \cdot U_{21W} \cong \sqrt{3} \cdot U_{22V}$$

$$202,95 \text{ V} \cong \sqrt{3} \cdot 116,25 \text{ V} \cong \sqrt{3} \cdot 119,26 \text{ V}$$

$$202,95 \text{ V} \cong 201,35 \text{ V} \cong 206,56 \text{ V}$$

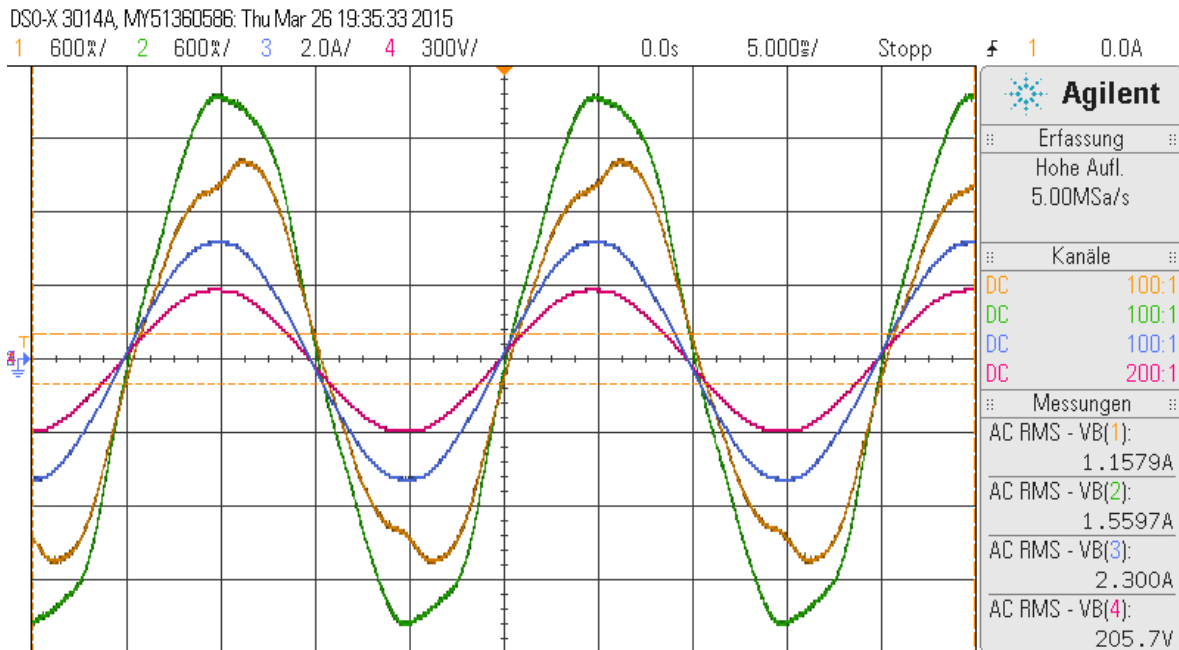


Bild 5-22: Kurven von I_V , I_W , $I_2 = I_L$, $U_{2V} = U_L$ bei Belastung in Yz

In Bild 5-22 ist erkennbar, dass der im Kanal (1) braun und im Kanal (2) grün aufgezeichneten Netzströme I_V und I_W von der Sinusform abweichen.

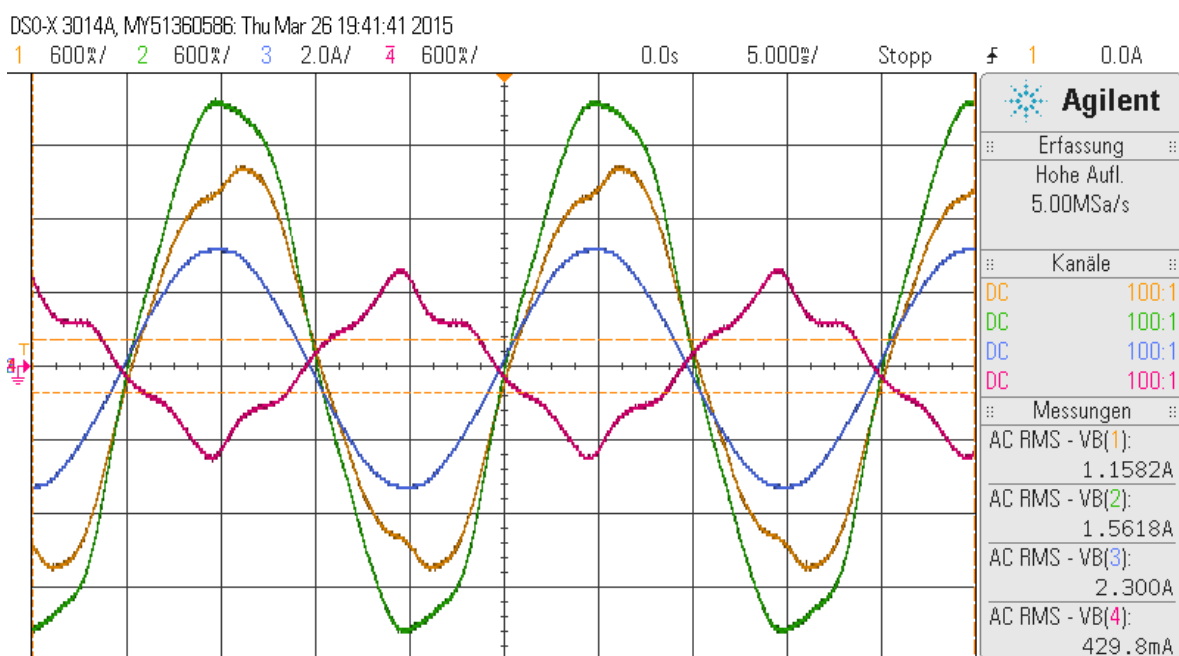


Bild 5-23: Netzströme verglichen mit Belastungsstrom in Yz

In Bild 5-23 werden die Netzströme mit dem Belastungsstrom verglichen. Die Netzströme I_V und I_W sind im Kanal (1) braun, im Kanal (2) grün und der Belastungsstrom I_L im Kanal (2) blau dargestellt. Der Netzstrom I_U im Kanal (4) invertiert und rot aufgenommen Er ist verformt und weicht von der Sinuskurve ab.

$$\eta = \frac{P_{\text{ab}}}{P_{\text{zu}}} = \frac{205,28 \text{ V} \cdot 2,287 \text{ A}}{529 \text{ W}} = 0,8875 \cong 88,75\%$$

Einphasige Belastung bei Yy-Schaltung mit Ausgleichswicklung

Der Transformator mit Yy-Schaltung wird mit einer Dreieckschaltung sekundärseitig erweitert, in dem die Wicklungen $2u1-2u2$, $2v1-2v2$, $2w1-2w2$ in Dreieck (d) und $2u3-2u4$, $2v3-2v4$, $2w3-2w4$ in Stern (y) geschaltet werden. Die mittlere Phase der y-Schaltung an der Sekundärseite wird mit einem Ohmschen Widerstand $R_L = 90 \Omega$ gegen den Neutralleiter wie in Bild 4-34 belastet. Die Eingangsspannung $U_1 = 400 \text{ V}$ einzustellen.

Messergebnisse:

Am Leistungsmesser abgelesen

$$P = 209 \text{ W}, \quad S = 339 \text{ VA}, \quad Q = 266 \text{ var}, \quad \text{PF} = \cos \varphi = 0.618$$

$$U_1 = 399,8 \text{ V}, \quad I_U = 0,250 \text{ A}, \quad I_V = 0,586 \text{ A}, \quad I_W = 0,634 \text{ A}$$

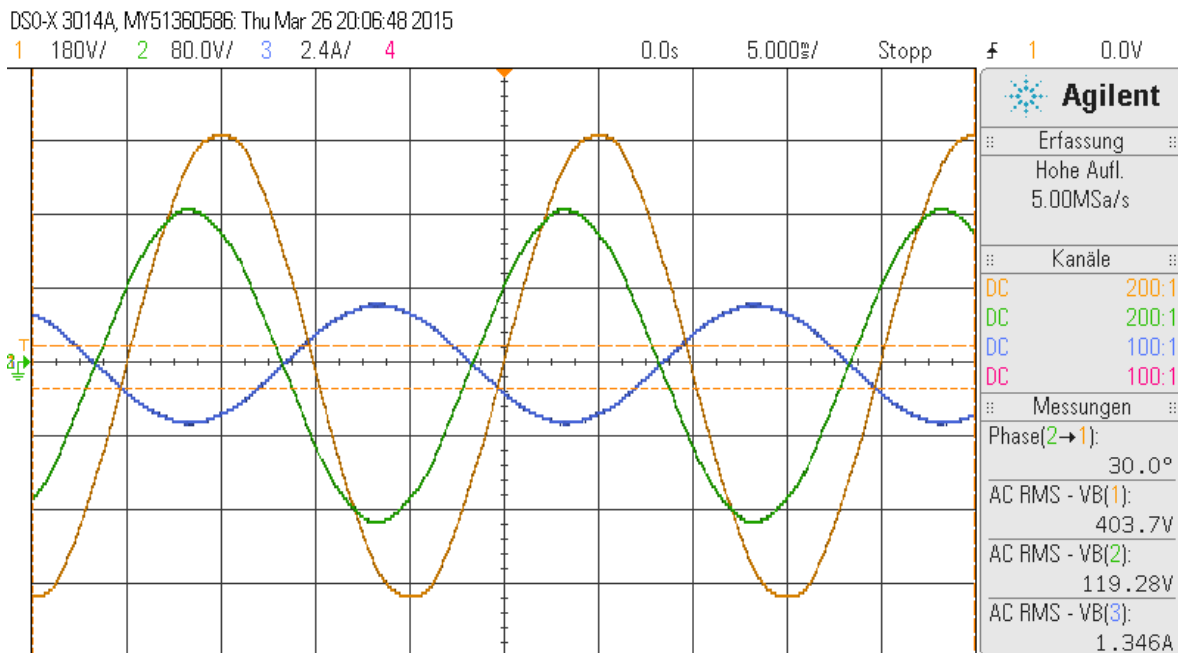


Bild 5-24: Strom- und Spannungskurven mit Phasenverschiebung bei Ausgleichswicklung

In Bild 5-24 ist der Belastungsstrom $I_2 = I_L = 1,346 \text{ A}$, die Eingangsspannung $U_1 = 403,7 \text{ V}$ (braun) sowie die Belastungsspannung $U_2 = U_L = 119,28 \text{ V}$ (grün) aufgenommen. Diese Spannungs- und Stromwerte der Belastung sind jeweils um ca. 50% kleiner als die Belastungsspannungen und Ströme in Yy- und Dy-Schaltungen, die ebenfalls einphasig belastet wurden.

Zwischen der Eingangs- und der Belastungsspannung gibt es eine Phasenverschiebung von 30° .

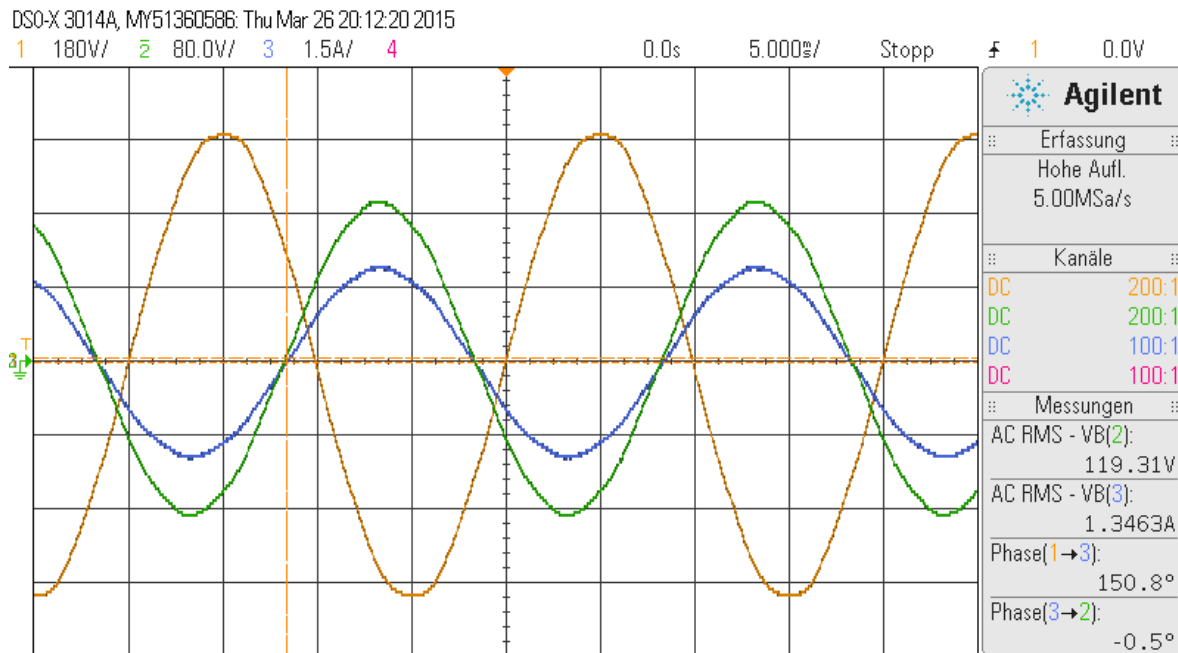


Bild 5-25: Belastungsstrom und -spannung bei Ausgleichwicklung

In Bild 5-25 ist auch erkennbar, dass es eine Phasenverschiebung 150° von zwischen der Belastungsspannung und dem -strom gibt.

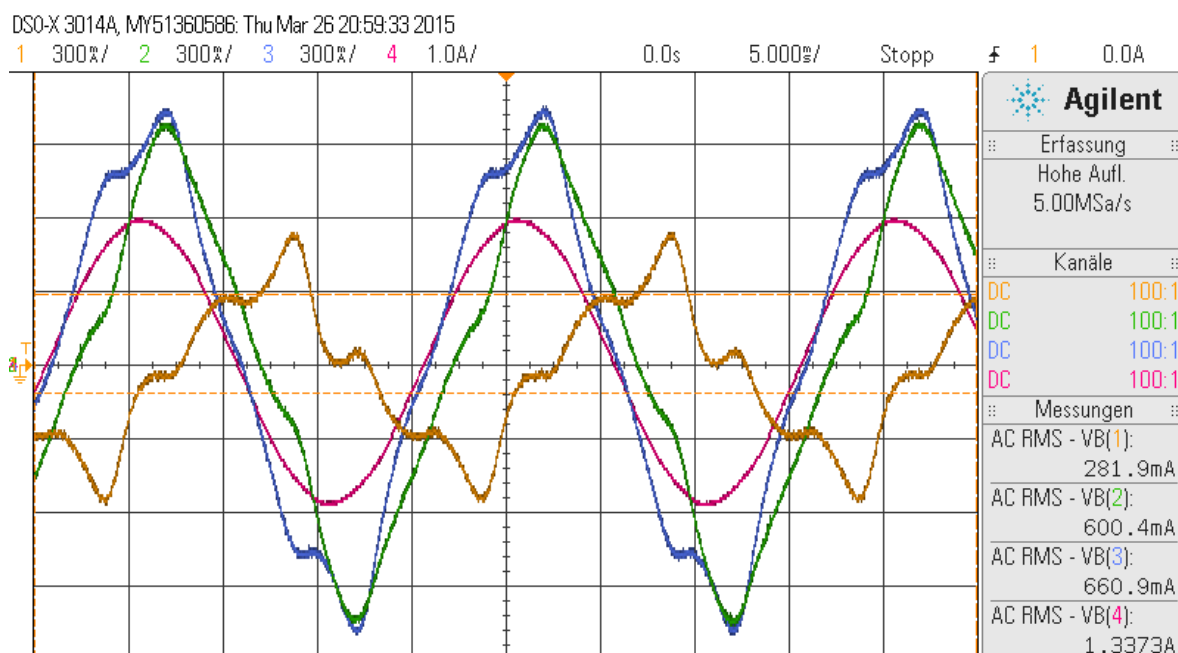


Bild 5-26: Netzströme verglichen mit Laststrom $I_L = I_2$

Die Netzströme I_U (braun) I_V (grün) und I_W (blau) sind in Bild 5-26 mit Belastungsstrom I_L (rot) verglichen. Der Belastungsstrom hat darin eine Sinusform, während die Netzströme von der Sinusform abweichen. Die Abweichung ist bei dem Strom I_U deutliche mehr als bei I_V und I_W .

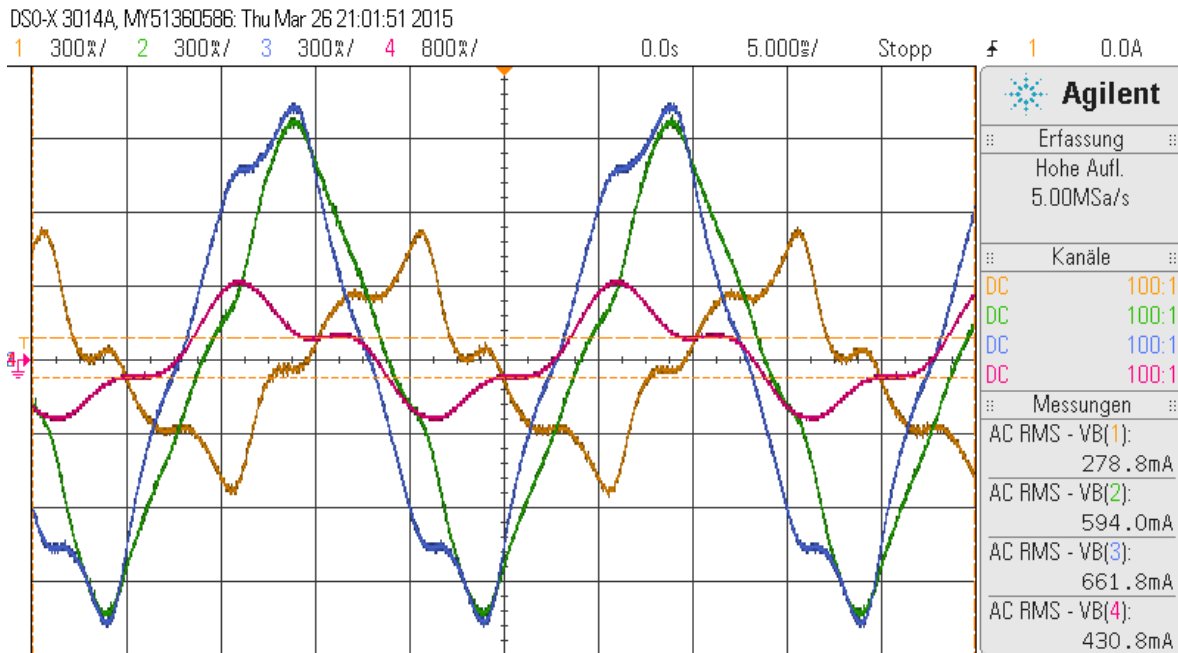


Bild 5-27: Netzströme verglichen mit Dreieckstrom $I_3 = I_{UW}$

Die Netzströme sind in Bild 5-27 mit dem Dreieckstrom I_3 (rot) verglichen. Der Dreieckstrom weist auch eine Abweichung auf.

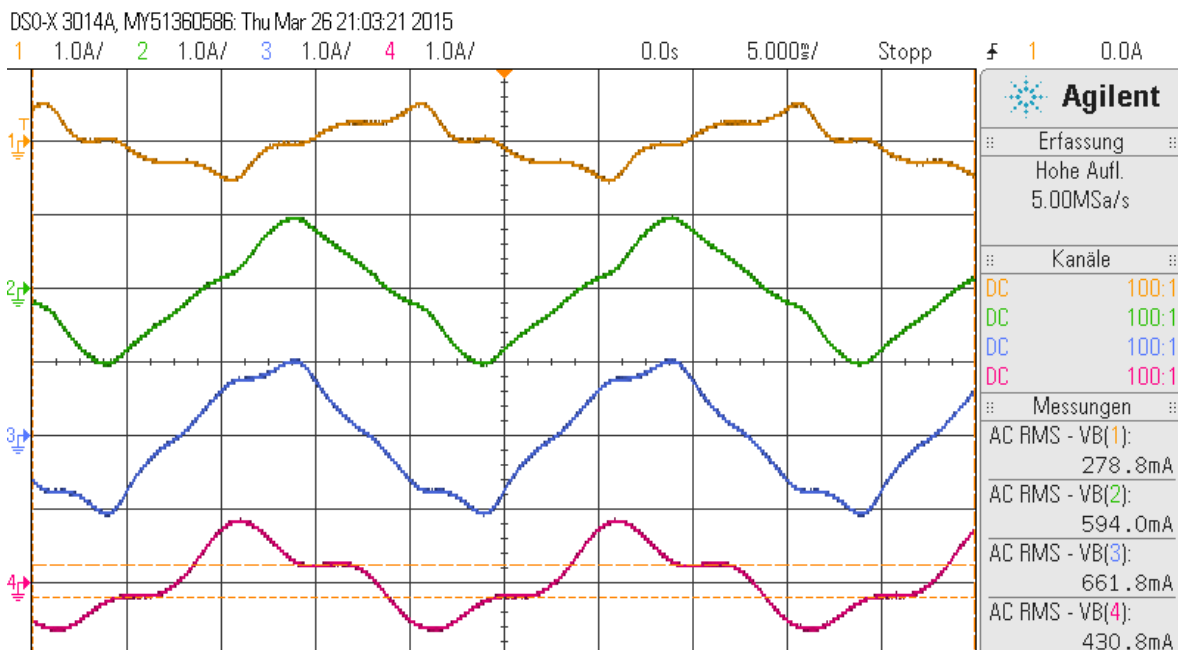


Bild 5-28: Netzströme verglichen mit Dreieckstrom I_3 mit Gleichem Maßstab

In Bild 5-28 sind die Netzströme mit gleichem Maßstab wie Dreieckstrom (rot) zum Vergleich dargestellt.

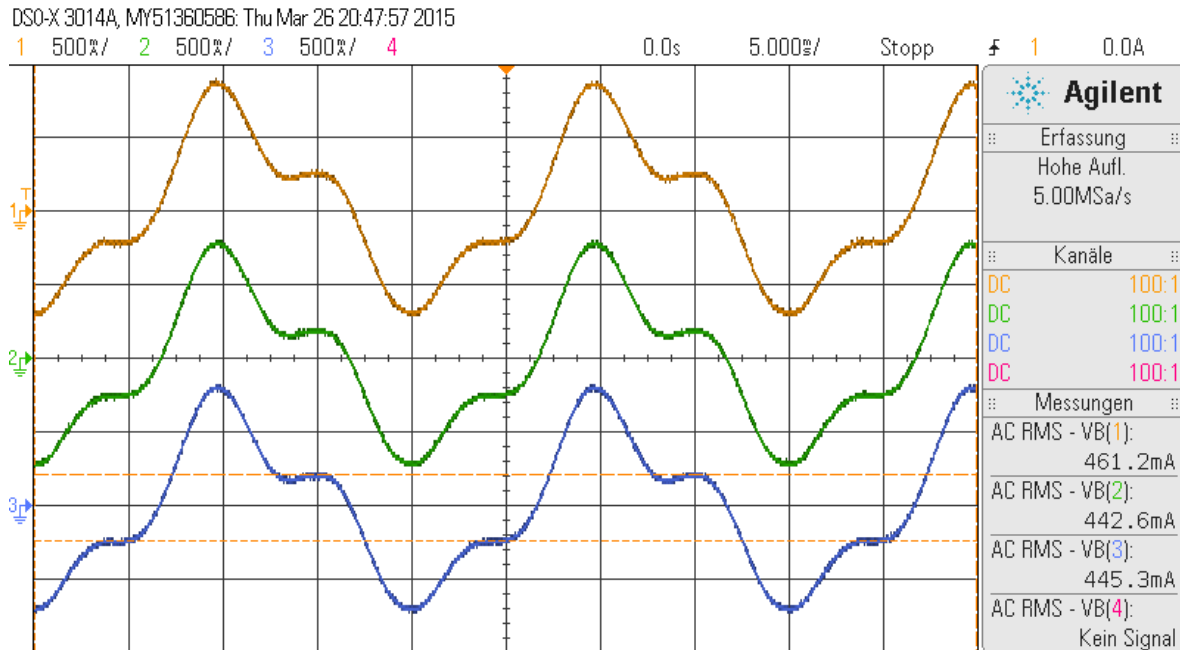


Bild 5-29: Dreieckströme der Ausgleichswicklung

Die Dreiecksströme I_U , I_V , I_W sind in Bild 5-29 dargestellt. I_U ist im Kanal (1) braun, I_V ist im Kanal (2) grün und I_W ist im Kanal (3) blau dargestellt.

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = \frac{119,28 \text{ V} \cdot 1,346 \text{ A}}{209 \text{ W}} = 0,7682 \cong 76,82\%$$

M3-Schaltung am Transformator in Dy

Der Transformator mit Dy5-Schaltung ist mit einer M3-Brücke gleicher Dioden anzuschließen. Die M3-Brücke ist mit einem Ohmschen Widerstand $R_L = 90 \Omega$ gegen den Neutralleiter zu belasten. Die Eingangsspannung $U_1 = 230 \text{ V}$ einzustellen. Die Schaltung nach Schaltplan in Bild 5-30 aufzubauen.

Für die Spannung der an Dioden gilt:

$$U_{Ventil} = \sqrt{3} \cdot U_{Ph-N} = U_{Ph-Ph}$$

die maximale Sperrspannung gilt:

$$U_{Ventil,max} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{Ph-N} = \sqrt{6} \cdot U_{Ph-N} \approx 2,45 \cdot U_{Ph-N}$$

Und die ideale Gleichspannung

$$U_{di} = \frac{3}{2\pi} \cdot \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} \sqrt{2} \cdot U_s \cdot \sin(\omega t) \cdot d\omega t = \frac{3}{2\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot U_s \cdot [-\cos(\omega t)]_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}}$$

$$U_{di} = \frac{3\sqrt{6}}{2\pi} \cdot U_s \approx 1,17 \cdot U_s \approx 0,68 \cdot U_{ventil}$$

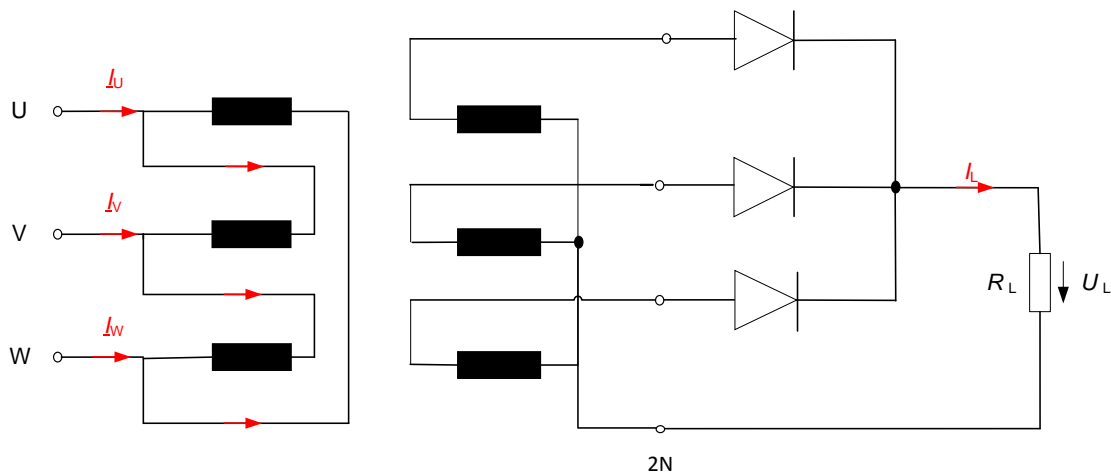


Bild 5-30: Schaltplan Dy-Transformator mit M3-Brücke

Messergebnisse:

Am Leistungsmesser abgelesen

$$P = 912 \text{ W}, \quad S = 1107 \text{ VA}, \quad Q = 627 \text{ var}, \quad PF = \cos \varphi = 0.824$$

$$U_1 = 399,8 \text{ V}, \quad I_U = 2,870 \text{ A}, \quad I_V = 2,686 \text{ A}, \quad I_W = 2,861 \text{ A}$$

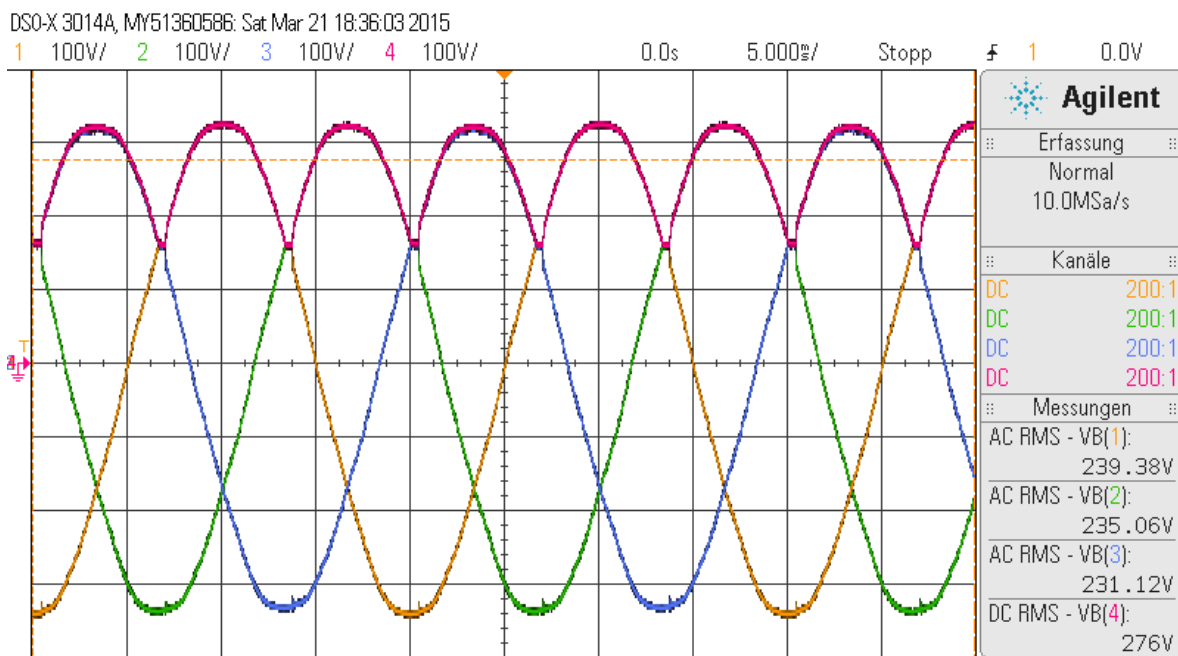


Bild 5-31: Netz- und Belastungsspannungen bei M3-Brücke

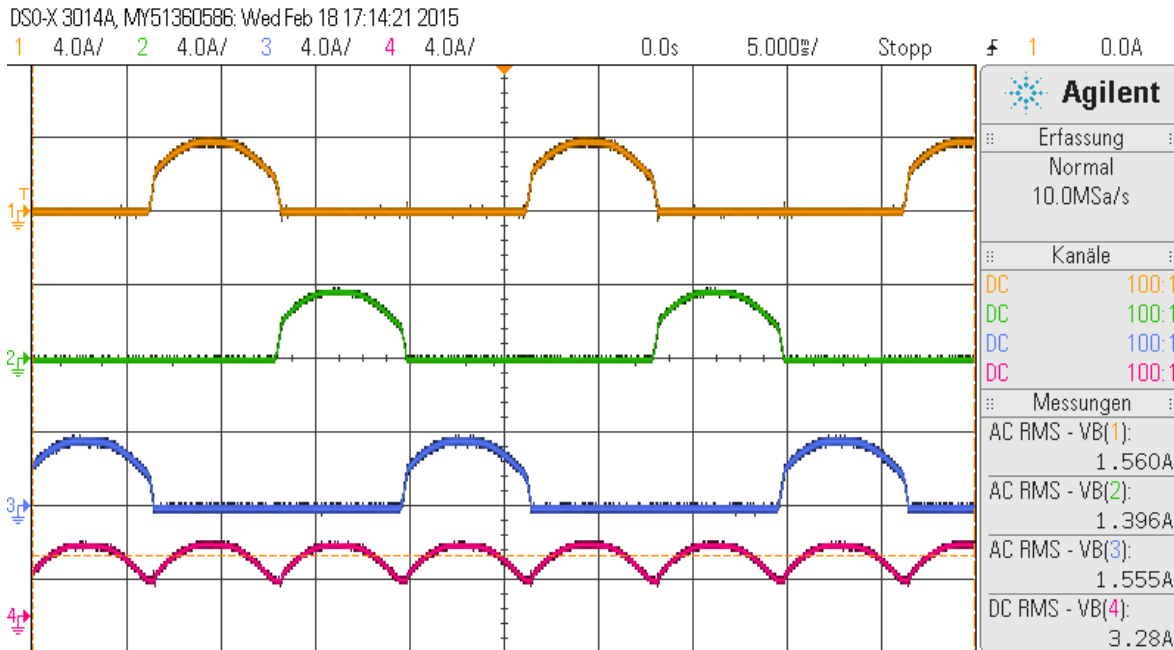


Bild 5-32: Dioden- und Belastungsströme bei M3-Brücke

Die Strangspannungen und die Belastungsspannung sind in Bild 5-31 aufgezeichnet. Die Gleichgerichtete Belastungsspannung ist im Kanal (4) rot dargestellt. Die in Kanal (1), (2), (3) dargestellten Spannungen sind U_1 , U_2 , U_3 der y-Schaltung. Diese vier Werte sind verglichen und damit

$$U_{ai} = 1,17 \cdot 231,12 \text{ V} = 270,41 \text{ V} \cong 0,68 \cdot 400 \text{ V}$$

Der reale Lastwiderstand mit gleichgerichteten Strom- und Spannungswerten

$$R_L = \frac{270 \text{ V}}{3,28 \text{ A}} \cong 82,32 \Omega$$

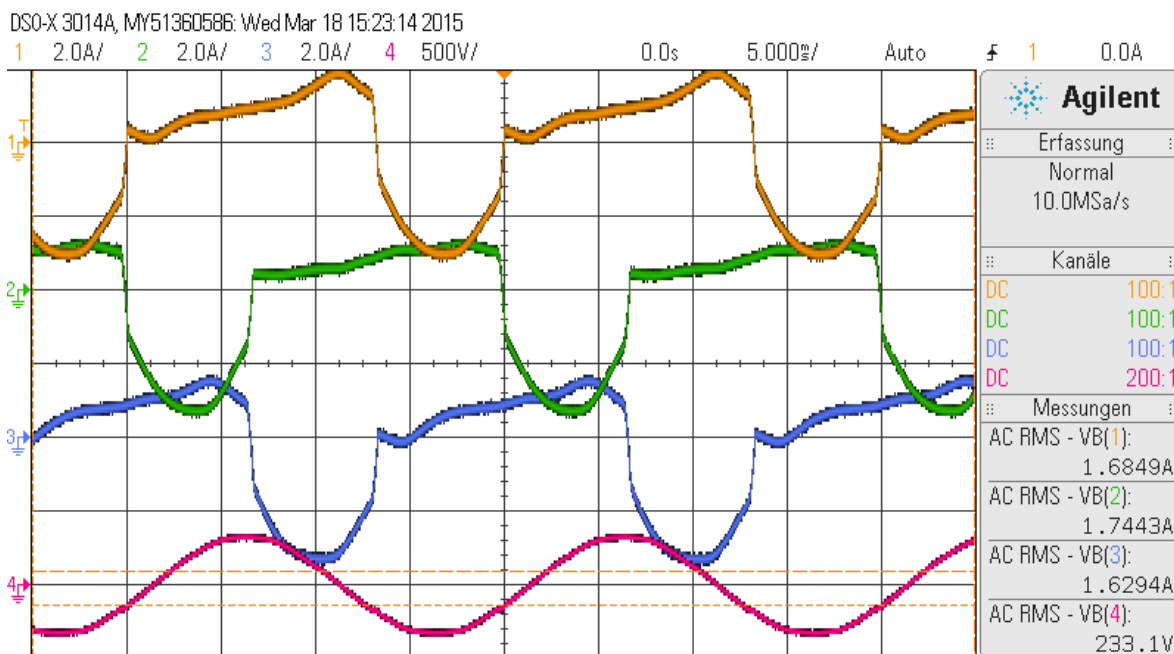


Bild 5-33: Netzseitige Ströme und Spannung bei M3-Brücke

Die in Bild 5-33 aufgezeichneten Kurven stellen die Netzströme I_{UV} (braun), I_{VW} (grün), I_{WU} (blau) und die Eingangsspannung U_1 (rot, gemessen gegen Neutralleiter) dar. Es stellt sich hier fest, dass die Netzströme von der Sinusform enorm abweichen.

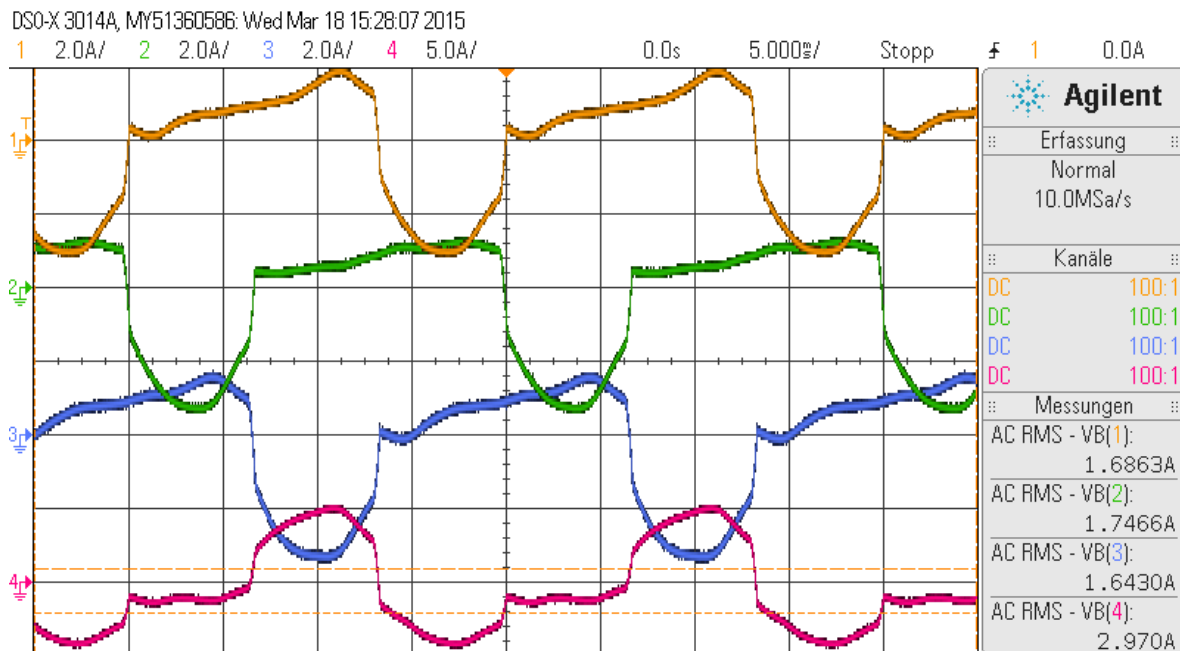


Bild 5-34: Netzseitige Ströme M3-Brücke

Die Kurven in Bild 5-24 sind die Netzströme I_{UV} (braun), I_{VW} (grün), I_{WU} (blau) sowie I_U (rot). Auch hier erkennbar, dass der Strom I_U einen außerordentlichen Verlauf mit abweichender Sinusform aufweist.

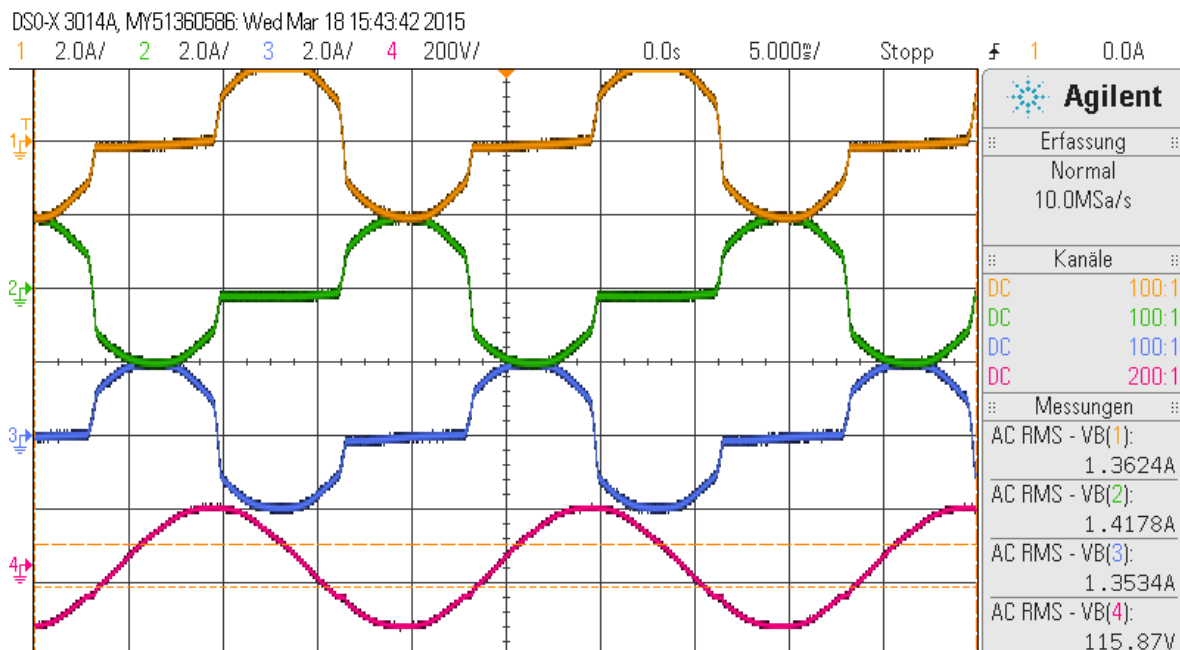


Bild 5-35: Netzseitige Ströme M3-Brücke

Die in Bild 5-35 abgebildete Kurve und in Bild 5-36 sind bei halber Nennspannung $U_1 = 0,5 \cdot U_N = 115 \text{ V}$, dem entsprechend mit halben Netzströmen, zum Vergleich aufgenommen.

Die Verformung der Netzströme bei halber Nennspannung hebt sich zum Teil auf. Nach jedem vollen Periodenverlauf legen die Ströme einen Verzögerungseffekt mit einer halben Periodendauer dar. In dieser Verzögerungszeit ist Netzseitige Stromaufnahme annähernd Null.

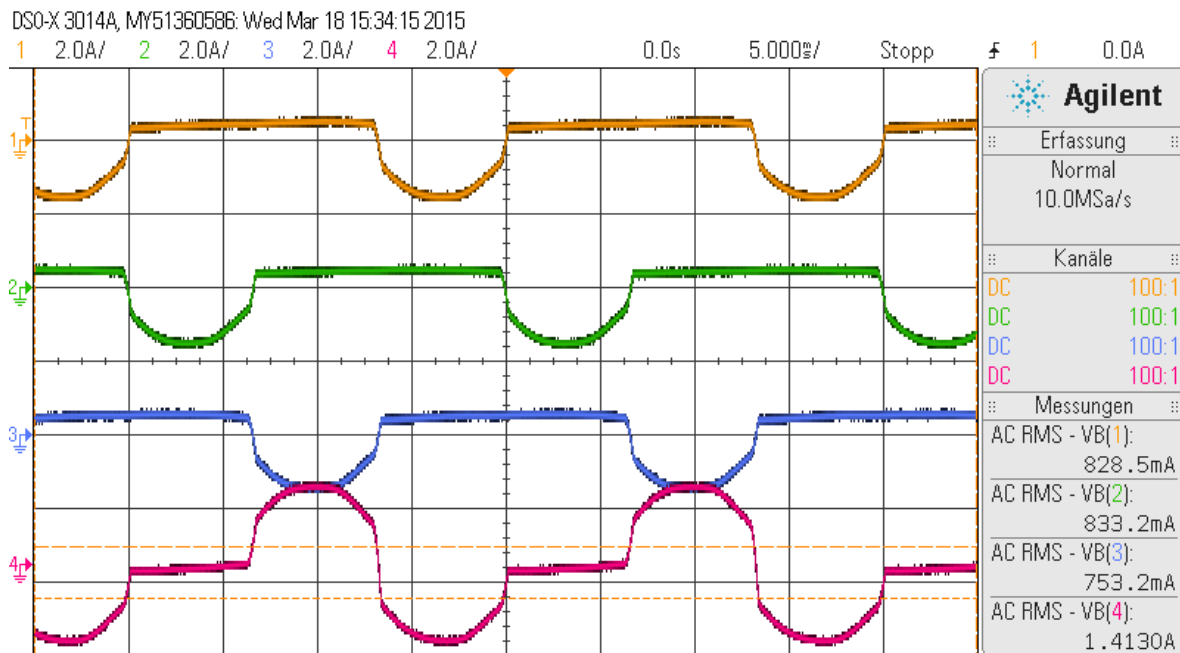


Bild 5-36: Netzseitige Ströme bei $U_1 = 0,5 \cdot U_N$ M3-Brücke

Der Wirkungsgrad lautet

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = \frac{270 \text{ V} \cdot 3,28 \text{ A}}{912 \text{ W}} = 0,9711 \cong 97,11\%$$

Einschaltverhalten

Zu diesem Versuchsteil wurde der Transformator in Dy5 verschaltet und primärseitig mit einem dreiphasigen Schaltwinkelsteller verbunden, der im Rahmen einer Bachelorthesis von Rüdiger-Joachim Bade an der HAW Hamburg entwickelt bzw. bearbeitet wurde. Mit der html-Benutzeroberfläche in Bild 5-37 kann gewählt werden, ob der Schaltwinkelsteller Ein- oder dreiphasig betrieben werden soll. Der Transformator ist mit der Eingangsspannung $U_1 = 230 \text{ V}$ (Dreiecksspannung) zu versorgen.

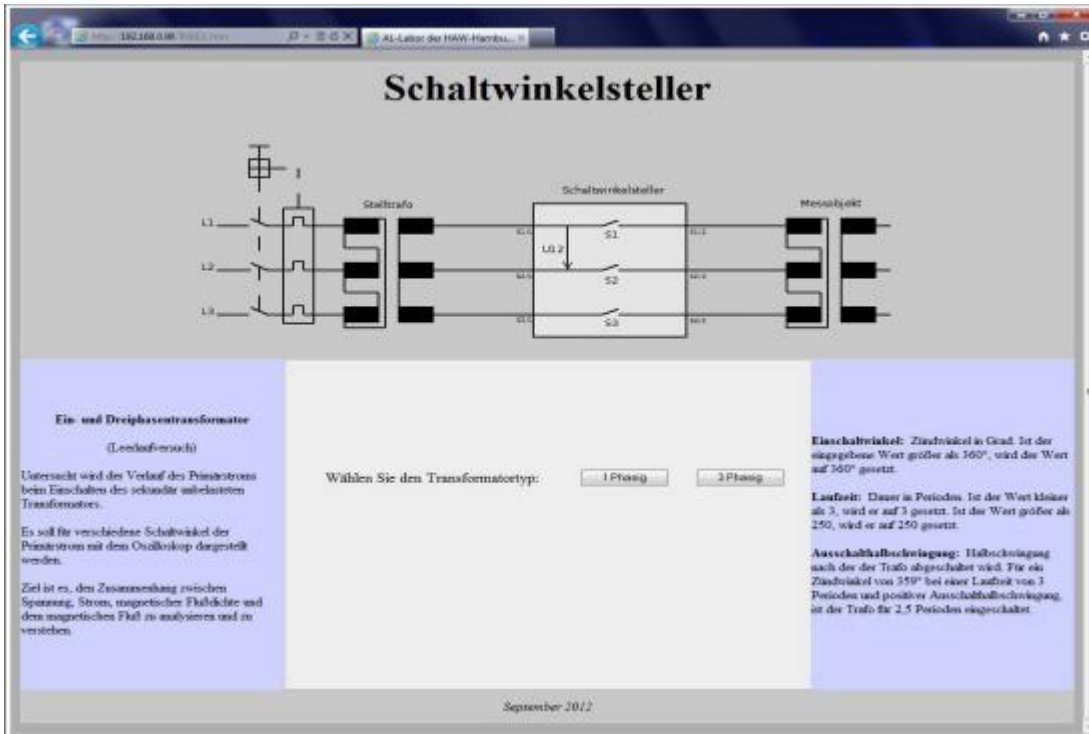


Bild 5-37: Auswahl zur Phasenzahl des Schaltwinkelstellers



Bild 5-38: Dreiphasiger Betrieb des Schaltwinkelstellers

Nach der Auswahl der Phasenzahl des Schaltwinkelstellers können jeweils unterschiedliche Winkelwerte für jede Phase vorgegeben werden.

Die Versuchsschaltung ist nach Schaltplan in Bild 5-39 aufzubauen. Für folgende Oszilloskop-Aufnahmen gilt:

Kanal (1):= I_U in braun, Kanal (2):= I_V in grün, Kanal (3):= I_W in blau

Messergebnisse.

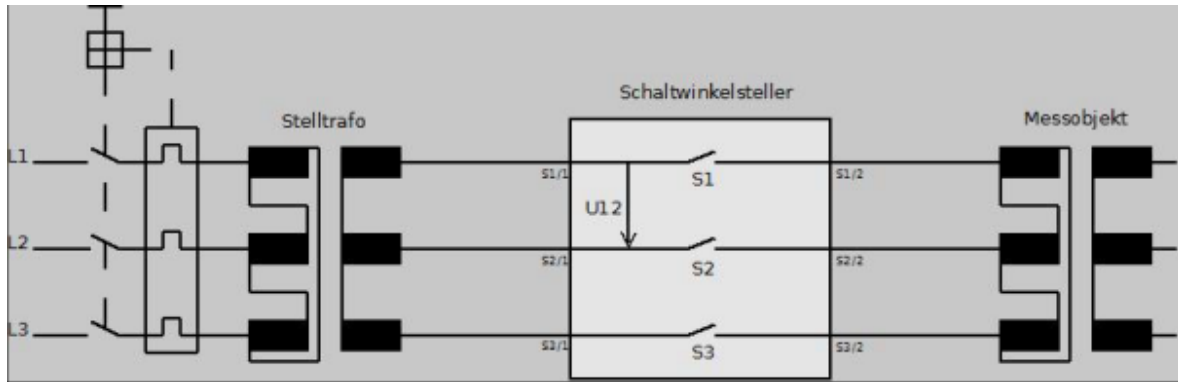


Bild 5-39: Schaltplan Einschaltverhalten

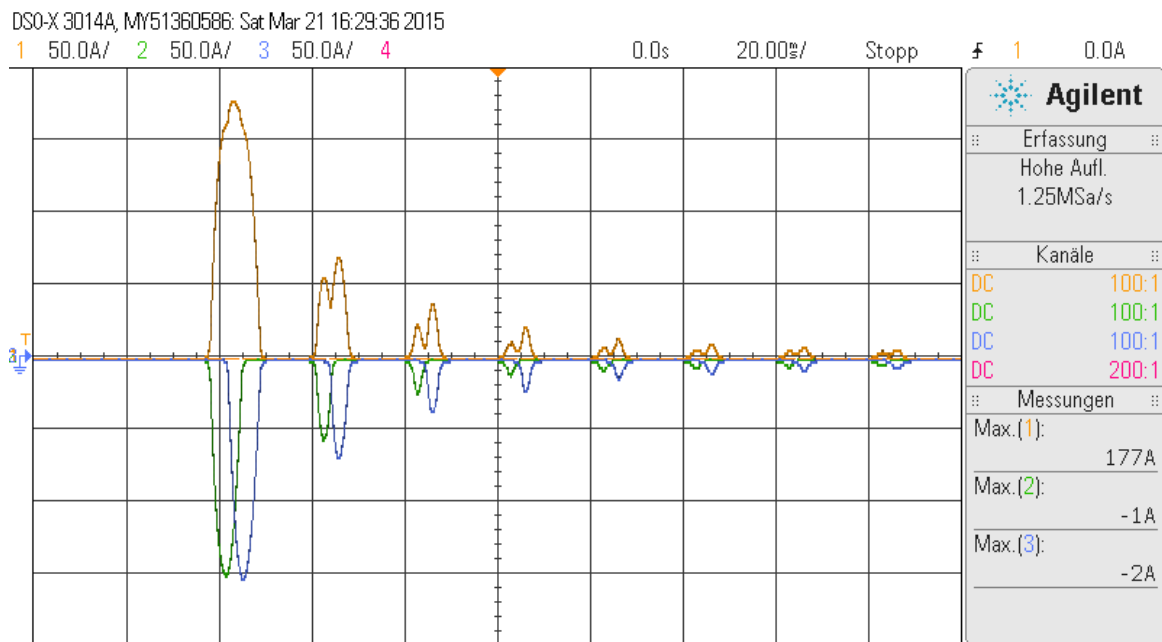


Bild 5-40: Einschaltströme mit Einschaltwinkel 0°0°90°

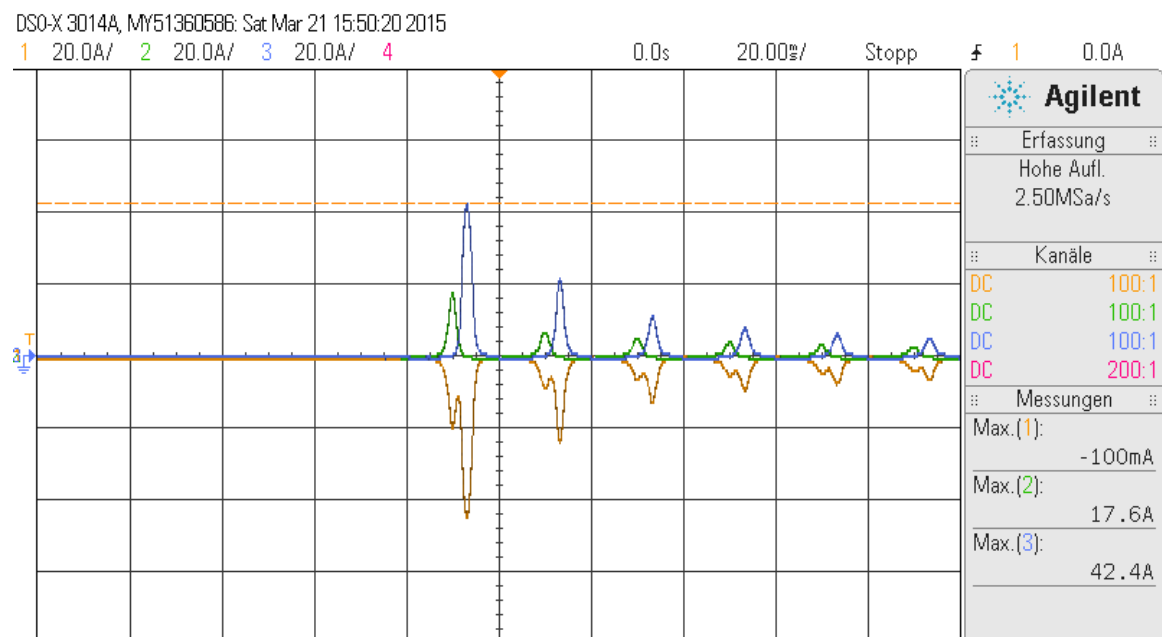
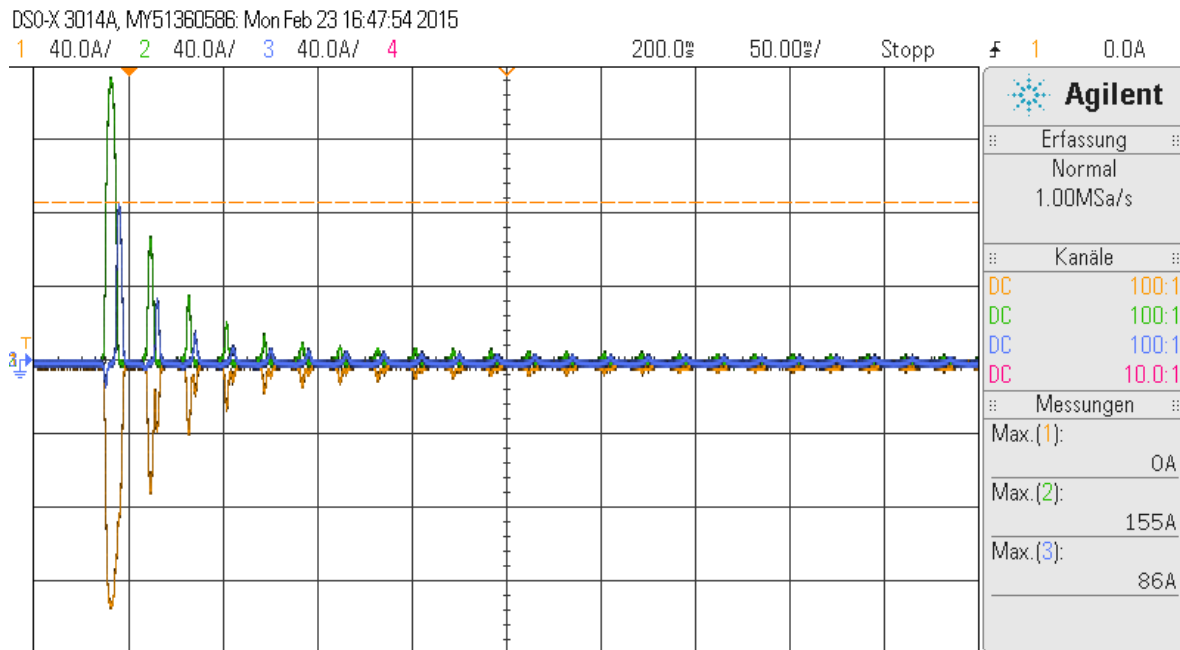
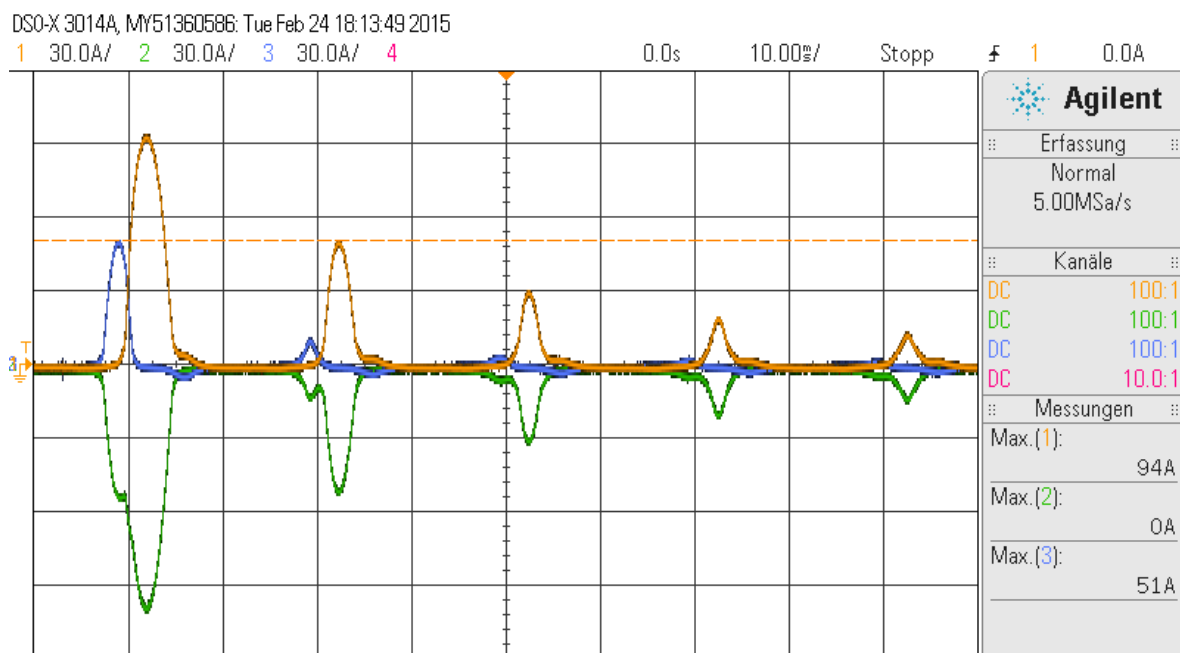


Bild 5-41: Schaltströme mit Schaltwinkel 90°90°180°

Mit Vorgabemöglichkeit kann beliebige Kombinationen für Einschaltwinkel eingestellt werden. Das Ergebnis der idealen Schaltwinkelkombination von $\alpha_U = 90^\circ$, $\alpha_V = 90^\circ$, $\alpha_W = 180^\circ$ für vergleichsweise kleineren Einschaltstrom wurde in Bild 5-41 aufgezeichnet. Der Einschaltstrom beläuft auf den Wert von $I_U = 177\text{ A}$ (Bild 5-40) für die Kombination von $\alpha_U = 0^\circ$, $\alpha_V = 0^\circ$, $\alpha_W = 90^\circ$.

Bild 5-42: Schaltströme mit Schaltwinkel von je 180° Bild 5-43: Schaltströme mit Schaltwinkel von je 0°

Mit einer Kombination von je $\alpha = 0^\circ$ sind die Einschaltströme in Bild 5-43 ($I_U = 94\text{ A}$) und einer Kombination von je $\alpha = 180^\circ$ sind die Einschaltströme ($I_V = 155\text{ A}$) in Bild 5-42 zum Vergleich aufgenommen.

Mit dem in Yy0 verschalteten Transformator wurden die folgenden Ergebnisse zum Vergleich aufgenommen. Die Eingangsspannung des Transformators mit Yy0 hier $U_1 = 400\text{ V}$.

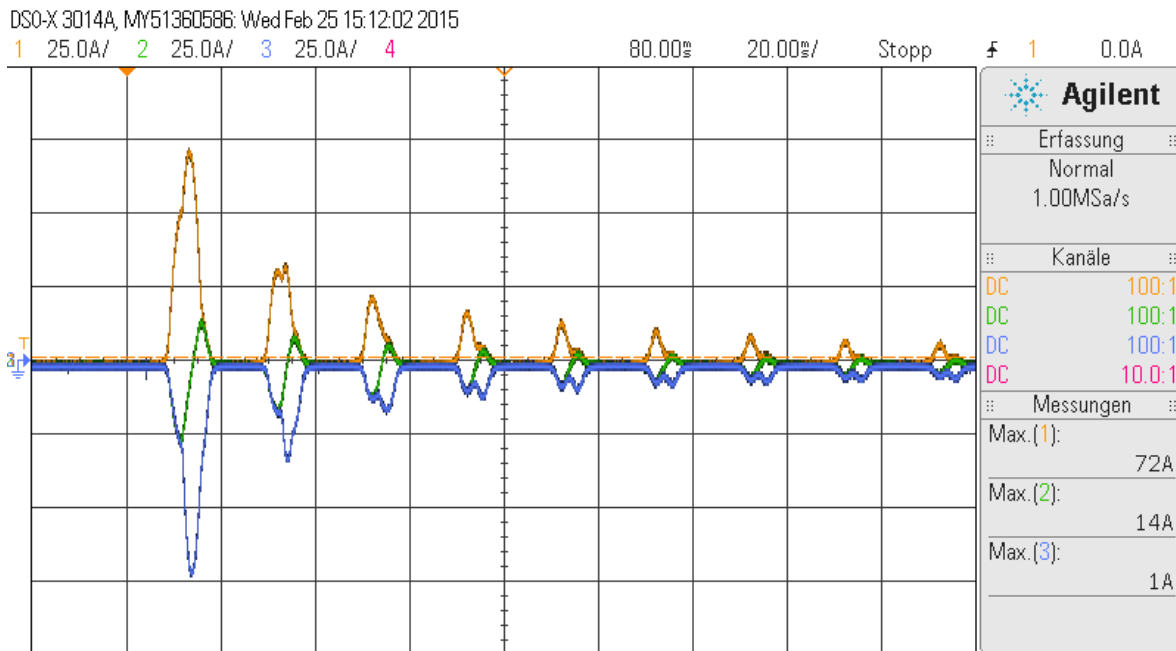


Bild 5-44: Schaltströme in Yy0 mit Winkel von je 60°

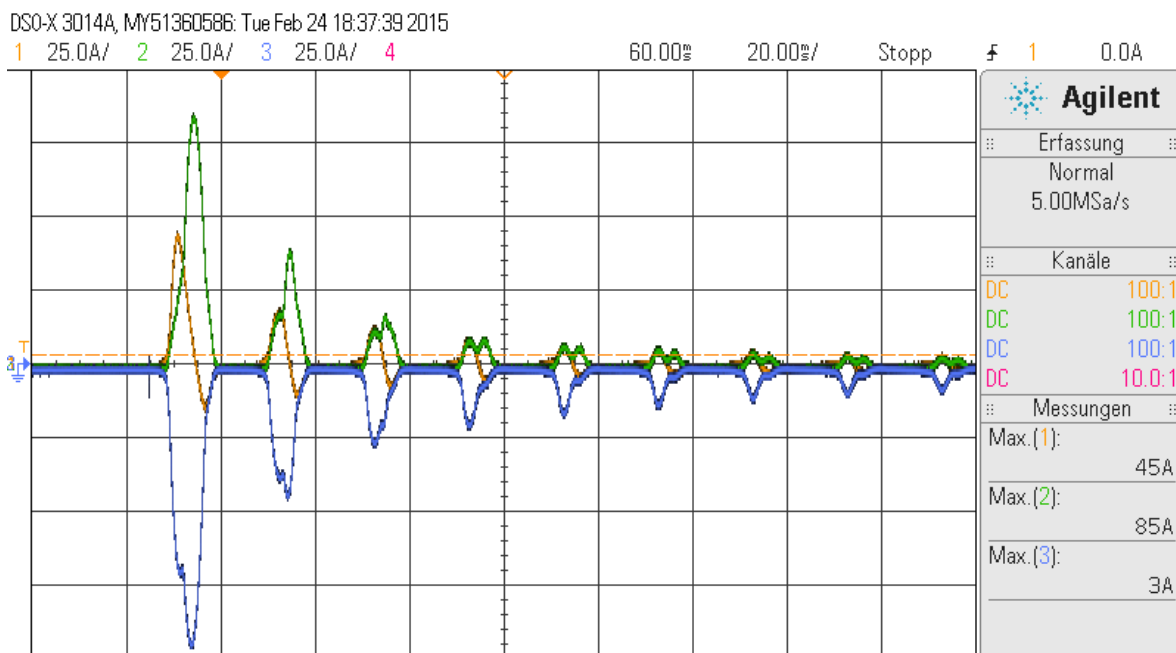


Bild 5-45: Schaltströme in Yy0 mit Winkel von je 120°

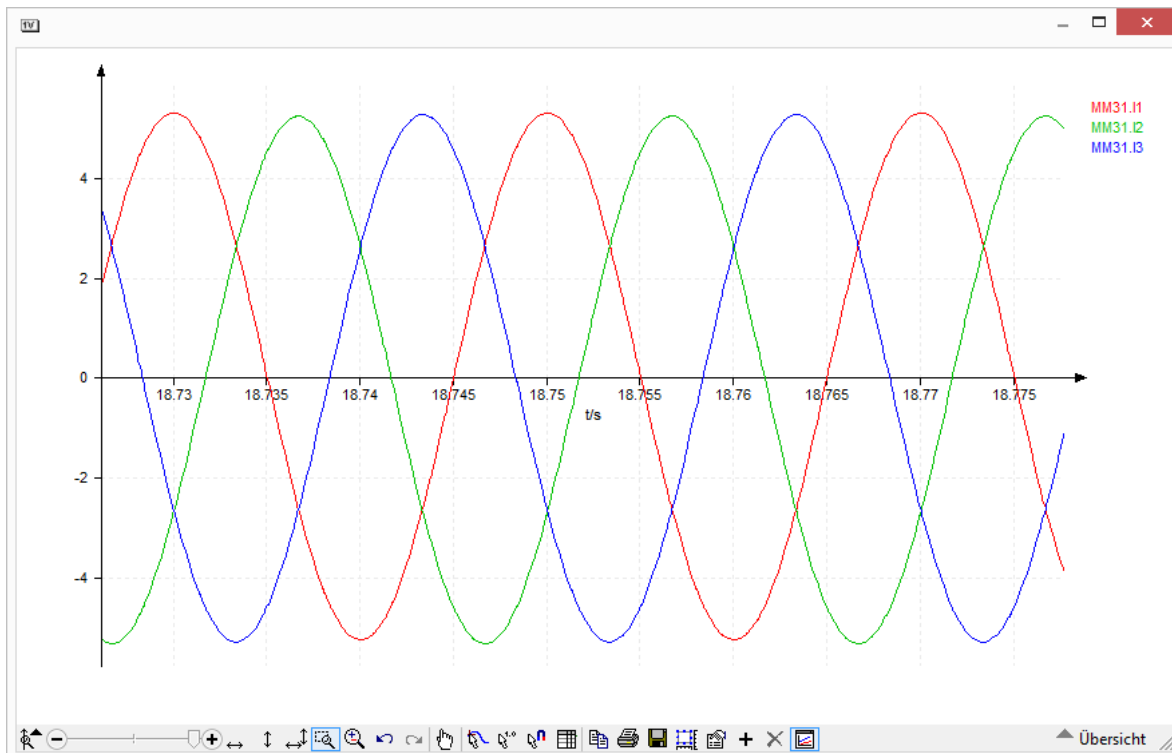
Mit dem Vergleich stellt sich fest, dass der Transformator in Dy-Schaltung höhere Einschaltströme bezieht, als in Yy-Schaltung

Schaltgruppe	Yy0	Yy0	Dy5	Yz5	Yy mit Ausgleichswicklung	M3-Brücke
Belastung	1~ Ohmsch	2~ Ohmsch	2~ Ohmsch	1~ Ohmsch	1~ Ohmsch	Ohmsch
Wirkungsgrad η	94,8%	96,96%	95,39%	88,75%	76;82%	97,11%

Tabelle 5-3: Wirkungsgrad-Vergleich bei Belastung

5.2. Simulationsergebnisse

Mit gerechten Werten von den praktischen Versuchsdurchführungen wurden Simulationen in PORTUNUS für Leerlauf- und Kurzschlussbetriebe, sowie für einphasige Belastung in Yy-Schaltung und M3-Schaltung realisiert und damit folgende Ergebnisse aufgenommen. Die Eingangsspannung $U_1 = 230 \text{ V}$ (Phase-N) eingestellt.

Bild 5-46: Kurzschluss, Eingangsstrom $I_{1,\text{eff}} = 2,55 \text{ A}$

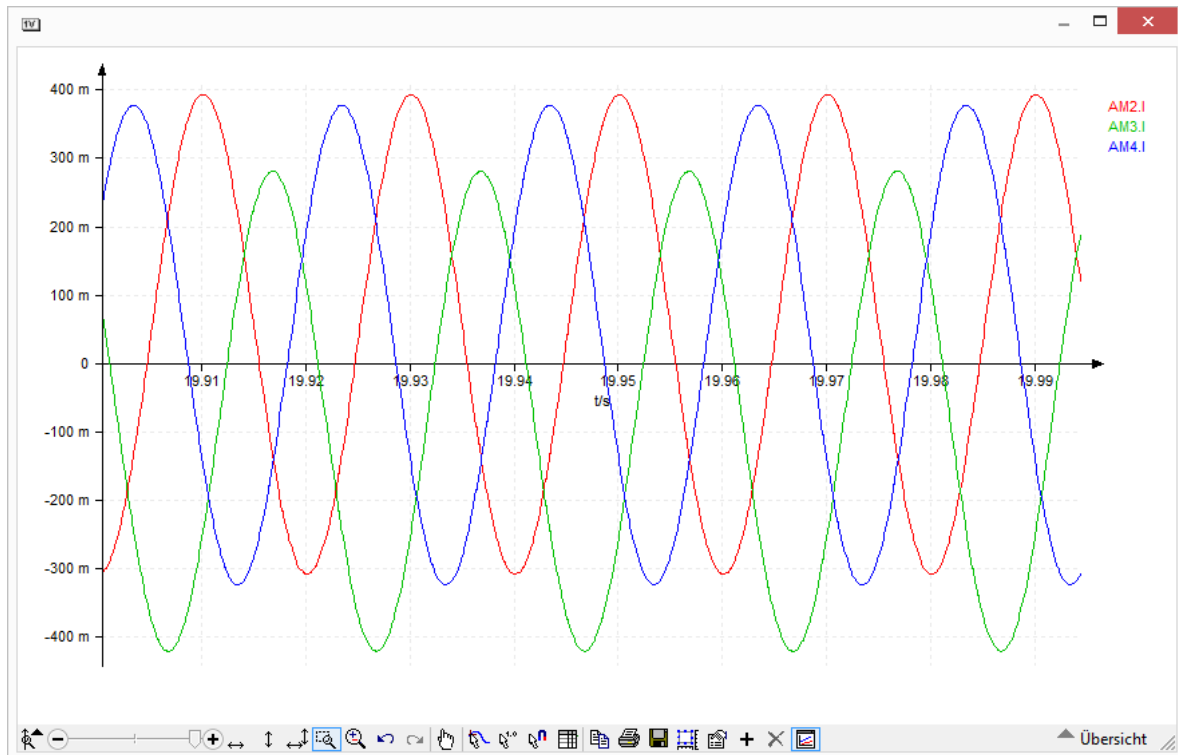


Bild 5-47: Bild 5.2-4: Leerlaufströme, $I_{1,eff} = 280 \text{ mA}$

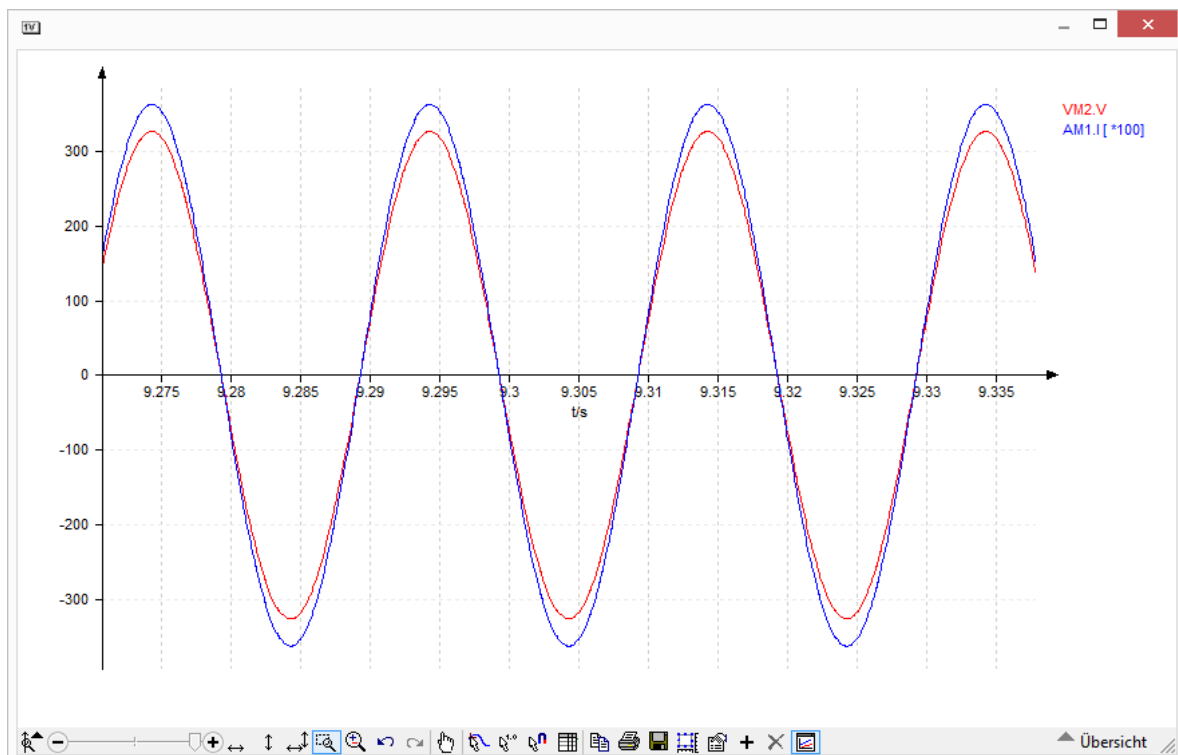


Bild 5-48: Einphasige Belastung in Yy, $R_L = 90 \Omega$, $U_{L,eff} = 230 \text{ V}$, $I_{L,eff} = 2,55 \text{ A}$

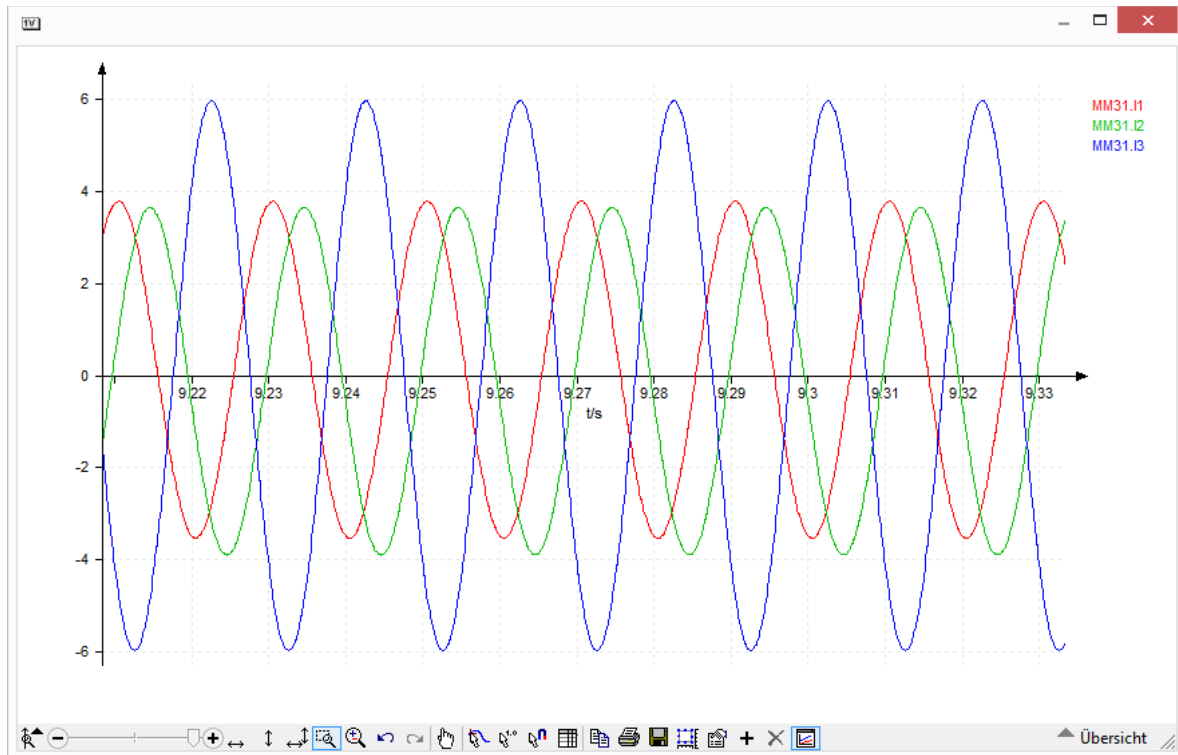


Bild 5-49: Einphasige Belastung in Yy, $R_L = 90 \Omega$, Netzstrom $I_{1,max,eff} = 4,2 \text{ A}$

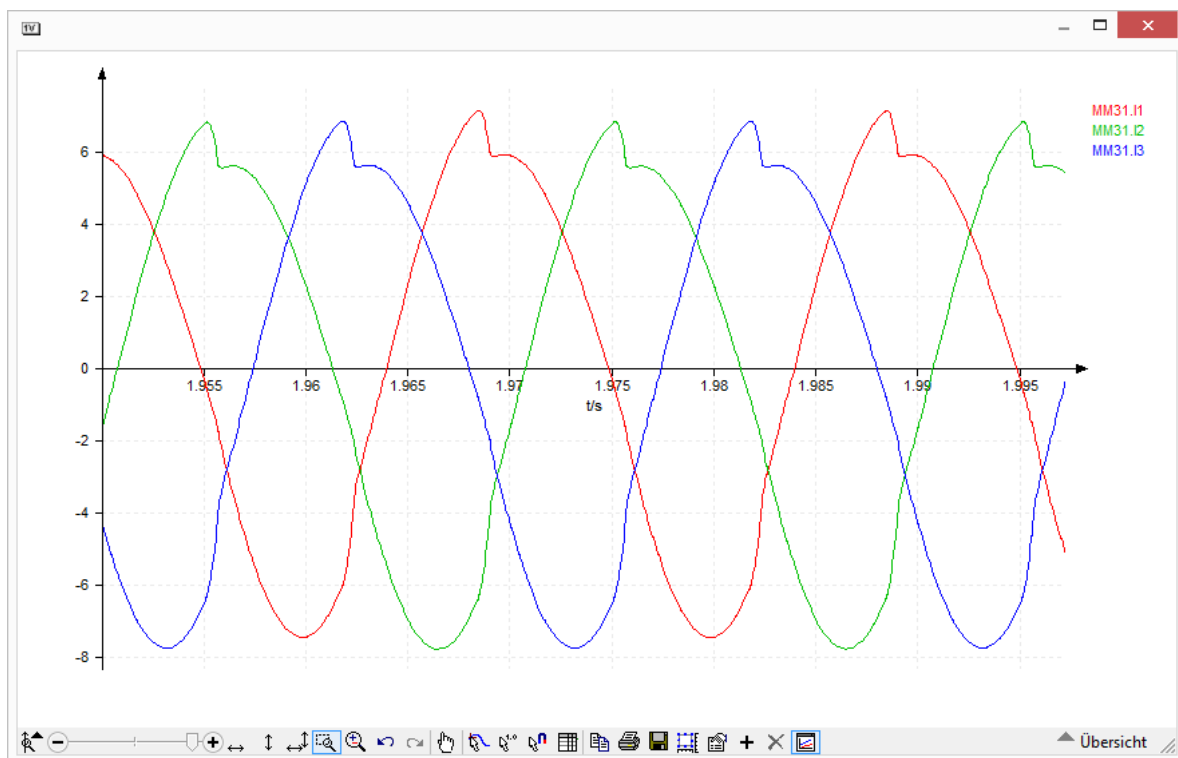
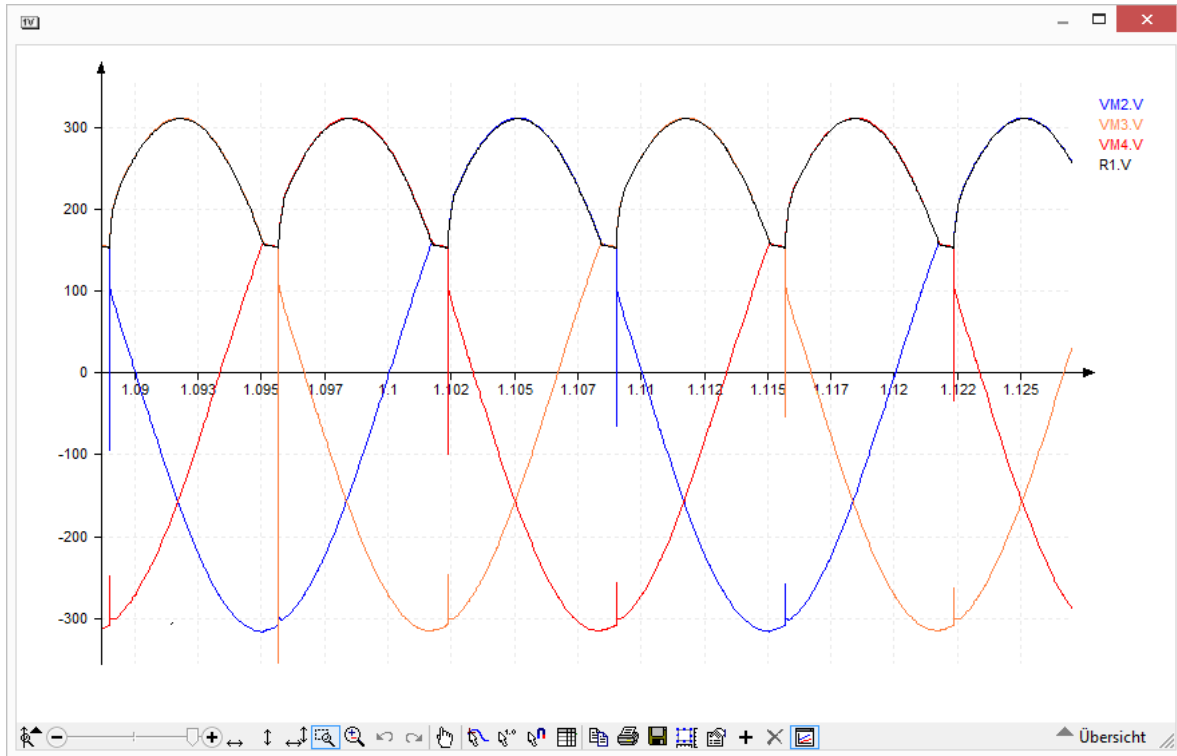
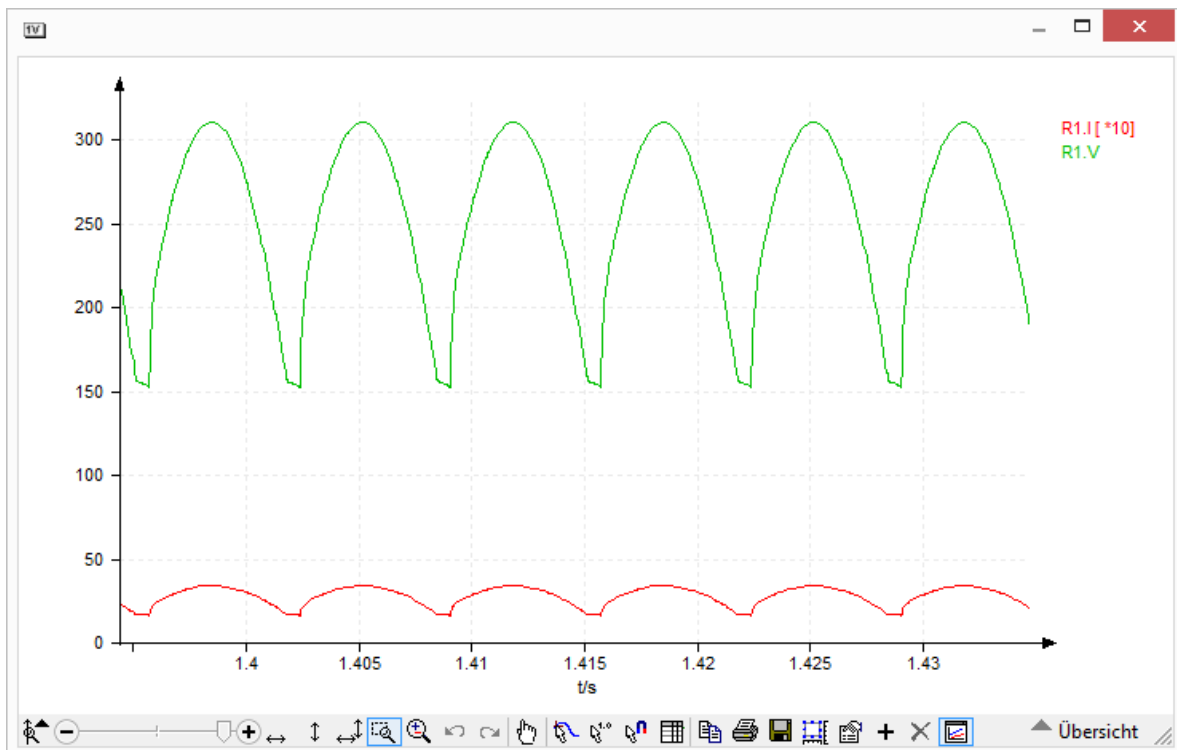


Bild 5-50: M3-Schaltung in Yy, $R_L = 90 \Omega$, Netzstrom $I_{1,max,eff} = 4,80 \text{ A}$

Bild 5-51: Gleichgerichtete Spannungen $U_{L, eff} = 270 \text{ V}$

Die M3-Schaltung wurde in der praktischen Versuchsdurchführung mit der Diode vom Typ BY 329 realisiert. Die Störungen an Spannungen liegen vermutlich auch daran, dass kein Simulationsmodell für diese Diode in der Simulationsbibliothek gefunden wurde und eine ähnliche Nachbildung dieser Diode aus dieser Simulationsbibliothek gewählt wurde.

Bild 5-52: Gleichgerichtete/r Spannung, Strom $I_{L, eff} \cong 3,02 \text{ A}$. $U_{L, eff} \cong 270 \text{ A}$

6. Zusammenfassung / Fazit

Transformatoren werden verwendet, um eine Spannung U_1 auf der Primärseite in die Spannung U_2 auf der Sekundärseite umzuformen. Bei dieser Umformung bleibt die Frequenz f unverändert. Die Spannungsumformung geschieht durch den magnetischen Fluss.

Drehstromtransformatoren basieren auf Einphasentransformatoren, D.h., eine Phase des Drehstromtransformators entspricht einen Einphasentransformator. Ein Drehstromtransformator kann in unterschiedlichen Schaltgruppen verschaltet werden, wie Dreieck (D), Stern (Y). Eine dritte Schaltgruppe ist die sogenannte Zick-Zack-Schaltung, die nur sekundärseitig verschalt wird.

Im Leerlauf- und Kurzschlussbetrieb können die Parameter, wie Leerlaufströme, Wicklungswiderstände, Streureaktanzen, Kurzschlussströme, Kupfer- und Eisenverluste, usw. des Transformators bestimmt werden.

Drehstromtransformatoren können sowohl symmetrisch als auch unsymmetrisch Belastet werden. Bei der unsymmetrischen Belastung kommen Verformungen der Netzströme vor.

Um die Theorie in die Praxis umzusetzen, wurde ein Drehstromtransformator, 5kVA, P.400V/S.400V-7,2A mit offenen Klemmen, von Firma Getra verwendet. Mit der praktischen Versuchsdurchführung wurden unterschiedliche Schaltgruppen, unsymmetrische Belastungen, Leerlauf- und Kurzschlussbetrieb, sowie M3-Brücke realisiert und untersucht. Mit einem Schaltwinkelsteller wurde er auf Einschaltstrom getestet. Mit den Messergebnissen wurden Simulationen mit PORTUNUS zum Vergleich ausgeführt.

Die Versuchsdurchführungen dienen zum Zwecke der Laborübungen zusätzlich zur Lehrveranstaltungen.

7. Literaturverzeichnis

[1] BINDER, A.: Elektrische Maschinen und Antriebe, Springer, 2012

[2] FISCHER, R.: Elektrische Maschinen, Hanser, 2013

[3] LISERRE, Prof. Dr.-Ing. M.: Technische Fakultät der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Leistungselektronik, Grundpraktikum, Transformator <http://www.tf.uni-kiel.de/servicezentrum/neutral/praktika/anleitungen/e304.pdf>, 10/2014

[4] FARSCHTSCHI, A.: Elektromaschinen in Theorie und Praxis, VDE, 2001

[5] SCHENKE, Prof. Dr.-Ing., G.: Elektrische Netze und Maschinen, FB Technik, Abt. E+I, University of Applied Sciences, Hochschule Emden-Leer, Vorlesung

[6] Praktikum Elektrische Maschinen, Drehstromtransformator, Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, Hochschule für Applied Sciences, Fakultät Elektrotechnik, https://www.htw-dresden.de/fileadmin/userfiles/et/Labore/Elektrische_Maschinen/Unterlagen/KP1_E03_DSTrafo.pdf , 03/2013

Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit versichere ich, Asim Gül, 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