



University of Applied Sciences

**HOCHSCHULE  
EMDEN • LEER**



**Labor**

**Grundlagen der Elektrotechnik**

FB Technik, Abteilung Elektrotechnik und Informatik

## **Praktikum Grundlagen der Elektrotechnik B**

### **Versuch B-3**

### **Drehstromtransformator**

**Name, Vorname:**

**Alsaady, Yaman**

**Schmidt, Oliver**

**Matrikel-Nr.:**

**7023554**

**7023462**

**Gruppe: A2a**

**WS / SS**

**Vorbereitung:**

**Durchführung:**

**Rücksprachen / Nachbesserungen:**

**Testat:**

## Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>2 Vorbereitung</b>	<b>1</b>
2.1 Ersatzschaltbild Transformator . . . . .	1
2.2 Aronschaltung zur Leistungsmessung . . . . .	5
2.3 Symmetrische Drehstromlast . . . . .	7
<b>3 Aufgabenstellung</b>	<b>8</b>
3.1 Messungen zur Ermittlung des vollständigen Ersatzschaltbildes des Drehstrom- transformators . . . . .	8
3.2 Messungen bei symmetrischer Drehstromlast auf der Sekundärseite . . . . .	10
<b>4 Auswertung</b>	<b>13</b>
4.1 Ersatzschaltbild Transformator . . . . .	13
4.2 Symmetrische Drehstromlast . . . . .	15

## Abbildungsverzeichnis

1 Vollständige einphasige Ersatzschaltbild des Transformators . . . . .	1
2 Zeichnung der eines Realtransformators mit Schaltplan . . . . .	2
3 Schaltplan von einem realen Transformator mit einem Lastwiderstand . . . . .	5
4 Zeigerdiagramm einer Sternschaltung . . . . .	5
5 ESP für den Transformator im Leerlauf . . . . .	6
6 Zeigerdiagramm für den Transformator im Leerlauf . . . . .	6
7 Nennwerte des Drehstromtransformators . . . . .	9
8 Vollständige einphasige ESP des Transformators . . . . .	13
9 ESB mit Messwerten aus der Messung 3.2 b . . . . .	15
10 Zeigerdiagramm der Außenleiterspannungen und Strangspannungen . . . . .	16

## Tabellenverzeichnis

1 Messwerte der Eingangsseite Yy0 Leerlaufversuch . . . . .	8
2 Messwerte der Ausgangsseite Yy0 Leerlaufversuch . . . . .	8
3 Messwerte der Eingangsseite Yy0 Kurzschlussversuch . . . . .	10
4 Messwerte der Ausgangsseite Yy0 Kurzschlussversuch . . . . .	10
5 Messwerte der Eingangsseite Yy0 Symmetrischlast . . . . .	11
6 Messwerte der Ausgangsseite Yy0 Symmetrischlast . . . . .	11
7 Messwerte der Eingangsseite Dy5 Symmetrischlast . . . . .	12
8 Messwerte der Ausgangsseite Dy5 Symmetrischlast . . . . .	12
9 Vergleich der primär- und sekundärseitigen Spannungen und Ströme . . . . .	20

## 2 Vorbereitung

Die Versuchsvorbereitung ist Bestandteil des Versuchs. Sie erhalten dafür ein gesondertes Testat. Ohne testierte Vorbereitung können Sie den Versuch nicht durchführen.

### 2.1 Ersatzschaltbild Transformator

- a) Zeichnen Sie das vollständige einphasige Ersatzschaltbild (Sternschaltung) des Transformators und geben Sie an, wie die einzelnen Werte und das Übersetzungsverhältnis  $\ddot{u}$  aus dem Leerlauf- und dem Kurzschlussversuch berechnet werden können.

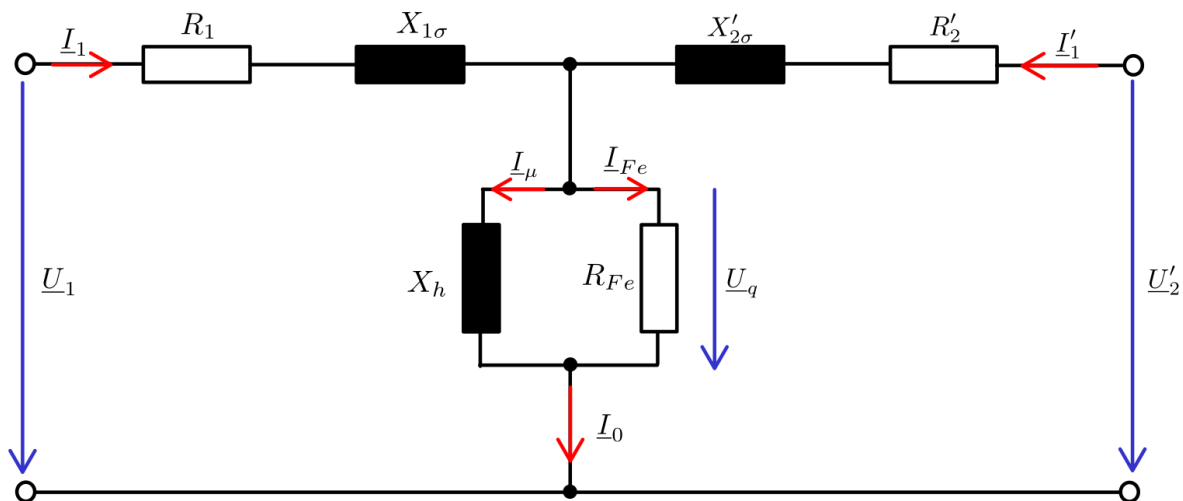


Abbildung 1: Vollständige einphasige Ersatzschaltbild des Transformators

$$\ddot{u} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

Leerlauf:

$$\begin{aligned} P_0 &= U_0 \cdot I_0 \cdot \cos(\varphi) \\ P_0 &= \frac{(U_1)^2}{R_{Fe}} \\ R_{Fe} &= \frac{(U_1)^2}{P_0} \\ Q_0 &= U_0 \cdot I_0 \cdot \sin(\varphi) \\ Q_0 &= \frac{(U_1)^2}{X_h} \\ X_h &= \frac{(U_1)^2}{Q_0} \end{aligned}$$

Kurzschluss:

$$\begin{aligned} P_K &= U_K \cdot I_K \cdot \cos(\varphi) \\ P_K &= (I_1 K)^2 \cdot R_K \\ R_K &= \frac{P_{1K}}{(I_1)^2} = R_1 + R'_2 \\ Q_0 &= U_0 \cdot I_0 \cdot \sin(\varphi) \\ Q_K &= (I_1 K)^2 \cdot X_K \\ X_K &= \frac{Q_{1K}}{(I_1)^2} = X_{1\sigma} + X'_{2\sigma} \end{aligned}$$

- b) Machen Sie sich die Bedeutung der einzelnen Bauelemente des vollständigen Ersatzschaltbildes klar (wird abgefragt). Welche Bedeutung haben die „gestrichenen“ Größen?

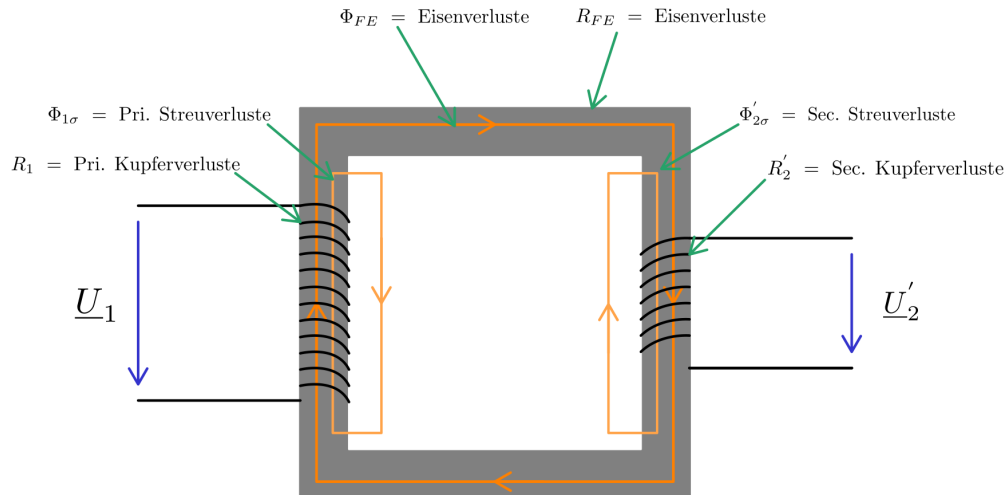


Abbildung 2: Zeichnung der eines Realtransformators mit Schaltpan

Das Ersatzschaltbild besteht aus verschiedenen Verlustkomponenten. Der Eisenkern bewirkt Energieverluste aufgrund von Hysterese und Wirbelströmen, die im Kern erzeugt werden. Sowohl an den Primär- als auch an den Sekundäranschlüssen befinden sich Kupferwicklungen, die aufgrund ihrer Länge ohmsche Verluste erzeugen, insbesondere unter Wechselstrombedingungen, wo Stromverdrängungseffekte auftreten. Der magnetische Fluss erstreckt sich nicht nur durch den Eisenkern, sondern breitet sich auch durch die Umgebungsluft aus, was zu einem Streufluss führt. Dieser Streufluss trägt nicht zur Energieübertragung bei. Die Striche an den Bauteilen signalisieren, dass diese bereits transformiert sind. Um die Spannung und den Strom umzuwandeln, muss das Ersatzschaltbild um einen idealen Transformator auf der Sekundärseite erweitert werden, da allein passive Bauelemente keine Transformationsfunktion erfüllen können.

- c) Wie groß darf der Strom im Kurzschlussversuch maximal werden? Begründen Sie Ihre Aussage.

Im Kurzschlussversuch bei einem Transformator wird die Eingangsspannung schrittweise erhöht, bis der Strom auf der Primärseite den Nennstrom ( $I_{1N}$ ) erreicht. Dabei muss beachtet werden, dass der Kurzschlussversuch eine Art von Überlasttest ist, und es ist wichtig, die zulässigen Grenzen einzuhalten, um Schäden am Transformator zu vermeiden.

$$I_K = I_{1N}$$

Die maximale Strombelastung im Kurzschlussversuch wird durch die thermische Belastung des Transformators begrenzt. Wenn der Strom zu hoch wird, kann dies zu übermäßiger Erwärmung führen, was zu Isolationsversagen oder anderen Schäden führen kann. Daher sollte der Kurzschlussversuch so durchgeführt werden, dass der Transformator nicht beschädigt wird.

Der Strom im Kurzschlussversuch sollte normalerweise auf einen Wert begrenzt werden, der sicher unterhalb des Kurzschluss Spitzenstroms ( $I_k$ ) liegt. Der Kurzschluss Spitzenstrom tritt

aufgrund von Transienten auf, wenn der Transformator plötzlich kurzgeschlossen wird. Er kann ein Vielfaches des Nennstroms betragen und ist kurzzeitig.

Die genaue maximale zulässige Strombelastung im Kurzschlussversuch hängt von den spezifischen Eigenschaften des Transformators ab, einschließlich seiner Größe, Bauart und Kühlung. Herstellerangaben und Normen sollten für eine genaue Bestimmung konsultiert werden. Es ist wichtig, den Kurzschlussversuch sorgfältig zu planen und sicherzustellen, dass er den Spezifikationen des Transformators entspricht, um Schäden zu vermeiden und die Sicherheit zu gewährleisten.

- d) Leiten Sie her, wie die Verlustleistung des Transformators in einem beliebigen Betriebspunkt (vorgegeben durch den Strom  $I_1$ ) aus den Verlusten der Leerlauf- und Kurzschlussmessung ermittelt werden kann.

$$P_{Cu} = P_K \cdot \frac{I^2}{I_N^2} \quad | P_K = 3 \cdot R_K \cdot I_N^2$$

$$P_{Cu} = 3 \cdot R_K \cdot I_N^2 \cdot \frac{I^2}{I_N^2}$$

$$P_{Cu} = 3 \cdot R_K \cdot I^2$$

$$P_{Fe} = P_0 \cdot \frac{U^2}{U_N^2} \quad | P_0 = \frac{U_N^2}{R_{Fe}}$$

$$P_{Fe} = \frac{U_N^2}{R_{Fe}} \cdot \frac{U^2}{U_N^2}$$

$$P_{Fe} = \frac{U^2}{R_{Fe}}$$

$$\Rightarrow P_V = 3 \cdot R_K \cdot I^2 + \frac{U^2}{R_{Fe}}$$

- e) Leiten Sie anhand des Zeigerdiagramms (Bild 6) die Formeln für den Längs- und Querspannungsabfall her.

$$\underline{\Delta U} = \underline{Z} \cdot \underline{I}_1$$

$$\underline{\Delta U} = (R_k + jX_k) \cdot (I_1 \cdot e^{-j\varphi_2})$$

$$\underline{\Delta U} = (R_k + jX_k) \cdot (I_1 \cdot \cos(-\varphi_2) + j \cdot I_1 \cdot \sin(-\varphi_2))$$

$$\underline{\Delta U} = (R_k + jX_k) \cdot (I_1 \cdot \cos \varphi_2 - j \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_2)$$

$$\underline{\Delta U} = R_K \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_2 + X_K \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_2 + j(-R_K \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_2 + X_K \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_2)$$

$$\underline{\Delta U} = U_\ell + jU_q$$

$$\Rightarrow U_\ell = \operatorname{Re} \underline{\Delta U} = R_K \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_2 + X_K \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_2$$

$$\Rightarrow U_q = \operatorname{Im} \underline{\Delta U} = -R_K \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_2 + X_K \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_2$$

- f) Leiten Sie anhand des Zeigerdiagramms (Bild 6) und den Formeln für den Längs- und Querspannungsabfall die Formel (12) für den relativen Spannungsfall auf der Sekundärseite her.

$$\begin{aligned}\Delta U'_2 &= \frac{U_1 - U'_2}{U_1} \\ \Delta U'_2 &= 1 - \frac{U'_2}{U_1} \\ \underline{U}'_2 + \underline{U}_\ell &= \sqrt{\underline{U}_1^2 - \underline{U}_q^2} \\ \underline{U}'_2 &= \sqrt{\underline{U}_1^2 - \underline{U}_q^2} - \underline{U}_\ell \\ \frac{\underline{U}'_2}{\underline{U}_1} &= \frac{\sqrt{\underline{U}_1^2 - \underline{U}_q^2}}{\underline{U}_1} - \frac{\underline{U}_\ell}{\underline{U}_1} \\ \frac{\underline{U}'_2}{\underline{U}_1} &= \sqrt{\frac{\underline{U}_1^2 - \underline{U}_q^2}{\underline{U}_1^2}} - \frac{\underline{U}_\ell}{\underline{U}_1} \\ \frac{\underline{U}'_2}{\underline{U}_1} &= \sqrt{1 - \left(\frac{\underline{U}_q}{\underline{U}_1}\right)^2} - \frac{\underline{U}_\ell}{\underline{U}_1} \\ \Delta U'_2 &= 1 - \frac{\underline{U}'_2}{\underline{U}_1} \\ \Delta U'_2 &= 1 + \frac{\underline{U}_\ell}{\underline{U}_1} - \sqrt{1 - \left(\frac{\underline{U}_q}{\underline{U}_1}\right)^2}\end{aligned}$$

- g) Welche Aussagekraft hat die relative Kurzschlussspannung für den Betrieb des Transformators?

Die relative Kurzschlussspannung eines Transformators ist ein entscheidender Parameter, der seine Verhaltensweise unter Belastung widerspiegelt. Dieser Wert ist von großer Bedeutung bei der Auslegung von Niederspannungsverteilungen sowie bei der Dimensionierung von Komponenten wie Sicherungsleisten und Leistungsschaltern.

Die relative Kurzschlussspannung gibt an, wie stark die Spannung ansteigt, wenn die Sekundärseite des Transformators kurzgeschlossen wird und der Nennstrom auf der Sekundärseite fließt. Dies ist von Bedeutung, da im Falle eines Kurzschlusses in der Verteilung die Sekundärseite des Transformators weiterhin am Netz angeschlossen ist, bis der vorgeschaltete Schutzmechanismus auslöst.

Die Kenntnis der relativen Kurzschlussspannung ermöglicht die Berechnung des maximalen Kurzschlussstroms, der in diesem Szenario auftreten kann. Ein einfacher Dreisatz kann verwendet werden, um dies zu ermitteln. Als Beispiel kann ein Drehstromtransformator mit den Spezifikationen 6 kV/400 V und einer relativen Kurzschlussspannung von 6 % dienen. Der sekundäre Nennstrom beträgt 145 A.

Die Berechnung des maximalen Kurzschlussstroms erfolgt durch die Division des Nennstroms durch die relative Kurzschlussspannung in Prozent. In diesem Fall ergibt sich ein Wert von 24 A. Dieser Strom, hier 2400 A, kann kurzzeitig durch die nach dem Transformator geschalteten Schutzschalter fließen. Es ist jedoch zu beachten, dass die dynamischen Kräfte, die bei einem Kurzschluss auftreten, die Schaltelemente mechanisch belasten und sie gegebenenfalls beschädigen können.

Es ist daher entscheidend, die Kurzschlussfestigkeit der verwendeten Komponenten zu überprüfen und gegebenenfalls hochwertigere Komponenten auszuwählen. In vielen Fällen sind gängige Niederspannungsschaltgeräte jedoch für Kurzschlussströme von 6 kA ausgelegt und erfüllen die Anforderungen.

## 2.2 Aronschaltung zur Leistungsmessung

- a) Leiten Sie her, warum Sie mit der Aronschaltung (Bild 8) die gesamte Scheinleistung im Dreiphasensystem messen können, sofern der Summenstrom im Knoten K zu Null angenommen werden kann.

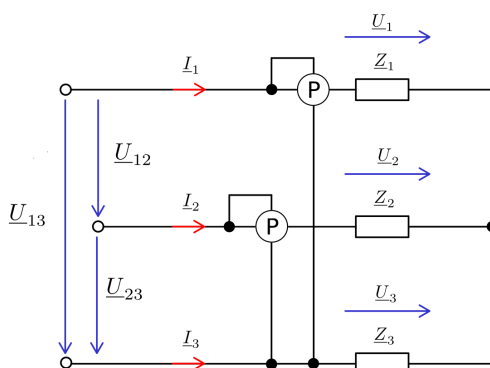


Abbildung 3: Schaltplan von einem realen Transformator mit einem Lastwiderstand

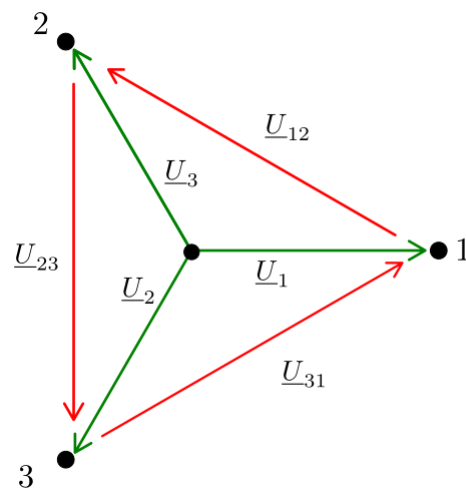


Abbildung 4: Zeigerdiagramm einer Sternschaltung

Knotenregel gilt: ges.:  $i_3$

$$0 = i_1 + i_2 + i_3$$

$$i_3 = -i_1 - i_2$$

Leistungsgleichung:

$$\underline{S} = \underline{U} \cdot \underline{I} = \underline{u} \cdot \underline{i}$$

$$\underline{S} = u_1 \cdot i_1 + u_2 \cdot i_2 + u_3 \cdot i_3$$

$$\underline{S} = u_1 \cdot i_1 + u_2 \cdot i_2 + u_3 \cdot (-i_1 - i_2)$$

$$\underline{S} = i_1(u_1 - u_3) + i_2(u_2 - u_3)$$

$$\underline{S} = i_1 \cdot u_{13} + i_2 \cdot u_{23}$$

Phasenverschiebungswinkel:

$L_M$  = Leistungsmessgerät

$$\begin{aligned} + L_{M1} &= + L_{M2} & \{\varphi &= 0^\circ \\ + L_{M1} &= - L_{M2} & \{\varphi &= \pm 90^\circ \\ L_{M1} &\neq L_{M2} & \{0^\circ < \varphi < 60^\circ \\ - L_{M1} &\text{ oder } - L_{M2} & \{60^\circ < \varphi < 0^\circ \end{aligned}$$

- b) Skizzieren Sie das Ersatzschaltbild für den Transformator im Leerlauf. Zeichnen Sie das zugehörige qualitative Zeigerdiagramm für den Leerlauf.

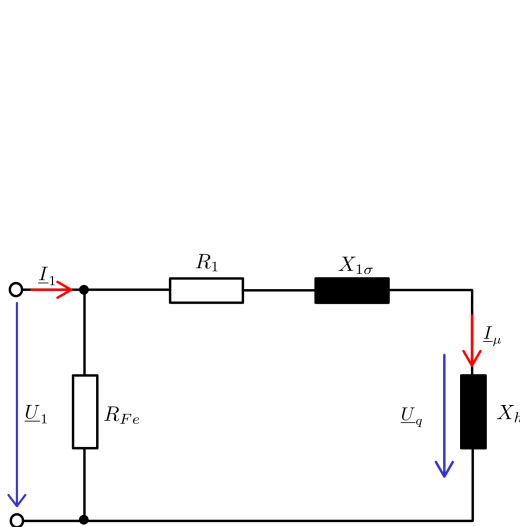


Abbildung 5: ESP für den Transformator im Leerlauf

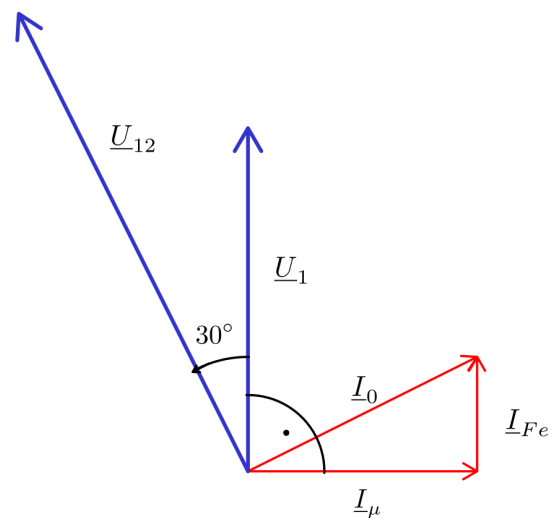


Abbildung 6: Zeigerdiagramm für den Transformator im Leerlauf

- c) Zeigen Sie anhand dieses Zeigerdiagramms, warum Sie im Leerlaufversuch (Bild 9) mit der Aronschaltung eine negative Wirkleistung  $P_1$  messen.

$$\begin{aligned} P_1 &= U_1 \cdot I_1 \cdot \cos(\varphi) \\ P_1 &= U_1 \cdot I_1 \cdot \cos(\varphi_{U1} - \varphi_{I1}) \\ P_1 &= \frac{U_{12}}{\sqrt{3}} \cdot I_1 \cdot \cos(\varphi_{U1} - \varphi_{I1} - 30^\circ) \\ P_1 &= \frac{U_{12}}{\sqrt{3}} \cdot I_1 \cdot \cos(-120^\circ) \\ P_1 &= -\frac{1}{2} \cdot \frac{U_{12}}{\sqrt{3}} \cdot I_1 \end{aligned}$$



### 2.3 Symmetrische Drehstromlast

- a) Geben Sie an, wie Sie aus den Messwerten nach 3.2 (a) und (b) die gemittelten Größen  $U_m$ ,  $I_m$  (siehe Versuch E2-4), den Leistungsfaktor  $\lambda = \cos(\varphi)$ , die Leistungen  $S$ ,  $P$  und  $Q$  jeweils für die Primär- und die Sekundärseite berechnen können.

Leistungsfaktor  $\lambda(\cos(\varphi))$ :

$$\lambda = \frac{|P|}{S} = \frac{S \cdot |\cos \varphi|}{S} = |\cos \varphi|$$

Der Leistungsfaktor kann zwischen 0 und 1 liegen:  $0 \leq \lambda \leq 1$   
Leistungen  $S$ ,  $P$  und  $Q$ :

$$P = U_M \cdot I_M \cdot \lambda$$

$$S = U_M \cdot I_M$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

- b) Mit welcher Leistung können Sie den Transformator (Yy0) maximal belasten?

$$S_{max} = \sqrt{3} \cdot U_{max} \cdot I_{max}$$

$$S_{max} = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 7,6 \text{ A}$$

$$S_{max} = 5 \text{ kVA}$$

### 3 Aufgabenstellung

**ACHTUNG:** Für den Schaltungsaufbau bitte nur Sicherheitsleitungen und Messgeräte mit Sicherheitsbuchsen verwenden! Die Gehäuse sind über Schutzleiter (grün/gelbe Leitung) an PE erden! Das Oszilloskop ist nur über Trennteiler bzw. Wandler anzuschließen!

**Der Transformator soll in der Baugruppe Yy0 geschaltet werden! Bitte überprüfen Sie das!**

**Nach jeder Messung ist die Versorgungsspannung des Transformators wieder auf 0 runterzufahren!**

#### 3.1 Messungen zur Ermittlung des vollständigen Ersatzschaltbildes des Drehstromtransformators

Bitte nutzen Sie für den Aufbau 6 digitale Multimeter zur Spannungsmessung und 3 analoge Multimeter zur Strommessung. Für die Messung mit dem Oszilloskop verwenden Sie für die Spannung potentialfreie Tastköpfe und die Stromwandler zur Messung des Stromes.

**Leerlaufversuch:** ( $U_N \leq U_0 \leq 1,05U_N$ )

- a) Messen Sie die Leerlaufspannung  $U_0$  sowie den Leerlaufstrom  $I_0$  auf der Primärseite und die Leerlaufspannung  $U_{20}$  auf der Sekundärseite für alle drei Phasen. Messen Sie ebenfalls alle zugehörigen Phasenwinkel der Primärseite. Beziehen Sie die Winkel auf  $\underline{U}_{12}$  der Primärseite.

Tabelle 1: Messwerte der Eingangsseite Yy0 Leerlaufversuch

Phasen	$\underline{U}$ in [V]	$\varphi_U$ in [°]	$\underline{I}$ in [mA]	$\varphi_I$ in [°]
L1	395	0	450	-120
L2	393	-120	300	135
L3	391	120	450	45
Mittelwert	393,000	0,000	400,000	20,000

Tabelle 2: Messwerte der Ausgangsseite Yy0 Leerlaufversuch

Phasen	$\underline{U}$ in [V]	$\varphi_U$ in [°]	$\underline{I}$ in [A]	$\varphi_I$ in [°]
L1	385	-180	0	0
L2	381	60	0	0
L3	381	-60	0	0
Mittelwert	382,333	-60,000	0,000	0,000

**Kurzschlussversuch:** ( $I_k = I_N$ , Spannung beachten!)

- b) Bestimmen Sie den Nennstrom des Transformators.

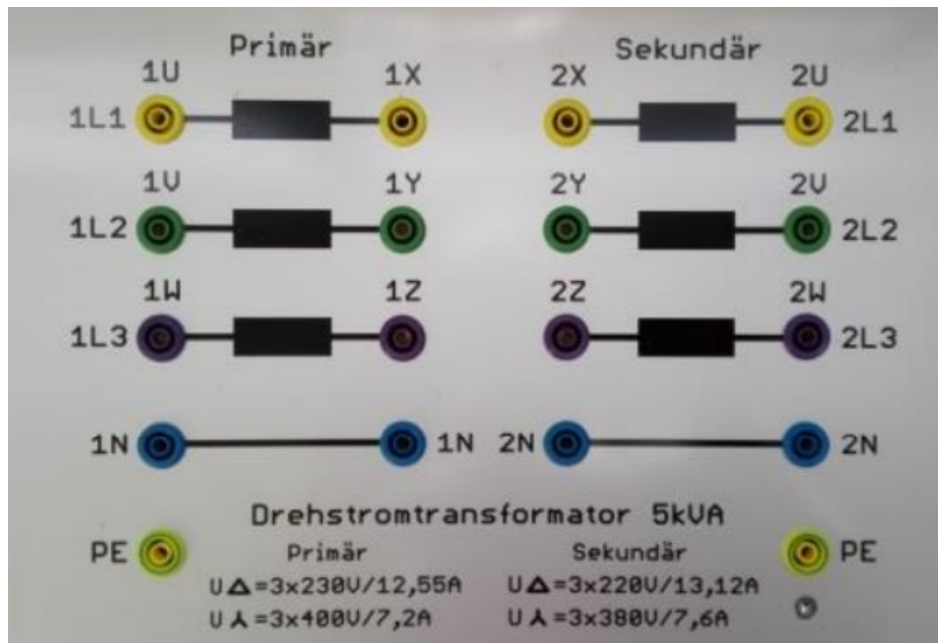


Abbildung 7: Nennwerte des Drehstromtransformators

Dreieckverschaltung Primärseite

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

$$I_N = 12,55 \text{ A}$$

Sternverschaltung Primärseite

$$U_N = 400 \text{ V}$$

$$I_N = 7,2 \text{ A}$$

Dreieckverschaltung Sekundärseite

$$U_N = 220 \text{ V}$$

$$I_N = 13,12 \text{ A}$$

Sternverschaltung Sekundärseite

$$U_N = 380 \text{ V}$$

$$I_N = 7,6 \text{ A}$$

- c) Messen Sie bei primärseitigem Nennstrom (Kurzschlussstrom) die Kurzschlussspannung  $U_K$  und den sekundären Kurzschlussstrom  $I_{2k}$  aller drei Phasen sowie die zugehörigen Phasenwinkel. Beziehen Sie die Winkel auf der Primärseite auf  $U_{12}$  der Primärseite. Auf der Sekundärseite messen Sie den Winkel zwischen  $\underline{U}_{12}$  und  $\underline{I}_1$  bezogen auf  $\underline{U}_{12}$ .

Tabelle 3: Messwerte der Eingangsseite Yy0 Kurzschlussversuch

Phasen	$\underline{U}$ in [V]	$\varphi_U$ in [°]	$\underline{I}$ in [A]	$\varphi_I$ in [°]
L1	13	0	7,3	-52
L2	12	-121	7,3	-175
L3	12	121	7,0	65
Mittelwert	12,300	0,000	7,200	-54,000

Tabelle 4: Messwerte der Ausgangsseite Yy0 Kurzschlussversuch

Phasen	$\underline{U}$ in [V]	$\varphi_U$ in [°]	$\underline{I}$ in [A]	$\varphi_I$ in [°]
L1	0	0	7,4	-50
L2	0	0	7,5	-50
L3	0	0	7,0	-50
Mittelwert	0,000	0,000	7,300	-50,000

### 3.2 Messungen bei symmetrischer Drehstromlast auf der Sekundärseite

Belasten Sie den Transformator mit der ohmsch-induktiven Last nach Bild 11.

Bitte achten Sie auf den Nennstrom! ( $U_{12} = 400\text{ V}$  primärseitig).

Verwenden Sie zur Strommessung analoge und zur Spannungsmessung digitale Messgeräte.

- a) Dürfen Sie diese Last mit dem Transformator betreiben? Begründen Sie!

Die Verbindung der Last mit dem Transformator ist grundsätzlich möglich, da der Transformator in der Lage ist, den maximalen Strom, d.h., den Nennstrom von 7,6A, zu liefern. Jedoch ist anzumerken, dass die Last möglicherweise nicht im Einklang mit den Nennwerten betrieben wird, denn der Nennbetrieb der Last liegt bei 9 A. Diese Konfiguration ist aus mehreren Gründen nicht empfehlenswert.

Erstens führt der Betrieb des Transformators nahe der maximalen Belastungsgrenze zu einem erhöhten thermischen Stress und einer potenziellen Reduzierung der Lebensdauer des Transformators.

Zweitens ist zu beachten, dass die Last möglicherweise nicht mit den Nennwerten betrieben werden kann, dies könnte zu einer instabilen Betriebssituation führen, die nicht nur die Funktionalität der Last beeinträchtigt, sondern auch zu weiteren Schäden an anderen elektrischen Komponenten führen kann.

Insgesamt ist die vorgeschlagene Konfiguration nicht optimal, da sie das Potenzial für eine verkürzte Lebensdauer des Transformators und eine unsachgemäße Betriebsweise der Last birgt. Es wird empfohlen, alternative Konfigurationen zu prüfen, um eine effiziente und sichere elektrische Energieübertragung zu gewährleisten.

**Schaltgruppe  $Yy0$**

- b) Messen Sie alle Effektivwerte der Außenleiterspannungen und der Außenleiterströme auf der Primär- und Sekundärseite sowie alle zugehörigen Phasenwinkel. Beziehen Sie die Winkel auf der Primärseite auf  $\underline{U}_{12}$  der Primärseite. Auf der Sekundärseite messen Sie den Winkel zwischen  $\underline{U}_{12}$  und  $\underline{I}_1$  bezogen auf  $\underline{U}_{12}$ . Messen Sie ebenfalls den Winkel zwischen den beiden Spannungen  $\underline{U}_{12}$  auf der Primär- und der Sekundärseite.

Tabelle 5: Messwerte der Eingangsseite  $Yy0$  Symmetrischelast

Phasen	$\underline{U}$ in [V]	$\varphi_U$ in [°]	$\underline{I}$ in [A]	$\varphi_I$ in [°]
$L1$	378	0	7	-65
$L2$	371	-120	7	172
$L3$	372	120	7	53
Mittelwert	373,667	0,000	7,000	53,333

Tabelle 6: Messwerte der Ausgangsseite  $Yy0$  Symmetrischelast

Phasen	$\underline{U}$ in [V]	$\varphi_U$ in [°]	$\underline{I}$ in [A]	$\varphi_I$ in [°]
$L1$	357	0	7,0	-64
$L2$	347	120	7,0	-64
$L3$	358	-120	6,7	-64
Mittelwert	354,000	0,000	6,900	-64,000

**Schaltgruppe Dy5**

- c) Messen Sie alle Effektivwerte der Außenleiterspannungen und der Außenleiterströme auf der Primär- und Sekundärseite sowie alle zugehörigen Phasenwinkel. Beziehen Sie die Winkel auf der Primärseite auf  $\underline{U}_{12}$  der Primärseite. Auf der Sekundärseite messen Sie den Winkel zwischen  $\underline{U}_{12}$  und  $\underline{I}_1$  bezogen auf  $\underline{U}_{12}$ . Messen Sie ebenfalls den Winkel zwischen den beiden Spannungen  $\underline{U}_{12}$  auf der Primär- und der Sekundärseite.

Tabelle 7: Messwerte der Eingangsseite Dy5 Symmetrischelast

Phasen	$\underline{U}$ in [V]	$\varphi_U$ in [°]	$\underline{I}$ in [A]	$\varphi_I$ in [°]
L1	204	0	11	-65
L2	187	-120	11	170
L3	202	120	11	58
Mittelwert	197,667	0,000	11,100	54,333

Tabelle 8: Messwerte der Ausgangsseite Dy5 Symmetrischelast

Phasen	$\underline{U}$ in [V]	$\varphi_U$ in [°]	$\underline{I}$ in [A]	$\varphi_I$ in [°]
L1	357	-152	7	-65
L2	347	94	6	-65
L3	358	-30	6	-65
Mittelwert	354,000	-29,333	6,300	-65,000

**Die Primärseite bitte am Ende der Messung wieder in Stern verschalten!**

## 4 Auswertung

### 4.1 Ersatzschaltbild Transformator

- a) Zeichnen Sie das vollständige einphasige Ersatzschaltbild (Sternschaltung) des Transformators.

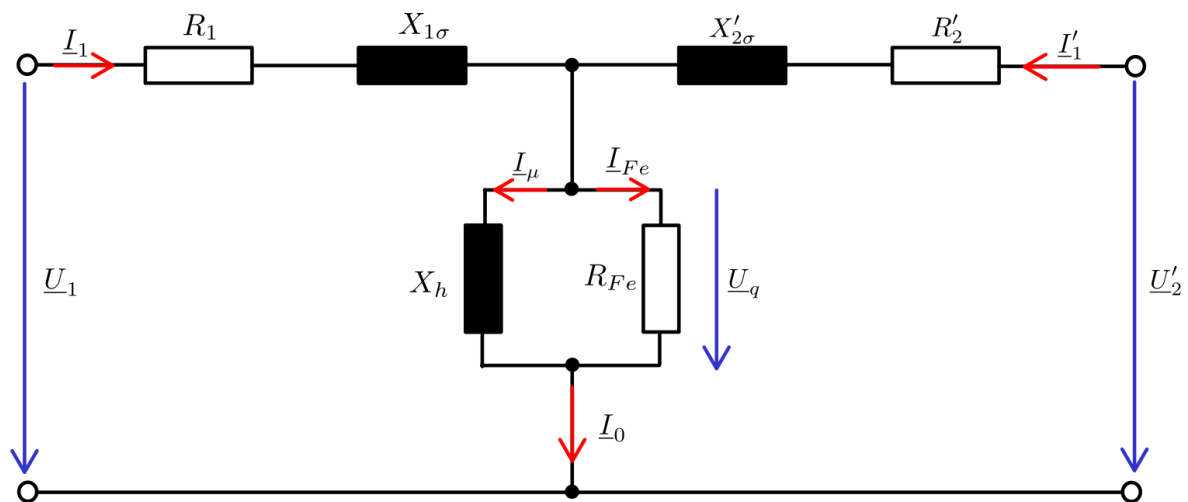


Abbildung 8: Vollständige einphasige ESP des Transformators

- b) Bestimmen Sie die Leistung im Leerlauf auf der Primärseite nach Gleichung (16).

$$\begin{aligned}\underline{S} &= \underline{U}_{12} \cdot \underline{I}_1^* + \underline{U}_{32} \cdot \underline{I}_3^* \\ \underline{S} &= \underline{U}_{12} \cdot \underline{I}_1^* - \underline{U}_{23} \cdot \underline{I}_3^* \\ \underline{S}_0 &= 395 \text{ V} \cdot e^{j0^\circ} \cdot 0.45 \text{ A} \cdot e^{-(-j120^\circ)} - 393 \text{ V} \cdot e^{-j110^\circ} \cdot 0.45 \text{ A} \cdot e^{-(j25^\circ)} \\ \underline{S}_0 &= 36,2 \text{ W} + j279 \text{ var} = 281 \text{ VA} \cdot e^{j82,6^\circ} \\ P_0 &= 36,2 \text{ W} \\ Q_0 &= 279 \text{ var}\end{aligned}$$

- c) Bestimmen Sie die Wirkleistung im Kurzschlussfall auf der Sekundärseite nach Gleichung (16). Gehen Sie dabei von einem symmetrischen System aus.

$$\begin{aligned}\underline{S} &= \underline{U}_{12} \cdot \underline{I}_1^* + \underline{U}_{32} \cdot \underline{I}_3^* \\ \underline{S} &= \underline{U}_{12} \cdot \underline{I}_1^* - \underline{U}_{23} \cdot \underline{I}_3^* \\ \underline{S}_K &= 12.5 \text{ V} \cdot e^{j0^\circ} \cdot 7,3 \text{ A} \cdot e^{-(-j52^\circ)} - 12 \text{ V} \cdot e^{-j121^\circ} \cdot 7 \text{ A} \cdot e^{-(j65^\circ)} \\ \underline{S}_K &= 140 \text{ W} + j63 \text{ var} = 153 \text{ VA} \cdot e^{j24^\circ} \\ P_K &= 140 \text{ W} \\ Q_K &= 63 \text{ var}\end{aligned}$$

- d) Ermitteln Sie die Daten des vollständigen Ersatzschaltbildes des Transformators mit der Annahme  $X_{1\sigma} = X'_{2\sigma}$  sowie  $R_1 = R'_2$ .

$$\begin{aligned}
 R_1 &= R'_2 \\
 \Rightarrow R_1 &= \frac{P_{1K}}{2I_1^2} \\
 R_1 &= \frac{140 \text{ W}}{3} \cdot \frac{1}{2(7,4 \text{ A})^2} \\
 R_1 &= R'_2 = 0,43 \text{ } \Omega \\
 X_{1\sigma} &= X'_{2\sigma} \\
 \Rightarrow X_{1\sigma} &= \frac{Q_{1K}}{2I_1^2} \\
 X_{1\sigma} &= \frac{63 \text{ var}}{3} \cdot \frac{1}{2(7,4 \text{ A})^2} \\
 X_{1\sigma} &= X'_{2\sigma} = 0,19 \text{ } \Omega \\
 R_{FE} &= \frac{3 \cdot (U_1)^2}{P_0} = \frac{3 \cdot (U_{12})^2}{3 \cdot P_0} = \frac{(U_{12})^2}{P_0} \\
 R_{FE} &= \frac{(395 \text{ V})^2}{36,2 \text{ W}} \\
 R_{FE} &= 4,3 \text{ k}\Omega \\
 X_h &= \frac{3 \cdot (U_1)^2}{Q_0} = \frac{3 \cdot (U_{12})^2}{3 \cdot Q_0} = \frac{(U_{12})^2}{Q_0} \\
 X_h &= \frac{(395 \text{ V})^2}{279 \text{ var}} \\
 X_h &= 559,2 \text{ k}\Omega
 \end{aligned}$$

- e) Berechnen Sie anhand des Kurzschlussversuches die relative Kurzschlussspannung des Transformators.

$$\begin{aligned}
 u_k &= \frac{U_K}{U_N} \\
 u_k &= \frac{12 \text{ V}}{400 \text{ V}} \\
 u_k &= 0,03 \hat{=} 3\%
 \end{aligned}$$



## 4.2 Symmetrische Drehstromlast

- a) Berechnen Sie aus den Messwerten nach 3.2(b) die gemittelten Größen  $U_m$ ,  $I_m$  und  $\varphi_m$  (siehe Versuch E2-4), den Leistungsfaktor  $\lambda = \cos(\varphi_m)$ , die Leistungen  $S$ ,  $P$  und  $Q$  jeweils für die Primär- und die Sekundärseite.

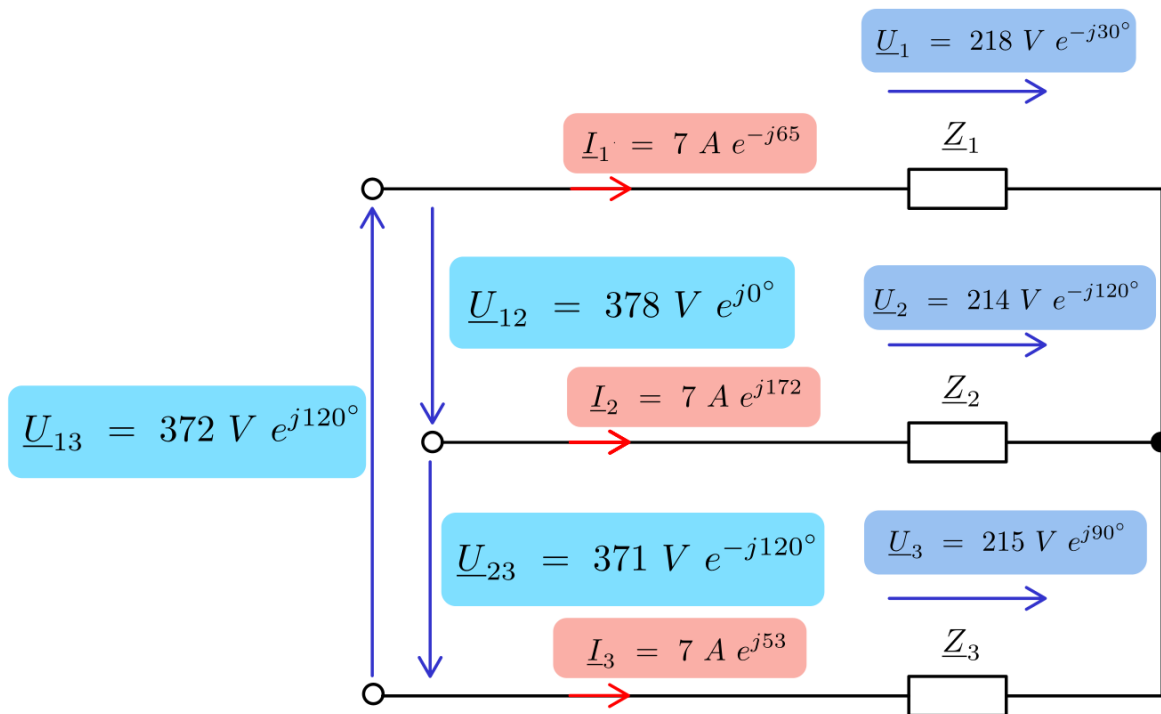


Abbildung 9: ESB mit Messwerten aus der Messung 3.2 b

**Spannung:**

Primärseite:	Sekundärseite:
$U_{M.pri} = \frac{U_{12} + U_{23} + U_{31}}{3}$	$U_{M.sec} = \frac{U_{12} + U_{23} + U_{31}}{3}$
$U_{M.pri} = \frac{378 \text{ V} + 371 \text{ V} + 372 \text{ V}}{3}$	$U_{M.sec} = \frac{378 \text{ V} + 371 \text{ V} + 358 \text{ V}}{3}$
$U_{M.pri} = 373,67 \text{ V}$	$U_{M.sec} = 354 \text{ V}$

**Strom:**

**Primärseite:**

$$I_{M.pri} = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3}$$

$$I_{M.pri} = \frac{7\text{ A} + 7\text{ A} + 7\text{ A}}{3}$$

$$I_{M.pri} = 7\text{ A}$$

**Sekundärseite:**

$$I_{M.sec} = \frac{I_{12} + I_{23} + I_{31}}{3}$$

$$I_{M.sec} = \frac{7\text{ A} + 7\text{ A} + 6,7\text{ A}}{3}$$

$$I_{M.sec} = 6,9\text{ A}$$

**Phase:**

**Primärseite:**

$$\varphi_{M.pri} = \frac{(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3) - 30^\circ}{3}$$

$$\varphi_{M.pri} = \frac{(65^\circ + 68^\circ + 67^\circ) - 30^\circ}{3}$$

$$\varphi_{M.pri} = 36,7^\circ$$

**Sekundärseite:**

$$\varphi_{M.sec} = \frac{(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3) - 30^\circ}{3}$$

$$\varphi_{M.sec} = \frac{(64^\circ + 65^\circ + 63^\circ) - 30^\circ}{3}$$

$$\varphi_{M.sec} = 34^\circ$$

Minus  $30^\circ$  kommen zustande, durch den Phasenwinkel der Außenleiterspannungen zu den Strangspannungen.

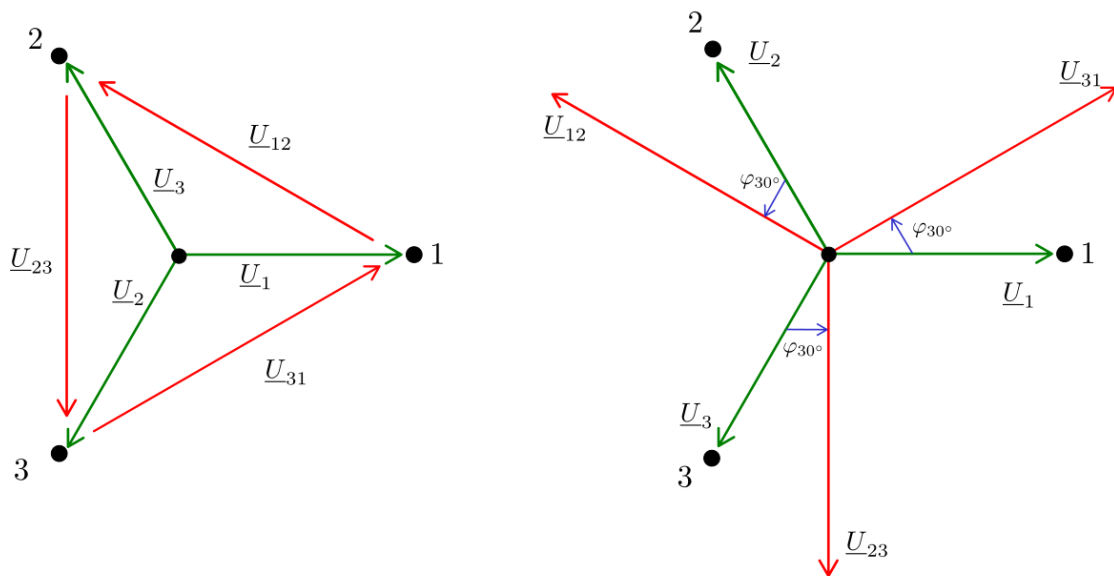


Abbildung 10: Zeigerdiagramm der Außenleiterspannungen und Strangspannungen

**Scheinleistung:**

**Primärseite:**

$$S_{pri} = \sqrt{3} \cdot U_{M.pri} \cdot I_{M.pri}$$

$$S_{pri} = \sqrt{3} \cdot 373,67 \text{ V} \cdot 7 \text{ A}$$

$$S_{pri} = 4,53 \text{ kVA}$$

**Sekundärseite:**

$$S_{sec} = \sqrt{3} \cdot U_{M.sec} \cdot I_{M.sec}$$

$$S_{sec} = \sqrt{3} \cdot 354 \text{ V} \cdot 6,9 \text{ A}$$

$$S_{sec} = 4,23 \text{ kVA}$$

**Wirkleistung:**

**Primärseite:**

$$P_{pri} = S_{pri} \cdot \cos(\varphi_{M.pri})$$

$$P_{pri} = 4,53 \text{ kVA} \cdot \cos(36,67^\circ)$$

$$P_{pri} = 3,63 \text{ kW}$$

**Sekundärseite:**

$$P_{sec} = S_{sec} \cdot \cos(\varphi_{M.sec})$$

$$P_{sec} = 4,23 \text{ kVA} \cdot \cos(34^\circ)$$

$$P_{sec} = 3,51 \text{ kW}$$

**Blindleistung**

**Primärseite:**

$$Q_{pri} = S_{pri} \cdot \sin(\varphi_{M.pri})$$

$$Q_{pri} = 4,53 \text{ kVA} \cdot \sin(36,67^\circ)$$

$$Q_{pri} = 2,71 \text{ kvar}$$

**Sekundärseite:**

$$Q_{sec} = S_{sec} \cdot \sin(\varphi_{M.sec})$$

$$Q_{sec} = 4,23 \text{ kVA} \cdot \sin(34^\circ)$$

$$Q_{sec} = 2,37 \text{ kvar}$$

**Leistungsfaktor**

**Primärseite:**

$$\lambda_{pri} = \cos(\varphi)$$

$$\lambda_{pri} = \cos(36,7^\circ)$$

$$\lambda_{pri} = 0,8$$

**Sekundärseite:**

$$\lambda_{sec} = \cos(\varphi)$$

$$\lambda_{sec} = \cos(34^\circ)$$

$$\lambda_{sec} = 0,83$$

- b) Berechnen Sie die Verlustleistung des Transformators sowie den Wirkungsgrad mit den Ergebnissen aus 4.2(a).

$$\begin{aligned}
 S_V &= S_{pri} - S_{sec} & \eta_S &= \frac{S_{sec}}{S_{pri}} \\
 S_V &= (4,53 - 4,23) \text{ kVA} & \eta_S &= 0,93 \hat{=} 93\% \\
 S_V &= 300 \text{ VA} & \eta_P &= \frac{P_{sec}}{P_{pri}} \\
 P_V &= P_{pri} - P_{sec} & \eta_P &= 0,97 \hat{=} 97\% \\
 P_V &= (3,63 - 3,51) \text{ kW} & \eta_Q &= \frac{Q_{sec}}{Q_{pri}} \\
 P_V &= 120 \text{ W} & \eta_P &= 0,88 \hat{=} 88\% \\
 Q_V &= Q_{pri} - Q_{sec} \\
 Q_V &= (2,71 - 2,27) \text{ var} \\
 Q_V &= 340 \text{ var}
 \end{aligned}$$

- c) Bestimmen Sie die Verlustleistung für 3.2(b) nach 2.1(d) und vergleichen Sie das Ergebnis mit dem Wert aus 4.2(b). Begründen Sie Ihre Beobachtungen.

**Eisen und Kupferverluste:**

**Eisenverluste:**

$$\begin{aligned}
 P_{FE} &= P_0 \left( \frac{U_{M,pri}}{U_N} \right)^2 \\
 P_{FE} &= 36,2 \text{ W} \left( \frac{373 \text{ V}}{400 \text{ V}} \right)^2 \\
 P_{FE} &= 31,591 \text{ W}
 \end{aligned}$$

**Kupferverluste:**

$$\begin{aligned}
 P_{Cu} &= P_K \left( \frac{I_{M,pri}}{I_N} \right)^2 \\
 P_{Cu} &= 140 \text{ W} \left( \frac{7 \text{ A}}{7,2 \text{ A}} \right)^2 \\
 P_{Cu} &= 132,330 \text{ W}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_V &= P_{FE} + P_{Cu} \\
 P_V &= 31,591 \text{ W} + 132,330 \text{ W} \\
 P_V &= 163,921 \text{ W}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \eta &= 1 - \frac{P_V}{S_{M,pri}} \\
 \eta &= 1 - \frac{132,330 \text{ W}}{4,53 \text{ VA}} \\
 \eta &= 0,971 \hat{=} 97,1 \%
 \end{aligned}$$

Die Verlustleistung bewegt sich ungefähr in derselben Größenordnung, wobei  $P_{V, Mess}$  bei 120 W liegt und  $P_{V, Theo}$  bei 163,921 W liegt. Es ist zu beachten, dass der theoretische Wert etwas über dem gemessenen Wert liegt.

Die Diskrepanz zwischen dem theoretischen Wert ( $P_{V.Theo} = 163,921 \text{ W}$ ) und dem gemessenen Wert ( $P_{V.Mess} = 120 \text{ W}$ ) könnte auf verschiedene Faktoren zurückzuführen sein. Mögliche Gründe für einen höheren theoretischen Wert könnten beispielsweise unberücksichtigte Verluste in der Messausrüstung, nicht ideale Bedingungen während der Messung sein.

- d) Berechnen Sie aus den Messwerten nach 3.2(b) und dem Übersetzungsverhältnis  $\ddot{u}$  den relativen Spannungsfall  $\Delta u'_2$ !

$$\begin{aligned} U_1 &= \ddot{u} \cdot U_2 & I_2 &= \ddot{u} \cdot I_1 \\ \ddot{u} &= \frac{U_1}{U_2} & \ddot{u} &= \frac{I_2}{I_1} \\ \ddot{u} &= \frac{373 \text{ V}}{354 \text{ V}} & \ddot{u} &= \frac{6,9 \text{ A}}{7 \text{ A}} \\ \ddot{u} &= 1,053 & \ddot{u} &= 0,985 \\ \ddot{u} &\approx 1 & \ddot{u} &\approx 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta u'_2 &= \frac{U_1 - U'_2}{U_1} \\ \Delta u'_2 &= \frac{373,67 \text{ V} - 354 \text{ V}}{373,67 \text{ V}} \\ \Delta u'_2 &= 0,053 \end{aligned}$$

- e) Bestimmen Sie anhand der Formeln (11) - (13) den relativen Spannungsabfall für 3.2(b).

$$\begin{aligned} U_l &= I_1(R_K \cos(\varphi_2) + X_K \sin(\varphi_2)) \\ U_l &= 7 \text{ A} (0,86 \Omega \cos(34^\circ) + 0,38 \Omega \sin(34^\circ)) \\ U_l &= 6,478 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_q &= I_1(R_K \sin(\varphi_2) + X_K \cos(\varphi_2)) \\ U_q &= 7 \text{ A} (0,86 \Omega \sin(34^\circ) + 0,38 \Omega \cos(34^\circ)) \\ U_l &= 5,572 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta u'_2 &= 1 + \frac{U_l}{U_1} - \sqrt{1 - \frac{U_q}{U_1}} \\ \Delta u'_2 &= 1 + \frac{6,478 \text{ V}}{373,67 \text{ V}} - \sqrt{1 - \frac{5,572 \text{ V}}{373,67 \text{ V}}} \\ \Delta u'_2 &= 0,017 \end{aligned}$$

- f) Vergleichen Sie die primär- und sekundärseitigen Spannungen und Ströme aus 3.2(b) und 3.2(c) miteinander.

**Vergleich der Eingangs- und Ausgangswerte:**

**Eingangsseite:**

- **Yy0-Verschaltung:** Yy0 hat eine höhere Eingangsspannung (373,667 V gegenüber 197,667 V)
- **Dy5-Verschaltung:** Dy5 hat einen höheren Eingangsstrom (11,100 A gegenüber 7 A).

**Ausgangsseite:**

- **Yy0-Verschaltung:** Yy0 hat eine höhere Ausgangsspannung (354,000 V gegenüber 354 V)
- **Dy5-Verschaltung:** Dy5 hat einen niedrigeren Ausgangsstrom (6,300 A gegenüber 6,900 A).

Tabelle 9: Vergleich der primär- und sekundärseitigen Spannungen und Ströme

	Spannung [V]	Strom [A]	Phasenwinkel [°]
<b>Yy0 Symmetrischelast</b>			
Eingangsseite	373,667	7,000	53,333
Ausgangsseite	354,000	6,900	-64,000
<b>Dy5 Symmetrischelast</b>			
Eingangsseite	197,667	11,100	54,333
Ausgangsseite	354,000	6,300	-65,000