

# M2: Drehstromtransformator

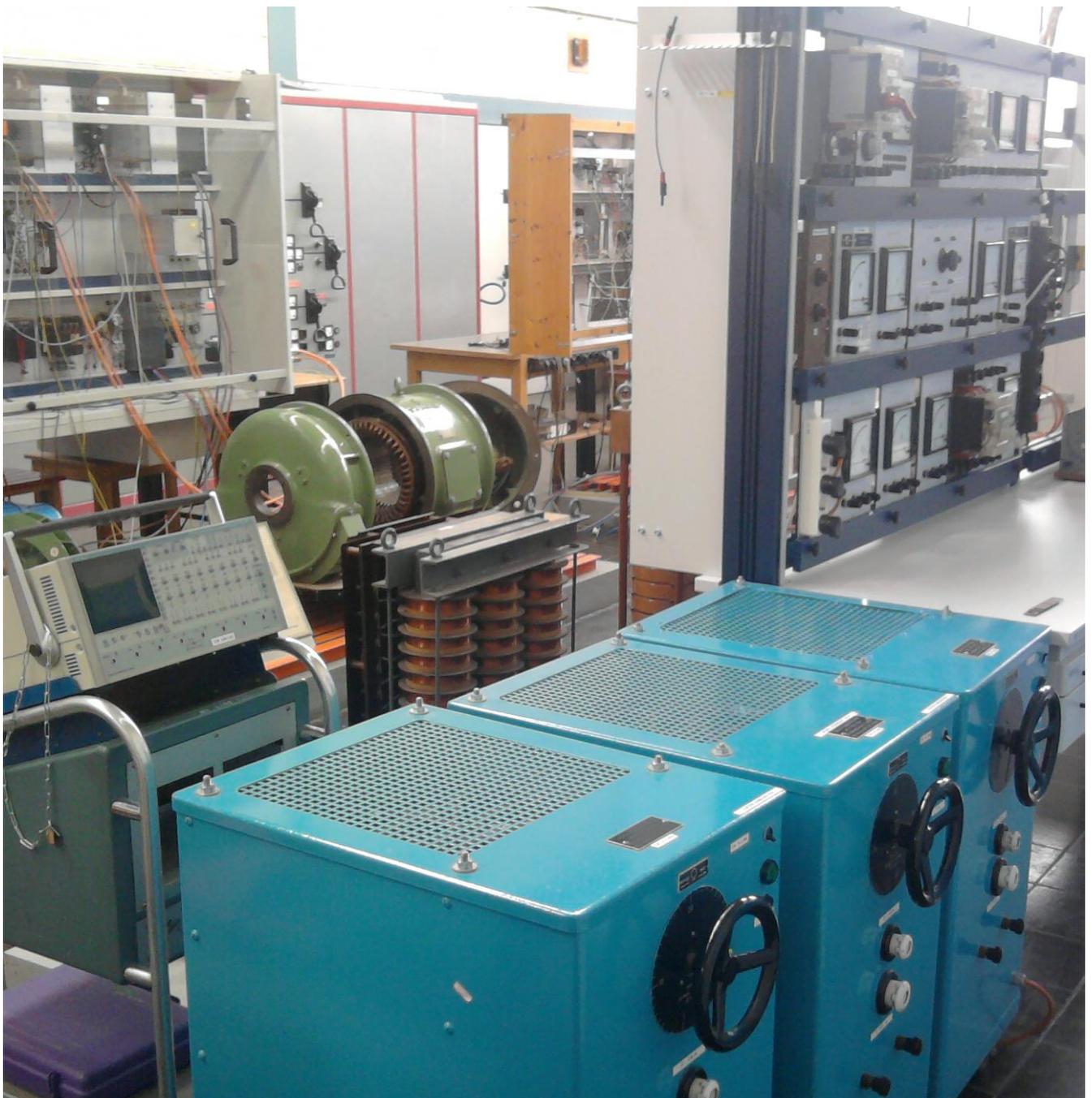


TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



Institut für  
Elektrische  
Energiewandlung

Energetechnisches Praktikum I



---

## Inhaltsverzeichnis

---

<b>INHALTSVERZEICHNIS .....</b>	<b>1</b>
<b>1. THEORIE DES TRANSFORMATORS .....</b>	<b>1</b>
1.1. FUNKTIONSPRINZIP DES EINPHASENTRANSFORMATORS.....	1
1.2. DER EINPHASENTRANSFORMATOR BEI SINUSSPANNUNGEN .....	5
1.3. BAUFORMEN VON EINPHASEN-TRANSFORMATOREN .....	11
1.4. DREHSTROMTRANSFORMATOREN .....	11
1.5. LEERLAUFENDER TRANSFORMATOR .....	13
1.6. SCHALTUNGSVARIANTEN VON DREHSTROMTRANSFORMATOREN .....	21
1.7. LEISTUNGSSCHILDANGABEN BEI DREHSTROMTRANSFORMATOREN.....	27
<b>2. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG.....</b>	<b>34</b>
2.1. LEERLAUFMESSUNGEN .....	36
2.2. KURZSCHLUSSMESSUNGEN.....	37
2.3. LASTMESSUNGEN (YYN0-SCHALTUNG) .....	37
2.4. MESSUNG DER NULLIMPEDANZ.....	39
<b>3. AUSWERTUNG .....</b>	<b>40</b>
3.1. LEERLAUFVERSUCH.....	40
3.2. KURZSCHLUSSVERSUCH .....	40
3.3. BELASTUNGSVERSUCH.....	41
3.4. BESTIMMUNG DER NULLIMPEDANZ.....	41
3.5. BERECHNUNG DER EINPHASIGEN BELASTUNG .....	42
<b>4. SCHALTPLÄNE .....</b>	<b>43</b>
<b>5. LITERATUR.....</b>	<b>45</b>
<b>6. VERSTÄNDNISFRAGEN .....</b>	<b>46</b>

# 1. Theorie des Transformators

## 1.1. Funktionsprinzip des Einphasentransformators

### a) Haupt- und Streufluss

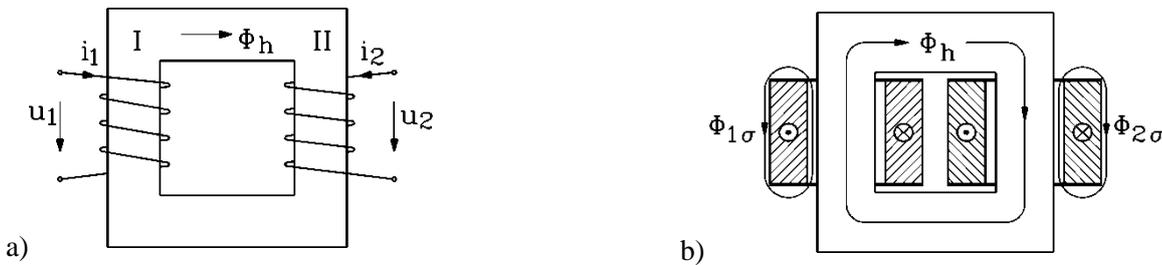


Abbildung 1-1: Einphasentransformator - Prinzipdarstellung: a) Bezeichnung von Spannung und Strom an Primär- und Sekundärspule, b) Haupt- und Streufluss

In Abbildung 1-1a) ist ein geschlossener Eisenkreis (Permeabilität  $\mu_{Fe}$ , Querschnitt  $A$ ) mit zwei elektrisch getrennten Spulen 1 und 2, der Primär- und Sekundärspule mit den Windungszahlen  $N_1, N_2$  dargestellt. Spule 1 ist stromdurchflossen mit zeitlich beliebig veränderlichem Strom  $i_1$ , während Spule 2 stromlos ist (offene Sekundärklemmen,  $i_2 = 0$ ). Mit dem *Ampere*'schen Durchflutungssatz wird die magnetische Feldstärke  $H_{Fe}$  im Eisen bestimmt.

$$\oint_C \vec{H}_{Fe}(s) \cdot ds = \Theta = N_1 \cdot i_1(t) \quad (1.1)$$

Da der Querschnitt  $A$  des Eisenkerns überall gleich groß ist, ist auch die Feldstärke  $H_{Fe}$  längs eines geschlossenen Weges  $C$  im Eisenkern konstant. Die magnetischen Feldlinien von  $H_{Fe}$  verlaufen fast ausschließlich im geschlossenen Eisenkern, da dessen magnetische Leitfähigkeit (**Permeabilität**)  $\mu_{Fe}$  etwa 1000...5000-mal größer ist als jene der ihn umgebenden Luft mit  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{Vs}/(\text{Am})$ . Ein real auftretender, geringer **Streufluss** über Luftwege wird vernachlässigt. Daher kann eine der geschlossenen Feldlinien von  $H_{Fe}$  als geschlossene Kurve  $C$  verwendet werden, die die elektrische Durchflutung  $\Theta = N_1 i_1$  umschließt (Abbildung 1-1b). Da der Feldstärkevektor  $\vec{H}_{Fe}$  sich definitionsgemäß tangential an die Feldlinien schmiegt, ist der Winkel zwischen Feldstärkevektor  $\vec{H}_{Fe}$  und differentiellem Wegelement-Vektor  $d\vec{s}$  Null. Es gilt für das skalare (innere) Vektorprodukt unter dem Kurvenintegral:

$$\oint_C \vec{H}_{Fe} \cdot d\vec{s} = \oint_C H_{Fe} \cdot ds \cdot \cos(\vec{H}_{Fe}, \vec{s}) = \oint_C H_{Fe} \cdot ds \cdot \cos(0) = \oint_C H_{Fe} \cdot ds \quad (1.2)$$

Da  $H_{\text{Fe}}$  wegen des konstanten Eisenquerschnitts  $A$  längs der Kurve  $C$  (Länge der Kurve  $C$ :  $s_{\text{Fe}}$ ) bis auf den Bereich der vier Ecken annähernd konstant ist, kann  $H_{\text{Fe}}$  vor das Integral gezogen werden, und wir erhalten:

$$\oint_C H_{\text{Fe}}(s) \cdot ds = H_{\text{Fe}} \oint_C ds = H_{\text{Fe}} \cdot s_{\text{Fe}} = \theta = N_1 i_1 \quad \Rightarrow \quad H_{\text{Fe}} = \frac{N_1 i_1}{s_{\text{Fe}}} \quad (1.3)$$

Das Werkstoffgesetz des verwendeten Eisenmaterials

$$B_{\text{Fe}} = \mu_{\text{Fe}} H_{\text{Fe}} \quad (1.4)$$

ergibt für den magnetischen Fluss  $\Phi_{\text{h}}$ , da  $B_{\text{Fe}}$  über die Eisenquerschnittsfläche  $A$  annähernd konstant ist und diese im rechten Winkel durchsetzt,

$$\Phi_{\text{h}} = \int_A \vec{B}_{\text{Fe}} \cdot d\vec{A} = \int_A B_{\text{Fe}} \cdot dA \cdot \cos(\vec{B}_{\text{Fe}}, d\vec{A}) = \int_A B_{\text{Fe}} \cdot dA \cdot \cos(0) = \quad (1.5)$$

$$\Phi_{\text{h}} = \int_A B_{\text{Fe}} \cdot dA = B_{\text{Fe}} \int_A dA = B_{\text{Fe}} \cdot A$$

Der zeitlich veränderliche Hauptfluss  $\Phi_{\text{h}}$  ist auch mit Spule 2 verkettet und induziert dort eine Spannung.

$$\Phi_{\text{h}}(t) = B_{\text{Fe}}(t) \cdot A = \mu_{\text{Fe}} H_{\text{Fe}}(t) \cdot A = \mu_{\text{Fe}} \frac{N_1 i_1(t)}{s_{\text{Fe}}} \cdot A = \Lambda_{\text{h}} \cdot N_1 i_1(t) \quad (1.6)$$

Die magnetische Kopplung von Spule 2 und 1 wird durch die Gegeninduktivität  $M_{21}$  ausgedrückt ( $\Lambda$ : „magnetischer Leitwert“).

$$M_{21} = \frac{\Psi_{2\text{h}}}{i_1} = \frac{N_2 \cdot \Phi_{\text{h}}}{i_1} = N_1 N_2 \cdot \mu_{\text{Fe}} \frac{A}{s_{\text{Fe}}} = N_1 N_2 \cdot \Lambda_{\text{h}} \quad , \quad \Lambda_{\text{h}} = \mu_{\text{Fe}} \frac{A}{s_{\text{Fe}}} \quad (1.7)$$

Die Selbstinduktivität des Hauptflusses  $L_{1\text{h}}$  für Spule 1 beschreibt die Wirkung der Selbstinduktionsspannung in Spule 1 (1.8). Die Feldlinien des Streuflusses  $\Phi_{1\sigma}$  von Spule 1 (Abbildung 1-1b) sind nur mit Spule 1, nicht aber mit Spule 2 verkettet. Die Selbstinduktionswirkung des Streuflusses in Spule 1 beschreibt die Selbstinduktivität  $L_{1\sigma}$  (1.9).

$$L_{1\text{h}} = \frac{\Psi_{1\text{h}}}{i_1} = \frac{N_1 \cdot \Phi_{\text{h}}}{i_1} = N_1^2 \cdot \Lambda_{\text{h}} \quad (1.8)$$

$$L_{1\sigma} = \frac{\Psi_{1\sigma}}{i_1} = \frac{N_1 \cdot \Phi_{1\sigma}}{i_1} = N_1^2 \cdot \Lambda_{\sigma} \quad (1.9)$$

- **resultierende Selbstinduktivität** von Spule 1 und 2 (jeweils Haupt- und Streufluss):

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_{1\text{h}} = N_1^2 \cdot (\Lambda_{1\sigma} + \Lambda_{\text{h}}) \quad , \quad L_2 = L_{2\sigma} + L_{2\text{h}} = N_2^2 \cdot (\Lambda_{1\sigma} + \Lambda_{\text{h}}) \quad (1.10)$$

- **Gegeninduktivität** zwischen Spule 1 und 2:

$$M_{12} = M_{21} = N_1 N_2 A_h \quad (1.11)$$

**Fazit:**

Die Selbstinduktivität ist quadratisch von der Windungszahl und linear von der Eisenpermeabilität abhängig, während die Gegeninduktivität vom Produkt beider Windungszahlen abhängt.

**Beispiel 1.1-1:**

Induktivitäten eines Einphasentransformators:

Flussquerschnittsfläche  $A = 6400 \text{ mm}^2$ , Feldlinienlänge  $s_{\text{Fe}} = 1320 \text{ mm}$ ,  $N_1 / N_2 = 100 / 10$

$\mu_{\text{Fe}} = 800\mu_0$ ,  $A_{1\sigma} = A_{2\sigma} = 0.001A_h$ :

$$A_h = \frac{\mu_{\text{Fe}} \cdot A}{s_{\text{Fe}}} = 800 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 6400 \cdot \frac{10^{-6}}{1,32} = 0.0487 \frac{\text{mVs}}{\text{A}}$$

$$A_{1\sigma} = A_{2\sigma} = 0.0487 \frac{\mu\text{Vs}}{\text{A}}, \quad M = N_1 N_2 A_h = 100 \cdot 10 \cdot 0.0487 \cdot 10^{-3} = 48.7 \text{ mH}$$

$$L_1 = N_1^2 \cdot (A_{1\sigma} + A_h) = 100^2 \cdot 1.001 \cdot 0.0487 \cdot 10^{-3} = 487.9 \text{ mH}, \quad L_2 = 4.879 \text{ mH}$$

**b) Spannungsinduktion**

Der von Spule 1 erregte Hauptfluss induziert in Spule 2 eine Spannung (Gegeninduktion,  $M$ ), während in Spule 1 sowohl Haupt- als auch Streufluss eine Spannung induzieren (Selbstinduktion,  $L_{1h}$ ,  $L_{1\sigma}$ ). Wird an Spule 2 eine Last angeschlossen (z. B. ein *OHM*'scher Widerstand), so fließt in Spule 2 ein Strom  $i_2$ .

**Fazit:**

Es ist ohne elektrisch leitende (= galvanische) Verbindung elektrische Leistung von Spule 1 nach Spule 2 übertragen worden.

Wenn in beiden Spulen Strom fließt, wird der Hauptfluss von beiden Strömen  $i_1$  und  $i_2$  gemeinsam erregt und induziert in beiden Spulen eine Spannung, die je Spule aus einer Selbst- und Gegeninduktionsspannung besteht. Diese Spannung und der *OHM*'sche Spannungsfall stellen die gesamte, an den Klemmen messbare Spulenspannung  $u_1$  bzw.  $u_2$  dar.

$$u_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} \quad u_2 = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{21} \frac{di_1}{dt} \quad (1.12)$$

### c) Übersetzungsverhältnis $\ddot{u}$

Die Spannungen und Ströme in Primär- und Sekundärspule können deutlich unterschiedlich sein. Dies wird durch die Wahl des Übersetzungsverhältnisses festgelegt.

$$\ddot{u} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1.13)$$

Aus (1.6) und (1.7) folgt mit (1.9), dass bei Einführung von  $\ddot{u}$  in die Gleichungen (1.8) nur noch eine Hauptinduktivität  $L_h$  sowohl die Selbst- als auch die Gegeninduktivitätswirkung des Hauptflusses beschreibt.

$$u'_2 = \ddot{u} \cdot u_2, \quad i'_2 = i_2 / \ddot{u}, \quad R'_2 = \ddot{u}^2 \cdot R_2, \quad L'_2 = \ddot{u}^2 \cdot L_2, \quad M' = \ddot{u} \cdot M_{12} \quad (1.14)$$

$$\underline{\underline{M'}} = \frac{N_1}{N_2} \cdot N_1 N_2 A_h = N_1^2 A_h = L_{1h} = \underline{\underline{L_h}} \quad , \quad \underline{\underline{L'_{2h}}} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \cdot N_2^2 A_h = N_1^2 A_h = L_{1h} = \underline{\underline{L_h}} \quad (1.15)$$

Damit vereinfachen sich die Spannungsgleichungen (1.8):

$$u_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{12} \cdot \ddot{u} \cdot \frac{d(i_2/\ddot{u})}{dt} \quad , \quad u_2 \cdot \ddot{u} = R_2 \ddot{u}^2 \cdot \frac{i_2}{\ddot{u}} + L_2 \ddot{u}^2 \cdot \frac{d(i_2/\ddot{u})}{dt} + M_{21} \cdot \ddot{u} \cdot \frac{di_1}{dt}$$

$$u_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + L_h \cdot \frac{di'_2}{dt} \quad , \quad u'_2 = R_2 i'_2 + L'_2 \cdot \frac{di'_2}{dt} + L_h \cdot \frac{di_1}{dt} \quad (1.16)$$

### d) Ersatzschaltbild

Mit der Auftrennung  $L_1 = L_{1\sigma} + L_h$ ,  $L'_2 = L'_{2\sigma} + L'_{2h} = L'_{2\sigma} + L_h$  folgt aus (1.12):

$$u_1 = R_1 i_1 + L_{1\sigma} \frac{di_1}{dt} + L_h \cdot \frac{d(i_1 + i'_2)}{dt} \quad , \quad u'_2 = R'_2 \cdot i'_2 + L'_{2\sigma} \cdot \frac{di'_2}{dt} + L_h \cdot \frac{d(i_1 + i'_2)}{dt} \quad (1.17)$$

Es kann damit ein (fiktiver) „gemeinsamer“ Magnetisierungsstrom  $i_m$  definiert werden, der den Hauptfluss erregt.

$$i_m = i_1 + i'_2 \quad (1.18)$$

$$\Psi_{1h} = N_1 \Phi_h = L_h (i_1 + i'_2) = N_1^2 \Lambda_h \left( i_1 + \frac{i'_2}{u} \right) = N_1 \Lambda_h (N_1 i_1 + N_2 i'_2)$$

$$\Rightarrow \Phi_h = \Lambda_h (N_1 i_1 + N_2 i'_2) = \Lambda_h \cdot \theta_m \quad (1.19)$$

Dies entspricht dem Ergebnis des Durchflutungssatzes (1.2), wenn Spule 1 und 2 gemeinsam den Hauptfluss erregen. Die Spannungsgleichungen (1.13) werden in dem „T-Ersatzschaltbild“ des Einphasentransformators abgebildet.

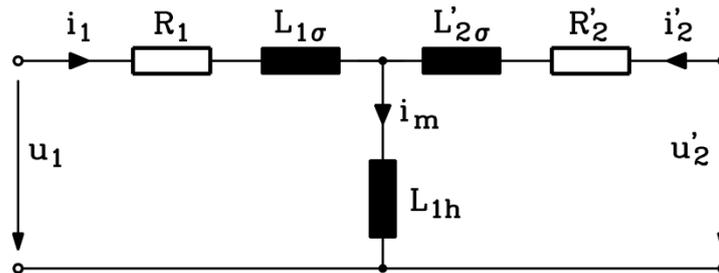


Abbildung 1-2: T-Ersatzschaltbild des Einphasentransformators

## 1.2. Der Einphasentransformator bei Sinusspannungen

### a) Ersatzschaltbild

Ist die an den Spulenklammern anliegende Spannung zeitlich sinusförmig mit der Frequenz  $f$  veränderlich, so kann die komplexe Wechselstromrechnung verwendet werden.

$$u_1(t) = \sqrt{2} \cdot U_1 \cdot \cos(\omega t) = \operatorname{Re}\{\sqrt{2} \cdot U_1 e^{j\omega t}\}, \quad \omega = 2\pi \cdot f \quad (1.20)$$

Es wird anstelle von  $u_1(t)$  nur noch der komplexe Zeiger  $\underline{U}_1 = U_1 e^{j0}$  in den Spannungsgleichungen (1.13) verwendet. Dies gilt sinngemäß für alle hier genannten zeitlich veränderlichen Größen. Wegen (1.17) werden alle zeitlichen Ableitungen durch Multiplikation mit  $j\omega$  ersetzt, wobei der Ausdruck  $\omega L$  als Reaktanz  $X$  bezeichnet wird.

$$L \frac{di}{dt} = \operatorname{Re}\left\{L \cdot \frac{d}{dt} \sqrt{2} \cdot I e^{j\varphi} \cdot e^{j\omega t}\right\} = \operatorname{Re}\{\sqrt{2} \cdot j\omega L I e^{j\varphi} \cdot e^{j\omega t}\} \quad (1.21)$$

Die Spannungsgleichungen (1.13) lauten in komplexer Schreibweise:

$$\underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + jX_{1\sigma} \underline{I}_1 + jX_h (\underline{I}_1 + \underline{I}'_2) \quad \underline{U}_2 = R'_2 \underline{I}'_2 + jX'_{2\sigma} \underline{I}'_2 + jX_h (\underline{I}_1 + \underline{I}'_2) \quad (1.22)$$

Ströme und Spannungen werden als Effektivwerte, Flüsse und Flussverkettungen wegen der durch sie bewirkten Sättigung als Scheitelwerte angegeben. Die Hauptfeldspannung

$$\underline{U}_h = jX_h (\underline{I}_1 + \underline{I}'_2) = jX_h \cdot \underline{I}_m = j\omega N_1 \Phi_h / \sqrt{2} \quad (1.23)$$

ist die induzierte „Nutzspannung“ infolge der zeitlichen Änderung des Hauptflusses. Dieser induziert auch im Eisen eine Spannung, die Wirbelströme treibt und Wirbelstromverluste verursacht. Mit

dem Ersatzwiderstand  $R_{Fe}$  für diese im Eisen fließenden Wirbelströme ergeben sich die Wirbelstromverluste zu

$$P_{Fe} = U_h^2 / R_{Fe} \quad (1.24)$$

Das zugehörige Ersatzschaltbild (Abbildung 1-3) folgt aus Abbildung 1-2. Strom und Spannung werden im VZS primär und sekundär als zugeführte Größen positiv gezählt. Wenn also von der Primär- auf die Sekundärseite Leistung übertragen wird, die sekundär z. B. an einen Belastungswiderstand abgegeben wird, so ist die Primärleistung positiv (= aufgenommene elektrische Leistung), die Sekundärleistung negativ (= abgegebene elektrische Leistung).

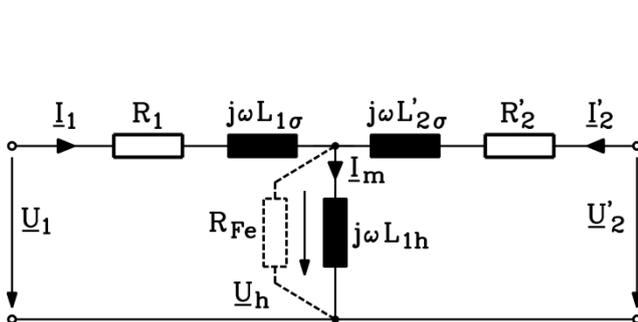


Abbildung 1-3: T-Ersatzschaltbild des Einphasentransformators für zeitlich sinusförmig veränderliche Spannungen, Ströme und Flüsse

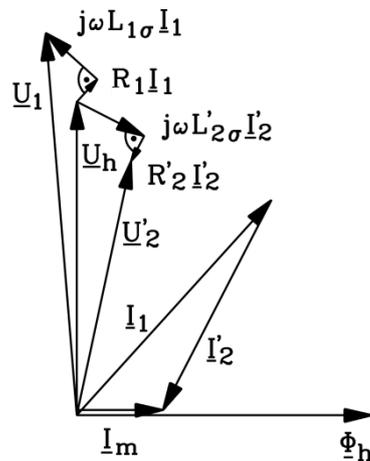


Abbildung 1-4: Zeigerdiagramm für Spannungen und Ströme beim Einphasentransformator mit sekundär überwiegend induktiver Belastung

### b) Zeigerdiagramm

Der Zeiger des Hauptflusses  $\underline{\Phi}_h$  in der komplexen Ebene in Abbildung 1-4 ist gemäß (1.19) in Phase mit dem Magnetisierungsstrom  $I_m$ . Die vom Hauptfluß induzierte Hauptfeldspannung  $\underline{U}_h$  ist um 90° zum Hauptfluß voreilend (Multiplikation mit  $j$ ). Der Magnetisierungsstrom wird aus der Summe von Primär- und Sekundärstrom gebildet. Wegen der hohen Eisenpermeabilität  $\mu_{Fe}$  ist die Hauptinduktivität  $L_h$  sehr groß (siehe Bsp. 1.1-1), so dass  $I_m$  sehr klein ist. Daher ist  $I_1$  deutlich größer als  $I_m$ , was auf Grund der Zeigersummenbildung von Primär- und Sekundärstrom einen **zum Primärstrom nahezu gegenphasigen** Sekundärstrom ergibt. In Abbildung 1-4 ist angenommen, dass die Belastung sekundär induktiv ist (z. B. Drosselspule als Last), so dass auch primär der Strom  $I_1$  der Spannung  $\underline{U}_1$  naheilt. Die *OHM'schen* Spannungsfälle sind in Phase zu den jeweiligen Strömen, die Spannungsfälle zufolge der Streuinduktivitäten eilen um 90° den jeweiligen Strömen voraus (Multiplikation mit  $j$ ).

### Fazit:

Die Klemmenspannungen primär und sekundär unterscheiden sich von der Hauptfeldspannung um die OHM'schen und streuinduktiven Spannungsfälle.

### Beispiel 1.2-1:

Einphasentransformator: Im Leerlauf ist  $I_1 = I_m$ , da  $I'_2 = 0$  ist.

$U_{1N} = 350 \text{ V}$ ,  $I_{1N} = 80 \text{ A}$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $R_1 = R'_2 = 16 \text{ m}\Omega$ ,  $M = 49 \text{ mH}$ ,  $L_{1\sigma} = 0.5 \text{ mH}$ ,

$L_{2\sigma} = 0.005 \text{ mH}$  ,  $N_1/N_2 = 100/10$ :

$\ddot{u} = 100/10 = \underline{10}$  ,  $L_h = \ddot{u}M = 10 \cdot 49 \cdot 10^{-3} = 490 \text{ mH}$  ,  $L'_{2\sigma} = \ddot{u}L_{2\sigma} = 10^2 \cdot 0.005 = 0.5 \text{ mH}$

$X_{1\sigma} = \omega L_{1\sigma} = 2\pi \cdot 50 \cdot 0.5 \cdot 10^{-3} = \underline{\underline{0.157 \Omega}}$  ,  $X_h = \omega L_h = 2\pi \cdot 50 \cdot 0.49 = \underline{\underline{154 \Omega}}$  ,  $X'_{2\sigma} = \underline{\underline{0.157 \Omega}}$

Leerlaufstrom:  $I_{10} = U_{1N}/\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + X_h)^2} = 2.27 \text{ A} = 2.8 \%$  des Nennstroms

### **c) Vereinfachtes Ersatzschaltbild - Kurzschlussspannung**

Jedes elektrische Betriebsmittel ist für einen bestimmten **Nennstrom**  $I_N$  bemessen, den es dauernd führen kann, ohne thermisch überlastet zu werden, und für eine bestimmte **Nennspannung**  $U_N$ . Der Magnetisierungsstrom  $I_m$  im Transformator beträgt wegen der großen Hauptinduktivität nur 1 % ... 2 % vom Nennstrom (Bsp. 1.2-1), so dass er vernachlässigt werden kann. Dann entsteht das vereinfachte Ersatzschaltbild Abbildung 1-5, das nur aus den Streureaktanzen und den OHM'schen Widerständen besteht. Aus (1.19) folgt:

$$I_m = 0 \Rightarrow \underline{I}_1 = -\underline{I}'_2 = \underline{I}_2 / \ddot{u} \Rightarrow N_1 \underline{I}_1 = -N_2 \underline{I}_2 \quad (1.25)$$

Beim Kurzschlussversuch kann das Stromübersetzungsverhältnis  $\ddot{u}_1 = I_2/I_1$  gemessen werden. Da der Magnetisierungsstrom beim realen Transformator sehr klein aber nicht Null ist, ist der Sekundärstrom  $I_2$  kleiner als im vereinfachten Ersatzschaltbild und damit auch das Stromübersetzungsverhältnis ( $\ddot{u}_1 < \ddot{u}$ ).

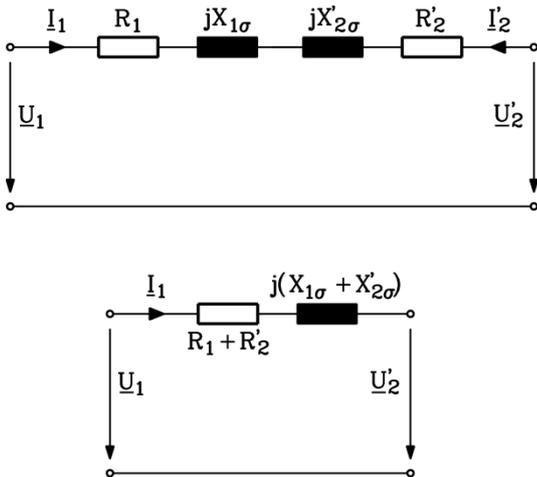


Abbildung 1-5: Vereinfachtes T-Ersatzschaltbild des Einphasentransformators für zeitlich sinusförmig veränderliche Spannungen, Ströme und Flüsse

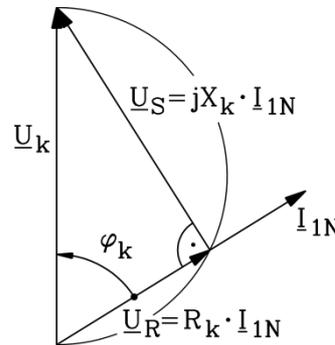


Abbildung 1-6: Zeigerdiagramm des sekundär kurzgeschlossenen Transformators

Es herrscht (nahezu) **vollkommener Durchflutungsausgleich**; der Primär- und der Sekundärstrom sind gegenphasig und übersetzen sich umgekehrt proportional zu  $\dot{u}$ , so dass sich die primäre- und sekundäre Spulendurchflutung gegenseitig aufhebt. Das entspricht einem ideal magnetisierbaren Eisenkreis ( $\mu_{Fe} \rightarrow \infty, X_h \rightarrow \infty$ ). Der Transformator bildet ein lineares System. Primär- und Sekundärspannung unterscheiden sich gemäß Abbildung 1-5 um den Spannungsfall an den *OHM'schen* Widerständen und an den Streuinduktivitäten. Dieser Spannungsfall heißt "**Kurzschlussspannung**"  $U_k$ , wenn der Primärstrom  $I_1$  den Nennwert  $I_{1N}$  hat.

$$U_k = \sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')^2} \cdot I_{1N} \quad (1.26)$$

Die Kurzschlussspannung ist direkt messbar, wenn der Transformator sekundär kurzgeschlossen ist ( $U_2 = 0$ ). Jene primäre Klemmenspannung, die dann in der Primärwicklung Nennstrom treibt, ist die Kurzschlussspannung (Abbildung 1-6). Das aus den *OHM'schen* und streuinduktiven Spannungsfällen gebildete rechtwinklige Dreieck (Abbildung 1-6) heißt **KAPP'sches Dreieck** (*Gisbert KAPP*). Werden diese Spannungsfälle auf die Nennspannung  $U_N$  bezogen, so erhält man sie in Prozent der Nennspannung, bzw. als „**Per-Unit-Wert (p.u.)**“. Ein Per-Unit-Wert einer Spannung von 1 bedeutet somit Nennspannung.

$$u_R = \frac{(R_1 + R_2') \cdot I_{1N}}{U_{1N}} = \frac{R_k \cdot I_{1N}}{U_{1N}}, \quad u_S = \frac{(X_{1\sigma} + X_{2\sigma}') \cdot I_{1N}}{U_{1N}} = \frac{X_k \cdot I_{1N}}{U_{1N}} \quad (1.27)$$

$$u_k = \sqrt{u_R^2 + u_S^2} = \frac{U_k}{U_{1N}} \quad (1.28)$$

### Beispiel 1.2-2:

„Bezogene Kurzschlussspannung“  $u_k$  :

a) Kleinere Leistungstransformatoren: Nennscheinleistung  $S_N = U_N I_N = \text{ca. } 1 \dots 1000 \text{ kVA}$ :

$$u_k = \text{ca. } 3\% \dots 6\% \text{ bzw. } 0.03 \dots 0.06 \text{ p.u.}$$

b) Große Leistungstransformatoren:  $S_N = 1 \dots 1000 \text{ MVA}$ :

$$u_k = \text{ca. } 6\% \dots 12\% \text{ bzw. } 0.06 \dots 0.12 \text{ p.u. und mehr.}$$

Wird der Transformator im Kurzschluss mit der Kurzschlussspannung betrieben, so sind die Um-magnetisierungsverluste vernachlässigbar klein.

$$P_{\text{Fe}} = 3 \cdot \frac{(0,06)^2 \cdot U_{\text{h,N}}^2}{R_{\text{Fe}}} = 3 \cdot \frac{0,0036 \cdot U_{\text{h,N}}^2}{R_{\text{Fe}}}$$

Die Stromwärmeverluste entsprechen beim Betrieb des Transformators im Kurzschluss hingegen den Verlusten im Nennbetrieb, da der Nennstrom auf Primär- und Sekundärseite fließt.

$$P_{\text{Cu}} = 3 \cdot (R_1 + R_2') \cdot I_N$$

### Beispiel 1.2-3:

Dauerkurzschlussstrom des Transformators :

Speist man den sekundär kurzgeschlossenen Transformator primär mit Nennspannung, so fließt ein **sehr hoher primärer „Kurzschlussstrom“**, z.B.: bei  $u_k = 4\%$ :

$$\frac{I_{1k}}{I_{1N}} = \frac{U_{1N}}{\sqrt{R_k^2 + X_k^2} \cdot I_{1N}} = \frac{U_{1N}}{U_k} = \frac{1}{u_k} = \frac{1}{0.04} = 25 \quad (1.29)$$

Der Dauerkurzschlussstrom  $I_{1k} = I_{1N}/u_k$  ist der 25-fache Nennstrom!

### **d) Vereinfachtes Zeigerdiagramm**

Zum vereinfachten Ersatzschaltbild Abbildung 1-5 gehört das Zeigerdiagramm Abbildung 1-7. Bei sekundär *OHM'scher* Belastung ist  $-I_2'$  bzw.  $I_1$  in Phase mit  $U_2'$ , bei induktiver Belastung eilt  $-I_2'$  der Spannung  $U_2'$  um  $90^\circ$  nach. Daher ist  $U_2'$  in beiden Fällen kleiner als  $U_1$ , wobei bei rein induktiver Belastung der "Spannungseinbruch" von  $U_2'$  am größten ist. Bei kapazitiver Belastung jedoch ist  $U_2'$  höher als  $U_1$  (**FERRANTI-Effekt**): Die Spannung  $U_2$  nimmt bei Belastung des Transformators gegenüber Leerlauf ZU (Leerlauf:  $I_1 = 0$ ,  $U_2' = U_1$ ). Das ist i.a. unerwünscht, da die Betriebsmittel sekundär mit zu hoher Spannung belastet werden.

### Achtung:

Auf Grund des *KAPP*'schen Dreiecks ist die Spannungsübersetzung  $U_1/U_2$  NICHT exakt gleich dem Übersetzungsverhältnis  $N_1/N_2$ , sondern je nach Belastungsart etwas kleiner oder größer.

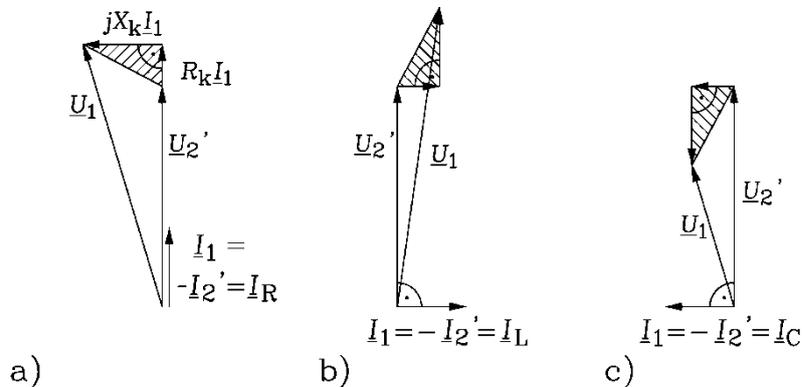


Abbildung 1-7: Vereinfachtes Zeigerdiagramm für Spannungen und Ströme beim Einphasentransformator für konstante Sekundär- und variable Primärspannung mit sekundär  
a) *OHM*'scher, b) induktiver, c) kapazitiver Belastung

### Beispiel 1.2-3:

Einphasentransformator bei rein kapazitiver Belastung  $I_2 = I_{2N}$ :

$$U_{1N} = 350 \text{ V}, I_{2N} = 800 \text{ A}, f = 60 \text{ Hz}, R_1 = R'_2 \approx 0 \Omega, L_{1\sigma} = L'_{2\sigma} = 0.5 \text{ mH}, N_1/N_2 = 100/10:$$

$$\ddot{u} = 100/10 = \underline{10}, X_{1\sigma} = X'_{2\sigma} = 2\pi \cdot 60 \cdot 0.5 \cdot 10^{-3} = 0.188 \Omega, X_k = X_{1\sigma} = X'_{2\sigma} = \underline{\underline{0.376 \Omega}}$$

$$|I_1| = |-I'_2| = \frac{I_{2N}}{\ddot{u}} = \frac{800}{10} = 80 \text{ A} \quad , \quad U'_2 = U_1 + X_k \cdot I_1 = 350 + 0.376 \cdot 80 = \underline{\underline{380 \text{ V}}}$$

$$U_2 = \frac{U'_2}{\ddot{u}} = \frac{380}{10} = \underline{\underline{38 \text{ V}}}$$

Die Sekundärspannung nimmt von 35 V bei Leerlauf auf 38 V bei Belastung zu (+ 8 %).

### 1.3. Bauformen von Einphasen-Transformatoren

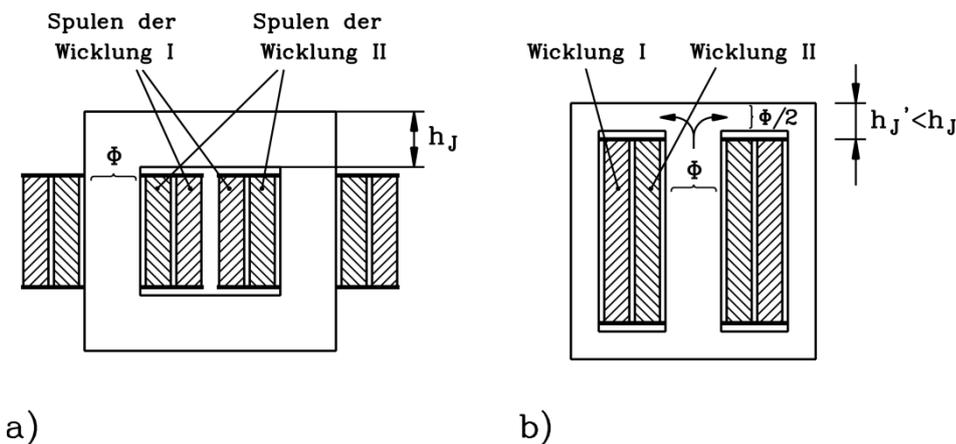


Abbildung 1-8: Bauformen von Einphasentransformatoren: a) Kerntyp, b) Manteltyp

Die Eisenkerne sind aus elektrisch isolierten Blechen geschichtet, um Wirbelströme zu unterbrechen. Es werden kornorientierte Bleche verwendet, deren Vorzugsrichtung (hohes  $\mu_{Fe}$ ) parallel zur Flußrichtung orientiert ist. Die Primär- und Sekundärspule (Spule I und II) sind zwecks maximaler magnetischer Kopplung **koaxial** angeordnet. Die Unterspannungswicklung befindet sich innen nahe am geerdeten Kern (Nullpotential) wegen der geringeren Leiter-Erde-Spannungsdifferenz.

- **Kerntransformatoren** (Abbildung 1-8a) haben Primär- und Sekundärspule geteilt auf zwei Schenkeln angeordnet.
- Beim **Manteltransformator** sind Primär- und Sekundärspule ungeteilt auf einem Mittelkern angeordnet, die von den Rückschlussjochen wie von einem Mantel umschlossen sind (Abbildung 1-8b). Dadurch teilt sich der Hauptfluss nach links und rechts und benötigt bei gleicher Flussdichte eine geringere Jochhöhe  $h'_j < h_j$  (Verringerung der Bauhöhe des Transformators).

### 1.4. Drehstromtransformatoren

#### a) Bauformen von Drehstrom-Transformatoren

Werden drei Einphasentransformatoren mit einem Drehspannungssystem gespeist (Abbildung 1-9b), so ist der Hauptfluss in den drei Transformatoren jeweils um 120° phasenverschoben. Durch die mit \*) gekennzeichnete Kontrollfläche in Abbildung 1-9b treten alle drei Hauptflüsse  $\underline{\Phi}_U$ ,  $\underline{\Phi}_V$ ,  $\underline{\Phi}_W$  hindurch und ergänzen sich stets zu Null ( $\underline{\Phi}_U + \underline{\Phi}_V + \underline{\Phi}_W = 0$ ), wie man an der Zeigersumme in Abbildung 1-9b sieht. Damit kann dieser Bereich des Eisens eingespart werden; es entsteht der „Tempeltyp“-Drehstromtransformator (Abbildung 1-9a), der aber schwierig zu bauen ist. Die Magnetkreise von U, V, W sind nach wie vor voneinander magnetisch unabhängig, so dass die für den Einphasentransformator hergeleiteten Formeln, Ersatzschaltbilder und Zeigerdiagramme auch für den Drehstromtransformator (je Strang U, V, W) gültig sind, solange das Drehspannungssystem „symmetrisch“

ist, d.h. in allen drei Strängen die gleichen Amplituden bei einer Phasenverschiebung von jeweils  $120^\circ$  vorhanden sind.

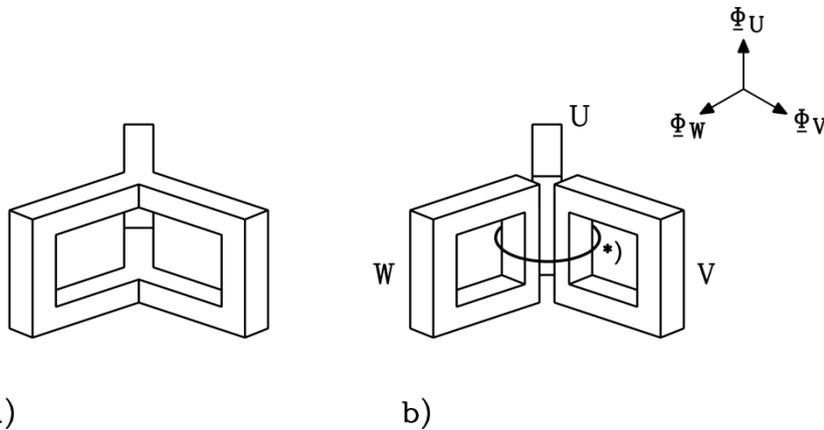


Abbildung 1-9: Entstehung des a) Drehstromtransformators (Tempeltyp) aus b) drei Einphasentransformatoren

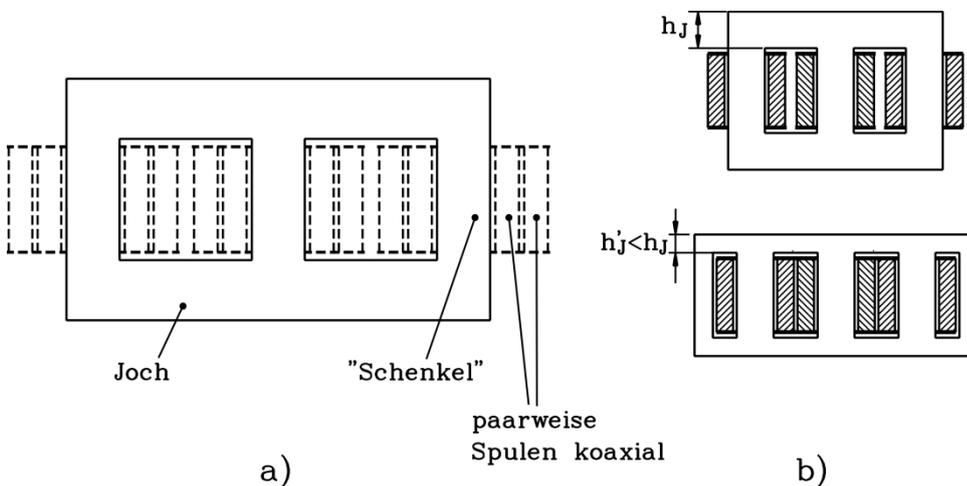
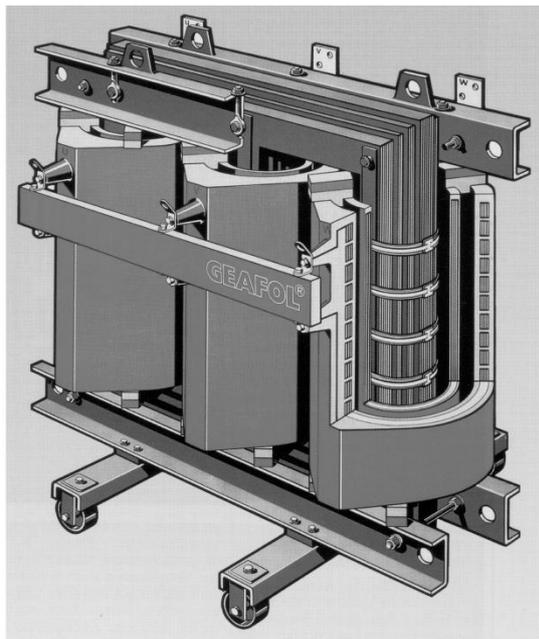


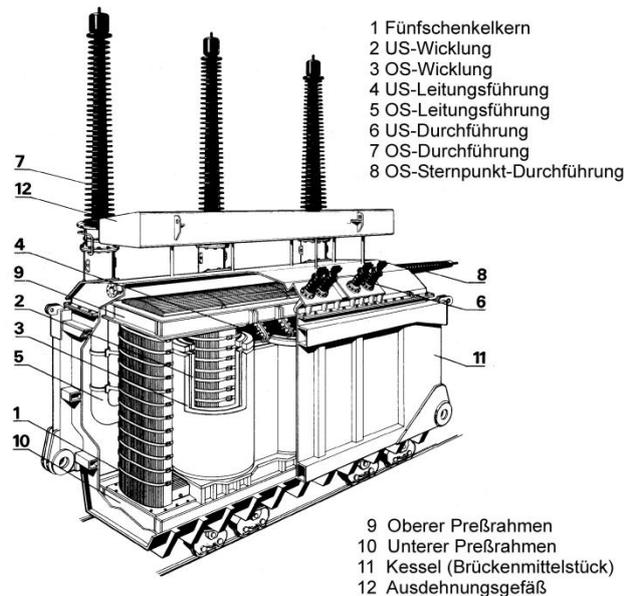
Abbildung 1-10: Bauformen von Drehstrom-Transformatoren: a) Dreischenkkel-Typ (Kerntyp), b) Fünfschenkkel-Typ unten im Vergleich mit dem Dreschenkel-Typ oben

Die technisch realisierte Bauform entsteht aus dem Tempeltyp durch Klappen aller drei Schenkel U, V, W in eine Ebene (**Drei-Schenkel-Transformator**, Abbildung 1-10a). Auf jedem der Schenkel U, V, W sind koaxial innen die Unter- und außen die Oberspannungsspule der Stränge U, V, W angeordnet. Bei Hinzufügen zweier Außenjoche (Mantelbauform) kann wieder die Jochhöhe verringert werden (**Fünfschenkel-Transformator**, Abbildung 1-10b).

Einphasen- und Drehstromtransformatoren werden bei kleineren Leistungen im Hunderte-kVA-Bereich in brandgefährdeter Umgebung **luftgekühlt** und **gießharz-** oder **luftisoliert** (Abbildung 1-11a) ausgeführt, ansonsten – vor allem für größere Leistungen - **ölgekühlt** und **ölisoliert** (Abbildung 1-11b). Da Öl eine 3- bis 6-fach höhere Durchschlagfeldstärke  $E_D$  als Luft besitzt sowie eine höhere Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität, können Öl-Transformatoren kompakter gebaut werden, benötigen aber einen Ölkessel und eine Ölwanne unter dem Transformator für das Auffangen des Öls im Störfall.



a)



b)

Abbildung 1-11: Ausführungsformen von Drehstrom-Transformatoren a) Gießharz-Transformator, b) Öl-Transformator

### b) Wirkungsgrad von Transformatoren

Die Ummagnetisierungsverluste  $P_{Fe}$  im Eisen infolge des Hauptflusses bestehen aus Wirbelstrom- und Hystereseverlusten und treten schon bei Leerlauf und Nennspannung ( $U_1 = U_{1N}$ ) auf ( $I_1 = I_m, I_2 = 0$ ). Die Stromwärmeverluste sind wegen des kleinen Primärstroms im Leerlauf ( $I_1 = I_m = \text{ca. } 0.01I_{1N}$ ) sehr klein. Bei Belastung kommen Stromwärmeverluste als Lastverluste hinzu, die quadratisch vom Strom abhängen. Der **Wirkungsgrad**  $\eta$  ist das Verhältnis von abgegebener zu zugeführter Leistung und bei Großtransformatoren größer als 99.5%.

$$\text{Leerverluste: } P_0 = P_{Fe}, \text{ Lastverluste: } P_{Cu1} + P_{Cu2} = 3(R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2) \quad (1.30)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{in} - P_0 - P_{Cu1+2}}{P_{in}} \quad (1.31)$$

## 1.5. Leerlaufender Transformator

Bei offenen Klemmen der Sekundärspulen liegt kein Verbraucher an der Sekundärwicklung; der Sekundärstrom  $I_2 = 0$ . Diesen Betrieb nennt man "Leerlauf" des Transformators.

### a) Vereinfachtes einphasiges Ersatzschaltbild des Transformators im Leerlauf

Das einphasige Ersatzschaltbild des leerlaufenden Transformators ist in Abbildung 1-12 a) dargestellt. Da der *Ohm'sche* Widerstand  $R_1$  der Primärwicklung deutlich kleiner als die Streureaktanz  $X_{1\sigma}$  und diese wiederum deutlich kleiner als die Hauptreaktanz  $X_h$  ist, kann in erster Näherung

der Ersatzwiderstand für die Berücksichtigung der Ummagnetisierungsverluste parallel zur Eingangsspannung gesetzt werden. Auf diese Weise erhält man das vereinfachte Ersatzschaltbild nach Abbildung 1-12 b).

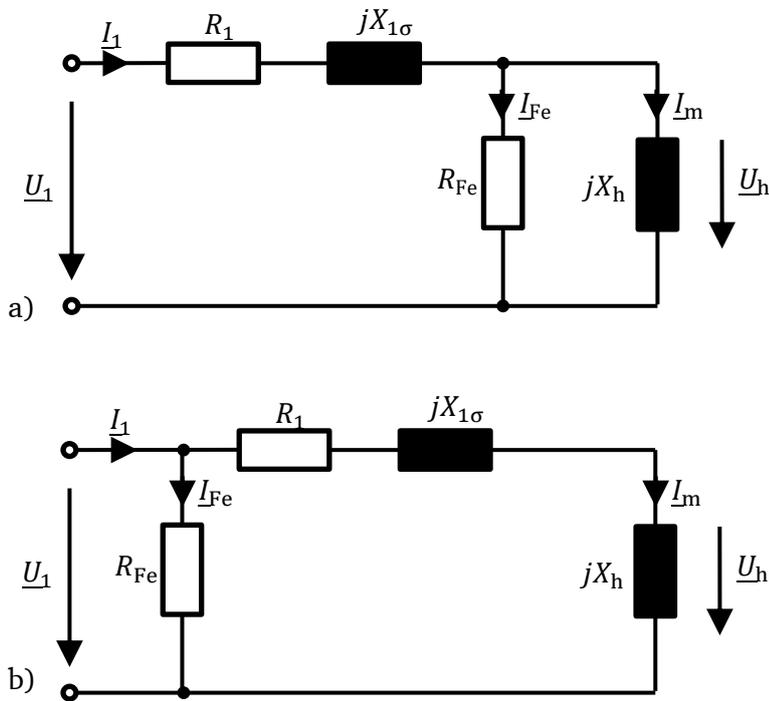


Abbildung 1-12: a) Einphasiges Ersatzschaltbild des Transformators im Leerlauf; b) Vereinfachtes einphasiges Ersatzschaltbild des Transformators im Leerlauf ( $R_1 \ll X'_{1\sigma} \ll X_h$ )

### b) Spannungsübersetzungsverhältnis im Leerlauf

Das Übersetzungsverhältnis  $\ddot{u}$  des Transformators ist durch das Windungszahlverhältnis, wie in Kap. 1.1 c) angegeben, definiert.

$$\ddot{u} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1.32)$$

Nach dem Induktionsgesetz erzeugt das Hauptfeld in den beiden Wicklungen die Spannungen  $u_{h1}$  und  $u_{h2}$ .

$$u_{h1} = N_1 \cdot \frac{d\Phi_h}{dt} \quad \text{und} \quad u_{h2} = N_2 \cdot \frac{d\Phi_h}{dt} \quad (1.33)$$

Das Übersetzungsverhältnis lässt sich damit als das Verhältnis der Spannungen  $u_{h1}$  und  $u_{h2}$  ausdrücken.

$$\ddot{u} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_{h1}}{U_{h2}} \quad (1.34)$$

Bei leerlaufendem Transformator ist die sekundäre Hauptfeldspannung  $U_{h2}$  als Klemmenspannung  $U_{20}$  an der Sekundärwicklung direkt messbar. Die Hauptfeldspannung auf der Primärseite ist, im

Wesentlichen wegen des Spannungsabfalls an der Streureaktanz der Primärwicklung, nicht direkt messbar. Es wird daher ein Spannungsübersetzungsverhältnis  $\ddot{u}_U = U_1/U_{20} \approx U_{h1}/U_{h2}$  eingeführt, welches bei der Leerlaufmessung messtechnisch bestimmt werden kann.

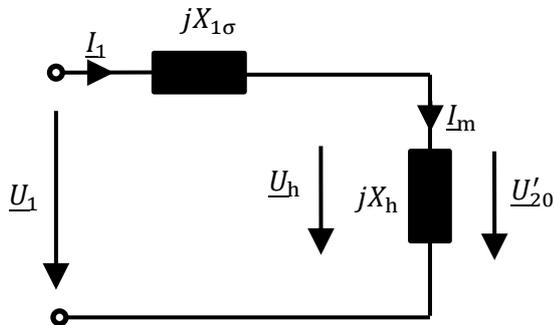


Abbildung 1-13: Einphasiges Ersatzschaltbild im Leerlauf bei Vernachlässigung des *Ohmschen* Widerstandes in der Primärwicklung

Mit Hilfe des Spannungsteilers aus Streu- und Hauptreaktanz lässt sich das Spannungsübersetzungsverhältnis  $\ddot{u}_U$  in das Übersetzungsverhältnis  $\ddot{u}$  umrechnen. Das Spannungsübersetzungsverhältnis  $\ddot{u}_U$  ist nach Gl. (1.36) um den Faktor  $K$  größer als das Übersetzungsverhältnis  $\ddot{u}$ . Der Faktor  $K$  ist kaum größer als eins (z.B.  $K = 1,05$ ), da die Streuinduktivität deutlich kleiner als die Hauptinduktivität ist.

$$U_h = \frac{X_h}{X_{1\sigma} + X_h} \cdot U_1 \quad (1.35)$$

$$\ddot{u}_U = \frac{U_1}{U_2} = \frac{X_{1\sigma} + X_h}{X_h} \cdot \frac{U_h}{U_2} = \frac{X_{1\sigma} + X_h}{X_h} \cdot \ddot{u} = K \cdot \ddot{u} \quad (1.36)$$

### c) Der Magnetisierungsstrom

Auf Grund der nichtlinearen Magnetisierungskennlinie des Elektroblechs  $B_{Fe} = f(H_{Fe})$  ergibt sich ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen der Versorgungsspannung und dem Magnetisierungsstrom. Der entstehende Verlauf des Magnetisierungsstromes lässt sich nach Abbildung 1-14 bei gegebener sinusförmiger Flussänderung und damit cosinusförmiger Versorgungsspannung bestimmen. Der Magnetisierungsstrom setzt sich aus einer Grundschwingung  $I_{m1}$  und ungeradzahligem Oberschwingungen mit nach der Ordnungszahl abnehmender Amplitude zusammen. Der Einfluss der Hysterese wird hierbei vernachlässigt.

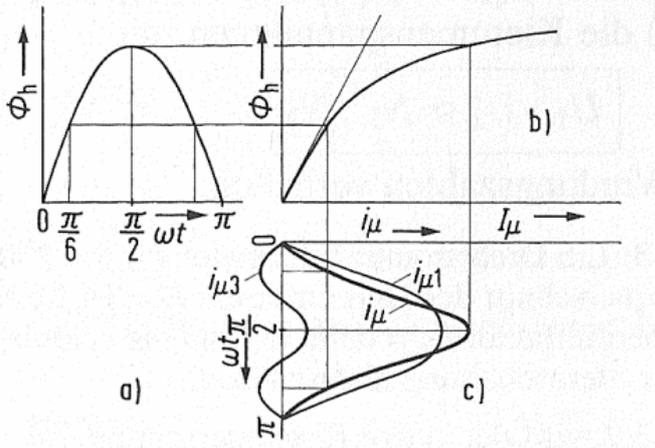


Abbildung 1-14: Bestimmung der Kurvenform des Magnetisierungsstromes  $i_m = i_\mu$ ; a) Zeitlich sinusförmiger Flussverlauf; b) Magnetisierungskennlinie des Elektroblechs; c) Zeitlicher Verlauf des Magnetisierungsstromes  $i_m = i_\mu$  [1]

### d) Einschaltstromstoß im Leerlauf

Beim Einschalten des leerlaufenden Transformators können beträchtliche Stromspitzen, bei hoch ausgenutzten Leistungstransformatoren von Werten bis zum 15fachen des Scheitelwerts des Bemessungsstromes auftreten. Der stationäre Leerlaufstrom stellt sich erst nach Abklingen eines elektromagnetischen Ausgleichsvorgangs ein. Maßgebend für den Einschaltstromstoß ist der Magnetisierungsstrom. Es wird angenommen, dass der Transformator an ein starres Netz geschaltet wird. Für die Phasenspannung  $u_1$  gilt nach dem Zuschalten:

$$u_1 = \sqrt{2} \cdot U_1 \cdot \sin(\omega t + \alpha) \quad (1.37)$$

Aus dem vereinfachten Ersatzschaltbild nach Abbildung 1-12 b) ergibt sich folgende Spannungsgleichung:

$$u_1 = R_1 \cdot i_m + L \cdot \frac{di_m}{dt} = R_1 \cdot i_m + N_1 \frac{d\Phi_1}{dt} \quad (1.38)$$

Durch die Kombination von Gl. (1.37) Und Gl. (1.38) unter Zuhilfenahme der Beziehung  $\sqrt{2}U_1 = \omega \cdot N_1 \cdot \Phi_1$  erhält man den zeitlichen Verlauf des mit der Primärwicklung verketteten Flusses  $\Phi_{1t}$ .

$$\Phi_{1t} = -\Phi_1 \cdot \cos(\omega t + \alpha) + C - \frac{R_1}{N_1} \cdot \int i_m dt \quad (1.39)$$

Die Integrationskonstante  $C$  ergibt sich aus den Anfangsbedingungen. Vor dem Zuschalten ist der Magnetisierungsstrom Null  $i_m(t = 0) = 0$  und die Flussdichte im Eisen entspricht der Remanenzflussdichte  $\Phi_{1t}(t = 0) = \Phi_{rem}$ .

$$C = \Phi_1 \cdot \cos(\alpha) + \Phi_{\text{rem}} \quad (1.40)$$

Mit der Integrationskonstante  $C$  lässt sich der zeitliche Verlauf des Flusses nach dem Zuschalten des Transformators bei  $t = 0$  folgendermaßen bestimmen.

$$\Phi_{1t} = -\Phi_1 \cdot \cos(\omega t + \alpha) + \Phi_1 \cdot \cos(\alpha) + \Phi_{\text{rem}} - \frac{R_1}{N_1} \cdot \int i_m dt \quad (1.41)$$

Durch die dämpfende Wirkung des *Ohm*'schen Wicklungswiderstandes  $R_1$  klingen die Schaltspitzen, bis zum Erreichen des eingeschwungenen Zustandes, mit der Zeit ab. Besonders kritisch ist das Zuschalten des Transformators im Spannungsnulldurchgang ( $\alpha = 0$ ) und positiver Remanenzflussdichte  $\Phi_{\text{rem}}$ , da hier nach einer halben Periode, bei Vernachlässigung der Dämpfung  $R_1 = 0$ , der maximal mögliche Fluss ( $\Phi_{\text{max}} = 2\Phi_1 + \Phi_{\text{rem}}$ ) auftritt. Die Vernachlässigung der Dämpfung hat bei der Bestimmung der ersten Stromspitze fast keinen Einfluss. Durch diesen großen Fluss wird das Eisenblech des Transformators, wie in Abbildung 1-15 dargestellt ist, extrem in Sättigung getrieben und so ein sehr großer Magnetisierungsstrom erzeugt.

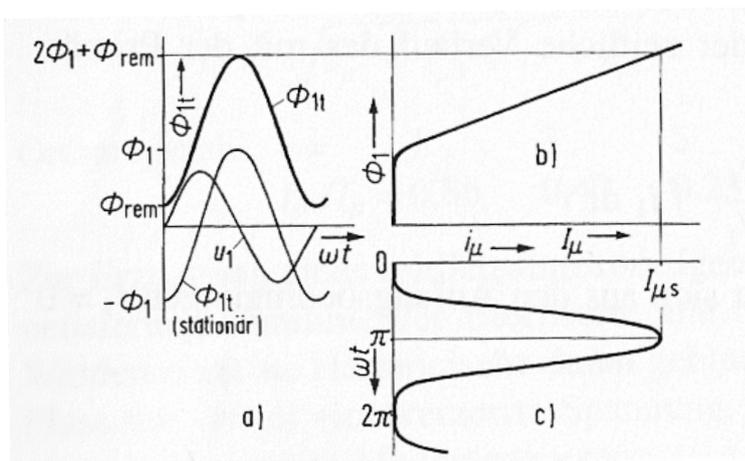


Abbildung 1-15: Einschaltstromstoß beim Zuschalten des leer laufenden Transformators im Spannungsnulldurchgang ( $I_\mu = I_m$ ).  
a) Spannungs- und Flussverlauf bei  $R_1 = 0$ ; b) Magnetisierungskennlinie; c) Erste Spitze des Einschaltstromes [1]

In Abbildung 1-16 ist der zeitliche Verlauf des Magnetisierungsstroms nach dem Zuschalten im Spannungsnulldurchgang bei Berücksichtigung der Dämpfung dargestellt.

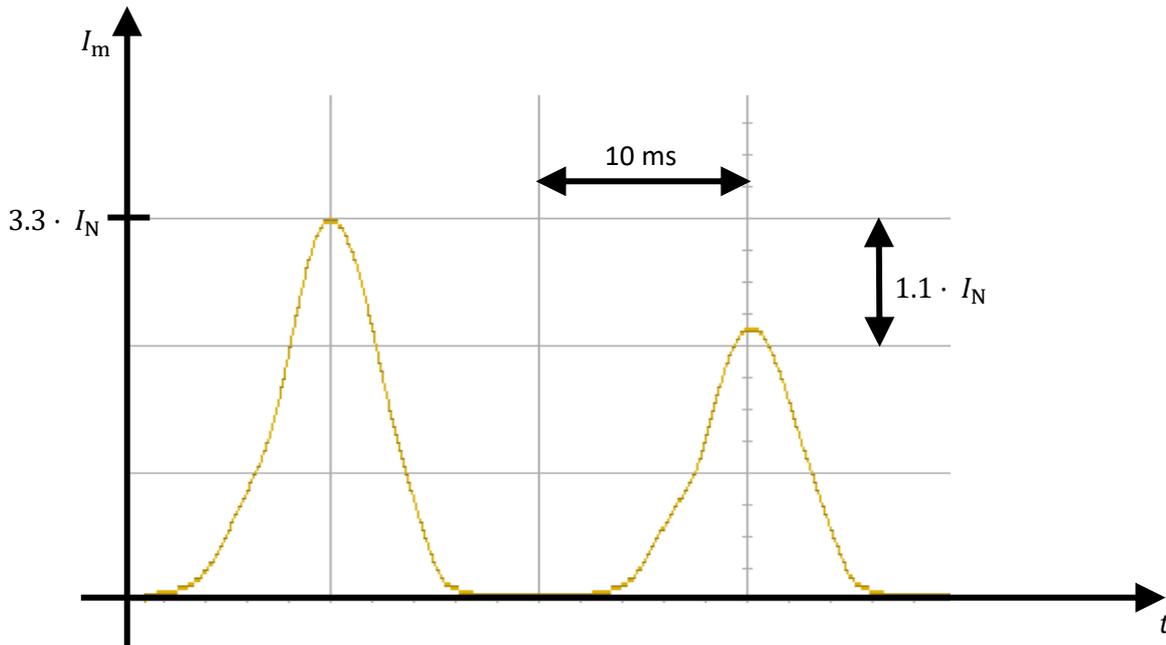


Abbildung 1-16: Gemessener Einschaltstromstoß beim Zuschalten des leer laufenden Transformators (aus der Laborübung) im Spannungsnulldurchgang. Auf Grund des schwach ausgenutzten Transformators ist der Strompeak nur  $3,3 I_N$ .

### e) Einfluss der nichtlinearen Eisenkennlinie auf den Leistungsfaktor des Transformators im Leerlauf

Der Leistungsfaktor ist allgemein als das Verhältnis von Wirk- zu Scheinleistung definiert. Im Leerlauf entspricht die im Transformator umgesetzte Wirkleistung hauptsächlich den Ummagnetisierungsverlusten im Eisen. Die *Ohm'schen* Verluste im Primärwiderstand sind bei leer laufendem Transformator klein, da der Leerlaufstrom nur etwa 5 % vom Nennstrom und damit die Stromwärmeverluste im Leerlauf nur 0,25 % der Stromwärmeverluste bei Nennstrom betragen ( $P_{Cu,0} = 3 \cdot R_1 \cdot (0,05)^2 \cdot I_N^2$ ). Die Ummagnetisierungsverluste des Dreiphasentransformators werden nach Gl. (1.42), analog zur Berechnung beim Einphasentransformator nach Gl. (1.24), berechnet. Der Ersatzwiderstand  $R_{Fe}$  ist unabhängig von der Belastung des Transformators. Der Leistungsfaktor ist daher, wie in Gl. (1.43) angegeben, proportional zum Verhältnis von Primärspannung  $U_1$  zum Primärstrom  $I_{10}$ .

$$P_{Fe} = 3 \cdot \frac{U_h^2}{R_{Fe}} \quad (1.42)$$

$$\cos(\varphi) = \frac{P}{S} = \frac{3 \cdot U_h^2 / R_{Fe}}{3 \cdot U_1 \cdot I_{10}} \sim \frac{U_1}{R_{Fe} \cdot I_{10}} \sim \frac{U_1}{I_{10}} \quad (1.43)$$

Da die Primärspannung proportional zur magnetischen Flussdichte  $B_{Fe}$  und der Strom zur magnetischen Feldstärke  $H_{Fe}$  ist, entspricht der Leistungsfaktor der Steigung der Magnetisierungskurve

des Elektroblechs. Der qualitative Verlauf der Magnetisierungskennlinie und des Leistungsfaktors sind in Abbildung 1-17 dargestellt.

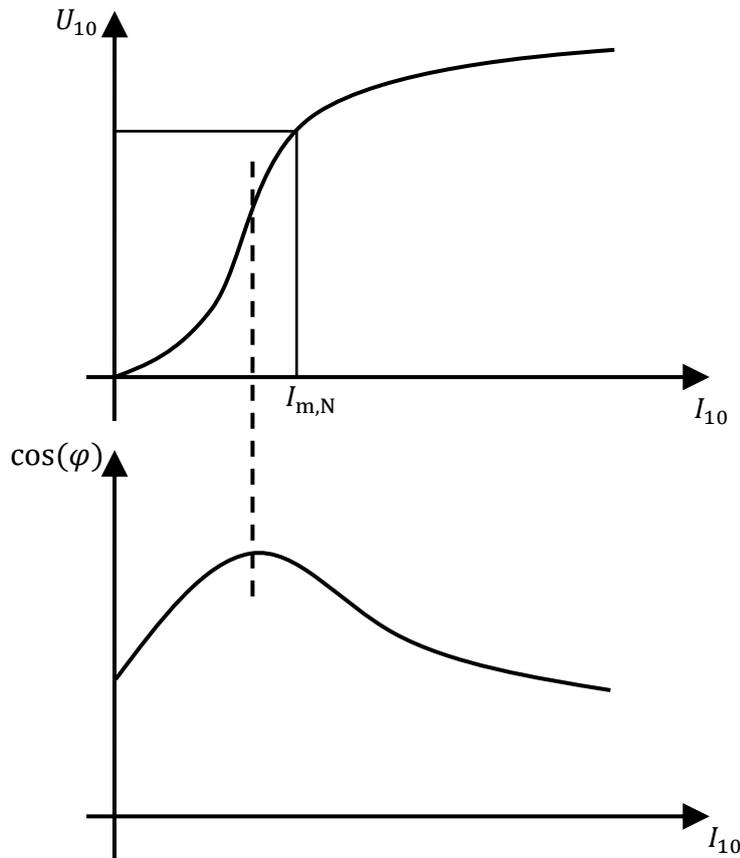


Abbildung 1-17: a) Magnetisierungskennlinie des Eisenblechs des Transformators; b) Leistungsfaktor des leerlaufenden Transformators in Abhängigkeit vom Magnetisierungsstrom

### **f) Unsymmetrie beim Dreischenkel-Transformator (Kerntyp)**

Beim Dreischenkel-Transformator sind die Feldlinien von Phase „U“ und „W“ auf Grund der Geometrie des Transformators länger als die der Phase „V“. Der Pfad des Hauptflusses für Phase „U“ und „V“ ist beispielhaft in Abbildung 1-18 dargestellt. Für eine bestimmte Feldstärke wird nach Gl. (1.44) in Phase „U“ und „W“ ein größerer Magnetisierungsstrom und damit Primärstrom  $I_{10}$  als in Phase „V“ benötigt.

$$H_{\text{Fe}} = \frac{\Theta}{s_{\text{Fe}}} \sim \frac{N_1 I_{10}}{s_{\text{Fe}}} \quad (1.44)$$

Wie in Abbildung 1-19 dargestellt, verläuft die Magnetisierungskennlinie für Phase „U“ und „W“ flacher als die Kennlinie von Phase „U“.

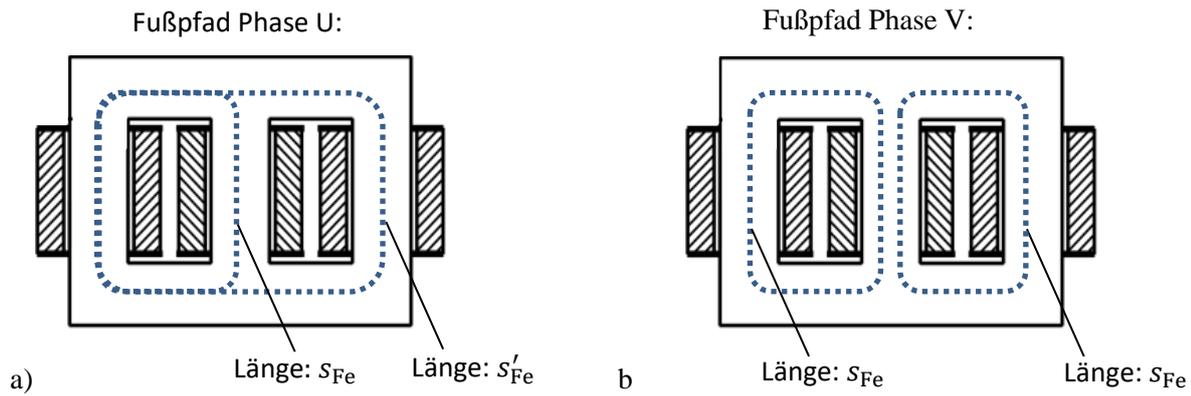


Abbildung 1-18: Pfad des magnetischen Hauptflusses für a) Phase U und b) Phase V. Hierbei gilt:  $s_{Fe} < s'_{Fe}$

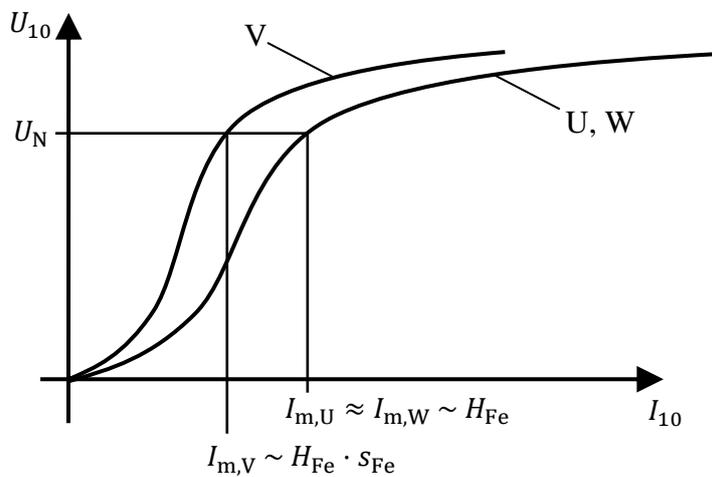


Abbildung 1-19: Primärspannung in Abhängigkeit vom Magnetisierungsstrom des Dreisickenkel-Transformators

Diese unterschiedlichen Magnetisierungsströme resultieren in eine Unsymmetrie zwischen den drei Phasen (U, V, W). Da diese Unsymmetrie auf Grund der hohen Permeabilität von Eisen klein ist, kann für die Analyse des Betriebsverhaltens das symmetrische Ersatzschaltbild verwendet werden.

## 1.6. Schaltungsvarianten von Drehstromtransformatoren

### a) Schaltgruppen, Stundenziffer

Bei Drehstrom-Transformatoren hat man mehrere Möglichkeiten, die Wicklungsenden der Oberspannungsspulen U-X, V-Y, W-Z bzw. der Unterspannungsspulen u-x, v-y, w-z untereinander zu verbinden.

#### Beispiel 1.5-1:

In Abbildung 1-20 ist oberspannungsseitig eine Sternschaltung „Y“ (X, Y, Z miteinander verbunden) und unterspannungsseitig eine Dreieckschaltung „d“ (Verbindung u-y, v-z, w-x) ausgeführt: **Schaltgruppe Yd**.

Die in der Primärspule des Strangs „U“ (Klemmen U-X) induzierte Spannung ist in Phase mit der auf demselben Schenkel befindlichen Spule unterspannungsseitig (Klemmen w-u). Auf Grund der Dreieckschaltung ist diese Sekundärspannung eine verkettete Spannung. Die zugehörige fiktive Strangspannung (Phasenspannung) ist um  $30^\circ$  voreilend oder  $330^\circ$  nacheilend. Diese Phasenverschiebung wird als nacheilend in 11 Schritten von  $30^\circ$  mit der „**Stundenziffer**“ 11 (vergleiche mit dem Zifferblatt einer Uhr!) angegeben: Yd11. Die Übersetzung der Spannung von der Primär- auf die Sekundärseite (Abbildung 1-20) ist:

$$\frac{U_{1\text{verk}}}{U_{2\text{verk}}} = \frac{\sqrt{3}U_1}{U_2} = \sqrt{3} \cdot \frac{N_1}{N_2} \quad (1.45)$$

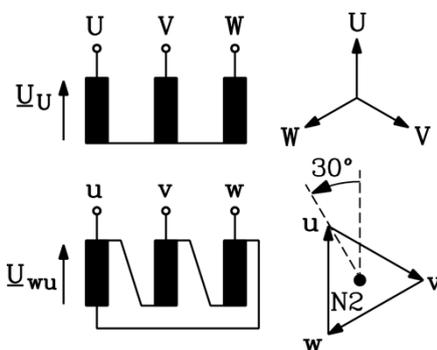


Abbildung 1-20: Drehstromtransformator: Schaltung: Stern (Oberspannung), Dreieck (Unterspannung) = Schaltgruppe Yd, „Stundenziffer“ 11

Die Spannungsübersetzung  $U_{1\text{verk}}/U_{2\text{verk}}$  von Drehstromtransformatoren ist daher selbst bei Vernachlässigung des KAPP'schen Dreiecks nicht mehr nur durch das Verhältnis der Windungszahlen alleine, sondern auch durch die Schaltgruppe bestimmt (1.28). Nur bei der Yy-Schaltung (Stern primär und sekundär) ist die Spannungsübersetzung wie beim Einphasentransformator durch das Verhältnis der Strangwindungszahlen (und das KAPP'sche Dreieck) bestimmt.

### b) Symmetrische ohm'sche Belastung

In Abbildung 1-21 ist die Schaltung Yyn6 dargestellt. Durch Vertauschen der Spulenanschlüsse sekundär ist die sekundäre Strangsspannung gegenphasig zur primären Strangsspannung, was einer Phasenverschiebung von  $6 \times 30^\circ = 180^\circ$  (Stundenziffer 6) entspricht. Unterspannungsseitig ist der Sternpunkt „N2“ als Klemmenanschluss heraus geführt. Bei der symmetrischen *ohm'schen* Belastung dieser Schaltung wird jede Phase sekundär mit dem gleichen Widerstand  $R$  abgeschlossen (Abbildung 1-21 a)). Das Betriebsverhalten je Strang entspricht hierbei dem Betriebsverhalten des Einphasentransformators. Das Ersatzschaltbild des Einphasentransformators entspricht jetzt einem Strang des Drehstromtransformators. Die Durchflutung des sekundären Laststromes wird durch einen entsprechenden Primärstrom nahezu kompensiert (Abbildung 1-21 b)), so dass der Magnetisierungsstrom klein ist (ca. 5 % vom Nennstrom). Bis auf den Spannungsabfall am Kapp'schen Dreieck von ca. 5 % bis 8 % je nach Bauform entspricht die Primärspannung der Sekundärspannung  $U_1 \approx U'_2$ .

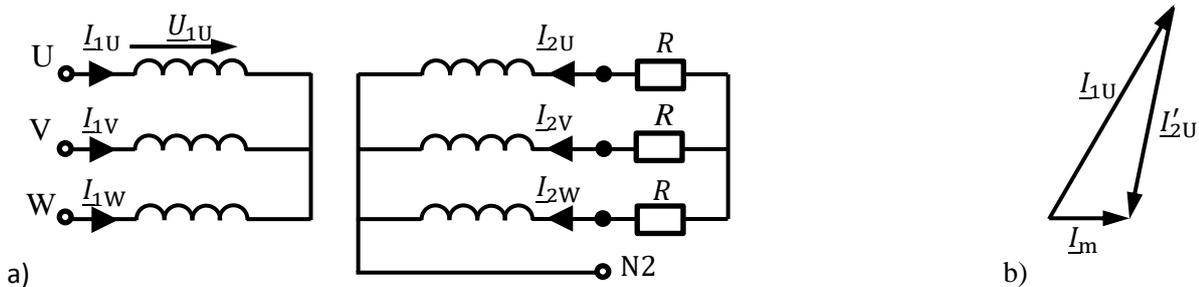


Abbildung 1-21: Symmetrische *ohm'sche* Belastung des Drehstromtransformators bei Yyn6-Schaltung; a) Ersatzschaltung; b) Lastkompensation in allen drei Phasen

### c) Zweiphasige ohm'sche Belastung

Wird der Drehstromtransformator sekundär z.B. wie in Abbildung 1-21 a) dargestellt zwischen Phase „U“ und „V“ belastet, so ist der Strom in Phase U genau gegenphasig zu Phase „V“ ( $I_{1U} = -I_{1V}$  und  $I_{2U} = -I_{2V}$ ). Die Durchflutung des sekundären Laststromes wird in Phase „U“ und „V“ durch einen entsprechenden Primärstrom nahezu kompensiert (Abbildung 1-21 b)), so dass der Magnetisierungsstrom klein ist und wie im symmetrischen Fall ca. 5 % vom Nennstrom beträgt. Die dritte Phase bleibt bei der zweiphasigen Belastung stromlos.

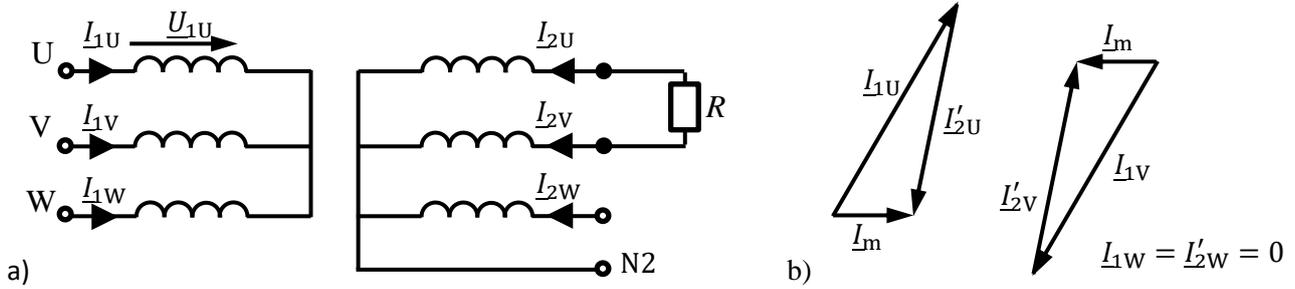


Abbildung 1-22: Zweiphasige ohm'sche Belastung des Drehstromtransformators bei Yyn6-Schaltung; a) Ersatzschaltung; b) Lastkompensation in Phase „U“ und „W“

### d) Einphasige ohm'sche Belastung

Wird die Schaltung Yyn (Abbildung 1-23 a)) für eine unsymmetrische, nämlich einphasige Belastung (Impedanz  $Z$ ) sekundär verwendet (z. B. Haushaltsanschluss: sekundär verkettet 400 V, Strangspannung 230 V), so fließt der Strom  $I_2$  sekundär nur im Strang „V“ und über den Sternpunktanschluss „N2“. Primär fließt der Strom  $I_V$  über Strang V zu und zu gleichen Teilen  $I_U = I_W$  über die Stränge „W“ und „U“ ab. Damit existiert aber KEIN Durchflutungsausgleich (1.21) für Schenkel „U“ und „W“. Da  $I_U$  und  $I_W$  – abhängig von der Belastung  $Z$  – deutlich größer sein können als der typische Magnetisierungsstrom  $I_m \approx 0.05 I_N$ , wird der magnetische Fluss in diesen Schenkeln sehr hoch. Damit sättigt aber das Eisen gemäß der  $B_{Fe}(H_{Fe})$ -Kennlinie (Abbildung 1-23 b)). Bei sehr kleiner Hauptfeldreaktanz  $X_h$  ist die zugehörige Hauptfeldspannung  $U_h$  auch klein und kommt in die Größenordnung des Spannungsfalls am primären Widerstand und der primären Streureaktanz. Abschätzung mit Abbildung 1-3 und  $U_h = \sqrt{R_1^2 + X_{1\sigma}^2} \cdot I_1$ : Die Sekundärspannung  $\underline{U}_2'$  ist bei Belastung nur etwa halb so groß wie bei Leerlauf; der Transformator wirkt wie ein Spannungsteiler.

$$\frac{U_2'}{U_1} \approx \frac{X_h}{X_{1\sigma} + X_h} \approx \frac{X_{1\sigma}}{X_{1\sigma} + X_{1\sigma}} = \frac{1}{2} \quad (1.46)$$

Man sagt: Die Sekundärspannung „bricht zusammen“. Dieser Betriebszustand ist unbrauchbar.

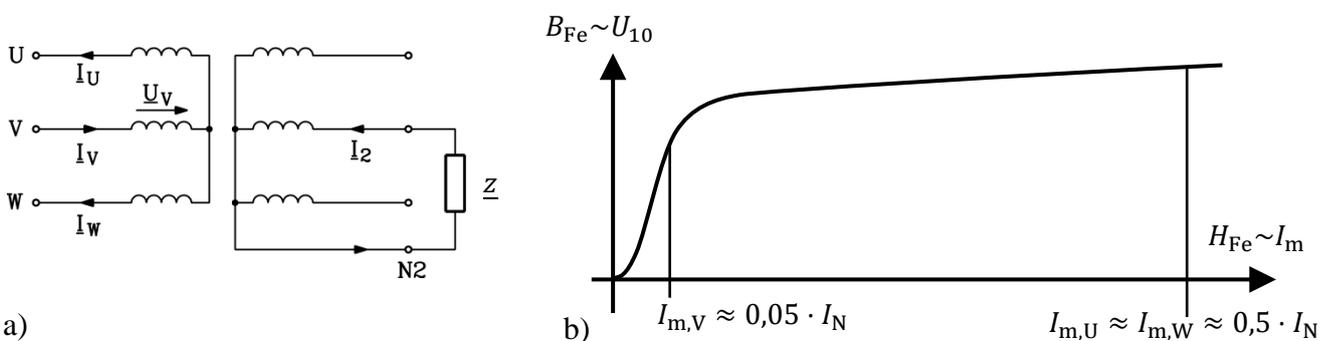


Abbildung 1-23: a) Bei einphasiger Belastung der Yyn6-Schaltung sekundär werden die Wicklungen der Schenkel U, W nur primär stromdurchflossen (Primär:  $I_V = -2I_U = -2I_W$ ), was zu hoher Eisensättigung führt. b) Magnetisierungskennlinie  $B_{Fe}(H_{Fe})$

Je nach Transformatorbauform ist der Spannungseinbruch bei einphasiger *ohm*'scher Belastung unterschiedlich groß.

b1) 3-Schenkel-Typ bei einphasiger Belastung

Für Schenkel „U“ und „W“ schließt sich der, aufgrund des fehlenden Durchflutungsausgleiches aufbauende, Fluss  $\Phi$  bei Trockentransformatoren über Luft und bei Öltransformatoren über das Stahl-Gehäuse. Der Fluss  $\Phi$  ist, insbesondere beim Trockentransformator, relativ klein und induziert daher nur eine relativ kleine störende Spannung  $\underline{U}_Z$ , die den Spannungseinbruch in der Sekundärspule „V“ bewirkt ( $\underline{U}_{2V} = \underline{U}_{2V,0} - \underline{U}_Z$ ). Beim Öltransformator ist die störende Spannung  $\underline{U}_Z$  auf Grund der höheren Permeabilität des Stahl-Gehäuses größer und damit auch der Spannungseinbruch. Typischerweise liegt der Spannungseinbruch für den 3-Schenkeltransformatoren bei  $U_{2V}/U_{2V,0} - 1 \cong -10 \% \dots - 20 \%$ .

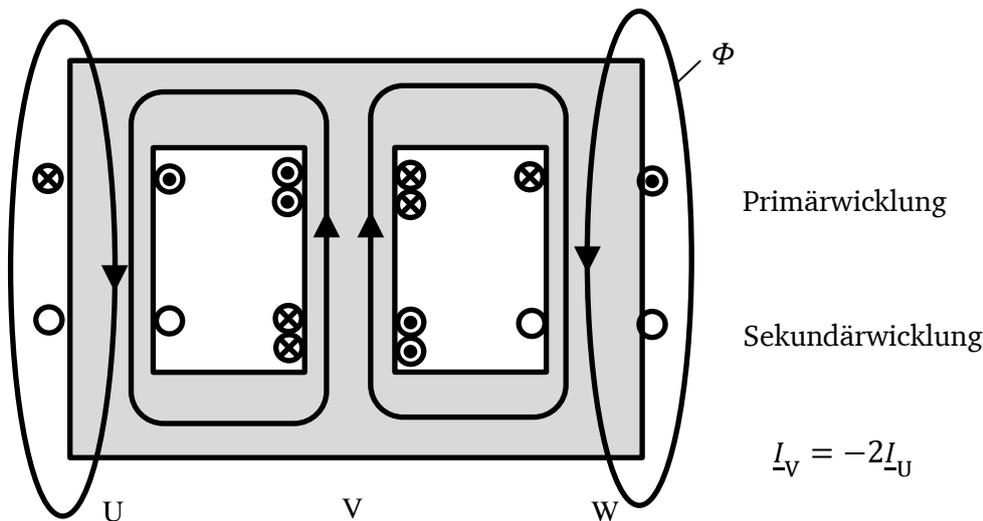


Abbildung 1-24: Verlauf der Feldlinien des 3-Schenkeltransformator bei einphasiger Belastung

b2) 5-Schenkeltransformator bei einphasiger Belastung

Am kritischsten ist die einphasige Belastung beim 5-Schenkeltransformator. Da sich der Fluss für Schenkel „U“ und „W“ über die beiden äußeren Schenkel schließt und daher relativ groß ist. Es wird daher auch einen relativ große störende Spannung induziert und der Spannungseinbruch in Phase „V“ ist groß. Typischerweise liegt der Spannungseinbruch für den 5-Schenkeltransformatoren bei  $U_{2V}/U_{2V,0} - 1 \cong -40 \% \dots - 50 \%$ .

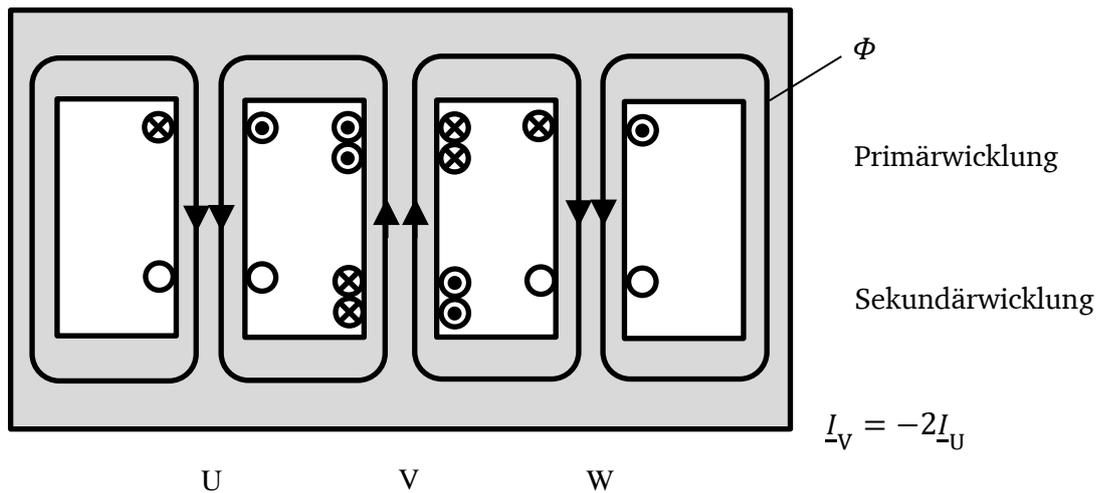


Abbildung 1-25: Verlauf der Feldlinien des 5-Schenkeltransformator bei einphasiger Belastung

**Fazit:**

*Yy-Schaltungen sind für einphasige Belastungen nicht geeignet.*

**Abhilfe:**

Abbildung 1-26 zeigt eine mögliche Abhilfe für dieses Problem, indem man die Sekundärspulen in zwei Teilspulen trennt und jede Teilspule mit der Teilspule des benachbarten Schenkels verbindet. Die Spannungszeiger der beiden Teilspulen je Strang ergeben einen „zickzack“-förmigen Zeigerstern („**Zickzack-Schaltung**“). Die Phasenverschiebung der Primär- und Sekundärstrangspannung ist  $150^\circ$  ( $= 5 \times 30^\circ$ ) (Schaltgruppe Yzn5). Bei einphasiger Belastung sekundär zwischen „N2“ und „w“ fließt sekundär der Strom in einer Teilspule auf Schenkel „U“ und Schenkel „W“, ebenso primär, so dass für beide Schenkel ein Durchflutungsausgleich möglich ist. Damit bleibt das Ersatzschaltbild Abbildung 1-5 gültig; es erfolgt kein Spannungszusammenbruch sekundär. Die Spulen auf Schenkel „V“ sind stets stromlos. Alternativ ist auch die Dreieck-Stern-Schaltung oder die Sternschaltung mit Ausgleichswicklung möglich.

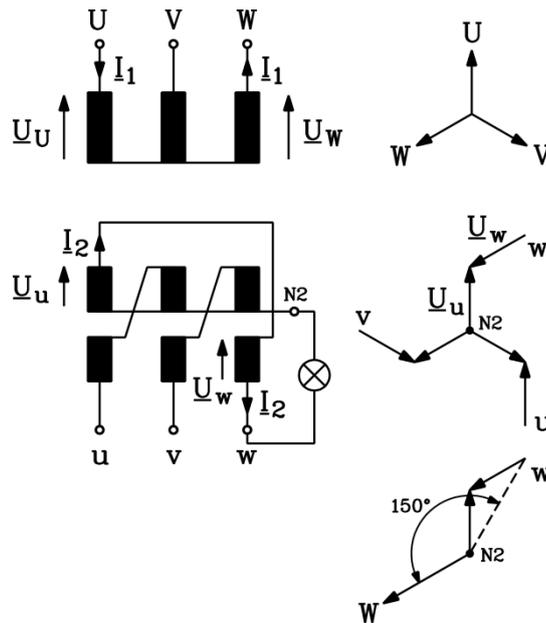


Abbildung 1-26: Bei einphasiger Belastung der Yzn5-Schaltung erfolgt auf den Schenkeln „U“, „W“ Durchflutungsausgleich, so dass kein Spannungszusammenbruch sekundär auftritt.

### e) Nullimpedanz

Die unter d) diskutierten Spannungseinbrüche bei unsymmetrischer (einphasiger) Belastung lassen sich mit Verwendung der Nullimpedanz  $\underline{Z}_0$  einigermaßen genau vorausberechnen. Ein unsymmetrisches Drehstromsystem  $\underline{I}_U, \underline{I}_V, \underline{I}_W$  (Zeiger unterschiedlich lang, Winkel zwischen den Zeigern ungleich  $120^\circ$ ) lässt sich eindeutig in ein symmetrisches Mitsystem  $\underline{I}_{M,U} = \underline{I}_M, \underline{I}_{M,V} = \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_M, \underline{I}_{M,W} = \underline{a} \cdot \underline{I}_M$ , ein symmetrisches Gegensystem  $\underline{I}_{G,U} = \underline{I}_G, \underline{I}_{G,V} = \underline{a} \cdot \underline{I}_G, \underline{I}_{G,W} = \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_G$  und in ein gleichphasiges Nullsystem  $\underline{I}_{0,U} = \underline{I}_0, \underline{I}_{0,V} = \underline{I}_0, \underline{I}_{0,W} = \underline{I}_0$  zerlegen ( $\underline{a} = e^{j2\pi/3}$ ). Sowohl für das Mit- als auch das Gegensystem als zwei Fälle eines symmetrischen Drehstromsystems herrscht bei Belastung des Transformators in allen drei Strängen Durchflutungsausgleich, sodass die dabei auftretende wirksame Transformatorimpedanz je Strang durch das Kapp'sche Dreieck bestimmt ist. Somit sind Mit- und Gegenimpedanz des Transformators identisch und klein.

$$\underline{Z}_M = \underline{Z}_G = (R_1 + R_2') + j \cdot (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}') \quad (1.47)$$

Bei der Nullimpedanz fließt der Strom in allen drei Phasen gleichphasig und erregt drei gleichphasige Flüsse die sich beim Dreischenkeltransformator über Luft schließen müssen, sodass die zugehörige Selbstinduktivität  $L_0$  je Strang und damit die Nullimpedanz  $\underline{Z}_0 = R_s + j \cdot \omega \cdot L_0$  je Strang nahezu (sättigungs)unabhängig vom Strom und klein ist, aber größer als die Mit- und Gegenimpedanz (etwa 4 ... 5-facher Wert) (Abbildung 1-27a). Beim Fünfschenkeltransformator können sich die gleichphasigen Flüsse über die beiden Außenschenkel schließen, sodass bei kleinen Nullströmen die Nullimpedanz sehr groß ist und mit zunehmendem Nullstrom sättigungsbedingt stark absinkt (Abbildung 1-27b). Und trotzdem ist sie in der Regel deutlich größer als beim

Dreischenkeltransformator. Im Anhang ist die Berechnung der drei sekundären Strangspannungen bei einphasiger Belastung Yy0 angegeben und zeigt das der zusätzliche Spannungsfall an der Nullimpedanz in der belasteten Phase für den dort auftretenden großen Spannungseinbruch verantwortlich ist, der vor allem beim Fünfschenkeltransformator besonders groß ist.

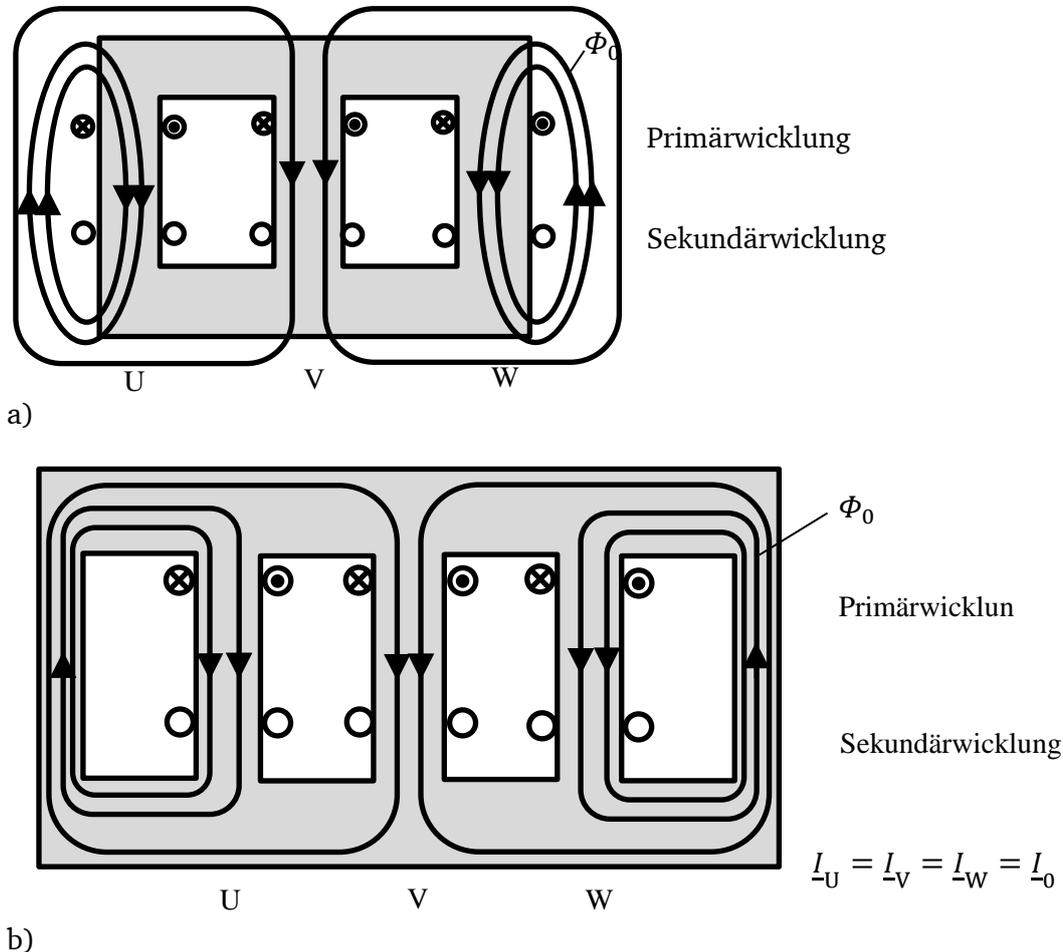


Abbildung 1-27: Nullflüsse: a) beim Dreischenkeltransformator, b) beim Fünfschenkeltransformator

## 1.7. Leistungsschildangaben bei Drehstromtransformatoren

Für die Nennscheinleistung gilt unabhängig von der Schaltgruppe (1.48), wobei die auf dem Leistungsschild angegebenen Nennspannungen **stets die verketteten Spannungen** und die Nennströme **stets die Außenleiterströme** darstellen.

$$S_N = \sqrt{3} \cdot U_{1N} \cdot I_{1N} = \sqrt{3} \cdot U_{2N} \cdot I_{2N} \quad (1.48)$$

### Beispiel 1.6-1:

Nennscheinleistung  $S_N = 315 \text{ kVA}$ , Nennspannungen  $U_{1N}, U_{2N}$  (verkettet)  $20 \text{ kV} / 525 \text{ V}$ :

Nennströme: primär:  $I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} = \frac{315}{\sqrt{3} \cdot 20} = 9.1 \text{ A}$

sekundär:  $I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}} = \frac{315}{\sqrt{3} \cdot 0.525} = 346.4 \text{ A}$

---

### **Fazit:**

Da im Ersatzschaltbild stets **Strangwerte** verwendet werden, auf dem Leistungsschild aber verkettete Spannungen und Außenleiterströme angegeben sind, muss man diese Werte für das Ersatzschaltbild auf Strangwerte **umrechnen**.

Die hier im Skript verwendeten **Klemmenbezeichnungen** U-X, V-Y, W-Z (Sternpunkt N) und u-x, v-y, w-z (Sternpunkt n = N<sub>2</sub>) sind gemäß Norm DIN42402 folgendermaßen festgelegt: 1U1-1U2, 1V1-1V2, 1W1-1W2 (Sternpunkt 1N) und 2U1-2U2, 2V1-2V2, 2W1-2W2 (Sternpunkt 2N), um eine Verwechslung von Groß- und Kleinbuchstaben zu vermeiden.



Abbildung 1-28: Großer Blocktransformator in einem Braunkohlekraftwerk „Schwarze Pumpe“: Die vom Kraftwerksblock (Dampfkessel, Turbine und Synchron-Turbo-Generator) erzeugte elektrische Leistung hat eine Spannung von 27 kV, die über den Transformator auf 400 kV hochgespannt wird. Durch den entsprechend heruntertransformierten kleinen Strom entstehen nur geringe Stromwärmeverluste auf der Freileitung.

## Anhang

### Berechnung der drei sekundären Phasenspannungen bei einphasiger unsymmetrischer Belastung

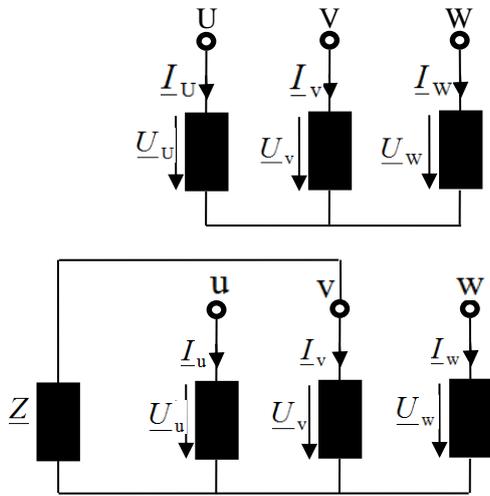


Abbildung 1-29: Schaltgruppe YyN0

$$\underline{U}_v = -\underline{Z} \cdot \underline{I}_v \quad \rightarrow \quad \underline{U}'_v = -\underline{Z}' \cdot \underline{I}'_v, \quad \underline{I}'_v = \frac{I_v}{\ddot{u}}, \quad \underline{Z}' = \ddot{u}^2 \cdot \underline{Z}, \quad \underline{U}'_v = \ddot{u} \cdot \underline{U}_v$$

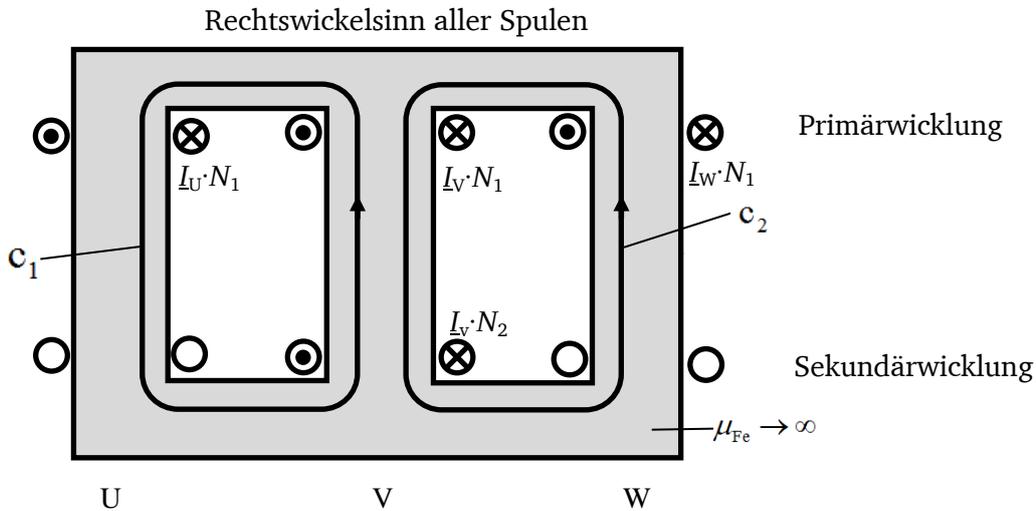


Abbildung 1-30: Durchflutungen mit positiver Stromrichtung und rechtssinnig gewickelten Spulen

Durchflutungssatz für  $\mu_{Fe} \rightarrow \infty$ :

$$\oint_{c_1} \vec{H} \cdot d\vec{s} = 0 = -(I_U - I_V) \cdot N_1 + I_V \cdot N_2$$

$$\oint_{c_2} \vec{H} \cdot d\vec{s} = 0 = -(I_V - I_W) \cdot N_1 - I_V \cdot N_2$$

$c_2$

$$\text{Primärer Sternpunkt Y: } \underline{I}_U + \underline{I}_V + \underline{I}_W = 0 \quad (1) \quad \ddot{u} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\ddot{u} \cdot (I_U - I_V) - I_V = 0 \quad (2)$$

$$\ddot{u} \cdot (I_V - I_W) + I_V = 0 \quad (3)$$

$$(1), (2), (3) \Rightarrow \underline{I}_U = \underline{I}_W, \underline{I}_V = -\underline{I}_U - \underline{I}_W = -2\underline{I}_U$$

$$\ddot{u} \cdot (\underline{I}_U + 2\underline{I}_U) = \underline{I}_V \rightarrow \underline{I}_U = \frac{\underline{I}_V}{3\ddot{u}} = \frac{\underline{I}'_V}{3} = \underline{I}_W$$

$$\underline{I}_U = \underline{I}_W = \frac{\underline{I}'_V}{3}, \quad \underline{I}_V = -\frac{2}{3}\underline{I}'_V$$

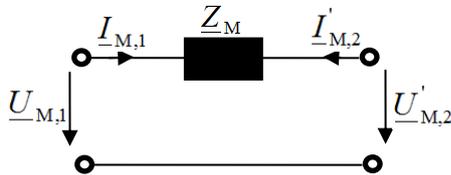
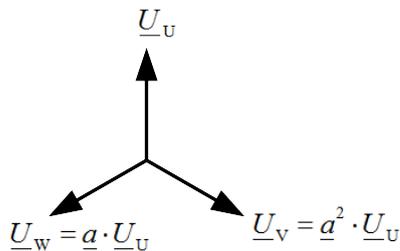


Abbildung 1-31: Ersatzschaltbild für die Mitimpedanz bei  $\mu_{Fe} \rightarrow \infty$

$$\underline{Z}_M = \underline{Z}_G = R_k + jX_k$$

Nullimpedanz  $\underline{Z}_0$  aus numerischer Feldberechnung oder Messung



- 1 primär
- 2 sekundär
- M Mit-System
- G Gegen-System
- 0 Null-System

Abbildung 1-32: Spannungszeiger - Mitsystem

$$\underline{I}'_{M,2} = \frac{1}{3} \cdot (\underline{I}'_u + \underline{a}\underline{I}'_v + \underline{a}^2\underline{I}'_w) = \frac{\underline{a}}{3} \cdot \underline{I}'_v$$

$$\underline{I}'_{G,2} = \frac{1}{3} \cdot (\underline{I}'_u + \underline{a}^2\underline{I}'_v + \underline{a}\underline{I}'_w) = \frac{\underline{a}^2}{3} \cdot \underline{I}'_v$$

$$\underline{I}'_{0,2} = \frac{1}{3} \cdot (\underline{I}'_u + \underline{I}'_v + \underline{I}'_w) = \frac{\underline{I}'_v}{3}$$

$$\underline{U}_{M,1} + \underline{Z}_M \cdot \underline{I}'_{M,2} = \underline{U}'_{M,2} \quad \underline{Z}_M = \underline{Z}_G : \quad \underline{U}_{G,1} + \underline{Z}_M \cdot \underline{I}'_{G,2} = \underline{U}'_{G,2} \quad \underline{U}_{0,1} + \underline{Z}_0 \cdot \underline{I}'_{0,2} = \underline{U}'_{0,2}$$

Symmetrisch speisendes Primärnetz mit Phasenfolge U-V-W

$$\underline{U}_{M,1} = \underline{U}_U, \quad \underline{U}_{G,1} = 0, \quad \underline{U}_{0,1} = 0$$

$$\underline{U}'_{M,2} = \underline{U}_U + \frac{\underline{a}}{3} \cdot \underline{Z}_M \cdot \underline{I}'_v, \quad \underline{U}'_{G,2} = \frac{\underline{a}^2}{3} \cdot \underline{Z}_M \cdot \underline{I}'_v, \quad \underline{U}'_{0,2} = \underline{Z}_0 \cdot \frac{\underline{I}'_v}{3}$$

$$\underline{U}'_u = \underline{U}'_{M,2} + \underline{U}'_{G,2} + \underline{U}'_{0,2} = \underline{U}_U + \frac{\underline{a}}{3} \cdot \underline{Z}_M \cdot \underline{I}'_v + \frac{\underline{a}^2}{3} \cdot \underline{Z}_M \cdot \underline{I}'_v + \underline{Z}_0 \cdot \frac{\underline{I}'_v}{3}$$

$$\underline{U}'_v = \underline{a}^2 \cdot \underline{U}'_{M,2} + \underline{a} \cdot \underline{U}'_{G,2} + \underline{U}'_{0,2} = \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_U + \frac{\underline{a}^3}{3} \cdot \underline{Z}_M \cdot \underline{I}'_v + \frac{\underline{a}^3}{3} \cdot \underline{Z}_M \cdot \underline{I}'_v + \underline{Z}_0 \cdot \frac{\underline{I}'_v}{3}$$

$$\underline{U}'_w = \underline{a} \cdot \underline{U}'_{M,2} + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}'_{G,2} + \underline{U}'_{0,2} = \underline{a} \cdot \underline{U}_U + \frac{\underline{a}^2}{3} \cdot \underline{Z}_M \cdot \underline{I}'_v + \frac{\underline{a}^4}{3} \cdot \underline{Z}_M \cdot \underline{I}'_v + \underline{Z}_0 \cdot \frac{\underline{I}'_v}{3}$$

$$\underline{U}'_u = \underline{U}_U - \frac{1}{3} \cdot \underline{Z}_M \cdot \underline{I}'_v + \underline{Z}_0 \cdot \frac{\underline{I}'_v}{3} \quad (1) \quad \underline{U}'_v = \underline{U}_V + \frac{2}{3} \cdot \underline{Z}_M \cdot \underline{I}'_v + \underline{Z}_0 \cdot \frac{\underline{I}'_v}{3} \quad (2)$$

$$\underline{U}'_w = \underline{U}_W - \frac{1}{3} \cdot \underline{Z}_M \cdot \underline{I}'_v + \underline{Z}_0 \cdot \frac{\underline{I}'_v}{3} \quad (3) \quad \underline{U}'_v = -\underline{Z}' \cdot \underline{I}'_v \quad (4)$$

$$\underline{U}'_u = \underline{U}_U + \frac{\underline{Z}_0 - \underline{Z}_M}{3} \cdot \left( -\frac{\underline{U}'_v}{\underline{Z}'} \right) \quad (1)'$$

$$\underline{U}'_v = \underline{U}_V + \frac{\underline{Z}_0 + 2\underline{Z}_M}{3} \cdot \left( -\frac{\underline{U}'_v}{\underline{Z}'} \right) \quad (2)'$$

$$\underline{U}'_w = \underline{U}_W + \frac{\underline{Z}_0 - \underline{Z}_M}{3} \cdot \left( -\frac{\underline{U}'_v}{\underline{Z}'} \right) \quad (3)'$$

$$\begin{pmatrix} 1 & \frac{\underline{Z}_0 - \underline{Z}_M}{3\underline{Z}'} & 0 \\ 0 & 1 + \frac{\underline{Z}_0 + 2\underline{Z}_M}{3\underline{Z}'} & 0 \\ 0 & \frac{\underline{Z}_0 - \underline{Z}_M}{3\underline{Z}'} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{U}'_u \\ \underline{U}'_v \\ \underline{U}'_w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{U}_U \\ \underline{U}_V \\ \underline{U}_W \end{pmatrix} \Rightarrow \text{CRAMER'sche Regel}$$

**Ergebnis:**

$$\underline{U}'_u = \underline{U}_U - \underline{U}_V \cdot \frac{\underline{Z}_0 - \underline{Z}_M}{3\underline{Z}' + 2\underline{Z}_M + \underline{Z}_0} \quad \underline{U}'_v = \underline{U}_V \cdot \frac{3\underline{Z}'}{3\underline{Z}' + 2\underline{Z}_M + \underline{Z}_0}$$

$$\underline{U}'_w = \underline{U}_W - \underline{U}_V \cdot \frac{\underline{Z}_0 - \underline{Z}_M}{3\underline{Z}' + 2\underline{Z}_M + \underline{Z}_0}$$

$$\underline{I}'_v = -\underline{U}_V \cdot \frac{3}{3\underline{Z}' + 2\underline{Z}_M + \underline{Z}_0}$$

Oder:

$$\underline{U}'_u = \underline{U}_U + \underline{I}'_v \cdot \frac{\underline{Z}_0 - \underline{Z}_M}{3} \quad \underline{U}'_v = \underline{U}_V + \underline{I}'_v \cdot \frac{\underline{Z}_0 + 2\underline{Z}_M}{3} \quad \underline{U}'_w = \underline{U}_W + \underline{I}'_v \cdot \frac{\underline{Z}_0 - \underline{Z}_M}{3}$$

**Beispiel:**

$$\underline{Z}' = R = 1.23 \Omega, \quad |\underline{U}_U| = |\underline{U}_V| = |\underline{U}_W| = 127 \text{ V}, \quad \underline{Z}_M = (0.16 + j \cdot 0.26) \Omega, \quad \ddot{u} = 1.73,$$

$$\underline{Z}_0 = (0.40 + j \cdot 0.93) \Omega, \quad \underline{I}_{N1} = 38 \text{ A}, \quad \underline{U}_{N1\text{ph}} = 127 \text{ V}, \quad \underline{U}_U = \underline{U}_{N1\text{ph}}, \quad \underline{U}_V = \underline{U}_{N1\text{ph}} \cdot e^{-j \cdot 120^\circ},$$

$$\underline{U}_W = \underline{U}_{N1\text{ph}} \cdot e^{-j \cdot 240^\circ}$$

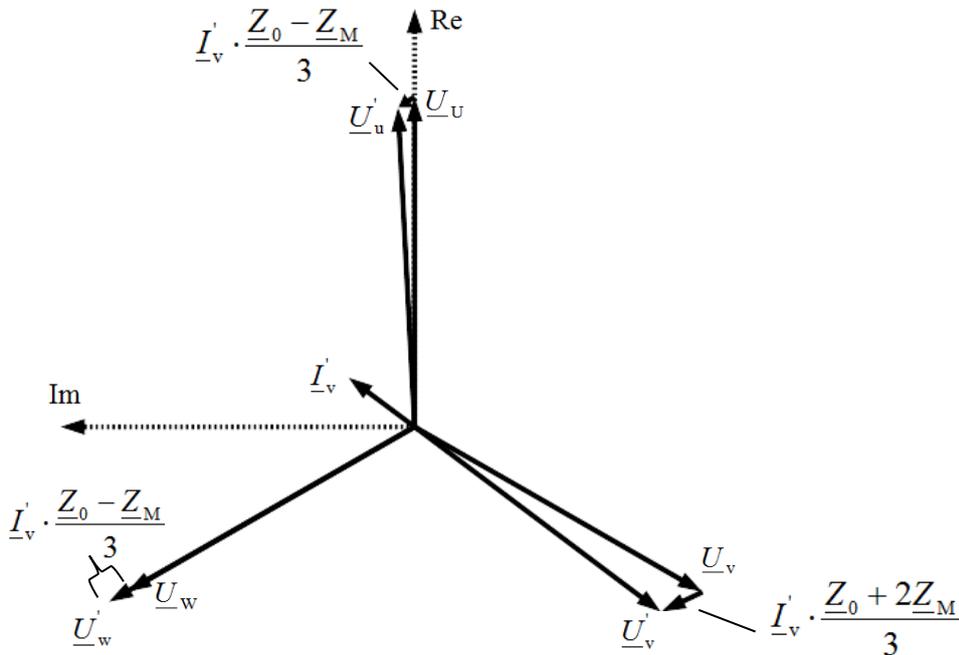


Abbildung 1-33: Zeigerdiagramm mit „verzerrtem“ sekundärem Spannungssystem

Verwendete Formeln:

$$\underline{U}'_u = \underline{U}_U - \underline{U}_V \cdot \frac{\underline{Z}_0 - \underline{Z}_M}{3\underline{Z}' + 2\underline{Z}_M + \underline{Z}_0} \quad \underline{U}'_v = \underline{U}_V \cdot \frac{3\underline{Z}'}{3\underline{Z}' + 2\underline{Z}_M + \underline{Z}_0}$$

$$\underline{U}'_w = \underline{U}_W - \underline{U}_V \cdot \frac{\underline{Z}_0 - \underline{Z}_M}{3\underline{Z}' + 2\underline{Z}_M + \underline{Z}_0} \quad \underline{I}'_v = -\underline{U}_V \cdot \frac{3}{3\underline{Z}' + 2\underline{Z}_M + \underline{Z}_0}$$

Nenner:

$$3\underline{Z}' + 2\underline{Z}_M + \underline{Z}_0 = 3 \cdot 1.73^2 \cdot 1.23 + 2 \cdot (0.16 + j \cdot 0.26) + 0.4 + j \cdot 0.93 = (11.76 + j \cdot 1.45) \Omega$$

$$\underline{U}'_v = \frac{3\underline{Z}'}{3\underline{Z}' + 2\underline{Z}_M + \underline{Z}_0} \cdot \underline{U}_V = \frac{3 \cdot 1.73^2 \cdot 1.23}{11.76 + j \cdot 1.45} \cdot \left( -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot 127 \text{ V}$$

$$\Rightarrow \left| \frac{\underline{U}'_v}{127 \text{ V}} \right| = |-(0.56 + j \cdot 0.74)| = 0.93$$

$$\underline{U}'_u = \left( 1 - \frac{0.4 - 0.16 + j \cdot (0.93 - 0.26)}{11.76 + j \cdot 1.45} \cdot \left( -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right) \cdot 127 \text{ V} = (1 - (0.0329 - j \cdot 0.0502)) \cdot 127 \text{ V}$$

$$\Rightarrow \left| \frac{\underline{U}'_u}{127 \text{ V}} \right| = |0.967 + j \cdot 0.0502| = 0.97$$

$$\underline{U}'_w = \left( -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} - 0.0329 + j0.0502 \right) \cdot 127V \Rightarrow \left| \frac{\underline{U}'_w}{127V} \right| = |-0.5329 + j0.9162| = 1.06$$

$$\underline{I}'_v = \frac{-3}{11.76 + j1.45} \cdot \left( -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot 127A = |0.15 + j0.2| \cdot 127A = 31.75A = 83.6\% \text{ von } \underline{I}_{N1}$$

Der belastete Strang (hier: v) hat den größten Spannungseinbruch von ca. 7 %!

Mit steigendem  $Z_0$  nimmt dieser Spannungseinbruch zu! Deshalb ist er bei 5-Schenkel-Transformatoren deutlich größer als bei 3-Schenkeltransformatoren!

Die Schiefkast  $\underline{I}'_v / \underline{I}_{N1}$  wird daher gemäß Norm begrenzt, z.B. auf max. 10 %

---

---

## 2. Versuchsdurchführung

---

Das Versuchsobjekt ist ein Drehstromtransformator mit drei Schenkeln. Primär- und Sekundärseite des Transformators sind beide in Stern geschaltet (Abbildung 4.1). In jedem Schenkel gibt es acht identische Spulen. Davon bilden vier in Reihe geschaltete Spulen die Primärwicklung der jeweiligen Phase. Die vier anderen Spulen bilden die Sekundärwicklung, bei der jeweils zwei Spulen in Reihe und anschließend parallel geschaltet sind. Der gemessene DC-Strangwiderstand (20 °C) auf der Primärseite ist  $R_1 = 0.16 \Omega$  und der gemessene DC-Strangwiderstand auf der Sekundärseite ist  $R_2 = 0.04 \Omega$ . Primärseitig werden Strom, Spannung und Leistung gemessen. Auf der Sekundärseite werden Spannung und gegebenenfalls Strom gemessen (Abbildung 4.2 - 4.6). Das Einschalten soll immer bei Primärspannung  $U_1 = 0 \text{ V}$  erfolgen (nach jedem Versuch die Versorgungsspannung über den speisenden Transformator mit variabler Ausgangsspannung wieder auf 0 V bringen!). Die Primärspannung wird durch einen Drehregler (Transformator mit veränderlicher Sekundärspannung über Schleifkontakte) gespeist, der im Untergeschoss steht und durch zwei Knöpfe im Schaltbrett gesteuert wird. Für den einphasigen Belastungsversuch wird der Sternpunkt der Sekundärseite auf dem Anschlussbrett des Transformators verwendet.

Die Nennleistung, Nennspannung und Verschaltung des Transformators werden vom Typenschild während des Versuchs aufgenommen und sind Teil der Versuchsdurchführung.

Verschalten Sie zunächst die Primärseite des Transformators gemäß Abbildung 4-1 (bleibt bis auf Aufgabenteil 2.5 unverändert).

### 2.1. Zuordnung der Wattmeter und Vorzeichenbestimmung

Bei einem Dreiphasensystem ohne Sternpunktleiter kann man mit zwei Wattmetern die augenblickliche Wirkleistung messen. Im vorliegenden Praktikumsversuch wird ein zeitlich sinusförmiges, symmetrisches Drehspannungssystem mit symmetrischer Belastung betrachtet. Hier gilt unter Berücksichtigung der Wattmeterkonstanten  $c_w$  und der beiden Wattmeteranzeigen  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$ :

$$c_w \cdot \alpha_1 = \operatorname{Re}\{\underline{U}_{wv} \cdot \underline{I}_w^*\} = \frac{S}{\sqrt{3}} \cdot \cos(30^\circ - \varphi) = \frac{S}{\sqrt{3}} \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(\varphi) + \frac{1}{2} \sin(\varphi) \right) \quad (\text{V1})$$

$$c_w \cdot \alpha_2 = \operatorname{Re}\{\underline{U}_{uv} \cdot \underline{I}_u^*\} = \frac{S}{\sqrt{3}} \cdot \cos(30^\circ + \varphi) = \frac{S}{\sqrt{3}} \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(\varphi) - \frac{1}{2} \sin(\varphi) \right) . \quad (\text{V2})$$

Die Summe von (V1) und (V2) ergibt die mittlere Wirkleistung je Periode:

$$P = c_w (\alpha_1 + \alpha_2) = S \cdot \cos(\varphi) . \quad (\text{V3})$$

Aus der Differenz von (V1) und (V2) erhält man die Blindleistung:

$$Q = \sqrt{3} \cdot c_w (\alpha_1 - \alpha_2) = S \cdot \sin(\varphi) . \quad (\text{V4})$$

Zur Bestimmung des Leistungsfaktors erhält man mit (V3) und (V4)

$$\cos(\varphi) = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (V5)$$

Die Wattmeterkonstante  $c_W$  lässt sich folgendermaßen berechnen:

$$c_W = \ddot{u}_1 \cdot \frac{I_{\text{Watt,N}} \cdot U_{\text{Watt,N}}}{\alpha_{\text{Watt,End}}} \quad (V6)$$

mit:

- $\ddot{u}_1$ : Übersetzungsverhältnis des Stromwandlers,
- $I_{\text{Watt,N}}$ : Bemessungsstrom des Wattmeters ( $I_{\text{Watt,N}} = 5 \text{ A}$ ),
- $U_{\text{Watt,N}}$ : eingestellter Wert des Spannungspfads,
- $\alpha_{\text{Watt,End}}$ : Skalenteile des Wattmeters (Vollausschlag:  $\alpha_{\text{Watt,End}} = 125 \text{ Skt}$ ).

Die Vorzeichen von  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  werden über den Schaltzustand der Umpolschalter eingestellt. Vor der ersten Leistungsmessung müssen  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  den beiden Wattmetern zugeordnet werden und deren Vorzeichen bestimmt werden. Bild V2 zeigt die Abhängigkeit der beiden Wattmeteranzeigen  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  vom Phasenwinkel  $\varphi = \varphi_U - \varphi_I$  bei konstanter Scheinleistung  $S = \sqrt{3} \cdot I \cdot U_{\text{verk}}$  und Wattmeterkonstante  $c_W$ .

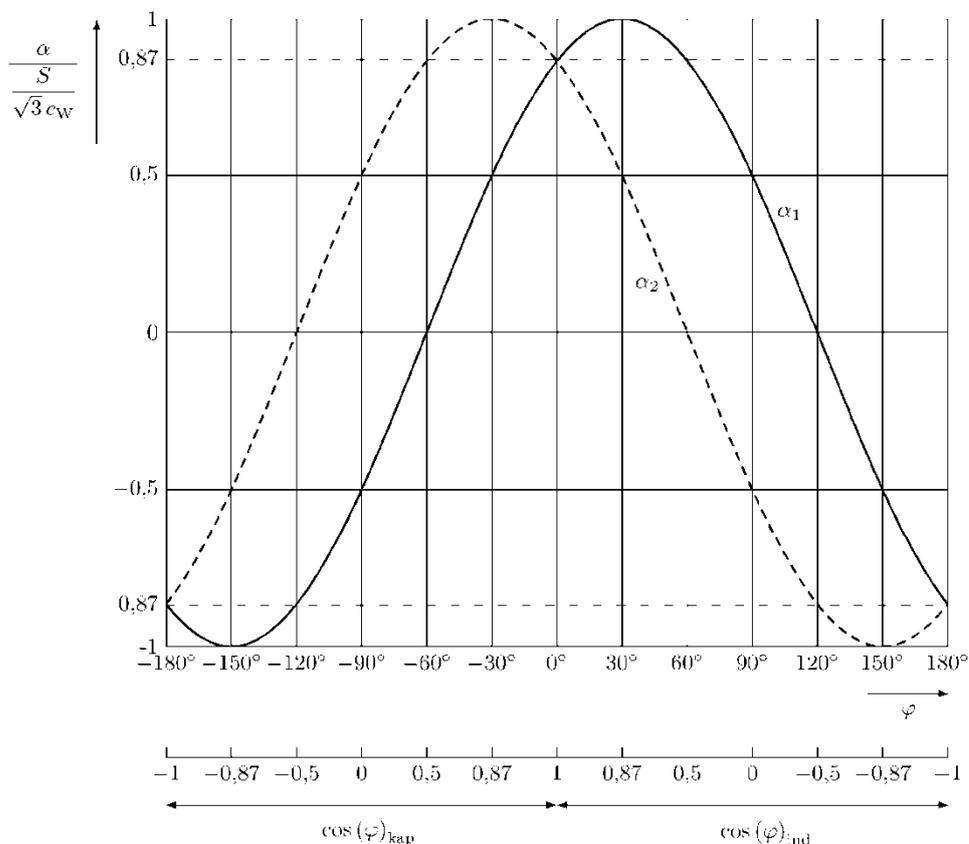


Bild V2: Zwei-Wattmeter-Methode: Abhängigkeit der Wattmeteranzeigen vom Phasenwinkel für konstante Scheinleistung  $S$  und Wattmeterkonstante  $c_W$  gemäß (V1) und (V2)

Um die Zuordnung der Wattmeter und die Vorzeichenbestimmung nach Bild V2 durchführen zu können, müssen die Wattmeter bei bekanntem Phasenwinkel abgelesen werden. Dazu wird der

Drehstromtransformator im sekundärseitigen Leerlauf mit primärseitiger Bemessungsspannung betrieben. In diesem Betriebspunkt gilt für den Phasenwinkel:  $60^\circ < \varphi < 90^\circ$ , da der Drehstromtransformator auch im Leerlauf eine kleine positive Wirkleistung benötigt. Aus Bild V2 folgt für diesen Betriebspunkt:

- Die Anzeige mit größerem Ausschlag ist  $\alpha_1$  und hat positives Vorzeichen.
- Die Anzeige mit kleinerem Ausschlag ist  $\alpha_2$  und hat negatives Vorzeichen.

## 2.2. Leerlaufmessungen

Schalten Sie die Sekundärseite des Transformators gemäß Abbildung 4-4. Die Sekundärseite bleibt zunächst offen (Schalter S3 in Abbildung 4-4 offen). Zur Messung der Primärströme kommen beim Leerlaufversuch die digitalen Amperemeter zum Einsatz (Schalter in Stellung „max 2 A“)

### 2.2.1. Bedienung des speisenden Transformators für veränderliche Spannung

Schalten Sie Schalter S1 ein. Verändern Sie nun mit Hilfe der Fernsteuerung die Primärspannung und beobachten Sie die Änderung der Spannung. Nachdem Sie sich mit der Fernsteuerung vertraut gemacht haben, stellen Sie die Spannung wieder auf 0 V. Schalten Sie nun Schalter S2 ein und bestimmen Sie das Vorzeichen der beiden Wattmeter  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  bei Nennspannung.

### 2.2.2. Messung der Leerlaufkennlinie

Steigern Sie die Primärspannung beginnend mit 0 V in 12 Schritten auf  $1.2 U_N = 456 \text{ V}$  und messen Sie  $U_{20}(U_1)$ ,  $I_0(U_1)$  und  $P_0(U_1)$ .

Messwerte									
$U_1$ /V	$U_2$ /Skt	$c_2$ / $\frac{V}{\text{Skt}}$	$I_{1U}$ /A	$I_{1V}$ /A	$I_{1W}$ /A	$\alpha_1$ /Skt	$\alpha_2$ /Skt	$c_1$ /-	$U_{\text{watt,N}}$ /V

Rechenwerte										
$I_{1,av}$ /A	$U_2$ /V	$\ddot{u}_U$ /-	$c_W$ / $\frac{VA}{\text{Skt}}$	$P_1$ /W	$Q_1$ /VAr	$S_1$ /VA	$\cos(\varphi)$ /-	$U_1^2$ /V <sup>2</sup>	$P_{Cu}$ /W	$P_{Fe}$ /W

### 2.2.3. Bestimmung des Spannungsübersetzungsverhältnisses

Bestimmen Sie aus der vorangegangenen Messung das Spannungsübersetzungsverhältnis  $\ddot{u}_U = \frac{U_1}{U_2}$ .

### 2.2.4. Oszillographieren des Magnetisierungsstroms

Oszillographieren Sie den Leerlaufstrom  $I_0$  bei halber und voller Nennspannung. Wieso ist Leerlaufstrom  $I_0$  gleichzeitig der "Magnetisierungsstrom"?

### 2.2.5. Oszillographieren des Einschaltstromstoßes

Benutzen Sie die "Single-Shot" Funktion des Oszilloskops, um den Einschaltstromstoß sichtbar zu machen. Stellen Sie zunächst die Nennspannung des Transformators ein und schalten Sie den

sekundärseitig offenen (leerlaufenden) Transformator mit S2 zu. Beobachten Sie den Verlauf des Einschaltstromes bis zu seinem Abklingen.

## 2.3. Kurzschlussmessungen

Nun wird der Transformator auf der Sekundärseite über S3 kurzgeschlossen (Schaltung gemäß Abbildung 4-2). Auf der Sekundärseite wird der sekundäre Dauer-Kurzschlussstrom, auf der Primärseite werden Kurzschlussstrom, Kurzschlussspannung und die Leistung nach der Zweiwattmeter-Methode (Aronschtaltung) gemessen. Der Primärstrom wird nun mit den analogen Amperemetern erfasst (Schalter in Stellung „max 25 A“)

### 2.3.1. Messung der Kurzschlusskennlinie

Beginnen Sie die Messung mit  $U_1 = 0 \text{ V}$ ! Steigern Sie den Primärstrom bis  $1.1 I_N = 19.8 \text{ A}$  und nehmen Sie bei sinkendem Primärstrom in Schritten zu jeweils 4 A folgende Kennlinien auf  $I_2(I_1)$ ,  $U_1(I_1)$ ,  $P_k(I_1)$ .

Messwerte										
$U_1$ /V	$I_{1U}$ /A	$I_{1V}$ /A	$I_{1W}$ /A	$\alpha_1$ /Skt	$\alpha_2$ /Skt	$c_1$ /-	$U_{\text{watt,N}}$ /V	$I_{2U}$ /A	$I_{2V}$ /A	$I_{2W}$ /A

Rechenwerte									
$I_{1,\text{av}}$ /A	$I_{2,\text{av}}$ /A	$\ddot{u}_1$ /-	$c_W$ / $\frac{\text{VA}}{\text{Skt}}$	$P_1$ /W	$Q_1$ /VAr	$S_1$ /VA	$\cos(\varphi)$ /-	$S_1$ /VA	$\cos(\varphi)$ /-

### 2.3.2. Bestimmung des Stromübersetzungsverhältnisses

Bestimmen Sie aus der vorangegangenen Messung das Stromübersetzungsverhältnis  $\ddot{u}_1 = \frac{I_2}{I_1}$ .

### 2.3.3. Oszillographieren des Dauer-Kurzschlussstromes

Oszillographieren Sie den Primärstrom  $I_1 = I_{1N}$ .

## 2.4. Lastmessungen (Yyn0-Schaltung)

Der Transformator wird mit verschiedenen Belastungen in der Schaltungsvariante Yyn0 betrieben. Die Primärspannung soll dabei konstant auf Nennspannung gehalten werden  $U_1 = U_{1N}$ .

### 2.4.1. 3-phasige Ohm'sche Belastung (Yyn0)

Verbinden Sie die 3 1-phasigen Belastungswiderstände und die Strom- und Spannungsmessgeräte gemäß Abbildung 4-5. Starten Sie die Messungen bei Nennspannung und jeweils maximalem Widerstand (linker Anschlag) und messen Sie jeweils  $U_2$ ,  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $P_1$  bis zum Erreichen von  $I_1 = 1.1 \cdot I_N$  in Schritten von jeweils 4 A. Die Primärspannung  $U_1$  muss während des Versuchs immer auf den Nennwert gehalten werden. Die Belastungswiderstände werden während des Versuchs variiert. Achten Sie beim Verstellen der 3 einzelnen Lastwiderstände darauf, dass die Last immer annähernd symmetrisch bleibt. Zur Messung der Wirkleistung wird die Aronschtaltung verwendet.

Messwerte												
$U_1$ /V	$U_2$ /Skt	$c_2$ / $\frac{V}{Skt}$	$I_{1U}$ /A	$I_{1V}$ /A	$I_{1W}$ /A	$\alpha_1$ /Skt	$\alpha_2$ /Skt	$c_1$ /-	$U_{watt,N}$ /V	$I_{2U}$ /A	$I_{2V}$ /A	$I_{2W}$ /A

Rechenwerte								
$I_{1,ave}$ /A	$I_{2,ave}$ /A	$U_2$ /V	$U_{2,str}$ /V	$c_W$ / $\frac{VA}{Skt}$	$P_1$ /W	$Q_1$ /VAr	$S_1$ /VA	$\cos(\varphi)$ /-

### 2.4.2. Ohm'sche Belastung zwischen 2 Phasen

Schalten Sie bei der Trafoschaltung Yy0 einen Belastungswiderstand zwischen die sekundären Klemmen  $v$  und  $w$  und verbinden Sie die entsprechenden Messgeräte gemäß Abbildung 4-3. Starten Sie die Messungen bei maximalem Widerstand (linker Anschlag) und messen Sie  $U_2$ ,  $I_2$ ,  $I_1$ ,  $P_1$  bis zum Erreichen von  $I_1 = 1.1 \cdot I_N$  in Schritten von jeweils 4 A. Primärspannung  $U_1$  muss während des Versuchs immer auf Nennwert gehalten werden. Der Widerstand wird während des Versuchs geändert. Aufgrund des Durchflutungsausgleichs in zwei Schenkeln wird zur Messung der primärseitigen Wirkleistung nur ein Wattmeter verwendet,  $\alpha_2$  ist hierbei Null.

Messwerte											
$U_1$ /V	$U_2$ /Skt	$c_2$ / $\frac{V}{Skt}$	$I_{1U}$ /A	$I_{1V}$ /A	$I_{1W}$ /A	$\alpha_1$ /Skt	$c_1$ /-	$U_{watt,N}$ /V	$I_{2U}$ /A	$I_{2V}$ /A	$I_{2W}$ /A

Rechenwerte			
$U_2$ /V	$U_{2,str}$ /V	$c_W$ / $\frac{VA}{Skt}$	$P_1$ /W

### 2.4.3. 1-phasige Ohm'sche Belastung gegen Sternpunkt (Yyn0)

Schalten Sie den 1-phasigen Belastungswiderstand zwischen die sekundäre Klemme  $w$  und den sekundären Sternpunkt  $n$  gemäß Abbildung 4-6. Starten Sie die Messungen bei konstanter Primärspannung ( $U_1 = U_N$ ) und maximalem Widerstand (linker Anschlag) und messen Sie jeweils  $U_2$ ,  $I_1$ ,  $I_2$  bis zum Erreichen von  $I_2 = 1.1 \cdot I_{2N}$  in Schritten von jeweils 8 A. Primärspannung  $U_1$  muss während des Versuchs immer auf den Nennwert gehalten werden. Der Widerstand wird während des Versuchs geändert. Zur Messung der primärseitigen Wirkleistung wird die Aronschaltung verwendet.

Messwerte														
$U_1$ /V	$U_{2U, str}$ /V	$U_{2V, str}$ /V	$U_{2W, str}$ /Skt	$c_2$ / $\frac{V}{Skt}$	$I_{1U}$ /A	$I_{1V}$ /A	$I_{1W}$ /A	$I_{2U}$ /A	$I_{2V}$ /A	$I_{2W}$ /A	$\alpha_1$ /Skt	$\alpha_2$ /Skt	$U_{watt,N}$ /V	$c_1$ /-

Rechenwerte	
$c_W$ / $\frac{VA}{Skt}$	$P_1$ /W

---

## 2.5. Messung der Nullimpedanz

---

Die drei primären Strangwicklungen werden am Sternpunkt aufgetrennt und in Serie geschaltet. Sie werden mit einer veränderlichen Spannung z.B. die verkettete Spannung zwischen den Phasen  $U$  und  $W$ , ausgehend von kleinen Spannungen, in Schritten von jeweils 4 A bis zum 1.1-fachen Nennstrom bestromt. Die auftretende Wirkleistung  $P_1$ , und die zugehörigen Wertepaare von Spannung und Strom  $U_1, I_1$  werden gemessen. Durch die Serienschaltung der drei Stränge wird sichergestellt, dass in jedem der drei Stränge derselbe Nullstrom  $I_0$  fließt. Zur Messung der Wirkleistung wird nur ein Wattmeter verwendet. Hierfür ist die dazugehörige Spannung zu messen.

Messwerte				
$U_1$ /V	$I_1$ /A	$\alpha_1$ /Skt	$c_1$ /-	$U_{\text{watt,N}}$ /V

Rechenwerte						
$c_W$ / $\frac{VA}{Skt}$	$P_1$ /W	$S_1$ /VA	$\cos(\varphi)$ /-	$Z_0$ / $\Omega$	$R_0$ / $\Omega$	$X_0$ / $\Omega$

---

### 3. Auswertung

---

1. Geben Sie das Typenschild des Transformators und die verwendeten Messgeräte an. **(0.15 Punkte)**

#### 3.1. Leerlaufversuch

1. Beschreibung der Versuchsdurchführung mit Angabe der Messwerte, den Formeln zur Umrechnung in SI-Einheiten sowie den umgerechneten Werten. **(0.2 Punkte)**
2. Geben Sie das einphasige Ersatzschaltbild für den Transformator im Leerlauf an. **(0.05 Punkte)**
3. Zeichnen Sie die Leerlaufkennlinie der Sekundärspannung  $U_{20} = f(U_1)$ . Begründen Sie den Verlauf und geben Sie das Übersetzungsverhältnis  $\ddot{u}_u$  an. **(0.6 Punkte)**
4. Zeichnen Sie die Leerlaufkennlinie vom Primärstrom  $I_{1,0} = f(U_1)$ . Begründen Sie den Verlauf. **(0.5 Punkte)**
5. Aus welchen Anteilen setzt sich die Wirkleistung im Leerlauf zusammen? Bestimmen Sie die Stromwärmeverluste im Leerlauf für alle Messpunkte, DC-Strangwiderstand-Primärseite  $R_1 = 0.16 \Omega$  und DC-Strangwiderstand-Sekundärseite  $R_2 = 0.04 \Omega$ . **(0.3 Punkte)**
6. Bestimmen Sie die Ummagnetisierungsverluste und zeichnen Sie die Kennlinie  $P_{Fe} = f(U_1^2)$ . Welchen Zusammenhang zwischen den Ummagnetisierungsverlusten und der Primärspannung können Sie erkennen? **(0.4 Punkte)**
7. Wie groß sind die Ummagnetisierungsverluste bei Nennspannung? **(0.1 Punkte)**
8. Wie groß sind die Parameter  $R_{Fe}$  und  $X_h$ ? Vernachlässigen Sie bei der Berechnung den *Ohm'schen* Widerstand  $R_1$  und die Streureaktanz  $X_{\sigma}$  und geben Sie das Ersatzschaltbild an. **(0.3 Punkte)**
9. Zeichnen Sie die Leerlaufkennlinie des Leistungsfaktors  $\cos \varphi_0 = f(U_1)$  und begründen Sie den Verlauf. **(0.5 Punkte)**
10. Fügen Sie einen Screenshot vom Magnetisierungsstrom  $I_m \approx I_{10}$  und vom Einschaltstromstoß bei leerlaufendem Transformator ein und begründen Sie die Kurvenform qualitativ. **(0.4 Punkte)**

#### 3.2. Kurzschlussversuch

1. Beschreibung der Versuchsdurchführung mit Angabe der Messwerte, den Formeln zur Umrechnung in SI-Einheiten sowie den umgerechneten Werten. **(0.2 Punkte)**
2. Geben Sie das vereinfachte einphasige Ersatzschaltbild für den Transformator im Kurzschluss an. **(0.1 Punkte)**
3. Zeichnen Sie die Kurzschlusskennlinie der Primärspannung  $U_1 = f(I_1)$  und des Sekundärstromes  $I_2 = f(I_1)$ . Begründen Sie den Verlauf. **(0.5 Punkte)**
4. Geben Sie das Stromübersetzungsverhältnis  $\ddot{u}_I$  an. **(0.1 Punkte)**

5. Zeichnen Sie die Kurzschlusskennlinie der Wirkleistung  $P_k = f(I_1)$  und der Scheinleistung  $S_k = f(I_1)$ . Begründen Sie den Verlauf. **(0.5 Punkte)**
6. Zeichnen Sie die Kurzschlusskennlinie des Leistungsfaktors  $\cos\varphi_k = f(I_1)$  und begründen Sie den Verlauf. **(0.5 Punkte)**
7. Wie groß ist die Kurzschlussspannung in Volt und als bezogener Wert (p.u.)? **(0.1 Punkte)**
8. Bestimmen Sie die Parameter des vereinfachten Ersatzschaltbildes für den Kurzschluss. **(0.4 Punkte)**
9. In welchem Zusammenhang stehen die Parameter des vereinfachten Ersatzschaltbildes mit dem KAPP'schen Dreieck? **(0.3 Punkte)**
10. Fügen Sie einen Screenshot vom Kurzschlussstrom  $I_k$  bei sekundär kurzgeschlossenem Transformator ein und begründen Sie die Kurvenform qualitativ. **(0.2 Punkte)**

### 3.3. Belastungsversuch

1. Beschreibung der Versuchsdurchführung mit Angabe der Messwerte, den Formeln zur Umrechnung in SI-Einheiten sowie den umgerechneten Werten. **(0.2 Punkte)**
2. Zeichnen Sie für jeden der 3 Belastungsfälle in ein Diagramm die sekundären Belastungskennlinie  $U_{2,\text{str}} = f(I_2)$  und begründen Sie qualitativ den Verlauf. Geben Sie für jeden der drei Belastungsfälle die Sekundärspannung  $U_{2,\text{str}}$  bei sekundärem Nennstrom  $I_{2N}$  an. **(0.55 Punkte)**
3. Zeichnen Sie für jeden der 3 Belastungsfälle in ein Diagramm die Belastungskennlinien der Wirkleistung  $P = f(I_2)$  und begründen Sie den Verlauf. In welchem Verhältnis ( $P_{1\text{phasig}}/P_{3\text{phasig}}$ ;  $P_{2\text{phasig}}/P_{3\text{phasig}}$ ;  $P_{2\text{phasig}}/P_{1\text{phasig}}$ ) stehen die umgesetzten Wirkleistungen und warum?<sup>1</sup> **(0.55 Punkte)**
4. Zeichnen Sie für die 3-phasige symmetrische Belastung das vereinfachte Zeigerdiagramm für alle drei Stränge ( $U_1 = U_N$ ;  $\lambda_U = 25 \text{ V/cm}$ ;  $\lambda_I = 4 \text{ A/cm}$ ). **(0.7 Punkte)**
5. Berechnen Sie den Wirkungsgrad des Transformators im Nennbetrieb bei 3-phasiger Belastung. **(0.1 Punkte)**

### 3.4. Bestimmung der Nullimpedanz

Aus dem Wertepaar  $U_1/I_1 = 3 \cdot Z_0$  wird die Nullimpedanz in Abhängigkeit vom Nullstrom  $I_1 = I_0$  bestimmt. Über die Wirk- und Scheinleistung werden der  $\cos(\varphi_0)$  und  $R_0$  und  $X_0$  ausgerechnet. Da dies

---

<sup>1</sup> Hinweis: Stellen Sie die Gleichungen für die an den Lastwiderständen umgesetzten Leistung für jeden der 3 Belastungsfälle auf und stellen diese ins Verhältnis.

ein Dreisckeneltransformator ist: Ist  $Z_0$  weitgehend unabhängig von  $I_1 = I_0$ ? Wie groß ist das Verhältnis von Nullimpedanz zur Mit- bzw. Gegenimpedanz bei Nennstrom? Fertigen Sie eine Grafik von  $R_0, X_0, Z_0$  über  $I_0$  an! Geben Sie die zugehörige Messtabelle und die Tabelle mit den Rechenwerten gesondert an!

**(0.75 Punkte)**

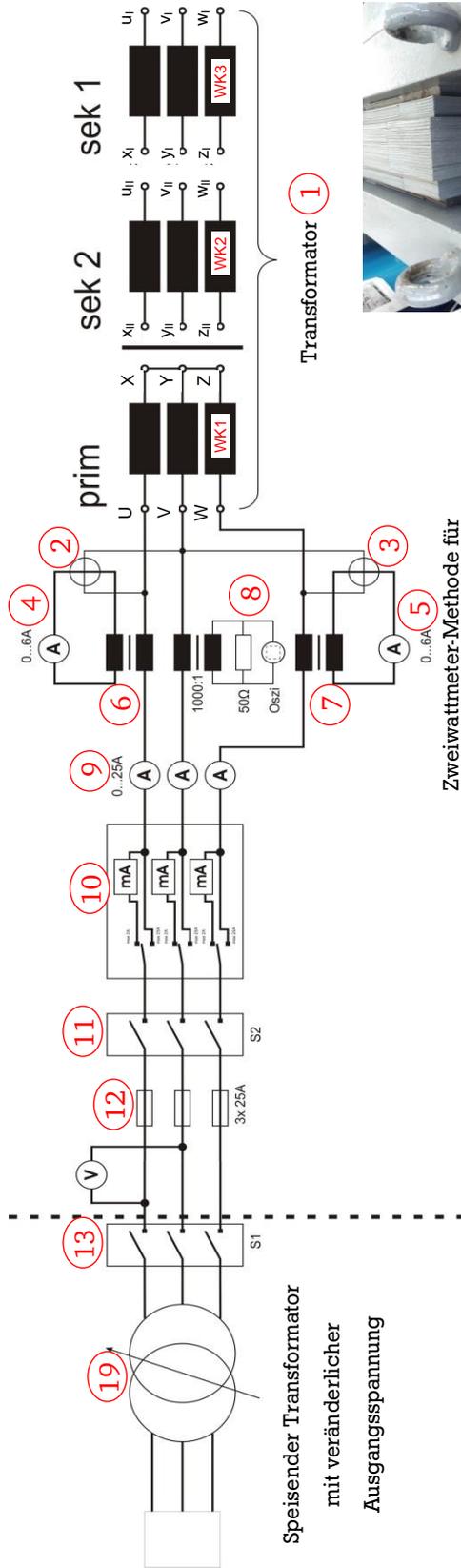
### 3.5. Berechnung der einphasigen Belastung

Bestimmen Sie mit den Formeln aus dem Anhang die drei sekundären Strangspannungen rechnerisch, wobei Sie für die Parameter der Mit- (Gegen-) impedanz und der Nullimpedanz die Messwerte übernehmen! Verwenden Sie für die Belastungsimpedanz  $Z = R = U_{\text{str.}}/I_{\text{str.}}$  den Messwert. Vergleichen Sie die drei sekundären gerechneten Strangspannungen mit den entsprechenden Messwerten in einer Tabelle! Wie groß sind die Abweichungen in Prozent bezogen auf die Rechenwerte? Geben Sie auch die prozentualen Abweichungen in einer Tabelle und in einer Grafik an.

**(0.75 Punkte)**

Rechenwerte			Messwerte			Abweichung		
$U_{2U\_str}$ /V	$U_{2V\_str}$ /V	$U_{2W\_str}$ /V	$U_{2U\_str}$ /V	$U_{2V\_str}$ /V	$U_{2W\_str}$ /V	$U_{2U\_str}$ /%	$U_{2V\_str}$ /%	$U_{2W\_str}$ /%

# 4. Schaltpläne



Zweiwattmeter-Methode für die Leistungsmessung

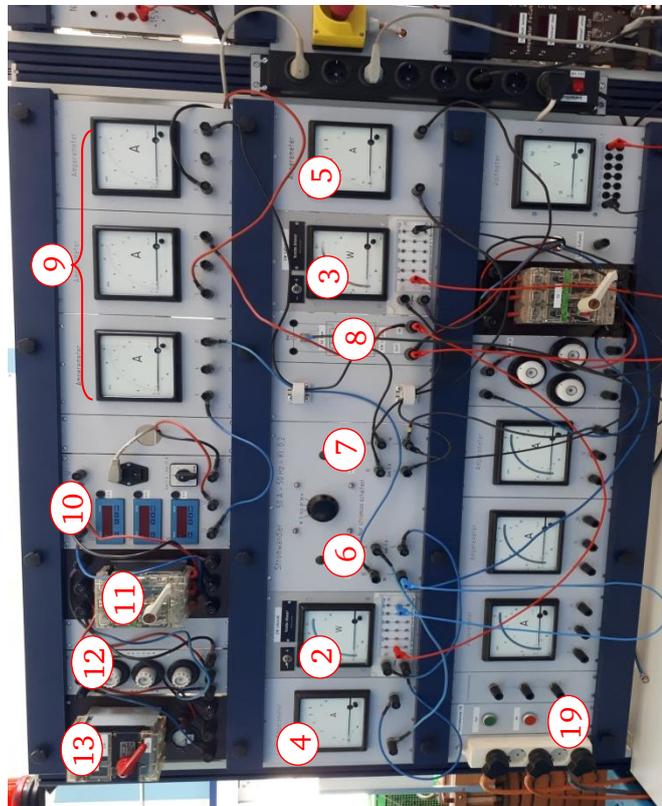
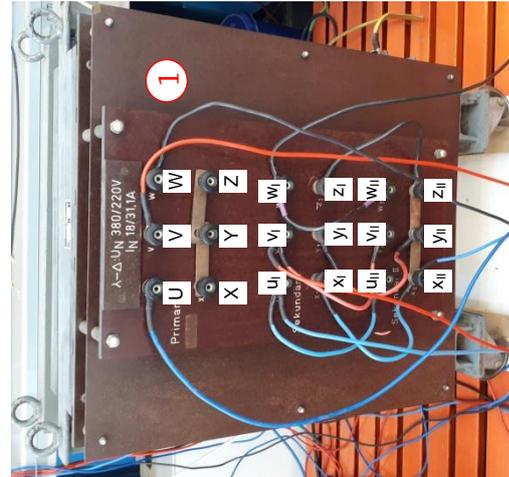
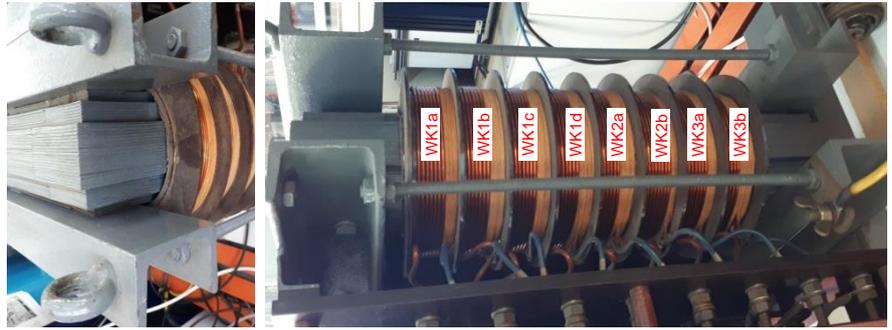


Abbildung 4-1: Prüfaufbau

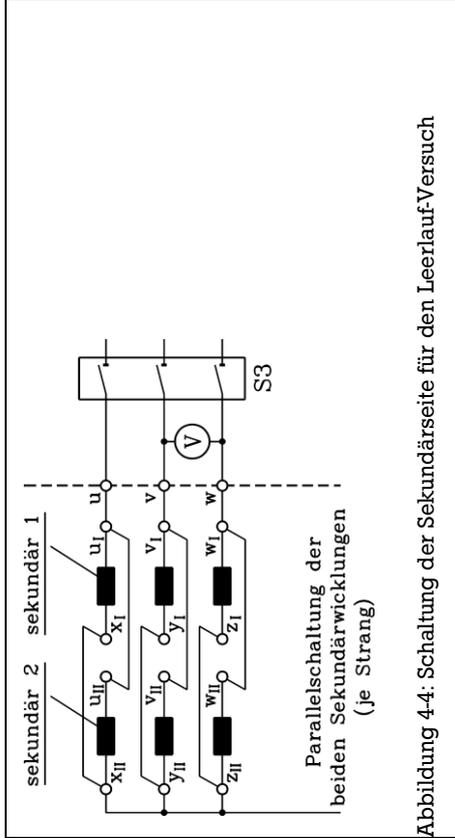


Abbildung 4-4: Schaltung der Sekundärseite für den Leerlauf-Versuch

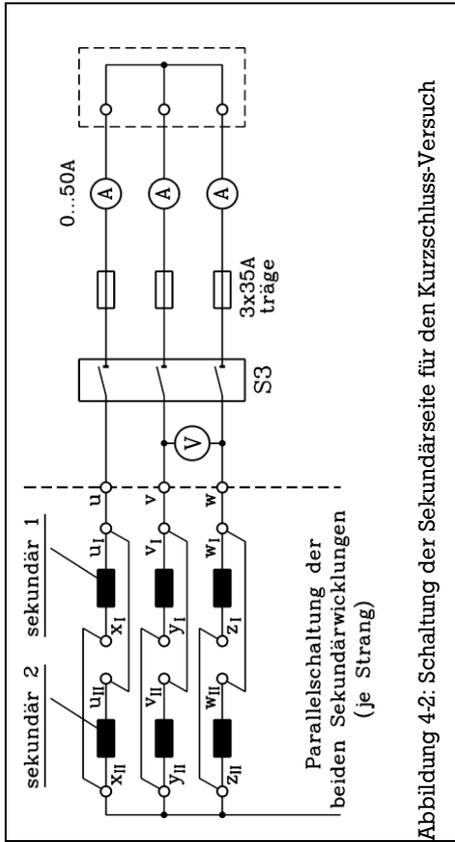


Abbildung 4-2: Schaltung der Sekundärseite für den Kurzschluss-Versuch

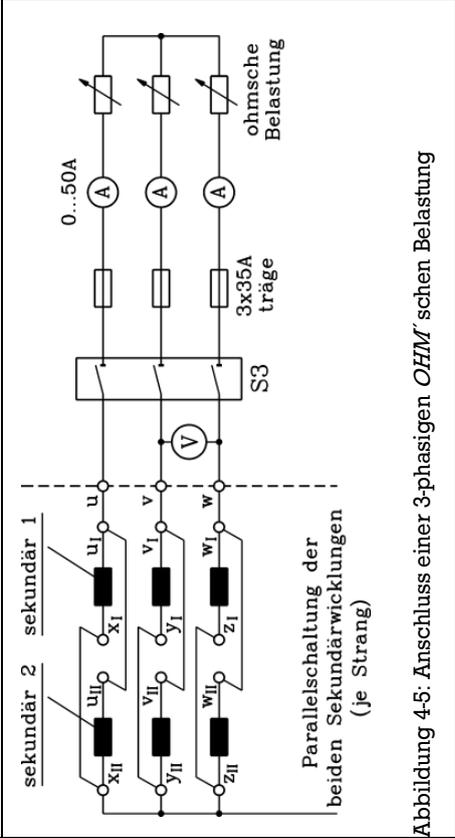


Abbildung 4-5: Anschluss einer 3-phasigen *OHM*'schen Belastung

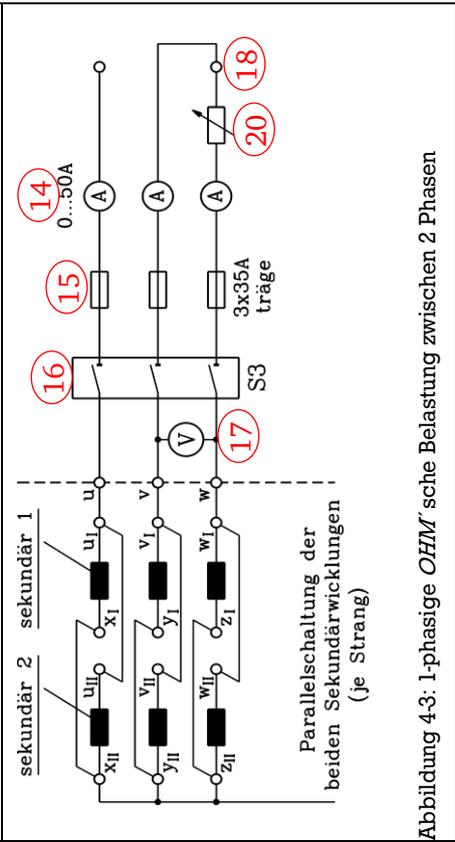


Abbildung 4-3: 1-phasige *OHM*'sche Belastung zwischen 2 Phasen

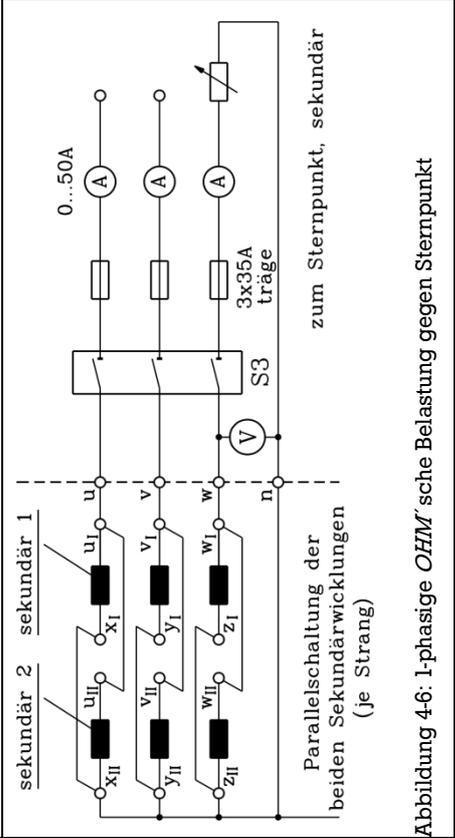
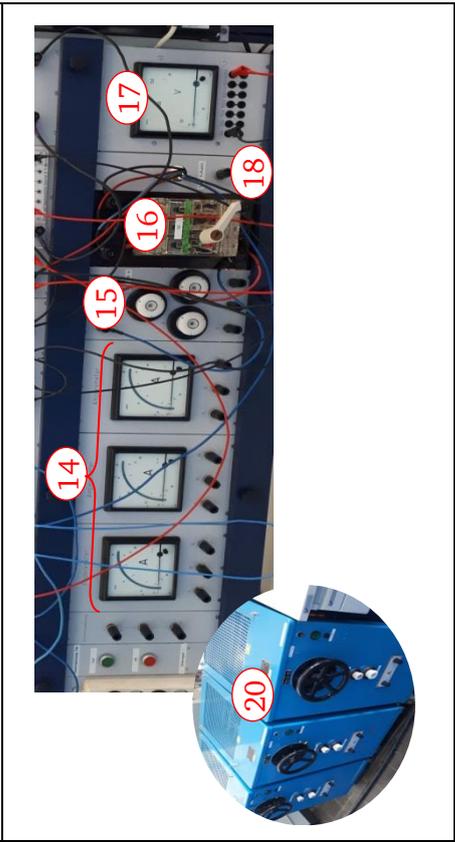


Abbildung 4-6: 1-phasige *OHM*'sche Belastung gegen Sternpunkt



---

## 5. Literatur

---

- [1] R. Fischer, *Elektrische Maschinen* vol. 13. München: Hanser, 2006.
- [2] B. Kawkabani, J.-J. Simond, "Improved Modeling of Three-Phase Transformer Analysis Based on Nonlinear B-H Curve and Taking into Account Zero-Sequence Flux", International conference on electrical machines (ICEM 2004), 5-8. September, Cracow, Poland, P1 - P10.

---

## 6. Verständnisfragen

---

1. Erklären Sie das Funktionsprinzip eines Einphasentransformators anhand des Ersatzschaltbilds und der dort verwendeten elektrischen Größen!
2. Wie groß ist die Sekundärspannung  $U_2$  des Transformators beim Kurzschlussversuch?

$$U_2 =$$

Wie groß ist die Primärspannung  $U_1$  bei Betrieb mit Nennstrom  $I_1 = I_N$  ?

$$U_1 =$$

3. Geben Sie die Formel für die Scheinleistung  $S_{\text{Dreiphasen}}$  des Dreiphasen-Transformators an! Verwenden Sie die verkettete primäre Spannung  $U_{1,LL}$  und den primären Außenleiterstrom  $I_1$ .

$$S_{\text{Dreiphasen}} =$$

Geben Sie die Scheinleistung  $S_{\text{Einphasen}}$  für den Einphasentransformator an!

$$S_{\text{Einphasen}} =$$

4. Welche Bedeutung haben die Symbole „Y“ und „Δ“ auf dem Typenschild eines Dreiphasentransformators? Skizzieren Sie die Schaltungsvariante Yd5!

5. Wie groß ist das Verhältnis von Primärstrom  $I_1$  zu Sekundärstrom  $I_2'$  bei sekundär kurzgeschlossenem Transformator? Begründung!

$$\frac{I_1}{I_2'} \approx$$

6. Zeichnen Sie das vereinfachte Ersatzschaltbild für einen sekundär kurzgeschlossenen Transformator und geben Sie eine Begründung zur gewählten Vereinfachung! Zeichnen Sie dazu das **vereinfachte** Zeigerdiagramm je Strang für Spannung und Strom!

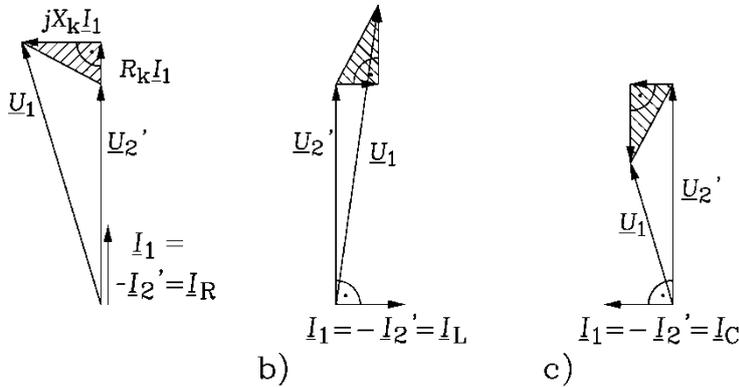
7. Wie groß ist in etwa die bezogene Kurzschlussspannung  $u_k$  für kleinere Drehstrom-Leistungstransformatoren  $S_N = \text{ca. } 1 \dots 1000 \text{ kVA}$ ? Berechnen Sie mit diesem Wert  $u_k$  den Wert  $U_k$  in Volt als Phasenwert für  $U_N = 690 \text{ V}$ !

$$u_k = \text{ca.}$$

$$U_k =$$

8. Wieso ist der Eisenkern von Transformatoren aus elektrisch isolierten Blechen aufgebaut? Wie dick sind diese Bleche typisch? Dürfen auch amagnetische Edelstahlbleche verwendet werden? Begründung!

9. Ordnen Sie die verschiedenen sekundären Lastfälle den Zeigerdiagrammen zu! 1) Induktive Belastung, 2) Ohm'sche Belastung und 3) kapazitive Belastung! Bei welchem dieser Lastfälle tritt der *Ferranti*-Effekt auf? Was versteht man darunter? Warum sollte er vermieden werden?



10. Zeichnen Sie das einphasige Ersatzschaltbild des Zweiwicklungs-Transformators! Benennen Sie alle Elemente entsprechend! Geben Sie die zugehörigen elektrischen Gleichungen für sinusförmigen eingeschwungenen Betrieb mit komplexer Schreibweise an!

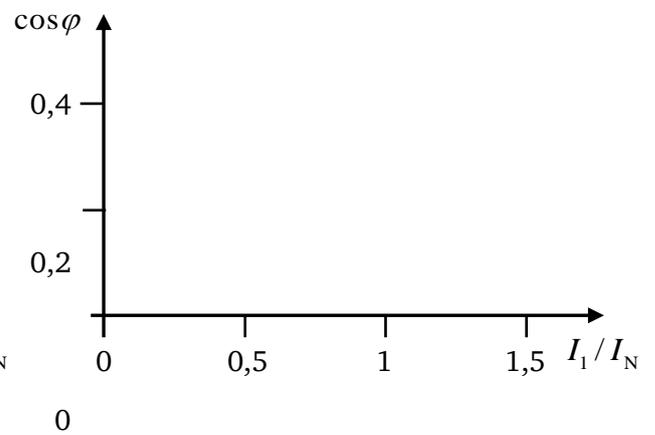
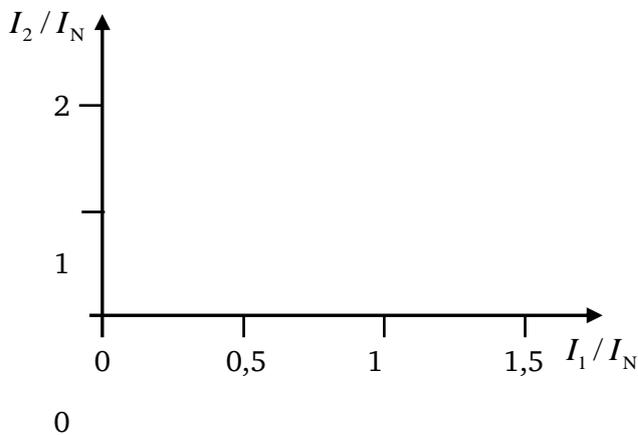
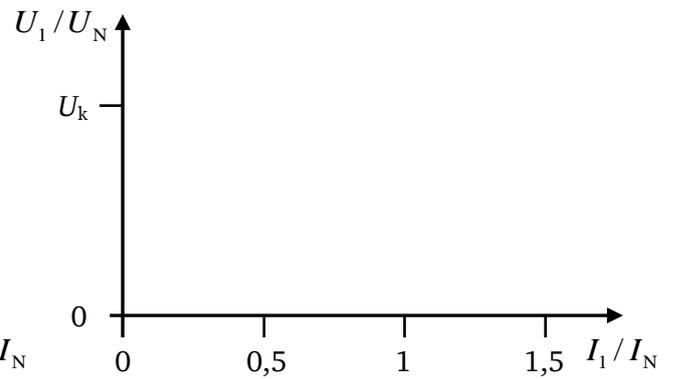
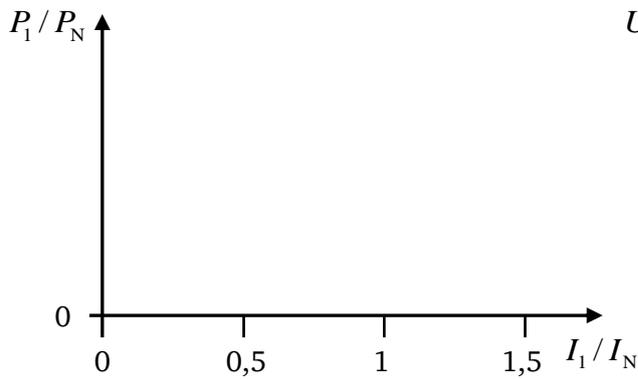
11. Zeichnen Sie eine Schaltung zur Vermessung der dreiphasigen ohmschen Belastung eines dreiphasigen Yd-Transformators. Es sollen damit die verketteten Spannungen  $U_{1,LL}$  und  $U_{2,LL}$ , die Strangströme  $I_1$  und  $I_2$ , die primärseitige Wirkleistung  $P_1$  und der primärseitige Leistungsfaktor  $\cos(\varphi_1)$  ermittelt werden.

12. Geben Sie die Formel für die Berechnung der primären Wirkleistung  $P_1$  des Dreiphasentransformators aus dem Leiterstrom  $I_1$ , der verketteten Spannung  $U_{1,LL}$  und dem Leistungsfaktor  $\cos(\varphi_1)$  bei symmetrischem Betrieb an!

$$P_1 =$$

Ist bei Leistungsfluss von 1 nach 2 die sekundäre Wirkleistung  $P_2$  größer als  $P_1$ ? Begründung!

13. Skizzieren Sie qualitativ die Kurzschlusskennlinien  $P_1(I_1)$ ,  $U_1(I_1)$ ,  $I_2(I_1)$ ,  $\cos\varphi_1(I_1)$  des Einphasentransformators! Nehmen Sie an, dass das Übersetzungsverhältnis  $\ddot{u} = 2$  und der Leistungsfaktor bei primärseitig fließendem Nennstrom  $\cos\varphi_1 = 0.4$  beträgt.



14. Geben Sie das Ersatzschaltbild des Einphasentransformators im Sinusbetrieb (komplexe Schreibweise!) an! Geben Sie dazu das Verhältnis von Ausgangsspannung  $U_2'$  zur Hauptfeldspannung  $U_h$  für den Einphasentransformator im Leerlauf an.

$$\frac{U_2'}{U_h} =$$