

2. Transformatoren

Das Funktionsprinzip von Transformatoren ist:

- Bei fester Frequenz werden die Spannungs- und Stromamplitude eines Primärsystems 1 (und ggf. die Phasenlage) über ein Übersetzungsverhältnis in einem Sekundärsystem 2 verändert.
- Die Wirkleistung bleibt (bis auf die Transformatorverluste) in beiden Systemen gleich.
- Die Leistungsübertragung vom Primärsystem auf das Sekundärsystem erfolgt beim Spartransformator (Bild 2.1a) ohne galvanische Trennung der Stromkreise des Primär- und Sekundärsystems, beim potentialtrennenden Transformator (Bild 2.1b) berührungslos (galvanisch trennend).

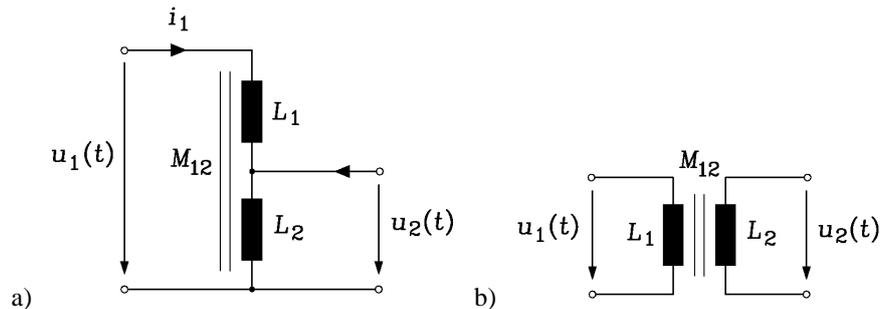


Bild 2.1: Einphasentransformator: a) als Spartransformator, b) als galvanisch trennender Transformator

Hier wird der galvanisch trennende Transformator behandelt, und zwar in der Form des Einphasen- und des Drehstrom-Transformators.

a) Einphasen-Transformatoren werden in einphasigen Wechselstromsystemen eingesetzt, z.B. in elektrischen Lokomotiven zum „Abspannen“ der Fahrdrabtspannung. Bei der deutschen Bahn wird die Oberleitungsspannung (15kV/16.7Hz) auf die jeweilig erforderliche Sekundärspannung (z. B. 1000V/16.7Hz) für das elektrische Antriebssystem abgesenkt. In Computernetzteilen wird die Einphasenspannung aus der Netzsteckdose (in *Deutschland*: 230V / 50Hz) auf die für die Elektronik deutlich niedrigere Gleichspannung (z. B. 5 ... 12V) über einen Transformator mit nachgeschaltetem Gleichrichter verringert.

b) Dreiphasen-Transformatoren (Drehstromtransformatoren) werden in Drehstromsystemen verwendet: So wird in Kraftwerken die Generatorspannung (z. B. 20kV, 50Hz) über den Blocktransformator auf die deutlich höhere Spannung der Freileitung (z. B. 400kV, 50 Hz) „hochgespannt“, da der Strom umgekehrt proportional sinkt ($20/400 = 0.05$) und damit nur geringe Querschnitte der Freileitungsseile nötig sind. In den Umspannwerken wird diese hohe Spannung auf die „Mittel“spannung *) (z. B. 20kV) für die verzweigte Leistungsversorgung in Ballungsgebieten „abgespannt“. In den Ortsnetz-Stationen wird über Verteiltransformatoren die Spannung von 20kV auf 400V für den Haushalts- und Gewerbebereich verringert.

*) Genormt sind nur Niederspannung (bis 1kV) und Hochspannung (über 1kV).

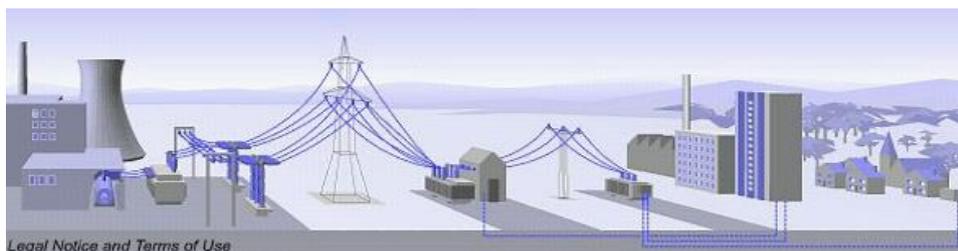


Bild 2.2: Einsatz von Drehstromtransformatoren: als Blocktransformator im Kraftwerk (links), im Umspannwerk (Mitte) und als Verteiltransformator (rechts) für sekundäre Niederspannung (Quelle: *Siemens AG*)

2.1 Funktionsprinzip des Einphasentransformators

a) Haupt- und Streufluss

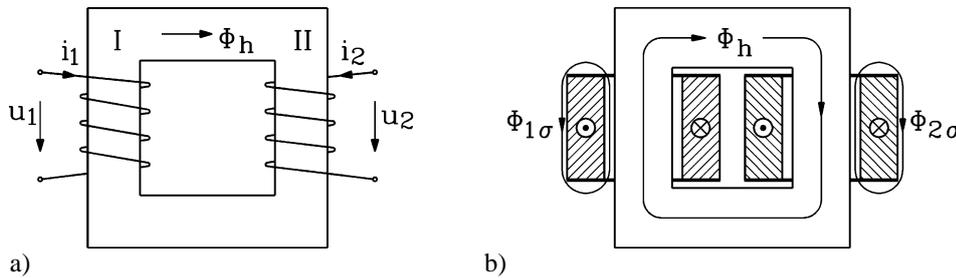


Bild 2.3: Einphasentransformator - Prinzipdarstellung: a) Bezeichnung von Spannung und Strom an Primär- und Sekundärspule, b) Haupt- und Streufluss

In Bild 2.3a ist ein geschlossener Eisenkreis (Permeabilität μ_{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 dem zeitlich beliebig veränderlichen Strom i_1 , während Spule 2 stromlos ist (offene Sekundärklemmen, $i_2 = 0$). Mit dem Durchflutungssatz wird die magnetische Feldstärke H_{Fe} im Eisen berechnet. Als geschlossene Kurve C wird der Weg einer Feldlinie des Hauptflusses Φ_h im Eisen mit der Länge s_{Fe} verwendet (Bild 2.3b). Der zeitlich veränderliche **Hauptfluss** Φ_h ist auch mit Spule 2 verkettet und induziert dort eine Spannung.

$$H_{Fe}(t) \cdot s_{Fe} = N_1 \cdot i_1(t) \quad (2.1)$$

$$\Phi_h(t) = B_{Fe}(t) \cdot A = \mu_{Fe} H_{Fe}(t) \cdot A = \mu_{Fe} \frac{N_1 i_1(t)}{s_{Fe}} \cdot A = \Lambda_h \cdot N_1 i_1(t) \quad (2.2)$$

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

$$M_{21} = \Psi_{2h} / i_1 = N_2 \cdot \Phi_h / i_1 = N_1 N_2 \cdot \mu_{Fe} \frac{A}{s_{Fe}} = N_1 N_2 \cdot \Lambda_h, \quad \Lambda_h = \mu_{Fe} \frac{A}{s_{Fe}} \quad (2.3)$$

Die **Selbstinduktivität des Hauptflusses** L_{1h} für Spule 1 beschreibt die Wirkung der Selbstinduktionsspannung in Spule 1 (2.4). Der Feldlinien des **Streuflusses** $\Phi_{1\sigma}$ von Spule 1 (Bild 2.3b) sind nur mit Spule 1, nicht aber mit Spule 2 verkettet. Die Selbstinduktionswirkung des Streuflusses in Spule 1 beschreibt die **Selbstinduktivität** $L_{1\sigma}$ (2.5).

$$L_{1h} = \Psi_{1h} / i_1 = N_1 \cdot \Phi_h / i_1 = N_1^2 \cdot \Lambda_h \quad (2.4)$$

$$L_{1\sigma} = \Psi_{1\sigma} / i_1 = N_1 \cdot \Phi_{1\sigma} / i_1 = N_1^2 \cdot \Lambda_{1\sigma} \quad (2.5)$$

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

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_{1h} = N_1^2 \cdot (\Lambda_{1\sigma} + \Lambda_h), \quad L_2 = L_{2\sigma} + L_{2h} = N_2^2 \cdot (\Lambda_{2\sigma} + \Lambda_h) \quad (2.6)$$

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

$$M_{12} = M_{21} = N_1 N_2 \Lambda_h \quad (2.7)$$

Beispiel 2.1-1:

Induktivitäten eines Einphasentransformators:

Flussquerschnittsfläche $A = 6400 \text{ mm}^2$, Feldlinienlänge $s_{Fe} = 1320 \text{ mm}$, $N_1 / N_2 = 100 / 10$ $\mu_{Fe} = 8000\mu_0$, $A_{1\sigma} = A_{2\sigma} = 0.001A_h$:

$$A_h = \mu_{Fe} A / s_{Fe} = 8000 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 6400 \cdot 10^{-6} / 1.32 = \underline{0.0487} \text{ mVs/A},$$

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

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

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 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.

$$\boxed{u_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt}} \quad \boxed{u_2 = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{21} \frac{di_1}{dt}} \quad (2.8)$$

c) Übersetzungsverhältnis \ddot{u}

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

$$\boxed{\ddot{u} = \frac{N_1}{N_2}} \quad (2.9)$$

Aus (2.6) und (2.7) folgt mit (2.9), dass bei Einführung von \ddot{u} in die Gleichungen (2.8) nur noch eine Hauptinduktivität L_h sowohl die Selbst- als auch die Gegeninduktivitätswirkung des Hauptflusses beschreibt.

$$u'_2 = \ddot{u} \cdot u_2, \quad i'_2 = i_2 / \ddot{u}, \quad R'_2 = \ddot{u}^2 \cdot R_2, \quad L'_2 = \ddot{u}^2 \cdot L_2, \quad M' = \ddot{u} \cdot M_{12} \quad (2.10)$$

$$\underline{\underline{M'}} = \frac{N_1}{N_2} \cdot N_1 N_2 A_h = N_1^2 A_h = L_{1h} = \underline{\underline{L_h}}, \quad \underline{\underline{L'_{2h}}} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \cdot N_2^2 A_h = N_1^2 A_h = L_{1h} = \underline{\underline{L_h}} \quad (2.11)$$

Damit vereinfachen sich die Spannungsgleichungen (2.8):

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

$$\boxed{u_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + L_h \frac{di'_2}{dt}}, \quad \boxed{u'_2 = R'_2 i'_2 + L'_2 \frac{di'_2}{dt} + L_h \frac{di_1}{dt}} \quad (2.12)$$

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 (2.12):

$$u_1 = R_1 i_1 + L_{1\sigma} \frac{di_1}{dt} + L_h \frac{d(i_1 + i'_2)}{dt}, \quad u'_2 = R'_2 i'_2 + L'_{2\sigma} \frac{di'_2}{dt} + L_h \frac{d(i_1 + i'_2)}{dt} \quad (2.13)$$

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

$$\boxed{i_m = i_1 + i'_2} \quad (2.14)$$

$$\Psi_{1h} = N_1 \Phi_h = L_h (i_1 + i'_2) = N_1^2 A_h (i_1 + \frac{i'_2}{\ddot{u}}) = N_1 A_h (N_1 i_1 + N_2 i'_2) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Phi_h = A_h (N_1 i_1 + N_2 i'_2) = A_h \cdot \Theta_m \quad (2.15)$$

Dies entspricht dem Ergebnis des Durchflutungssatzes (2.2), wenn Spule 1 und 2 gemeinsam den Hauptfluss erregen. Die Spannungsgleichungen (2.13) werden in dem „**T-Ersatzschaltbild**“ des Einphasentransformators abgebildet.

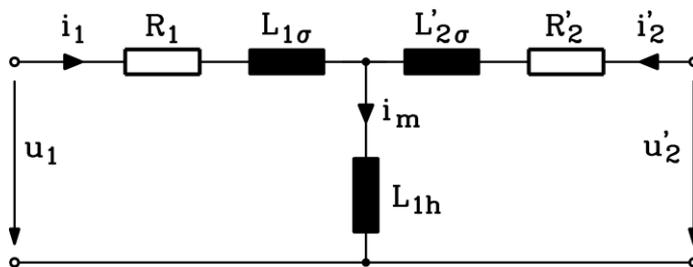


Bild 2.4: T-Ersatzschaltbild des Einphasentransformators (ohne Ummagnetisierungsverluste)

d) Leerlaufender und belasteter Transformator:

Beim leerlaufenden Transformator (**Index 0**) liegt die Primärwicklung (Windungszahl N_1) an der Spannung $u_{10}(t)$, aber die Sekundärwicklung (Windungszahl N_2) hat offene Klemmen; es ist also sekundär kein Verbraucher angeschlossen (Bild 2.5a); der Sekundärstrom ist Null $i_{20} = 0$. Da die Primärwicklung an zeitlich veränderlicher Spannung liegt, erregt der durch sie getriebene Primärstrom $i_{10}(t)$ über die Primärwicklung einen zeitlich veränderlichen Fluss, der eine Selbstinduktionsspannung in der Primärwicklung und eine Gegeninduktionsspannung $u_{20}(t)$ in der Sekundärwicklung induziert.

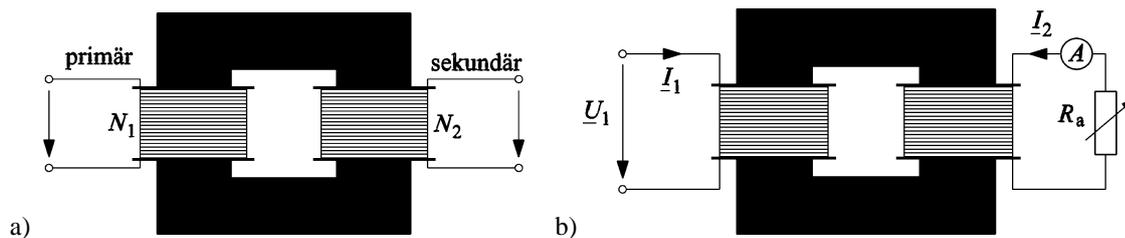


Bild 2.5: a) Leerlaufender Transformator: Sekundär ist keine Last angeschlossen. b) Beim belasteten Transformator (hier: Wechselspannung \underline{U}_1) ist sekundär als Last ein OHM'scher Widerstand R_a angeschlossen

$$u_{10} = R_1 \cdot i_{10} + (L_{1\sigma} + L_h) \cdot \frac{di_{10}}{dt}, \quad u_{20} = \frac{u'_{20}}{\ddot{u}} = \frac{1}{\ddot{u}} \cdot L_h \cdot \frac{di_{10}}{dt} \quad (2.16)$$

Das Übersetzungsverhältnis der Spannungen bei Leerlauf ist u_{10}/u_{20} und gemäß (2.16) wegen $R_1 > 0, L_{1\sigma} > 0$ nicht gleich dem Wert \ddot{u} . Werden Primärwicklungswiderstand und primärer Streufluss, da sie relativ klein sind, vernachlässigt ($R_1 \approx 0, L_{1\sigma} \approx 0$), so folgt: $u_{10}/u_{20} \approx \ddot{u}$. Die experimentelle Überprüfung von \ddot{u} über u_{10}/u_{20} liefert **etwas andere** Werte für u_{20} als u_{10}/\ddot{u} , was auf den Spannungsfall am R_1 und $L_{1\sigma}$ zurückzuführen ist. Bei Belastung (Bild 2.5b) fließen primär und sekundär durch die dort induzierte Spannung Ströme $i_1(t), i_2(t)$, die mit dem Ampere'schen Durchflutungssatz für eine geschlossene Kurve C (hier eine Hauptflussfeldlinie gemäß Bild 2.3b) die Hauptfeldstärke H_{Fe} im Eisenkern ergeben.

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{s} = H_{Fe} s_{Fe} = \Theta = N_1 i_1 + N_2 i_2 \rightarrow H_{Fe} \approx 0 : i_2 \approx -i_1 \cdot (N_1/N_2) = -i_1 \cdot \ddot{u} \quad (2.17)$$

Im Eisenkern bei $B_{Fe} \approx 1.75$ T ist gemäß Bild 5.13, Kurve (2) $H_{Fe} \approx 4$ A/cm und daher $\mu_{Fe,r} = B_{Fe}/(\mu_0 H_{Fe}) \approx 3500$ relativ hoch, so dass näherungsweise $H_{Fe} \approx 0$ gilt. Die Durchflutungen von Primär- und Sekundärwicklung sind (2.17) etwa entgegengesetzt gleich groß: $N_2 i_2 \approx -N_1 i_1$ („Durchflutungsausgleich“). Daher übersetzen die Ströme unter Last etwa mit $|i_1/i_2| \approx 1/\ddot{u}$ bzw. $i'_2 \approx -i_1$. Bei unendlich großer Hauptinduktivität $\mu_{Fe} \rightarrow \infty, L_h \rightarrow \infty$ gilt exakt: $i'_2 = -i_1$.

Beim „idealen“ Transformator übersetzen Spannung und Strom exakt mit \ddot{u} :

$$u_1/u_2 = \ddot{u}, \quad |i_1/i_2| = 1/\ddot{u}, \quad \text{denn}$$

- alle Verluste sind vernachlässigt ($R_1 = 0, R_2 = 0, \dots$)
- alle Streuflüsse sind vernachlässigt = der gesamte magnetische Fluss ist im Eisenkern.
- das Eisen hat unendlich große Permeabilität.

Daher sind die Wirkleistungen primär und sekundär identisch:

$$p_1 = u_1 i_1 = (u_2 \cdot \ddot{u}) \cdot (i_2 / \ddot{u}) = u_2 \cdot i_2 = p_2.$$

Häufig wird der reale Transformator durch den idealen Transformator beschrieben: Der ideale Transformator übersetzt den Strom umgekehrt wie die Spannung. Im selben Maße, wie er etwa die Spannung herab transformiert, setzt er den Strom hinauf, und umgekehrt. Tatsächlich sind die Bedingungen a) und b) wegen des OHM'schen Spannungsfalls von ca. 2 ... 4 % der Nennspannung und des induktiven Streuspannungsfalls von ca. 5 ... 10 % nicht wirklich erfüllt, während Bedingung c) wegen $\mu_{Fe} \approx 3500 \mu_0 \gg \mu_0$ sehr gut erfüllt ist.

Fazit:

Beim realen Transformator übersetzen Spannung und Strom nicht exakt mit \ddot{u} , aber wegen der hohen Eisenpermeabilität die Ströme nahezu exakt mit $1/\ddot{u}$. Bei der Spannungsübersetzung müssen OHM'sche und streuinduktive Spannungsfälle berücksichtigt werden (KAPP'sches Dreieck, siehe 2.2).

2.2 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.

$$u_1(t) = \sqrt{2} \cdot U_1 \cdot \cos(\omega t + \varphi_U) = \operatorname{Re} \left\{ \sqrt{2} \cdot U_1 e^{j\varphi_U} \cdot e^{j\omega t} \right\}, \quad \omega = 2\pi \cdot f \quad (2.18)$$

Es wird anstelle von $u_1(t)$ nur noch der komplexe Zeiger $\underline{U}_1 = U_1 e^{j\varphi_U}$ in den Spannungsgleichungen (2.13) verwendet. Dies gilt sinngemäß für alle hier genannten zeitlich veränderlichen Größen. Wegen (2.19) werden alle zeitlichen Ableitungen durch Multiplikation mit $j\omega$ ersetzt, wobei der Ausdruck ωL als **Reaktanz X** bezeichnet wird.

$$L \frac{di}{dt} = \operatorname{Re} \left\{ L \cdot \frac{d}{dt} \sqrt{2} \cdot I e^{j\varphi_I} \cdot e^{j\omega t} \right\} = \operatorname{Re} \left\{ \sqrt{2} \cdot j\omega L I e^{j\varphi_I} \cdot e^{j\omega t} \right\} \quad (2.19)$$

Die Spannungsgleichungen (2.13) lauten in komplexer Schreibweise:

$$\boxed{\underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + jX_{1\sigma} \underline{I}_1 + jX_h (\underline{I}_1 + \underline{I}'_2)} \quad \boxed{\underline{U}'_2 = R'_2 \underline{I}'_2 + jX'_{2\sigma} \underline{I}'_2 + jX_h (\underline{I}_1 + \underline{I}'_2)} \quad (2.20)$$

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

$$\underline{U}_h = jX_h (\underline{I}_1 + \underline{I}'_2) = jX_h \underline{I}_m = j\omega N_1 \underline{\Phi}_h / \sqrt{2} \quad (2.21)$$

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

$$P_{Fe} = U_h^2 / R_{Fe} \quad (2.22)$$

Das zugehörige Ersatzschaltbild Bild 2.6 folgt aus Bild 2.4. 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).

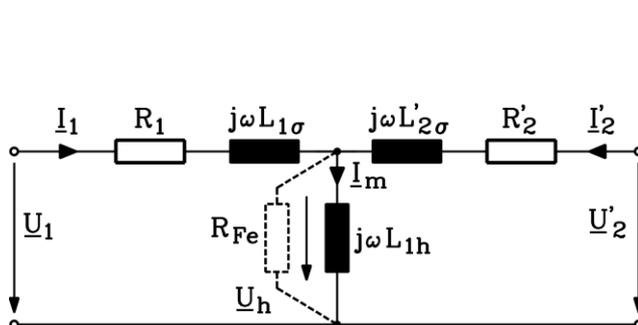


Bild 2.6: T-Ersatzschaltbild des Einphasentransformators für zeitlich sinusförmig veränderliche Spannungen, Ströme und Flüsse (mit Ummagnetisierungsverluste im F_e)

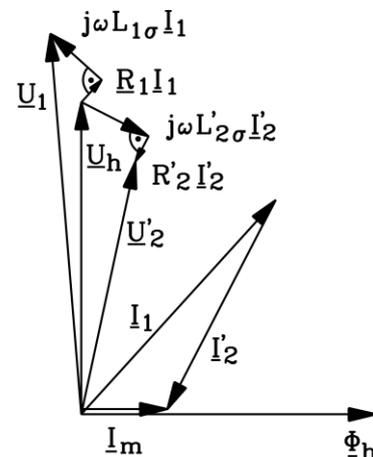


Bild 2.7: Zeigerdiagramm für Spannungen und Ströme beim Einphasentransformator, $R_{Fe} \rightarrow \infty$, überwiegend induktive Last sekundär

b) Zeigerdiagramm

Der Zeiger des Hauptflusses $\underline{\Phi}_h$ in der komplexen Ebene in Bild 2.7 ist gemäß (2.21) 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 μ_{Fe} ist die Hauptinduktivität L_h sehr groß (siehe Bsp. 2.1-1), 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: $\underline{I}_1 \approx -\underline{I}'_2$. Im Bild 2.7 ist angenommen, dass die Belastung sekundär induktiv ist (z. B. Drosselspule als Last), so dass auch primär der Strom \underline{I}_1 der Spannung \underline{U}_1 nacheilt. Die OHM'schen Spannungsfälle sind in Phase zu den jeweiligen Strömen, die Spannungsfälle zufolge der Streuinduktivitäten eilen um 90° den jeweiligen Strömen vor (Multiplikation mit j).

Fazit:

Die Klemmenspannungen primär und sekundär unterscheiden sich von der Hauptfeldspannung um die OHM'schen und streuinduktiven Spannungsfälle. Beim idealen Transformator sind U_1 , U_h und U'_2 identisch. Primär- und Sekundärstrom unterscheiden sich um den Magnetisierungsstrom, der i. A. sehr klein ist (ca. 1 ... 2 % des Nennstroms).

Beispiel 2.2-1:

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

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

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

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

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

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

c) Vereinfachtes Ersatzschaltbild - Kurzschlussspannung

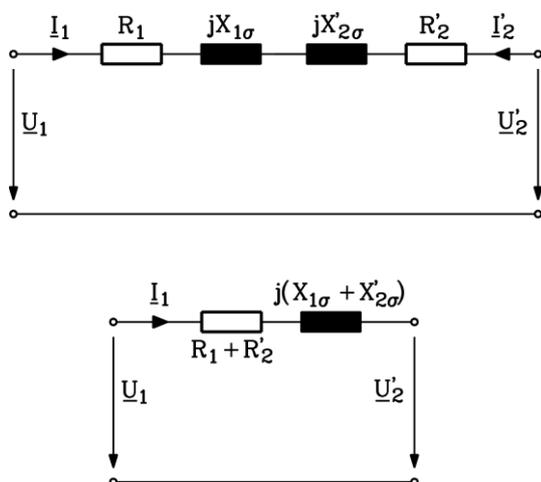


Bild 2.8: Vereinfachtes T-Ersatzschaltbild des Einphasentransformators für zeitlich sinusförmig veränderliche Spannungen, Ströme und Flüsse

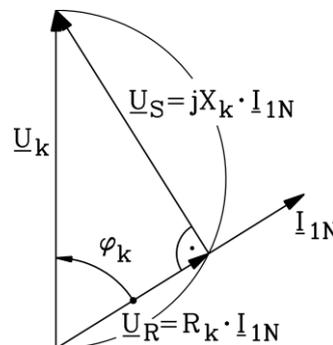


Bild 2.9: Zeigerdiagramm des sekundär kurzgeschlossenen Transformators ($u_2 = 0$: zu Bild 2.8)

Der Transformator als elektrisches Betriebsmittel ist für einen bestimmten **Nennstrom** I_N bemessen, den er 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. 2.2-1), so dass er für Untersuchungen des belasteten Transformators vernachlässigt werden kann (bei Leerlauf allerdings nicht, den dann ist der Magnetisierungsstrom als Leerlaufstrom direkt messbar!). So entsteht das vereinfachte Ersatzschaltbild Bild 2.8, das nur aus den Streureaktanzen und den OHM'schen Widerständen besteht. Aus (2.21) folgt:

$$\underline{I}_m = 0 \quad \Rightarrow \quad \underline{I}_1 = -\underline{I}'_2 = \underline{I}_2 / \dot{u} \quad \Rightarrow \quad N_1 \underline{I}_1 = -N_2 \underline{I}_2 \quad (2.23)$$

Es herrscht (nahezu) **vollkommener Durchflutungsungleich**; der Primär- und der Sekundärstrom sind gegenphasig und übersetzen sich umgekehrt proportional zu \dot{u} , so dass sich die Primär- und Sekundär-Spulendurchflutung gegenseitig aufheben. Das entspricht einem ideal magnetisierbaren Eisenkreis ($\mu_{Fe} \rightarrow \infty$, $X_h \rightarrow \infty$). Primär- und Sekundärspannung unterscheiden sich gemäß Bild 2.5 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.

$$\boxed{U_k = \sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})^2} \cdot I_{1N}} \quad (2.24)$$

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 (Bild 2.9). Das aus den OHM'schen und streuinduktiven Spannungsfällen gebildete rechtwinklige Dreieck (Bild 2.9) 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.

$$u_R = \frac{(R_1 + R'_2) \cdot I_{1N}}{U_{1N}} = \frac{R_k \cdot I_{1N}}{U_{1N}}, \quad u_S = \frac{(X_{1\sigma} + X'_{2\sigma}) \cdot I_{1N}}{U_{1N}} = \frac{X_k \cdot I_{1N}}{U_{1N}} \quad (2.25)$$

$$u_k = \sqrt{u_R^2 + u_S^2} = \frac{U_k}{U_{1N}} \quad (2.26)$$

Beispiel 2.2-2:

„Bezogene Kurzschlussspannung“ u_k :

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

$$u_k = \text{ca. } 3\% \dots 8\% \text{ bzw. } 0.03 \dots 0.08 \text{ p.u.}$$

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

$$u_k = \text{ca. } 8\% \dots 15\% \text{ bzw. } 0.08 \dots 0.15 \text{ p.u. und mehr.}$$

d) Vereinfachtes Zeigerdiagramm ($I_m = 0$):

$$\underline{U}'_2 + (R_k + jX_k) \cdot \underline{I}_1 = \underline{U}_1 \quad \underline{U}'_2 = \underline{Z}'_2 \cdot \underline{I}_1 \quad \underline{I}_1 = -\underline{I}'_2 \quad (2.27)$$

Zum vereinfachten Ersatzschaltbild Bild 2.8 gehört wegen (2.27) das Zeigerdiagramm Bild 2.10, das für die drei Belastungsfälle $\underline{Z}'_2 = R'_a$, $\underline{Z}'_2 = j\omega L'_a = jX'_L$, $\underline{Z}'_2 = 1/(j\omega C'_a) = -jX'_C$

gezeichnet ist. 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° 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 (bei Leerlauf ist wegen $I_m = 0$: $I_1 = 0$, $U_2' = U_1$). Das ist i. A. unerwünscht, da die Betriebsmittel sekundär mit zu hoher Spannung belastet werden.

Bild 2.10 zeigt anschaulich:

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

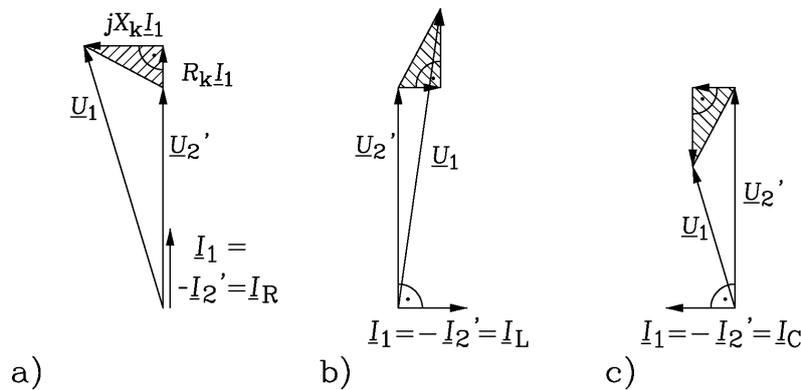


Bild 2.10: Vereinfachtes Zeigerdiagramm für Spannungen und Ströme beim Einphasentransformator mit sekundär a) OHM'scher, b) induktiver, c) kapazitiver Belastung

Beispiel 2.2-3:

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

$$U_{1N} = 350 \text{ V}, I_{2N} = 800 \text{ A}, f = 60 \text{ Hz}, R_1 = R_2' \approx 0 \text{ m}\Omega, L_{1\sigma} = L_{2\sigma}' = 0.5 \text{ mH}, N_1/N_2 = 100/10:$$

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

$$|I_1| = |-I_2'| = I_{2N} / \ddot{u} = 800/10 = 80 \text{ A}, U_2' = U_1 + X_k \cdot I_1 = 350 + 0.376 \cdot 80 = \underline{380 \text{ V}}$$

$$U_2 = U_2' / \ddot{u} = 380/10 = \underline{38 \text{ V}}$$

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

e) Zeitlicher Stromverlauf bei Leerlauf und Belastung

Der Zeitverlauf des Leerlaufstroms (ohne Hystereseeinfluss der $B_{Fe}(H_{Fe})$ -Kennlinie gemäß Bild 5.13) ist wegen der nichtlinearen $B_{Fe}(H_{Fe})$ -Kennlinie trotz sinusförmig speisender Primärspannung nicht sinusförmig (Bild 2.11), sondern weist hohe Spitzenwerte bei niedrigem Effektivwert auf. Die eingepreßte sinusförmige Netzspannung u_1 erzwingt wegen des Induktionsgesetzes bei vernachlässigtem Widerstand R_1 einen zeitlich cosinus-förmigen Flussverlauf $\Phi_1 = \Phi_{1\sigma} + \Phi_h$ und damit auch einen entsprechenden Zeitverlauf der Flussdichte

$$B_{Fe} = \Phi_h / A \text{ im Eisen: } R_1 \cong 0 \Rightarrow u_1 = N_1 \cdot \frac{d\Phi_1}{dt} = \hat{U}_1 \cos(\omega t) \Rightarrow B_{Fe} = \frac{\hat{U}_1}{AN_1} \cdot \frac{\sin(\omega t)}{\omega}.$$

Damit ergibt sich aber wegen der nichtlinearen (gekrümmten) $B_{Fe}(H_{Fe})$ -Kennlinie ein nichtsinusförmiger Verlauf $H_{Fe}(t)$ gemäß Bild 2.11. Wegen des Ampere'schen Durchflutungssatzes $N_1 i_{10}(t) = H_{Fe}(t) \cdot s_{Fe} = H_{Fe}(B_{Fe}(t)) \cdot s_{Fe}$ ist damit auch der Leerlaufstrom $i_{10}(t)$ zeitlich nicht sinusförmig.

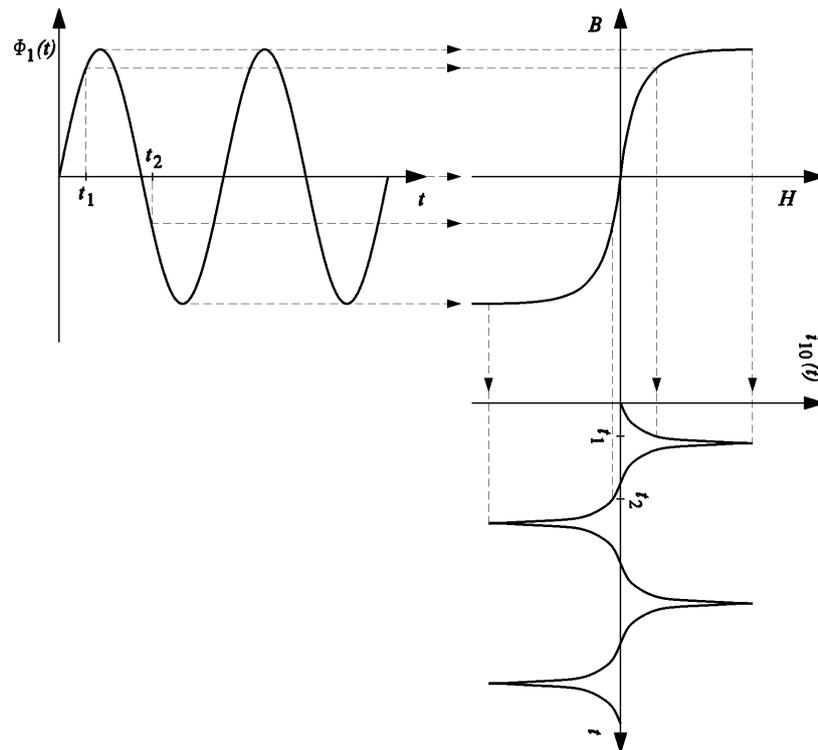


Bild 2.11: Herleitung des nichtsinusförmigen Verlaufs des Leerlaufstroms bei sinusförmigem Flussverlauf

Der Zeitverlauf des primären und sekundären Stroms bei Belastung des Transformators ist weitgehend sinusförmig, denn nun herrscht Durchflutungsausgleich durch den Sekundärstrom. Nicht mehr die nichtlineare Eisenkennlinie der Hauptinduktivität, sondern die linearen Streuinduktivitäten und die sinusförmige Gegenspannung \underline{U}_2 begrenzen den daher sinusförmigen Strom. Der kleine nichtlineare Magnetisierungsstrom als Anteil des Gesamtstroms ist kaum merkbar.

f) Der sekundär kurzgeschlossene Transformator ($U_2 = 0$):

Wenn Transformator im Betrieb bei $U_1 = U_{1N}$ sekundär kurz geschlossen, dann fließt wegen der primären Nennspannung ein zu hoher Strom I_{2k} als Kurzschlussstrom sekundär und als Kurzschlussstrom $I_{1k} = I_{2k}/\dot{u}$ primär, wobei $I_{1k} = I_{1N}/u_k$ sehr groß ist. Diese Betriebsart ist daher ein Störfall und nicht dauernd zulässig. Nur Selbstinduktion der kleinen Streuflüsse und der Spannungsfall an den kleinen Wicklungswiderständen begrenzen den Strom, daher ist dieser primär und sekundär zu groß.

Beispiel 2.2-4:

Dauerkurzschlussstrom des Transformators :

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

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

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

2.3 Bauformen von Einphasen-Transformatoren

Die Eisenkerne der Transformatoren bestehen aus den vertikalen Schenkeln und den horizontalen Jochen. Sie sind aus elektrisch isolierten Stahlblechen (Eisenkohlenstoff Fe-C,

ca. 0.35 mm dick) geschichtet („lamellierte“ Kerne), um Wirbelströme zu unterbrechen. Es werden kornorientierte Bleche verwendet. Die Kristallkörner sind durch den Walzprozess der Herstellung parallel gerichtet. Ihre Vorzugsrichtung (hohes μ_{Fe} in Vorzugsrichtung der Körner) ist parallel zur Flussrichtung (siehe Feldlinie in Bild 2.3, 2.12) orientiert. Quer zur Vorzugsrichtung ist die Permeabilität sehr klein, aber in diese Richtung tritt kein Fluss auf (magnetisch anisotropes Blech Bild 5.13, Kurve (2)). 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.

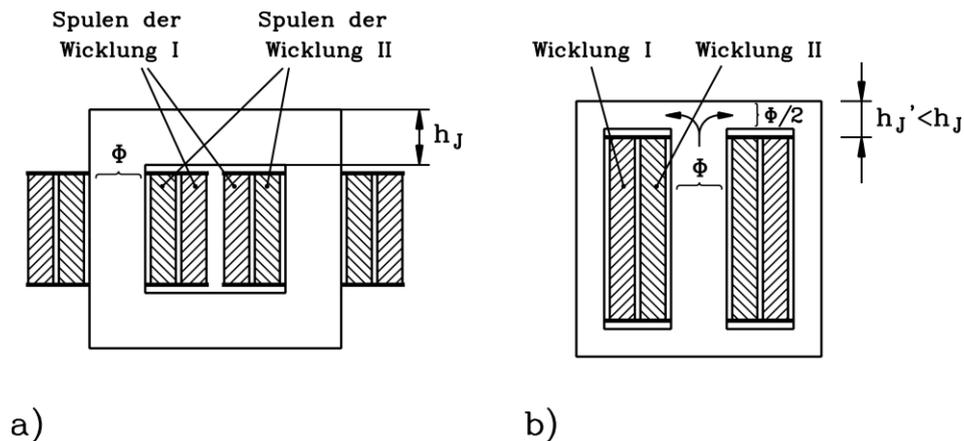


Bild 2.12: Bauformen von Einphasentransformatoren: a) Kerntyp, b) Manteltyp

- **Kerntransformatoren** (Bild 2.12a) 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 (Bild 2.12b). 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).

2.4 Drehstromtransformatoren

a) Bauformen von Drehstrom-Transformatoren

Werden drei Einphasentransformatoren mit einem Drehspannungssystem gespeist, so ist der Hauptfluss in den drei Transformatoren jeweils um 120° phasenverschoben (Bild 2.13b). Durch die mit *) gekennzeichnete Kontrollfläche in Bild 2.13b treten alle drei Hauptflüsse Φ_U , Φ_V , Φ_W hindurch und ergänzen sich stets zu Null ($\Phi_U + \Phi_V + \Phi_W = 0$). Damit kann dieser Bereich des Eisens eingespart werden; es entsteht der „Tempeltyp“-Drehstromtransformator (M. v. DOLIVO-DOBROWOLSKI, 1890, Berlin, Bild 2.13a), der aber schwierig zu bauen ist. Die Magnetkreise von U, V, W sind voneinander magnetisch unabhängig, so dass die für den Einphasen-Transformator 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° vorhanden sind. Die technisch realisierte Bauform entsteht aus dem Tempeltyp durch Klappen aller drei Schenkel U, V, W in eine Ebene (**Drei-Schenkel-Transformator**, Bild 2.14a). 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 Außenjoch (Mantelbauform) kann wieder die Jochhöhe verringert werden (**Fünf-Schenkel-Transformator**, Bild 2.14b). Der mittlere Schenkel ist nun kürzer,

aber diese kleine magnetische Unsymmetrie zwischen dem Mittel- und den Außenschenkeln ist i. A. vernachlässigbar klein.

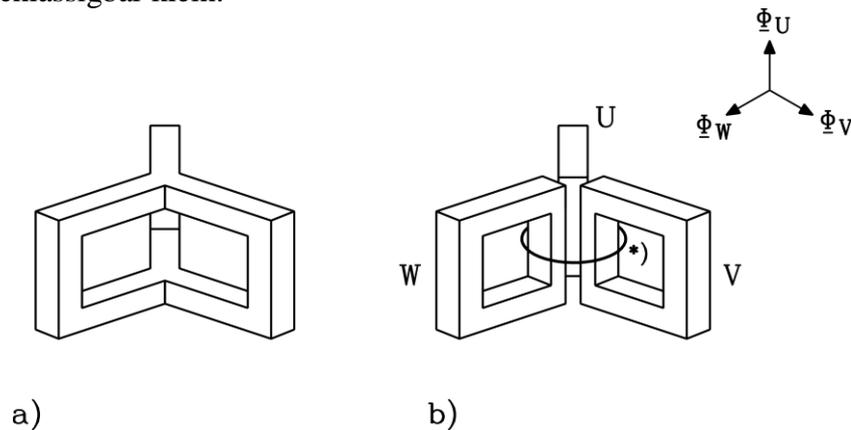


Bild 2.13: Entstehung des a) Drehstromtransformators (Tempeltyp) aus b) drei Einphasentransformatoren

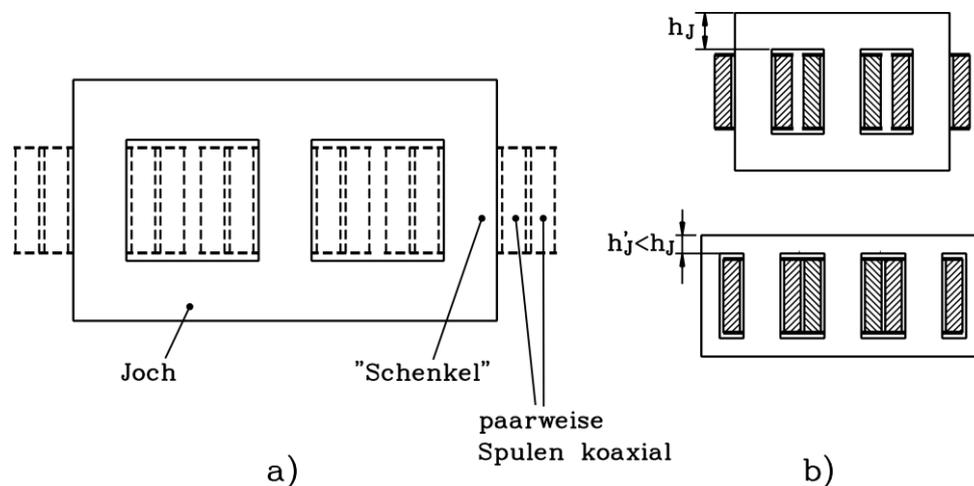


Bild 2.14: Bauformen von Drehstrom-Transformatoren: a) Dreischenkler-Typ (Kerntyp), b) Fünfschenkler-Typ (Manteltyp), unten, im Vergleich zum Dreischenkler-Typ, oben

Einphasen- und Drehstromtransformatoren werden bei kleineren Leistungen im Hunderte-kVA-Bereich bis ca. 30 kV in brandgefährdeter Umgebung **luftgekühlt** und **gießharz-** oder **luftisoliert** (Bild 2.15a) ausgeführt, ansonsten – vor allem für größere Leistungen – **ölggekühlt** und **ölisoliert** (Bild 2.15b). 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. Öltransformatoren in Kesseln mit Ölfüllung verwenden also den Ölumlau auch zur Kühlung, wobei unterschieden wird:

- (a) natürlicher Konvektion (Oil natural) ON
- (b) Zwangsumlauf (Pumpen) (Oil forced) OF

Das heiße Öl wird in Radiatoren durch Luft zurückgekühlt. Für diese äußere Luftbewegung unterscheidet man:

- (c) natürliche Konvektion (air natural) AN
- (d) forcierte Luftströmung durch Ventilatoren (air forced) AF

Daher sind die Kombinationen ONAN, ONAF, OFAN, OFAF möglich und üblich! Bei Luftspulen- u. Gießharztransformatoren herrscht nur Luftkühlung vor, zumeist mit natürlicher Konvektion: ON, also relativ schwacher Kühlwirkung. Deshalb werden diese Transformatoren nur für kleine Leistungen (und damit auch kleine Verlustleistungen) gebaut.

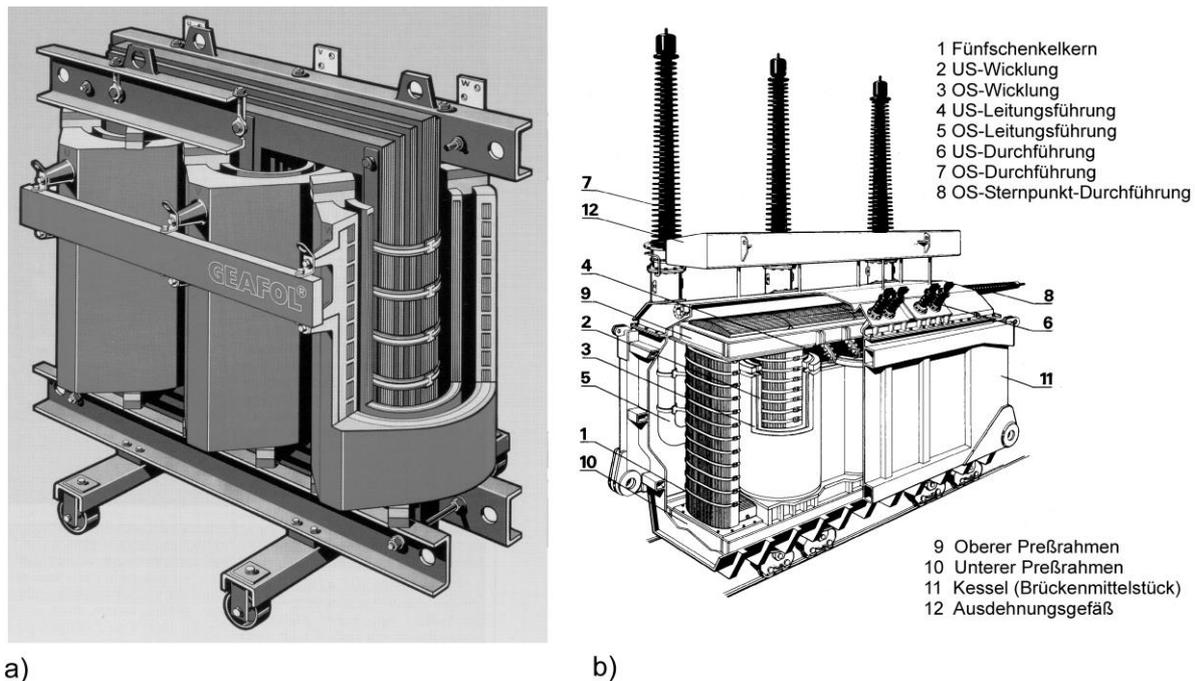


Bild 2.15: Ausführungsformen von Drehstrom-Transformatoren: a) Gießharz-Transformator: Typische Nenn-daten: 20 kV/400 V, 400 kVA (Siemens AG), b) Öl-Transformator: Typisch Nenndaten: 380 kV/20 kV, 1300MVA (Bohn, T.: *El. Energietechnik, TÜV Rheinland*)

Für die **Leistungsgrenzen von Drehstrom-Transformatoren** gilt: Die Baugröße wird von der Nennleistung, aber auch der Nennspannung (Hochspannung benötigt große Spannungsabstände wegen der Überschlagsgefahr!) bestimmt. Der Transport vom Hersteller zum Aufstellungsort i. A. mit der Bahn erzwingt die Einhaltung des Bahnprofils (z. B. Tunnel!), daher werden große Transformatoren als **Fünfschenkel-Transformator** gebaut, weil diese zwar länger, aber niedriger als leistungsgleiche Dreischenkeltypen sind. Bei 400 kV Oberspannung ist die weltgrößte Einheitsleistung (Nennleistung je Transformator) ca. 1500 MVA bei 50 Hz, die transportiert werden kann. Bei 60 Hz ist wegen des um 5/6 kleineren Flusses für gleiche Spannung der Transformator wegen des entsprechend geringeren Kernquerschnitts um ca. 5/6 kleiner. Bei größeren Leistungen werden „Drehstrombänke“ verwendet: Bei z. B. 1800 MVA bilden drei Einphasentransformatoren je 600 MVA eine „**Drehstrom-Bank**“, indem sie zum Drehstromsystem verschaltet werden. Für die Reservehaltung benötigt man nur einen Einphasentransformator 600 MVA anstatt eines kompletten Drehstromtransformators 1.8GVA, da (fast) nie zwei oder drei Einphasentransformatoren gleichzeitig ausfallen. Alternativ schaltet man auch zwei Drehstromtransformatoren 900 MVA parallel, und muss einen Drehstromtransformator 900 MVA in Reserve halten.

b) Wirkungsgrad von Transformatoren

Die Ummagnetisierungsverluste P_{Fe} im Eisen infolge des Hauptflusses bestehen aus Wirbelstrom- und Hystereseverluste 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 ($I_1 = I_m = \text{ca. } 0.01 I_{1N}$) vernachlässigbar:

$$P_{Cu10} = 3R_1 I_{10}^2 = \text{ca. } 3R_1 \cdot (I_{1N} / 100)^2 = 0.0001 \cdot 3R_1 I_{1N}^2 \approx 0.$$

Bei Belastung kommen Stromwärmeverluste als Lastverluste hinzu, die quadratisch vom Strom abhängen. Der **Wirkungsgrad** η ist das Verhältnis von abgegebener zu zugeführter Leistung und ist bei Großtransformatoren größer als 99.5%.

$$\text{Leerverluste: } P_0 = P_{Fe}, \text{ Lastverluste: } P_{Cu1} + P_{Cu2} = 3(R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2) = P_{Cu,1+2} \quad (2.28)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{in} - P_d}{P_{in}} = \frac{P_{in} - P_0 - P_{Cu,1+2}}{P_{in}} \quad (2.29)$$

2.5 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 2.5-1:

In Bild 2.16 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 Sekundär-Spannung eine verkettete Spannung. Die zugehörige fiktive Strangspannung (Phasenspannung) ist um 30° voreilend oder 330° nacheilend. Diese Phasenverschiebung wird als nacheilend in 11 Schritten von 30° mit der „**Stundenziffer**“ 11 (vergleiche mit dem Zifferblatt einer Uhr!, Bild 2.18a) angegeben: Yd11. Die Übersetzung der Spannung von der Primär- auf die Sekundärseite ist (Bild 2.16).

$$\frac{U_{1verk}}{U_{2verk}} = \frac{\sqrt{3}U_1}{U_2} = \sqrt{3} \cdot \frac{N_1}{N_2} \quad (2.30)$$

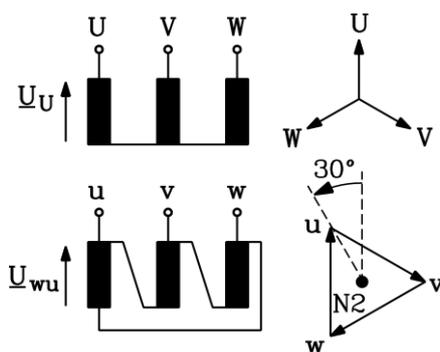


Bild 2.16: Drehstromtransformator: Schaltung: Stern (Oberspannung), Dreieck (Unterspannung) = Schaltgruppe Yd, „Stundenziffer“ 11

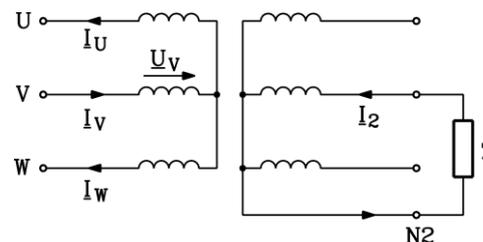


Bild 2.17: Bei einphasiger Belastung der Yyn6-Schaltung sekundär werden die Wicklungen der Schenkel U, W nur primär stromdurchflossen, was zu hoher Eisensättigung führt.

Die Spannungsübersetzung U_{1verk}/U_{2verk} 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 (2.30). 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) Unsymmetrische Belastung des Drehstromtransformators

In Bild 2.17 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. Wird diese Schaltungsvariante für eine unsymmetrische, nämlich einphasige Belastung (Impedanz Z) sekundär verwendet (z. B. Haushaltsanschluss: sekundär verkettet 400 V, Strangsspannung 230 V), so fließt der Strom I_2 sekundär nur im Strang „v“ und über den Sternpunktanschluss. 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 (2.23) für Schenkel U und W. Da I_U und I_W – abhängig von der Belastung Z – deutlich größer sein können als der typische Magnetisierungsstrom $I_m \approx 0.01 I_N$, wird der magnetische Fluss in diesen Schenkeln sehr hoch. Damit sättigt aber das Eisen gemäß der $B(H)$ -Kennlinie (siehe Anhang Kap. 5) sehr stark, wodurch $\mu_{Fe} = B_{Fe} / H_{Fe}$ sehr klein wird. Folglich ist auch X_h sehr klein.

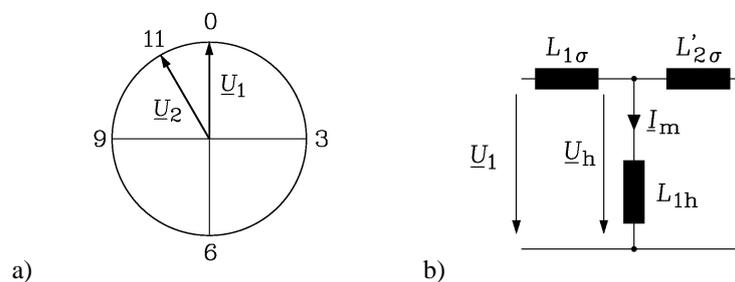


Bild 2.18: a) Stundenziffer: Beispiel: Phasenverschiebung zwischen \underline{U}_1 und \underline{U}_2 : 330° : Wenn \underline{U}_1 bei „0 Uhr“ steht, dann steht \underline{U}_2 bei „11 Uhr“. b) Abschätzung der Spannung sekundär bei einphasiger Belastung Yy: (Annahme: $R_1 = R'_2 = 0$)

Bei sehr kleiner Hauptfeldreaktanz X_h ist die zugehörige Hauptfeldspannung U_h auch klein und kommt in die Größenordnung des Spannungsfalls an der Streureaktanz.

Abschätzung mit Bild 2.18b ($R_1 \approx R'_2 = 0$):
$$\frac{U_h}{U_1} = \frac{L_h}{L_h + L_{1\sigma}}$$

Im symmetrischen Fall und damit schwach gesättigtem Eisenkern ist $L_h \gg L_{1\sigma}$ und damit $U_h \approx U_1$, wie im Abschnitt 2.2 besprochen. Bei einphasiger Belastung Yy sättigt das Eisen so hoch, dass im Extremfall z. B. gilt: $L_h \approx 2L_{1\sigma}$, und damit $U_h \approx 0.66 \cdot U_1$. Es ergibt sich gegenüber $U_h \approx U_1$ ein Spannungseinbruch von 33%. Statt der erwarteten 230 V liefert der Transformator nur ca. $U_2 \approx 0.66 \cdot 230 = 153\text{V}$. Das ist technisch unbrauchbar.

Fazit:

Yy-Schaltungen sind für einphasige Belastungen nicht geeignet.

Abhilfe gegen den Spannungseinbruch bei einphasiger Belastung:

Bild 2.19a 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 Sekundärstrangsspannung ist $150^\circ (= 5 \times 30^\circ)$ (Schaltgruppe Yzn5). Bei einphasiger Belastung sekundär zwischen N_2 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 Bild 2.8 gültig; es erfolgt kein Spannungszusammen-

bruch sekundär. Die Spulen auf Schenkel V sind stets stromlos. Eine andere Schaltung, die den sekundären Spannungseinbruch vermeidet, ist Dyn5 (Bild 2.19b).

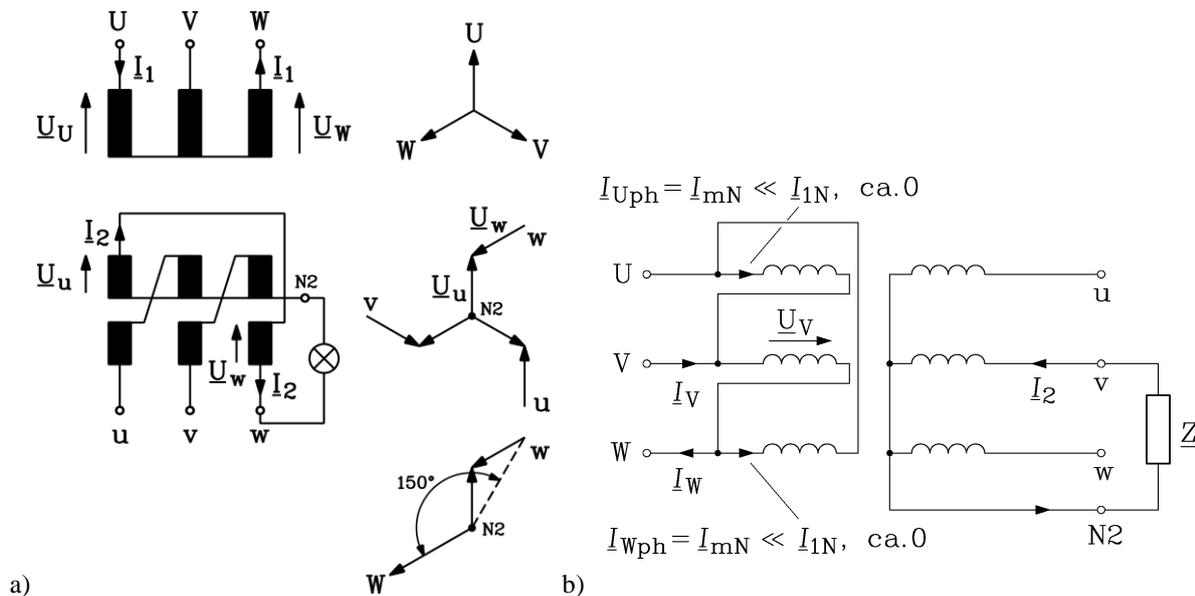


Bild 2.19: a) Bei einphasiger Belastung der Yzn5-Schaltung erfolgt auf den Schenkeln U, W Durchflutungsausgleich, so dass kein Spannungszusammenbruch sekundär auftritt. b) Bei einphasiger Belastung der Dyn5-Schaltung erfolgt auf dem Schenkel V Durchflutungsausgleich, so dass kein Spannungszusammenbruch sekundär auftritt.

2.6 Leistungsschildangaben bei Drehstromtransformatoren

Für die Nenn-Scheinleistung gilt unabhängig von der Schaltgruppe (2.31), wobei die auf dem Leistungsschild angegebenen Nennspannungen **stets die verketteten Spannungen** und die Nennströme **stets die Außenleiterströme** darstellen.

$$S_N = \sqrt{3} \cdot U_{1N} \cdot I_{1N} = \sqrt{3} \cdot U_{2N} \cdot I_{2N} \quad (2.31)$$

Beispiel 2.6-1:

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

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

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

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 = N₂) 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.



Bild 2.20: Blocktransformator im Braunkohle-Kraftwerk "Schwarze Pumpe", Deutschland: 27 kV / 380 kV, 800 MVA, Kühlung OFAF. Die vom Kraftwerksblock (Dampfkessel, Turbine und Synchron-Turbo-Generator) erzeugte elektrische Leistung 800 MVA mit der Spannung 27 kV wird über den Transformator auf 400 kV hochgespannt. Durch den umgekehrt proportional heruntertransformierten kleinen Strom entstehen nur geringe Stromwärmeverluste auf der Freileitung (Siemens AG).



a)



b)

Bild 2.21: Hochspannungsprüfung von Transformatoren im Hochspannungs-Prüffeld: a) Einphasen-Transformator (Kühlung Oil forced, air forced OFAF) einer Drehstrombank, b) Großtransformator mit drei dreiphasigen Wicklungssystemen (links vorne: Marx-Stoßspannungserzeugung für Blitzstoß-Prüfung) (Siemens AG (vormals: ELIN), Weiz, Österreich)