

Energietechnik

Inhalt des Vorlesungsteils

I Elektrische Energiewandler

Schlüsseltechnologie: Elektrische Energietechnik

Repetitorium: Grundlagen der Elektrotechnik

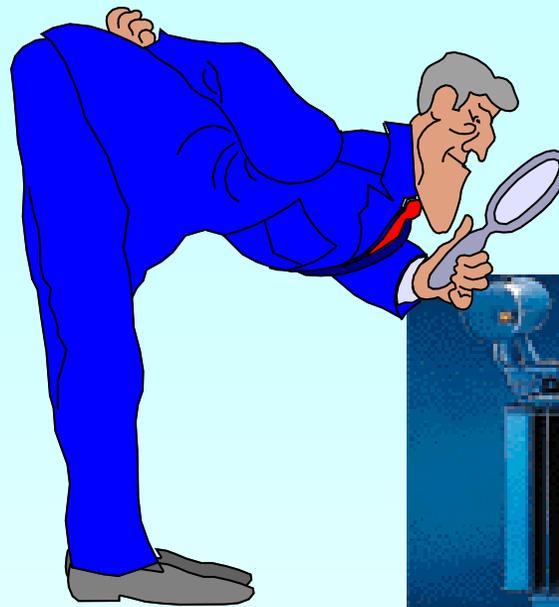
1. Elektrische Energiewandlung - Einführung

2. Transformatoren

3. Gleichstrommaschinen

4. Drehfeldmaschinen





2. Transformatoren

Quelle: BWK



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Prof. A. Binder : Energietechnik / El. Energiewandler
2/2

Institut für Elektrische
Energiewandlung • FB 18



2. Transformatoren

2.1 Funktionsprinzip des Einphasentransformators

2.2 Der Einphasentransformator bei Sinusspannungen

2.3 Bauformen von Einphasen-Transformatoren

2.4 Drehstromtransformatoren

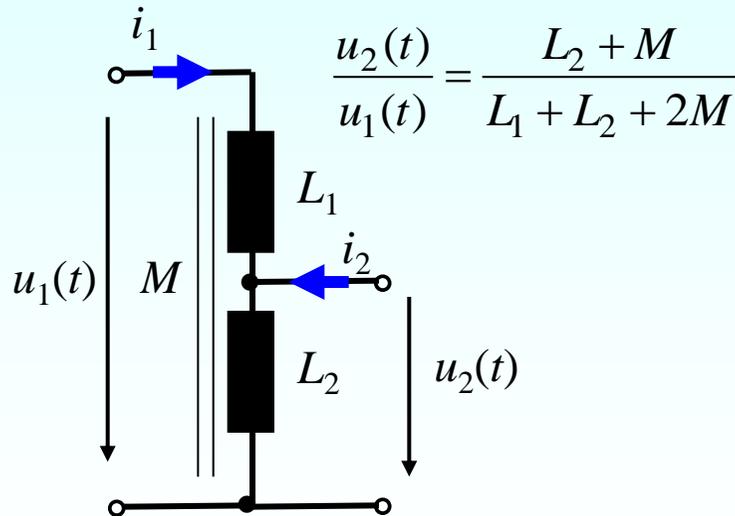
2.5 Schaltungsvarianten von Drehstromtransformatoren

(2.6 Leistungsschildangaben bei Drehstromtransformatoren)

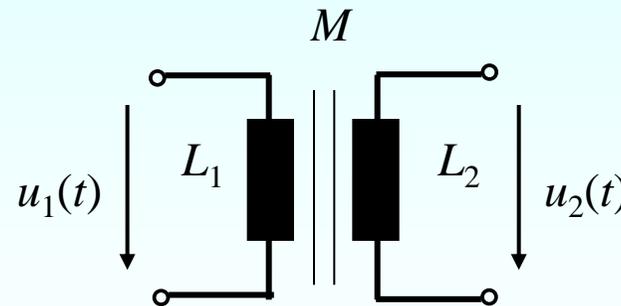
Transformator-Prinzip

- Bei fester Frequenz werden die Spannungs- und Stromamplitude (und ggf. die Phasenlage) über ein Übersetzungsverhältnis verändert.
- Die Leistung bleibt (nahezu) gleich.
- Leistungsübertragung i. A. berührungslos (Ausnahme: Spartransformator).

Beispiel: Leerlauf: $i_2 = 0$: $M_{12} = M_{21} = M$



$$\frac{u_2(t)}{u_1(t)} = \frac{L_2 + M}{L_1 + L_2 + 2M}$$



Galvanisch trennender
Transformator einphasig

Spartransformator einphasig

Einsatzgebiete von Transformatoren

a) Einphasen-Transformatoren: für einphasige Spannungssysteme

Beispiele:

- a) Elektrische Bahn: in der Lok: „Abspannen“ der Fahrdrabtspannung 15 kV/16.7 Hz auf die Fahrmotorspannung z. B. 1000 V/16.7 Hz.
- b) Computernetzteil: 230 V / 50 Hz (Steckdose) auf Elektronikspannung (mit Gleichrichter): ca. 5 V ... 12 V

b) Dreiphasen-Transformatoren: Drehstromsysteme:

Beispiel: Kraftwerk: 50 Hz: Generator: 20 kV „hochspannen“ auf 400 kV (Freileitung), „Abspannen“ 400 kV auf 20 kV (Umspannwerk), 20 kV / 400 V - Verteiltransformator



Drehstrom-Transformatoren



Quelle: Siemens AG

800 MVA-Blocktransformator in einem thermischen (Braunkohle-)Kraftwerk:
27 kV/380 kV, 50 Hz

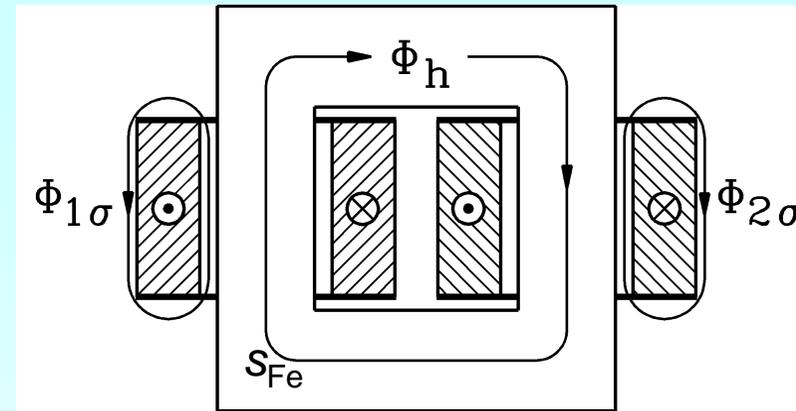
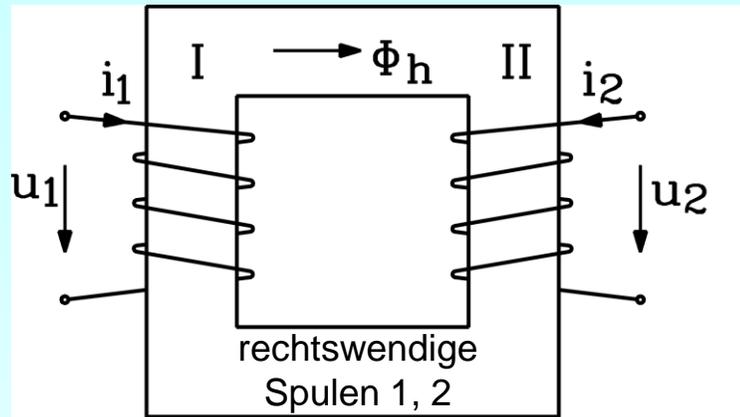


Quelle: BWK

250 kVA-Verteiltransformatoren für die Vor-Ort-Trafo-Stationen:
20 kV/400 V, 50 Hz



Einphasentransformator: Haupt- und Streufluss



Spule 1 stromdurchflossen mit i_1 , **Spule 2** stromlos: Durchflutungssatz
für Hauptfluss $\Phi_h = B_{Fe} \cdot A$ mit der Feldstärke im Eisen $H_{Fe} = B_{Fe} / \mu_{Fe}$

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{s} = H_{Fe} s_{Fe} = \Theta = N_1 i_1 + N_2 i_2 = N_1 i_1 + 0 = N_1 i_1 \quad H_{Fe} s_{Fe} = N_1 i_1 \rightarrow H_{Fe} = N_1 i_1 / s_{Fe}$$

Gegeninduktivität von Spule 1 zu Spule 2:

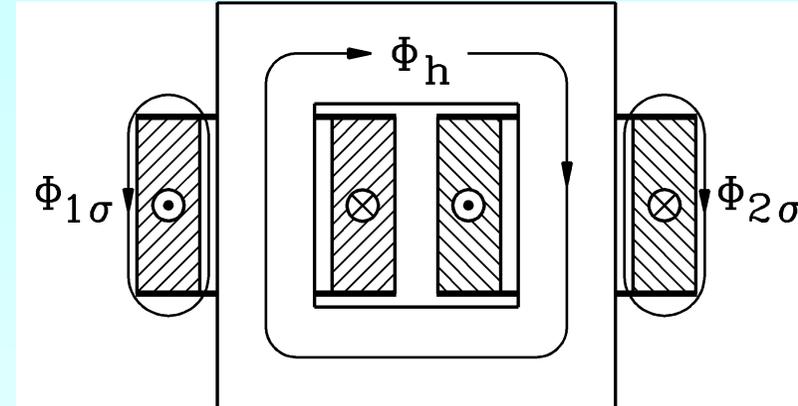
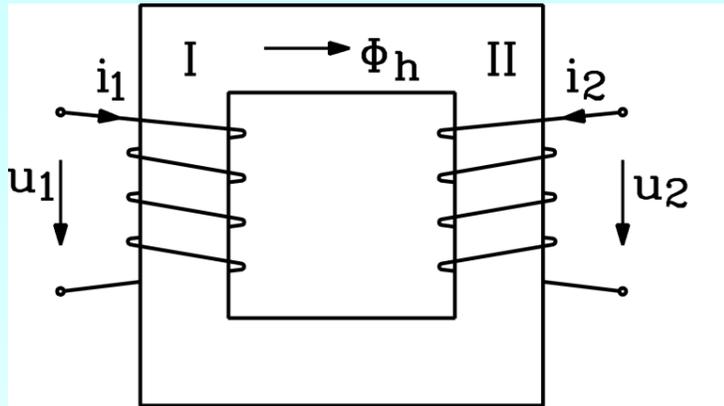
$$M_{21} = \Psi_{2h} / i_1 = N_2 \cdot \Phi_h / i_1 = N_2 \cdot B_{Fe} A / i_1 = N_2 \cdot N_1 \cdot \mu_{Fe} \cdot A / s_{Fe} = N_1 \cdot N_2 \cdot \Lambda_h$$

Selbstinduktivität des Hauptflusses von Spule 1:

$$L_{1h} = \Psi_{1h} / i_1 = N_1 \cdot \Phi_h / i_1 = N_1 \cdot B_{Fe} A / i_1 = N_1^2 \cdot \mu_{Fe} \cdot A / s_{Fe} = N_1^2 \cdot \Lambda_h \quad \Lambda_h \sim \mu_{Fe}$$

Selbstinduktivität des Streuflusses von Spule 1: $L_{1\sigma} = N_1^2 \cdot \Lambda_{1\sigma} \quad \Lambda_{\sigma} \sim \mu_0 \ll \mu_{Fe}$

Einphasentransformator: Induktivitäten, Spannungen



Selbstinduktivität von Spule 1 (Haupt- u. Streufluss): $L_1 = L_{1\sigma} + L_{1h} = N_1^2 \cdot (A_{1\sigma} + A_h)$

Selbstinduktivität von Spule 2 (Haupt- u. Streufluss): $L_2 = L_{2\sigma} + L_{2h} = N_2^2 \cdot (A_{2\sigma} + A_h)$

Gegeninduktivität zwischen Spule 1 und 2: $M_{12} = M_{21} = N_1 N_2 \cdot A_h$

Spulen 1 und 2 sind gleichzeitig bestromt und erregen gemeinsam Φ_h :

$$u_1 = R_1 \cdot i_1 + L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + M_{12} \cdot \frac{di_2}{dt}$$

$$u_2 = R_2 \cdot i_2 + L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} + M_{21} \cdot \frac{di_1}{dt}$$

Spannungsgleichungen mit dem (willkürlich gewählten) Übersetzungsverhältnis \ddot{u}

$$u_1 = R_1 \cdot i_1 + L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + M_{12} \cdot \ddot{u} \cdot \frac{d(i_2 / \ddot{u})}{dt}$$

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

$$i'_2 = \frac{i_2}{\ddot{u}} \quad u'_2 = u_2 \cdot \ddot{u} \quad M' = \ddot{u} \cdot M_{12} \quad R'_2 = \ddot{u}^2 \cdot R_2 \quad L'_2 = \ddot{u}^2 \cdot L_2$$

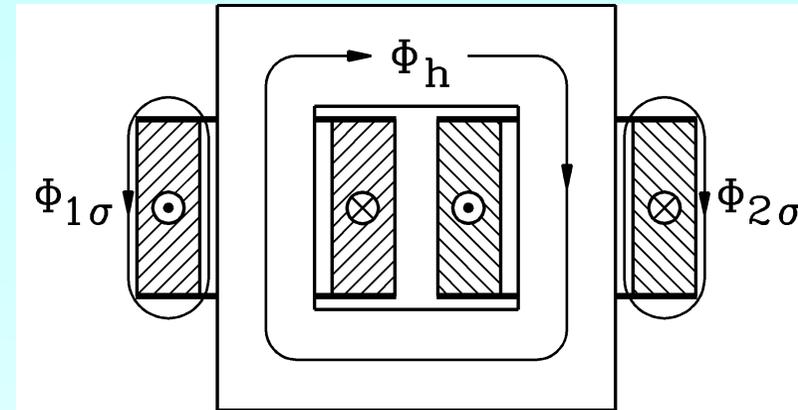
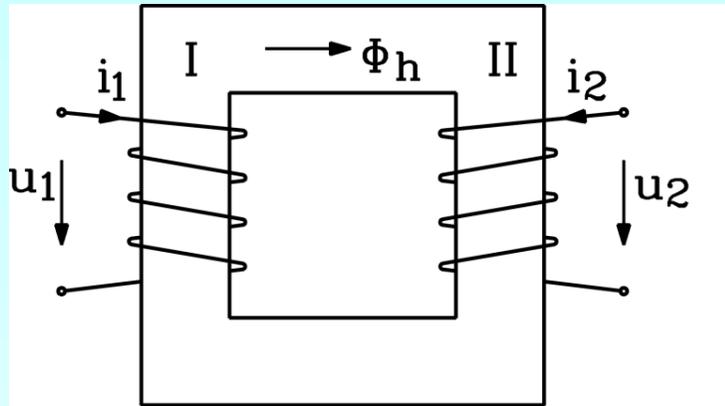
$$u_1 = R_1 \cdot i_1 + L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + M' \cdot \frac{di'_2}{dt} = R_1 \cdot i_1 + (L_1 - M') \cdot \frac{di_1}{dt} + M' \cdot \frac{d(i_1 + i'_2)}{dt}$$

$$u'_2 = R'_2 \cdot i'_2 + L'_2 \cdot \frac{di'_2}{dt} + M' \cdot \frac{di_1}{dt} = R'_2 \cdot i'_2 + (L'_2 - M') \cdot \frac{di'_2}{dt} + M' \cdot \frac{d(i_1 + i'_2)}{dt}$$

Magnetisierungsstrom: $i_m = i_1 + i'_2$



Übersetzungsverhältnis \ddot{u}



- Das Übersetzungsverhältnis \ddot{u} kann **willkürlich** gewählt sein.

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_{1h} \quad \text{aus } L_2 = L_{2\sigma} + L_{2h} \text{ wird } L'_2 = \ddot{u}^2 \cdot L_2 = L'_{2\sigma} + L'_{2h}$$

$$\text{Ebenso wird: } R'_2 = \ddot{u}^2 \cdot R_2 \quad i'_2 = \frac{i_2}{\ddot{u}} \quad u'_2 = u_2 \cdot \ddot{u} \quad M' = \ddot{u} \cdot M_{12}$$

- Sinnvolle Wahl von \ddot{u} : Parameter von Primär- und Sekundärkreis sind **von gleicher Größenordnung**.

$$\ddot{u} = N_1 / N_2$$

$$M' = (N_1 / N_2) \cdot N_1 N_2 \Lambda_h = L_{1h} = L_h \quad L'_{2h} = (N_1 / N_2)^2 \cdot N_2^2 \Lambda_h = L_h$$

$$L'_2 = L'_{2\sigma} + L'_{2h} = L'_{2\sigma} + L_h$$

Spannungsgleichungen mit dem Übersetzungsverhältnis $\ddot{u} = N_1/N_2$

- Spannungsgleichungen mit “Strich”-Größen:

$$u_1 = R_1 \cdot i_1 + L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + M' \cdot \frac{di_2'}{dt} = R_1 \cdot i_1 + L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + L_h \cdot \frac{di_2'}{dt}$$

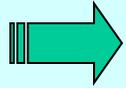
$$u_2' = R_2' \cdot i_2' + L_2' \cdot \frac{di_2'}{dt} + M' \cdot \frac{di_1}{dt} = R_2' \cdot i_2' + L_2' \cdot \frac{di_2'}{dt} + L_h \cdot \frac{di_1}{dt}$$



$$L_2' = L_{2\sigma}' + L_h$$

$$L_{2h}' = M' = L_h$$

Spannungsgleichungen mit \ddot{u}



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

$$u'_2 = R'_2 \cdot i'_2 + L'_{2\sigma} \cdot \frac{di'_2}{dt} + L_h \cdot \frac{d(i_1 + i'_2)}{dt}$$

Der “gemeinsame” Magnetisierungsstrom erregt den gemeinsamen Hauptfluss Φ_h .

$$\Psi_{1h} = L_h \cdot (i_1 + i'_2) = N_1^2 \Lambda_h (i_1 + i_2 / \ddot{u}) = N_1 \cdot \Lambda_h \cdot (N_1 i_1 + N_2 i_2) = N_1 \cdot \Lambda_h \cdot \Theta_m$$

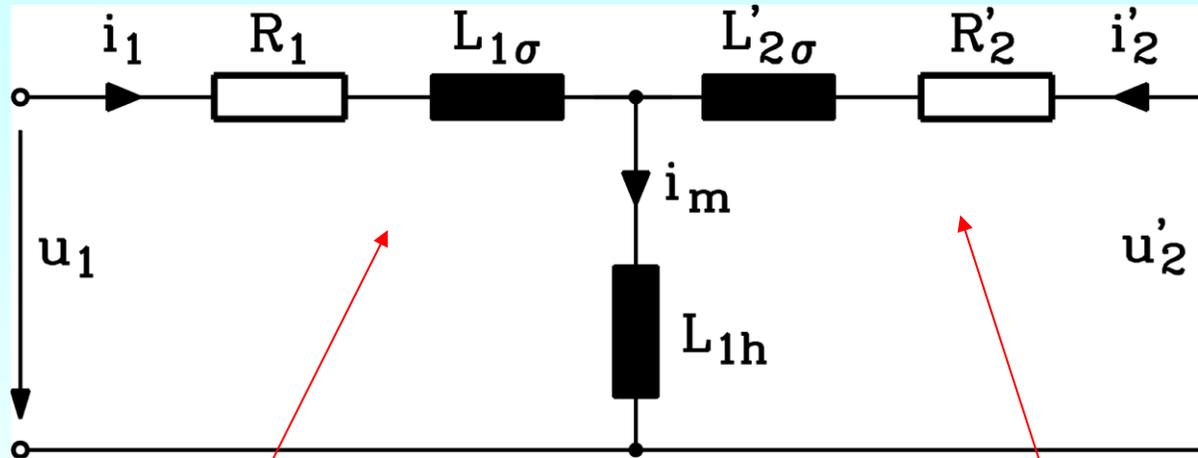
$$\Psi_{1h} = N_1 \cdot \Phi_h = N_1 \cdot \Lambda_h \cdot \Theta_m \Rightarrow \Phi_h = \Lambda_h \cdot \Theta_m$$

Hauptfluss: $\Phi_h = \Lambda_h \cdot (N_1 i_1 + N_2 i_2)$

Magnetisierungsstrom: $i_m = i_1 + i'_2$



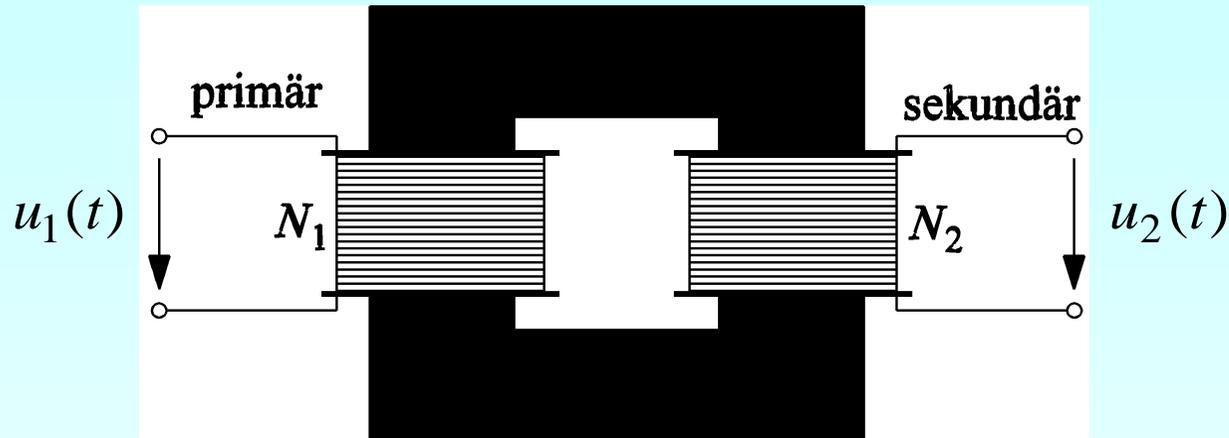
T-Ersatzschaltbild des Einphasentransformators



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

$$u'_2 = R'_2 \cdot i'_2 + L'_{2\sigma} \cdot \frac{di'_2}{dt} + L_h \cdot \frac{d(i_1 + i'_2)}{dt}$$

Leerlaufender Transformator



Leerlauf: Offene Klemmen der Sekundärspule = kein Verbraucher sekundär

- Der Sekundärstrom $i_2 = 0$.
- Primärwicklung liegt an zeitlich veränderlicher Spannung: $u_1(t)$
- Selbstinduktionsspannung primär, Gegeninduktionsspannung sekundär

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

$$u'_2 = L_h \cdot \frac{di_1}{dt}$$

$$u_2 = u'_2 / \ddot{u}$$

Übersetzungsverhältnis der Spannungen bei Leerlauf

- **Annahmen:** Leerlaufstrom i_1 klein: $R_1 i_1 \approx 0$, Streufluss $\Phi_{1\sigma} \ll \Phi_h$

- **Primär:** Spannungsgleichung: Leerlauf:

$$u_{10} = R_1 \cdot i_1 + L_{1\sigma} \cdot \frac{di_1}{dt} + L_h \cdot \frac{di_1}{dt} \approx L_h \cdot \frac{di_1}{dt}$$

- **Sekundärspannung:** Leerlauf: $i_2 = 0$, $u_2 = u_{20}$

$$u'_{20} = L_h \cdot \frac{di_1}{dt} \approx u_{10} \quad u_2 = u'_2 / \ddot{i}$$

- Übersetzungsverhältnis:

$$\ddot{i} = u'_2 / u_2 \approx u_{10} / u_{20}$$

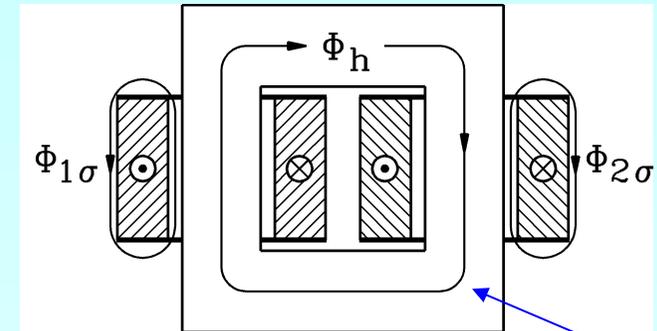
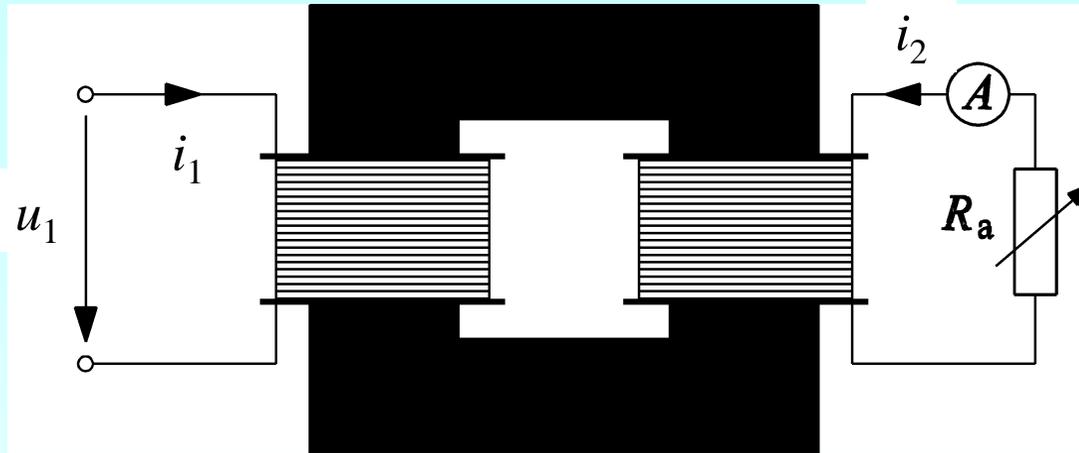
$$\ddot{i} = \frac{u_{10}}{u_{20}} \cong \frac{N_1}{N_2}$$

- Die experimentelle Überprüfung liefert **etwas kleinere** Werte für U_2 , was auf den Spannungsfall am R_1 und $L_{1\sigma}$ zurückzuführen ist.

- Daher wird \ddot{i} aus dem Leerlaufversuch etwas zu groß bestimmt: $\ddot{i}_0 = \frac{u_{10}}{u_{20}} > \frac{N_1}{N_2}$



Belasteter Transformator



Geschlossene Kurve C ,
Länge s_{Fe}

Bei Belastung fließen primär und sekundär (durch die dort induzierte Spannung) Ströme gleicher Frequenz.

Ampere'scher Durchflutungssatz für die geschlossene Kurve C :

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{s} = H_{Fe} s_{Fe} = \Theta = N_1 i_1 + N_2 i_2$$

Eisen hat hohes $\mu_{rel,Fe} \approx 5000$: Daher ist H_{Fe} sehr klein:

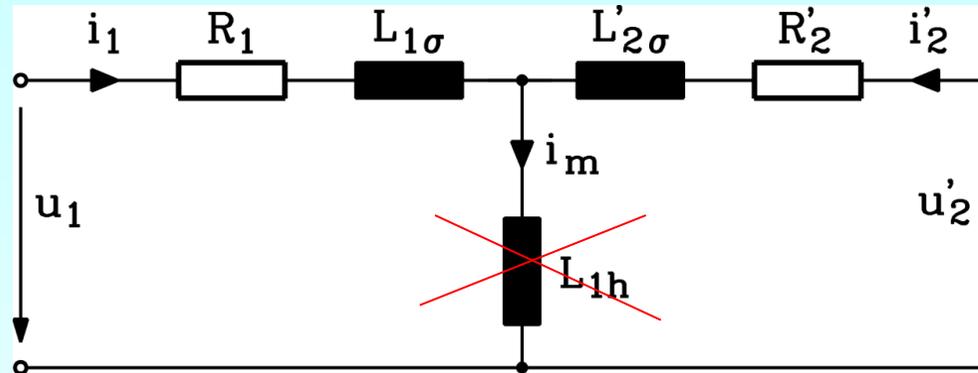
$$B_{Fe} = \Phi_h / A \quad H_{Fe} = B_{Fe} / (\mu_{rel,Fe} \cdot \mu_0) \quad H_{Fe} \approx 0$$

$$H_{Fe} s_{Fe} = \Theta = N_1 i_1 + N_2 i_2 \approx 0 \quad \text{„Durchflutungsausgleich“}$$

$$i_2 \cong -i_1 \cdot \frac{N_1}{N_2}$$

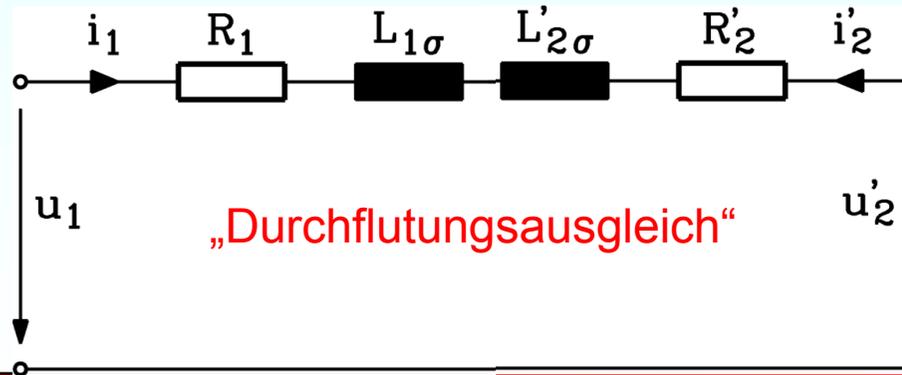
$$\frac{|i_1|}{|i_2|} \cong \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{\ddot{u}}$$

T-Ersatzschaltbild des belasteten Einphasentransformators



$$u_1 \approx L_h \cdot \frac{di_m}{dt} \Big|_{L_h \rightarrow \infty} \Leftrightarrow i_m = 0$$

$$i_m = i_1 + i'_2 = 0 : i_1 = -i'_2$$



„Durchflutungsausgleich“

Energietechnik

Zusammenfassung Funktionsprinzip des Einphasentransformators

- Gegenläufiges Hoch-/Tiefsetzen von Wechselspannung und -strom
- Idealer Transformator = keine Verluste
- T-Ersatzschaltbild durch $M_{12} = M_{21}$ möglich
- Spannungsübersetzung gemäß Windungszahlverhältnis
- Stromübersetzung invers zum Windungszahlverhältnis
- Magnetisierungsstrom zur Flusserregung sehr klein wegen ungesättigtem Eisenkern
- Bei Eisenkern-Transformator: Durchflutungsausgleich bei Belastung



2. Transformatoren

2.1 Funktionsprinzip des Einphasentransformators

2.2 Der Einphasentransformator bei Sinusspannungen

2.3 Bauformen von Einphasen-Transformatoren

2.4 Drehstromtransformatoren

2.5 Schaltungsvarianten von Drehstromtransformatoren

(2.6 Leistungsschildangaben bei Drehstromtransformatoren)



Idealer Transformator

„Idealer“ Transformator:

- a) Verluste primär- und sekundärseitig vernachlässigt ($R_1 = 0, R_2 = 0, \dots$)
- b) Gesamter magnetischer Fluss im Eisenkern = KEIN Streufluss
- c) Wirkleistungsfluss bei Sinusspeisung:

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi = (U_2 \cdot \ddot{i}) \cdot (I_2 / \ddot{i}) \cdot \cos \varphi = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi = P_2$$

Übersetzungsverhältnis \ddot{u} :

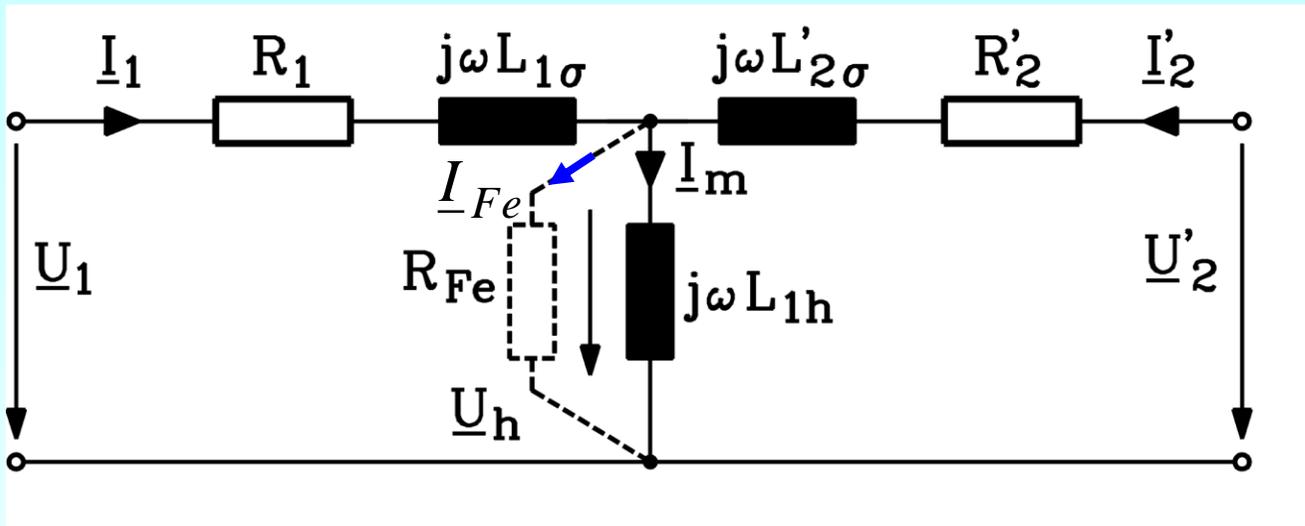
- Der ideale Transformator übersetzt den Strom umgekehrt wie die Spannung.
- Im selben Maße, wie er etwa die Spannung herab transformiert, setzt er den Strom hinauf, und umgekehrt.

$$\ddot{u} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{\ddot{u}}$$



Ummagnetisierungsverluste im Ersatzschaltbild



Ummagnetisierungsverluste:

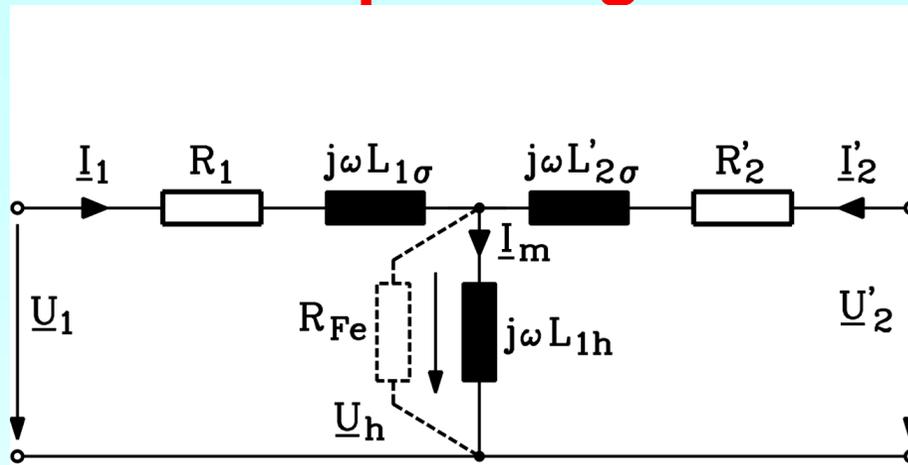
$$P_{Fe} \sim B_{Fe}^2 \sim \Phi_h^2 \sim (L_{1h} i_m)^2 \sim U_h^2$$

Die Verluste P_{Fe} können je Strang durch einen **Eisen-Ersatz-Widerstand R_{Fe}** parallel zu L_{1h} berücksichtigt werden:

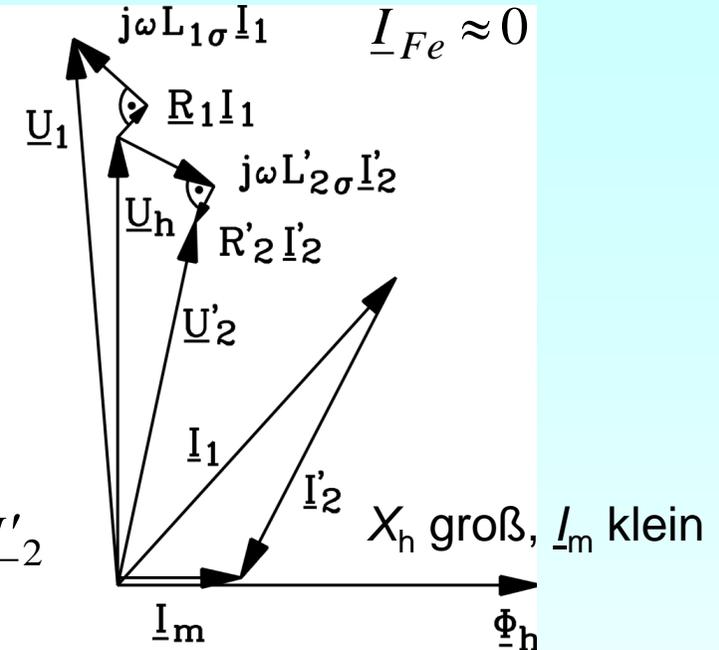
$$\underline{I}_{Fe} = \underline{U}_{Fe} / R_{Fe} \quad \underline{I}_1 + \underline{I}'_2 = \underline{I}_{Fe} + \underline{I}_m \approx \underline{I}_m \quad \boxed{P_{Fe} = U_h^2 / R_{Fe}}$$

Achtung !: Dreiphasentransformator $P_{Fe} = 3 \cdot U_h^2 / R_{Fe}$

Wechselstromspeisung des Einphasentransformators



Durchflutungsausgleich: $\underline{I}_1 + \underline{I}'_2 = \underline{I}_m \Rightarrow \underline{I}_1 \approx -\underline{I}'_2$



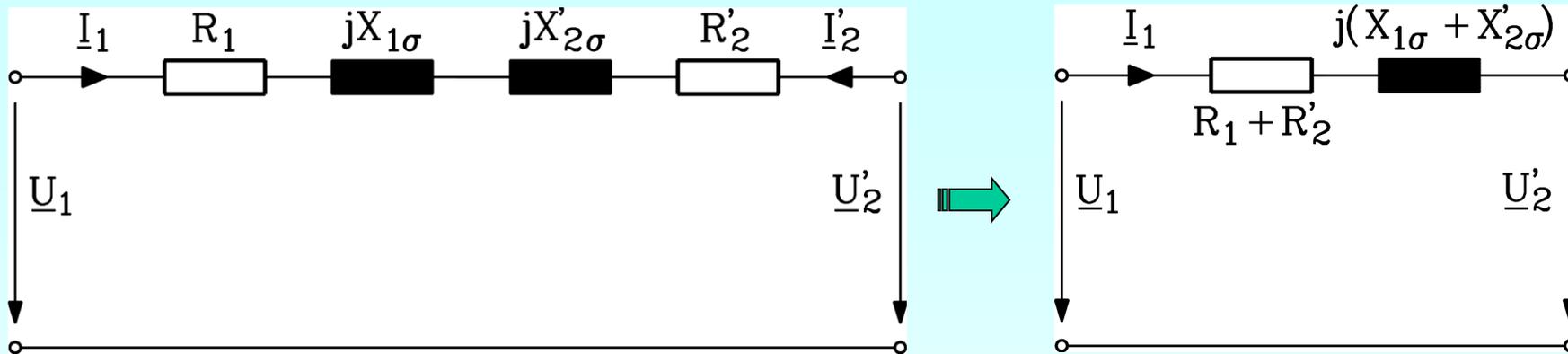
Für **sinusförmig eingeschwungenen** Zustand: **KOMPLEXE** Rechnung:

$$u_1(t) = \sqrt{2} \cdot U_1 \cdot \cos(2\pi f t) = \operatorname{Re} \left\{ \sqrt{2} \cdot \underline{U}_1 \cdot \exp(j2\pi f t) \right\} \quad L \frac{di}{dt} \rightarrow j2\pi f L \cdot \underline{I} = j\omega L \cdot \underline{I} = jX \cdot \underline{I}$$

$$\left. \begin{aligned} \Rightarrow \underline{U}_1 &= R_1 \underline{I}_1 + jX_{1\sigma} \underline{I}_1 + jX_h (\underline{I}_1 + \underline{I}'_2) \\ \Rightarrow \underline{U}'_2 &= R'_2 \underline{I}'_2 + jX'_{2\sigma} \underline{I}'_2 + jX_h (\underline{I}_1 + \underline{I}'_2) \end{aligned} \right\} \text{ bei } R_{Fe} \rightarrow \infty$$

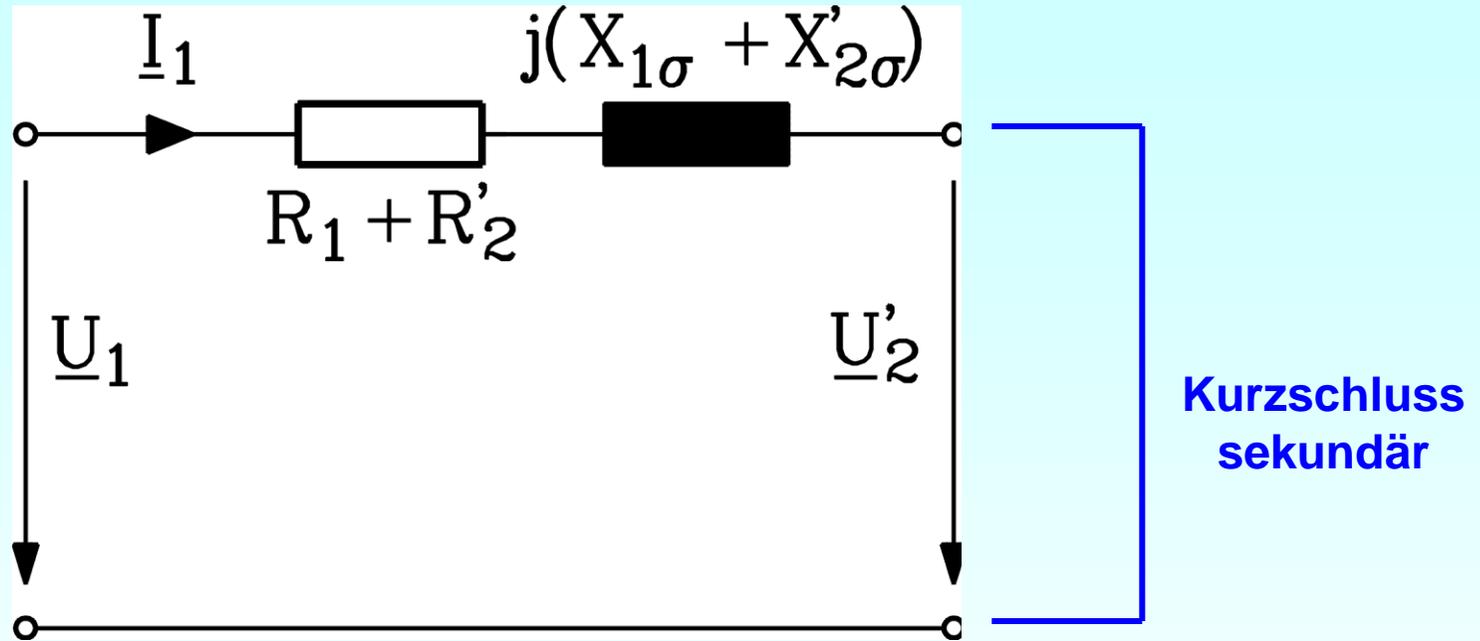
Hauptfeldspannung: $\underline{U}_h = jX_h (\underline{I}_1 + \underline{I}'_2) = jX_h \underline{I}_m = j\omega N_1 \underline{\Phi}_h \sqrt{2}$

Vereinfachtes Ersatzschaltbild des Transformators



- $X_h \gg X_{1\sigma}, X'_{2\sigma}$: Magnetisierungsstrom ist **SEHR** klein (I_m / I_N ca. 1% - 2%)
- $I_m \approx 0$: $\underline{I}_1 \approx -\underline{I}'_2$ und $\underline{I}_2 = -\underline{I}'_2$: **DURCHFLUTUNGS-AUSGLEICH!**
- Für den **sekundär belasteten** Transformator ($\underline{I}'_2 \neq 0$): $\underline{I}_m / \underline{I}_1 \approx 0$:
 $X_h \rightarrow \infty, R_{Fe} \rightarrow \infty$: X_h, R_{Fe} **weglassen!**
- Nur für **Leerlauf** ($\underline{I}'_2 = 0$) muss X_h berücksichtigt werden: **Leerlaufstrom** $\underline{I}_{10} = \underline{I}_m$

Vereinfachtes Ersatzschaltbild



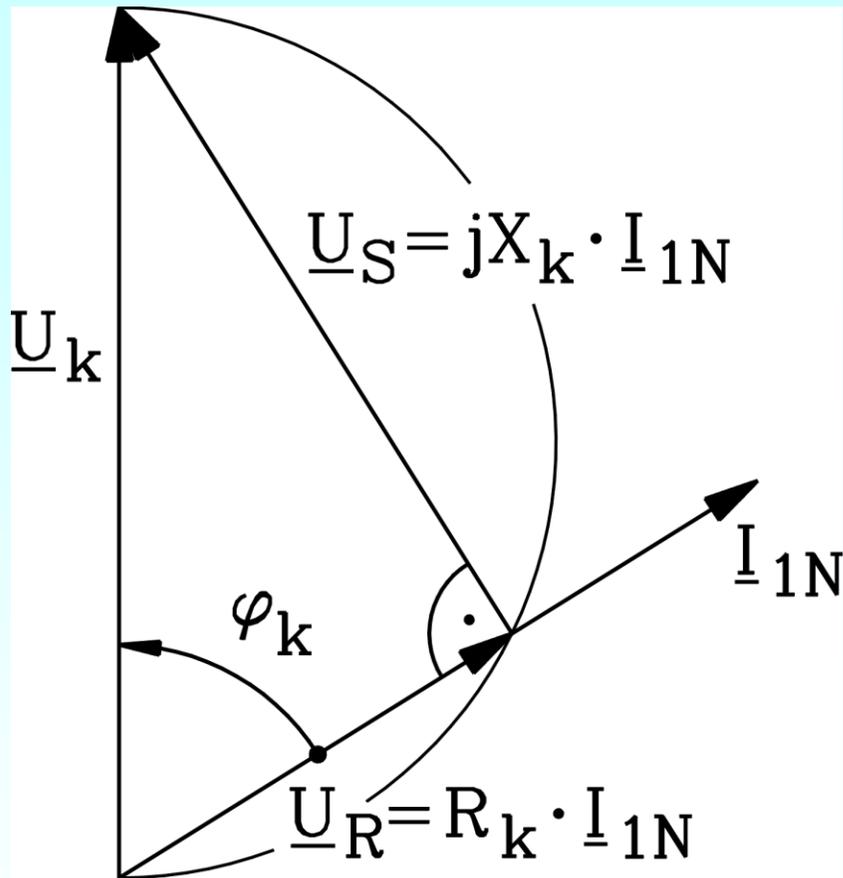
- **“Kurzschlussspannung” U_k :**

Spannung primär, damit bei sekundärem Kurzschluss primär

Nennstrom fließt !

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

Transformator mit sekundärem Kurzschluss



- Sekundärer Kurzschluss: $U_2' = 0$.
- Nur $R_1 + R_2'$ und $X_{1\sigma} + X_{2\sigma}'$ begrenzen den primären und sekundären Strom.
- **KAPP'sches Dreieck!**
- Bezogene Kurzschluss-Spannung: $u_k = U_k / U_{1N}$

$$R_k = R_1 + R_2'$$

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

$$u_k = U_k / U_{1N} = (\sqrt{R_k^2 + X_k^2} \cdot I_{1N}) / U_{1N}$$

Zeigerbild der Kurzschluss-Spannung bei $I_1 = I_{1N}$: ist induktiv, Strom eilt Spannung nach

Das **KAPP'sche Dreieck** (*Gisbert Kapp, 1888*)

- Die **“bezogene” Kurzschlussspannung** u_k kennzeichnet den Transformator im Lastbetrieb.

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

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

- **“Bezogene” Spannungen**: Angabe in % oder “per unit” (p.u.):

Beispiel:

a) Einphasen-Transformator: $S_N = 1 \text{ kVA}$, Nennspannung $U_{1N} = 400 \text{ V}$, $U_k = 20 \text{ V}$,

$$u_k = 20 / 400 = 0.05 = 5\%$$

b) Dreiphasen-Transformator: $S_N = 400 \text{ kVA}$, Nennspannung $U_N = 6300 \text{ V}$ (laut Leistungsschild, daher **verkettet**), $U_k = 180 \text{ V}$ je Strang (**Phasenspannung!**)

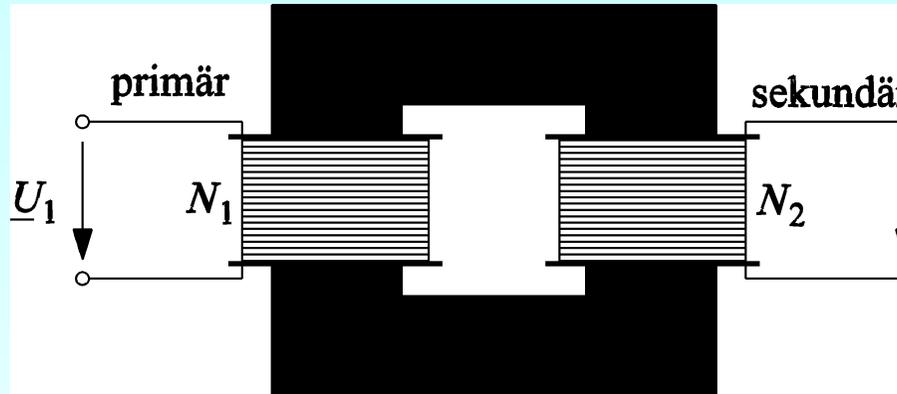
$$\text{Nenn-Strangspannung: } \Rightarrow U_{1N} = U_N / \sqrt{3} = 6300 / \sqrt{3} = 3637 \text{ V}$$

$$u_k = U_k / U_{1N} = 180 / 3637 = 5\% = 0.05 \text{ p.u.}$$

- u_k **steigt** mit der Baugröße des Transformators: z. B.: 400 kVA: 5%, 1000 MVA: 15%



Sekundärer Kurzschluss des Transformators bei Betriebsspannung $U_1 = U_{1N}$



Kurzschluss

Achtung:

- Wenn Transformator im Betrieb bei $U_1 = U_{1N}$ **sekundär kurz geschlossen**, dann fließt wegen der primären Nennspannung ein **zu hoher** Strom I_{2k} sekundär und $I_{1k} = I_{2k}/\ddot{u}$ primär.
- Diese Betriebsart ist daher ein Störfall und nicht dauernd zulässig.
- Nur Selbstinduktion der Streuflüsse (klein !) und Widerstände (klein !) begrenzen den Strom, daher ist dieser primär und sekundär **zu groß**.

Transformatorstrom bei sekundärem Kurzschluss

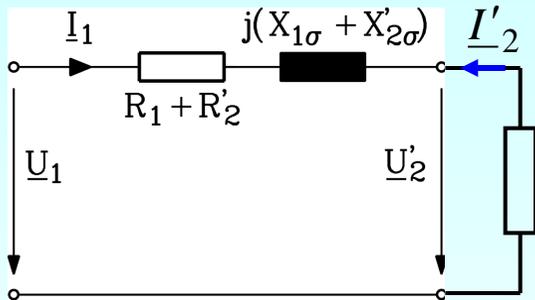
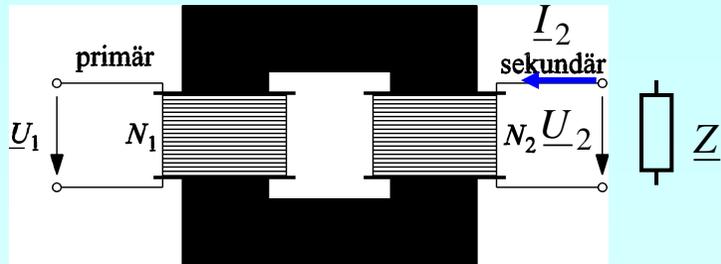
- Sekundärer Kurzschluss: $U'_2 = 0$.
- Nur $R_1 + R'_2$ und $X_{1\sigma} + X'_{2\sigma}$ als **KAPP'sches Dreieck** begrenzen den primären und sekundären Strom.
- Primär: Nennspannung $U_1 = U_{1N}$: Kurzschlussstrom I_{1k} **SEHR HOCH!**

$$I_{1k} / I_{1N} = U_{1N} / (\sqrt{R_k^2 + X_k^2} \cdot I_{1N}) = U_{1N} / U_k = 1 / u_k$$

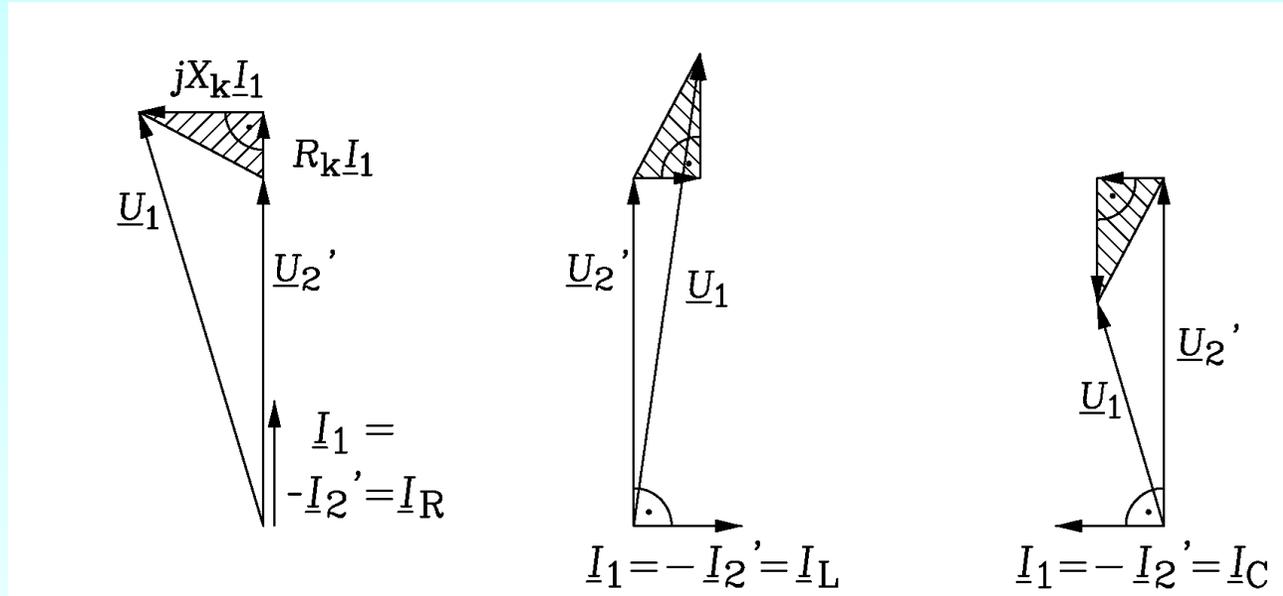
$I_{1k} / I_{1N} = 1/u_k$ -fach: bei z.B. $u_k = 4\%$: **25-facher Nennstrom!**



Spannungsübersetzung bei Belastung



Belastung Z sekundär:



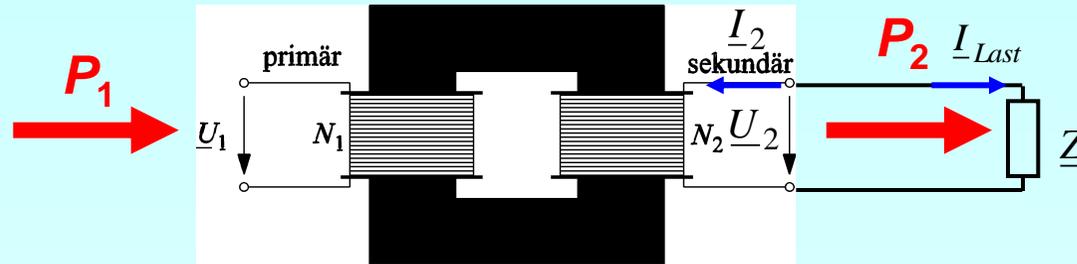
OHM'sch

rein induktiv

rein kapazitiv

- Die sekundäre Spannung ist **nur** im Leerlauf etwa $U_2 = U'_2/\ddot{u} = U_1/\ddot{u}$.
- Bei Belastung ist die Sekundärspannung bei a) und b) **KLEINER** als U_1/\ddot{u} , bei c) **GRÖßER** als U_1/\ddot{u} (gefürchteter "FERRANTI-Effekt").
- Ursache dafür sind die **Spannungsfälle** an Widerständen u. Streureaktanzen (**KAPP'sches Dreieck**).

Betrieb bei ohmsch-induktiver Belastung



- Belastung Z sekundär: OHM'sch-induktiv

\underline{I}_1 eilt \underline{U}_1 nach, $\underline{I}'_{Last} = -\underline{I}'_2$ eilt \underline{U}'_2 nach

- Realer Transformator: Einfluss der KAPP-Dreiecks:

$|\underline{U}'_2|$ kleiner als $|\underline{U}_1|$

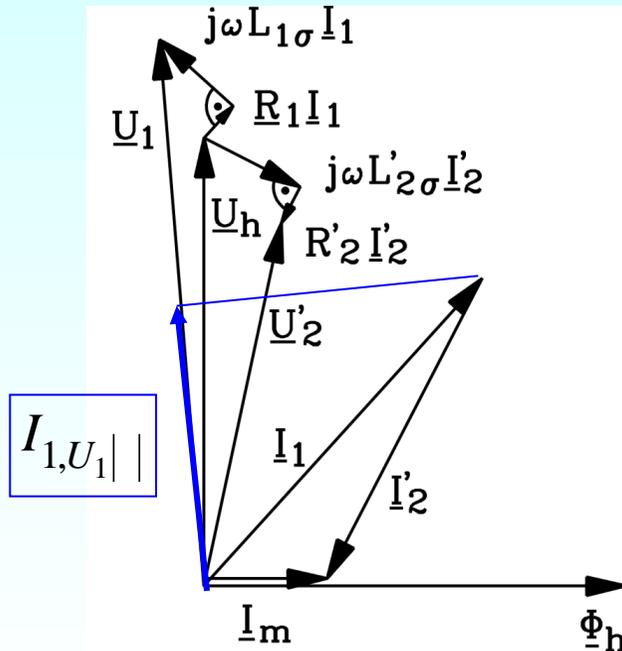
- Realer Transformator mit $I_m > 0$:

$|\underline{I}'_2|$ kleiner als $|\underline{I}_1|$

- Leistungsfluss durch den Transformator:

$$P_{in} = P_1 = U_1 \cdot I_{1,U_1|} > P_{out} = P_2 = -U'_2 \cdot I'_{2,U'_2|} > 0$$

$I_{1,U_1|}$: Stromkomponente v. \underline{I}_1 parallel zu \underline{U}_1



Werkstoffe für den Eisenkern ?

Reines Eisen Fe zu „weich“, daher Fe-C-Verbindungen im Einsatz in den Formen

- (1) Gusseisen (Grauguss) mit graphitischen C-Einlagerungen
- (2) Stahlguss

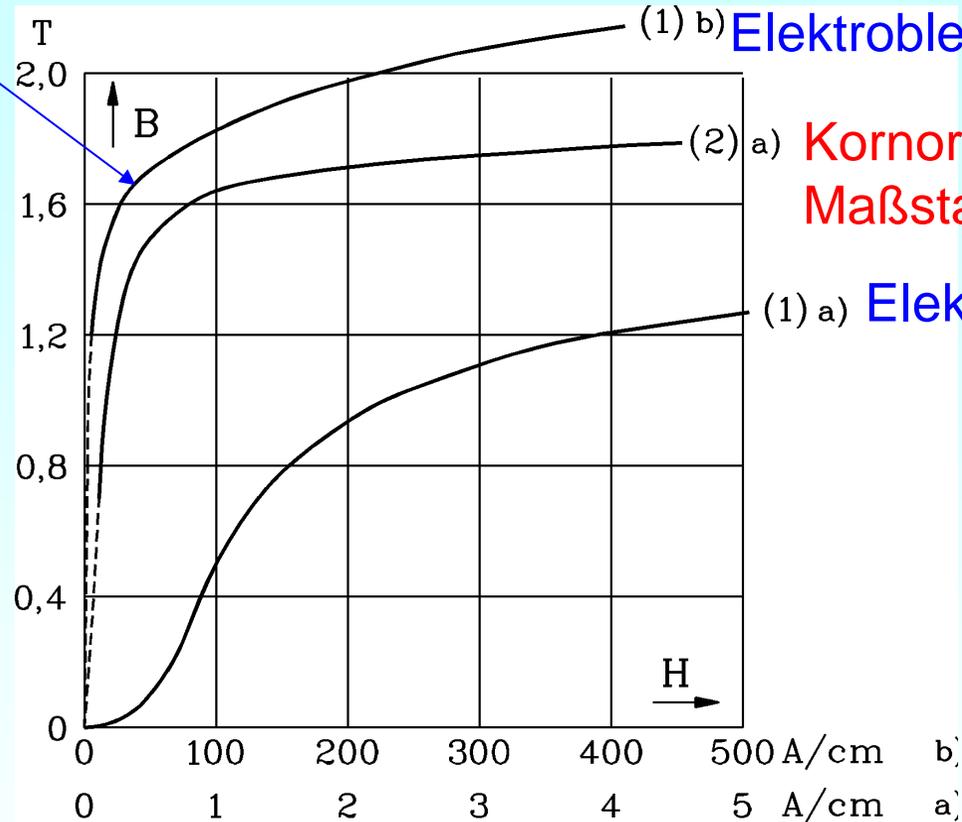
- a) **Grauguss:** relativ niedriges μ_{Fe} ; spröde, daher keine Bleche walzbar → keine Unterdrückung der Wirbelströme im Eisen. Wird **NICHT** als Eisenkern verwendet.
- b) **Stahlguss:** hohes μ_{Fe} ; als Stahlbleche für geblechte („lamellierte“) **Eisenkerne** (mit Isolation dazwischen), damit die Wirbelstromverluste vermindert werden. Eisenkerne für Kleintransformatoren bei Netzfrequenz 50 ... 60 Hz (isotropes Elektroblech).
- c) **Kornorientierte Stahlbleche:** spezielles **Kaltwalz-Verfahren**, in Walzrichtung sehr hohes μ_{Fe} , quer dazu niedriges μ_{Fe} . Eisenkerne bei großen Transformatoren (anisotropes Hi-B-Blech).
- d) **Schnittbandkerne:** Blech aufgewickelt. Um Wicklungen aufstecken zu können, muss man den Wickel durchschneiden (U-Form). Kleintransformatoren für hohe Frequenzen (kHz !, Nachrichtentechnik).



Weicheisenwerkstoffe

Eisensättigung:
„Krümmung“ in der
 $B(H)$ -Kurve

(Hystereseschleife
vernachlässigt!)



- **Elektroblech** ist isotrop: z. B.: Dicke 0.5 mm, $P_{Fe} = 3 \text{ W/kg}$ bei 50 Hz, 1 T: für E-Maschinen
- **Kornorientiertes Blech** ist anisotrop: hat Vorzugsrichtung, z. B.: Dicke 0.35 mm, $P_{Fe} = 0.45 \text{ W/kg}$ bei 50 Hz, 1 T: für Transformatoren

Eisenpermeabilität bei Eisensättigung

Beispiel: Elektroblech

Hohe Eisensättigung =
kleine Permeabilität

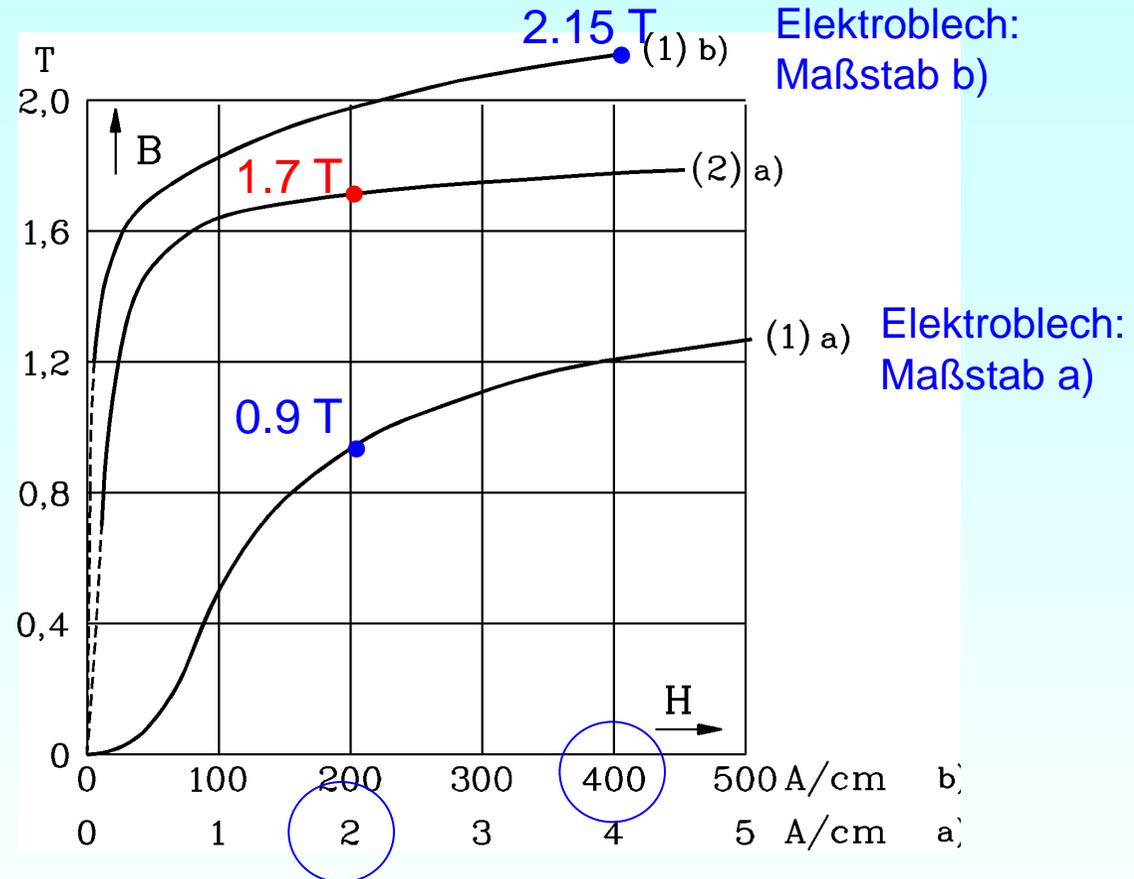
$$\mu_{Fe,rel} = \frac{B}{\mu_0 H} = \frac{2.15T}{\mu_0 \cdot 400A/cm} = 43$$

Niedrige Eisensättigung =
große Permeabilität

$$\mu_{Fe,rel} = \frac{B}{\mu_0 H} = \frac{0.9T}{\mu_0 \cdot 2A/cm} = 3580$$

Mit steigender Eisensättigung sinkt
die Hauptinduktivität deutlich!

$$L_h = N_1^2 \cdot \mu_{Fe} \cdot A / s_{Fe} \sim \mu_{Fe,rel}$$



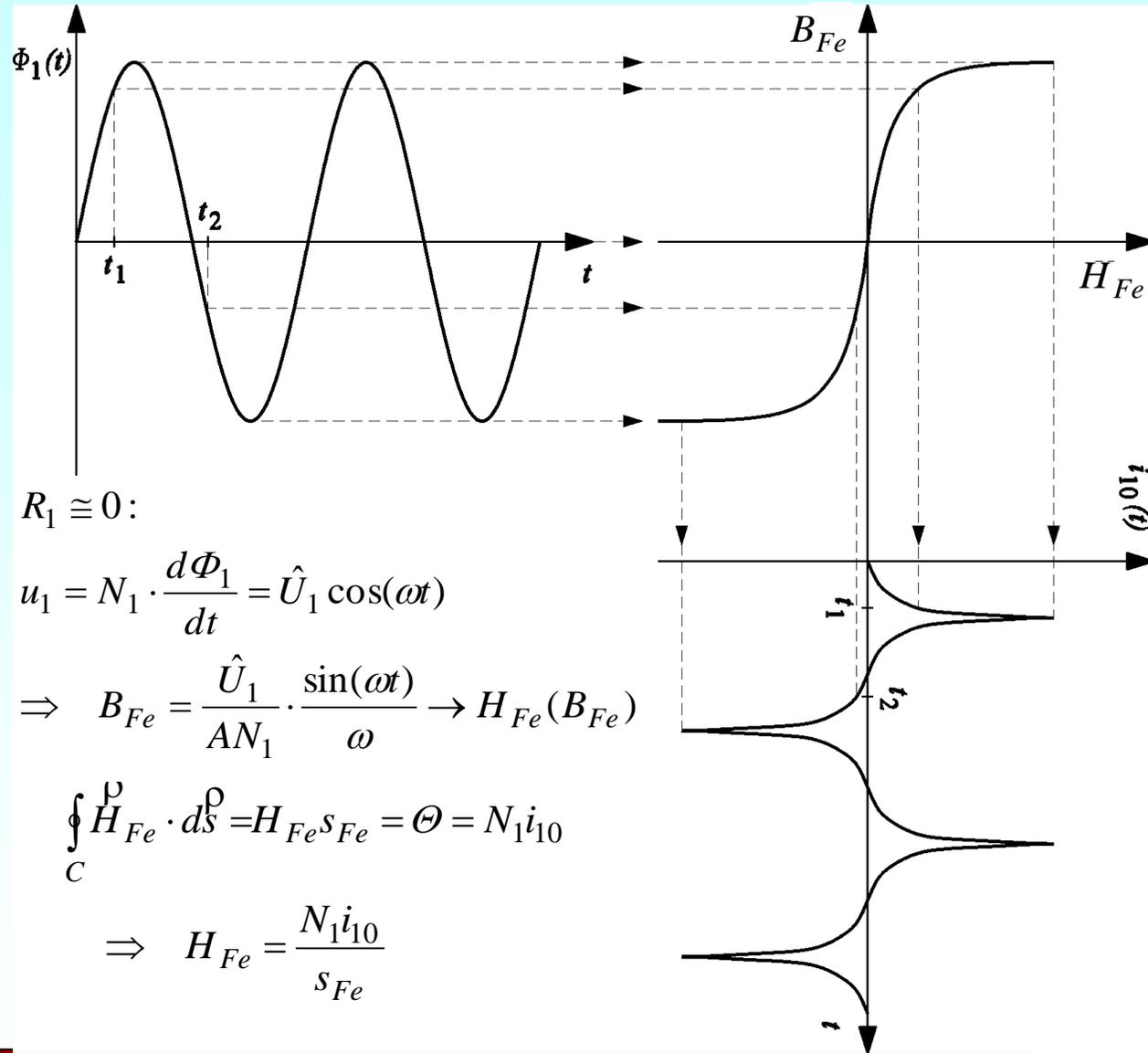
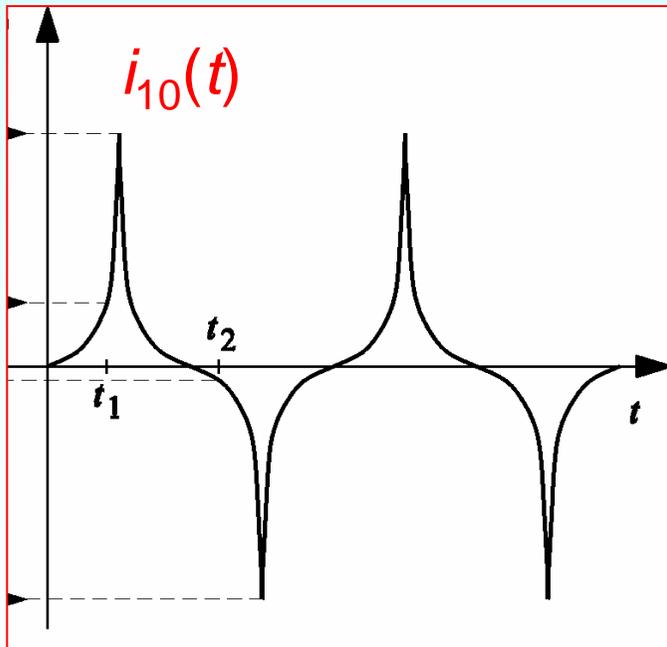
Zum Vergleich: kornorientiertes Blech: $\mu_{Fe,rel} = \frac{1.7T}{\mu_0 \cdot 2A/cm} = 6765$

Hat in Vorzugsrichtung doppelt so große Permeabilität wie Elektroblech bei gleichem H

Zeitverlauf des Leerlaufstroms (ohne Hysterese)

Nichtlineare Eisenkennlinie:

- Im Leerlauf begrenzt $L_h \sim \mu_{Fe}$ Strom i_{10} , dieser ist nicht sinusförmig, obwohl Spannung und damit Fluss sinusförmig sind!



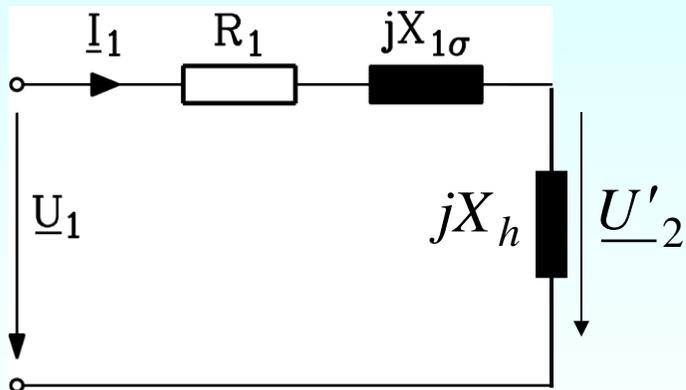
Zeitverlauf des Laststroms

Unter Last: Durchflutungsausgleich durch Sekundärstrom:

Nicht mehr die **nichtlineare Eisenkennlinie** der Hauptinduktivität, sondern die linearen Streuinduktivitäten und die sinusförmige Gegenspannung \underline{U}_2 begrenzen den Strom.

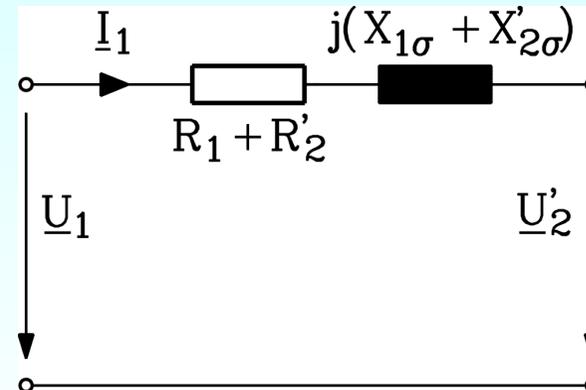
Dieser ist daher sinusförmig!

Leerlauf



Strom tatsächlich nicht sinusförmig!
(Komplexe Rechnung nur näherungsweise zulässig!)

Last



Strom ist sinusförmig!
(Komplexe Rechnung korrekt!)

Energietechnik

Zusammenfassung

Der Einphasentransformator bei Sinusspannungen

- Realer Transformator hat auch Ummagnetisierungsverluste im Eisenkern
- Komplexe Wechselstromrechnung - Zeigerdiagramm
- KAPP´ches Dreieck als Spannungsfall bei Betrieb („Kurzschlussspannung“)
- Unzulässig hoher Kurzschlussstrom
- FERRANTI-Effekt: Spannungsüberhöhung bei kapazitiver Belastung sekundär
- Magnetisierungsstrom nichtsinusförmig wegen Eisen- $B(H)$ -Kennlinie
- Weichmagnetischer Eisenkern-Transformator aus 0.35 mm dünnen Blechen



2. Transformatoren

2.1 Funktionsprinzip des Einphasentransformators

2.2 Der Einphasentransformator bei Sinusspannungen

2.3 Bauformen von Einphasen-Transformatoren

2.4 Drehstromtransformatoren

2.5 Schaltungsvarianten von Drehstromtransformatoren

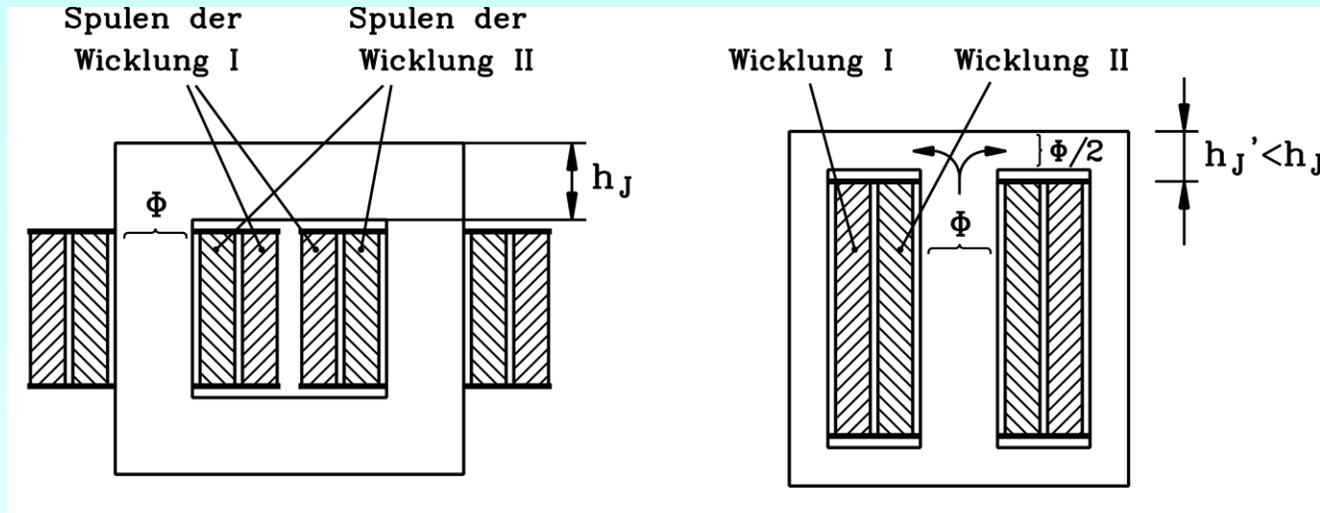
(2.6 Leistungsschildangaben bei Drehstromtransformatoren)



Bauformen von Einphasen-Transformatoren

Serienschaltung der beiden Spulen I = OS-Wicklung

Serienschaltung der beiden Spulen II = US-Wicklung



Kerntransformator

- **Anwendung:** Netztransformatoren (Bahnnetz 16.7 Hz)
Kleintransformatoren

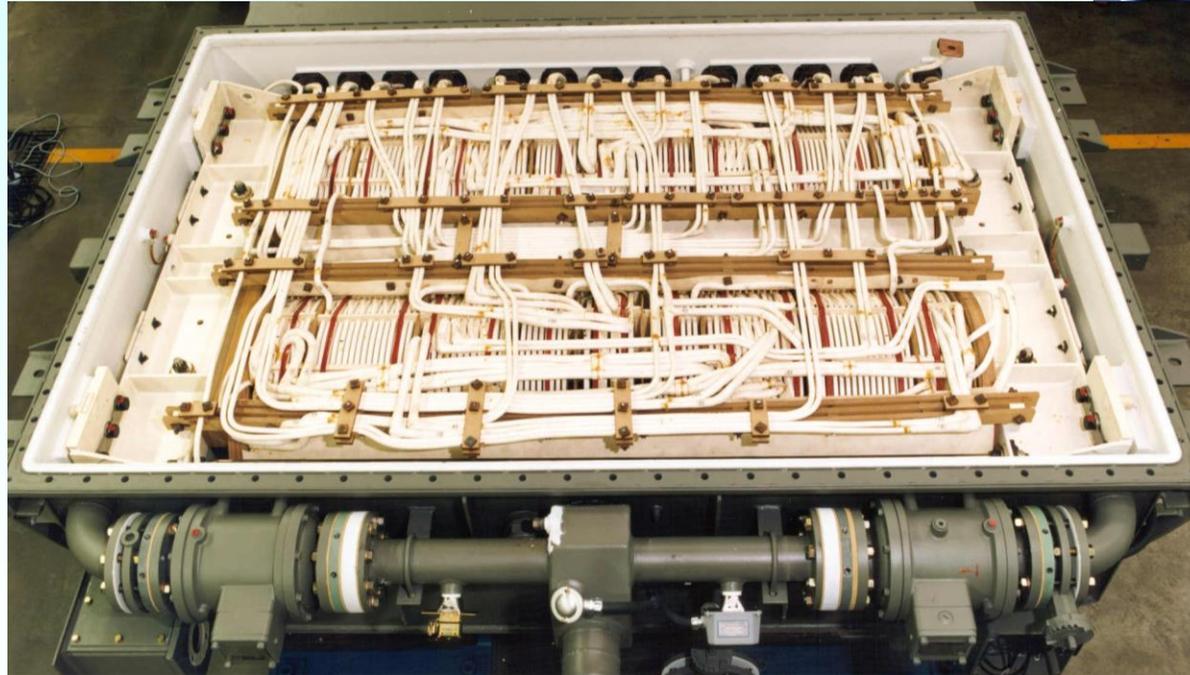
Manteltransformator

- Lokomotiv-Transformatoren
- gedrungene, ältere Bauweise
wegen beschränktem Platz

- **Koaxiale** Anordnung der Spulen: **Minimaler** Streufluss, **optimale Kopplung**
- **Unterspannungswicklung = kernnahe!** (Kern auf Nullpotential = geerdet).
Oberspannungswicklung außen: hat größeren Abstand zum Kern.
- Flussrichtung **vorgegeben** = **Einsatz kornorientierter Bleche** möglich.

Lok-Einphasen-Transformator

Einphasen-Traktions-
Transformator (Unterflureinbau
flach im Ölkessel) für
Hochgeschwindigkeitstriebzüge,
z. B. ICE3



Quelle: Siemens AG



Energietechnik

Zusammenfassung Bauformen von Einphasen-Transformatoren

- Kern- und Mantelbauform (für geringere Höhe)
- Koaxial angeordnete Primär- und Sekundärwicklungsspulen
- Niederspannungswicklung näher am geerdeten Eisenkern
- Luft- und ölgekühlte Transformatoren



2. Transformatoren

2.1 Funktionsprinzip des Einphasentransformators

2.2 Der Einphasentransformator bei Sinusspannungen

2.3 Bauformen von Einphasen-Transformatoren

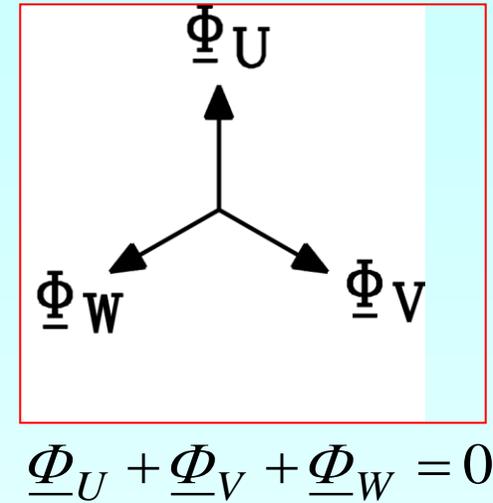
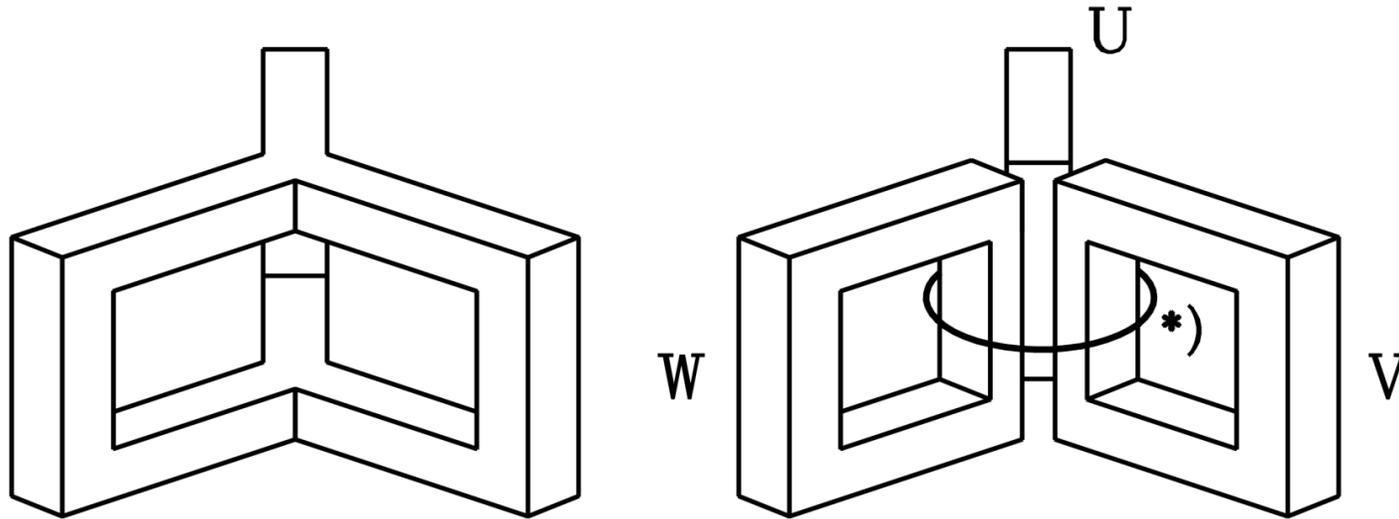
2.4 Drehstromtransformatoren

2.5 Schaltungsvarianten von Drehstromtransformatoren

(2.6 Leistungsschildangaben bei Drehstromtransformatoren)

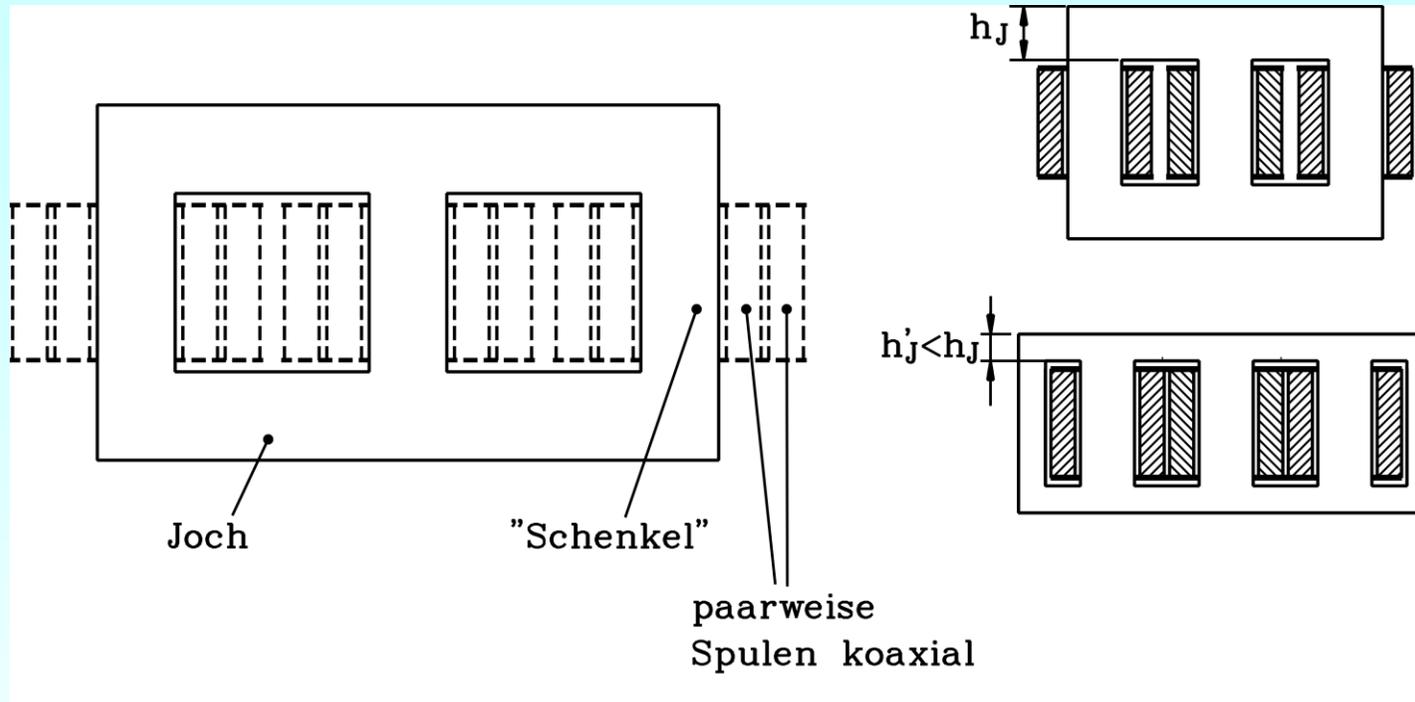


Entstehung des Drehstromtransformators



- **Tempeltyp**-Drehstromtransformator: entsteht aus drei Einphasen-Transformatoren, die an die drei Phasen U, V, W angeschlossen sind.
- Die drei Hauptflüsse von Φ_U , Φ_V , Φ_W sind um 120° el. phasenverschoben.
- In der gemeinsamen Kontrollfläche *) sind sie als Summe stets Null, so dass die drei **Mittelschenkel entfallen** können = **Tempeltyp**.
- Der Tempeltransformator ist für die drei Phasen U, V, W magnetisch symmetrisch (Erfinder: **Michael von Dolivo-Dobrowolsky 1890, AEG, Berlin**)

Bauformen von Drehstrom-Transformatoren

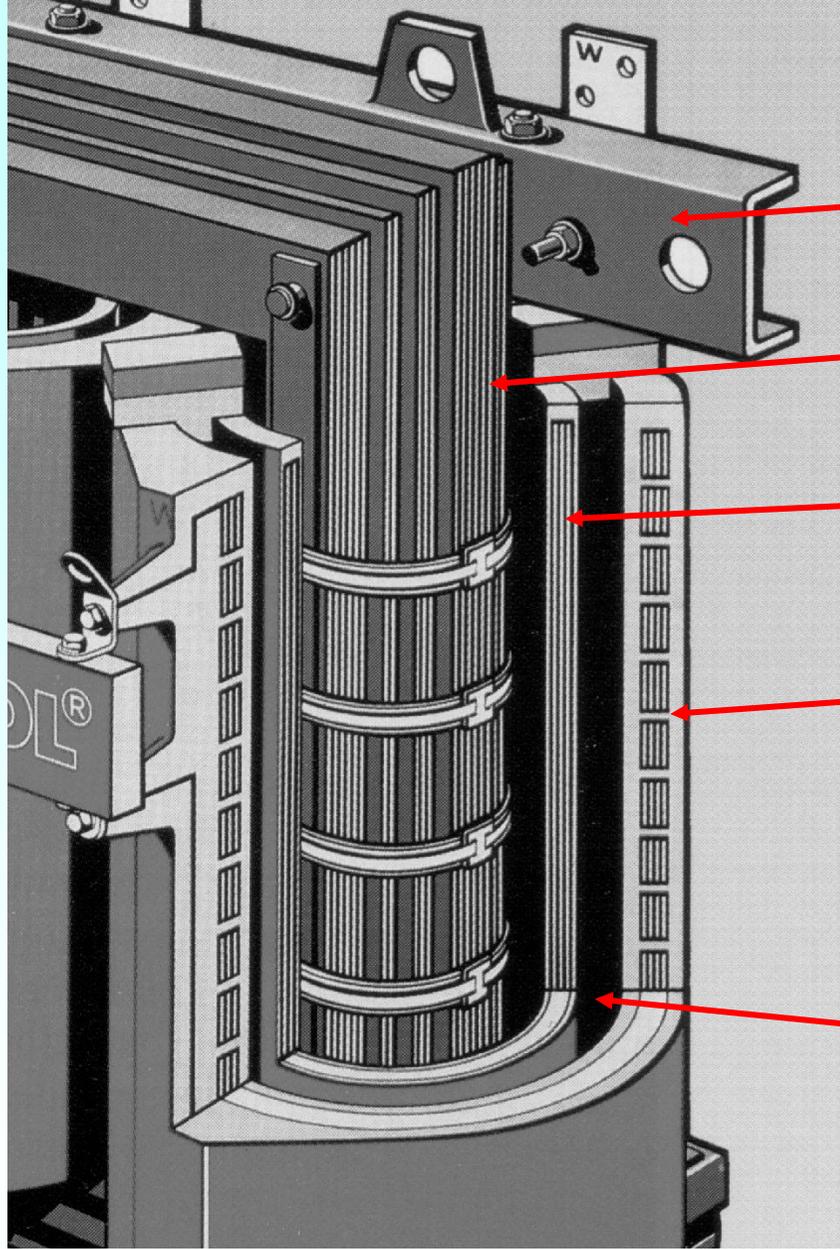


Drei-Schenkel-
Transformator

Fünf-Schenkel-
Transformator:
geringere Jochhöhe!

- “Klappen” der drei Schenkel in eine Ebene: Aus dem Tempeltyp entsteht der wesentlich einfacher baubare **Drei-Schenkel-Transformator**.
- Bei begrenzter Bauhöhe (z. B. Bahntransport: “Bahnprofil” in Tunneln etc.) wird der Manteltyp als **Fünfschenkel-Transformator** gebaut.
- Eisenkern aus Blechen **stufig geschichtet**: Kern-Querschnitt hat annähernd Kreisform. Die Joche werden nach Aufschieben der Röhrenspulen “eingebledt”.

Aufbau eines Schenkels



Obere Presskonstruktion

Stufig geblechter Eisenkern mit Glasfaserbandagen fixiert

Unterspannungswicklung: Kupferfolien (dünn, aber lang, daher großer Querschnitt für großen Niederspannungs-Strom

Oberspannungswicklung: Viele Windungen = hohe Windungszahl, kleiner Leiterquerschnitt, dicke Isolation wegen hoher Oberspannung. Weit vom geerdeten Eisenkern entfernt = geringe Überschlagsgefahr.

Streuspalt: Hier bildet sich das Streufeld von OS- und US-Wicklung gemeinsam aus.

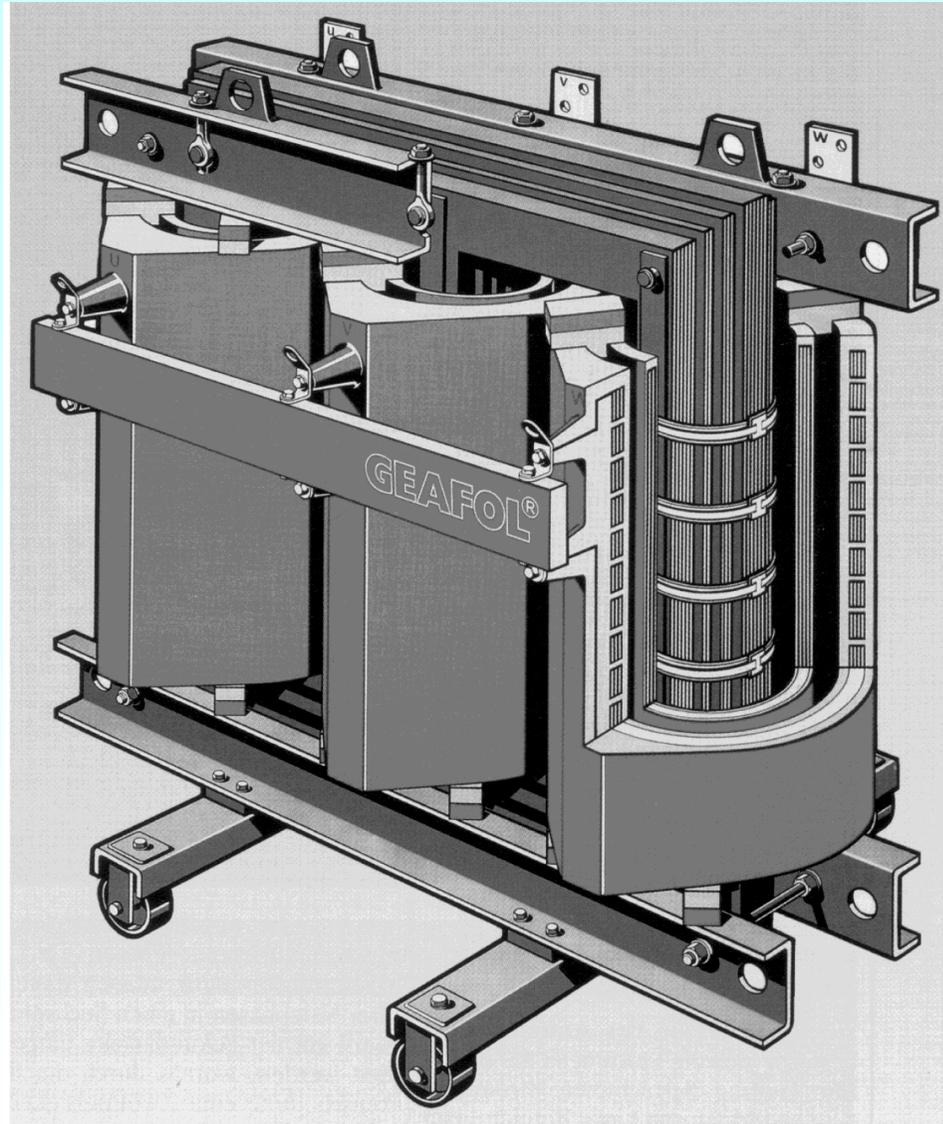
Quelle: Siemens AG

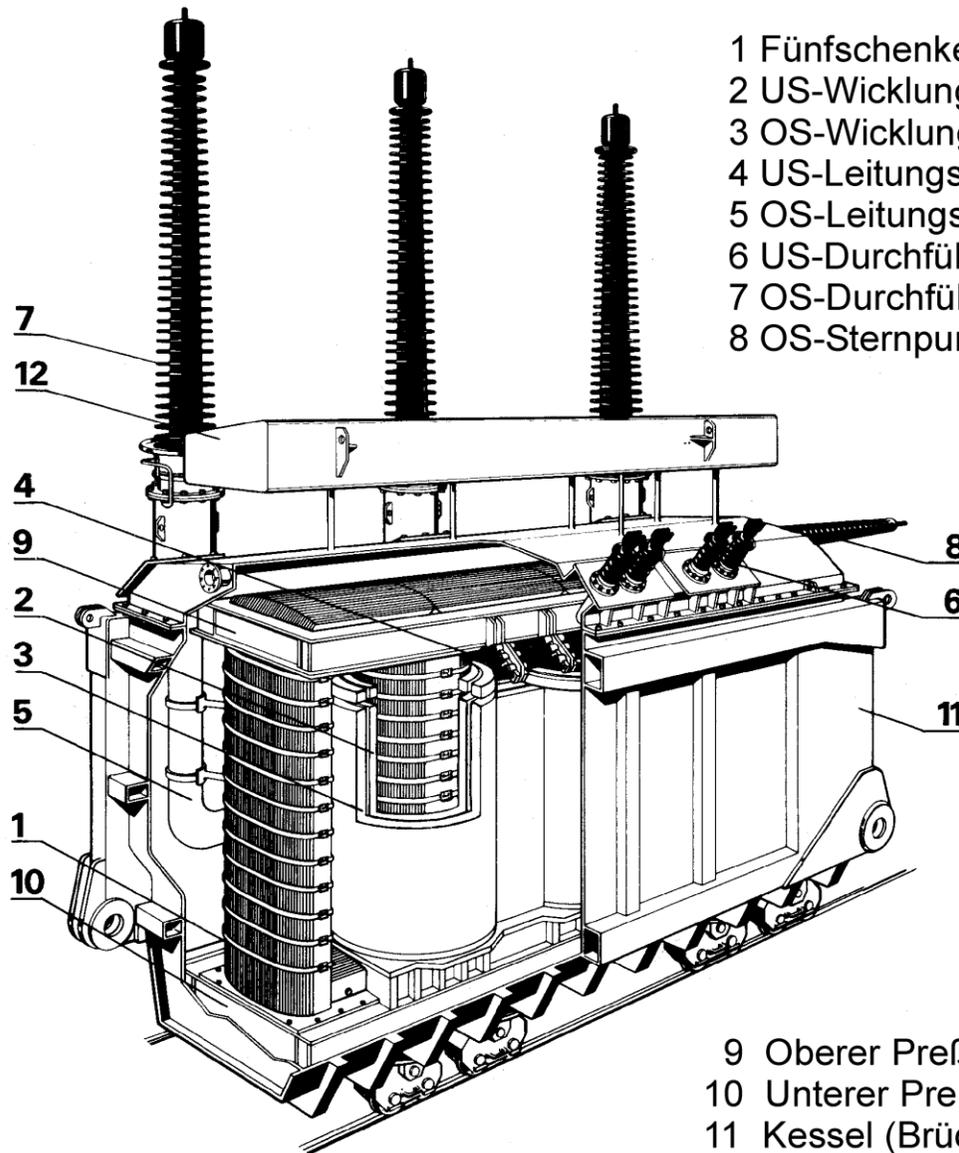


Gießharzisolierter Drehstromtransformator für Luftkühlung

Typische
Bemessungsdaten:
20 kV / 400 V, 400 kVA

Quelle: Siemens AG





- 1 Fünfschenkelkern
- 2 US-Wicklung
- 3 OS-Wicklung
- 4 US-Leitungsführung
- 5 OS-Leitungsführung
- 6 US-Durchführung
- 7 OS-Durchführung
- 8 OS-Sternpunkt-Durchführung

Ölgekühlter Drehstrom- Großtransformator

Typische
Bemessungsdaten:
380 kV / 20 kV, 1300 MVA

- 9 Oberer Preßrahmen
- 10 Unterer Preßrahmen
- 11 Kessel (Brückenmittelstück)
- 12 Ausdehnungsgefäß

Quelle: Bohn, T.
El. Energietechnik, TÜV
Rheinland



Marx-Stoßspannungs-
erzeugung für Blitzstoß-
Prüfung



Großtransformator mit drei Wicklungssystemen im Hochspannungs-Prüffeld

(Quelle: Werkfoto ELIN Transformatoren GmbH, Weiz, Österreich, jetzt Siemens AG)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Prof. A. Binder : Energietechnik / El. Energiewandler
2/47

Institut für Elektrische
Energiewandlung • FB 18



Leistungsgrenzen von Drehstrom- Transformatoren

- Baugröße wird von der Leistung, aber auch der Hochspannung (Spannungsabstände !) bestimmt.
- Transport mit der Bahn erzwingt Einhaltung des **Bahnprofils**, daher: große Transformatoren als **Fünfschenkel-Transformator** gebaut.
- Bei 400 kV Oberspannung weltgrößte Einheitsleistungen ca. 1500 MVA, 50 Hz.
- Bei größeren Leistungen z. B. 1800 MVA: Drei Einphasentransformatoren je 600 MVA bilden eine „**Drehstrom-Bank**“ 1.8 GVA. Vorteil: Reservehaltung benötigt nur einen Einphasentrafo 600 MVA, nicht einen kompletten Drehstromtransformator.
- **Alternativ:** Zwei Drehstromtransformatoren 900 MVA parallel geschaltet, Reservehaltung: Ein Drehstromtransformator 900 MVA.





Auslieferung eines Großtransformators im Schnabelwagen: dahinter: Hochspannungsprüfhalle

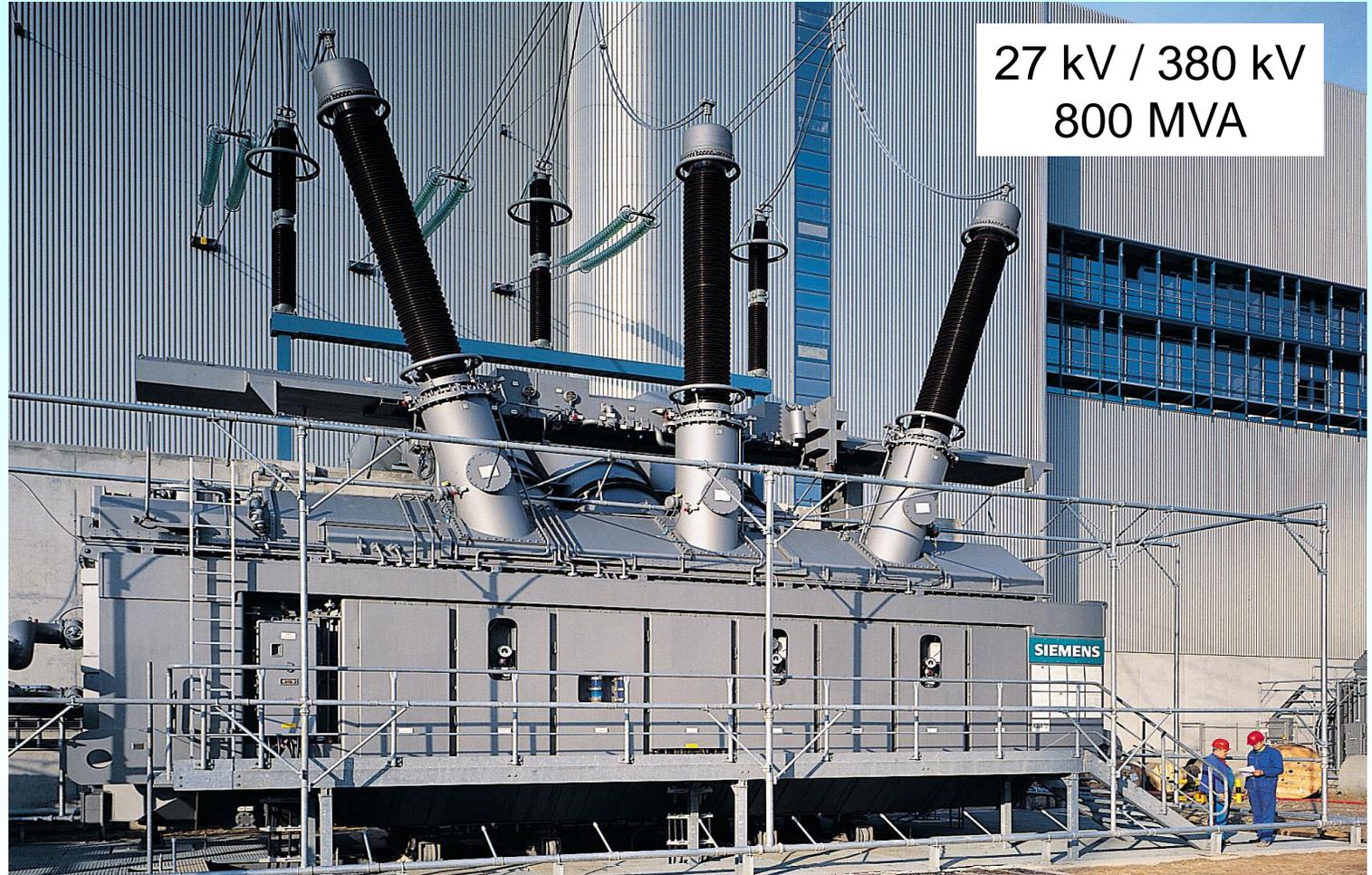
Schnabelwagen: ca. 20 Tonnen je Achse als Last, bei 32 Achsen: ca. 640 Tonnen max. Trafomasse
(Quelle: Werkfoto ELIN Transformatoren GmbH, Weiz, Österreich, jetzt: Siemens AG)



Blocktransformator in einem thermischen Kraftwerk

Blocktransformator im Kraftwerk: (Leistung = Generatorleistung). Die Generatorspannung 27 kV wird über den Transformator auf 380 kV hochgespannt

Braunkohle-
Kraftwerk
"Schwarze
Pumpe",
Deutschland

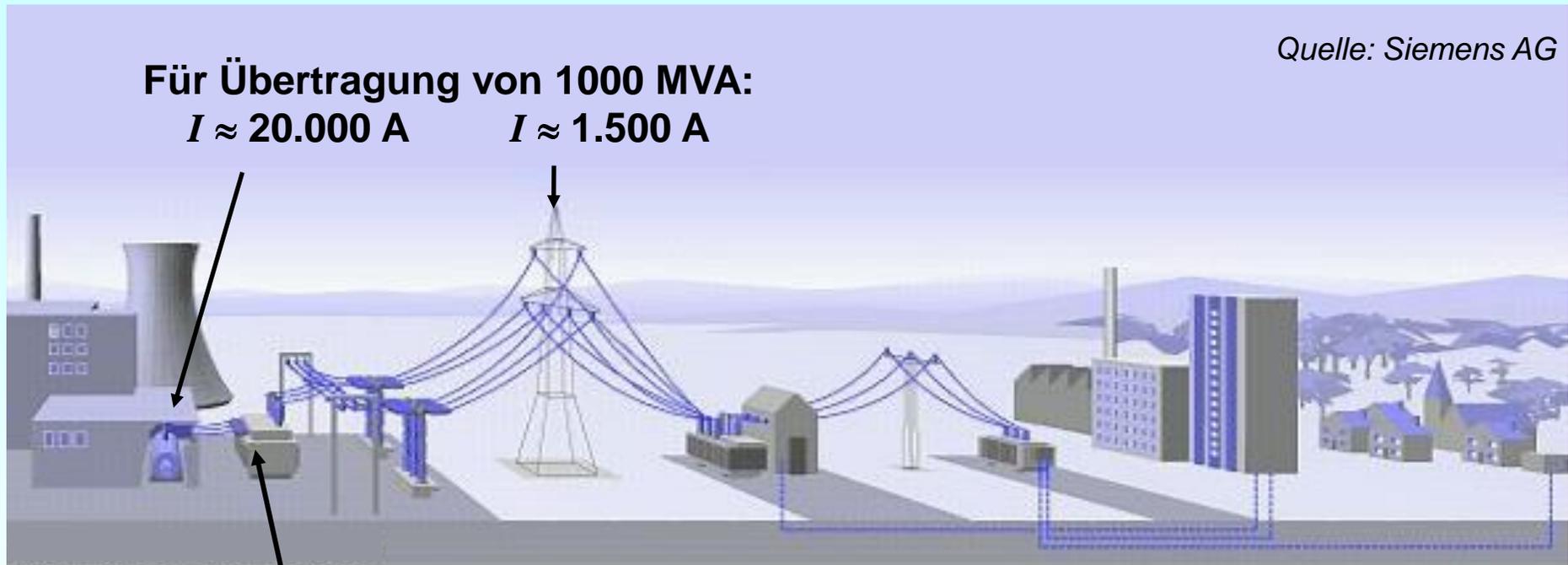


Quelle:
Siemens AG
Germany



Vom Erzeuger zum Verbraucher

Quelle: Siemens AG



13 kV ... 27 kV

110 kV ... 380 kV
 "Hoch- und Höchstspannung"

12 kV ... 36 kV
 "Mittelspannung"

0.4kV
 "Niederspannung"

Blocktransformator im Kraftwerk:

Transformiert Generatorspannung auf Netzspannung

$$S_N = \sqrt{3}U_{N1}I_{N1} = \sqrt{3} \cdot 27\text{kV} \cdot 21.4\text{kA} = 1000\text{MVA}$$

$$S_N = \sqrt{3}U_{N2}I_{N2} = \sqrt{3} \cdot 380\text{kV} \cdot 1520\text{A} = 1000\text{MVA}$$



Kühlung

- **Kühlung**

- **Öltransformatoren** in Kesseln mit Ölfüllung

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

- Öl wird in Radiatoren durch Luft rückgekühlt

- Luftbewegung (c) *natürliche Konvektion* (air natural) AN

- (d) *forcierte Luftströmung* durch Ventilatoren (air forced) AF

Daher Kombinationen ONAN, ONAF, OFAN, OFAF möglich!

- **Luftspulen- u. Gießharztransformatoren:** Luftkühlung: AN;
nur für kleinere Leistungen



Einphasen-Transformator einer Drehstrombank im Hochspannungs-Prüffeld, Hochspannungsprüfung

(Quelle: Werkfoto ELIN Transformatoren GmbH,
Weiz, Österreich, jetzt: Siemens AG)

Oil forced, air forced

OFAF



Elektrische Isolation

Öl:

- Durchschlagfeldstärke: ca. 3- bis 6-fach von reiner Luft:

$$U = E \cdot d = E' \cdot d' \Rightarrow E' = 6E : d' = d / 6 \quad \text{Wesentlich kleinere Spannungsabstände}$$

- Wicklungen sind durch Ölkanäle und ölgetränktes Isolationspapier isoliert
- Ölwanne unter dem Transformator zum Ölauffangen im Schadensfall
- Öl brennbar!: [Buchholz-Schutz = Schwimmer auf Öloberfläche mit ele. Kontakt](#):
Wenn Wicklungs-Störlichtbogen Öl verbrennt: Aufsteigende Brandgasblasen bewegen Ölschwimmer, schließen Kontakt → Alarmsignal

Gießharz, Luft (“Trockentransformatoren”):

- Einhaltung größerer Abstände zwischen spannungsführenden Teilen bei Gießharz- oder Luftisolation nötig.
- Einsatz bei niedrigen Spannungsniveaus bis ca. 30 kV, also kleineren Leistungen bis ca. 400 kVA (z. B. Verteiltrafos in Gebäuden)



Schadensfall: Ölbrand bei Leistungstransformatoren

- Leistungs-Transformatoren sind ölgefüllt und können im Falle eines internen Kurzschlusses leider auch brennen zum Glück äußerst selten!
- Früherkennung von Gasbildung durch *Buchholz*-Schutz



Quelle: Internet



Dreiphasen-Transformator in einem Umspannwerk (Freiluftschaltanlage)

(Quelle: Werkfoto ELIN Transformatoren GmbH, Weiz, Österreich, jetzt Siemens AG)



Wirkungsgrad η von Transformatoren

- **Leerverluste** $P_0 = P_{Fe} + P_{Kühl} + P_{Cu10}$

Ummagnetisierungsverluste P_{Fe} im geblechten Kern, Kühlungsverluste $P_{Kühl}$

Die Stromwärmeverluste P_{Cu10} sind **wegen des kleinen Leerlaufstroms I_{10}** sehr klein:

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

- **Lastverluste P_k** : Stromwärmeverluste $P_{Cu1} + P_{Cu2}$ in den Wicklungen !

- **Wirkungsgrad**: $\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{in} - P_d}{P_{in}}$ $P_d = P_0 + P_{Cu1} + P_{Cu2} \cong P_{Fe} + 3 \cdot (R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2)$

- **Transformatoren sind optimiert für *möglichst geringe Verluste P_d* , da sie**
 - nahezu **ständig unter Spannung** stehen (Leerverluste P_0 stets vorhanden)
 - und
 - die installierte Kraftwerksleistung bis zum Verbraucher ca. 4-mal in Transformatoren umge"spannt" wird.
- Typische Wirkungsgrade η : **ca. 97 %...99.5 %**.
Höhere Werte gelten für Großtransformatoren.



Energietechnik

Zusammenfassung Drehstromtransformatoren

- Kernbauform = Dreischenkeltyp
- Mantelbauform = Fünfschenkeltyp (für geringere Höhe)
- Koaxial angeordnete Primär- und Sekundärwicklungsspulen
- Niederspannungswicklung näher am geerdeten Eisenkern
- Luft- und ölgekühlte Transformatoren
- Leer- und Lastverluste für Wirkungsgradbestimmung
- Drehstrombank für größte Leistung = drei Einphasentransformatoren



2. Transformatoren

2.1 Funktionsprinzip des Einphasentransformators

2.2 Der Einphasentransformator bei Sinusspannungen

2.3 Bauformen von Einphasen-Transformatoren

2.4 Drehstromtransformatoren

2.5 Schaltungsvarianten von Drehstromtransformatoren

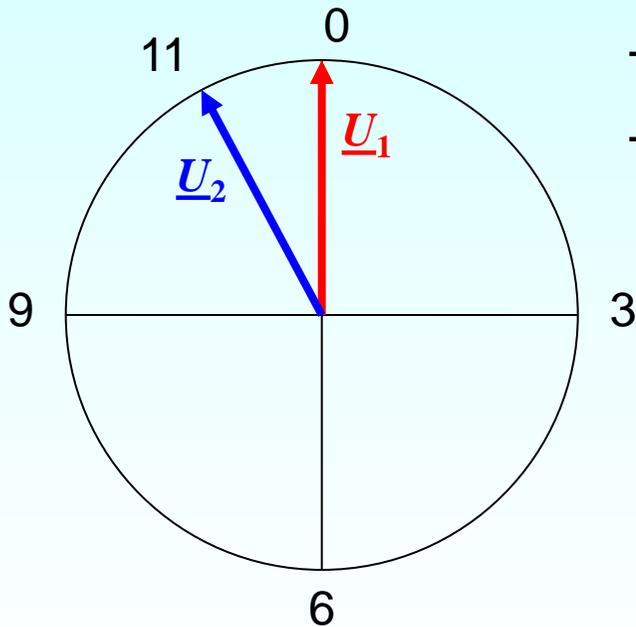
(2.6 Leistungsschildangaben bei Drehstromtransformatoren)

Stundenziffer

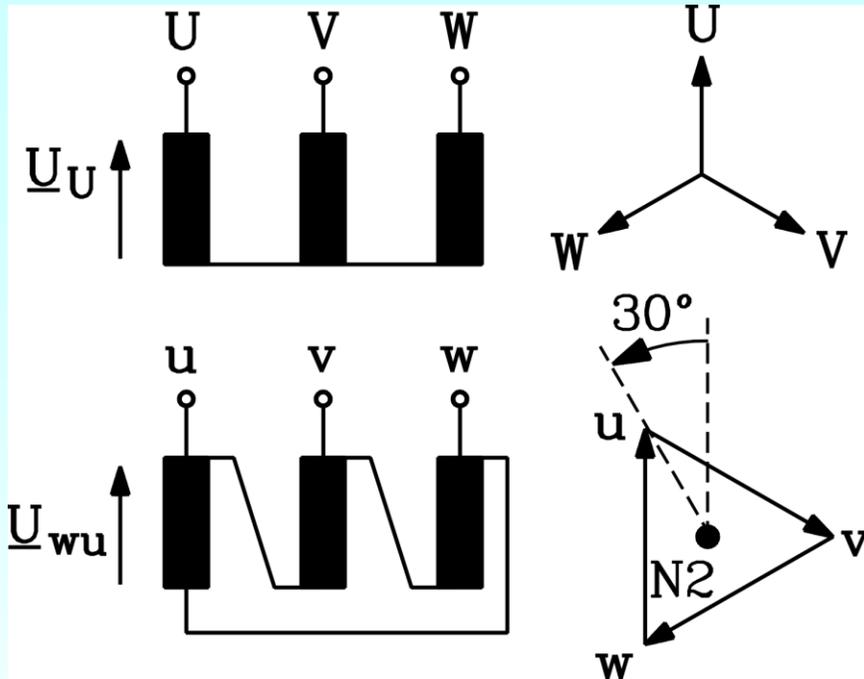
- Angabe der Phasenverschiebung zwischen Primär- und Sekundärspannung (in Schritten von 30° möglich) wie beim Uhr-Zifferblatt!

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“.



Schaltungsvarianten, Stundenziffer



- Die drei Stränge von Ober- und Unterspannungsseite können in **Stern-** (Y), **Dreieck-** (D) und **Zickzack** (Z) geschaltet werden.
- Spulenspannung \underline{U}_U (OS) und \underline{U}_u (US) am selben Schenkel in Phase od. Gegenphase (0° od. 180°). Phasenverschiebung zw. OS- und US-Strangspannung ermitteln, als Stundenziffer ausdrücken.
- **Übersetzungsverhältnis:** Ist allgemein das Verhältnis der verketteten OS- und US-Spannung. Es ist daher
 - a) durch die Windungszahlen UND
 - b) durch die Schaltgruppe bestimmt .

Beispiel:

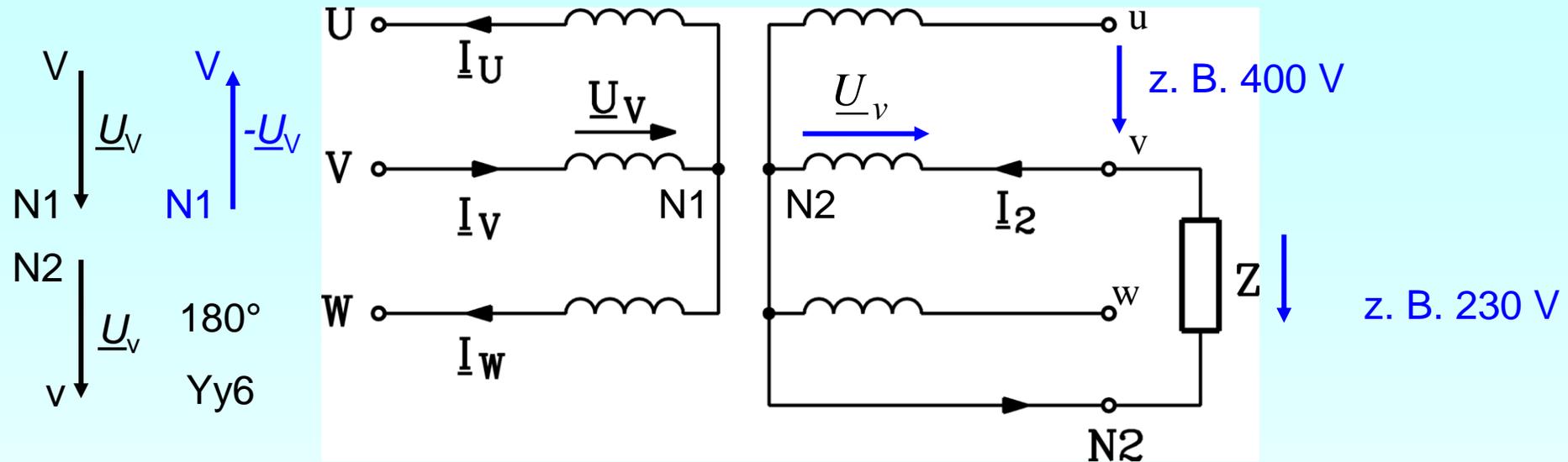
Schaltgruppe Yd11: “11”:

$$11 \times 30^\circ = 330^\circ$$

$$\ddot{u} = \frac{U_{1verk}}{U_{2verk}} = \frac{\sqrt{3}U_1}{U_2} = \sqrt{3} \cdot \frac{N_1}{N_2}$$



Einphasige Belastung eines Drehstromtransformators (1)



Schaltgruppe Yy6n: Strangspannung, gemessen von Sternpunkt zur Klemme: z. B.: N1-V oder N2-v: 180°! Phasenverschiebung = Stundenziffer 6

Beispiel: Schaltgruppe Yy6n: Sekundär **einphasig** belastet

IST TECHNISCH **NICHT** SINNVOLL!

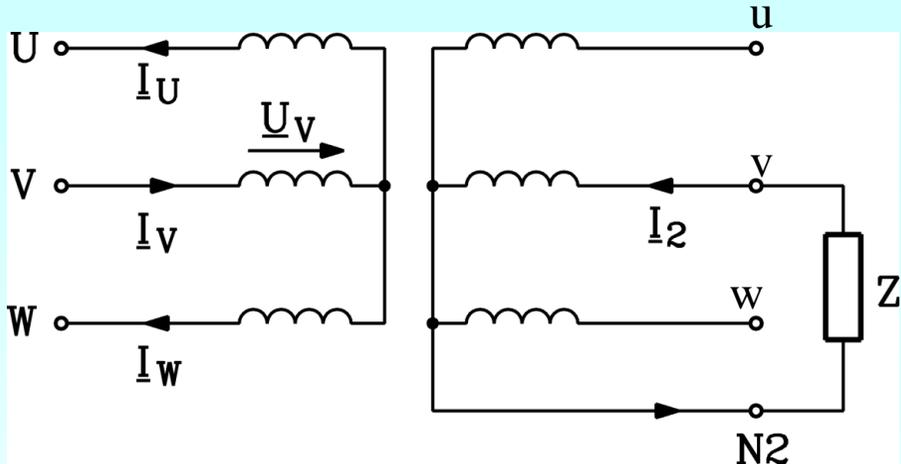
z. B.:

Verteiltransformator für Haushalte: verkettet 400 V, Strangspannung 230 V, z. B. in

Strang V Nennstrom gefordert: $I_V = I_{1N}$.



Einphasige Belastung eines Drehstromtransformators (2)



- Stromfluss in Strang U und W **nur in** Primärwicklung:
 $I_U = I_W = I_{Um} = I_{Wm} = I_V/2 = I_{1N}/2 \gg I_m \approx I_{1N}/100$
Strom viel höher als Nenn-Magnetisierungsstrom.
- Durchflutungssatz: $H_{Fe} = N_1 i_1 / s_{Fe}$
 in Schenkel U und W so hoch, dass das **Eisen enorm gesättigt** wird.
 - (a) μ_{Fe} sinkt auf ca. μ_0 !
 - (b) $L_h \sim \mu_{Fe} A / s_{Fe}$ wird **fast so klein** wie $L_{1\sigma}$
 - (c) Sekundär induzierte Spannung **zu klein**

$$\underline{I}_U = \underline{I}_W = \underline{I}_V / 2 \quad |\underline{I}_V| = I_{1N} = I'_2$$

Fazit:

Yy6n darf nicht einphasig belastet werden, da U sonst sekundär "zusammenbricht".



Einphasige Belastung eines Drehstromtransformators (3)

- Abschätzung der Spannung sekundär: ($L_{1\sigma} = L'_{2\sigma}$, $R_1 = R'_2 = 0$)

a) Symmetrische 3-Phasenlast

$$L_h = 1000L_{1\sigma}$$

$$\frac{U_h}{U_1} = \frac{1000}{1001} \approx 1$$

Kein Spannungseinbruch

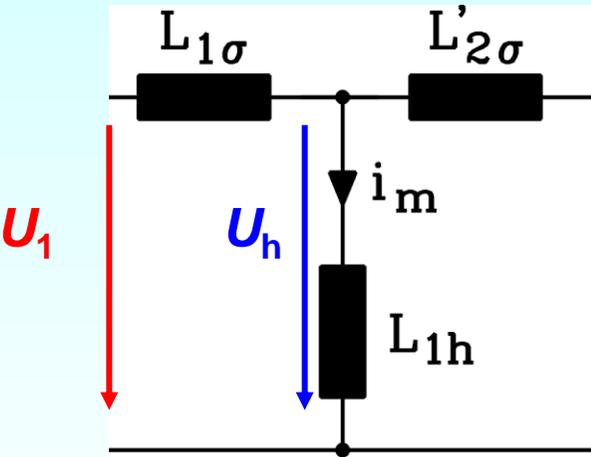
b) Einphasige Belastung Yy

$$L_h = 2L_{1\sigma}$$

$$\frac{U_h}{U_1} = \frac{L_h}{L_h + L_{1\sigma}}$$

$$\frac{U_h}{U_1} = \frac{2}{3} = 0.66$$

33% Spannungseinbruch



Schaltgruppen für einphasige Belastung des Drehstromtransformators

- Welche Schaltgruppen dürfen einphasig belastet werden ?
- Alle Schaltungen, wo stets je Strang Primär- und Sekundärspule stromdurchflossen sind (“Durchflutungsausgleich”), so dass je Schenkel der Nenn-Magnetisierungsstrom auftritt.
- Beispiele: Verteiltransformatoren für Haushalte: Sekundär **einphasig** belastet
 - a) Schaltgruppe Dy5n
 - b) Schaltgruppe Yz5n



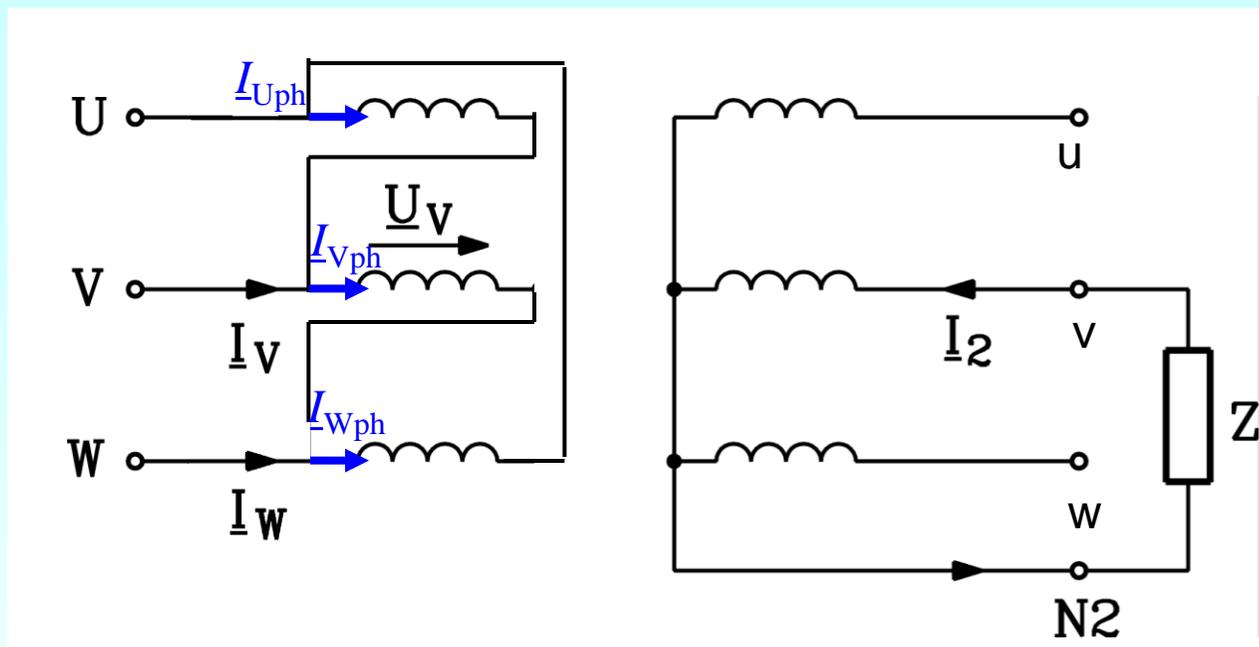
Einphasige Belastung bei Dreieckschaltung

$$I_V = I_W = I_{1N}$$

$$I_{Uph} = I_{mN} \ll I_{1N}, I_{Uph} \approx 0$$

$$I_{Vph} = I_{1N}$$

$$I_{Wph} = I_{mN} \ll I_{1N}, I_{Wph} \approx 0$$



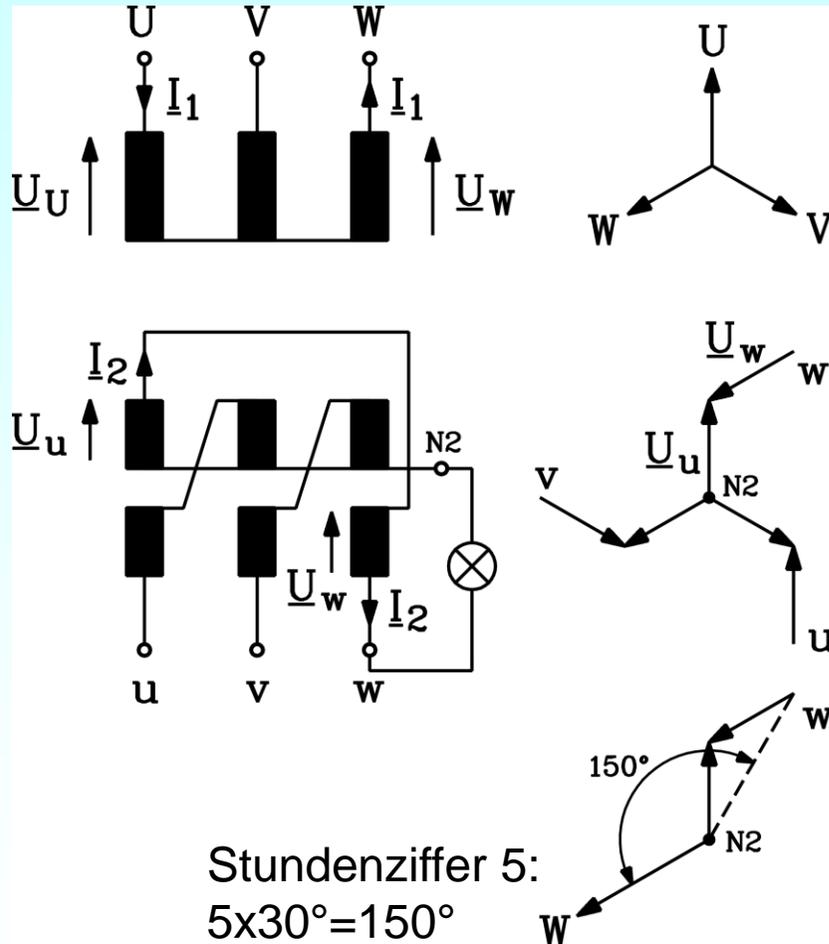
Beispiel: Schaltgruppe Dy5n: Sekundär **einphasig** belastbar, da der Eisenschenkel V über die Primärwicklung und die Sekundärwicklung im Durchflutungsausgleich ist.

Der Primär-Strom \underline{I}_V fließt als Strom $\underline{I}_W = -\underline{I}_V$ über die D-Schaltung ab, ohne den Schenkel U zu magnetisieren!

Daher: **TECHNISCH SINNVOLL**, weil kein Spannungszusammenbruch !

Einphasige Belastung bei Zickzackschaltung

$$I_V = I_{mN} \ll I_{1N}, \text{ ca. } 0$$



- **Beispiel:** Schaltgruppe Yz5n: Sekundär **einphasig** belastet (Verteiltransformator für Haushalte).

- Strangspannung 230 V: z. B. zwischen N2 und w
- Nennstrom gefordert: $I_w = I_{2N}$.
- Schenkel U und W ober- und unterspannungsseitig bestromt, Schenkel V stromlos.

→ **KEIN Spannungszusammenbruch sekundär !**

Typische Schaltungen der Wicklungen von dreiphasigen Transformatoren

U, V, W: Oberspannung (OS)

u, v, w: Unterspannung (US)

Y: Sternschaltung OS

D: Dreieckschaltung OS

y: Sternschaltung US

d: Dreieckschaltung US

z: Zickzackschaltung US

Quelle: Kleinrath, H.:
Elektrische Maschinen,
Studententext, 1972

ACHTUNG: Die genormten Klemmenbezeichnungen verwenden nur Großbuchstaben!

1U, 1V, 1W: Oberspannung (OS)

2U, 2V, 2W : Unterspannung (US)

		Y y 0
		Y y 6
		Y d 5
		Y z 5
		D d 0
		D y 5
		D y 11
		D z 6



Energietechnik

Zusammenfassung

Schaltungsvarianten von Drehstromtransformatoren

- Stundenziffer als Angabe der Phasenverschiebung zwischen Primär- und Sekundärspannung
- Stern-, Dreieck- und Zickzackschaltung führen zu Schaltgruppen
- Y-y-Schaltgruppe für einphasige Belastung ungeeignet (kein Durchflutungsausgleich = hohe Eisensättigung)
- Übersetzungsverhältnis durch Windungszahlen UND Schaltgruppe bestimmt!

