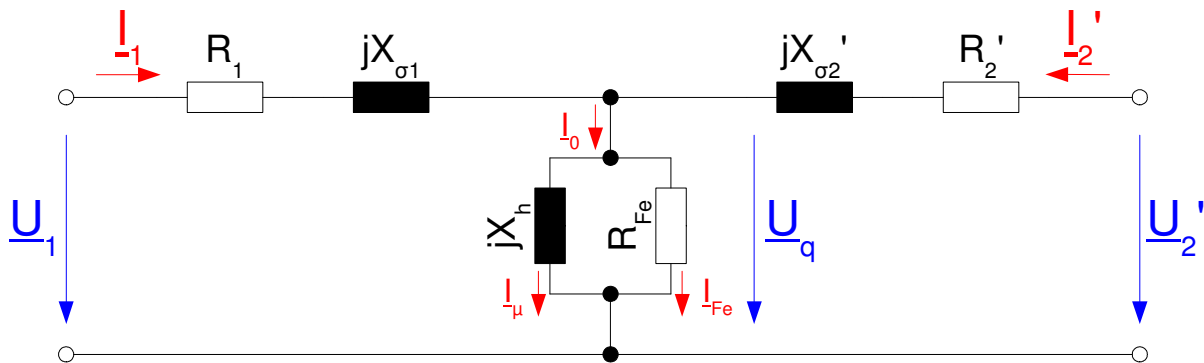


Ersatzschaltbilder und Zeigerdiagramme des einphasigen Transformators

1) Vollständiges T-Ersatzschaltbild, Grundformeln



U_1	Primärspannung	R_1	Wicklungswiderstand primär
U_2	Sekundärspannung	R_2	Wicklungswiderstand sekundär
U_q	Quellenspannung	X_h	Hauptinduktivität
I_1	Primärstrom	R_{Fe}	Eisenverlustwiderstand
I_2	Sekundärstrom	$X_{\sigma 1}$	Streureaktanz primär
I_0	Leerlaufstrom	$X_{\sigma 2}$	Streureaktanz sekundär
I_μ	Magnetisierungsstrom	Φ_h	Hauptfluss
I_{Fe}	Eisenverluststrom	Φ_σ	Streulfluss

Spannungsgleichung

$$\underline{U}_1 = R_1 I_1 + jX_{1\sigma} I_1 + jX_h (I_1 + I_2')$$

$$\underline{U}_2' = R_2' I_2' + jX_{2\sigma}' I_2' + jX_h (I_1 + I_2')$$

Leerlaufstrom

$$I_0 = I_1 + I_2'$$

$$I_0 = I_\mu + I_{Fe}$$

$$\ddot{u} = \frac{N_1}{N_2} \quad U_2' = U_2 \cdot \frac{N_1}{N_2} \quad R_2' = R_2 \cdot \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad R_1 \approx R_2'$$

$$I_2' = I_2 \cdot \frac{N_2}{N_1} \quad X_{2\sigma}' = X_{2\sigma} \cdot \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad X_{1\sigma} \approx X_{2\sigma}'$$

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

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

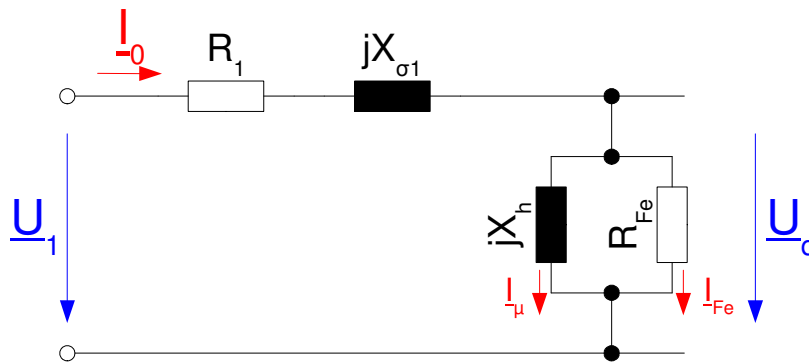
$$\Phi_h(t) = \Phi_h \cdot \sin(\omega t)$$

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

- Die Bemessungsspannung ist laut VDE primärseitig die für die Auslegung zugrundegelegte Spannung, sekundärseitig die Leerlaufspannung

Ersatzschaltbilder und Zeigerdiagramme des einphasigen Transformators

2) Leerlauf

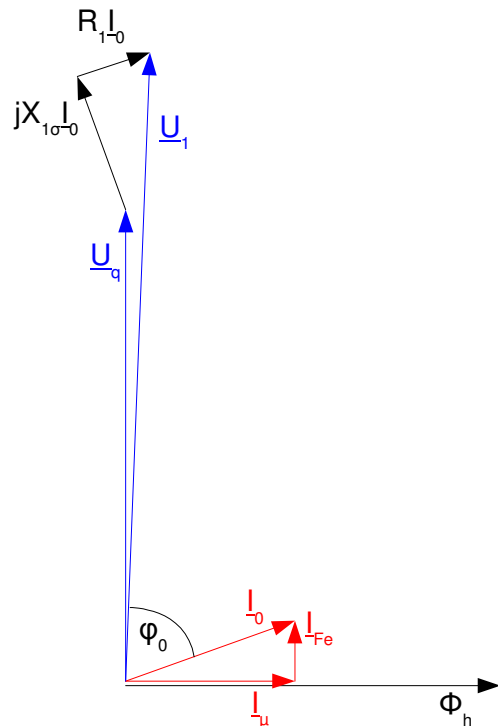


$$\underline{U}_1 = R_1 I_0 + jX_{1\sigma} \cdot I_0 + U_q$$

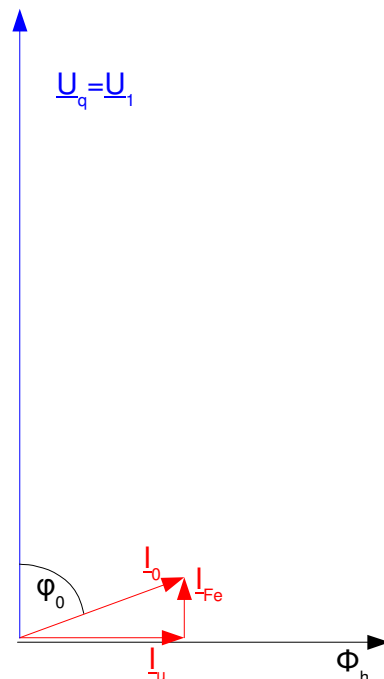
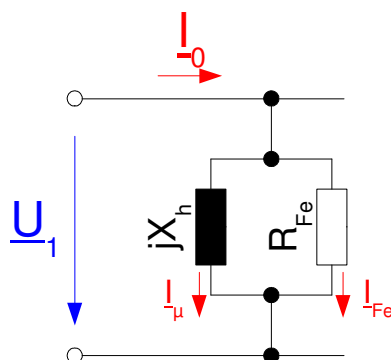
$$I_0 = I_{\mu} + I'_{Fe}$$

$$\varphi > 70^\circ$$

- Der Leerlaufstrom dient hauptsächlich der Magnetisierung und enthält eine kleine ohmsche Komponente zur Deckung der Eisenverluste (ca. 10%)
- Der Leerlaufstrom hat einen Anteil von 1-5% am Bemessungsstrom. Der geschlossene Eisenkern (kein Luftspalt) hält den Magnetisierungsstrom klein.



Vereinfachung:



Ersatzschaltbilder und Zeigerdiagramme des einphasigen Transformators

3) Belastung

$$I_0 = I_1 + I_2' \quad \text{und} \quad I_0 \approx I_\mu$$

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

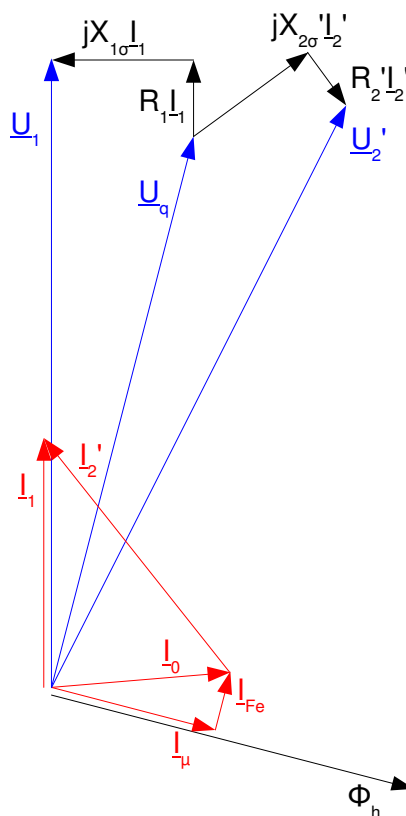
Primäre und sekundäre Wicklung bilden gemeinsam die Magnetisierungsdurchflutung zur Erzeugung des Hauptfeldes.

$$N_1 I_\mu \approx N_1 I_1 + N_2 I_2'$$

ohmsche Belastung

$$\underline{U}_1 = R_1 I_1 + jX_{1\sigma} I_1 + \underbrace{jX_h (I_1 + I_2')}_{\underline{U}_q}$$

$$\underline{U}_2' = R_2' I_2' + jX_{2\sigma}' I_2' + \underbrace{jX_h (I_1 + I_2')}_{\underline{U}_q}$$



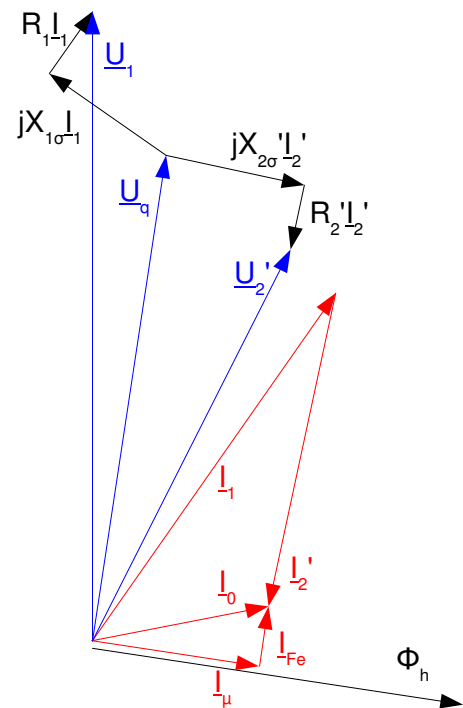
Ersatzschaltbilder und Zeigerdiagramme des einphasigen Transformators

3) Belastung (Forts.)

ohmsch-induktive Belastung

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

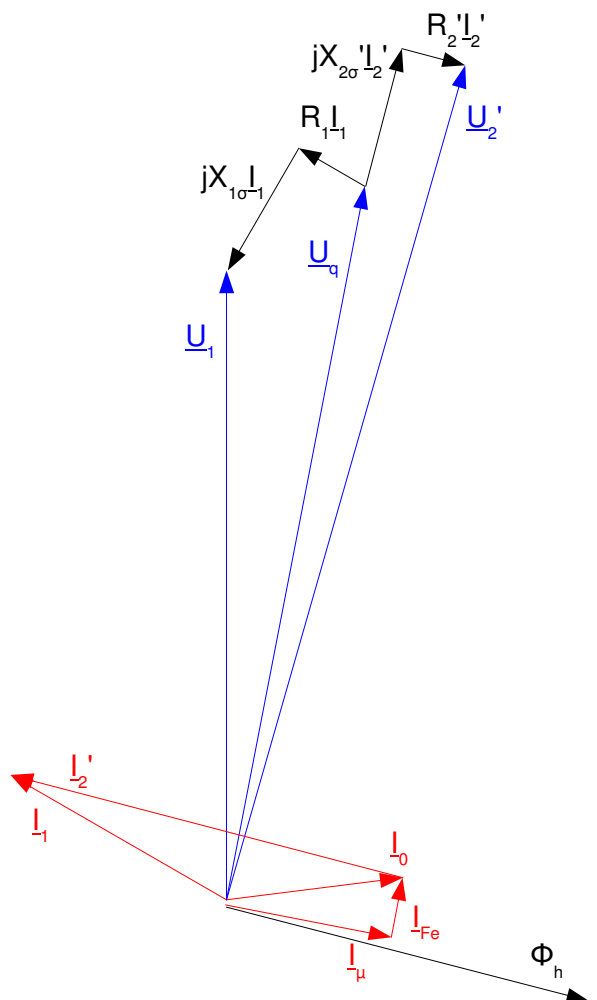
$$\underline{U}'_2 = R'_2 \underline{I}'_2 + jX'_{2\sigma} \underline{I}'_2 + \underbrace{jX_h (\underline{I}_1 + \underline{I}'_2)}_{\underline{U}_q}$$



ohmsch-kapazitive Belastung

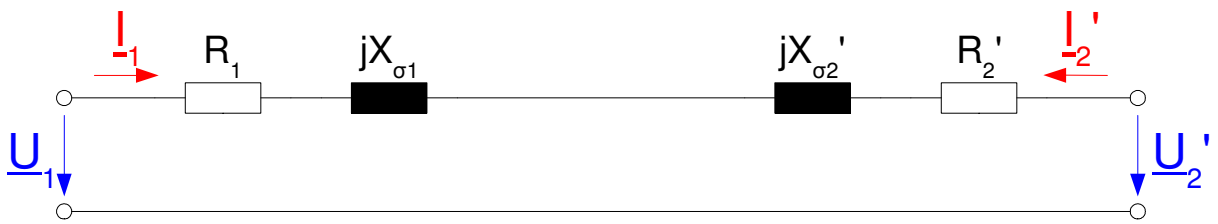
$$\underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + jX_{1\sigma} \underline{I}_1 + \underbrace{jX_h (\underline{I}_1 + \underline{I}'_2)}_{\underline{U}_q}$$

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



Ersatzschaltbilder und Zeigerdiagramme des einphasigen Transformators

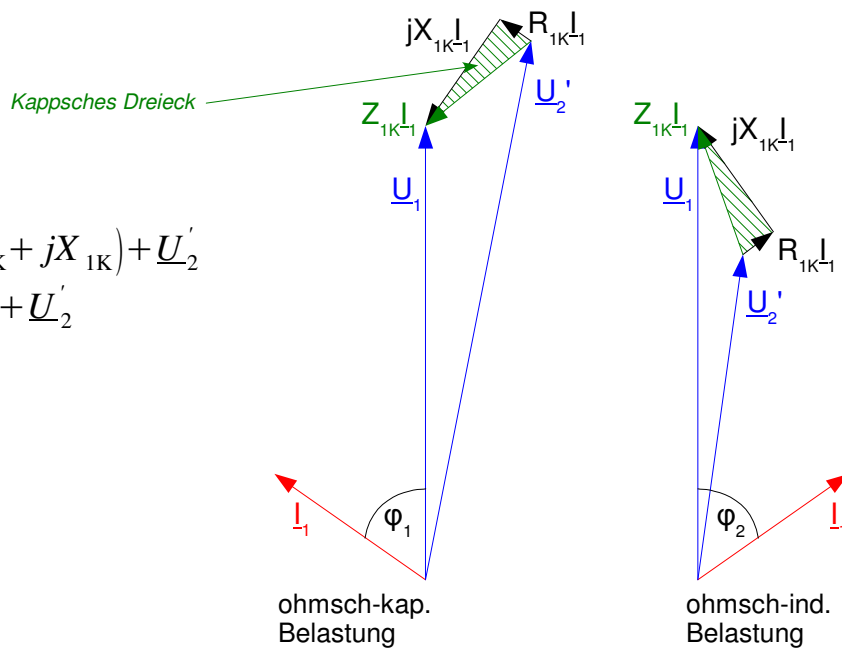
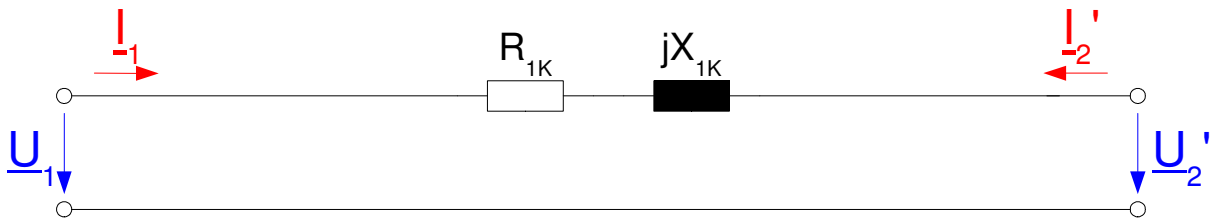
4) Vereinfachtes Ersatzschaltbild für Belastung



$$I_1 = -I_2'$$

$$R_{1K} = R_1 + R_2'$$

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



$$\underline{U}_1 = I_1 \cdot (R_{1K} + jX_{1K}) + \underline{U}_2'$$

$$= I_1 \cdot Z_{1K} + \underline{U}_2'$$

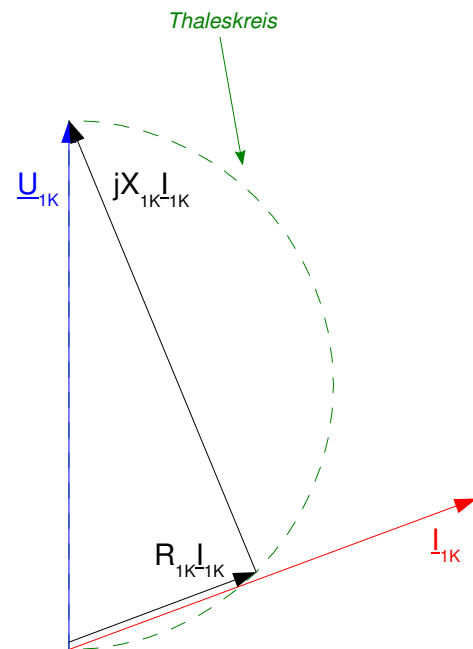
Ersatzschaltbilder und Zeigerdiagramme des einphasigen Transformators

5) Kurzschluss

$$\underline{U}'_2 = 0$$

$$\underline{U}_{1K} = R_{1K} I_{1K} + jX_{1K} I_{1K}$$

$$Z_{1K} = \sqrt{R_{1K}^2 + X_{1K}^2}; \quad \tan \varphi_K = \frac{X_K}{R_K}$$



Kurzschlussversuch

Die **Kurzschlussspannung** U_K ist eine wichtige Kenngröße. Sie ist die Spannung, die an einen Transformator mit kurzgeschlossener Sekundärwicklung angelegt werden muss, damit der Bemessungsstrom fließt.

Die **relative Kurzschlussspannung** u_K ist auf die Bemessungsspannung bezogen.

$$U_{1K} = I_{1N} \cdot Z_{1K}$$

$$u_K = \frac{U_{1K}}{U_{1N}} = \frac{I_{1N} \cdot Z_{1K}}{U_{1N}} = \frac{Z_{1K}}{U_{1N} / I_{1N}} \approx 0,04 \dots 0,12$$

$$\text{wenn } U_{1K} = U_{1N} \rightarrow I_{1K} = \frac{U_{1N}}{Z_{1K}}$$

$$\frac{I_{1K}}{I_{1N}} = \frac{U_{1N}}{Z_{1K} \cdot I_{1N}} = \frac{1}{u_K} \Rightarrow I_{1K} (u_K = 4\%) = 25 \cdot I_{1N}$$

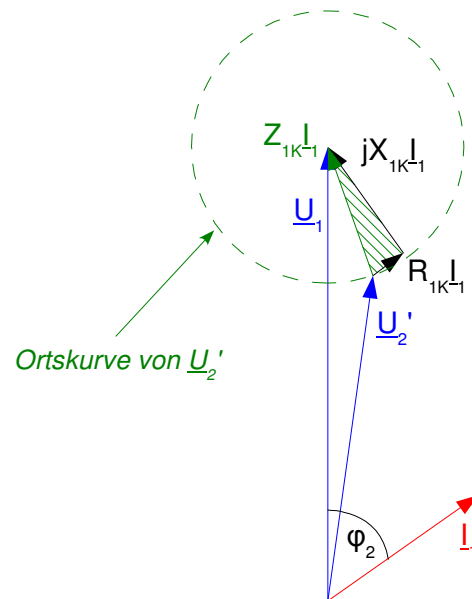
Ersatzschaltbilder und Zeigerdiagramme des einphasigen Transformators

6) Spannungsänderung

Die beiden Klemmenspannungen \underline{U}_1 und \underline{U}_2' unterscheiden sich durch ein Spannungsdreieck, das als *Kappsches Dreieck* bezeichnet wird. Dieses Dreieck hat für einen bestimmten Stromwert konstante Größe und rotiert lediglich - je nach Phasenlage des Stromes - um die Spitze der Primärspannung.

Für konstante Belastung und beliebigen Leistungsfaktor $\cos \varphi$ ergibt sich also als Ortskurve des Zeigers \underline{U}_2' ein Kreis um die Primärspannung \underline{U}_1 , welcher den Radius r besitzt.

$$r = I_1 \cdot Z_{1K} = I_1 \cdot \sqrt{R_{1K}^2 + X_{1K}^2}$$



Der Unterschied zwischen \underline{U}_1 und \underline{U}_2' wird als Spannungsänderung $U_{1\varphi}$ bezeichnet, diese ist laut VDE definiert als Unterschied zwischen Leerlauf- und Vollastspannung auf der Abgangsseite bei I_{2N} .

Die relative Spannungsänderung $u_{1\varphi}$ ist auf die Bemessungsspannung bezogen.

$$U_{1\varphi} = U_1 - U_2'$$

$$u_{1\varphi} = \frac{U_1 - U_2'}{U_1} = 1 - \frac{U_2'}{U_1}$$

$$\begin{aligned} u_{1\varphi} &= \frac{I_1}{I_{1N}} \cdot \left(\frac{R_{1K}}{Z_N} \cdot \cos \varphi \pm \frac{X_{1K}}{Z_N} \cdot \sin \varphi \right) \\ &= \frac{I_1}{I_{1N}} \cdot \left(u_R \cdot \cos \varphi \pm u_X \cdot \sin \varphi \right) \end{aligned}$$

$$\text{mit } Z_N = \frac{U_{1N}}{I_{1N}}$$

Nennimpedanz, Basisimpedanz

- + für induktive Belastung
- für kapazitive Belastung