



Technische
Universität
Braunschweig

Grundlagen der elektrischen Energietechnik

Teil 1: Grundlagen der Energieversorgung

- Transformator -

Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel | elenia Institut für Hochspannungstechnik und Energiesysteme | 11.04.2024

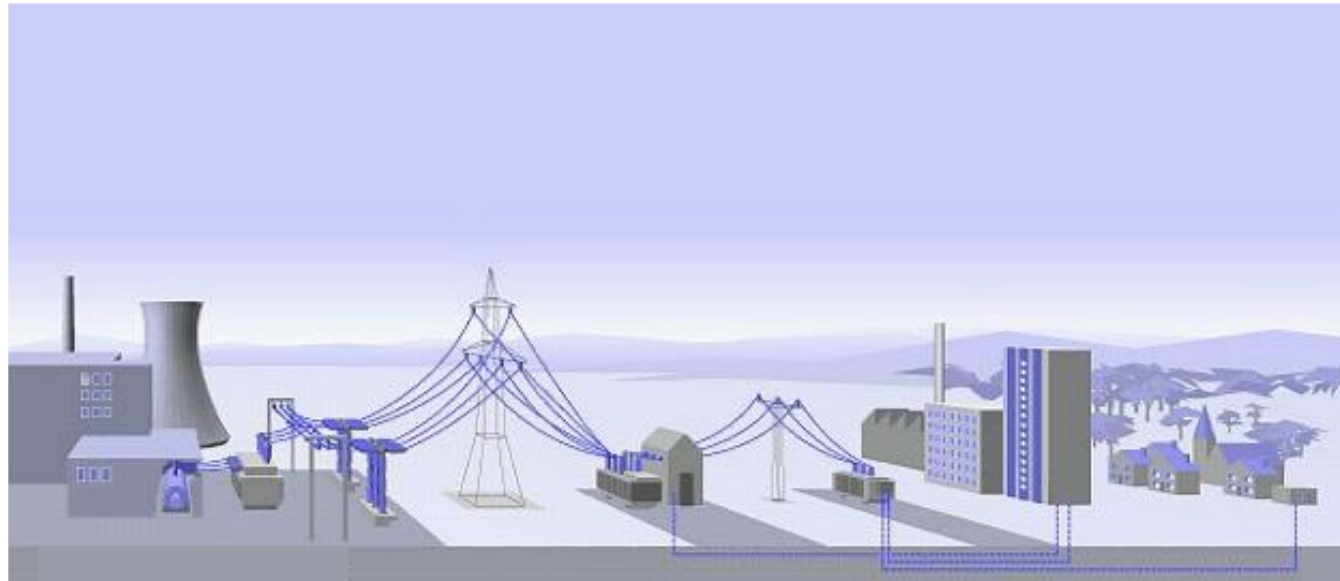
Drehstromtransformator



Vorlesung:
Elektrische Anlagen und Netze

Lernziele:

- Kennenlernen des Aufbaus von Drehstrom-Leistungstransformatoren
- Beherrschen des Trafo-Ersatzschaltbildes
- Ermittlung des Zeigerdiagramms für den Leistungsbetrieb



Agenda

- 1 | Allgemeines
- 2 | Transformator
Ersatzschaltbild
- 3 | Zeigerdiagramm

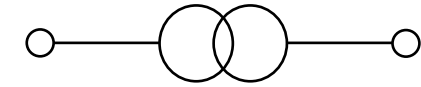


1 | Allgemeines

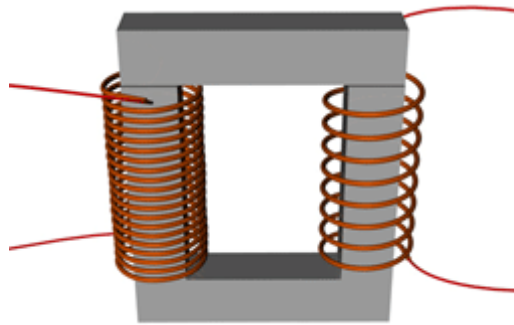
Transformator

Was ist das?

Transformatoren werden dazu verwendet, Spannungen umzuformen (immer) und dadurch zwei unterschiedliche Spannungsebenen miteinander zu verbinden (Ausnahme: Regler).



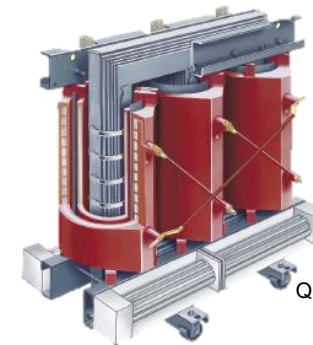
Zweiwicklungstransformator



Quelle: phynet.de

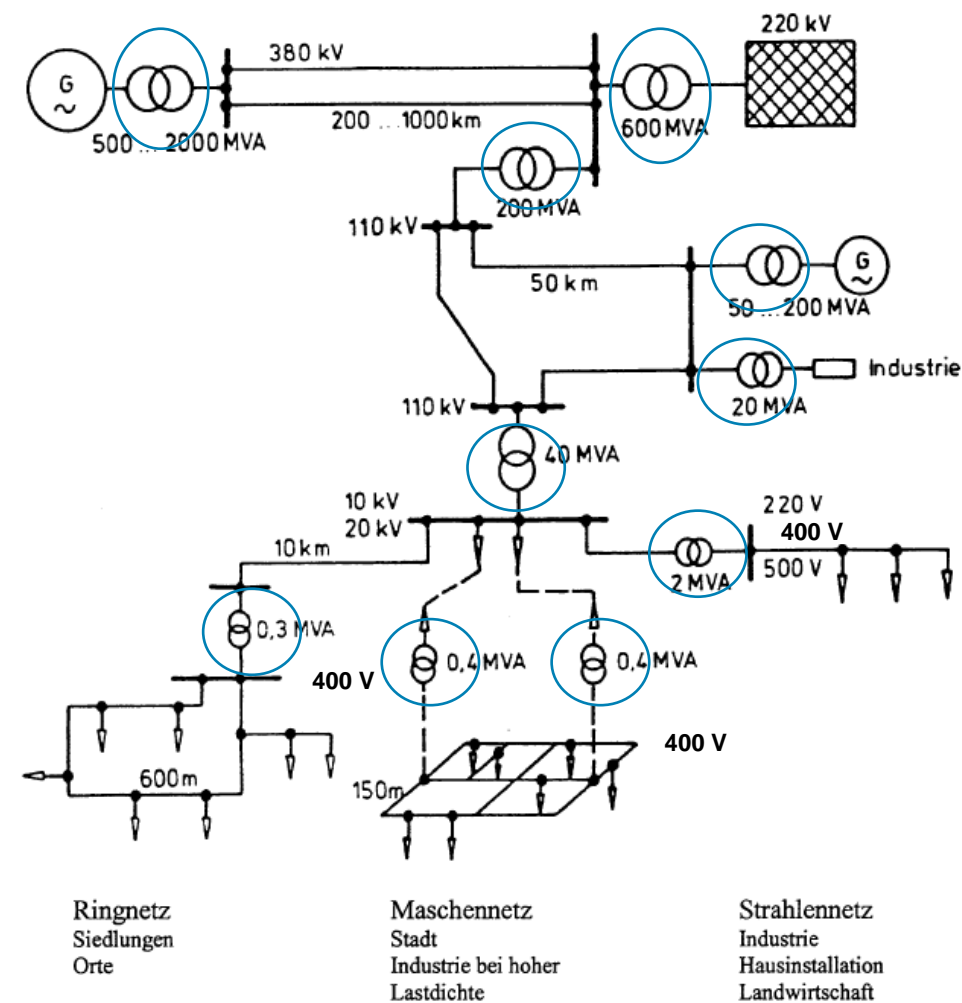
- Ein Transformator besteht aus mind. zwei Wicklungen, die über einen Eisenkern magnetisch gekoppelt sind.
- Volltransformator: Wicklungen sind galvanisch getrennt; häufiger Einsatz von Zwei- oder Dreiwicklungstransformatoren
- Spartransformator: mind. zwei Wicklungen haben einen gemeinsamen Teil (keine galvanische Trennung)

- Transformatoren weisen sehr geringe Verluste auf. Der Wirkungsgrad bei großen Einheiten (ab ca. 200 MVA) liegt bei etwa 99,5 %. Das ist ihr großer Vorteil gegenüber allen anderen Formen der Spannungsänderung.



Quelle: Schwab, 2017

Elektrische Energieversorgung Drehstromtransformatoren



Leistungstransformatoren

Höchstspannungsdurchführungen

Sammelschienen

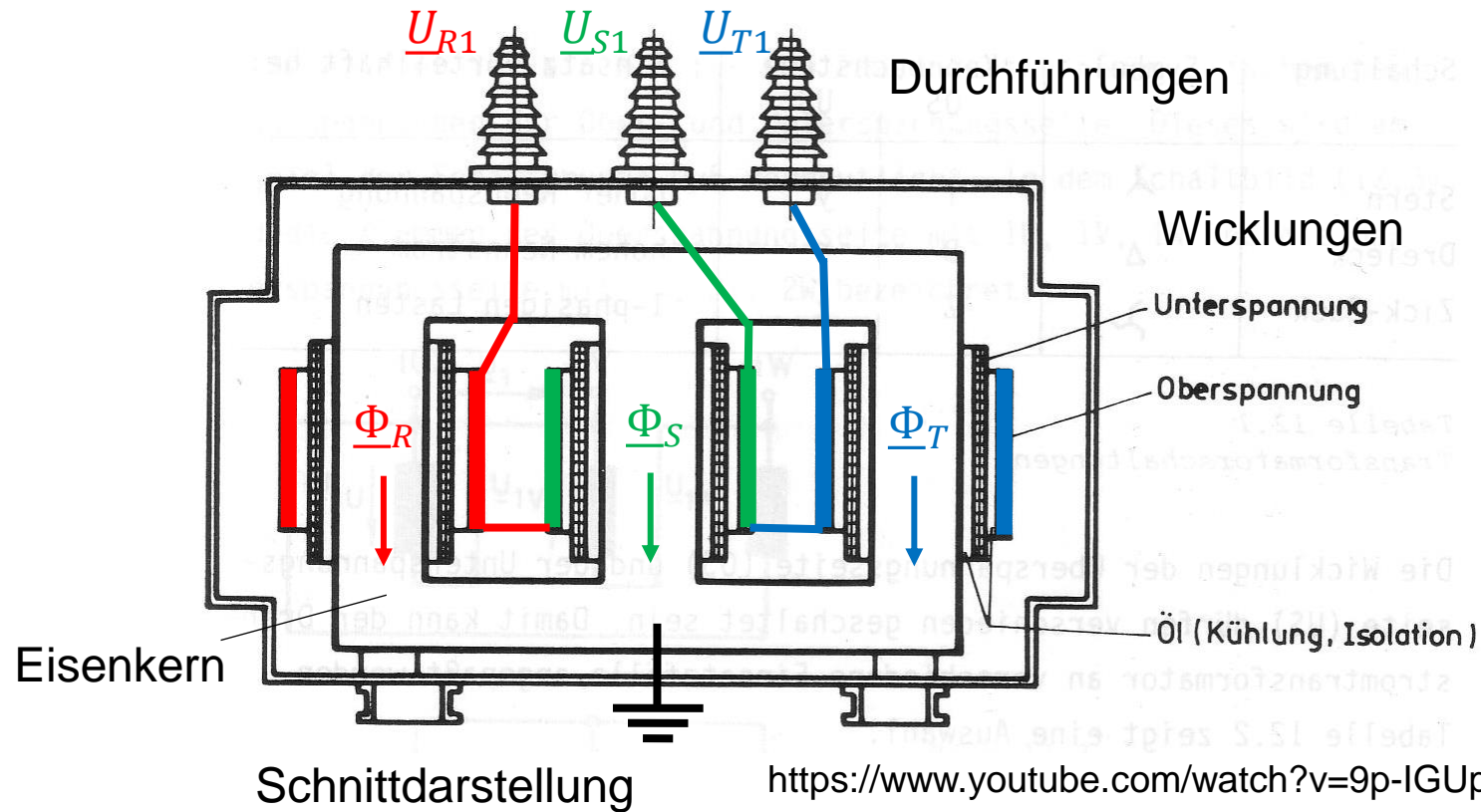


Hochspannungsdurchführungen

www.new.Siemens.com

Aufbau von Drehstromtransformatoren

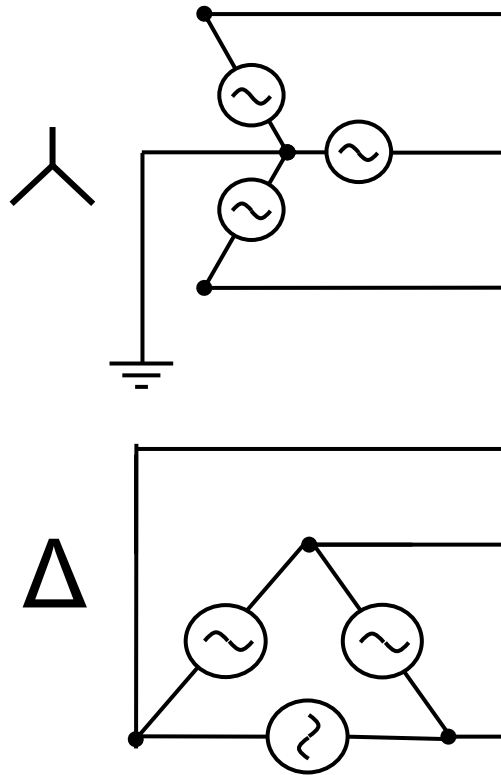
Der Drehstromtransformator besitzt einen Eisenkern mit drei Schenkeln. Jeder Schenkel besitzt eine Primär- und Sekundärwicklung. Ein ölgefülltes, luftdichtes Stahlblechgehäuse beinhaltet das Aktivteil, das aus Kern und Wicklungen besteht. Hochspannungsdurchführungen ermöglichen den äußeren Anschluss der Wicklungen.



<https://www.youtube.com/watch?v=9p-IGUpvwvs>

Drehstromtransformator-Schaltungen

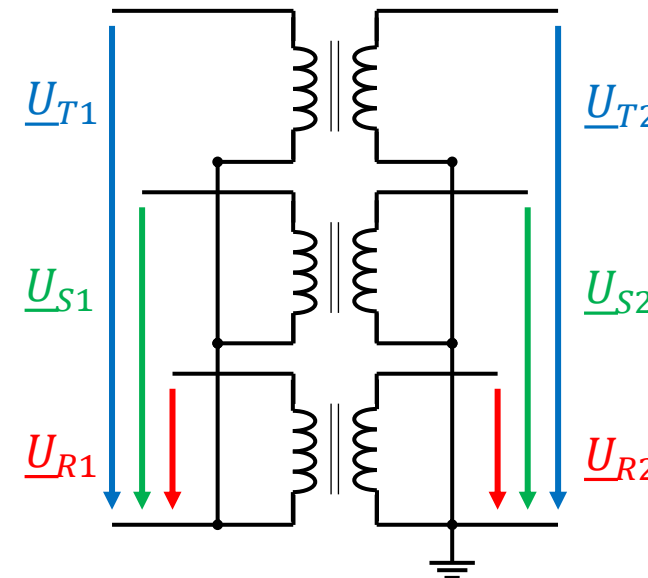
Die Wicklungen arbeiten als Spannungsquellen und können in Stern- oder Dreieckschaltung ausgeführt werden. Primär- und Sekundärseite können unterschiedlich geschaltet sein.



Beispiel für Sternschaltung mit Sternpunkt
Leiter-Erd-Spannungen

Primärseite
Oberspannung

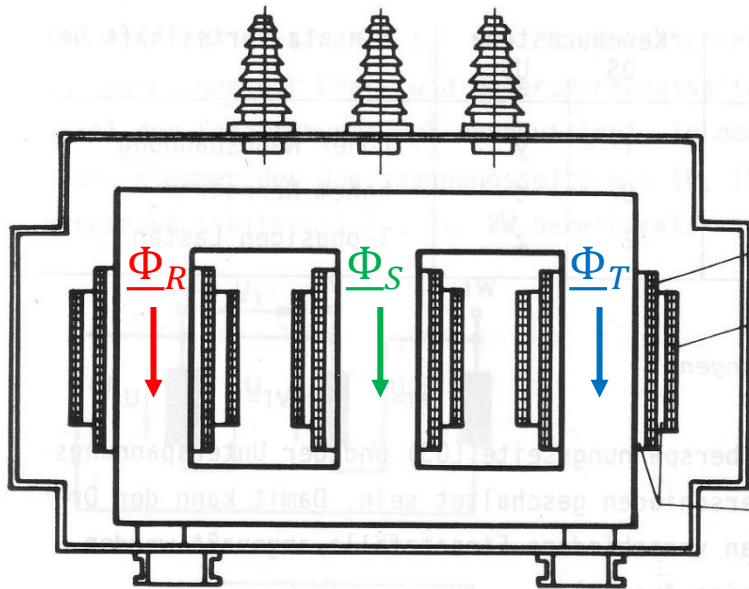
Sekundärseite
Unterspannung



Drehstromtransformator-Schaltungen

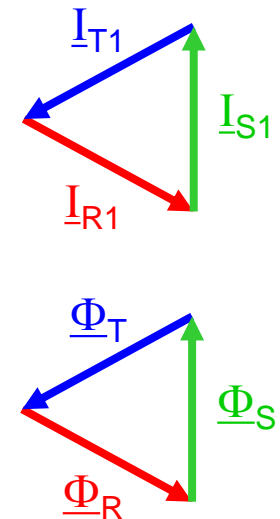
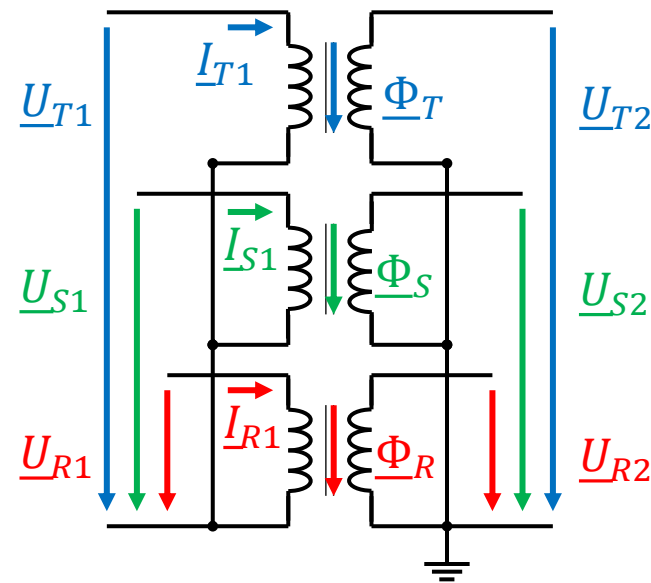
Die Symmetrie des Drehstromsystems überträgt sich auf die magnetischen Flüsse. Der Kern wird aus geschichteten, dünnen, gestanzten und isolierten Dynamoblechen zur Reduzierung der Eisenverluste aufgebaut.

$$\begin{aligned}\underline{\Phi}_R &= L \cdot \underline{I}_R & \underline{I}_R + \underline{I}_S + \underline{I}_T &= 0 \\ \underline{\Phi}_S &= L \cdot \underline{I}_S & \underline{\Phi}_R + \underline{\Phi}_S + \underline{\Phi}_T &= 0 \\ \underline{\Phi}_T &= L \cdot \underline{I}_T\end{aligned}$$



Primärseite
Oberspannung

Sekundärseite
Unterspannung



Transformator-Modell

Ist das Drehstromsystem symmetrisch, kann der Drehstrom-Transformator in drei einphasige Transformatoren zerlegt werden. Damit wird immer die Sternschaltung verwendet und die Leiter-Erd-Spannung und die Außenleiterströme für die einphasige Berechnung verwendet.

Für den idealen Transformator sind Spannungen, Ströme und Impedanzen an das Windungszahlverhältnis gekoppelt

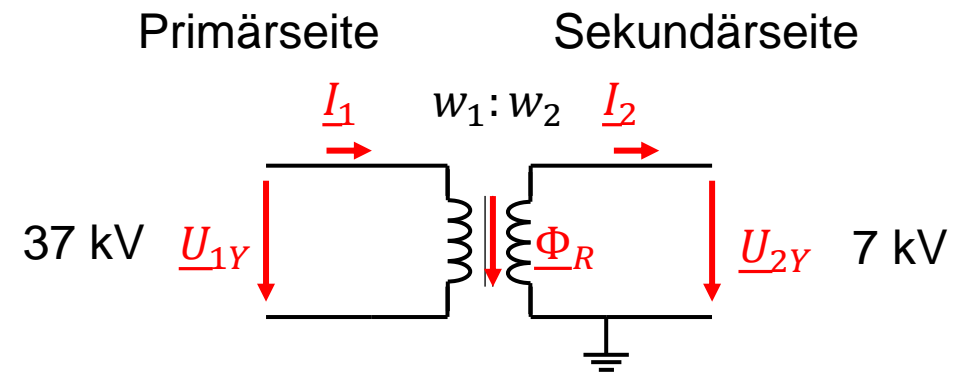
$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{w_2}{w_1}$$

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2$$

$$\frac{P_1}{P_2} = 1$$

$$\text{Rechnung } \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{U_1}{I_1} \bigg/ \frac{U_2}{I_2} = \frac{U_1}{U_2} \bigg/ \frac{I_1}{I_2}$$



Windungszahlen $w_1:w_2$

Beispiel 40 MVA Trafo

64 kV : 12 kV

210 A : 1100 A

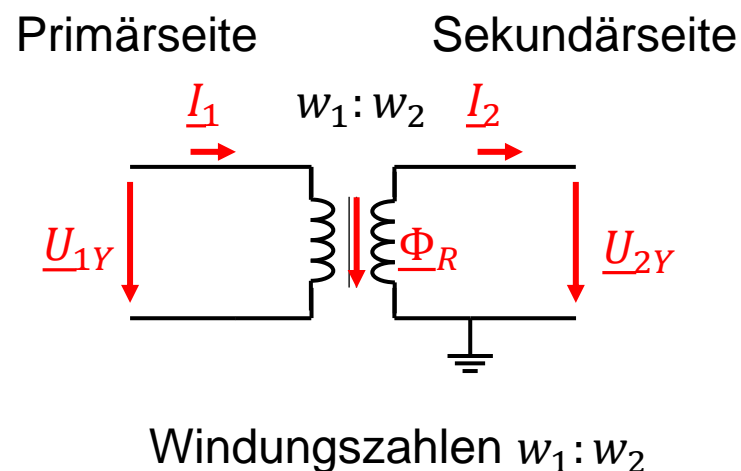
typ. eff. Windungsspannung 2 V



Lerneinheit

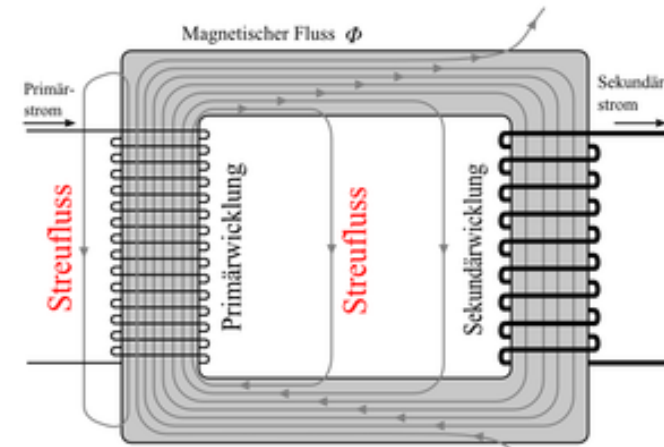
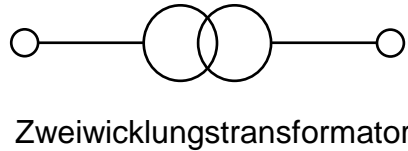
Ein Drehstromtransformator 110 kV/ 20 kV versorgt das Mittelspannungsnetz bei einer Betriebsspannung von 20 kV mit einer Wirkleistung von 17 MW.

- Bestimmen Sie bitte den Außenleiterstrom auf der Sekundärseite
- Berechnen Sie den Außenleiterstrom auf der Primärseite über das Windungszahlverhältnis



2 | Ersatzschaltbild

Der einphasige Zweiwicklungstransformator

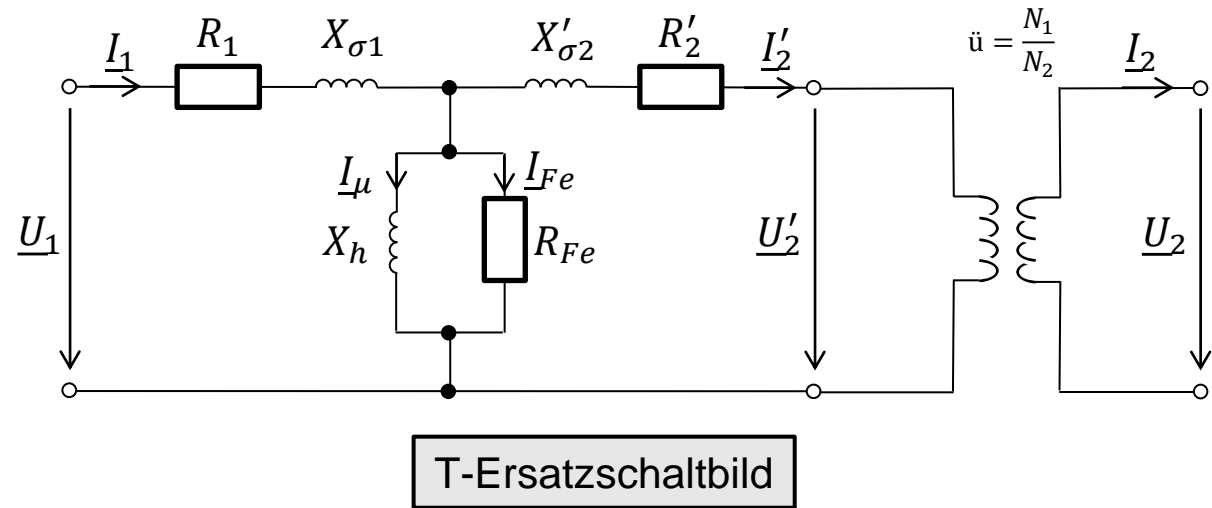


Quelle: physik.cosmos-indirekt.de

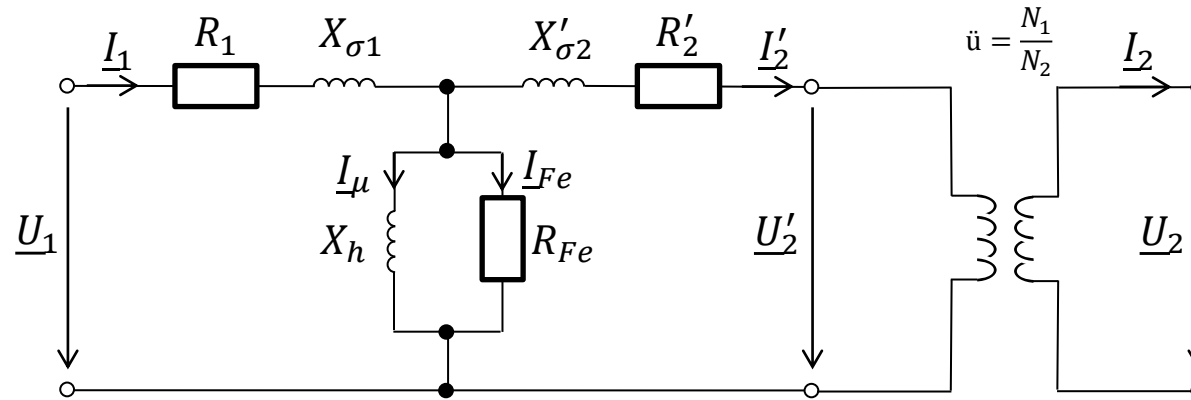
- Wesentliche Komponenten: Eisenkern mit zwei Wicklungen, Feststoffisolierung
- Wicklungen sind konzentrisch um den Hauptschenkel angeordnet, der den magnetischen (Haupt-)Fluss durch beide Spulen erzwingt (die Streuflüsse in der Luft sind gering).
- Wicklungen haben eine unterschiedliche Anzahl von Windungen, weil das Windungsverhältnis das Spannungsverhältnis bestimmt. Die Frequenz bleibt gleich.
- Feststoffisolierung besteht aus Formteilen und Barrieren, die durch dazwischen liegende Distanzleisten fixiert werden
- Reale Verwendung in Deutschland überwiegend in Bahnstromnetzen, selten im HöS-Netz

Einphasiger Zweiwicklungstransformator – Ersatzschaltbild

- Die Größen mit den Indizes 1 und 2 beschreiben die beiden Wicklungen 1 (Primär-) und 2 (Sekundärwicklung) des Transformators.
- R_1 und R_2 beschreiben die in den Wicklungen auftretenden Kupferverluste
- Die Reaktanzen $X_{\sigma 1}$ und $X_{\sigma 2}$ beschreiben die Streufelder des Induktionsflusses und werden Streureaktanzen genannt.
- X_h kennzeichnet den Haupt- bzw. Koppelfluss und wird Hauptreaktanz genannt.
- R_{Fe} beschreibt Hysterese- und Wirbelstromverluste im Eisenkern (Eisenverluste)



Einphasiger Zwe Wicklungstransformator



T-Ersatzschaltbild mit Umrechnung der Sekundärgrößen auf die Primärseite

- Übersetzung \ddot{u} dient der Umrechnung der Größen von der Sekundär- (Index 2) auf die Primärseite (Index 1)
- Transformierte Größen werden mit ' gekennzeichnet

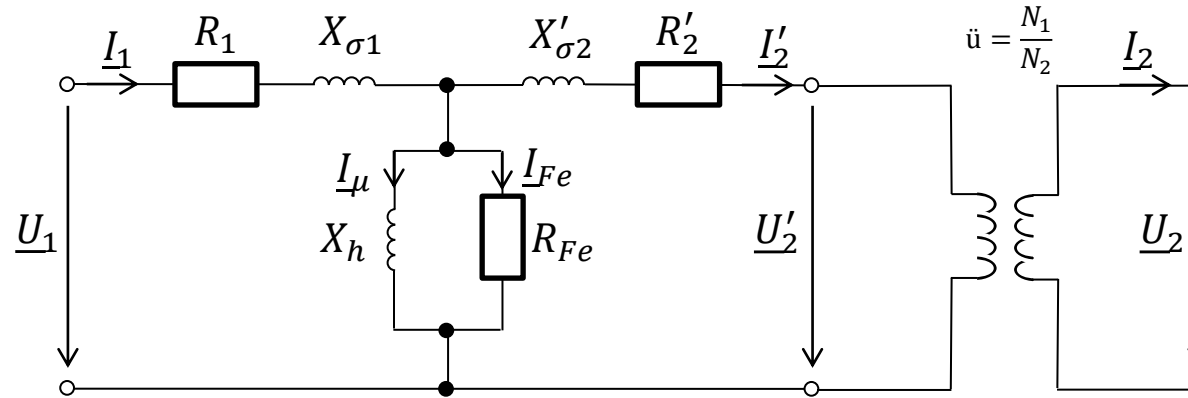
$$\ddot{u} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$I'_2 = I_2 \cdot \frac{1}{\ddot{u}}$$

$$U'_2 = U_2 \cdot \ddot{u}$$

$$X'_2 = \ddot{u}^2 \cdot X_2$$

Bestimmung der elektrischen Kenngrößen

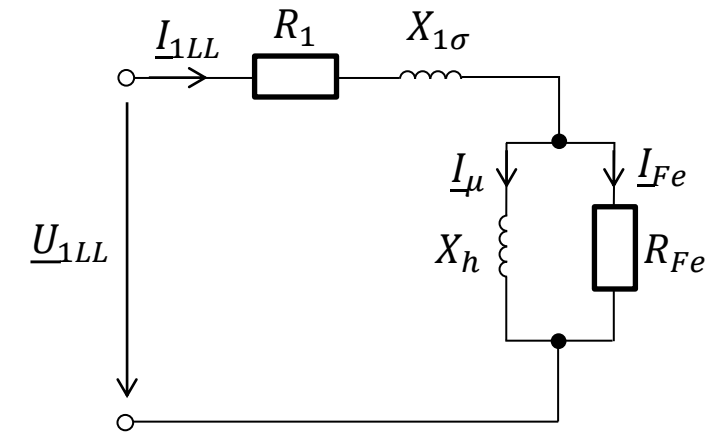


Für die Bestimmung sind zwei Versuchsanordnungen wichtig:

- Im Leerlaufversuch sind die Klemmen an der Sekundärseite des Transformators geöffnet. Damit wird der Stromfluss auf der Sekundärseite zu konstant null.
- Im Kurzschlussversuch sind die Klemmen auf der Sekundärseite kurzgeschlossen. Damit wird die Spannung dort zu null.

Leerlaufmessung

- Sekundärseite des Transformators befindet sich im Leerlauf; Anlegen von Nennspannung an die Primärseite



Ersatzschaltbild im Leerlaufversuch

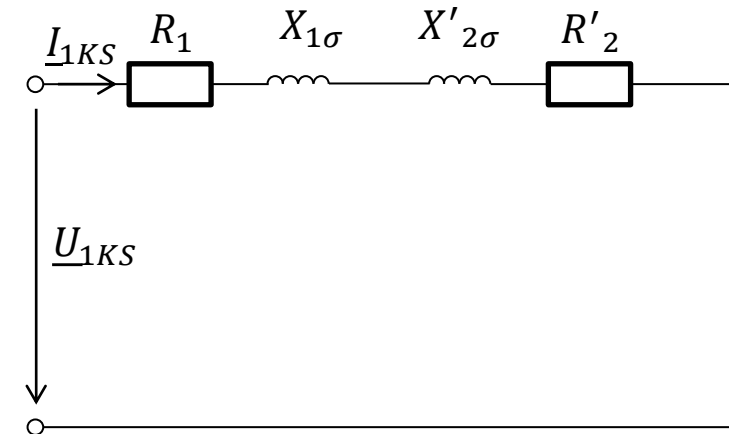
- Folgende Vereinfachung ist häufig zulässig:

$$|R_1 + jX_{1\sigma}| \ll X_h$$

→ Spannung fällt (nahezu) vollständig über den Querelementen (X_h und R_{Fe}) ab

Kurzschlussmessung

- Kurzschließen der Sekundärseite und Erhöhung der Primärspannung, bis sich der Nennstrom einstellt
- $X_h \gg X_{\sigma 1}$ und $X_h \gg X'_{\sigma 2}$ sowie $R_{Fe} \gg R_1$ und $R_{Fe} \gg R'_2$
→ Strom fließt (fast) ausschließlich durch Längselemente
- Vereinfachung aus Annahme von Symmetrie: $X_{1\sigma} \approx X'_{2\sigma}$ und $R_1 \approx R'_2$
- Um Transformatoren verschiedener Baugrößen und Leistungen miteinander vergleichen zu können verwendet man die relative Kurzschlussspannung :
- Relative Kurzschlussspannung: $u_k = \frac{U_{1KS}}{U_{1N}} = \frac{Z_K \cdot I_{1KS}}{U_{1N}}$ (in der Praxis etwa zwischen 0,05 und 0,1)
- $Z_k = \sqrt{(2 R_1)^2 + (2 X_{1\sigma})^2} = \frac{U_{1KS}}{I_{1KS}}$



Vereinfachtes Ersatzschaltbild
im Kurzschlussversuch

Transformator-Modell

Die ohmschen Widerstände und die Streuinduktivitäten werden zusammengefasst. Für große Drehstrom-Leistungstransformatoren kann der ohmsche Widerstand vernachlässigt werden.

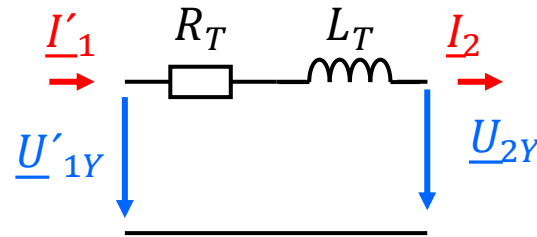
- Primär- und Sekundärstrom sind identisch
- Bemessungsspannungen sind für Primär- und Sekundärseite identisch

Zusammenfassen

$$R_1 + R_2 = R_T$$

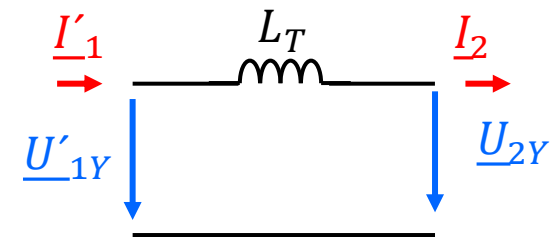
$$L_1 + L_2 = L_T$$

Primärseite Sekundärseite



einphasiges Ersatzschaltbild
für Drehstromtransformatoren

Primärseite Sekundärseite



einphasiges Ersatzschaltbild
für große Leistungstransformatoren

Einphasiges Drehstrom-Transformator-Modell

Das Transformatormodell bezieht sich auf eine Bezugsspannung.

Sind Primär- und Sekundärspannung unterschiedlich, ist eine Größe als **Bezugsspannung** zu wählen.

Die Herleitung erfolgt hier mit Bezug auf die Primärseite. Das Modell gibt die Primärspannung und den Primärstrom original wieder. Die Sekundärgrößen sind transformiert (gestrichene Größen) und geben **nicht die realen Größen** wieder.

Die **Originalgrößen** der Sekundärseite müssen zum Schluss durch Rücktransformation bestimmt werden.

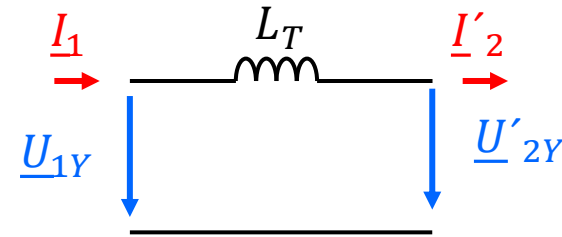
Transformation:
$$U'_2 = \frac{w_1}{w_2} \cdot U_2$$

$$I'_2 = \frac{w_2}{w_1} \cdot I_2$$

Rücktransformation:
$$U_2 = \frac{w_2}{w_1} \cdot U'_2$$

$$I_2 = \frac{w_1}{w_2} \cdot I'_2$$

Primärseite Sekundärseite



einphasiges Ersatzschaltbild
für große Leistungstransformatoren



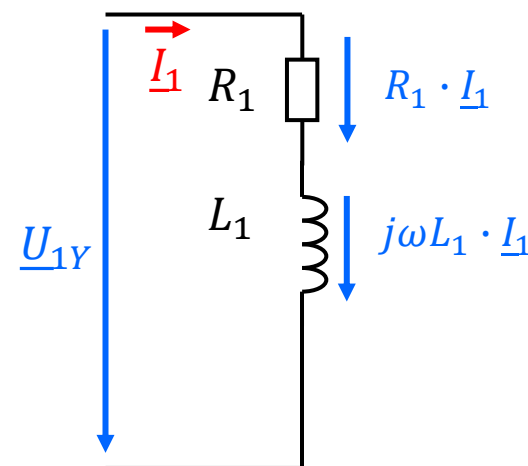
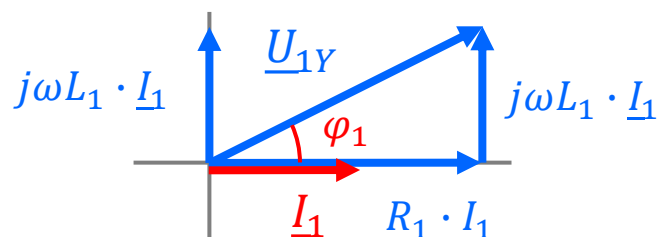
Wiederholung Komplexe Impedanz / Lerneinheit

- Bitte berechnen Sie den Scheinwiderstand für eine Impedanz, die bei 50 Hz und einer Spannung von 1400 V einen Strom von 100 A mit einer Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom von 30° fließen lässt!

$$\underline{U}_{1Y} = 1400 \text{ V} \cdot e^{j30^\circ}$$

$$\underline{I}_1 = 100 \text{ A}$$

$$\underline{Z} = \underline{U} / \underline{I}$$

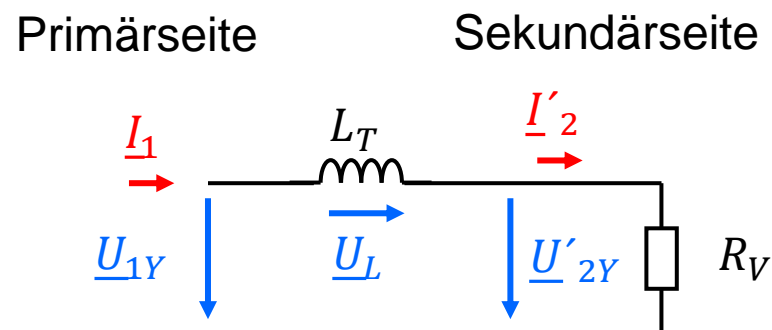




Lerneinheit

Ein Drehstromtransformator 110 kV/ 20 kV mit einer Induktivität von 200 mH versorgt das Mittelspannungsnetz bei einer Betriebsspannung von 20 kV mit einer Wirkleistung von 17 MW.

- Wie groß ist die Längsspannung an der Transformatorinduktivität bezogen auf die Primärseite?



eduVote - Transformator

Wie kann die Transformatorinduktivität bestimmt werden?

- a) Leerlaufversuch
- b) Kurzschlussversuch
- c) Widerstandsmessung
- d) Magnetfeldmessung



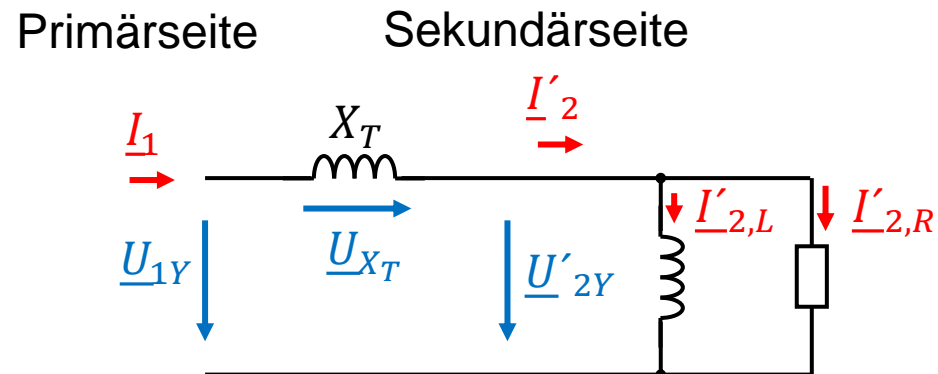
ID = j.grobler@tu-braunschweig.de
Umfrage noch nicht gestartet

3 | Zeigerdiagramm

Transformatorersatzschaltbild

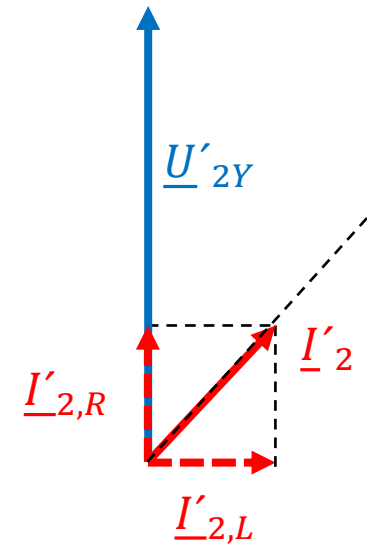
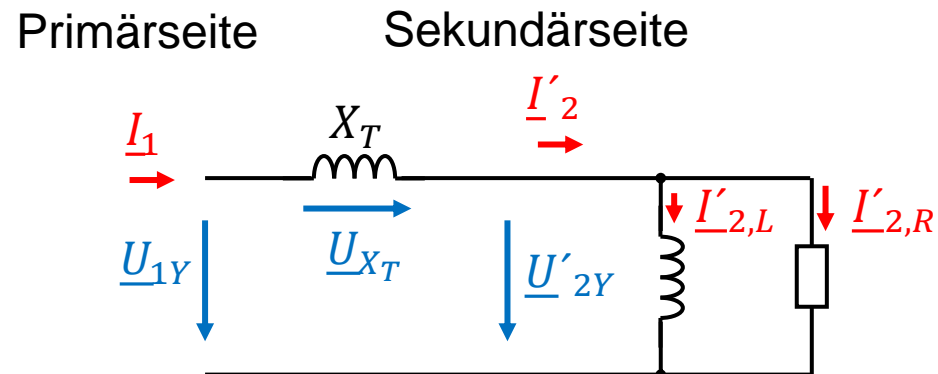
Der Transformator ist ein erstes Beispiel für ein Energieübertragungssystem.

- Der Transformator liefert der Last R und L eine Wirk- und Blindleistung
- Die Primärspannung ist die konstante Spannung des Verbundnetzes
- Die Leistung wird durch einen Magnetfluss bzw. Stromfluss übertragen
- Im ESB verursacht der Stromfluss eine Längsspannung an der Trafo-Induktivität
- Die Längsspannung verursacht eine Änderung zwischen Primärspannung und Sekundärspannung



Transformatorersatzschaltbild

Der Laststrom kann in einen Blindstrom durch die Induktivität L und einen Wirkstrom durch den Widerstand R aufgeteilt werden.



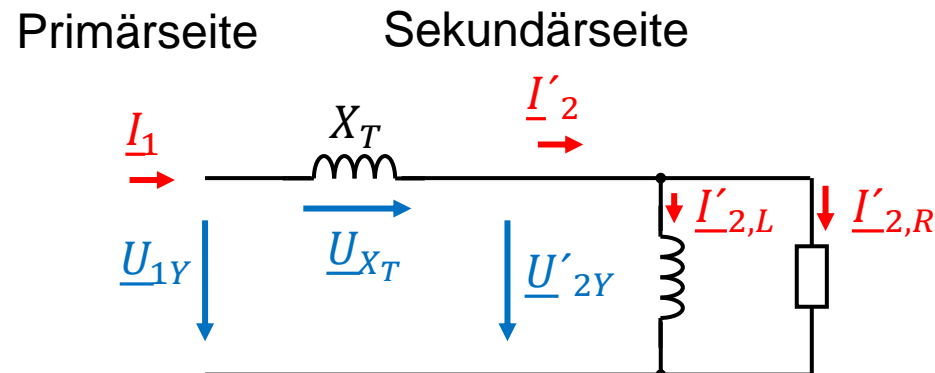
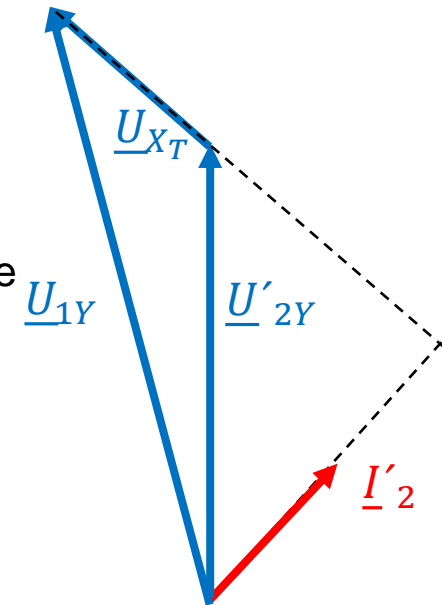
Transformatorersatzschaltbild

Die Primärspannung kann mit dem Zeigerdiagramm konstruiert werden.

Primärspannung ist die konstante Netz-Spannung

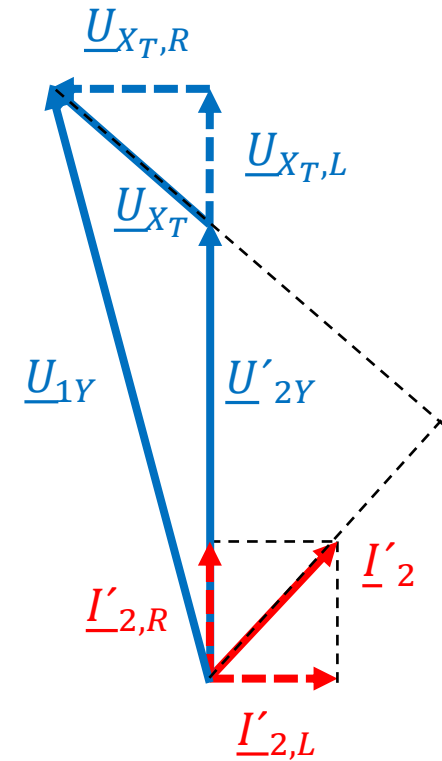
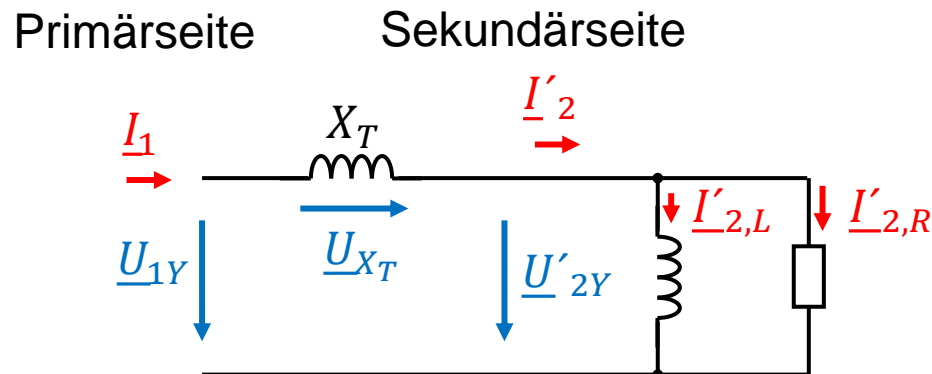
Das **Transformator-Zeigerdiagramm** zeigt die typischen Eigenschaften eines Energieübertragungssystems

Die Änderung der Sekundärspannung wird bei Stromfluss durch die Längsspannung an der Trafo-Induktivität verursacht.



Transformatorersatzschaltbild

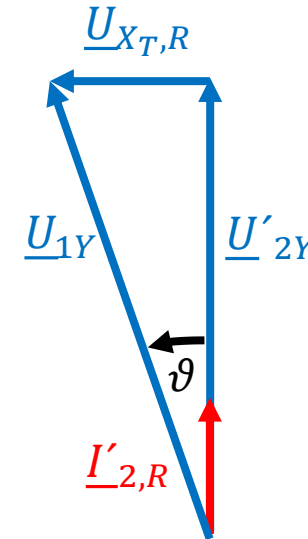
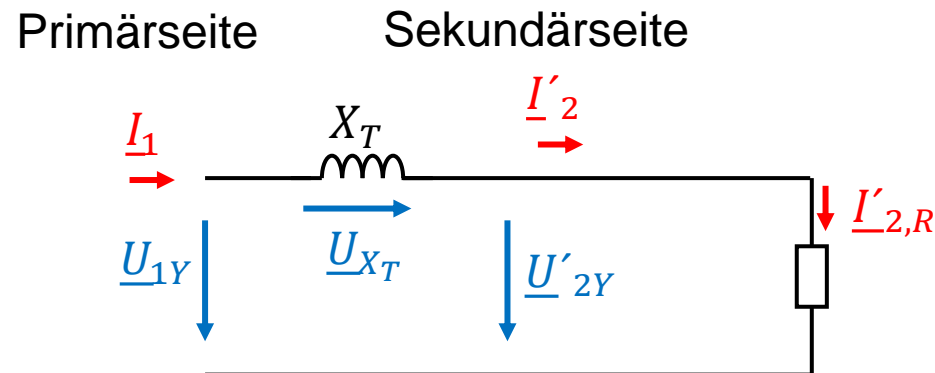
Der Laststrom kann in einen **Blindstrom** durch die Induktivität L und einen **Wirkstrom** durch den Widerstand R aufgeteilt werden. Die **Längsspannung** an der Trafo-Induktivität kann den verursachenden Laststromanteilen zugeordnet werden. Die Längsspannungs-anteile eilen den Stromanteilen jeweils um 90° voraus.



Transformatorersatzschaltbild

Der Laststrom durch den Widerstand R stellt die **Wirkleistungsübertragung** durch den Transformator dar.

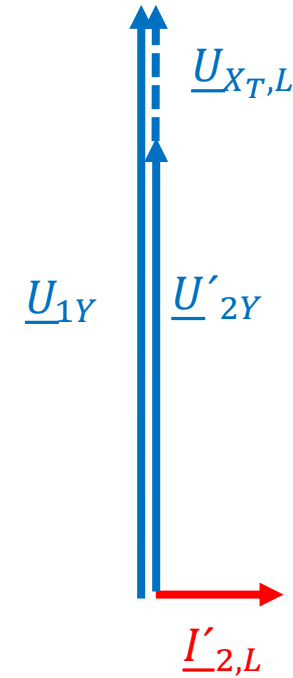
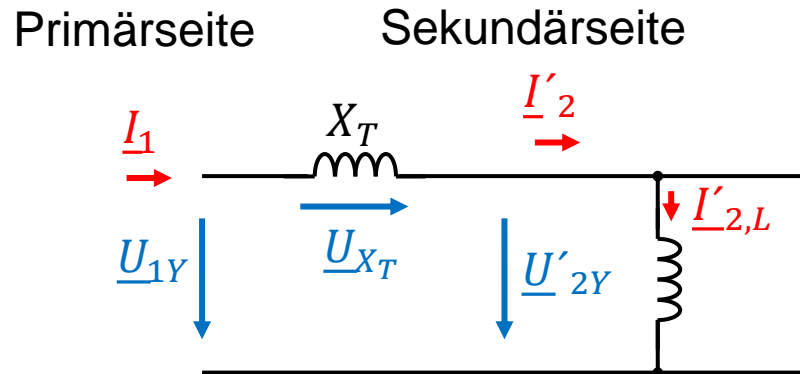
Die Längsspannung an der Trafo-Induktivität durch den Wirkstrom eilt der Sekundärspannung um 90° voraus. Der Längsspannungszeiger steht quer zum Sekundärspannungszeiger. Daher spricht man von einer **Querspannung**. Die Primärspannung eilt der Sekundärspannung um den **Übertragungswinkel ϑ** voraus.



**Wirkleistungsübertragung
=
Phasendifferenz der
Übertragungsspannungen**

Transformatorersatzschaltbild

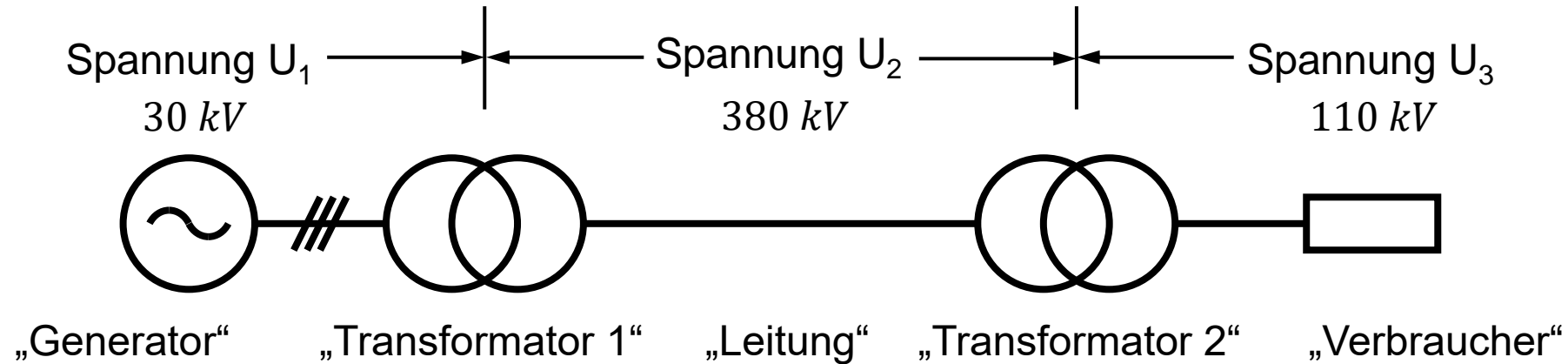
Der Laststrom durch die Induktivität L stellt die **Blindleistungsübertragung** durch den Transformator dar. Die Längsspannung an der Trafo-Induktivität durch den Blindstrom verändert die Länge des Sekundärspannungs-Zeigers. Daher spricht man von einer **Längsspannung**. Die Sekundärspannung wird bei induktiver Last kleiner als die Primärspannung.



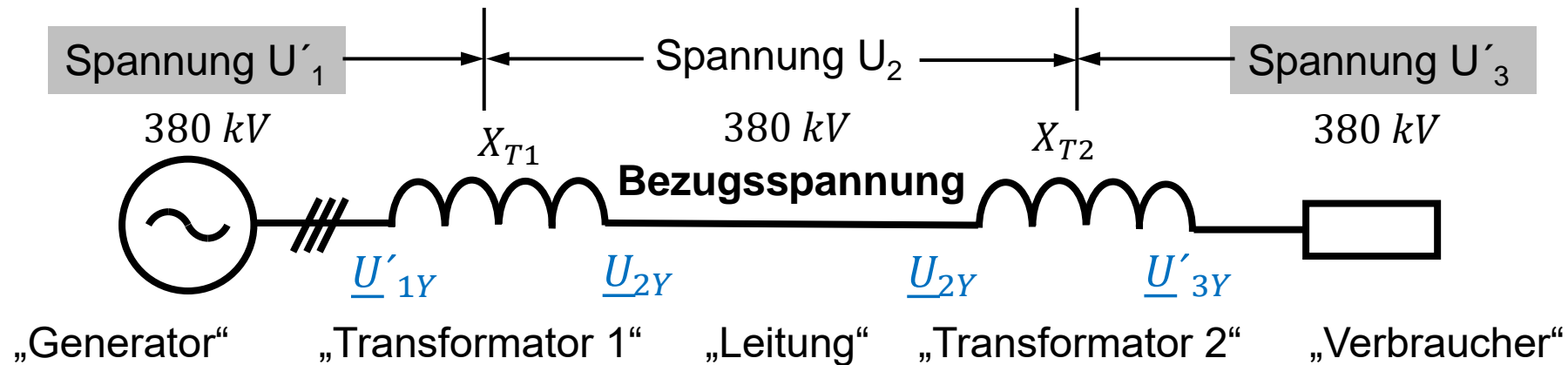
**Blindleistungsübertragung
=
Betragsdifferenz der
Übertragungsspannungen**

Elektrische Energieversorgung mit Drehstromtransformatoren

- Wahl der Bezugsspannung -



Ersatzschaltbild für Drehstromsystem



Fragen?

Nächste Vorlesung:

17.04.2024

Generator

