




Technische
Universität
Braunschweig

The background of the slide is a photograph of several high-voltage power lines and pylons stretching across a landscape at sunset. The sky is filled with orange and yellow clouds, and the sun is visible on the horizon. The pylons are silhouetted against the bright sky.

Grundlagen der elektrischen Energietechnik

Teil 1: Grundlagen der Energieversorgung

- Drehstromsysteme III -

Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel | elenia Institut für Hochspannungstechnik und Energiesysteme | 10.04.2024

Darstellung von Lasten im Frequenzbereich für eine Frequenz durch Impedanzen in der komplexen Ebene

▪ Bekannte Begriffe:

- Wirkwiderstand: R
- Blindwiderstand: X
- Scheinwiderstand: Z

$$f = 50 \text{ Hz}$$

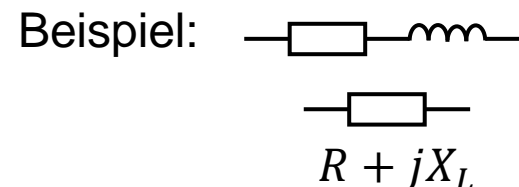
$$\omega = 2\pi f = 314 \text{ Hz}$$

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

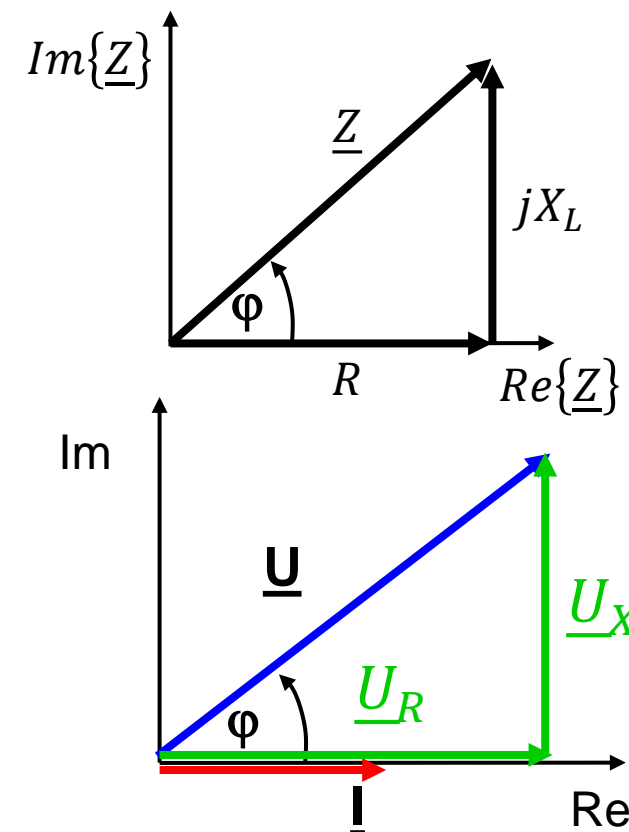
$$\underline{U}_R / \underline{I} = R$$

$$\underline{U}_X / \underline{I} = jX_L = j\omega L$$

$$\underline{U} / \underline{I} = \underline{Z} = Z \cdot e^{j\varphi} = R + j\omega L = R + jX_L$$



Wiederholung

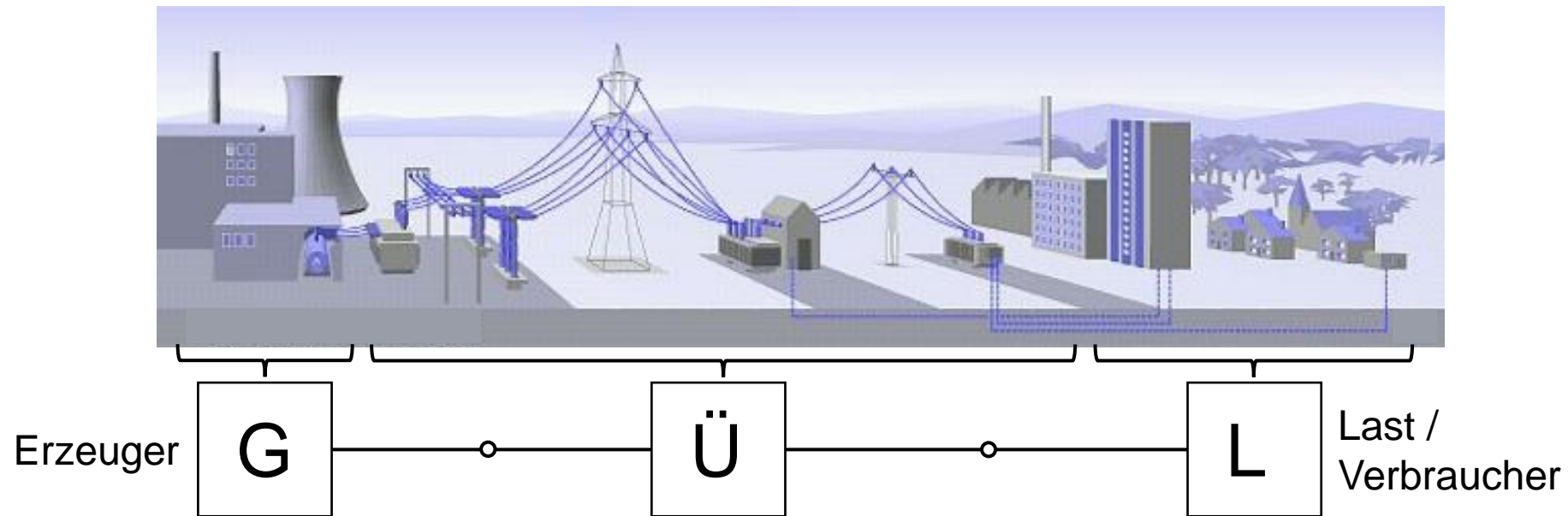


[2] Hering, E., Martin, R., Gutekunst, J., & Kempkes, J. (2018). Elektrotechnik und Elektronik für Maschinenbauer (4., aktualisierte und verbesserte Auflage.). Berlin: Springer Vieweg.
Kapitel A.5.3 Zeigerdiagramm
 Besonders Bild A-62 Komplexer Widerstand und Leitwert eines Zweipols

Drehstromsysteme III

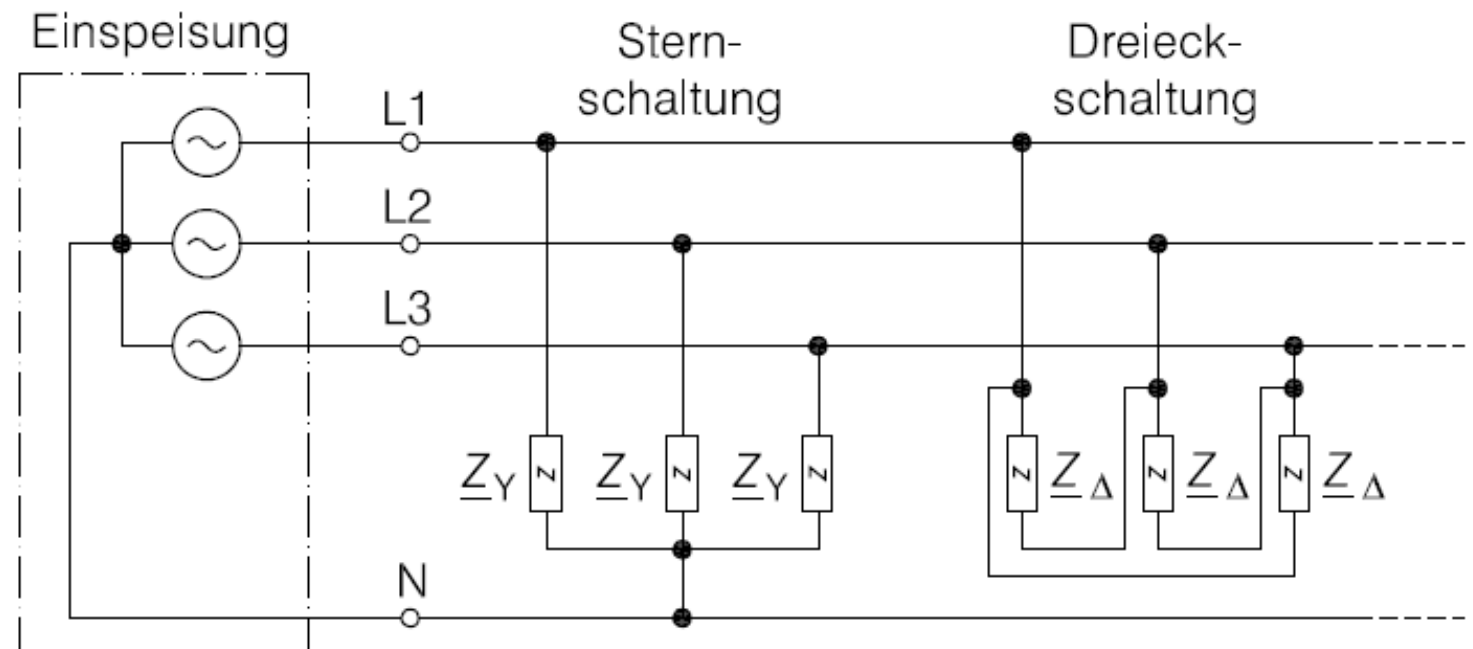
Lernziele:

- Berechnung von Sternschaltungen und Dreieckschaltungen
- Berechnung von Spannungen und Strömen für Lasten in Stern- und Dreieckschaltungen



Agenda

- 1 Sternschaltung
- 2 Übertragungssysteme
- 3 Dreiecksschaltung
- 4 Leistungen in Drehstromsystemen

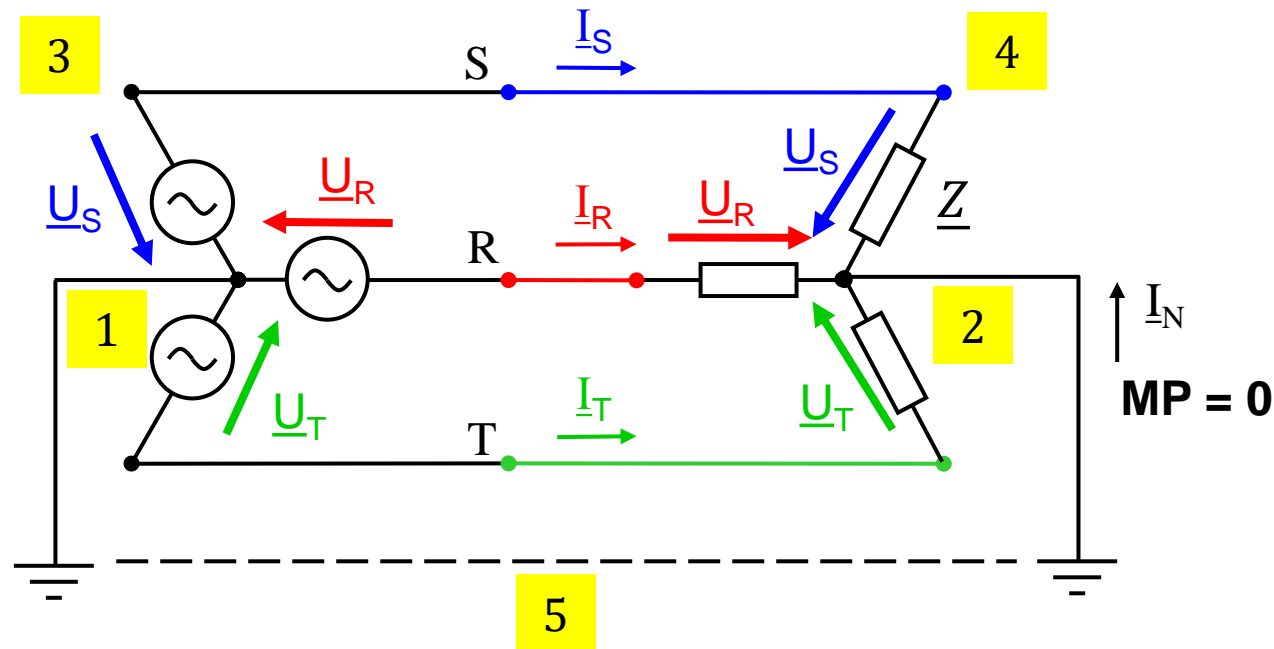


1 | Sternschaltung

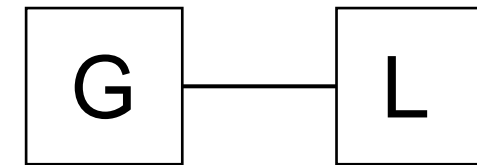
Schaltungen von Drehstrom-Verbrauchern

Symmetrische Sternschaltung

Bei der Sternschaltung sind die Verbraucher zwischen Außenleiter und gemeinsamen Sternpunkt geschaltet.



Bezugspotential = Erde



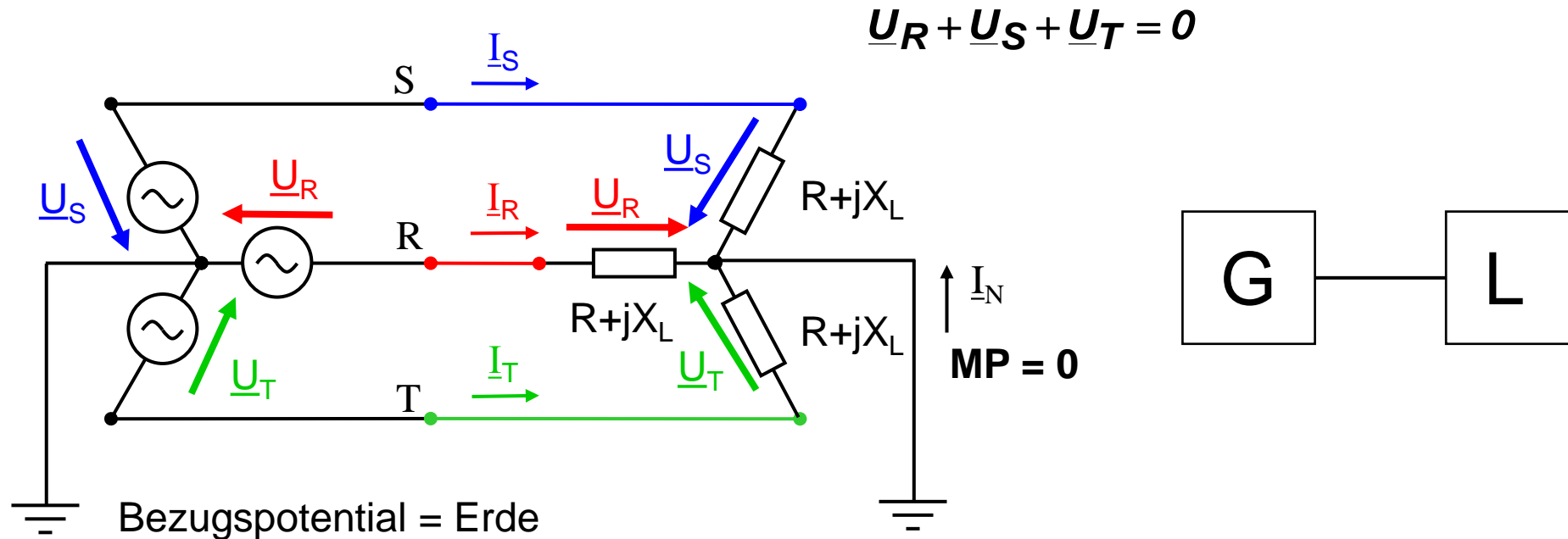
Begriffe:

- Knoten
- Zweig
- Strang
- Masche

Schaltungen von Drehstrom-Verbrauchern

Symmetrische Sternschaltung

Bei der Sternschaltung sind die Verbraucher zwischen Außenleiter und gemeinsamen Sternpunkt geschaltet. Ist der Sternpunkt geerdet, liegt an den Verbrauchern das Leiter-Erd-Spannungssystem.



Die Außenleiterströme I_R , I_S , I_T entsprechen den Strangströmen durch die Verbraucherimpedanzen.

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

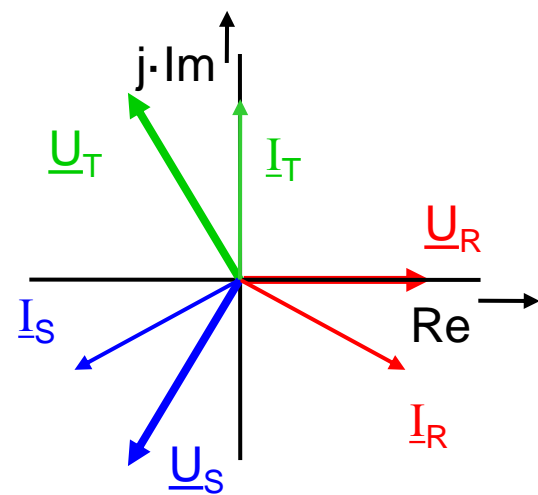
$$\underline{I}_S = \underline{U}_S / \underline{Z}_S$$

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

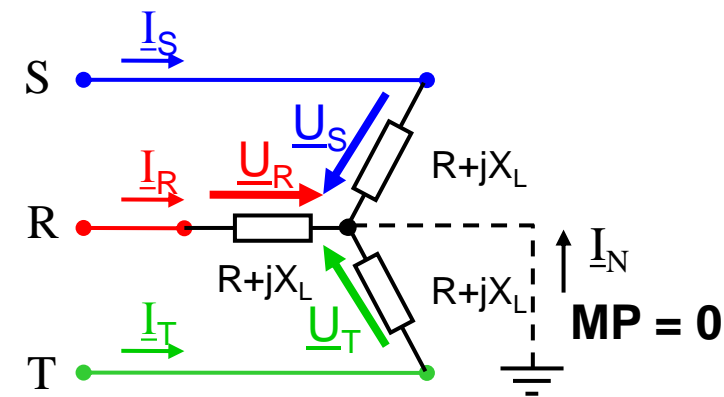
Schaltungen von Drehstrom-Verbrauchern

Symmetrische Sternschaltung

Die Impedanzen \underline{Z} sind bei **symmetrischen Verbrauchern** alle gleich groß. Damit wird das Stromsystem ebenfalls symmetrisch.



Spannungs- und Stromzeiger



Schaltung

Spannungssystem – Impedanzen bestimmen – Ströme ausrechnen

$$\underline{U}_R = |U|e^{j0^\circ}$$

$$\underline{U}_T = |U|e^{j120^\circ}$$

$$\underline{U}_S = |U|e^{j240^\circ}$$

$$\underline{Z} = R + jXL$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}$$

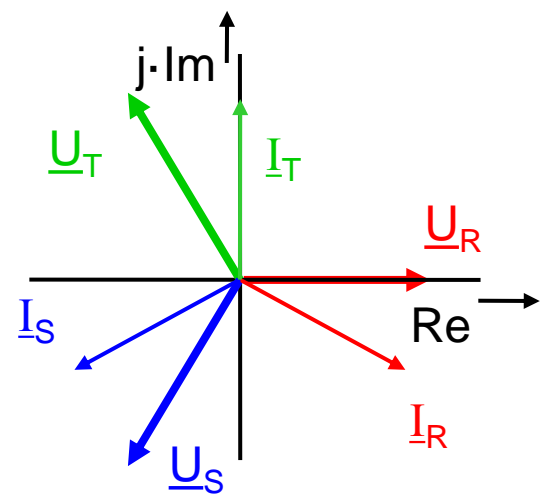
$$\underline{Z} = |Z|e^{j\varphi}$$

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

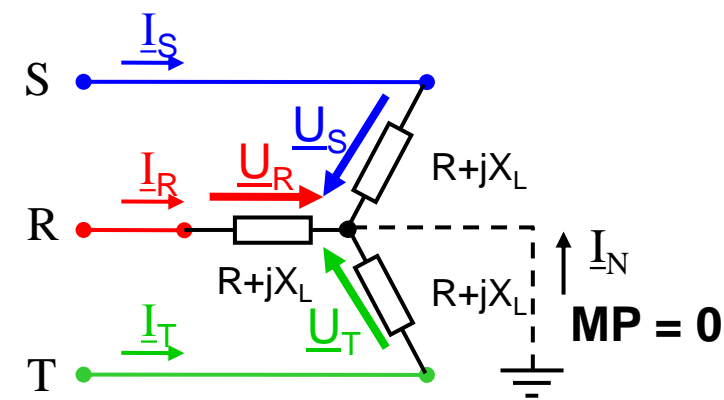
Schaltungen von Drehstrom-Verbrauchern

Symmetrische Sternschaltung

Die Impedanzen \underline{Z} sind bei **symmetrischen Verbrauchern** alle gleich groß. Damit wird das Stromsystem ebenfalls symmetrisch.



Spannungs- und Stromzeiger



Schaltung

Spannungssystem – Impedanzen bestimmen – Ströme ausrechnen

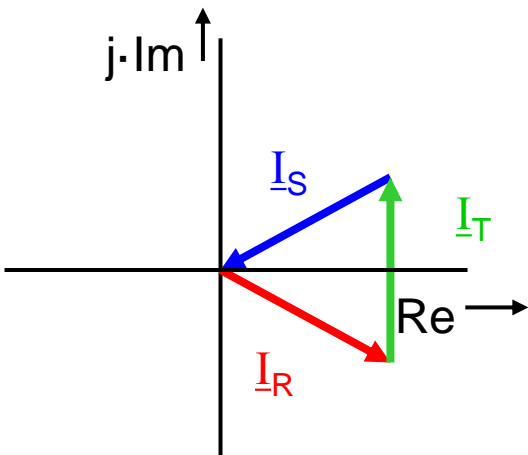
$$\underline{I}_R = \frac{\underline{U}_R}{\underline{Z}_R} = \frac{|U|}{|Z|} e^{j0-\varphi} \qquad \underline{I}_S = \frac{\underline{U}_S}{\underline{Z}_S} = \frac{|U|}{|Z|} e^{j240-\varphi} \qquad \underline{I}_T = \frac{\underline{U}_T}{\underline{Z}_T} = \frac{|U|}{|Z|} e^{j120-\varphi}$$

Schaltungen von Drehstrom-Verbrauchern

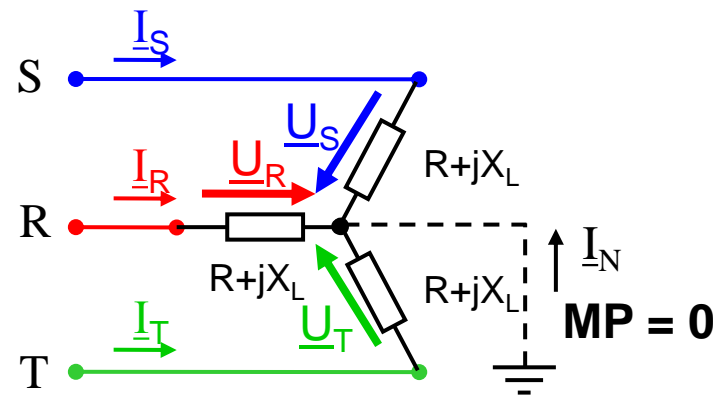
Symmetrische Sternschaltung

Die Impedanzen \underline{Z} sind bei **symmetrischen Verbrauchern** alle gleich groß. Damit wird das Stromsystem ebenfalls symmetrisch.

$$\underline{I}_R + \underline{I}_S + \underline{I}_T = 0 \quad (\text{„Knotenregel“})$$



Verbraucher-Stromsystem



Schaltung

Die Leiterströme heben sich auf und es fließt kein Nullleiterstrom I_N .
 Der Nullleiter vom Erdpotential zum Mittelpunkt MP kann bei symmetrischem Verbraucher entfallen.

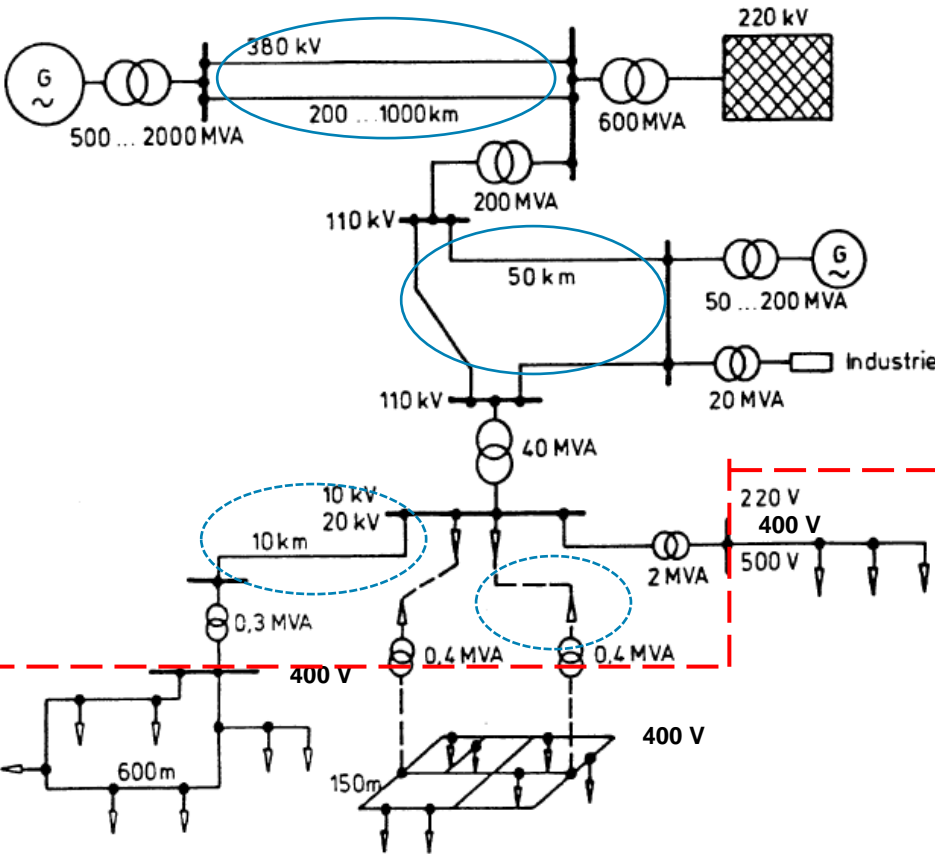
2 | Übertragungssysteme

Elektrische Energieversorgung

Übertragung

3-Leiter-System

4-Leiter-System



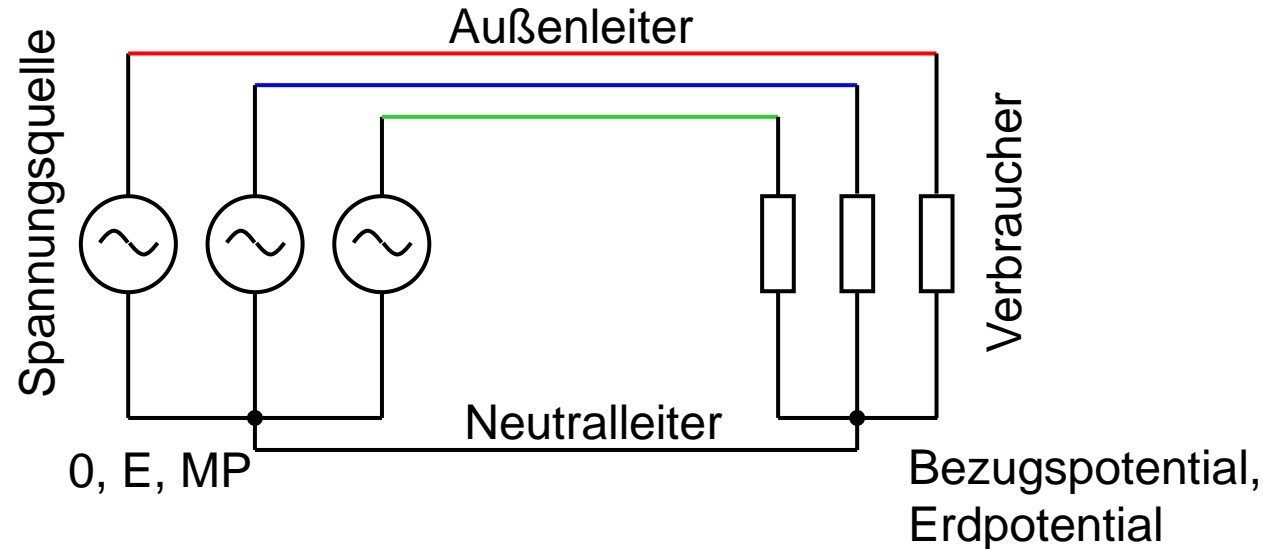
Ringnetz
Siedlungen
Orte

Maschennetz
Stadt
Industrie bei hoher
Lastdichte

Strahlennetz
Industrie
Hausinstallation
Landwirtschaft

Schaltungen von Drehstrom-Systemen

Werden Spannungsquellen und Verbraucher in einem symmetrischen Dreiphasensystem in **Sternschaltung** angeordnet, so entsteht ein **gemeinsamer Rückleiter**. Die Hinleiter werden Außenleiter oder kurz Leiter genannt. Der Rückleiter heißt Neutralleiter.

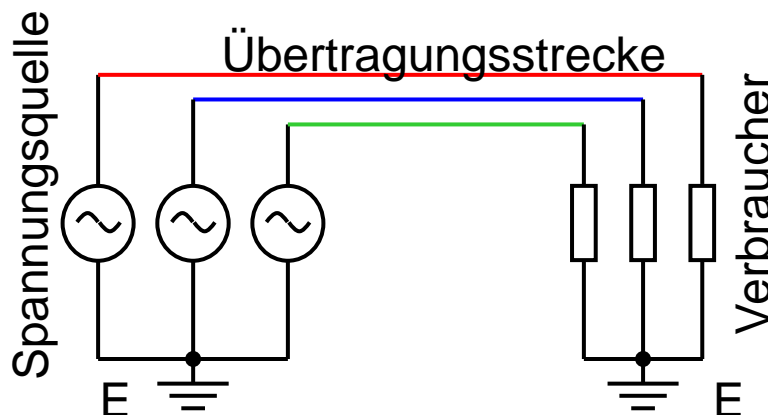


Bei unsymmetrischer Belastung wird der vierte Leiter (Neutralleiter) benötigt. Dies stellt ein **4-Leiter-System** dar, das im **Niederspannungsnetz** verwendet wird. Der vierte Leiter stellt dann einen besonderen Bezugspunkt dar, der mit dem Erdpotential verbunden ist.

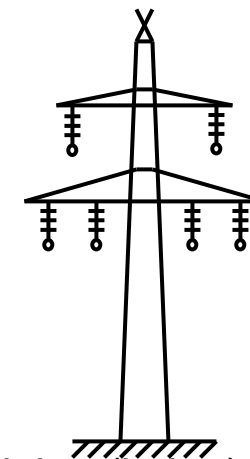
Bei symmetrischer Belastung kann der Neutralleiter entfallen. Dies ist ein **3-Leiter-System**, das in der **Hochspannungsübertragung** üblich ist.

Drehstrom- und Wechselstromübertragungssysteme

Bei Hoch- und Höchstspannungs-Drehstromübertragungssystemen wird auf den Neutraleiter verzichtet. Das Bezugspotential ist das Erdpotential. Die Erdung aller Betriebsmittel wird unter Sicherheitsaspekten nur für den Fehlerfall ausgelegt.



Freileitungsmast
(Donaumast) für eine
Drehstromübertragungs-
strecke mit 2 Systemen



Im Drehstrom-System können die Spannungen zwischen den Außenleitern (Leitern) oder zwischen Außenleiter (Leiter) und Bezugspunkt Erde gemessen werden. Die **Isolatoren** müssen entsprechend der Leiter-Erde-Spannung bemessen werden. Die System-**Nennspannung** wird als Leiter-Leiter-Spannung angegeben.

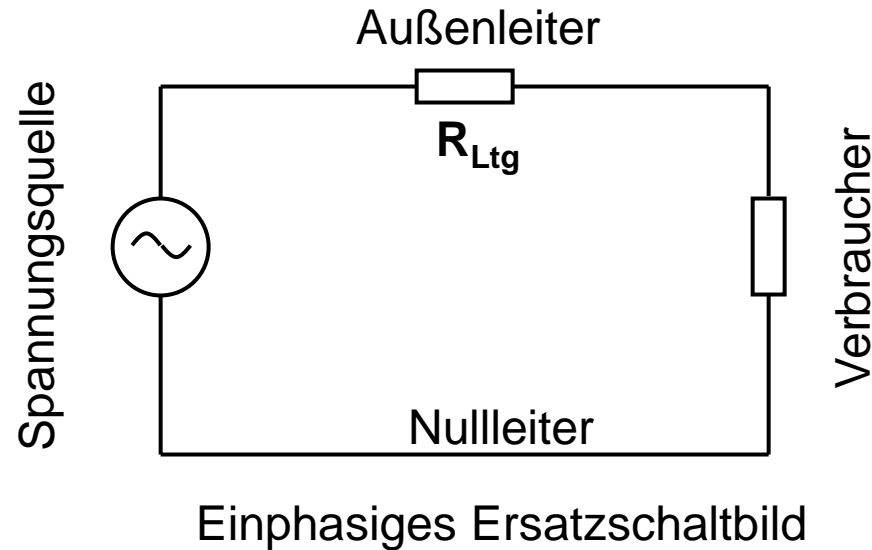
Bemessungsspannungen U:

- 110 kV
- 220 kV
- 380 kV
- 800 kV (Amerika, Russland, China)

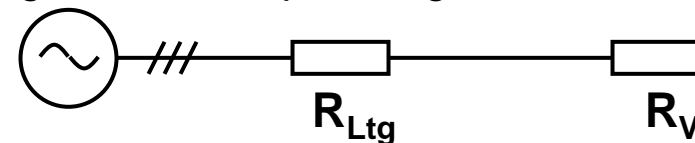
Faustformel für geringe Verluste:
Nennspannung $\hat{=}$ Kilometer

Einphasiges Ersatzschaltbild

Die Spannungen und Ströme in den Außenleitern unterscheiden sich in symmetrischen Systemen nur durch die Phasenlage. Daher reicht es aus, nur eine Phase zu betrachten. Der Leitungswiderstand ergibt sich nur aus dem Hinleiter (Außenleiter). Der Rückleiter (Nullleiter) ist impedanzlos.

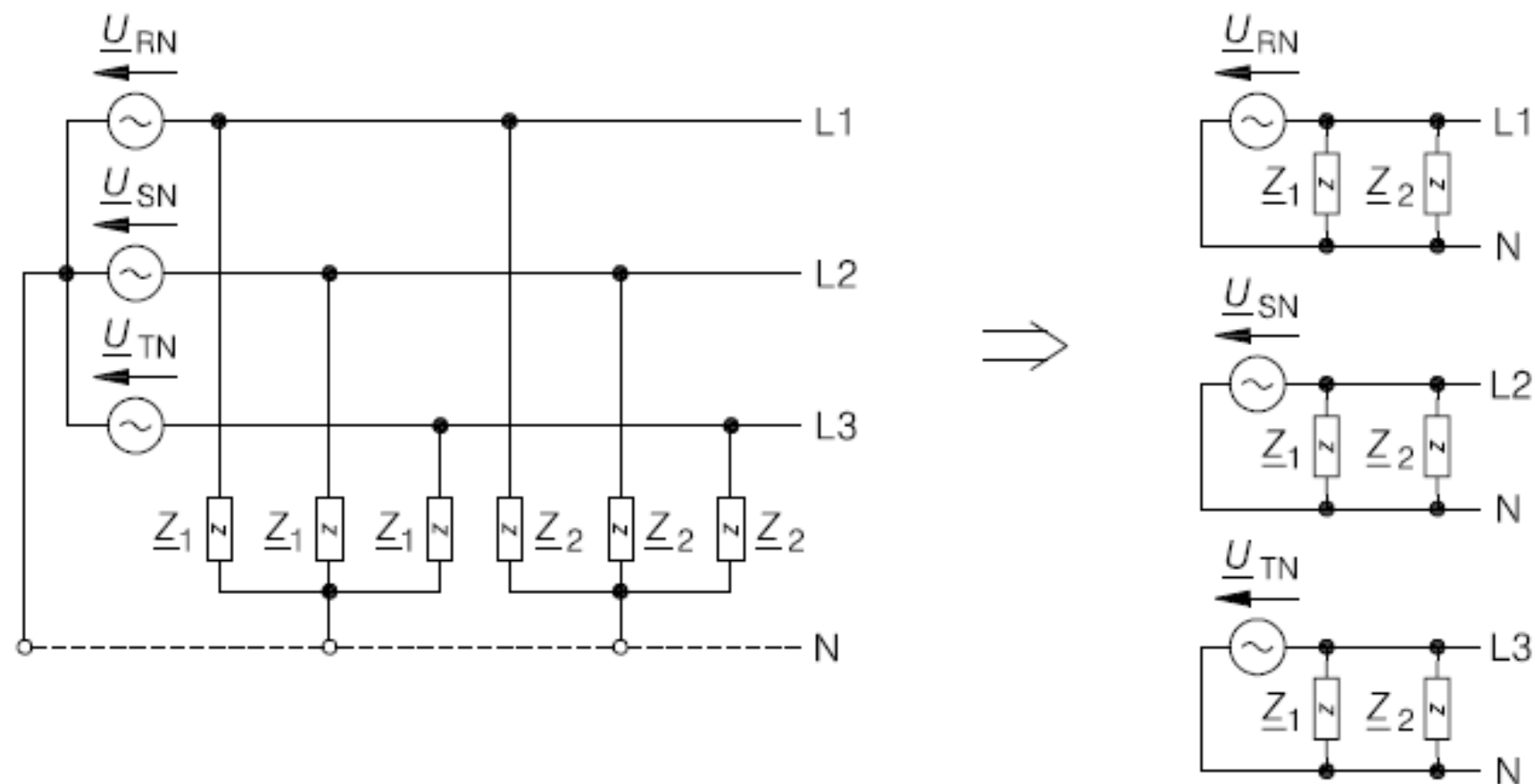


Drehstromsysteme werden auch in Form von **einpoligen Ersatzschaltbildern** dargestellt. Dabei wird auf den Rückleiter verzichtet und die Anzahl der Leitungen durch Schrägstriche dargestellt. Die Spannungen sind Leiter-Erde-Spannungen, die Ströme entsprechen denen einer Sternschaltung.





Lerneinheit: Vorteile von Drei- und Vierleitersystemen

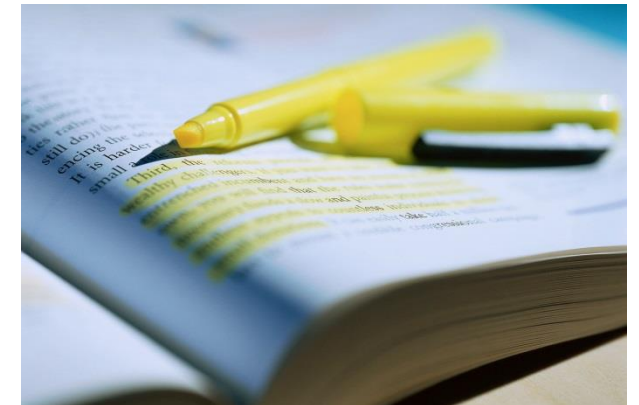




Lerneinheit

- Welche Bezeichnungen gibt es für die beiden Stromsysteme in einem Drehstromsystem ?
- Wie groß ist der Bemessungsstrom eines Verbrauchers in Dreieckschaltung bei einem Strangstrom von 520 A ?

$$I = \sqrt{3} \cdot I_{\Delta}$$



3 | Dreiecksschaltung

Schaltungen von Drehstrom-Verbrauchern

Dreiecksschaltung – Strangströme

Bei der Dreieckschaltung sind die Verbraucher zwischen den Außenleitern angeschlossen. An den Verbrauchern liegt somit das Außenleiterspannungssystem. Die Strangströme ergeben sich aus den Außenleiterspannungen:

Kochrezept:

Leiterspannung

↓

Strangstrom

↓

Leiterstrom (n.S.)

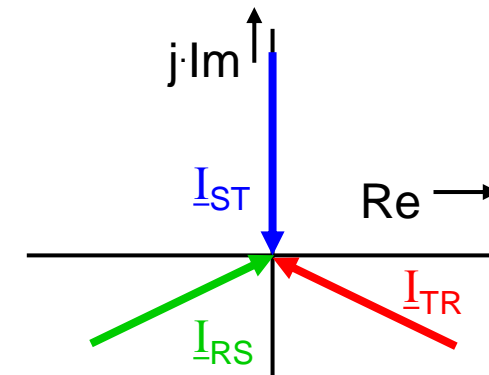
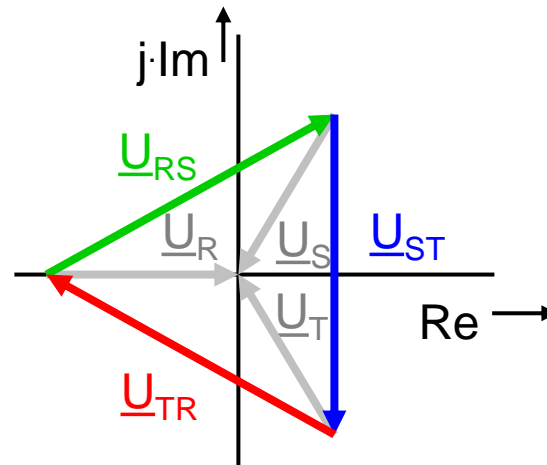
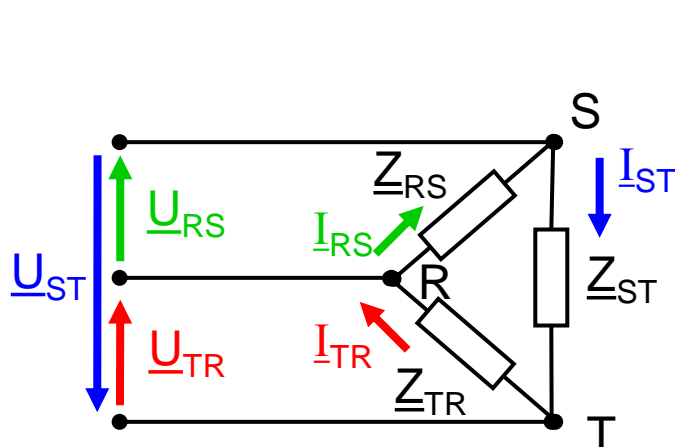
$$\underline{Z}_{RS} = \underline{Z}_{ST} = \underline{Z}_{TR} = \underline{Z}_{\Delta}$$

Beispiel: $\underline{Z}_{\Delta} = Z_{\Delta} = R_{\Delta}$

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

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

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

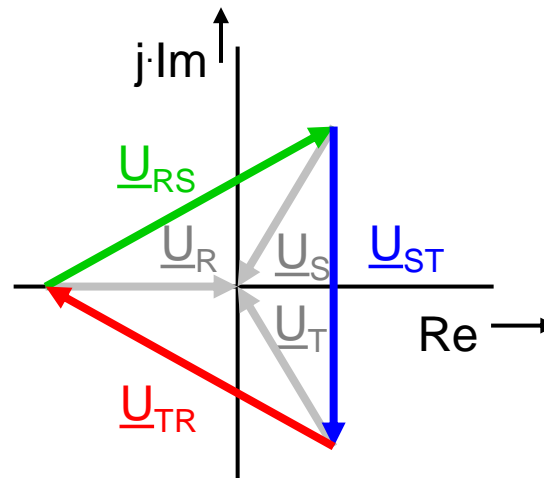
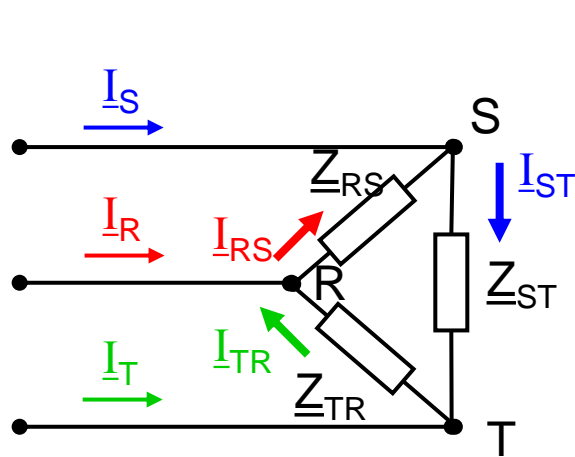


Stromzeiger für **symmetrischen ohmschen** Verbraucher \underline{Z}_{Δ}

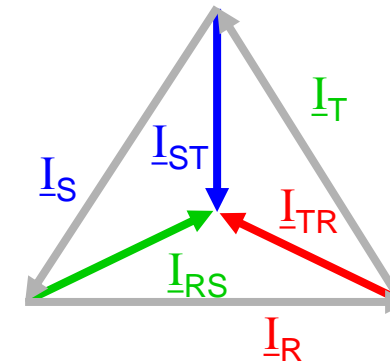
Schaltungen von Drehstrom-Verbrauchern

Dreiecksschaltung – Außenleiterströme

Die Außenleiterströme ergeben sich aus den Strangströmen. Oder anders ausgedrückt: Bei der Dreieckschaltung teilen sich die Außenleiterströme auf die Stränge auf.



Stromzeigerbeispiel
für **symmetrischen**
ohmschen Verbraucher Z_{Δ}



$$\underline{I}_R = \underline{I}_{RS} - \underline{I}_{TR}$$

$$\underline{I}_S = \underline{I}_{ST} - \underline{I}_{RS}$$

$$\underline{I}_T = \underline{I}_{TR} - \underline{I}_{ST}$$

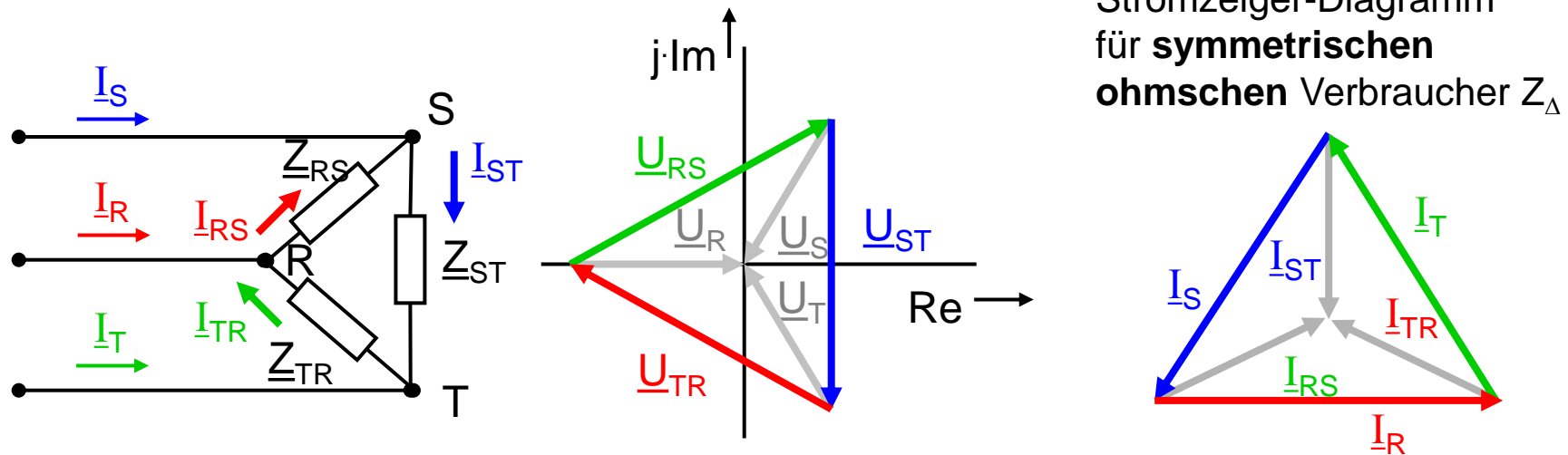
Mit der Knotenregel können die Außenleiterströme aus den Strangströmen berechnet werden.

Hinweis: Durch die Phasenverschiebung um 120° im Drehstromsystem können sich gegenüber dem Zählpfeil umgekehrte Stromrichtungen ergeben.

Schaltungen von Drehstrom-Verbrauchern

Dreiecksschaltung – Knotenregel

Bei der Dreieckschaltung sind die Außenleiterströme größer als die Strangströme.
Im Stromzeiger-Diagramm sind die unterschiedlichen Beträge erkennbar.



Die Summe der Außenleiterströme ist immer Null.
Die Dreieckschaltung stellt einen strukturierten Knoten dar.

Dies gilt für die Strangströme einer Dreieckschaltung nicht allgemein, sondern nur bei einem symmetrischen Verbraucher.

$$\underline{I}_R + \underline{I}_S + \underline{I}_T = 0$$

Schaltungen von Drehstrom-Verbrauchern

Dreiecksschaltung – Umrechnung von Strömen

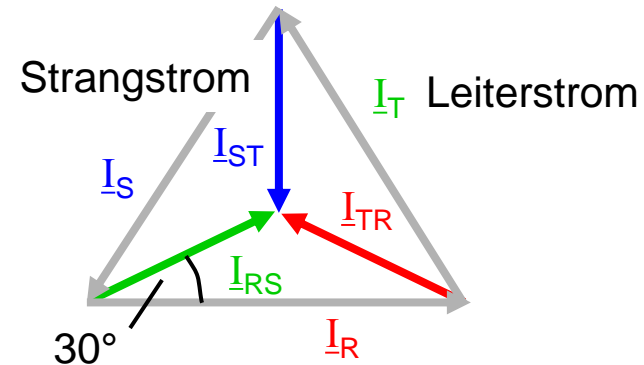
Für die **symmetrische Dreieckschaltung** gilt allgemein für die Strangströme:

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

Die Außenleiterströme ergeben sich aus der geometrischen Addition der Strangströme. Die geometrischen Zusammenhänge sind im Zeigerdiagramm deutlich erkennbar.

$$I = \sqrt{3} \cdot I_{\Delta}$$

Leiterstrom Strangstrom



Die Außenleiterströme sind bei einer symmetrischen Dreieckschaltung immer um den Faktor $\sqrt{3}$ größer als die Strangströme.

Gegenüber den Strangströmen sind die Außenleiterströme bei einer symmetrischen Dreieckschaltung um 30° phasenverschoben.

Der **Bemessungsstrom** ist als Außenleiterstrom definiert: $I = I_r = I$

4 | Leistungen in Drehstromsystemen

Schaltungen von Drehstrom-Verbrauchern

Elektrische Scheinleistung

Mit den Zeigergrößen (Effektivwerte) stellt die Multiplikation von **Spannung** und **Strom** eine reine **Rechengröße** dar:

die **Scheinleistung**: $S = U \cdot I$ in **VA**

Die Scheinleistung ist eine Vergleichsgröße zur Beurteilung der **Baugrößen** von Betriebsmitteln, bspw. Leistungstransformatoren (s. Abb. rechts). Für Drehstromsysteme ist die Scheinleistung definiert:

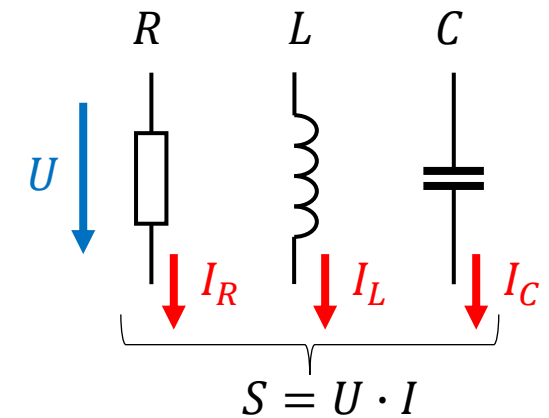
$$S = 3 \cdot U_Y \cdot I$$

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$$

Berechnung der Scheinleistung nur mit **Beträgen** möglich



Anlagenleistungen: bis 1.300 MVA
Systemspannungen: bis 1.100 kV



www.new.Siemens.com

Scheinleistung im symmetrischen Drehstrom-System Sternschaltung

Die **Scheinleistung** S im **symmetrischen** Drehstromsystem ist $S_{3\sim} = 3 \cdot S_{\text{Phase}}$.

Die 3-phasige Leistung im Drehstrom-System ist **zeitlich konstant**.

Für einen symmetrischen Drehstrom-Verbraucher in Sternschaltung gilt:

- Der Außenleiterstrom ist gleich dem Verbraucherstrom
- Der Betrag aller 3 Außenleiterströme ist gleich
- Die Außenleiterströme sind gegeneinander um 120° phasenverschoben

Berechnung der
Scheinleistung nur mit
Beträgen möglich

$$I_R = I_S = I_T = I_Y$$

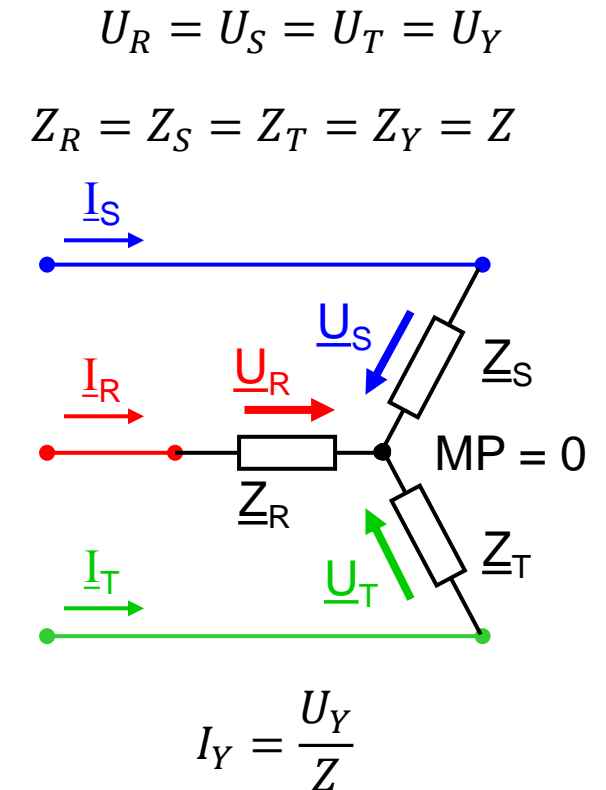
$$S_{3\sim} = 3 \cdot U_{\lambda} \cdot I_{\lambda}$$

Umrechnung auf Bemessungsgrößen (Außenleiter)

$$U_Y = \frac{U_{\Delta}}{\sqrt{3}}$$

$$S_{3\sim} = \sqrt{3} \cdot U_{\Delta} \cdot I_Y = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$$

$$S_{3\sim} = 3 \cdot \frac{U_Y^2}{Z}$$



Scheinleistung im symmetrischen Drehstrom-System

Dreieckschaltung

Für einen symmetrischen Drehstrom-Verbraucher in Dreieckschaltung gilt:

- Der Außenleiterstrom ist um $\sqrt{3}$ größer als der Verbraucherstrom (Strangstrom)
- Der Betrag aller 3 Strangströme ist gleich
- Die Strangströme sind um 120° gegeneinander phasenverschoben

$$I_{RS} = I_{ST} = I_{TR} = I_{\Delta}$$

$$\boxed{S_{3\sim} = 3 \cdot U_{\Delta} \cdot I_{\Delta}}$$

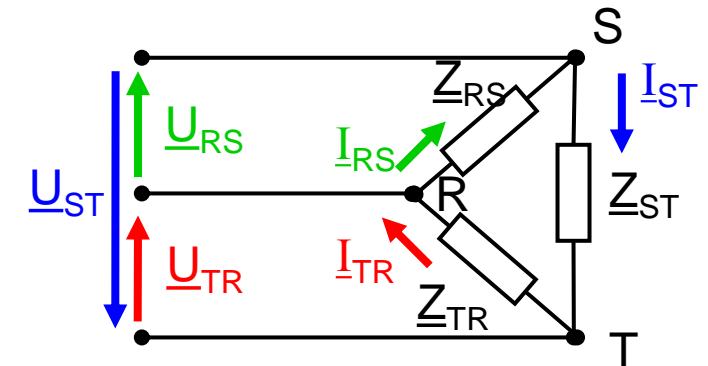
Umrechnung auf Bemessungsgrößen (Außenleiter)

$$I_{\Delta} = \frac{I_Y}{\sqrt{3}}$$

$$S_{3\sim} = \sqrt{3} \cdot U_{\Delta} \cdot I_Y = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$$

$$U_{RS} = U_{ST} = U_{TR} = U_{\Delta}$$

$$Z_{RS} = Z_{ST} = Z_{TR} = Z_{\Delta} = Z$$



$$I_{\Delta} = \frac{U_{\Delta}}{Z}$$

$$S_{3\sim} = 3 \cdot \frac{U_{\Delta}^2}{Z}$$

Scheinleistung im symmetrischen Drehstrom-System

Vergleich Stern- / Dreieckschaltung

Für einen symmetrischen Drehstrom-Verbraucher in **Sternschaltung** gilt:

- Die Strangspannung ist um $\sqrt{3}$ kleiner als die Leiterspannung

$$U_Y = \frac{U_\Delta}{\sqrt{3}}$$

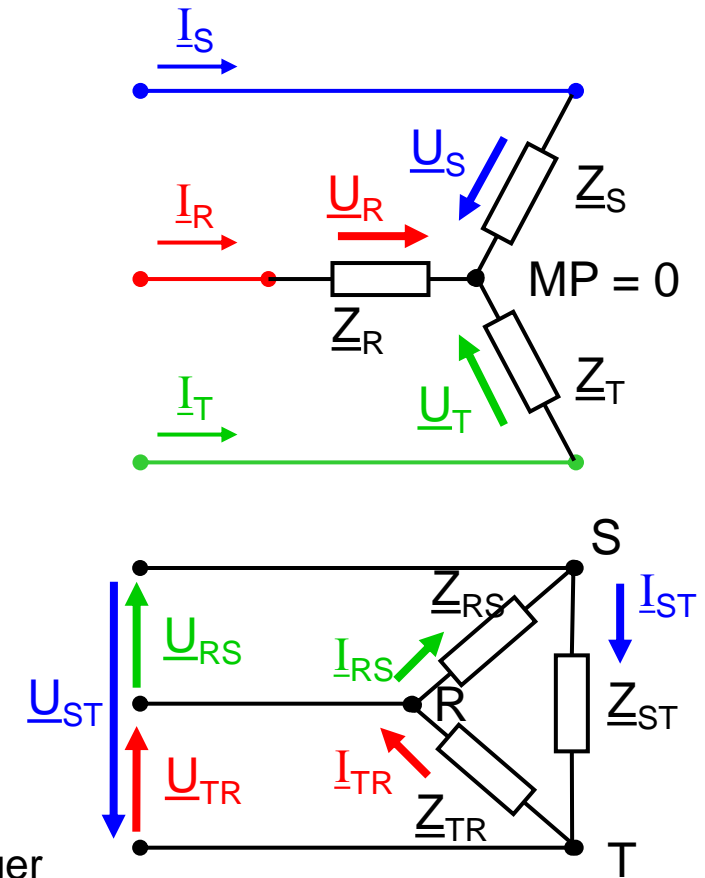
- Das Isolationssystem von Betriebsmitteln (bspw. Trafowicklung) ist kostengünstiger

Für einen symmetrischen Drehstrom-Verbraucher in **Dreieckschaltung** gilt:

- Der Außenleiterstrom ist um $\sqrt{3}$ größer als der Verbraucherstrom (Strangstrom)

$$I_\Delta = \frac{I_Y}{\sqrt{3}}$$

- Die Leiter- und Kühlsystem von Betriebsmitteln (bspw. Trafowicklung) ist kostengünstiger



Scheinleistung im symmetrischen Drehstrom-System

Vergleich Stern- / Dreieckschaltung

Für einen symmetrischen Drehstrom-Verbraucher mit dem gleichen Scheinwiderstand Z in den Strängen (bspw. Motorwicklung) ergibt

- die **Sternschaltung** eine Anschlussleistung von:

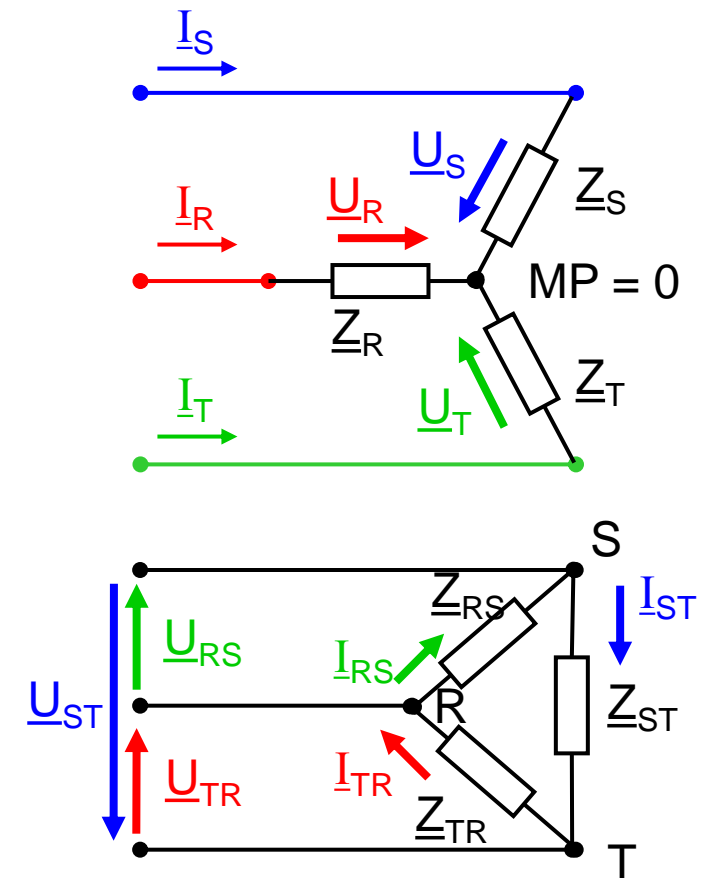
$$S_{3\sim} = 3 \cdot \frac{U_Y^2}{Z}$$

- die **Dreieckschaltung** eine Anschlussleistung von:

$$S_{3\sim} = 3 \cdot \frac{U_\Delta^2}{Z}$$

- Durch Umschaltung zwischen Stern- und Dreieckschaltung wird die Anschlussleistung **verdreifacht**.

$$U_\Delta = U_Y \cdot \sqrt{3} \qquad \frac{U_\Delta^2}{Z} = 3 \cdot \frac{U_Y^2}{Z}$$



Schaltungen von Drehstrom-Verbrauchern

Elektrische Wirkleistung bei symmetrischer Sternschaltung

Im **Drehstromsystem** wird die gesamte Wirkleistung für alle 3 Leiter (Phasen) berechnet. Bei **symmetrischer Last** fließt in allen Leitern der gleiche Strom. Der Phasenwinkel φ zwischen Spannung und Strom in den Strängen der **Sternschaltung** ist ebenfalls gleich groß. Somit ist hier die gesamte Wirkleistung das **3-fache** der einzelnen Wirkleistungen in jedem Strang.

$$P = 3 \cdot U_Y \cdot I \cdot \cos(\varphi)$$

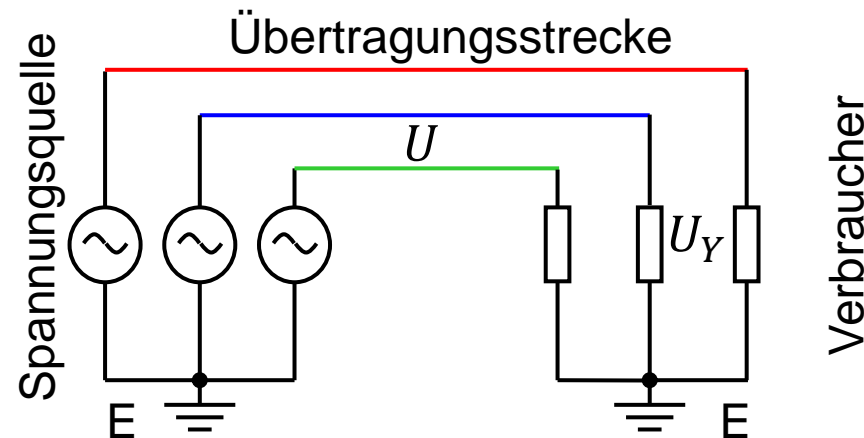
Strangspannung, Strangstrom

$$P = 3 \cdot \frac{U}{\sqrt{3}} \cdot I \cdot \cos(\varphi)$$

Bitte beachten: $U = \sqrt{3} \cdot U_Y$

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos(\varphi)$$

Leiterspannung, Leiterstrom



Schaltungen von Drehstrom-Verbrauchern

Elektrische Wirkleistung bei symmetrischer Dreieckschaltung

Im **Drehstromsystem** wird die gesamte Wirkleistung für alle 3 Leiter (Phasen) berechnet. Bei **symmetrischer Last** fließt in allen Leitern der gleiche Strom. Der Phasenwinkel φ zwischen Spannung und Strom in den Strängen der **Dreieckschaltung** ist ebenfalls gleich groß. Somit ist hier die gesamte Wirkleistung das **3-fache** der einzelnen Wirkleistungen in jedem Strang.

$$P = 3 \cdot U \cdot I_{\Delta} \cdot \cos(\varphi)$$

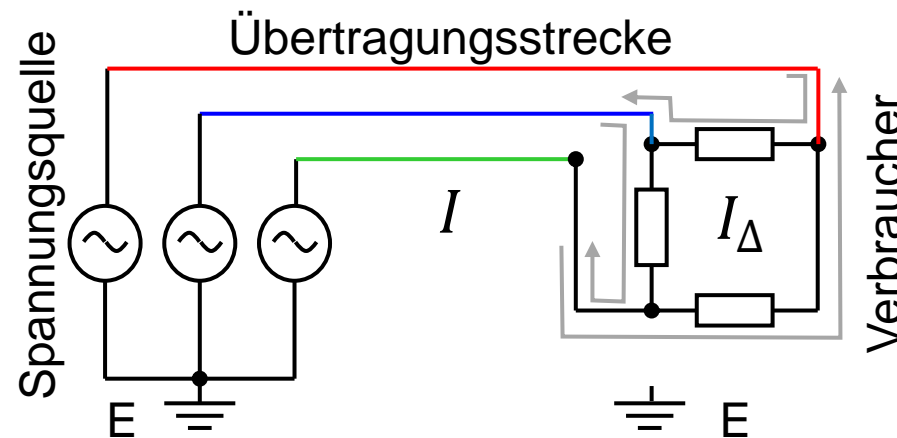
Strangspannung, Strangstrom

$$P = 3 \cdot U \cdot \frac{I}{\sqrt{3}} \cdot \cos(\varphi)$$

Bitte beachten: $I = \sqrt{3} \cdot I_{\Delta}$

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos(\varphi)$$

Leiterspannung, Leiterstrom





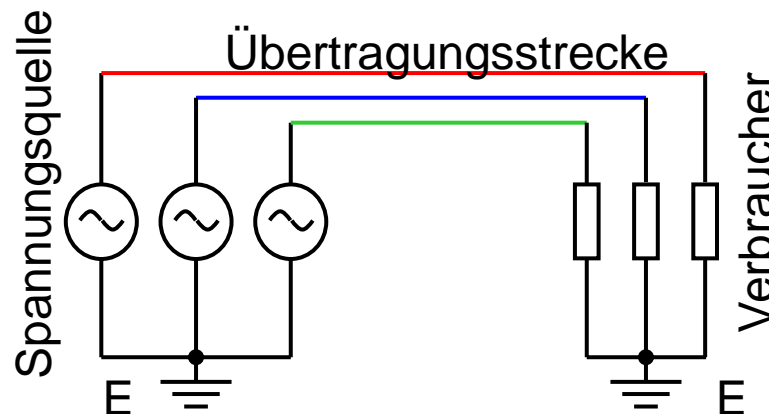
Lerneinheit

Eine symmetrische 380-kV-Übertragungsstrecke soll als Freileitungsstrecke ausgelegt werden. Die zu übertragende Scheinleistung sei

690 MVA bei einer Leiter-Erd-Betriebsspannung von 220 kV.

Der Bündelleiter-Widerstand betrage auf der gesamten Strecke 10 Ohm. Der Erdwiderstand auf der gesamten Strecke betrage 5 Ohm.

- Bestimmen Sie bitte den Außenleiterstrom!
- Wie groß ist die gesamte Verlustleistung der Übertragungsstrecke?
- Diskutieren sie die Effizienz der Leistungsübertragung!



Elektrische Leistungen im symmetrischen Drehstrom-System

Die Leistungsgleichungen sind unabhängig von Stern- oder Dreieckschaltung bei Verwendung von Außenleiterspannungen U_Δ und Außenleiterströme I_Y .

φ = Winkel von \underline{I} nach \underline{U} im Zeigerdiagramm

Alle Gleichungen geben die Beträge an.

Blindleistung für $\varphi > 0$ bei Induktivitäten positiv und

Blindleistung für $\varphi < 0$ bei Kapazitäten negativ gezählt

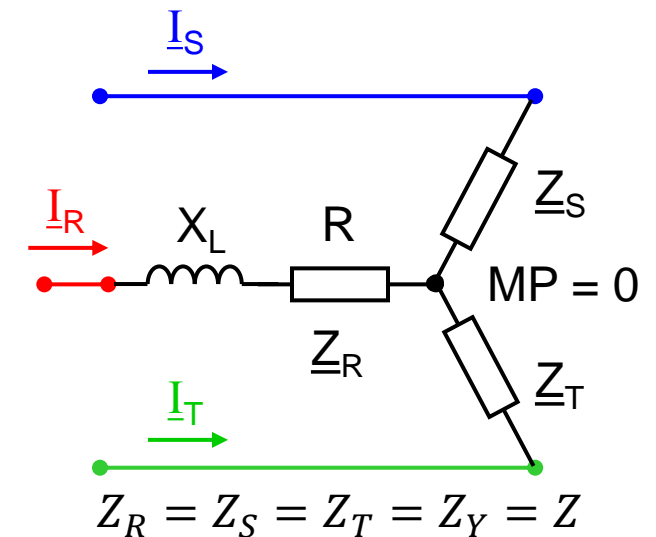
$$S_{3\sim} = \sqrt{3} \cdot U_\Delta \cdot I_Y$$

$$P_{3\sim} = S_{3\sim} \cdot \cos\varphi = \sqrt{3} \cdot U_\Delta \cdot I_Y \cdot \cos\varphi$$

$$Q_{3\sim} = S_{3\sim} \cdot \sin\varphi = \sqrt{3} \cdot U_\Delta \cdot I_Y \cdot \sin\varphi$$

Der **Leistungsfaktor** $\cos \varphi$ gibt an, welcher Anteil der Scheinleistung in Wirkleistung umgesetzt wird.

Bei induktiven Verbrauchern, wie elektrischen Maschinen, liegt der Leistungsfaktor zwischen 0,5 und 0,9.



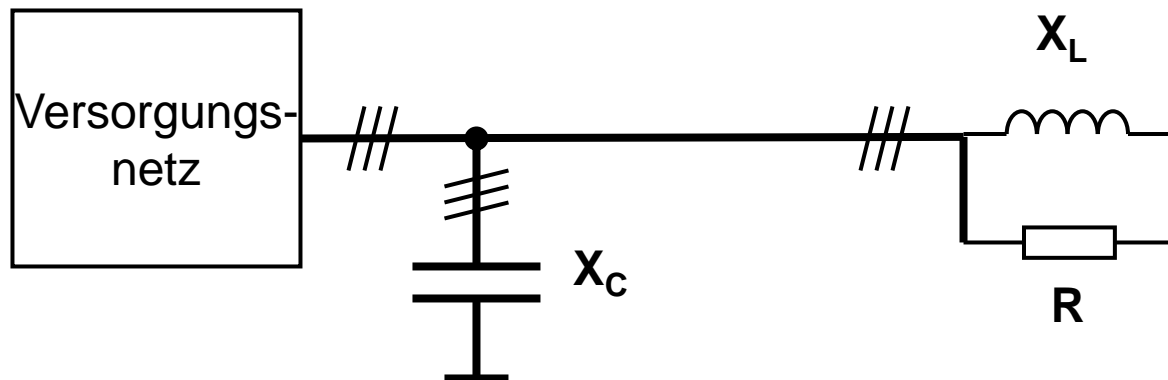
induktiver Blindwiderstand $X_L = \omega L$



Lerneinheit

Industrienetze mit induktiven Lasten (Elektrische Antriebe) haben hohe induktive Blindströme. Diese Blindströme bewirken hohe Leitungsverluste und eine starke Netzauslastung. Kapazitäten X_C am Netz-Einspeisepunkt speichern die Blindleistung zwischen. Die Blindleistung pendelt dann zwischen induktiven Verbrauchern X_L und Kondensatorbatterie X_C und belastet nicht das vorgelagerte Versorgungsnetz.

- Stellen Sie im einphasigen ESB die Gleichung für die Kompensation der Blindleistung auf.
- Bitte bestimmen Sie die Gleichung für die Kapazität der gesamten Kondensatorbank für den Netz-Einspeisepunkt!



$$X_L = \omega L$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

Fragen?

Nächste Vorlesung:

11.04.2024

Freileitungen

