



Technische  
Universität  
Braunschweig



# Grundlagen der elektrischen Energietechnik

## Teil 1: Grundlagen der Energieversorgung

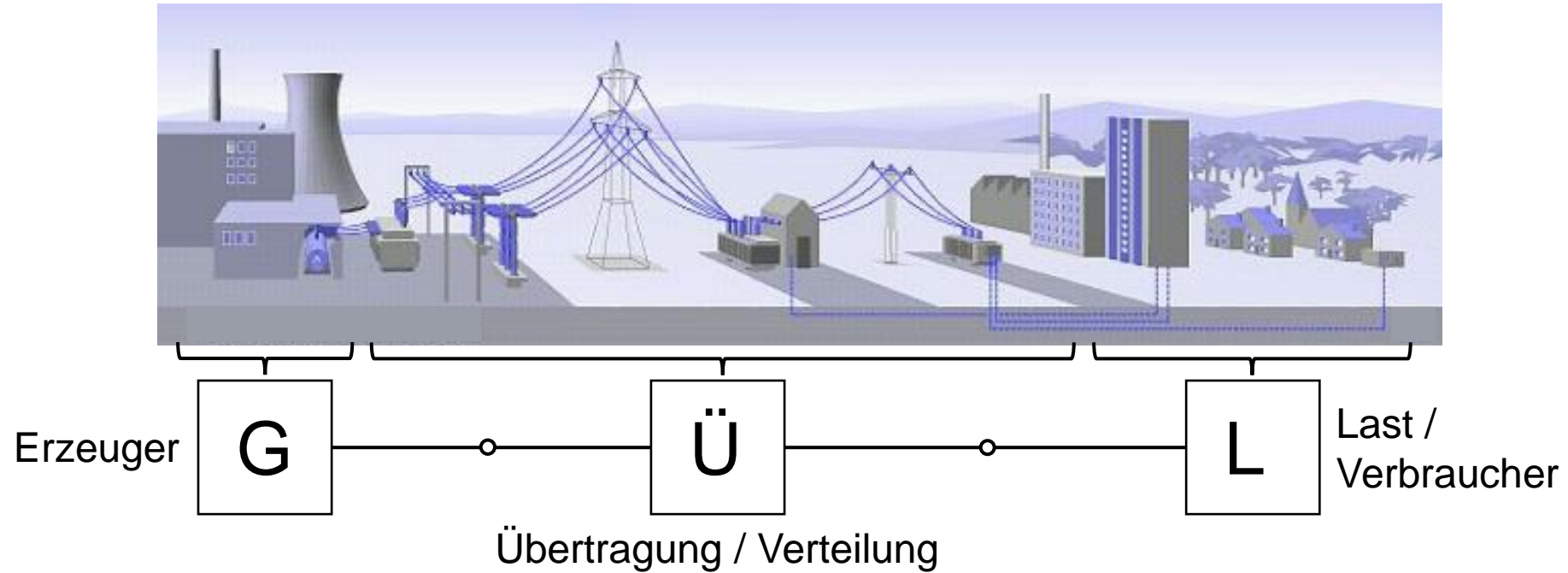
### - Freileitungen und Kabel -

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

# Freileitungen und Kabel

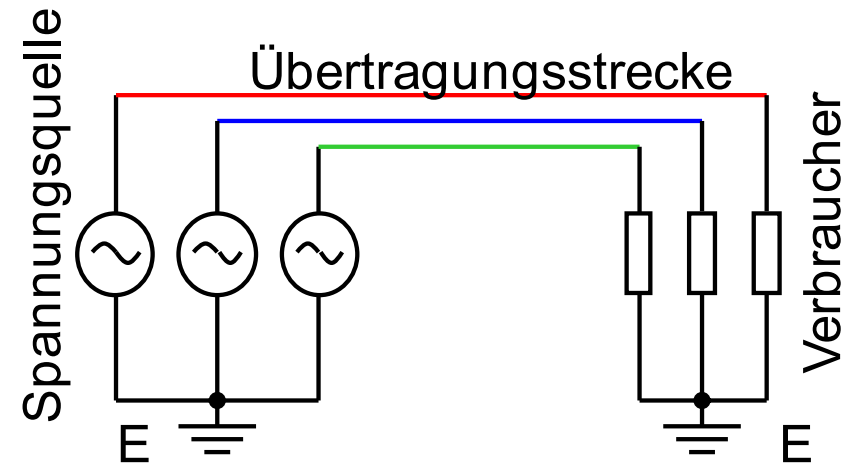
## Lernziele:

- Anwendung von Ersatzschaltbildern für Freileitungs- und Kabelsystemen
- Berechnung von Spannungen und Strömen bei der Drehstrom-Energieübertragung



# Agenda

- 1 | Freileitungen
- 2 | Kabel

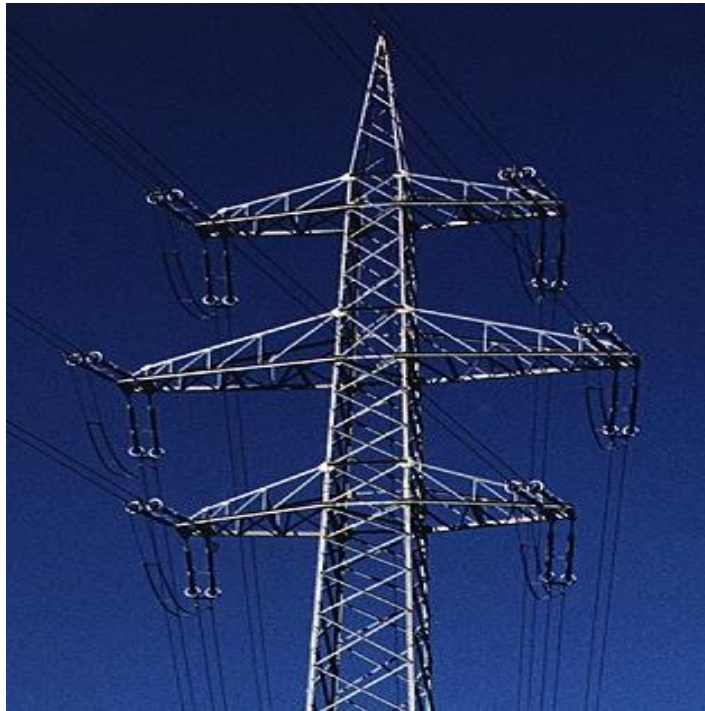


# 1 | Freileitungen

# Übertragung mit Freileitungen und Kabeln

Die **Drehstrom-Fernübertragung** erfolgt in der Regel über **Freileitungssysteme**. Freileitungen gibt es bis zu den höchsten Spannungen. In Deutschland beträgt die höchste Nennspannung **380 kV**, im Ausland 1000 kV.

Der Einsatz von **Drehstrom-Kabelstrecken** ist auf Entfernungen bis **100 km** beschränkt. Vorwiegend werden diese im **Mittelspannungsbereich** bis 30 kV eingesetzt. Hochspannungskabel (z.B. Berliner Trasse) gibt es für Nennspannungen bis zu 380 kV.

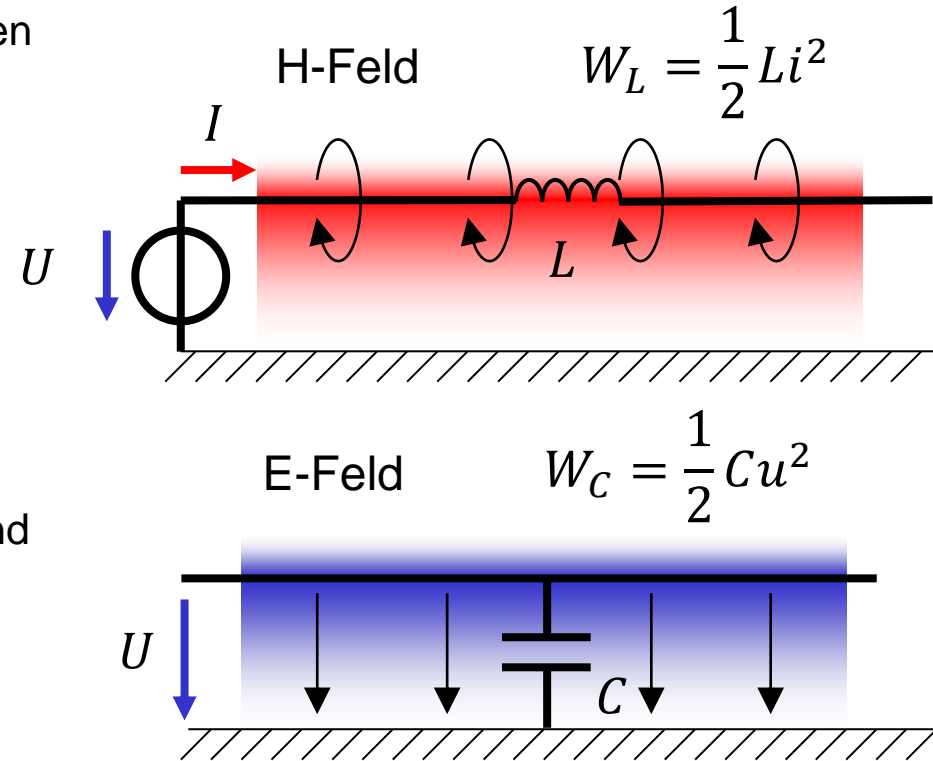




# Freileitungen Leitungs-Wellenwiderstand

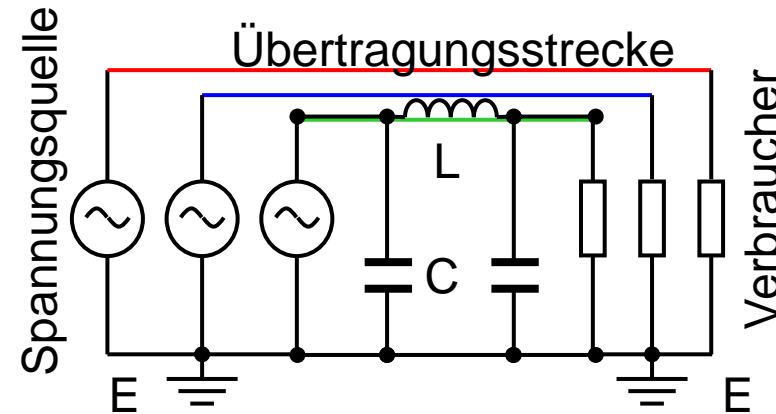
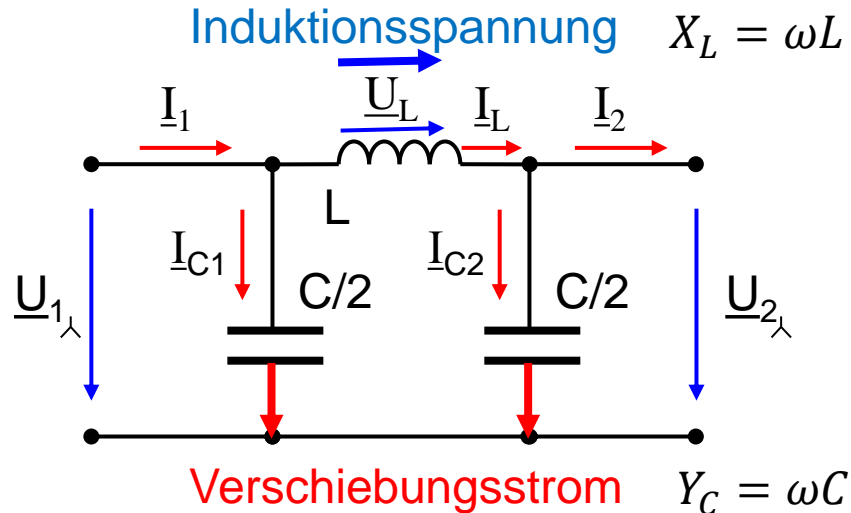
- Ein Stromfluss durch eine Leitung ist verknüpft mit Magnetfeldern
- Eine Leitung unter Spannung zu setzen ist verbunden mit Elektrofeldern
- Der Leitungswellenwiderstand  $Z_W$  ist als Verhältnis zwischen Leitungs-Spannung und Strom definiert
- Eine Leitung verhält sich wie ein reeller Widerstand, wenn magnetische und elektrische Feldenergie identisch sind → natürliche Leistung
- $Z_W$  ergibt sich aus  $L$  und  $C$  der Leitungsabschnitte und liegt im Bereich von 240 – 450 Ohm

$$\frac{1}{2}Cu^2 = \frac{1}{2}Li^2 \quad Z_W = \frac{u}{i} = \sqrt{L/C}$$



# Freileitungen Ersatzschaltbild

Eine Freileitung überträgt einen elektrischen Strom bei einer hohen Spannung.



Das Ersatzschaltbild für einen Leitungsabschnitt bis 200 km ist für alle 3 Außenleiter identisch:

- Symmetrisches  $\pi$ -Ersatzschaltbild durch Aufteilung der Leitungs-Kapazität
- Sternschaltung mit Leiter-Erd-Spannung

Die Wechselspannungen führen zu einem Stromfluss (Verschiebungsstrom) durch die Kapazitäten. Der Wechselstrom ruft eine Längs-Spannung (Induktionsspannung) an der Induktivität hervor.

$$I_C = Y_C \cdot U_Y$$

$$U_L = X_L \cdot I_L$$

Betrags-Größen

# Ersatzschaltbild-(ESB)-Elemente einer Freileitung

**Leitungsbeläge** für Freileitungen sind auf die Leitungslänge bezogen. Die ESB-Elemente ergeben sich durch Multiplikation mit der Leitungslänge  $l$

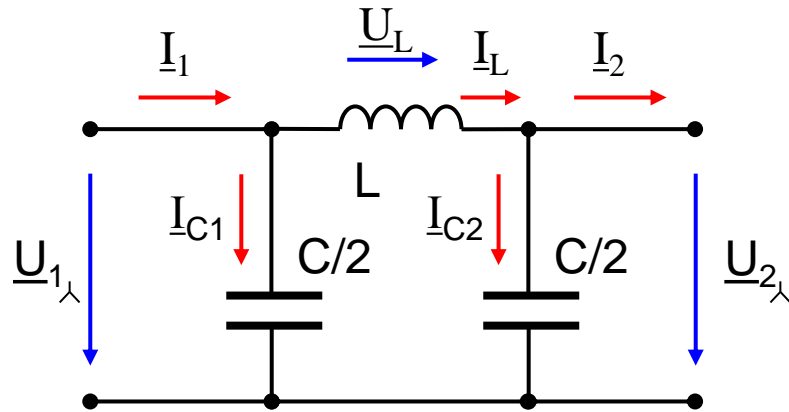
110-kV-Hochspannungs-Freileitung:  $X_L' = 0,4 \, \Omega/\text{km}$     $Y_C' = 3 \, \mu\text{S}/\text{km}$

380-kV-Höchstspannungs-Freileitung:  $X_L' = 0,25 \, \Omega/\text{km}$     $Y_C' = 4,5 \, \mu\text{S}/\text{km}$

Mit diesem einphasigen Ersatzschaltbild sollen zwei Betriebsfälle untersucht werden:

- Leitung ohne Belastung (Leerlauf)
- Leitung mit Wellenwiderstand belastet (Anpassung)

$$Z = \sqrt{L'/C'} = \sqrt{X_L'/Y_C'}$$



Betrags-Größen für das Ersatzschaltbild

$$Y_C = \omega C$$

$$Y_C = Y_C' \cdot l$$

$$X_L = \omega L$$

$$X_L = X_L' \cdot l$$

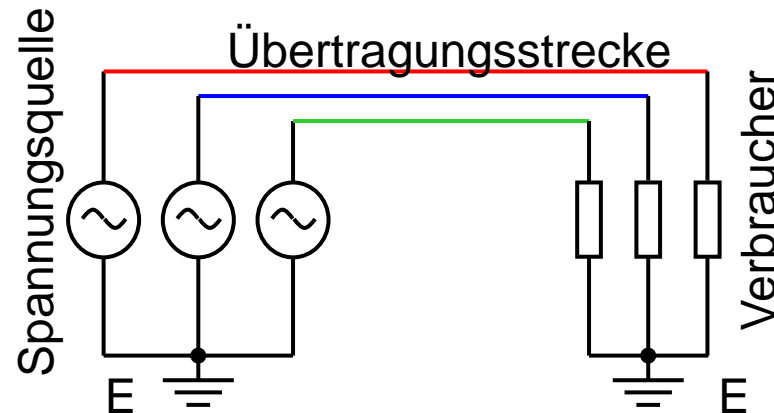




# Lerneinheit

Eine 380-kV-Übertragungsstrecke mit 100 km Länge soll als Freileitungsstrecke ausgelegt werden. Die zu übertragende Scheinleistung sei 690 MVA bei einer Leiter-Erd-Betriebsspannung von 220 kV.

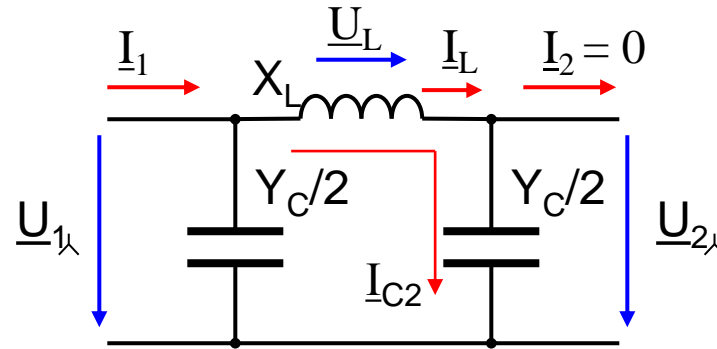
- Bestimmen Sie bitte den Außenleiterstrom aus der Scheinleistung!
- Wie groß ist die Längsspannung an der Leitungsinduktivität?
- Wie groß ist der kapazitive Verschiebungsstrom für einen Außenleiter?



# Leerlauf am Ende einer Freileitung

Bei einer unbelasteten Leitungsstrecke liegen besondere Betriebsbedingungen vor

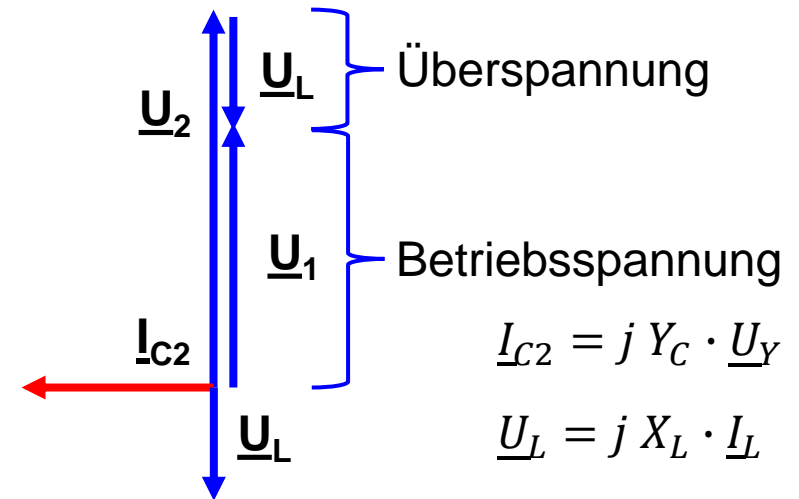
- Betrag der Spannung am Ende der Leitung
- Blindleistungsbilanz der Leitung (Blindleistungbedarf)



Rechenweg:

- kapazitiver Verschiebungsstrom eilt der Spannung am Leitungsende voraus
- kapazitiver Verschiebungsstrom fließt durch die Leitungsinduktivität
- Längsspannung eilt dem Strom durch die Leitungsinduktivität voraus

Die induktive Längsspannung führt zur Spannungsüberhöhung am Leitungsende, dies ist der **Ferranti-Effekt**. Die Leitung nimmt kapazitive Blindleistung auf.

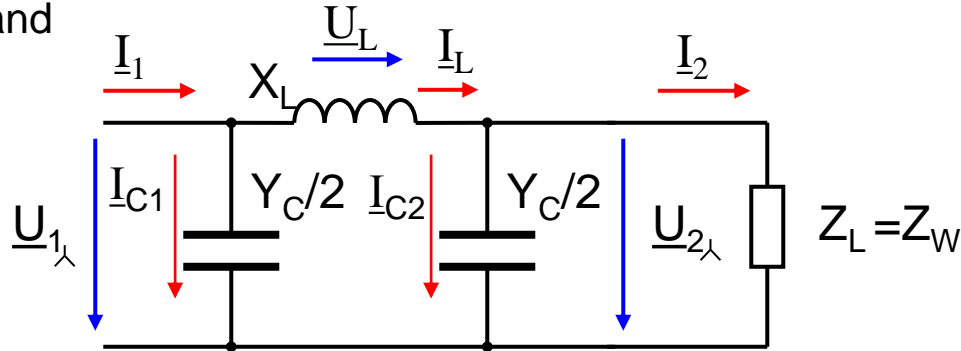


$$\underline{I}_{C2} = j Y_C \cdot \underline{U}_Y$$

$$\underline{U}_L = j X_L \cdot \underline{I}_L$$

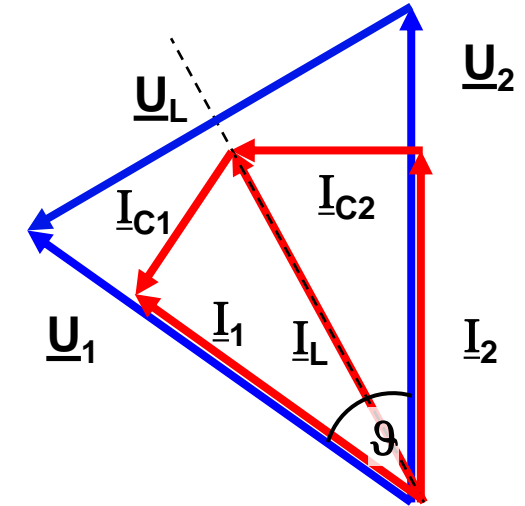
# Anpassung am Ende einer Freileitung

Der Verbraucherwiderstand am Ende der Leitung entspricht dem Wellenwiderstand



Die Leitung nimmt am Anfang genau die abgegebene Wirkleistung am Leitungsende auf. Diese **natürliche Leistung**  $P_{nat}$  ist deutlich kleiner als die maximale Übertragungsleistung. Bei einer 110-kV-Freileitung beträgt die natürliche Leistung 32 MW, bei einer 380-kV-Freileitung beträgt diese 600 MW. Die Blindleistungsbilanz der Leitung ist ausgeglichen.

Die Spannungs- und Stromzeiger am Anfang und am Ende der Leitung sind gleich groß und nur um einen Phasenwinkel  $\vartheta$  verschoben (**Übertragungswinkel**  $\vartheta$ ).



$$P_{nat} = 3 \cdot U_1^2 / Z$$

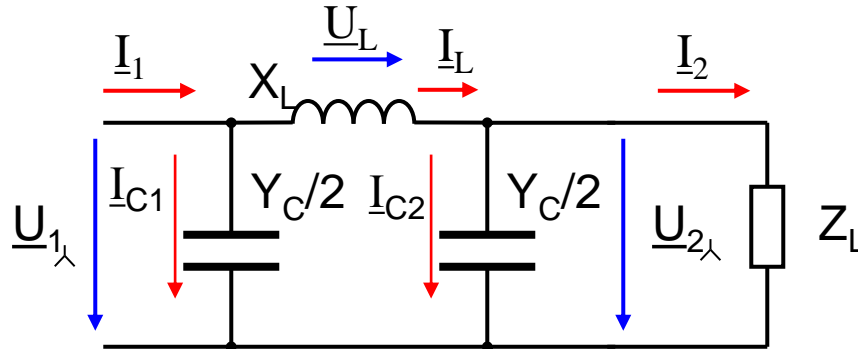
$$U_1 = U_2 \cdot e^{j\vartheta}$$

$$\vartheta = \sqrt{\omega L' \cdot \omega C'} \cdot l$$

$$Z_W = \sqrt{L' / C'} = \sqrt{X_L' / Y_C'}$$

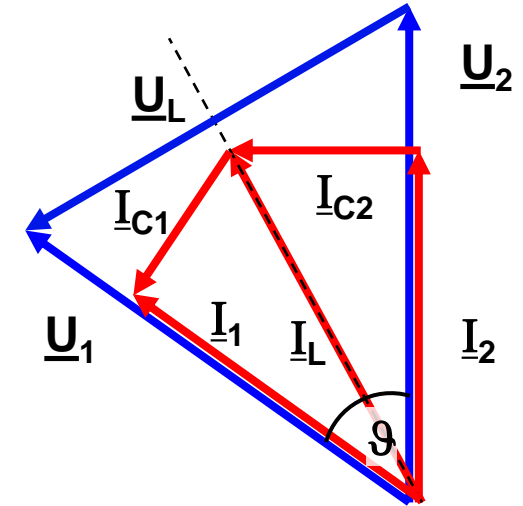
# Anpassung am Ende einer Freileitung

Der Verbraucherwiderstand am Ende der Leitung entspricht dem Wellenwiderstand



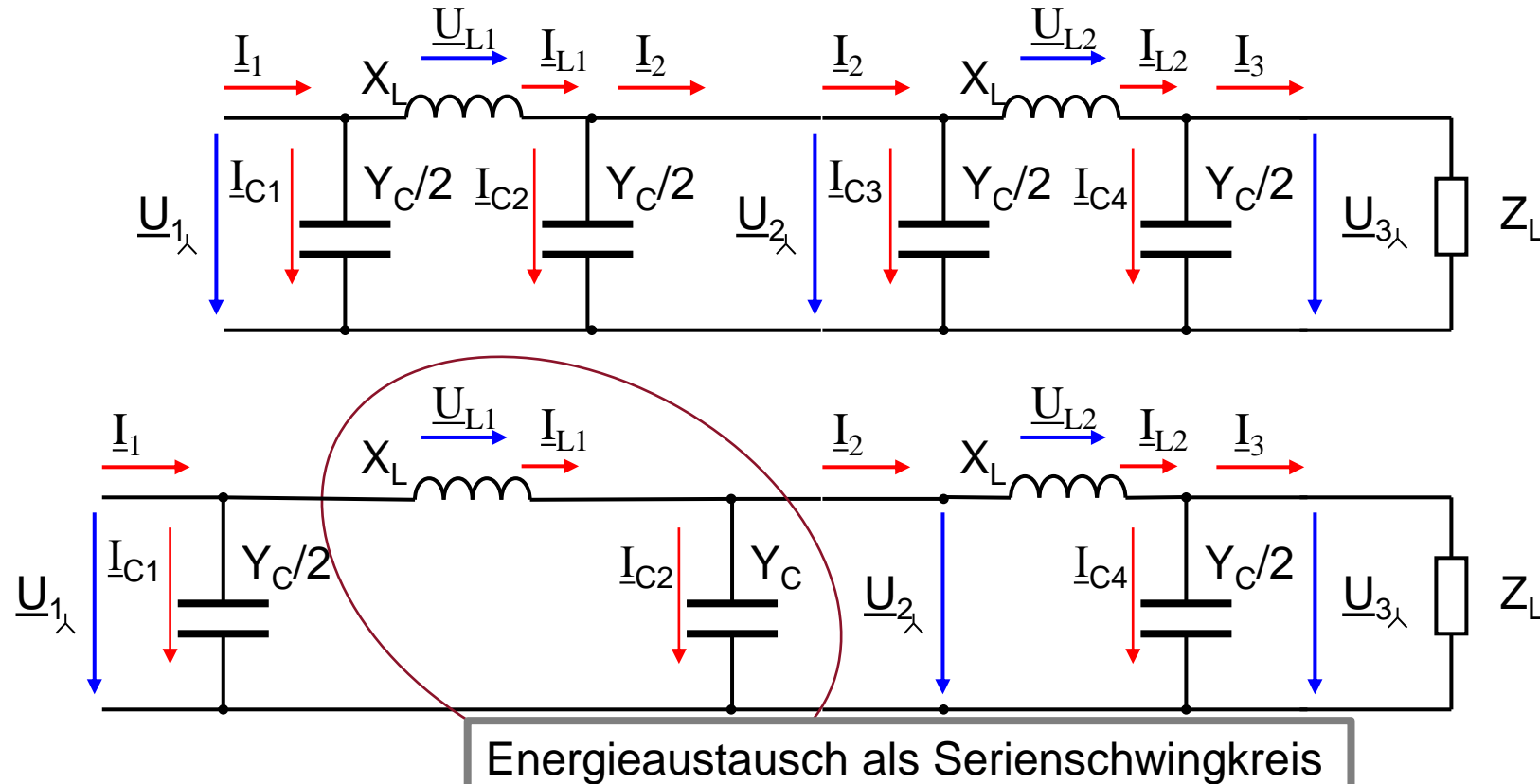
Konstruktion Zeigerdiagramm:

1. Bezugszeiger  $\underline{U}_2$  und Strom  $\underline{I}_2$  in Phase durch ohmschen Verbraucher
2. Strom  $\underline{I}_{C2}$  durch Kondensator  $C2$  eilt um  $90^\circ$  der Spg.  $\underline{U}_2$  voraus
3. Strom  $\underline{I}_L$  durch Induktivität  $L$  ergibt sich aus  $\underline{I}_L = \underline{I}_{C2} + \underline{I}_2$
4. Spg.  $\underline{U}_L$  an Induktivität ergibt sich aus Strom  $\underline{I}_L$  und eilt um  $90^\circ$  voraus
5. Spg.  $\underline{U}_1$  ergibt sich aus  $\underline{U}_1 = \underline{U}_L + \underline{U}_2$
6. Strom  $\underline{I}_{C1}$  durch Kondensator  $C1$  eilt um  $90^\circ$  der Spg.  $\underline{U}_1$  voraus
7. Der Strom  $\underline{I}_1$  am Leitungsanfang ergibt sich aus  $\underline{I}_1 = \underline{I}_{C1} + \underline{I}_L$
8. Leitung nimmt Wirkleistung auf, da Spgszeiger  $\underline{U}_1$  und Stromzeiger  $\underline{I}_1$  in Phase



# Anpassung am Ende einer Freileitung

Elektrische und magnetische Feldenergie tauschen sich innerhalb der Leitung aus.



Energieaustausch als Serienschwingkreis

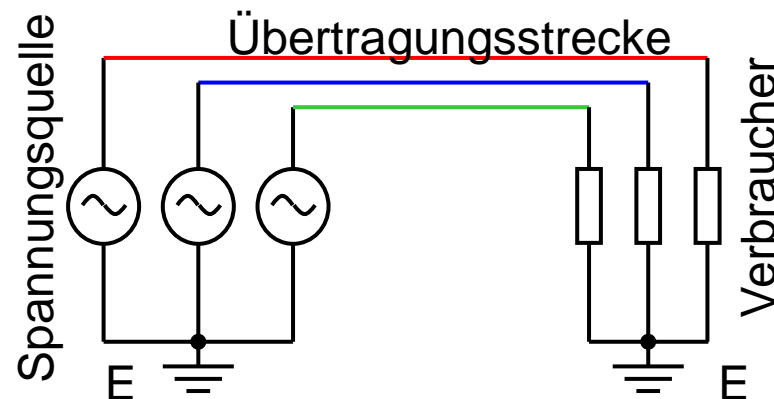
$$\frac{1}{2} C u^2 = \frac{1}{2} L i^2 \quad Z_W = \frac{u}{i} = \sqrt{L/C}$$



# Lerneinheit

Eine 380-kV-Übertragungsstrecke mit 100 km Länge soll als Freileitungsstrecke ausgelegt werden. Die natürliche Leistung soll übertragen werden bei einer Leiter-Erd-Betriebsspannung von 220 kV.

- Bestimmen Sie bitte die natürliche Leistung!
- Wie groß ist der Außenleiterstrom?
- Wie groß ist die maximale magnetisch gespeicherte Feldenergie für einen Außenleiter?
- Wie groß ist die in der Leitung pendelnde Blindleistung?

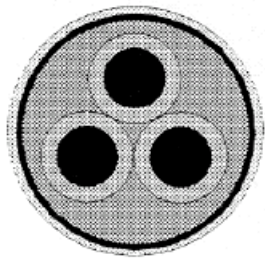




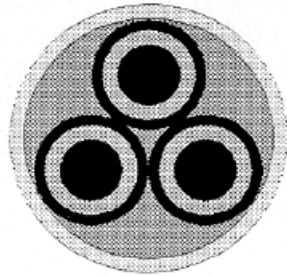
# 2 | Kabel

# Erdkabel - Einleitung

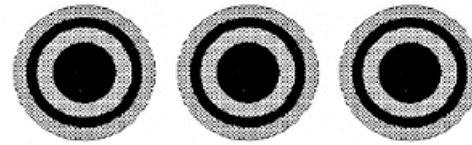
Die erste Bauform war das Gürtelkabel. Hier sind drei papierisolierte Leiter von einer Gürtelisolierung umgeben. Die Papierisolierung ist mit einer Öl-Harzmischung getränkt, daher auch der Name Massekabel.



Gürtelkabel



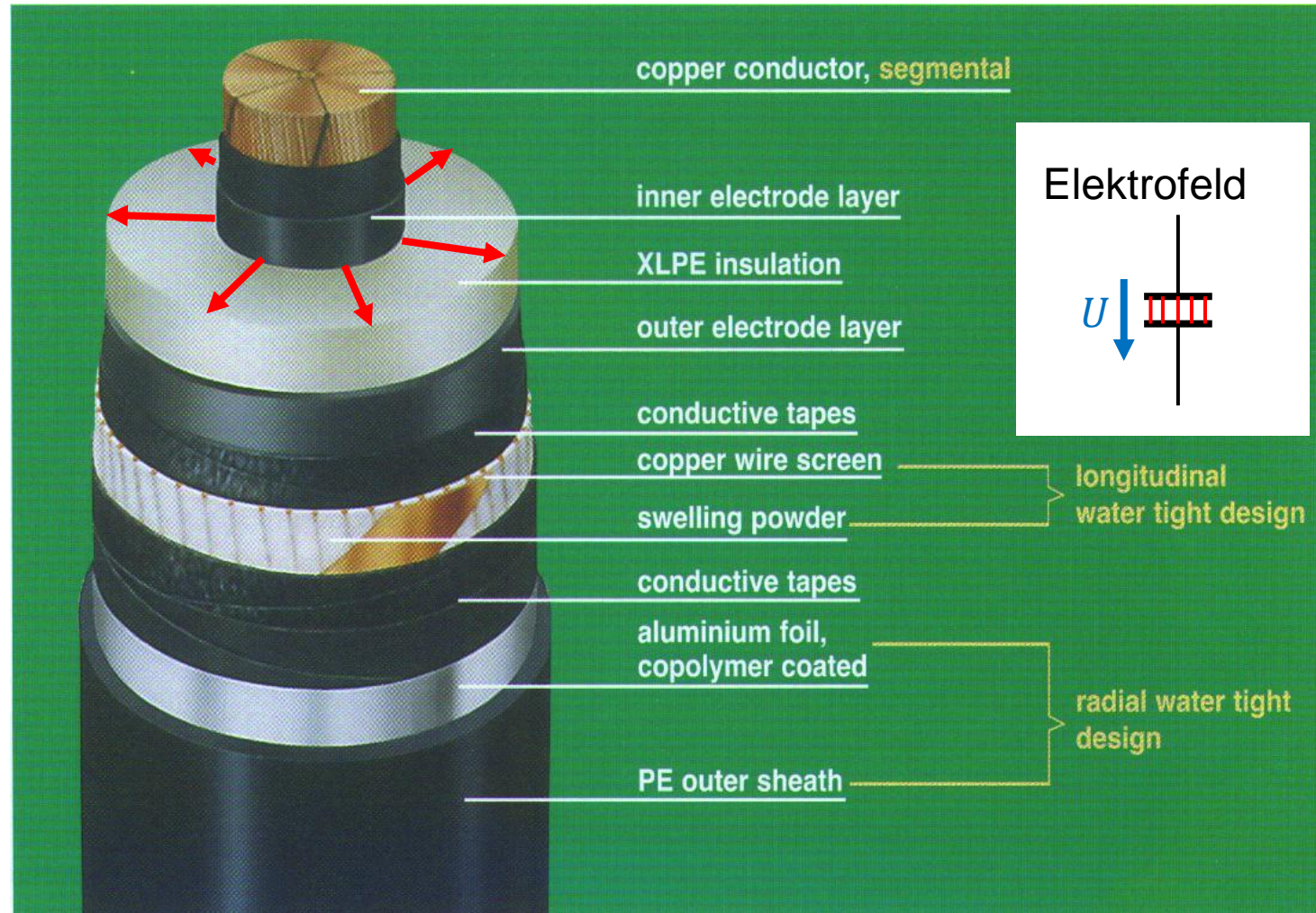
Dreimantel-Kabel



Einleiter-Kabel

Der Nachfolger war das hochspannungstechnisch optimierte Dreimantel-Kabel. Heute werden Kunststoffkabel verlegt (VPE-Kabel). Die Kunststoffkabel werden überwiegend als Einleiter-Kabel hergestellt und weisen neben hoher Flexibilität nur ein geringes Gewicht auf.

# Aufbau VPE-Kabel

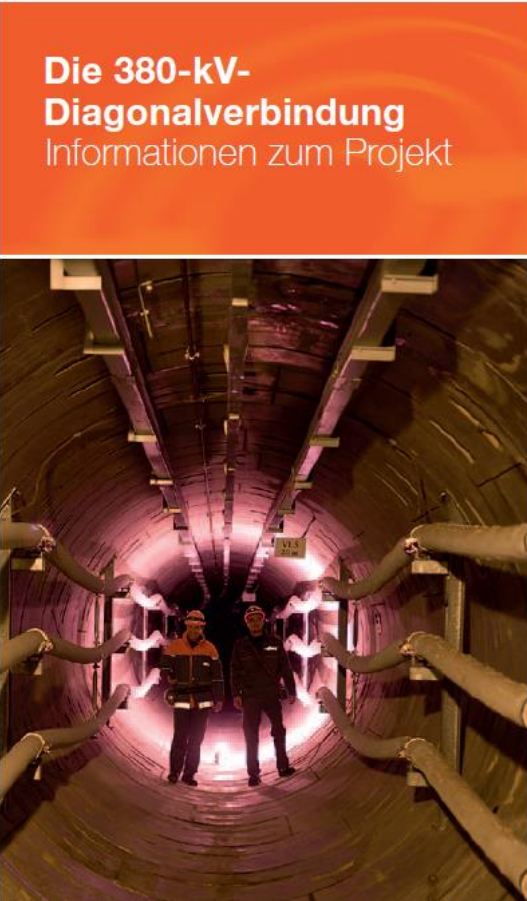


# Übertragung mit Freileitungen und Kabeln

Zum Einsatz kommen zwei Kabeltypen

	Schichtenmantel- kabel 2XS(FL)2Y	Wellmantel- kabel 2XKLD2Y
Leiterquerschnitt	1.600 mm <sup>2</sup> Cu	1.600 mm <sup>2</sup> Cu
Mantelquerschnitt	240 mm <sup>2</sup>	1.400 mm <sup>2</sup>
Außendurchmesser	134 mm	150 mm
Nenn-Übertragungsleistung	1.100 MVA	1.100 MVA
Kabelgewicht	ca. 27 kg/m	ca. 28 kg/m
max. Lieferlänge	750 m	750 m

Berliner Kabel-Trasse  
Betriebsspannung 380 kV.

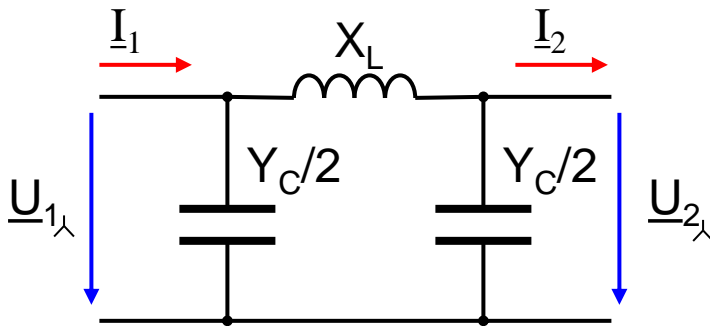


[www.50hertz.com](http://www.50hertz.com)

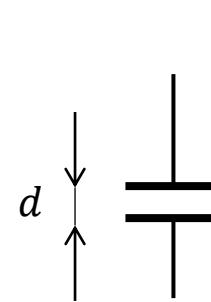


# Ersatzschaltbild Erdkabel

Das Starkstromkabel ist ebenfalls in einem Leitungs-Ersatzschaltbild darstellbar. Im Unterschied zur Freileitung hat es durch die kompakte Bauform und das feste Dielektrikum eine höhere Betriebskapazität (ca. Faktor 10 zur Freileitung).



Beispiel: Plattenkondensator



$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{A}{d}$$

Permittivität:  $\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$

Plattenfläche:  $A$

Plattenabstand:  $d$

Leitungsbeläge müssen für das ESB mit der Leitungslänge multipliziert werden.

Mittelspannungs-VPE-Kabel:  $X_L' = 0,1 \, \Omega/\text{km}$      $Y_C' = 40 \, \mu\text{S}/\text{km}$

Wellenwiderstand:  $Z_L = 30 \, \Omega$

Freileitung

$Z_L = 450 \, \Omega$

$Y_C' = 3 \, \mu\text{S}/\text{km}$

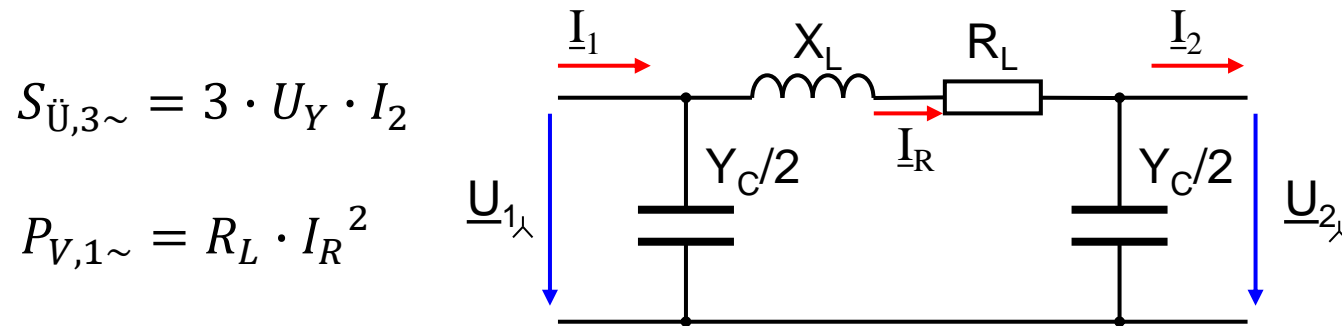
$$Z_W = \sqrt{L'/C'} = \sqrt{X_L'/Y_C'}$$

$$X_L = \omega \cdot L$$

$$Y_C = \omega \cdot C$$

# Betriebsverhalten Übertragungsleistung Erdkabel

Der Widerstand des Innenleiters  $R_L$  im Ersatzschaltbild führt bei Stromfluss zu ohmschen Verlusten  $P_V$  und zur Erwärmung des Innenleiters und der festen Isolation. Die maximale Temperatur der Isolation (max. 90°C) bestimmt den Betriebsstrom und damit die übertragbare Leistung.



$$S_{\ddot{U},3\sim} = 3 \cdot U_Y \cdot I_2$$

$$P_{V,1\sim} = R_L \cdot I_R^2$$

Die natürliche Leistung entspricht der Belastung mit dem Wellenwiderstand. Durch die höhere Betriebskapazität ist der Wellenwiderstand um ca. einen Faktor 10 geringer als bei der Freileitung. Die natürliche Leistung wird nicht erreicht, da der zulässige Betriebsstrom überschritten wird.

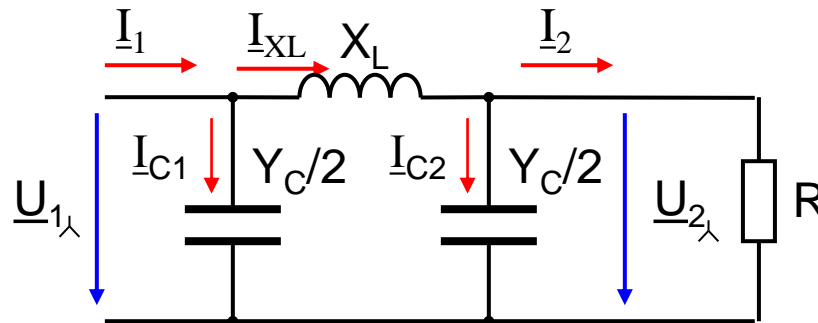
$$P_{nat} = \frac{U^2}{Z} \gg P_{zulässig} \quad I_{nat} = U_Y / Z \quad Z_W = \sqrt{L' / C'} = \sqrt{X_L' / Y_C'}$$



# Betriebsverhalten Übertragungsstrecke Erdkabel

Der kapazitive Leitungsbelag verursacht einen Verschiebungsstrom (Blindstrom). Dieser überlagert sich mit dem Leitungsstrom für die Energieübertragung zum Verbraucher. Der maximale Betriebsstrom beschränkt somit die übertragbare Leistung einer langen Kabelstrecke.

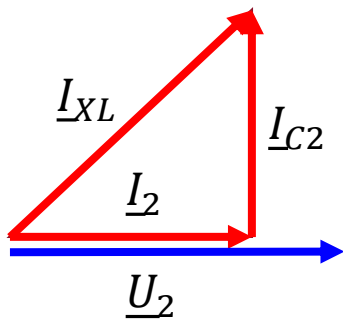
Beispiel 110-kV-Kabel



$$Y_C/2 = 7 \text{ mS}$$

$$U_{2Y} = 70 \text{ kV}$$

$$I_{max} = 700 \text{ A}$$



$$I_{C2} = (Y_C/2) \cdot U_{2Y}$$



$$I_{C2} = 490 \text{ A}$$

$$I_{XL} = I_{C2} + I_2$$



$$I_2 = 490 \text{ A}$$

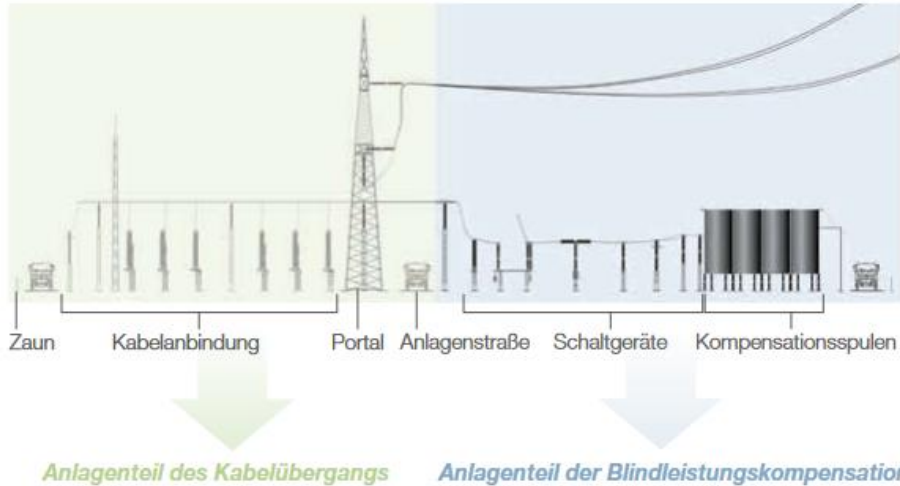
Satz von Pythagoras

# Kabelübergangsanlage Tennet in Holle (Niedersachsen)

380 kV Drehstromübertragung



- Wahle – Mecklar  
380-kV-Leitungsbau**  
(Stand: März 2022)
- Gebiet Niedersachsen  
Abschnitt A:  
UW Wahle – UW Lamspringe
- geplante 380-kV-Freileitung
  - geplante 380-kV-Erdverkabelung
  - Umspannwerk (UW)
  - Kabelübergangsanlage (KÜA)
  - Pumpspeicherkraftwerk



# Fragen?

Nächste Vorlesung:

11.04.2024

Transformator

