

1. Übung: Energieübertragung und Netzregelung

Institut für Elektroenergiesysteme und Hochspannungstechnik



Organisatorisches

- 6 Übungstermine (5 Übungen + 1 Fragestunde)

- Zugangsdaten
 - Nutzername: euen
 - Passwort: 4EUN2use!

- Kontakt: timo.nowak@kit.edu

- Klausur
 - Termin: 16.10.2019
 - Hilfsmittel: Taschenrechner und Formelsammlung (wird gestellt)

Organisatorisches

- Ablauf der Übung:
 - Wiederholung/Zusammenfassung des Wesentlichen
 - **Übungsaufgaben** und **Lösungen** werden Online veröffentlicht zum selbst Üben. Übungsaufgaben sind Basis für die Klausur.
 - Einzelne Aufgaben werden exemplarisch in der Übung vorgerechnet.
 - Zeit für Fragen zu den übrigen Aufgaben

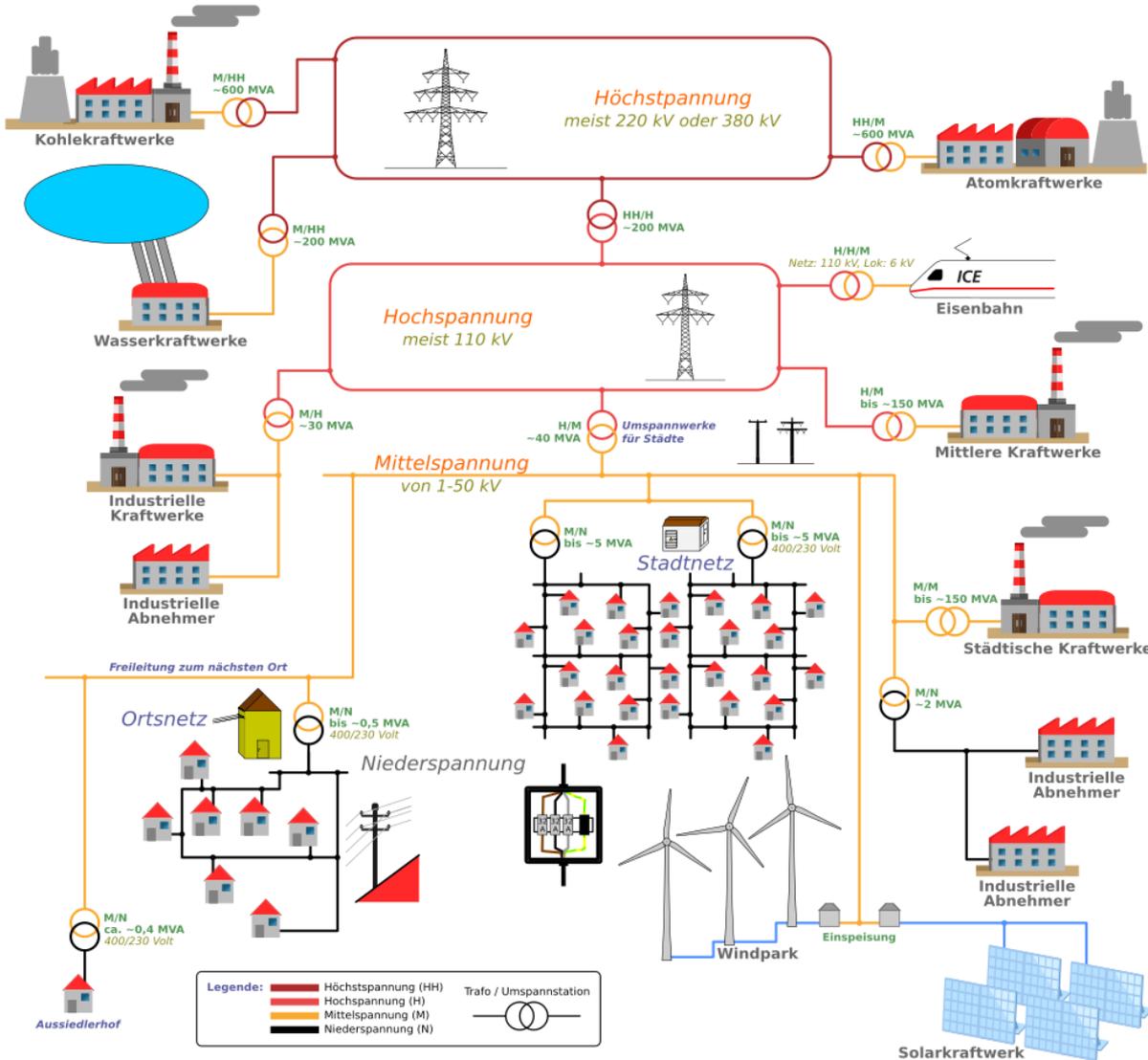
Themen 1. Übung EÜN

- Grundlagen
 - Netzstruktur in Deutschland und Europa
 - Wiederholungen
 - Definitionen
- Einspeisung in ein starres Netz über eine lange Leitung
- Beispielaufgabe zu „Einspeisung in ein starres Netz über kurze Leitung“

Themen 1. Übung EÜN

- Grundlagen
 - **Netzstruktur in Deutschland und Europa**
 - Wiederholungen
 - Definitionen
- Einspeisung in ein starres Netz über eine lange Leitung
- Beispielaufgabe zu „Einspeisung in ein starres Netz über kurze Leitung“

Grundlagen – Netzstruktur in Deutschland



↑
Transportnetz-
betreiber

↓
Verteilnetz-
betreiber

Grundlagen – Netzstruktur in Deutschland



Grundlagen – Netzstruktur in Deutschland



Niederspannung (400V)

Grundlagen – Netzstruktur in Deutschland



Grundlagen – Netzstruktur in Deutschland



Höchstspannung in Kanada (735 kV)

Grundlagen – Netzstruktur in Deutschland



Grundlagen – Netzstruktur in Deutschland



Hochspannung (110 kV, 220 kV und 380 kV)

Grundlagen – Netzstruktur in Deutschland



Grundlagen – Netzstruktur in Deutschland



Mittelspannung (20 kV)

Grundlagen – Netzstruktur in Deutschland



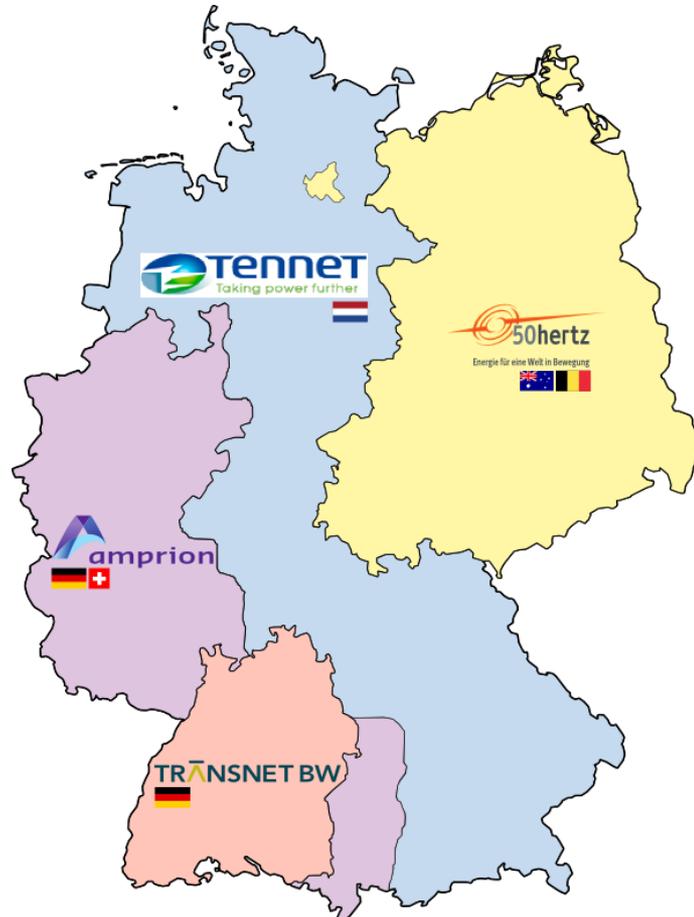
Grundlagen – Netzstruktur in Deutschland



Niederspannung (400V)

Grundlagen – Netzstruktur in Deutschland

- Transportnetzbetreiber bzw. Übertragungsnetzbetreiber betreiben überregionales Stromnetz



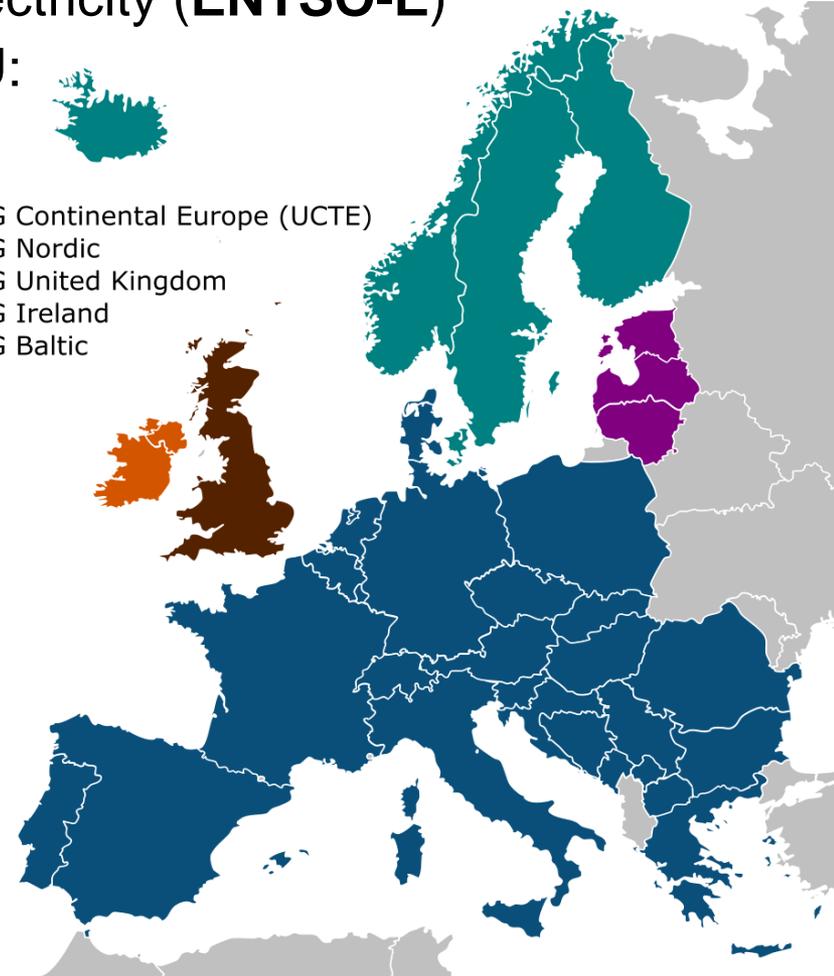
- Vier Übertragungsnetzbetreiber in Deutschland
- Aufgaben
 - Betreuung überregionaler Stromnetze
 - Beschaffung/Einkauf von **Regelleistung** zur Sicherstellung der Stabilität der Stromnetze

Grundlagen – Netzstruktur in Europa

- 43 Übertragungsnetzbetreiber bilden European Network of Transmission System Operators for Electricity (**ENTSO-E**)
- Insgesamt fünf Verbundnetze in der EU:

- Kontinentaleuropäisches Netz (ehem. UCTE) ist mit ca. 670 GW größtes Verbundnetz der Welt

- RG Continental Europe (UCTE)
- RG Nordic
- RG United Kingdom
- RG Ireland
- RG Baltic

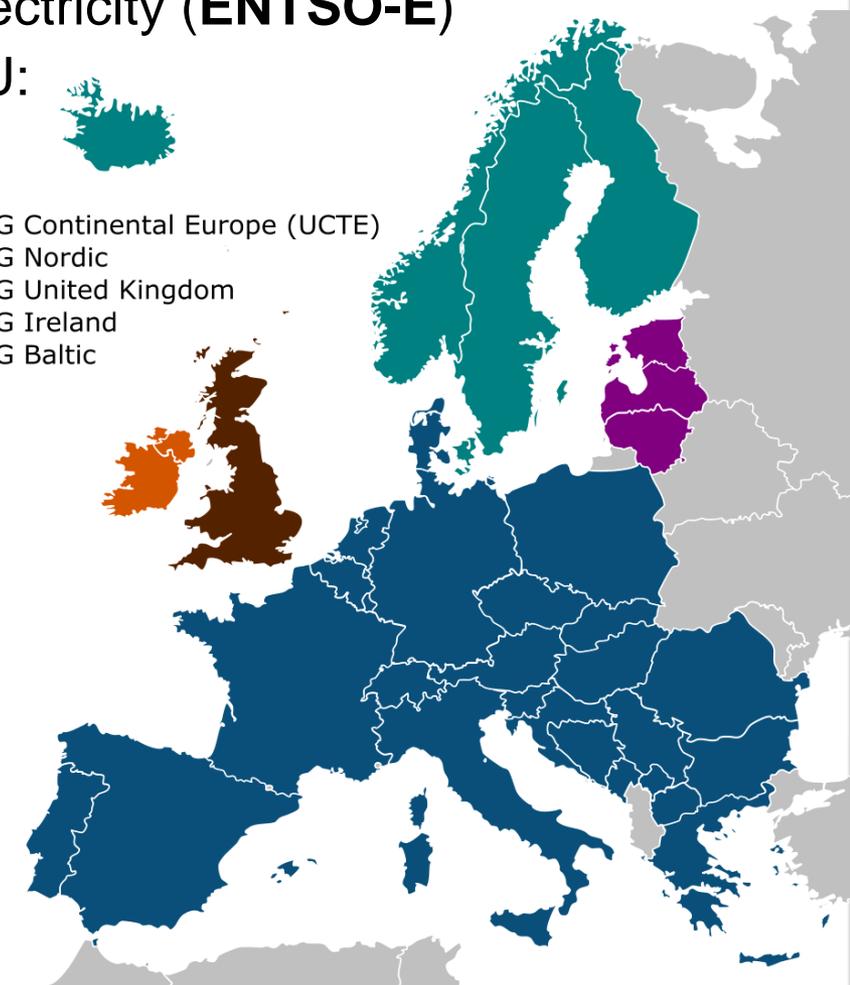


Grundlagen – Netzstruktur in Europa

- 43 Übertragungsnetzbetreiber bilden European Network of Transmission System Operators for Electricity (**ENTSO-E**)
- Insgesamt fünf Verbundnetze in der EU:

- Kontinentaleuropäisches Netz (ehem. UCTE) ist mit ca. 670 GW größtes Verbundnetz der Welt

- Hauptvorteil der weiträumigen Vernetzung:
Lokale Leistungsschwankungen können besser ausgeglichen werden.

- 
- RG Continental Europe (UCTE)
 - RG Nordic
 - RG United Kingdom
 - RG Ireland
 - RG Baltic

Themen 1. Übung EÜN

- Grundlagen
 - Netzstruktur in Deutschland und Europa
 - **Wiederholungen**
 - **Definitionen**
- Einspeisung in ein starres Netz über eine lange Leitung
- Beispielaufgabe zu „Einspeisung in ein starres Netz über kurze Leitung“

Themen 1. Übung EÜN

- Wiederholungen und Definitionen
 - **Spannungen**
 - Vorzeichen bei Wirk- und Blindleistung
 - Ersatzimpedanz

Wiederholungen und Definitionen – Spannungen

Was bedeutet eigentlich ... ?

Nennspannung

Effektivwert

Leiterspannung

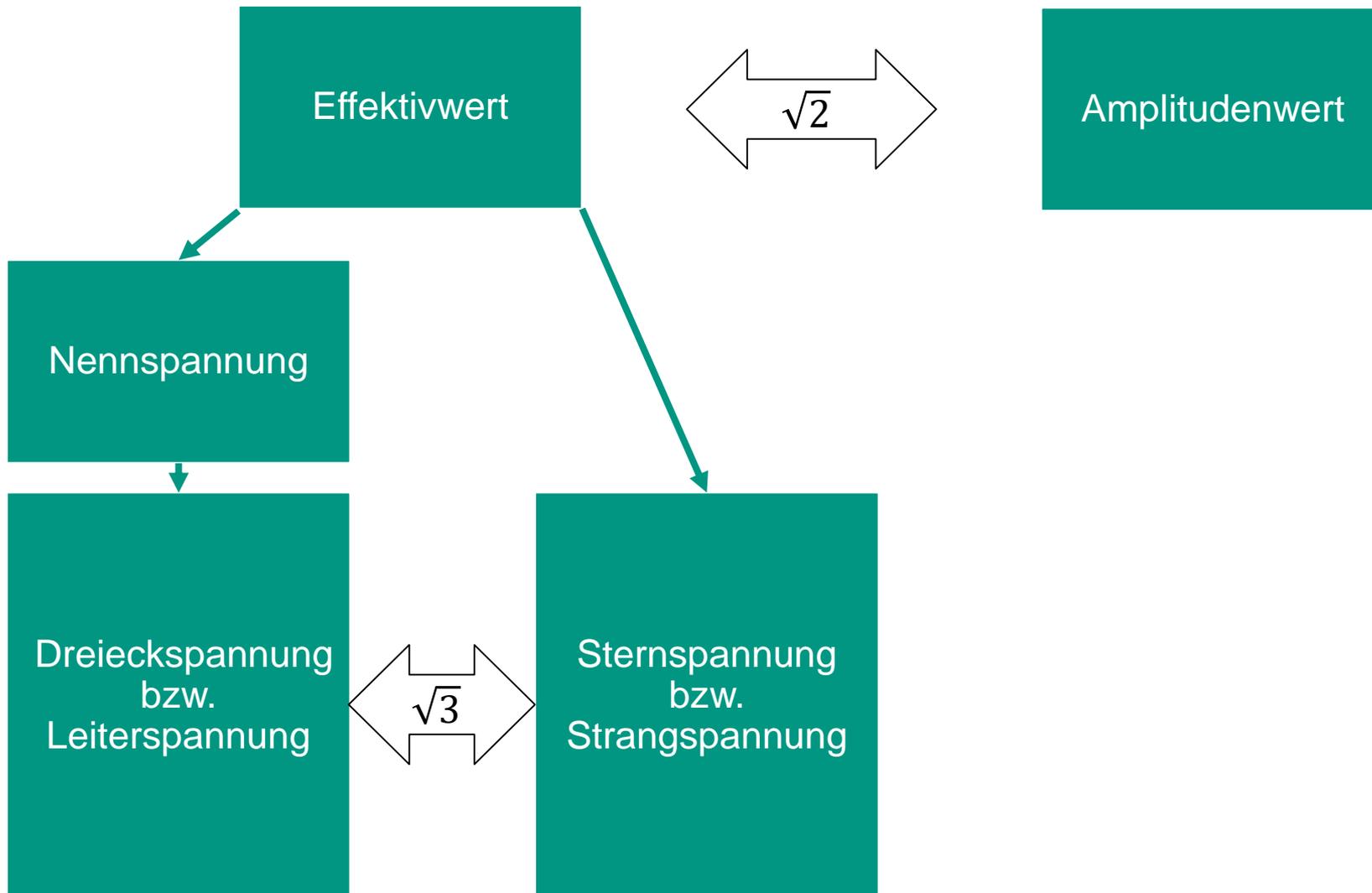
Strangspannung

Sternspannung

Dreiecksspannung

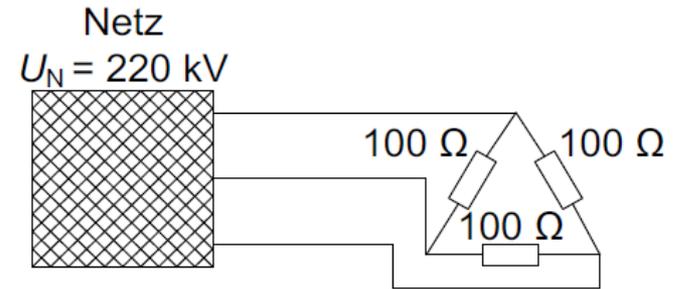
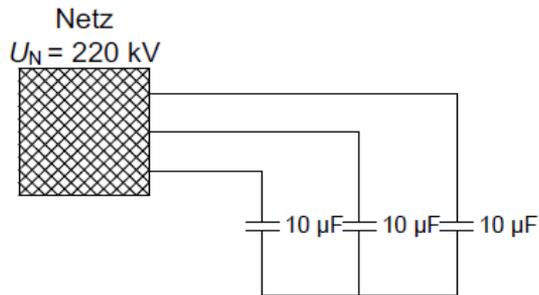
Amplitudenwert

Wiederholungen und Definitionen – Spannungen



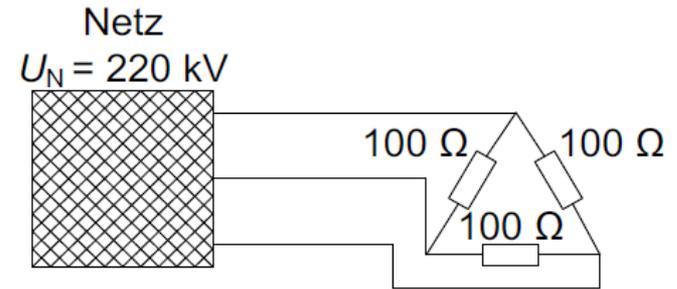
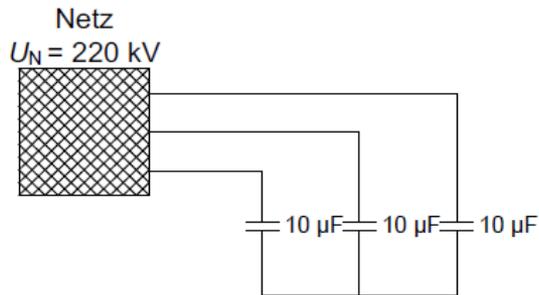
Wiederholungen und Definitionen – Anwendung

Berechnen Sie die Wirk- und Blindleistungsaufnahme der beiden Lasten in Abbildung 1 und 2.



Wiederholungen und Definitionen – Anwendung

Berechnen Sie die Wirk- und Blindleistungsaufnahme der beiden Lasten in Abbildung 1 und 2.



Welche Verschaltung liegt vor?
 Welche Spannung muss verwendet werden?

Wiederholungen und Definitionen – Anwendung

Berechnen Sie die Wirk- und Blindleistungsaufnahme der beiden Lasten in Abbildung 1 und 2.

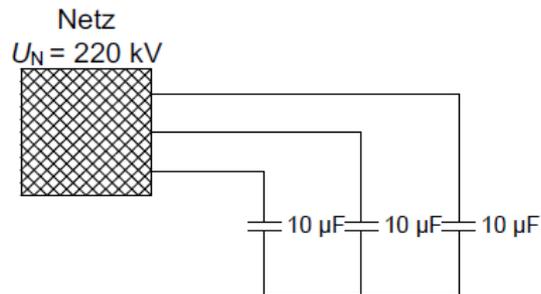


Abbildung 1 Last in Sternschaltung

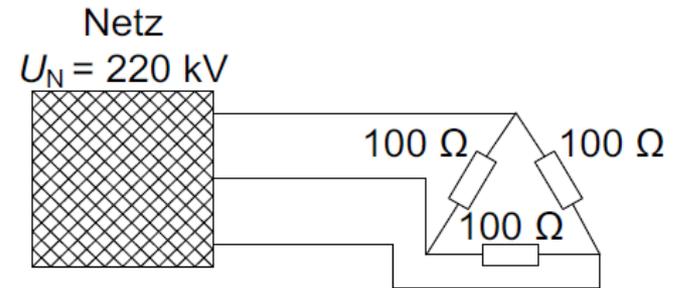


Abbildung 2 Last in Dreiecksschaltung

Wiederholungen und Definitionen – Anwendung

Berechnen Sie die Wirk- und Blindleistungsaufnahme der beiden Lasten in Abbildung 1 und 2.

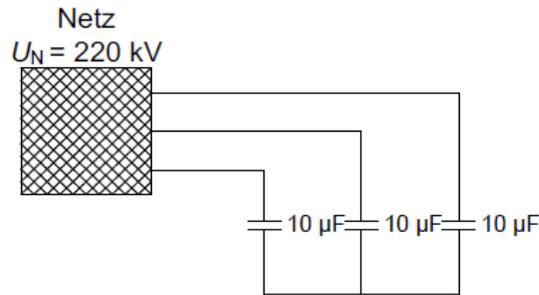


Abbildung 1 Last in Sternschaltung

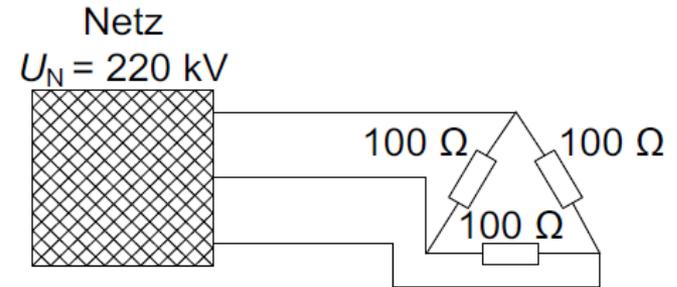


Abbildung 2 Last in Dreiecksschaltung

$$\underline{S} = 3 \cdot U_Y \cdot \underline{I}^* \leftarrow \text{Komplexe Konjugation nicht vergessen!}$$

Wiederholungen und Definitionen – Anwendung

Berechnen Sie die Wirk- und Blindleistungsaufnahme der beiden Lasten in Abbildung 1 und 2.

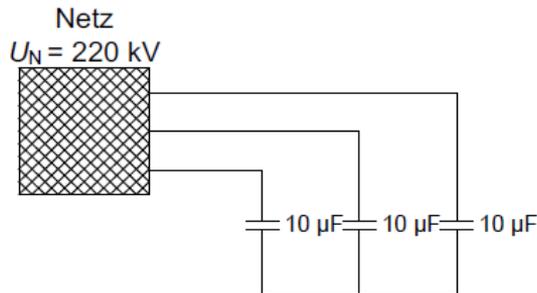


Abbildung 1 Last in Sternschaltung

$$\begin{aligned}
 \underline{S} &= 3 \cdot U_Y \cdot \underline{I}^* \\
 &= \sqrt{3} \cdot U_\Delta \cdot \underline{I}^* = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot \left(\frac{U_Y}{Z} \right)^* \\
 &= \sqrt{3} \cdot U_N \cdot \left(\frac{U_Y}{\frac{1}{j\omega C}} \right)^* = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot \frac{U_N}{\sqrt{3}} \cdot (j\omega C)^* \\
 &= U_N^2 \cdot (-j\omega C)
 \end{aligned}$$

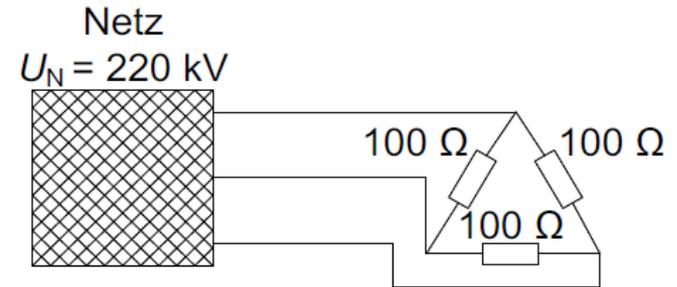


Abbildung 2 Last in Dreiecksschaltung

Wiederholungen und Definitionen – Anwendung

Berechnen Sie die Wirk- und Blindleistungsaufnahme der beiden Lasten in Abbildung 1 und 2.

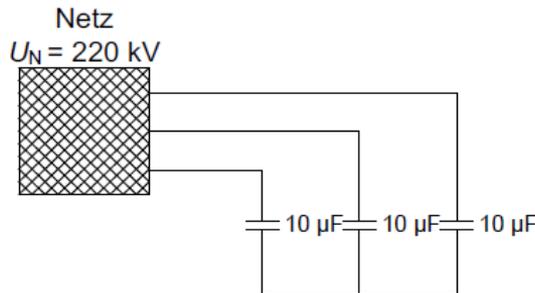


Abbildung 1 Last in Sternschaltung

$$\begin{aligned}
 \underline{S} &= 3 \cdot U_Y \cdot \underline{I}^* \\
 &= \sqrt{3} \cdot U_\Delta \cdot \underline{I}^* = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot \left(\frac{U_Y}{Z} \right)^* \\
 &= \sqrt{3} \cdot U_N \cdot \left(\frac{U_Y}{\frac{1}{j\omega C}} \right)^* = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot \frac{U_N}{\sqrt{3}} \cdot (j\omega C)^* \\
 &= U_N^2 \cdot (-j\omega C) \quad \begin{array}{l} \text{Keine Wirkleistung} \\ \text{Negative Blindleistung} \end{array}
 \end{aligned}$$

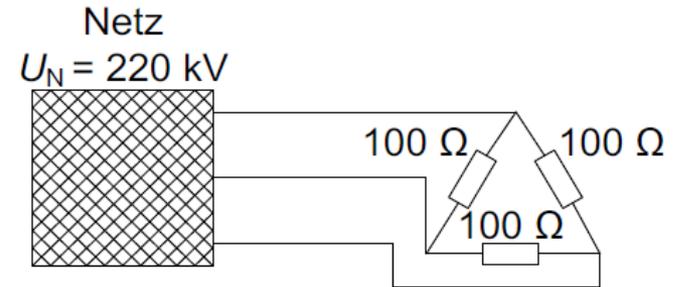


Abbildung 2 Last in Dreiecksschaltung

Wiederholungen und Definitionen – Anwendung

Berechnen Sie die Wirk- und Blindleistungsaufnahme der beiden Lasten in Abbildung 1 und 2.

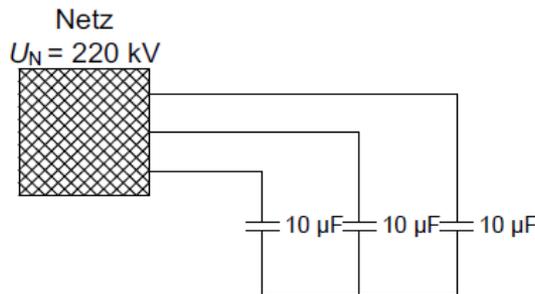


Abbildung 1 Last in Sternschaltung

$$\begin{aligned}
 \underline{S} &= 3 \cdot U_Y \cdot \underline{I}^* \\
 &= \sqrt{3} \cdot U_\Delta \cdot \underline{I}^* = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot \left(\frac{U_Y}{Z} \right)^* \\
 &= \sqrt{3} \cdot U_N \cdot \left(\frac{U_Y}{\frac{1}{j\omega C}} \right)^* = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot \frac{U_N}{\sqrt{3}} \cdot (j\omega C)^* \\
 &= U_N^2 \cdot (-j\omega C)
 \end{aligned}$$

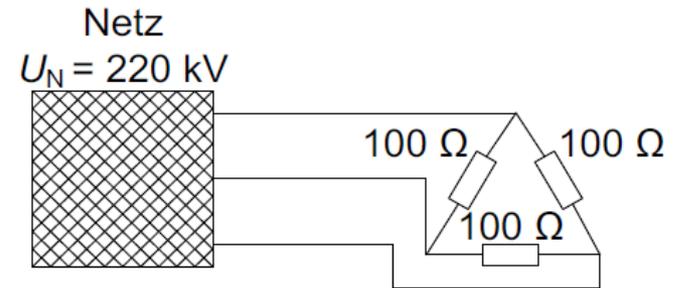


Abbildung 2 Last in Dreiecksschaltung

$$\underline{S} = 3 \cdot U_\Delta \cdot \underline{I}^*$$

Wiederholungen und Definitionen – Anwendung

Berechnen Sie die Wirk- und Blindleistungsaufnahme der beiden Lasten in Abbildung 1 und 2.

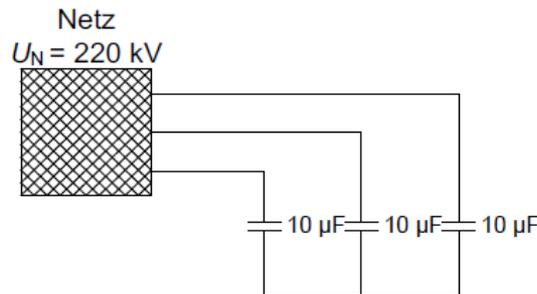


Abbildung 1 Last in Sternschaltung

$$\begin{aligned}
 \underline{S} &= 3 \cdot U_Y \cdot \underline{I}^* \\
 &= \sqrt{3} \cdot U_\Delta \cdot \underline{I}^* = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot \left(\frac{U_Y}{Z} \right)^* \\
 &= \sqrt{3} \cdot U_N \cdot \left(\frac{U_Y}{\frac{1}{j\omega C}} \right)^* = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot \frac{U_N}{\sqrt{3}} \cdot (j\omega C)^* \\
 &= U_N^2 \cdot (-j\omega C)
 \end{aligned}$$

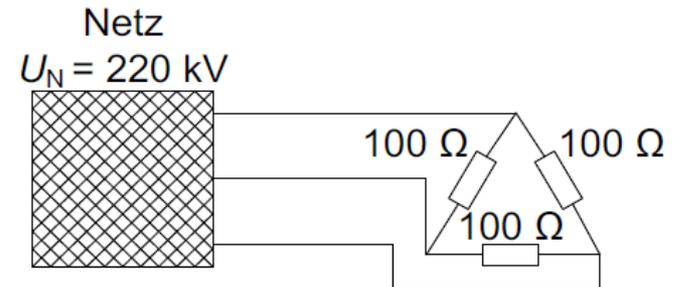


Abbildung 2 Last in Dreiecksschaltung

$$\begin{aligned}
 \underline{S} &= 3 \cdot U_\Delta \cdot \underline{I}^* \\
 &= 3 \cdot U_N \cdot \left(\frac{U_N}{R} \right)^* \\
 &= 3 \cdot \frac{U_N^2}{R}
 \end{aligned}$$

Wiederholungen und Definitionen – Anwendung

Berechnen Sie die Wirk- und Blindleistungsaufnahme der beiden Lasten in Abbildung 1 und 2.

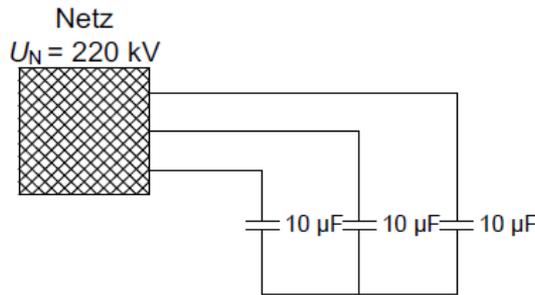


Abbildung 1 Last in Sternschaltung

$$\begin{aligned}
 \underline{S} &= 3 \cdot U_Y \cdot \underline{I}^* \\
 &= \sqrt{3} \cdot U_\Delta \cdot \underline{I}^* = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot \left(\frac{U_Y}{Z} \right)^* \\
 &= \sqrt{3} \cdot U_N \cdot \left(\frac{U_Y}{\frac{1}{j\omega C}} \right)^* = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot \frac{U_N}{\sqrt{3}} \cdot (j\omega C)^* \\
 &= U_N^2 \cdot (-j\omega C)
 \end{aligned}$$

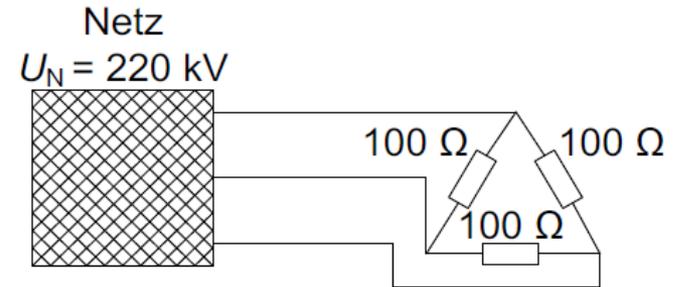


Abbildung 2 Last in Dreiecksschaltung

$$\begin{aligned}
 \underline{S} &= 3 \cdot U_\Delta \cdot \underline{I}^* \\
 &= 3 \cdot U_N \cdot \left(\frac{U_N}{R} \right)^* \\
 &= 3 \cdot \frac{U_N^2}{R}
 \end{aligned}$$

Nur Wirkleistung
 Keine Blindleistung

Themen 1. Übung EÜN

- Wiederholungen und Definitionen
 - Spannungen
 - **Vorzeichen bei Wirk- und Blindleistung**
 - Ersatzimpedanz

Wiederholungen und Definitionen – Wirk- und Blindleistung

■ Vorzeichen beachten:

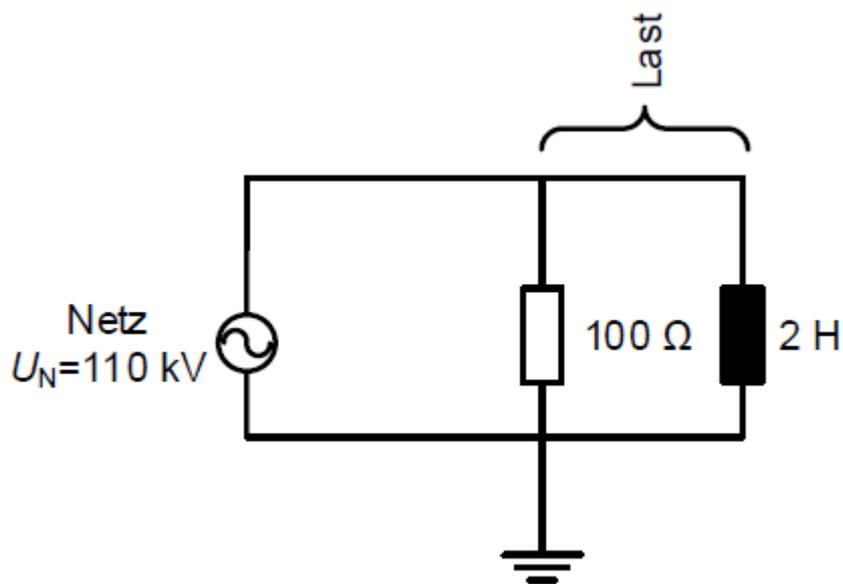
Last / Quelle	VZS	EZS
induktive Last	$P > 0, Q > 0$	$P < 0, Q < 0$
kapazitive Last	$P > 0, Q < 0$	$P < 0, Q > 0$
induktive Quelle	$P < 0, Q < 0$	$P > 0, Q > 0$
kapazitive Quelle	$P < 0, Q > 0$	$P > 0, Q < 0$

Wiederholungen und Definitionen – Wirk- und Blindleistung

- Vorzeichen beachten:

Last / Quelle	VZS	EZS
induktive Last	$P > 0, Q > 0$	$P < 0, Q < 0$
kapazitive Last	$P > 0, Q < 0$	$P < 0, Q > 0$
induktive Quelle	$P < 0, Q < 0$	$P > 0, Q > 0$
kapazitive Quelle	$P < 0, Q > 0$	$P > 0, Q < 0$

- Aufgabe:

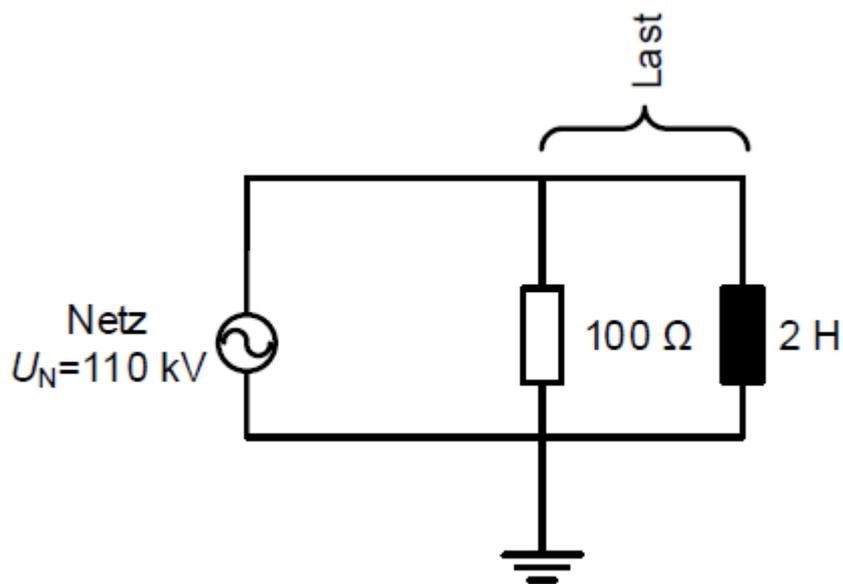


Wiederholungen und Definitionen – Wirk- und Blindleistung

- Vorzeichen beachten:

Last / Quelle	VZS	EZS
induktive Last	$P > 0, Q > 0$	$P < 0, Q < 0$
kapazitive Last	$P > 0, Q < 0$	$P < 0, Q > 0$
induktive Quelle	$P < 0, Q < 0$	$P > 0, Q > 0$
kapazitive Quelle	$P < 0, Q > 0$	$P > 0, Q < 0$

- Aufgabe:



$$\underline{S} = 121 \text{ MW} + j19,3 \text{ MV ar}$$

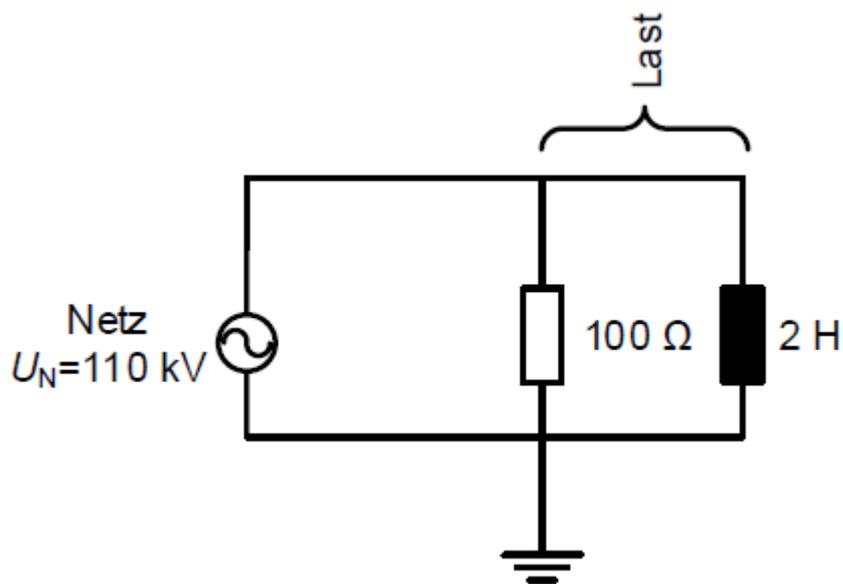
Wiederholungen und Definitionen – Wirk- und Blindleistung

■ Vorzeichen beachten:

Last / Quelle	VZS	EZS
induktive Last	$P > 0, Q > 0$	$P < 0, Q < 0$
kapazitive Last	$P > 0, Q < 0$	$P < 0, Q > 0$
induktive Quelle	$P < 0, Q < 0$	$P > 0, Q > 0$
kapazitive Quelle	$P < 0, Q > 0$	$P > 0, Q < 0$

■ Aufgabe:

→ induktive Last



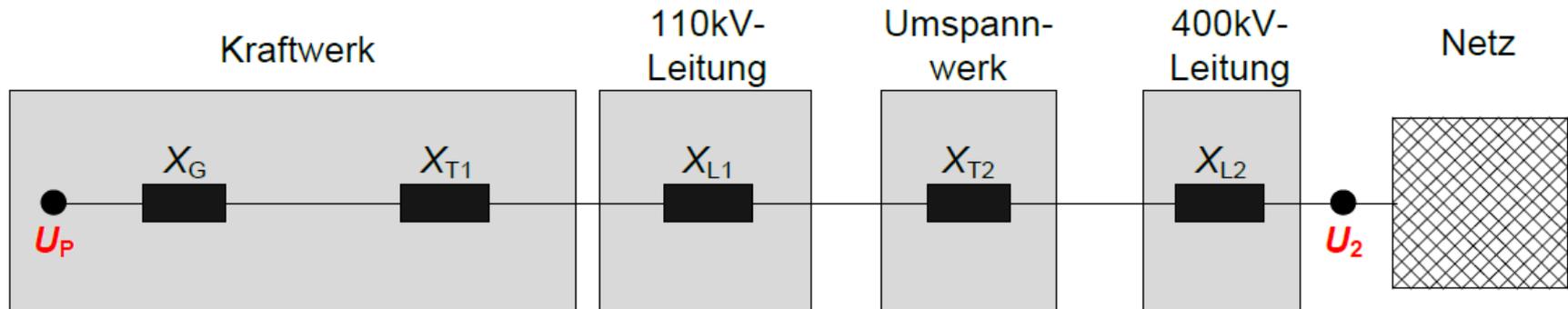
$$\underline{S} = 121 \text{ MW} + j19,3 \text{ MV ar}$$

Themen 1. Übung EÜN

- Wiederholungen und Definitionen
 - Spannungen
 - Vorzeichen bei Wirk- und Blindleistung
 - **Ersatzimpedanz**

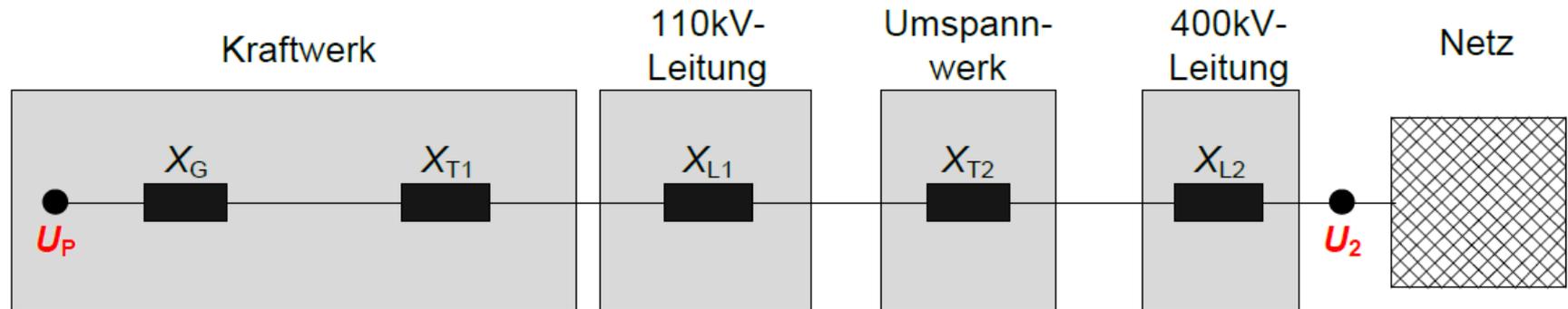
Wiederholungen und Definitionen – Ersatzimpedanz

- Ersatzimpedanz ist die bezogen auf eine gegebene Bezugsspannung sichtbare Impedanz



Wiederholungen und Definitionen – Ersatzimpedanz

- Ersatzimpedanz ist die bezogen auf eine gegebene Bezugsspannung sichtbare Impedanz



Generator
 $S_{NG} = 150 \text{ MVA}$
 $P_{NG} = 100 \text{ MW}$
 $X_d = 1,2$
 $U_{NG} = 11 \text{ kV}$

Maschinentrafo
 $S_{NT1} = 175 \text{ MVA}$
 $u_{KT1} = 11 \%$
 $\ddot{u}_{T1} = 110 \text{ kV}/11 \text{ kV}$

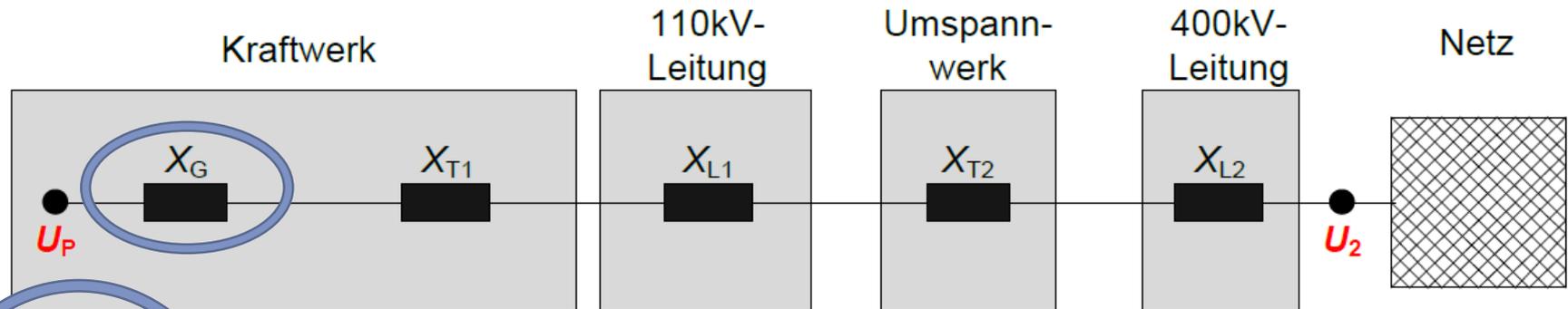
110-kV-Kabel:
 $l = 2 \text{ km}$
 $L' = 0,46 \text{ mH/km}$

Netzkuppeltrafo
 $S_{NT2} = 375 \text{ MVA}$
 $u_{KT2} = 15 \%$
 $\ddot{u}_{T2} = 400 \text{ kV}/110 \text{ kV}$

400-kV-Leitung
 $X_{L2} = 4,084 \Omega$

Wiederholungen und Definitionen – Ersatzimpedanz

- Ersatzimpedanz ist die bezogen auf eine gegebene Bezugsspannung sichtbare Impedanz



Generator
 $S_{NG} = 150 \text{ MVA}$
 $P_{NG} = 100 \text{ MW}$
 $x_d = 1,2$
 $U_{NG} = 11 \text{ kV}$

Maschinentrafo
 $S_{NT1} = 175 \text{ MVA}$
 $u_{KT1} = 11 \%$
 $\ddot{u}_{T1} = 110 \text{ kV}/11 \text{ kV}$

110-kV-Kabel:
 $l = 2 \text{ km}$
 $L' = 0,46 \text{ mH/km}$

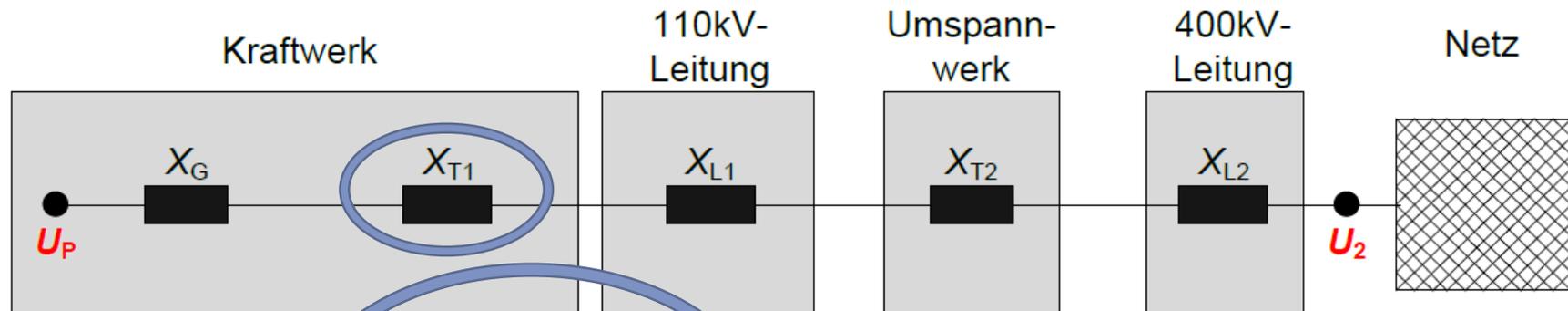
Netzkuppeltrafo
 $S_{NT2} = 375 \text{ MVA}$
 $u_{KT2} = 15 \%$
 $\ddot{u}_{T2} = 400 \text{ kV}/110 \text{ kV}$

400-kV-Leitung
 $X_{L2} = 4,084 \Omega$

$$X_{G,11} = x_d \cdot \frac{(U_{N,G})^2}{S_{N,G}} = 0,968 \Omega$$

Wiederholungen und Definitionen – Ersatzimpedanz

- Ersatzimpedanz ist die bezogen auf eine gegebene Bezugsspannung sichtbare Impedanz



Generator
 $S_{NG} = 150 \text{ MVA}$
 $P_{NG} = 100 \text{ MW}$
 $X_d = 1,2$
 $U_{NG} = 11 \text{ kV}$

Maschinentrafo
 $S_{NT1} = 175 \text{ MVA}$
 $u_{KT1} = 11 \%$
 $\ddot{u}_{T1} = 110 \text{ kV}/11 \text{ kV}$

110-kV-Kabel:
 $l = 2 \text{ km}$
 $L' = 0,46 \text{ mH/km}$

Netzkuppeltrafo
 $S_{NT2} = 375 \text{ MVA}$
 $u_{KT2} = 15 \%$
 $\ddot{u}_{T2} = 400 \text{ kV}/110 \text{ kV}$

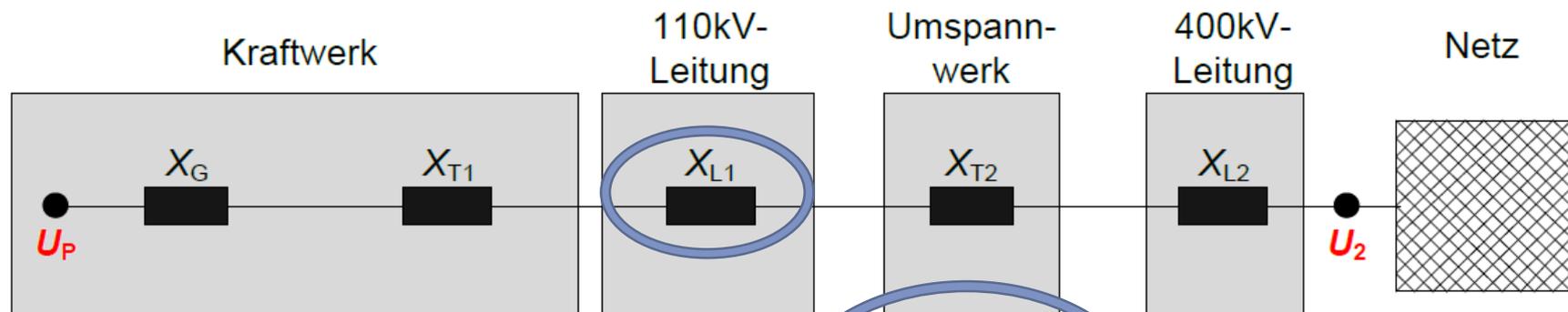
400-kV-Leitung
 $X_{L2} = 4,084 \Omega$

$$X_{T1,11} = u_k \cdot \frac{(U_{US,T1})^2}{S_{N,T1}} = 0,076 \Omega$$

$$X_{T1,110} = u_k \cdot \frac{(U_{OS,T1})^2}{S_{N,T1}} = 7,606 \Omega$$

Wiederholungen und Definitionen – Ersatzimpedanz

- Ersatzimpedanz ist die bezogen auf eine gegebene Bezugsspannung sichtbare Impedanz



Generator
 $S_{NG} = 150 \text{ MVA}$
 $P_{NG} = 100 \text{ MW}$
 $X_d = 1,2$
 $U_{NG} = 11 \text{ kV}$

Maschinentrafo
 $S_{NT1} = 175 \text{ MVA}$
 $u_{KT1} = 11 \%$
 $\ddot{u}_{T1} = 110 \text{ kV}/11 \text{ kV}$

110-kV-Kabel:
 $l = 2 \text{ km}$
 $L' = 0,46 \text{ mH/km}$

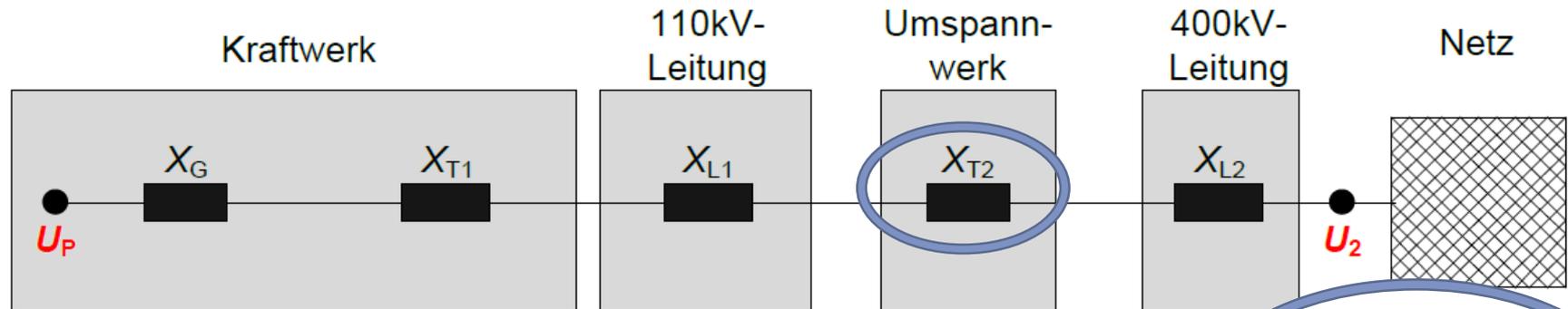
Netzkuppeltrafo
 $S_{NT2} = 375 \text{ MVA}$
 $u_{KT2} = 15 \%$
 $\ddot{u}_{T2} = 400 \text{ kV}/110 \text{ kV}$

400-kV-Leitung
 $X_{L2} = 4,084 \Omega$

$$X_{L1,110} = l \cdot L' \cdot \omega = 0,289 \Omega$$

Wiederholungen und Definitionen – Ersatzimpedanz

- Ersatzimpedanz ist die bezogen auf eine gegebene Bezugsspannung sichtbare Impedanz



Generator
 $S_{NG} = 150 \text{ MVA}$
 $P_{NG} = 100 \text{ MW}$
 $X_d = 1,2$
 $U_{NG} = 11 \text{ kV}$

Maschinentrafo
 $S_{NT1} = 175 \text{ MVA}$
 $u_{KT1} = 11 \%$
 $\ddot{u}_{T1} = 110 \text{ kV}/11 \text{ kV}$

110-kV-Kabel:
 $l = 2 \text{ km}$
 $L' = 0,46 \text{ mH/km}$

Netz-kuppeltrafo
 $S_{NT2} = 375 \text{ MVA}$
 $u_{KT2} = 15 \%$
 $\ddot{u}_{T2} = 400 \text{ kV}/110 \text{ kV}$

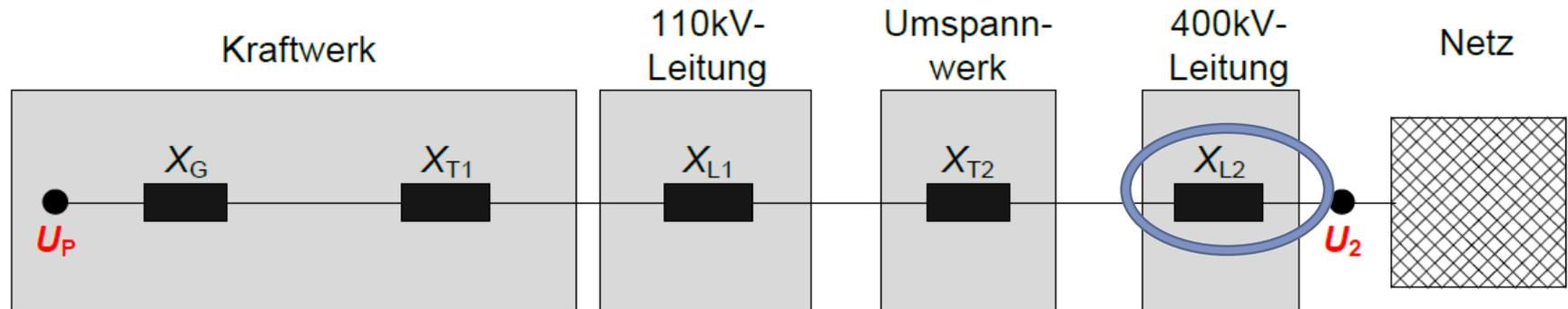
400-kV-Leitung
 $X_{L2} = 4,084 \Omega$

$$X_{T2,110} = u_k \cdot \frac{(U_{US,T2})^2}{S_{N,T2}} = 4,84 \Omega$$

$$X_{T2,400} = u_k \cdot \frac{(U_{OS,T2})^2}{S_{N,T2}} = 64 \Omega$$

Wiederholungen und Definitionen – Ersatzimpedanz

- Ersatzimpedanz ist die bezogen auf eine gegebene Bezugsspannung sichtbare Impedanz



Generator
 $S_{NG} = 150 \text{ MVA}$
 $P_{NG} = 100 \text{ MW}$
 $X_d = 1,2$
 $U_{NG} = 11 \text{ kV}$

Maschinentrafo
 $S_{NT1} = 175 \text{ MVA}$
 $u_{KT1} = 11 \%$
 $\ddot{u}_{T1} = 110 \text{ kV}/11 \text{ kV}$

110-kV-Kabel:
 $l = 2 \text{ km}$
 $L' = 0,46 \text{ mH/km}$

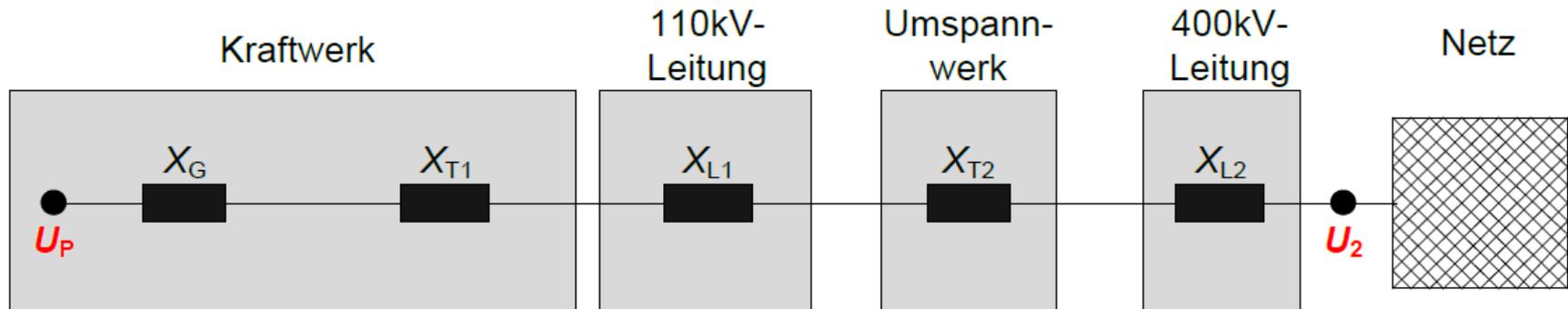
Netzkuppeltrafo
 $S_{NT2} = 375 \text{ MVA}$
 $u_{KT2} = 15 \%$
 $\ddot{u}_{T2} = 400 \text{ kV}/110 \text{ kV}$

400-kV-Leitung
 $X_{L2} = 4,084 \Omega$

$$X_{L2,400} = 4,084 \Omega$$

Wiederholungen und Definitionen – Ersatzimpedanz

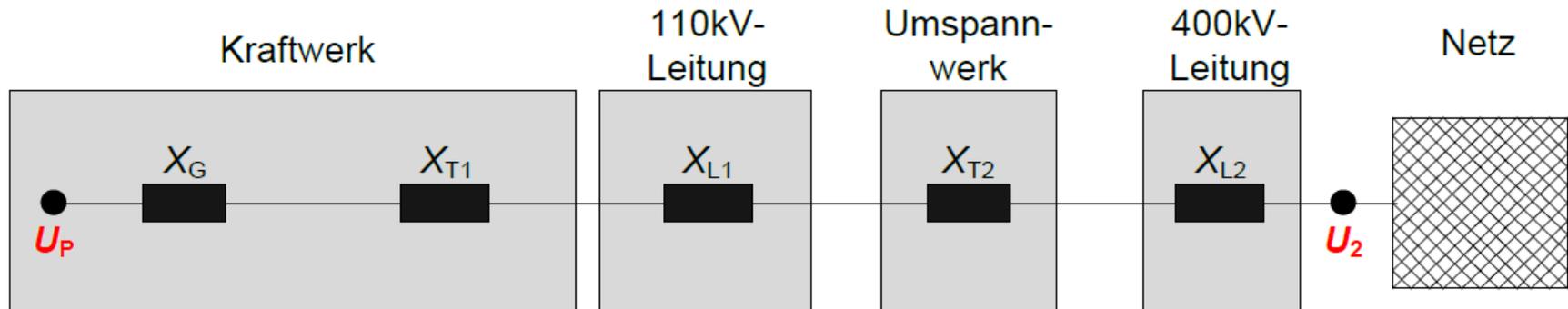
- Ersatzimpedanz ist die bezogen auf eine gegebene Bezugsspannung sichtbare Impedanz



Umrechnung der Impedanzen auf
andere Bezugsspannung?

Wiederholungen und Definitionen – Ersatzimpedanz

- Ersatzimpedanz ist die bezogen auf eine gegebene Bezugsspannung sichtbare Impedanz

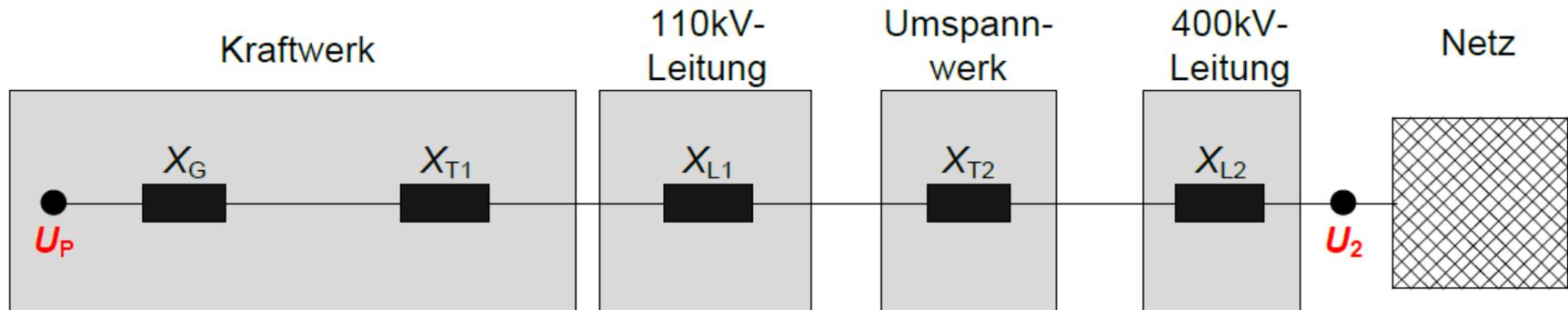


Umrechnung der Impedanzen auf
andere Bezugsspannung:

$$X_{BM,UB} = X_{BM,UN} \cdot \left(\frac{U_B}{U_N} \right)^2$$

Wiederholungen und Definitionen – Ersatzimpedanz

- Ersatzimpedanz ist die bezogen auf eine gegebene Bezugsspannung sichtbare Impedanz



Umrechnung der Impedanzen auf
andere Bezugsspannung:

$$X_{BM,UB} = X_{BM,UN} \cdot \left(\frac{U_B}{U_N} \right)^2$$

Wichtig: Das bedeutet gerade **nicht**, dass sich die Impedanz tatsächlich auf diesen Wert ändern würde, wenn z.B. eine Leitung auf einer anderen Spannungsebene betrieben wird.

Themen 1. Übung EÜN

- Grundlagen
 - Netzstruktur in Deutschland und Europa
 - Wiederholungen
 - Definitionen
- **Einspeisung in ein starres Netz über eine lange Leitung**
- Beispielaufgabe zu „Einspeisung in ein starres Netz über kurze Leitung“

Einspeisung in ein starres Netz über eine lange Leitung

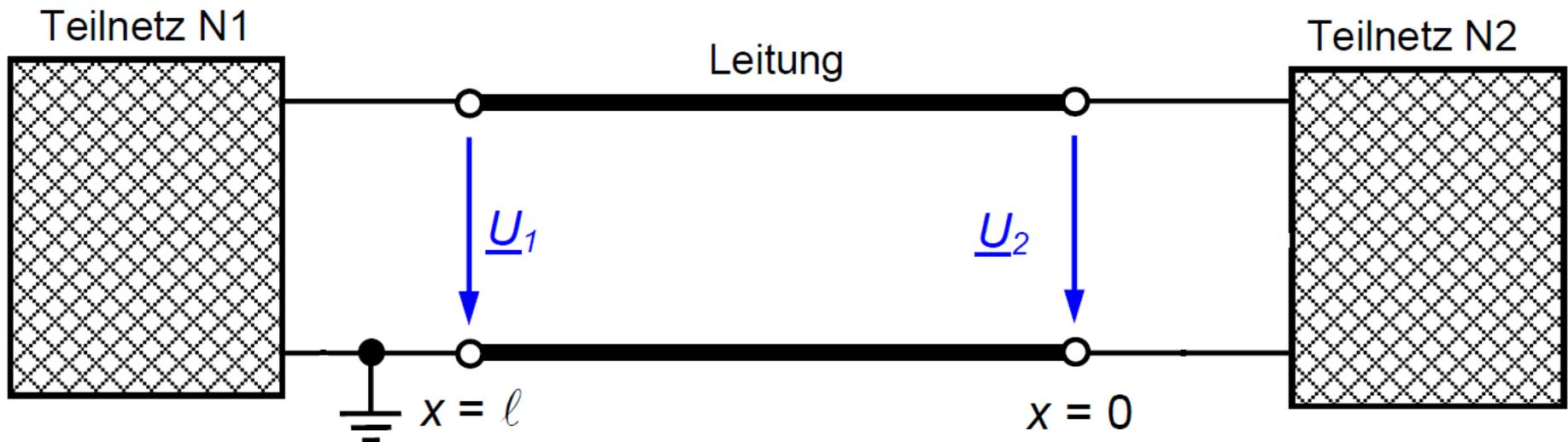
■ Ziel

- Verständnis der Formeln zur „Einspeisung in ein starres Netz über eine lange Leitung“:

$$P_1 = P_2 = \frac{U_P \cdot U_2}{Z_0 \cdot \sin(2\pi \frac{l}{\lambda}) + X_d \cdot \cos(2\pi \frac{l}{\lambda})} \cdot \sin(\vartheta)$$

Einspeisung in ein starres Netz über eine lange Leitung

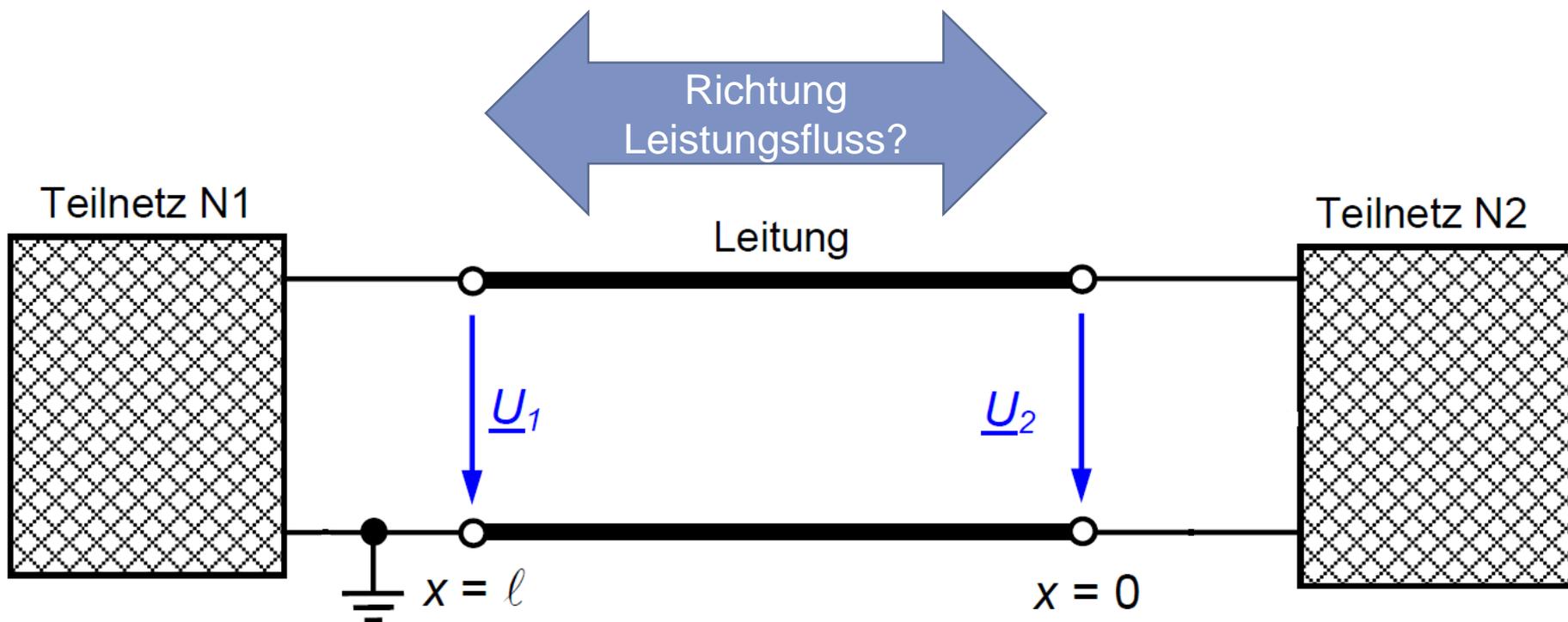
Verständnis zu „Energieübertragung im Hochspannungsnetz über lange Leitung“ als Basis:



■ Formel:

$$P_1 = P_2 = \frac{U_1 \cdot U_2}{Z_0 \cdot \sin(2\pi \frac{l}{\lambda})} \cdot \sin(\vartheta)$$

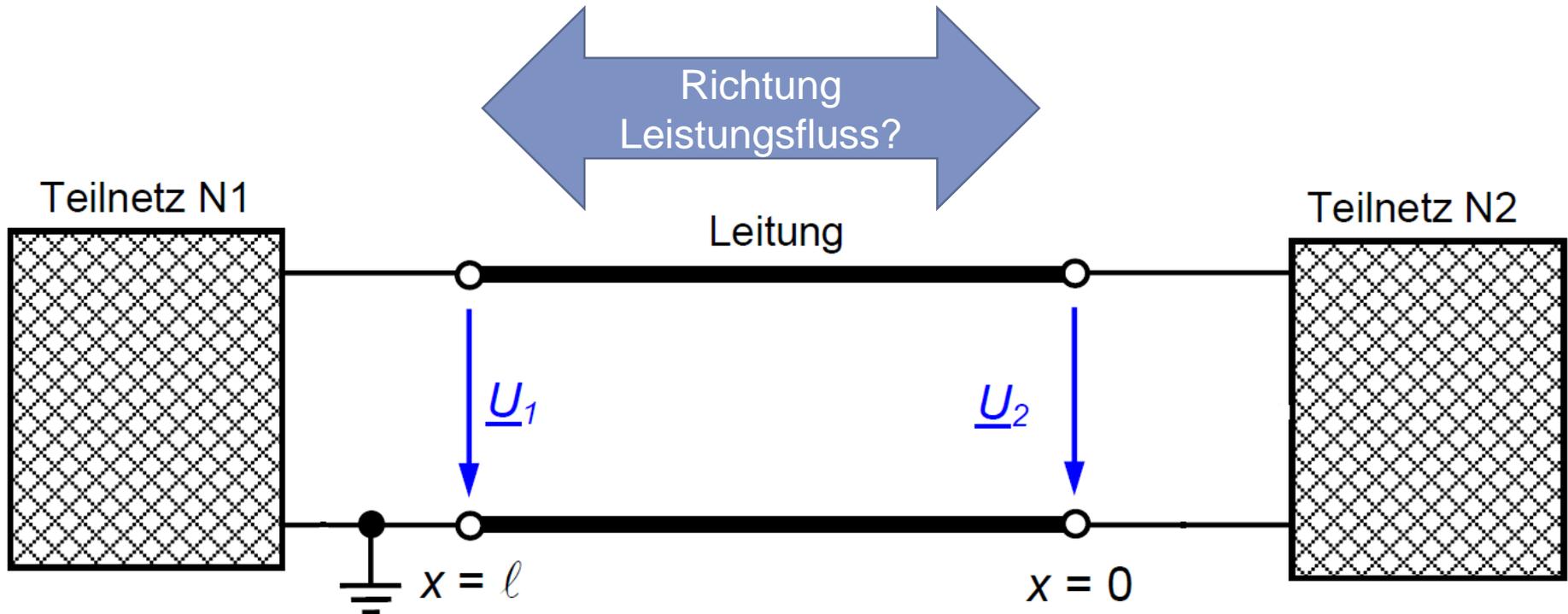
Einspeisung in ein starres Netz über eine lange Leitung



■ Formel:

$$P_1 = P_2 = \frac{U_1 \cdot U_2}{Z_0 \cdot \sin(2\pi \frac{l}{\lambda})} \cdot \sin(\vartheta)$$

Einspeisung in ein starres Netz über eine lange Leitung

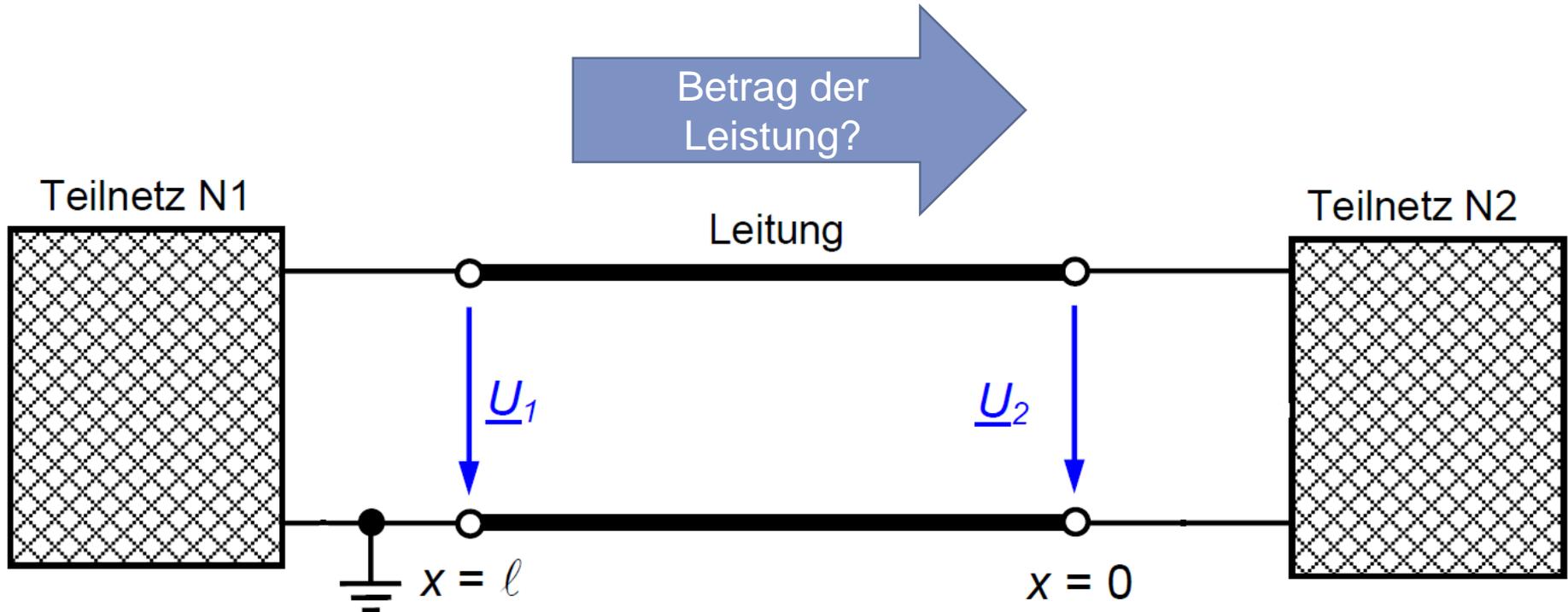


■ Formel:

$$P_1 = P_2 = \frac{U_1 \cdot U_2}{Z_0 \cdot \sin(2\pi \frac{l}{\lambda})} \cdot \sin(\vartheta)$$

Polradwinkel bzw. Übertragungswinkel bestimmt die Richtung des Leistungsflusses

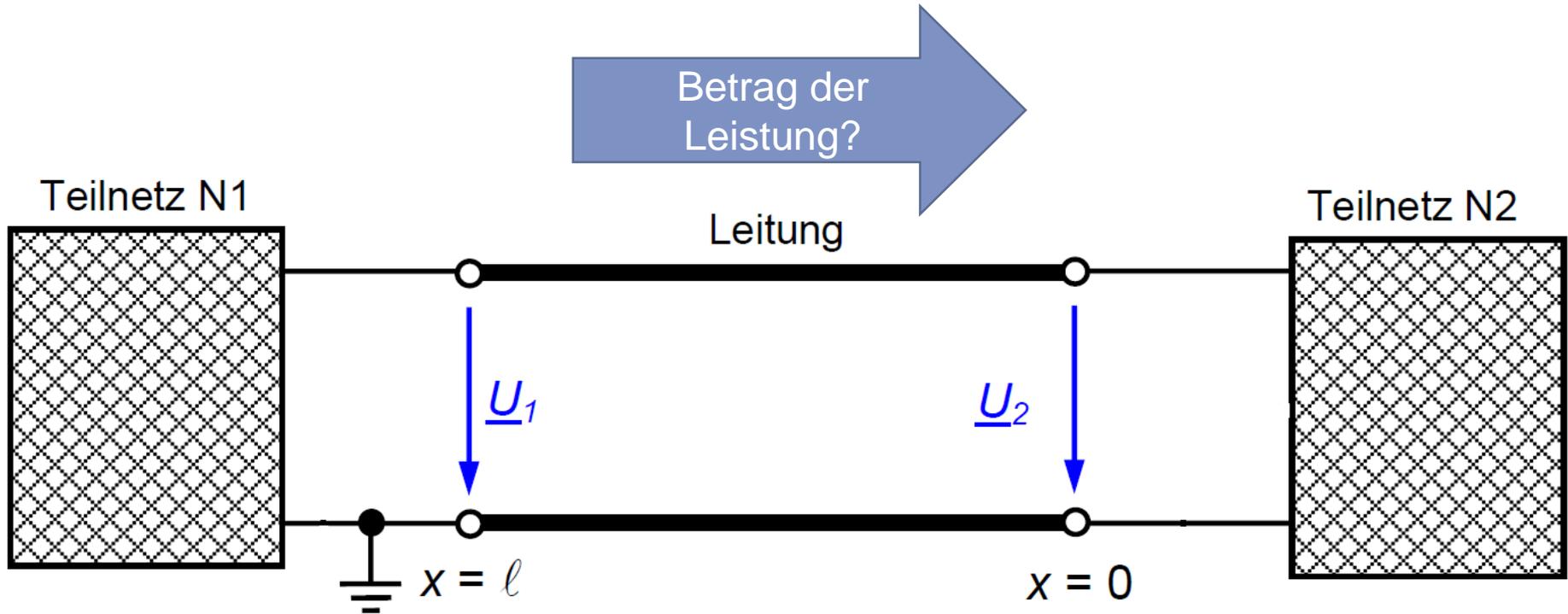
Einspeisung in ein starres Netz über eine lange Leitung



■ Formel:

$$P_1 = P_2 = \frac{U_1 \cdot U_2}{Z_0 \cdot \sin(2\pi \frac{l}{\lambda})} \cdot \sin(\vartheta)$$

Einspeisung in ein starres Netz über eine lange Leitung

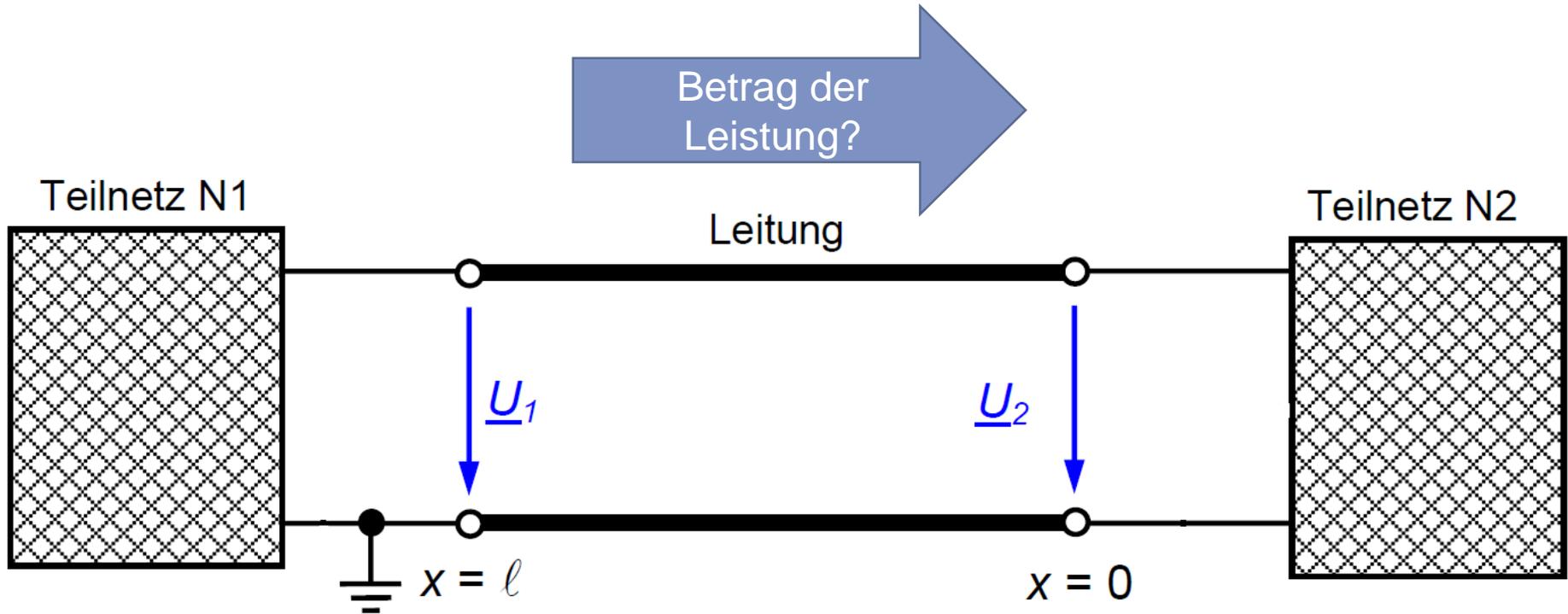


■ Formel:

$$P_1 = P_2 = \frac{U_1 \cdot U_2}{Z_0 \cdot \sin(2\pi \frac{l}{\lambda})} \sin(\vartheta)$$

Betrag der Leistung kann über Polradwinkel und die Spannungen beeinflusst werden.

Einspeisung in ein starres Netz über eine lange Leitung

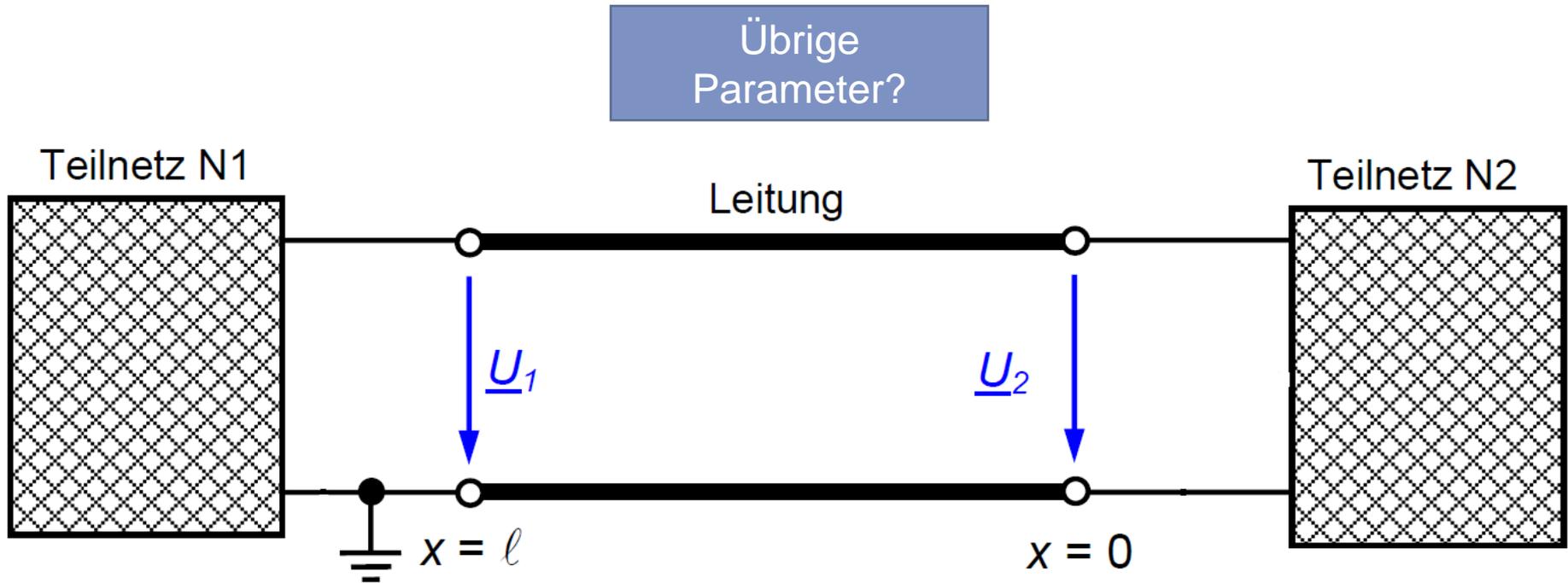


■ Formel:

$$P_1 = P_2 = \frac{U_1 \cdot U_2}{Z_0 \cdot \sin(2\pi \frac{l}{\lambda})} \sin(\vartheta)$$

In Praxis: $U_1 \approx U_2 \approx const$
 Polradwinkel bestimmt i.d.R.
 auch den Betrag der Leistung
 alleine.

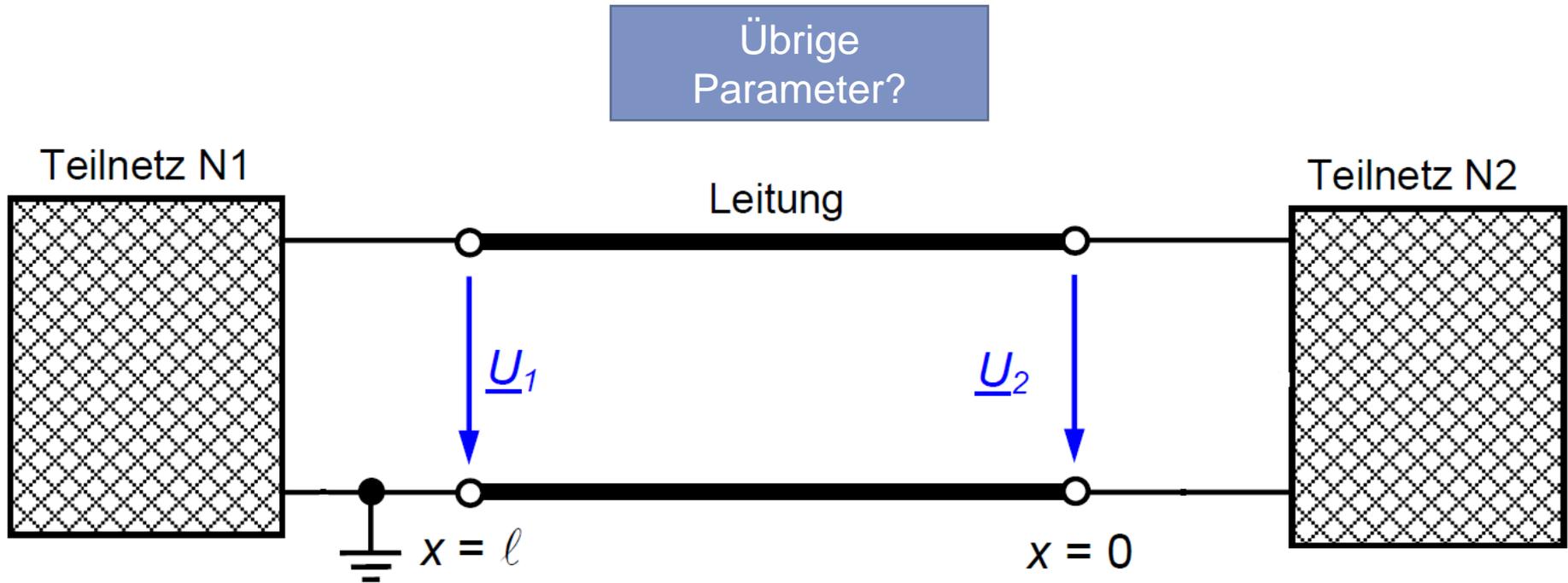
Einspeisung in ein starres Netz über eine lange Leitung



■ Formel:

$$P_1 = P_2 = \frac{U_1 \cdot U_2}{Z_0 \cdot \sin\left(2\pi \frac{l}{\lambda}\right)} \cdot \sin(\vartheta)$$

Einspeisung in ein starres Netz über eine lange Leitung

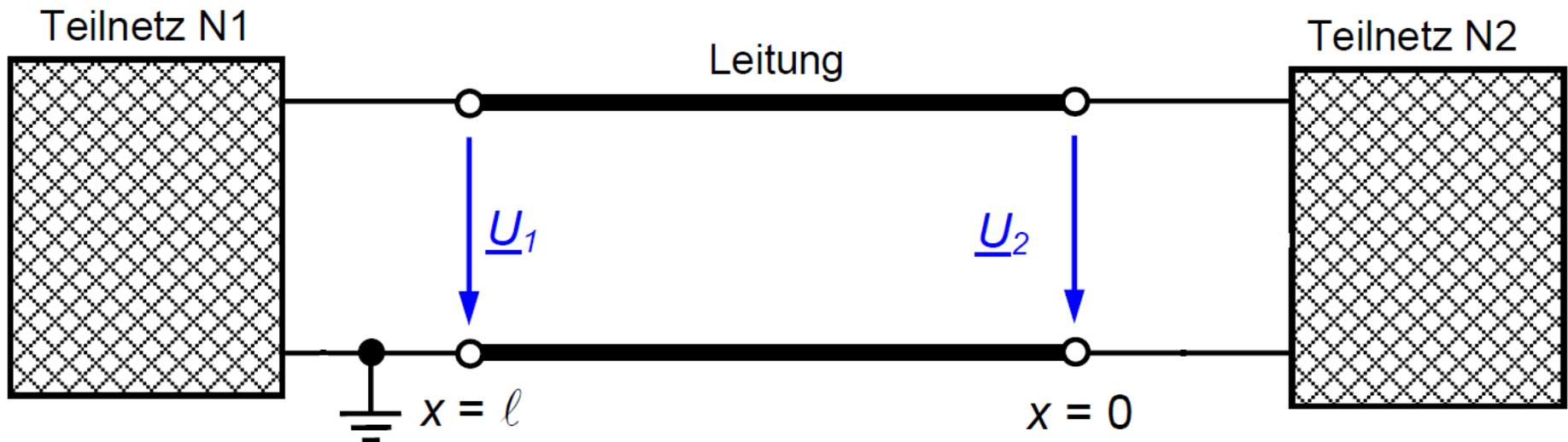


■ Formel:

$$P_1 = P_2 = \frac{U_1 \cdot U_2}{Z_0 \cdot \sin\left(2\pi \frac{l}{\lambda}\right)} \cdot \sin(\vartheta)$$

feste Leitungsparameter:
 l : Länge der Leitung
 λ : Wellenlänge der Leitung
 Z_0 : Wellenwiderstand

Einspeisung in ein starres Netz über eine lange Leitung



■ Formel:

$$P_1 = P_2 = \frac{\underline{U}_1 \cdot \underline{U}_2}{Z_0 \cdot \sin(2\pi \frac{l}{\lambda})} \cdot \sin(\vartheta)$$

$U_1 \neq U_2$
Warum wären sehr unterschiedliche Spannungen in der Praxis oft problematisch?

Einspeisung in ein starres Netz über eine lange Leitung

■ Formel:

$$Q_1 = \frac{U_1^2 \cdot \cos(2\pi \frac{l}{\lambda}) - U_1 \cdot U_2 \cdot \cos(\vartheta)}{Z_0 \cdot \sin(2\pi \frac{l}{\lambda})}$$

$$Q_2 = \frac{U_1 \cdot U_2 \cdot \cos(\vartheta) - U_2^2 \cdot \cos(2\pi \frac{l}{\lambda})}{Z_0 \cdot \sin(2\pi \frac{l}{\lambda})}$$

■ Formel:

$$P_1 = P_2 = \frac{U_1 \cdot U_2}{Z_0 \cdot \sin(2\pi \frac{l}{\lambda})} \cdot \sin(\vartheta)$$

$$U_1 \neq U_2$$

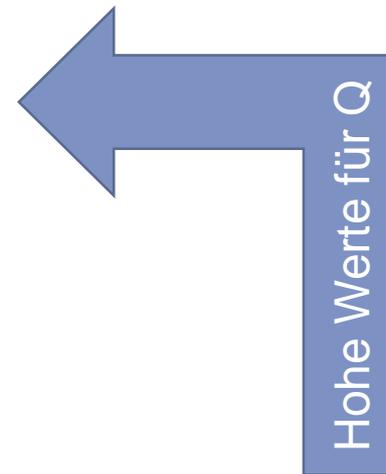
Warum wären sehr unterschiedliche Spannungen in der Praxis oft problematisch?

Einspeisung in ein starres Netz über eine lange Leitung

■ Formel:

$$Q_1 = \frac{U_1^2 \cdot \cos(2\pi \frac{l}{\lambda}) - U_1 \cdot U_2 \cdot \cos(\vartheta)}{Z_0 \cdot \sin(2\pi \frac{l}{\lambda})}$$

$$Q_2 = \frac{U_1 \cdot U_2 \cdot \cos(\vartheta) - U_2^2 \cdot \cos(2\pi \frac{l}{\lambda})}{Z_0 \cdot \sin(2\pi \frac{l}{\lambda})}$$



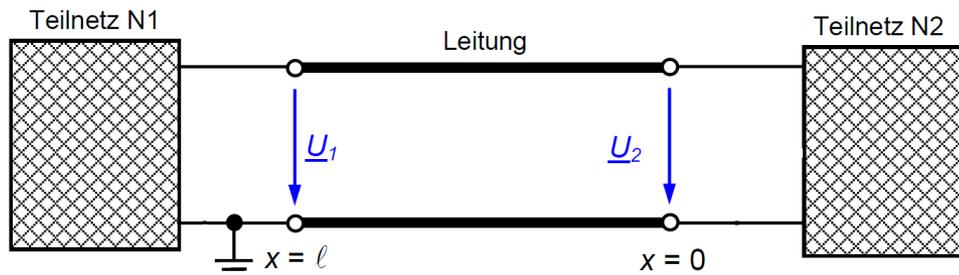
■ Formel:

$$P_1 = P_2 = \frac{U_1 \cdot U_2}{Z_0 \cdot \sin(2\pi \frac{l}{\lambda})} \cdot \sin(\vartheta)$$

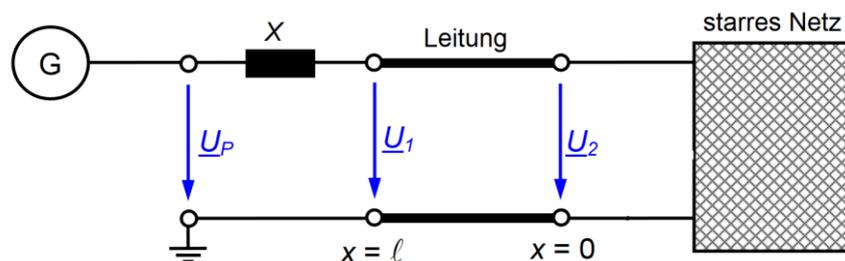
$U_1 \neq U_2$

Warum wären sehr unterschiedliche Spannungen in der Praxis oft problematisch?

Einspeisung in ein starres Netz über eine lange Leitung

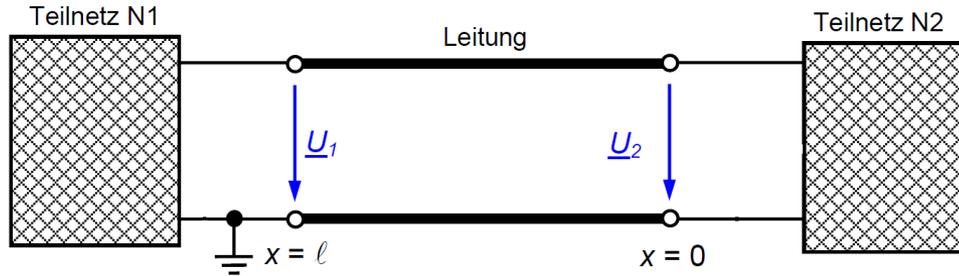


$$P_1 = P_2 = \frac{U_1 \cdot U_2}{Z_0 \cdot \sin\left(2\pi \frac{l}{\lambda}\right)} \cdot \sin(\vartheta)$$

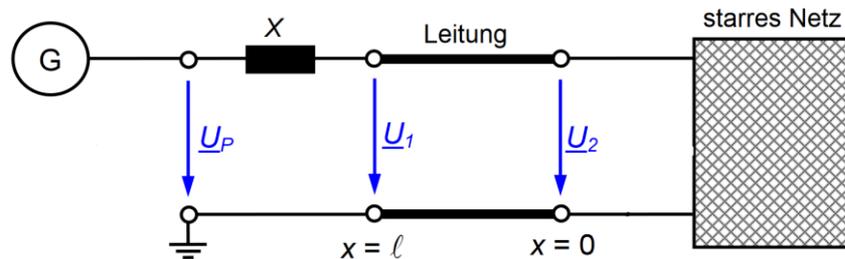


$$P_1 = P_2 = \frac{U_P \cdot U_2}{Z_0 \cdot \sin\left(2\pi \frac{l}{\lambda}\right) + X_d \cdot \cos\left(2\pi \frac{l}{\lambda}\right)} \cdot \sin(\vartheta)$$

Einspeisung in ein starres Netz über eine lange Leitung

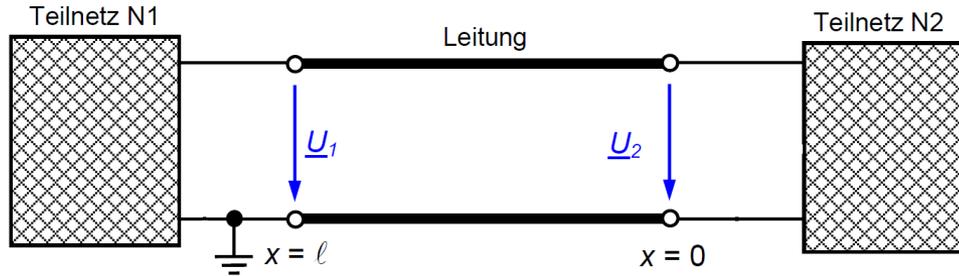


$$P_1 = P_2 = \frac{U_1 \cdot U_2}{Z_0 \cdot \sin(2\pi \frac{l}{\lambda})} \cdot \sin(\vartheta)$$

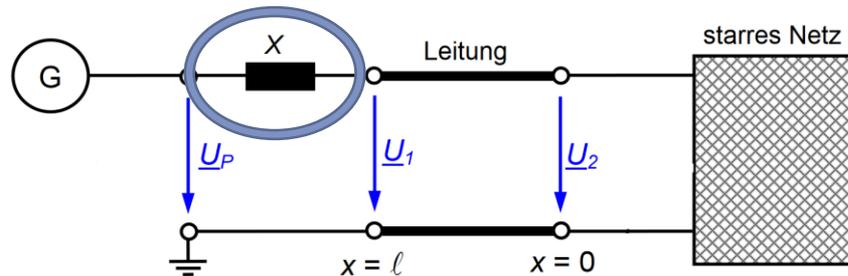


$$P_1 = P_2 = \frac{U_P \cdot U_2}{Z_0 \cdot \sin(2\pi \frac{l}{\lambda}) + X_d \cdot \cos(2\pi \frac{l}{\lambda})} \cdot \sin(\vartheta)$$

Einspeisung in ein starres Netz über eine lange Leitung



$$P_1 = P_2 = \frac{U_1 \cdot U_2}{Z_0 \cdot \sin(2\pi \frac{l}{\lambda})} \cdot \sin(\vartheta)$$

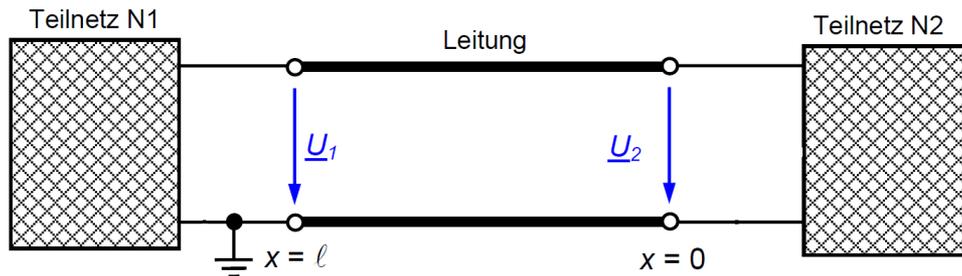


$$P_1 = P_2 = \frac{U_P \cdot U_2}{Z_0 \cdot \sin(2\pi \frac{l}{\lambda}) + X_d \cdot \cos(2\pi \frac{l}{\lambda})} \cdot \sin(\vartheta)$$

Einfluss von Generator ist größer, je näher das starre Netz am Generator ist.

Einspeisung in ein starres Netz über eine lange Leitung

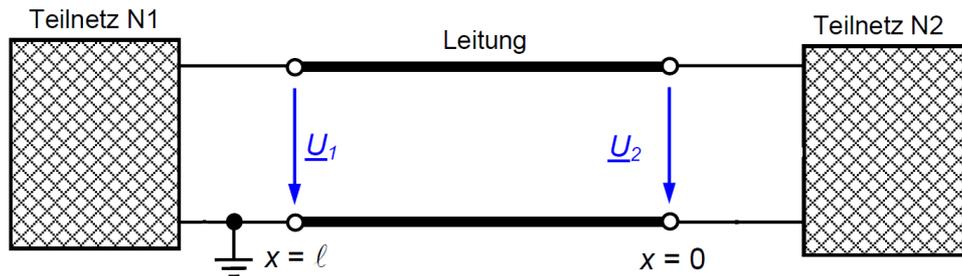
■ Maximal einspeisbare Leistung



$$P_1 = P_2 = \frac{U_1 \cdot U_2}{Z_0 \cdot \sin(2\pi \frac{l}{\lambda})} \cdot \sin(\vartheta)$$

Einspeisung in ein starres Netz über eine lange Leitung

■ Maximal einspeisbare Leistung

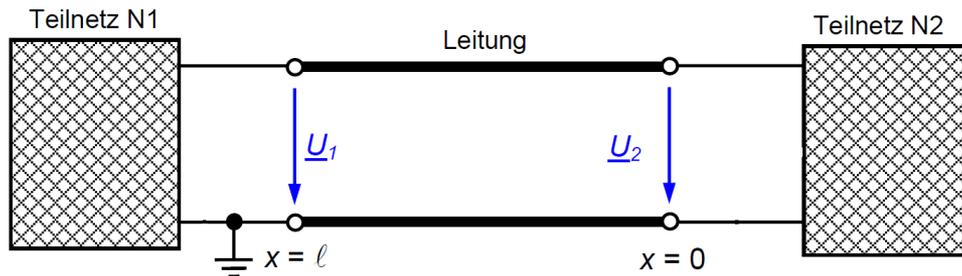


$$P_1 = P_2 = \frac{U_1 \cdot U_2}{Z_0 \cdot \sin(2\pi \frac{l}{\lambda})} \cdot \sin(\vartheta)$$

$\sin(\vartheta)$ wird maximal für $\vartheta = 90^\circ$.

Einspeisung in ein starres Netz über eine lange Leitung

■ Maximal einspeisbare Leistung



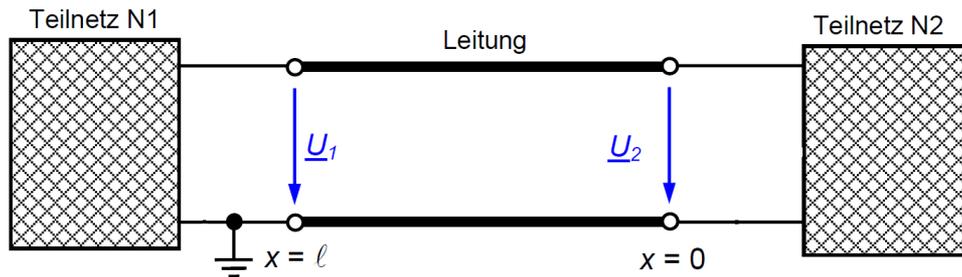
$$P_1 = P_2 = \frac{U_1 \cdot U_2}{Z_0 \cdot \sin\left(2\pi \frac{l}{\lambda}\right)} \cdot \sin(\vartheta)$$

$\sin(\vartheta)$ wird maximal für $\vartheta = 90^\circ$.

Danach kann P nur noch durch Reduktion der Impedanz erhöht werden.

Einspeisung in ein starres Netz über eine lange Leitung

■ Maximal einspeisbare Leistung

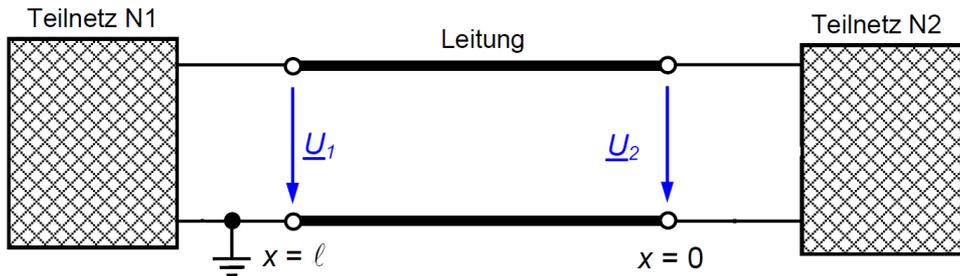


$$P_1 = P_2 = \frac{U_1 \cdot U_2}{Z_0 \cdot \sin(2\pi \frac{l}{\lambda})} \cdot \sin(\vartheta)$$

■ Verringern der wirksamen Impedanz durch zusätzliches Bauteil

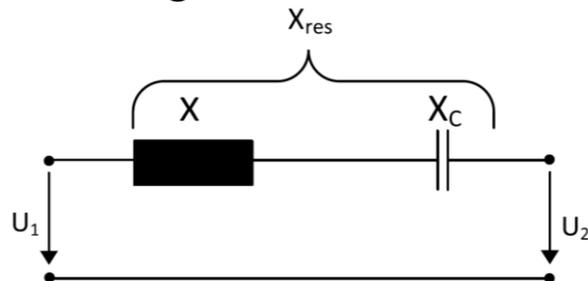
Einspeisung in ein starres Netz über eine lange Leitung

■ Maximal einspeisbare Leistung



$$P_1 = P_2 = \frac{U_1 \cdot U_2}{Z_0 \cdot \sin(2\pi \frac{l}{\lambda})} \cdot \sin(\vartheta)$$

■ Verringern der wirksamen Impedanz durch zusätzliches Bauteil



Leitungen sind induktiv, also kann die gesamt wirksame Impedanz mit einer zusätzlichen Kapazität reduziert werde.

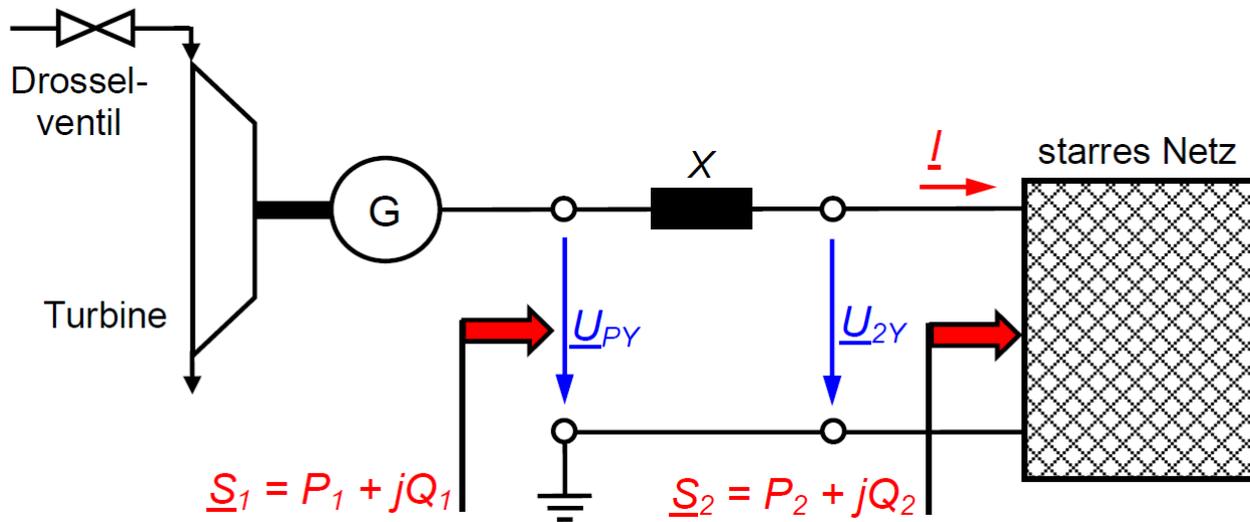
Themen 1. Übung EÜN

- Grundlagen
 - Netzstruktur in Deutschland und Europa
 - Wiederholungen
 - Definitionen

- Einspeisung in ein starres Netz über eine lange Leitung

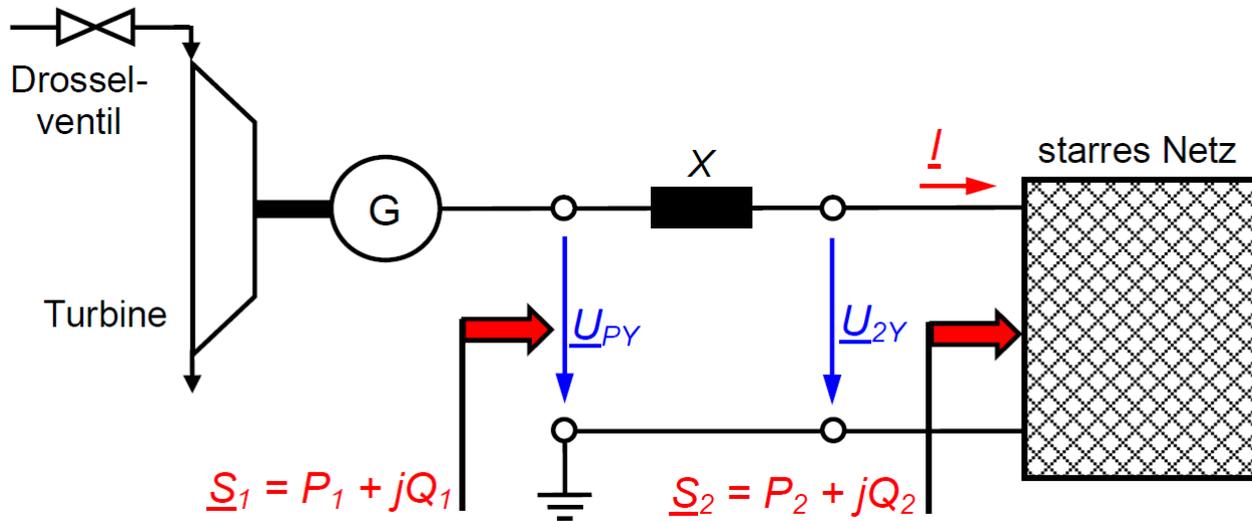
- **Beispielaufgabe zu „Einspeisung in ein starres Netz über kurze Leitung“**

Ein Blockheizkraftwerk (BHKW) soll über einen Transformator und eine Leitung in das öffentliche 110-kV-Energieversorgungsnetz einspeisen. Sie sollen die wesentlichen Anlagenparameter bestimmen.



a) Wie groß ist die Spannung U_{2Y} ?

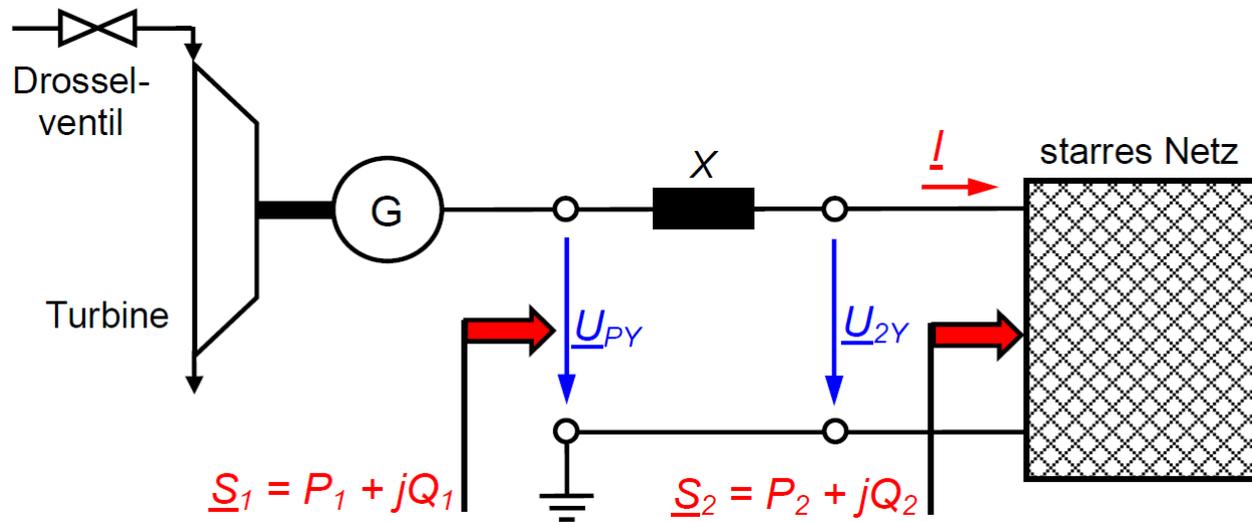
Ein Blockheizkraftwerk (BHKW) soll über einen Transformator und eine Leitung in das öffentliche 110-kV-Energieversorgungsnetz einspeisen. Sie sollen die wesentlichen Anlagenparameter bestimmen.



a) Wie groß ist die Spannung U_{2Y} ?

$$U_{2Y} = \frac{U_2}{\sqrt{3}} = \frac{110 \text{ kV}}{\sqrt{3}} = 63,51 \text{ kV}$$

Ein Blockheizkraftwerk (BHKW) soll über einen Transformator und eine Leitung in das öffentliche 110-kV-Energieversorgungsnetz einspeisen. Sie sollen die wesentlichen Anlagenparameter bestimmen.



b) Die Betriebsmittel haben folgende Daten:

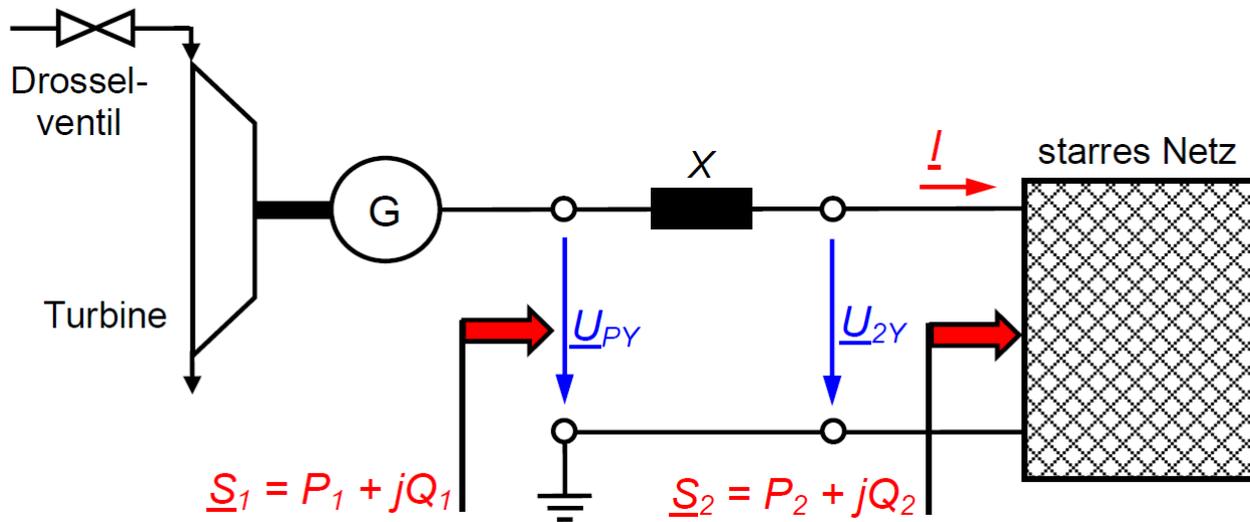
Generator: $U_N = 11 \text{ kV}$, $S_N = 40 \text{ MVA}$, $x_d = 1,4$

Transformator: $u_k = 12\%$, Übersetzung: $11 \text{ kV} / 110 \text{ kV}$, $S_N = 40 \text{ MVA}$

110-kV-Leitung: Länge = 30 km , $X_L' = 0,39 \text{ } \Omega/\text{km}$.

Bestimmen Sie die insgesamt wirksame Reaktanz X .

Ein Blockheizkraftwerk (BHKW) soll über einen Transformator und eine Leitung in das öffentliche 110-kV-Energieversorgungsnetz einspeisen. Sie sollen die wesentlichen Anlagenparameter bestimmen.



b) Die Betriebsmittel haben folgende Daten:

Generator: $U_N = 11 \text{ kV}$, $S_N = 40 \text{ MVA}$, $x_d = 1,4$

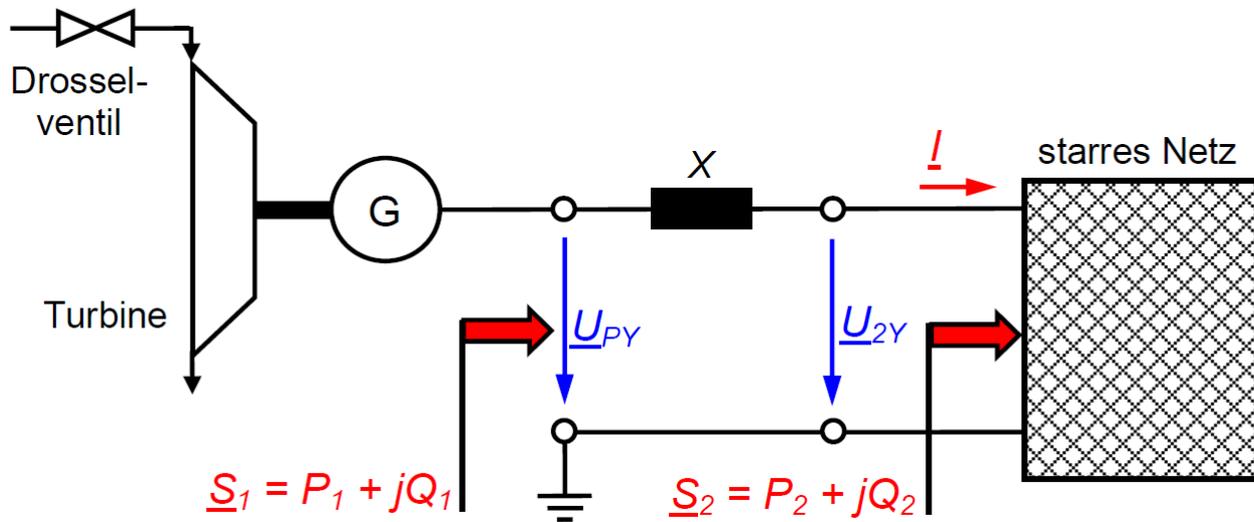
Transformator: $u_k = 12\%$, Übersetzung: $11 \text{ kV} / 110 \text{ kV}$, $S_N = 40 \text{ MVA}$

110-kV-Leitung: Länge = 30 km , $X_L' = 0,39 \Omega/\text{km}$.

Bestimmen Sie die insgesamt wirksame Reaktanz X .

→ Tafel

Ein Blockheizkraftwerk (BHKW) soll über einen Transformator und eine Leitung in das öffentliche 110-kV-Energieversorgungsnetz einspeisen. Sie sollen die wesentlichen Anlagenparameter bestimmen.



b) Die Betriebsmittel haben folgende Daten:

Generator: $U_N = 11 \text{ kV}$, $S_N = 40 \text{ MVA}$, $x_d = 1,4$

Transformator: $u_k = 12\%$, Übersetzung: $11 \text{ kV} / 110 \text{ kV}$, $S_N = 40 \text{ MVA}$

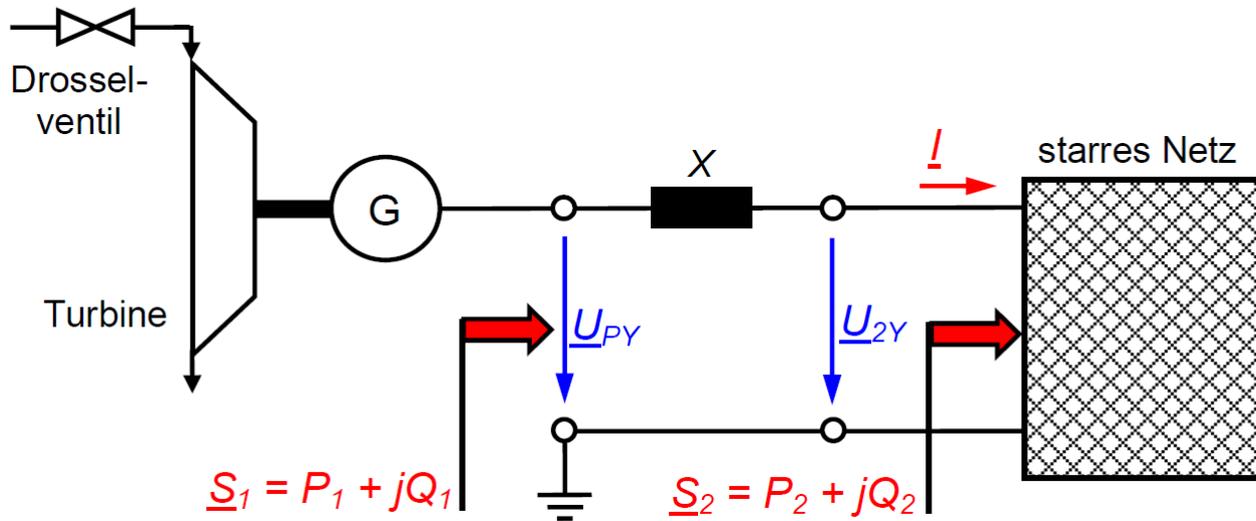
110-kV-Leitung: Länge = 30 km , $X_L' = 0,39 \Omega/\text{km}$.

Bestimmen Sie die insgesamt wirksame Reaktanz X .

→ Tafel

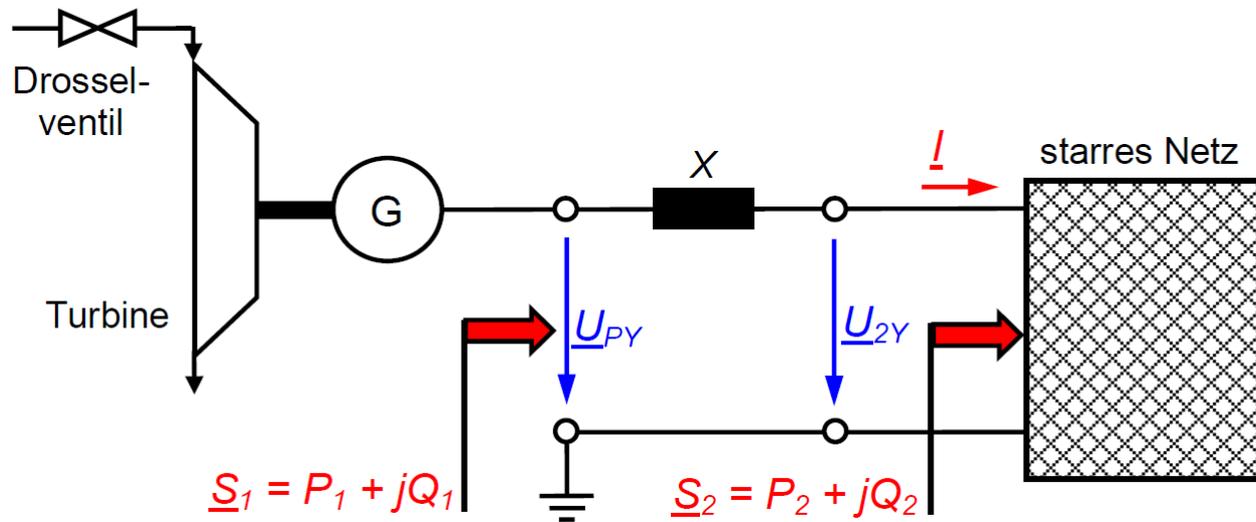
$$X = 471,5 \Omega$$

Ein Blockheizkraftwerk (BHKW) soll über einen Transformator und eine Leitung in das öffentliche 110-kV-Energieversorgungsnetz einspeisen. Sie sollen die wesentlichen Anlagenparameter bestimmen.



- c) Welche maximale Wirkleistung P_{max} ist übertragbar? Wie groß ist dann der Leitungswinkel ϑ ? Der Generator kann um 10% übererregt werden.

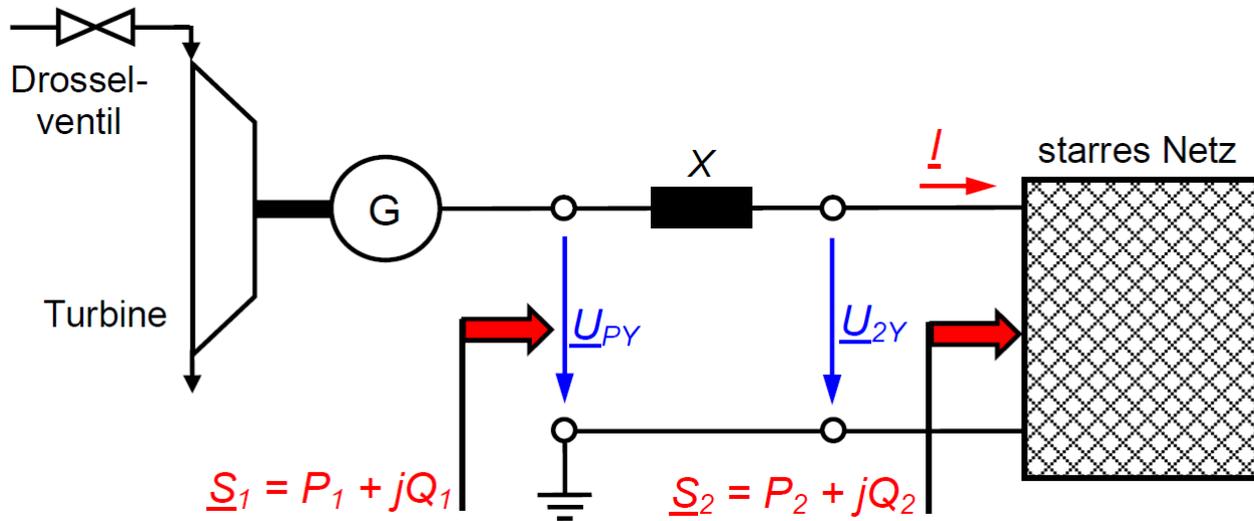
Ein Blockheizkraftwerk (BHKW) soll über einen Transformator und eine Leitung in das öffentliche 110-kV-Energieversorgungsnetz einspeisen. Sie sollen die wesentlichen Anlagenparameter bestimmen.



- c) Welche maximale Wirkleistung P_{max} ist übertragbar? Wie groß ist dann der Leitungswinkel ϑ ? Der Generator kann um 10% übererregt werden.

$$P_1 = P_2 = \frac{U_P \cdot U_2}{X} \cdot \sin(\vartheta)$$

Ein Blockheizkraftwerk (BHKW) soll über einen Transformator und eine Leitung in das öffentliche 110-kV-Energieversorgungsnetz einspeisen. Sie sollen die wesentlichen Anlagenparameter bestimmen.

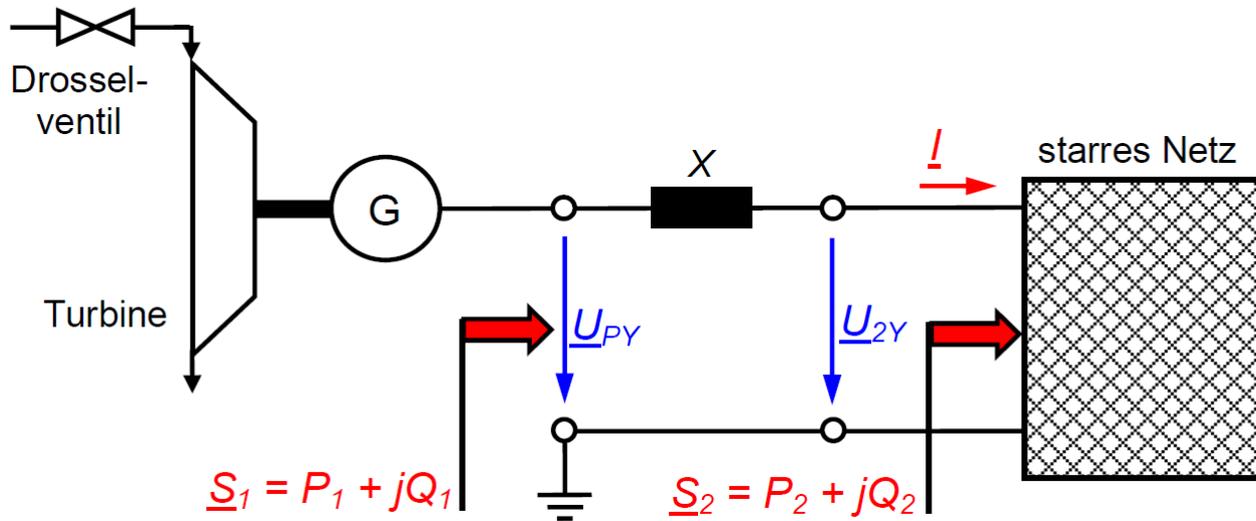


- c) Welche maximale Wirkleistung P_{max} ist übertragbar? Wie groß ist dann der Leitungswinkel ϑ ? Der Generator kann um 10% übererregt werden.

$$P_1 = P_2 = \frac{U_P \cdot U_2}{X} \cdot \sin(\vartheta)$$

$$X = 471,5 \Omega$$

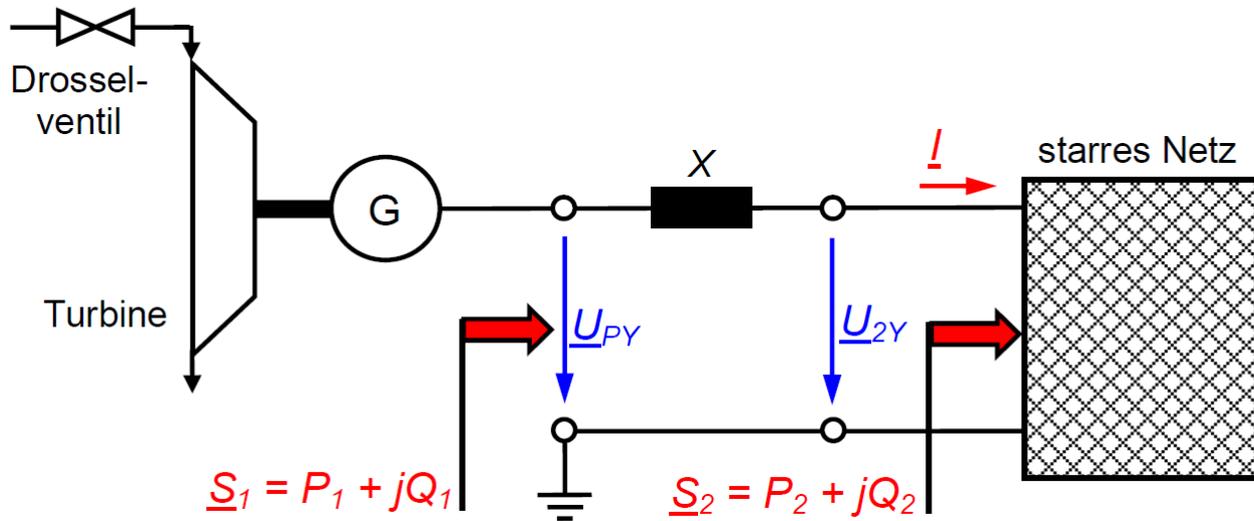
Ein Blockheizkraftwerk (BHKW) soll über einen Transformator und eine Leitung in das öffentliche 110-kV-Energieversorgungsnetz einspeisen. Sie sollen die wesentlichen Anlagenparameter bestimmen.



- c) Welche maximale Wirkleistung P_{max} ist übertragbar? Wie groß ist dann der Leitungswinkel ϑ ? Der Generator kann um 10% übererregt werden.

$$P_1 = P_2 = \frac{U_P \cdot U_2}{X} \cdot \sin(\vartheta)$$

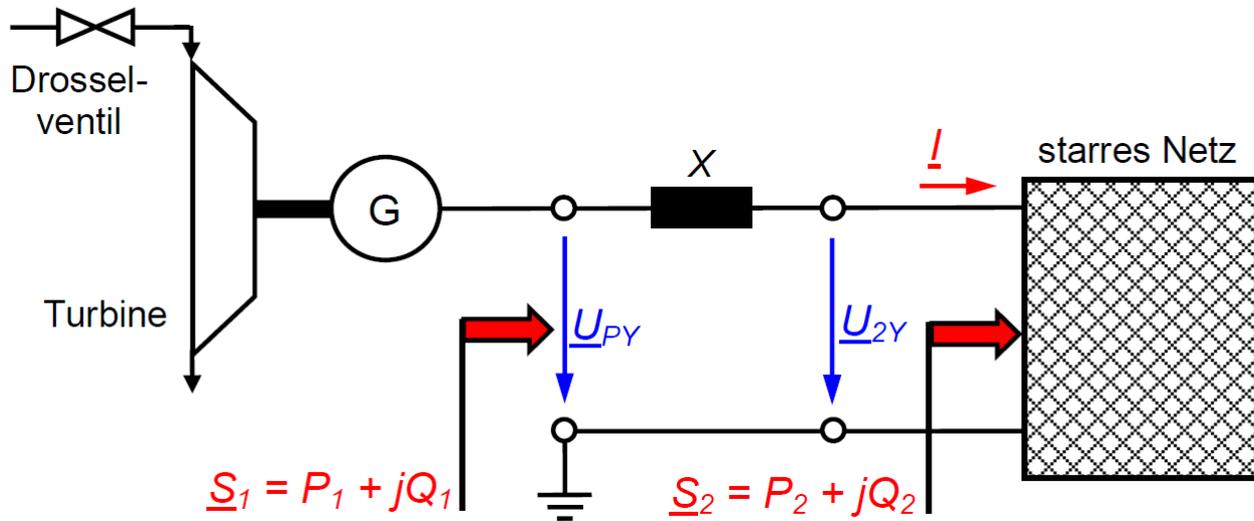
Ein Blockheizkraftwerk (BHKW) soll über einen Transformator und eine Leitung in das öffentliche 110-kV-Energieversorgungsnetz einspeisen. Sie sollen die wesentlichen Anlagenparameter bestimmen.



- c) Welche maximale Wirkleistung P_{max} ist übertragbar? Wie groß ist dann der Leitungswinkel ϑ ? Der Generator kann um 10% übererregt werden.

$$P_1 = P_2 = \frac{U_P \cdot U_2}{X} \cdot \sin(\vartheta) \quad \sin(\vartheta) \text{ wird maximal für } \vartheta = 90^\circ.$$

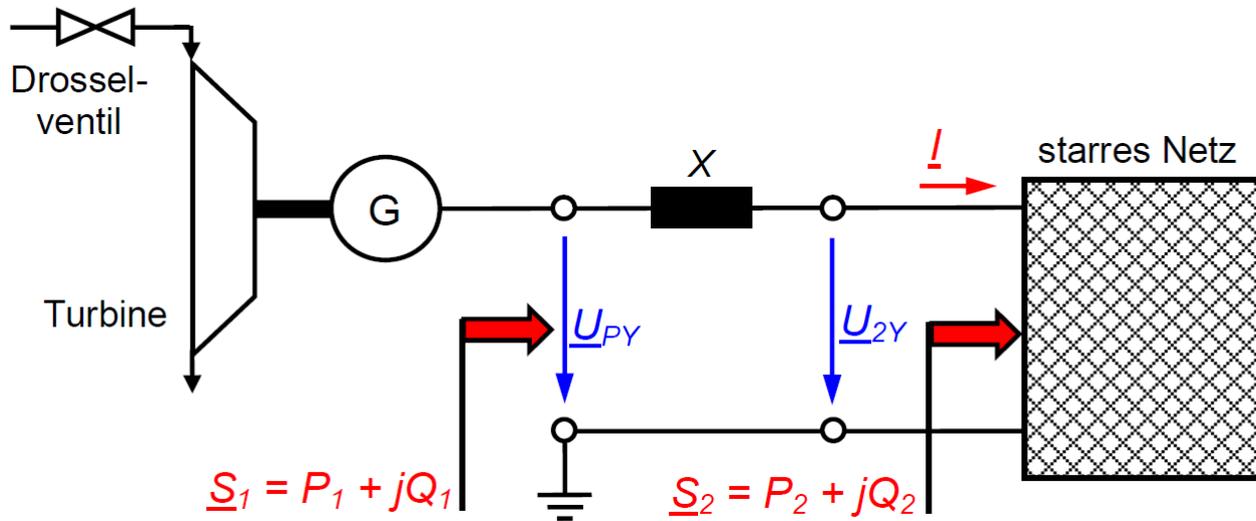
Ein Blockheizkraftwerk (BHKW) soll über einen Transformator und eine Leitung in das öffentliche 110-kV-Energieversorgungsnetz einspeisen. Sie sollen die wesentlichen Anlagenparameter bestimmen.



- c) Welche maximale Wirkleistung P_{max} ist übertragbar? Wie groß ist dann der Leitungswinkel ϑ ? Der Generator kann um 10% übererregt werden.

$$P_1 = P_2 = \frac{U_P \cdot U_2}{X} \cdot \sin(\vartheta)$$

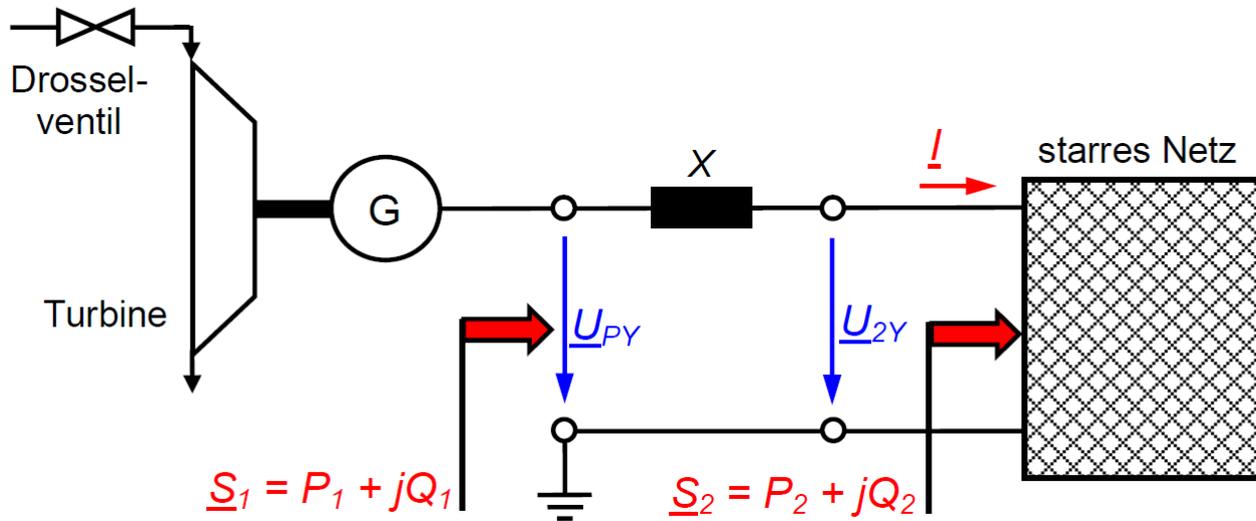
Ein Blockheizkraftwerk (BHKW) soll über einen Transformator und eine Leitung in das öffentliche 110-kV-Energieversorgungsnetz einspeisen. Sie sollen die wesentlichen Anlagenparameter bestimmen.



c) Welche maximale Wirkleistung P_{max} ist übertragbar? Wie groß ist dann der Leitungswinkel ϑ ? Der Generator kann um 10% übererregt werden.

$$P_1 = P_2 = \frac{U_P \cdot U_2}{X} \cdot \sin(\vartheta) \quad U_2 = 110 \text{ kV}$$

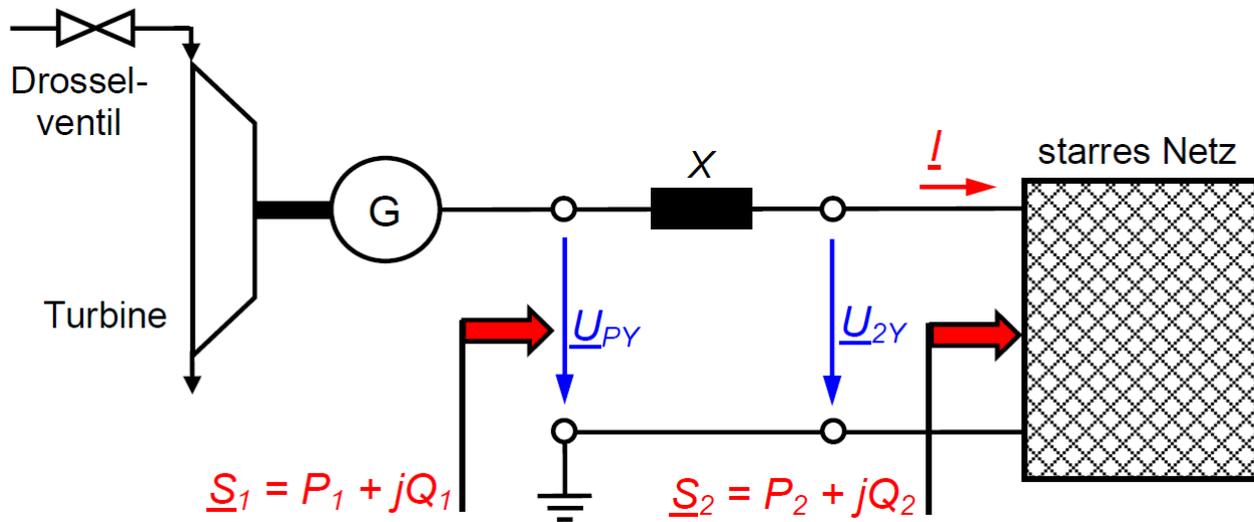
Ein Blockheizkraftwerk (BHKW) soll über einen Transformator und eine Leitung in das öffentliche 110-kV-Energieversorgungsnetz einspeisen. Sie sollen die wesentlichen Anlagenparameter bestimmen.



- c) Welche maximale Wirkleistung P_{max} ist übertragbar? Wie groß ist dann der Leitungswinkel ϑ ? Der Generator kann um 10% übererregt werden.

$$P_1 = P_2 = \frac{U_P \cdot U_2}{X} \cdot \sin(\vartheta)$$

Ein Blockheizkraftwerk (BHKW) soll über einen Transformator und eine Leitung in das öffentliche 110-kV-Energieversorgungsnetz einspeisen. Sie sollen die wesentlichen Anlagenparameter bestimmen.

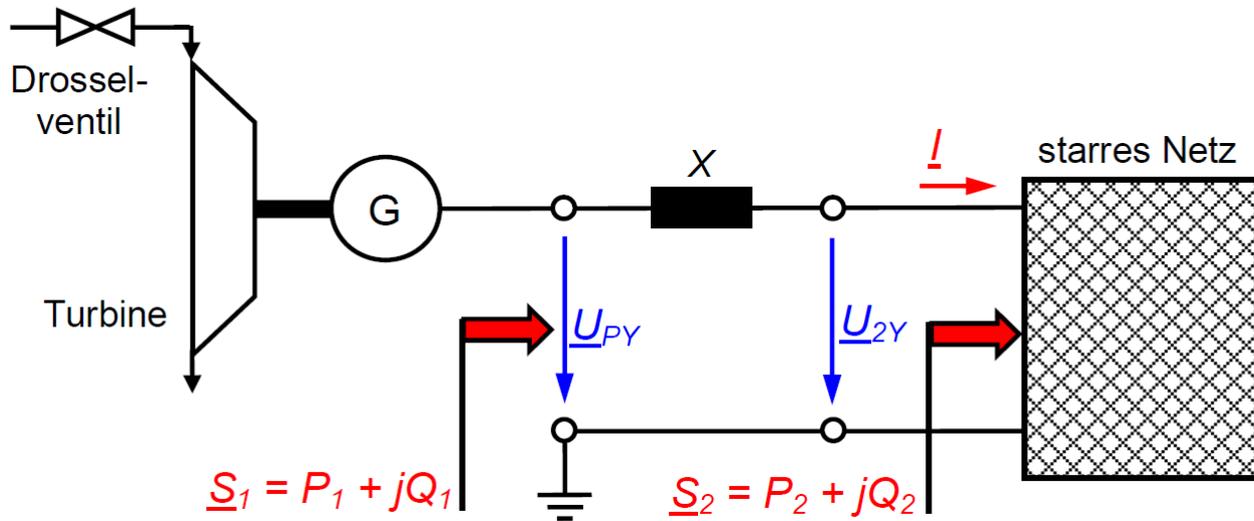


- c) Welche maximale Wirkleistung P_{max} ist übertragbar? Wie groß ist dann der Leitungswinkel ϑ ? Der Generator kann um 10% übererregt werden.

$$P_1 = P_2 = \frac{U_P \cdot U_2}{X} \cdot \sin(\vartheta)$$

$$U_P = 1,1 \cdot 110 \text{ kV}$$

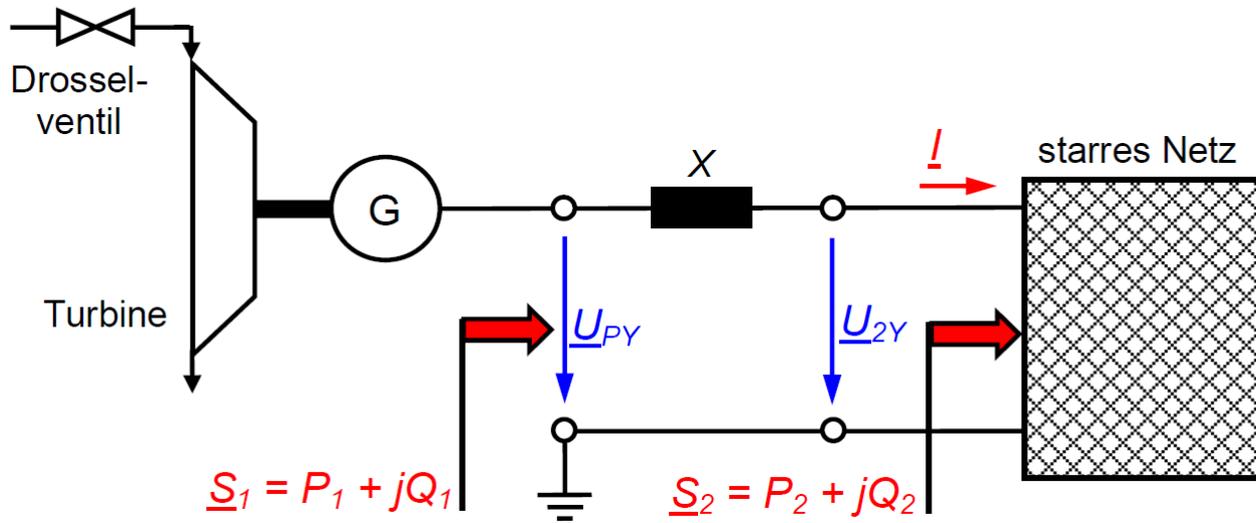
Ein Blockheizkraftwerk (BHKW) soll über einen Transformator und eine Leitung in das öffentliche 110-kV-Energieversorgungsnetz einspeisen. Sie sollen die wesentlichen Anlagenparameter bestimmen.



- c) Welche maximale Wirkleistung P_{max} ist übertragbar? Wie groß ist dann der Leitungswinkel ϑ ? Der Generator kann um 10% übererregt werden.

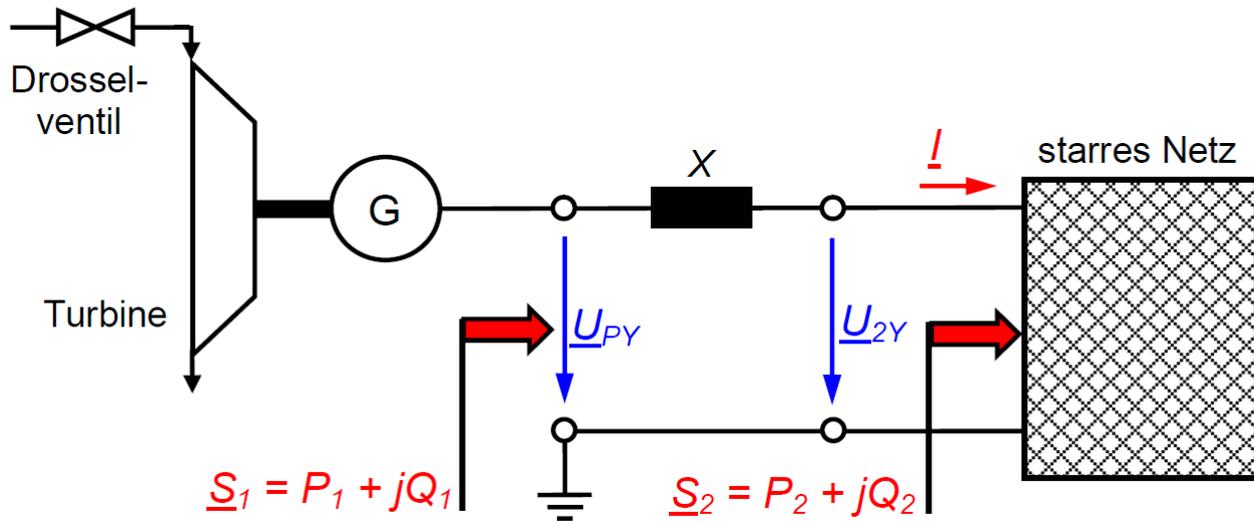
$$P_1 = P_2 = \frac{U_P \cdot U_2}{X} \cdot \sin(\vartheta) = \frac{1,1 \cdot (110 \text{ kV})^2}{471,5 \Omega} = 28,229 \text{ MW}$$

Ein Blockheizkraftwerk (BHKW) soll über einen Transformator und eine Leitung in das öffentliche 110-kV-Energieversorgungsnetz einspeisen. Sie sollen die wesentlichen Anlagenparameter bestimmen.



Zusatzfrage: Warum wäre dieser Betriebszustand problematisch?

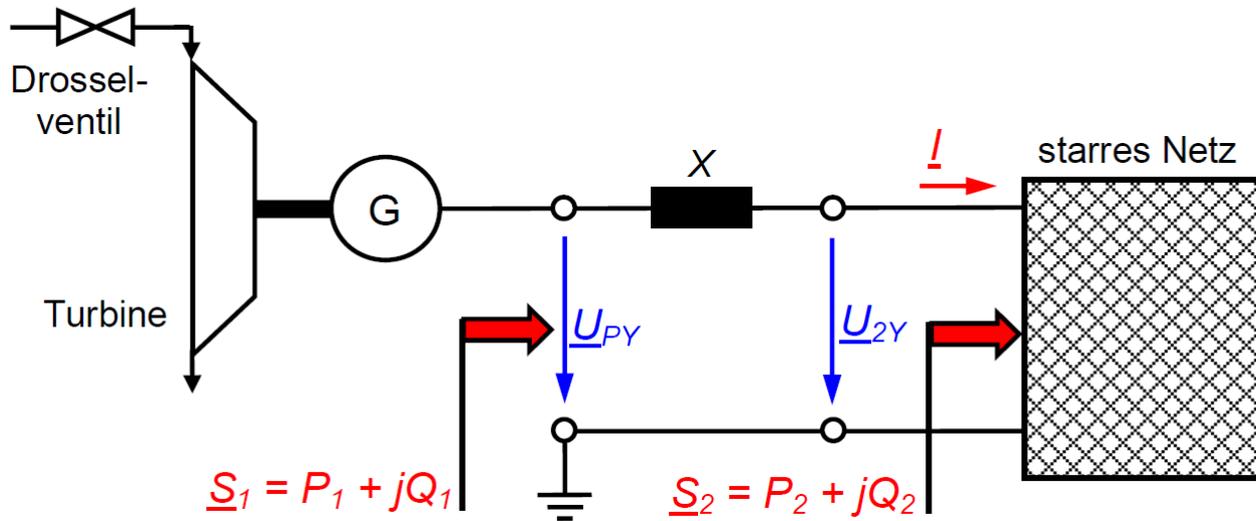
Ein Blockheizkraftwerk (BHKW) soll über einen Transformator und eine Leitung in das öffentliche 110-kV-Energieversorgungsnetz einspeisen. Sie sollen die wesentlichen Anlagenparameter bestimmen.



Zusatzfrage: Warum wäre dieser Betriebszustand problematisch?

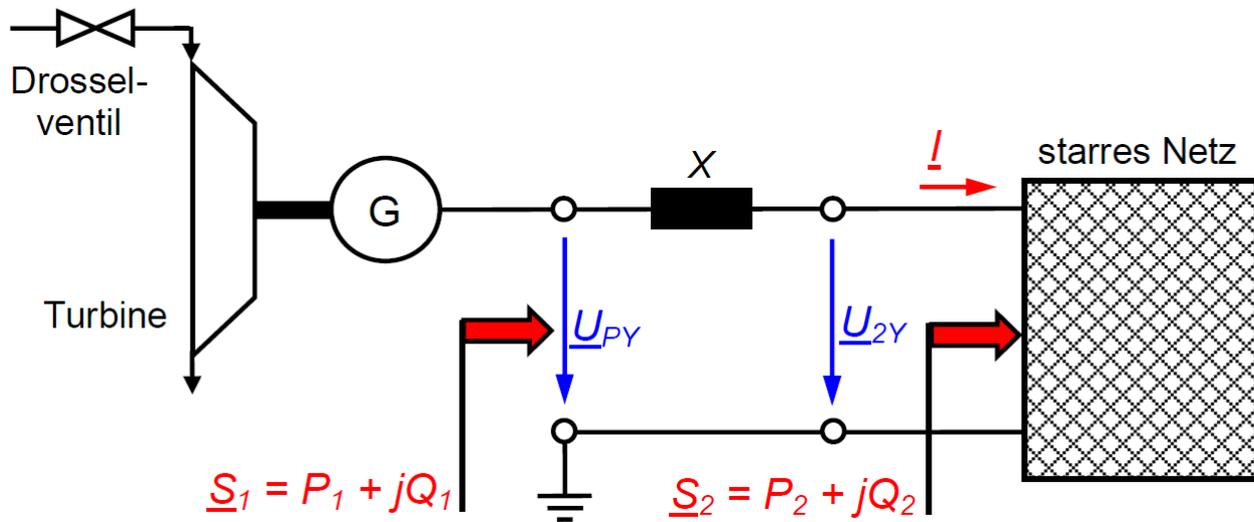
→ Instabil, da bei weiterer Erhöhung der benötigten Leistung der Übertragungswinkel 90° überschreitet und die übertragbare Leistung dann zusammenbricht.

Ein Blockheizkraftwerk (BHKW) soll über einen Transformator und eine Leitung in das öffentliche 110-kV-Energieversorgungsnetz einspeisen. Sie sollen die wesentlichen Anlagenparameter bestimmen.



d) Mit welchem Leitungswinkel ϑ arbeitet die Anlage, wenn der Generator die halbe maximale Wirkleistung $P_1 = P_{max}/2$ zur Verfügung stellt.

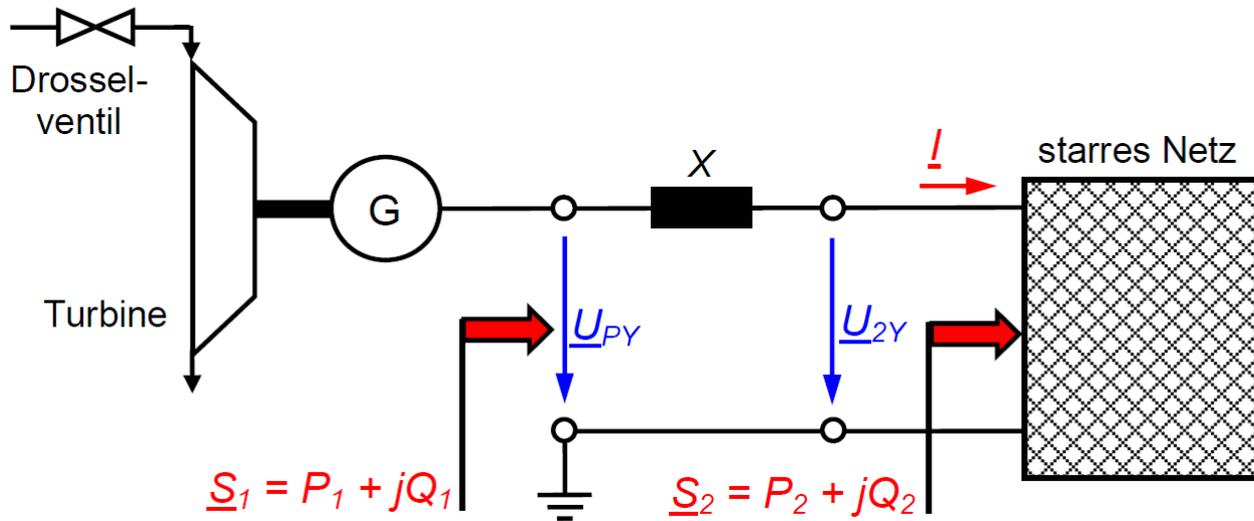
Ein Blockheizkraftwerk (BHKW) soll über einen Transformator und eine Leitung in das öffentliche 110-kV-Energieversorgungsnetz einspeisen. Sie sollen die wesentlichen Anlagenparameter bestimmen.



- d) Mit welchem Leitungswinkel ϑ arbeitet die Anlage, wenn der Generator die halbe maximale Wirkleistung $P_1 = P_{max}/2$ zur Verfügung stellt.

$$P_1 = P_2 = \frac{U_P \cdot U_2}{X} \cdot \sin(\vartheta)$$

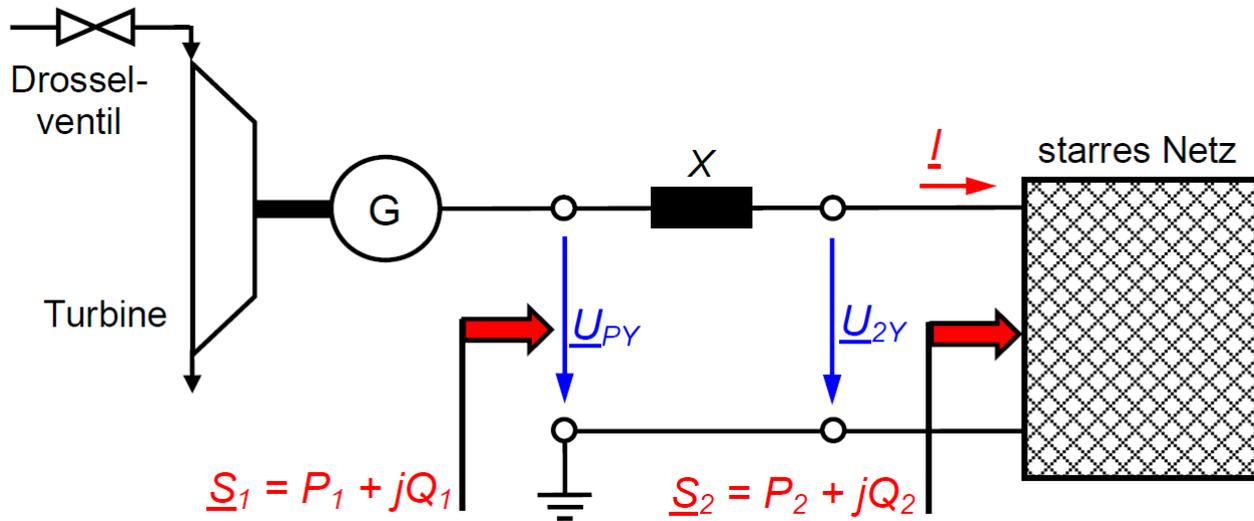
Ein Blockheizkraftwerk (BHKW) soll über einen Transformator und eine Leitung in das öffentliche 110-kV-Energieversorgungsnetz einspeisen. Sie sollen die wesentlichen Anlagenparameter bestimmen.



d) Mit welchem Leitungswinkel ϑ arbeitet die Anlage, wenn der Generator die halbe maximale Wirkleistung $P_1 = P_{max}/2$ zur Verfügung stellt.

$$P_1 = P_2 = \frac{U_P \cdot U_2}{X} \cdot \sin(\vartheta) \qquad P_1 = P_{max} \cdot \frac{1}{2} \rightarrow \sin(\vartheta) = \frac{1}{2}$$

Ein Blockheizkraftwerk (BHKW) soll über einen Transformator und eine Leitung in das öffentliche 110-kV-Energieversorgungsnetz einspeisen. Sie sollen die wesentlichen Anlagenparameter bestimmen.

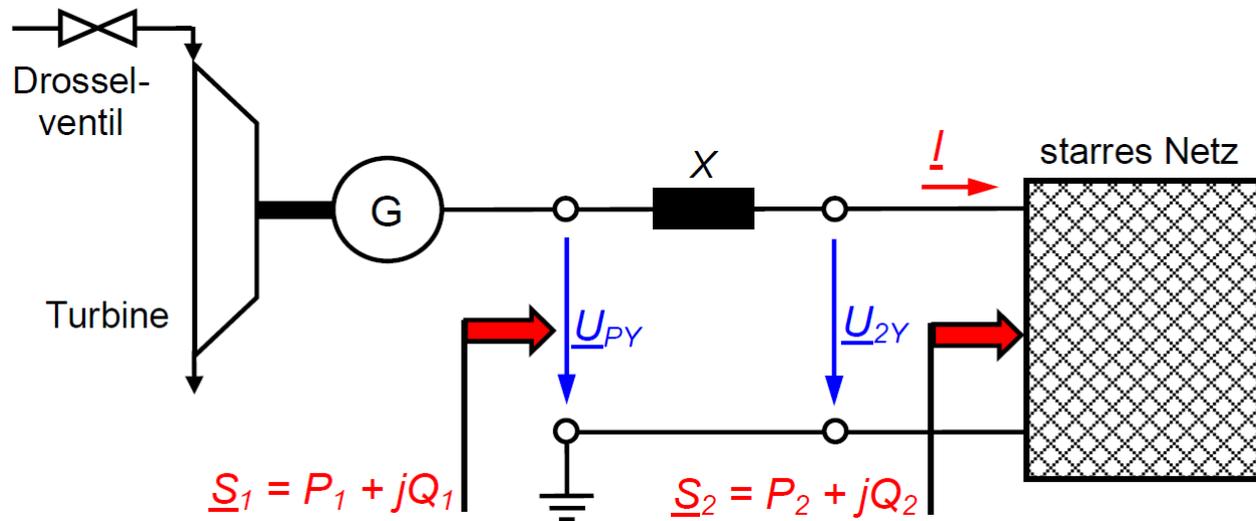


d) Mit welchem Leitungswinkel ϑ arbeitet die Anlage, wenn der Generator die halbe maximale Wirkleistung $P_1 = P_{max}/2$ zur Verfügung stellt.

$$P_1 = P_2 = \frac{U_P \cdot U_2}{X} \cdot \sin(\vartheta) \qquad P_1 = P_{max} \cdot \frac{1}{2} \rightarrow \sin(\vartheta) = \frac{1}{2}$$

$$\vartheta = 30^\circ$$

Ein Blockheizkraftwerk (BHKW) soll über einen Transformator und eine Leitung in das öffentliche 110-kV-Energieversorgungsnetz einspeisen. Sie sollen die wesentlichen Anlagenparameter bestimmen.



- e) Das BHKW soll besser ausgenutzt werden. Die bisherige maximale Leistung P_{max} soll jetzt bei einem Leitungswinkel von $\vartheta = 45^\circ$ tatsächlich übertragen werden. Hierzu wird eine kapazitive Kompensation der Reaktanz X in den Längsweig der Leitung eingebaut. Bestimmen Sie die notwendige Kapazität C der kapazitiven Kompensationseinrichtung.

→ Tafel