



# Das elektrische Energiesystem im Spannungsfeld zwischen Technik und Markt

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Lothar Fickert

Institut für Elektrische Anlagen  
Technische Universität Graz



# Physikalische Grundgrößen:



# Physikalische Grundgrößen:

V



# Physikalische Grundgrößen:

**V    A**



# Physikalische Grundgrößen:

**V A S**



# Physikalische Grundgrößen:

V A s €



# Physikalische Grundgrößen:

**V    A    s    €    §**

# Physikalische Grundgrößen:

V A s € §

$$A_{ik} \rightarrow A_{ki}$$

# Physikalische Grundgrößen:

V A s € §

$$A_{ik} \rightarrow A_{ki}$$

V  
A  
s  
€  
§

# Physikalische Grundgrößen:

**V A s € §**

## Technik

Spannungsband

Stromtragfähigkeit

Resilienz

## Markt

Gesetzlich-regulatorische Rahmenbedingungen

**V**

**A**

**s**

**€**

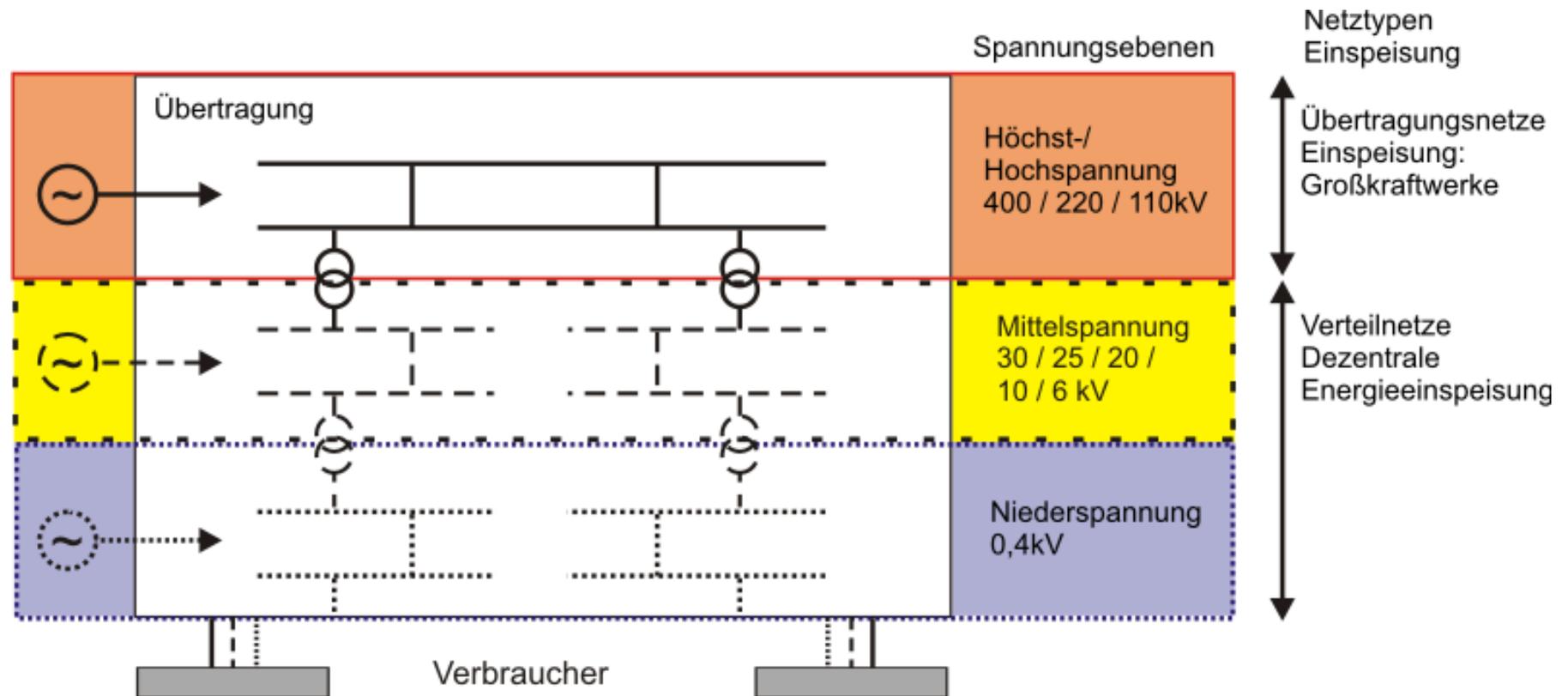
**§**

**→ Wechselseitige Einflussnahmen und Kritikalität**



# Der Status Quo

# Grundsatz-Darstellung des elektrischen Energiesystems





# Das Spannungsband

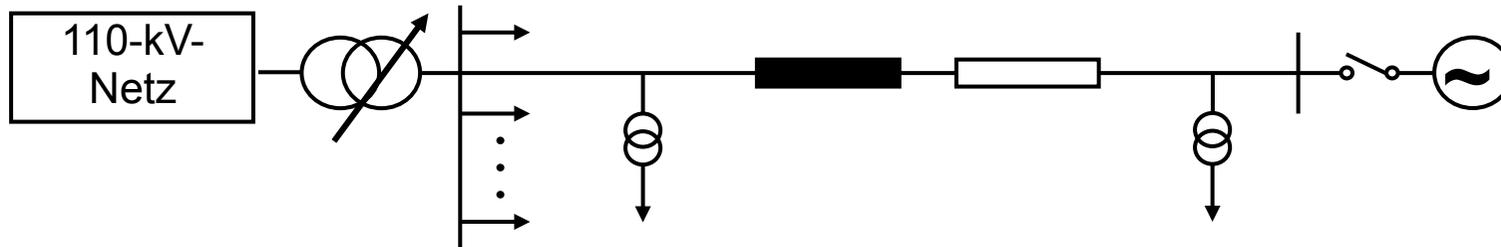
# Spannungsverlauf auf einer Leitung (1)



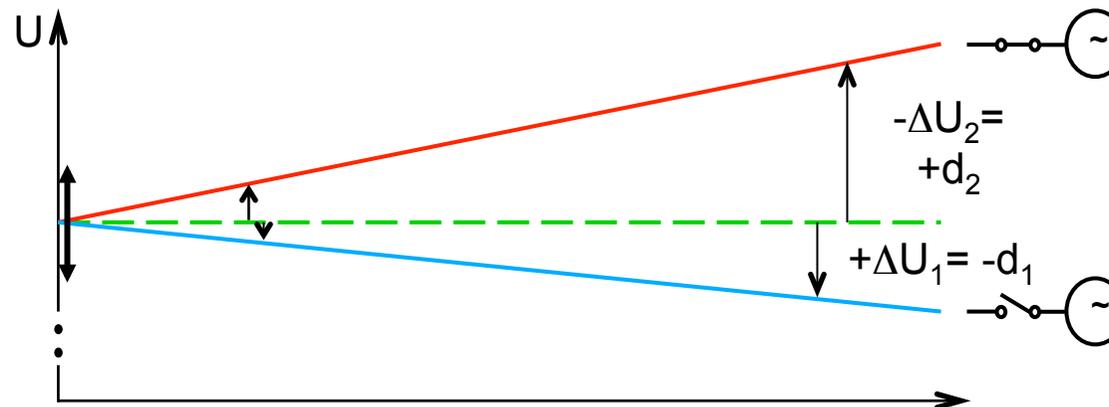
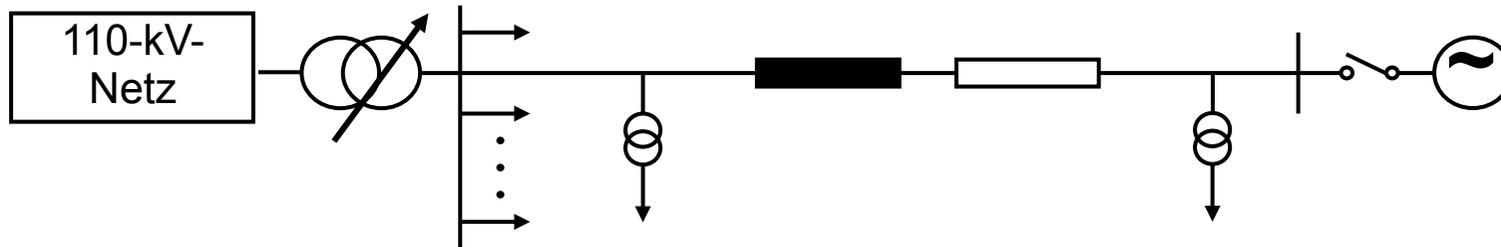
## Spannungsverlauf auf einer Leitung (1)



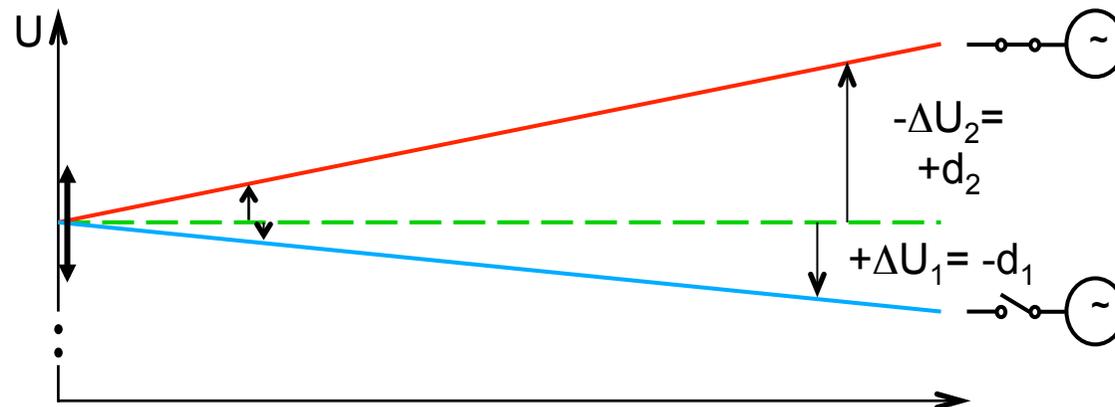
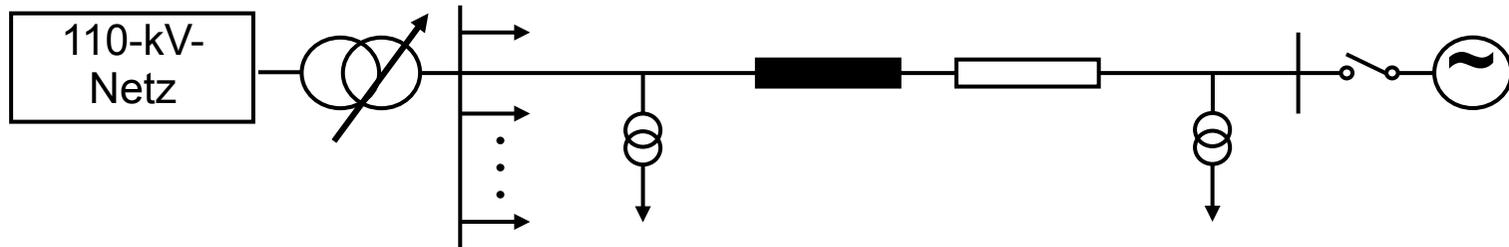
# Spannungsverlauf auf einer Leitung (1)



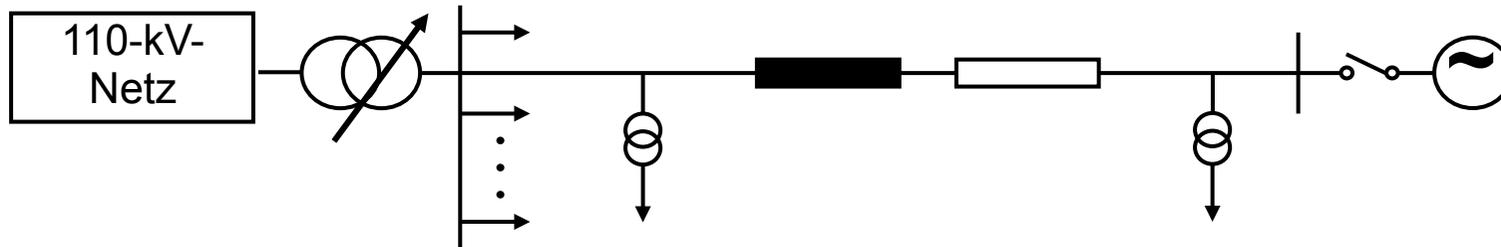
# Spannungsverlauf auf einer Leitung (1)



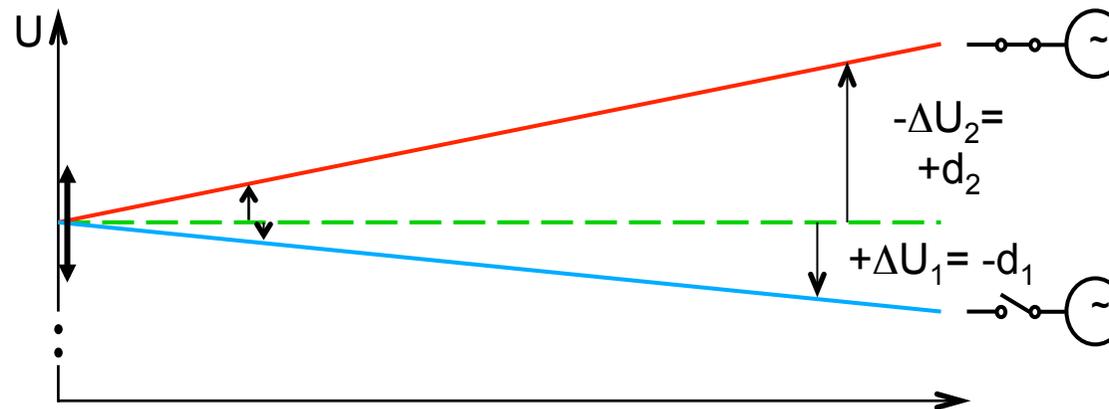
# Spannungsverlauf auf einer Leitung (1)



# Spannungsverlauf auf einer Leitung (1)

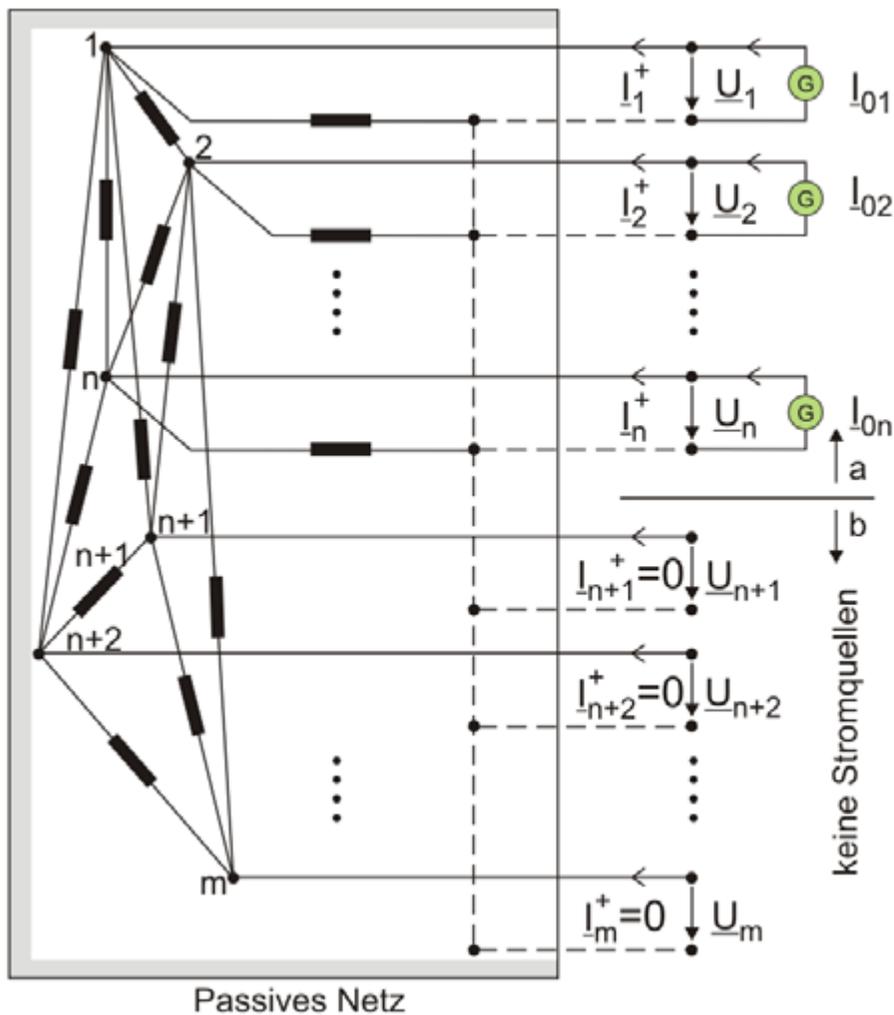


- P → P  
 - Q → Q  
 →  $|\Delta U| = |\Delta U|$



„Einspeisung bis zur Höhe der Entnahme ist ok“

# Ersatzschaltung eines linearen Netzes



$$\underline{I}_0^+ = \begin{pmatrix} I_1^+ \\ I_2^+ \\ \vdots \\ I_n^+ \\ \hline 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} = \underline{Y}^+ \cdot \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \\ \hline U_{n+1} \\ \vdots \\ U_m \end{pmatrix}$$

$$I_0^+ = Y^+ * U^+$$

## Spannungsänderung im Niederspannungsnetz

### Grundgleichung

$$\underline{I}^+ = \underline{Y}^+ \cdot \underline{U}^+ \rightarrow$$

$$\underline{U}^+ = (\underline{Y}^+)^{-1} \cdot \underline{I}^+ = (\underline{K} \cdot \underline{Y}_{\text{Zweig}} \cdot \underline{K}^T)^{-1} \cdot \underline{I}^+$$

### Für jeden Netzknoten

$$U_i^+ = \sum R_{ik} \cdot I_k^+$$

### Spannungsänderung bei reiner Entnahme

$$- |\Delta U_i^+| = - |\sum R_{ik} \cdot \Delta I_k^+| = - \sum R_{ik} \cdot |\Delta I_k^+|$$

### Spannungsänderung bei reiner Einspeisung

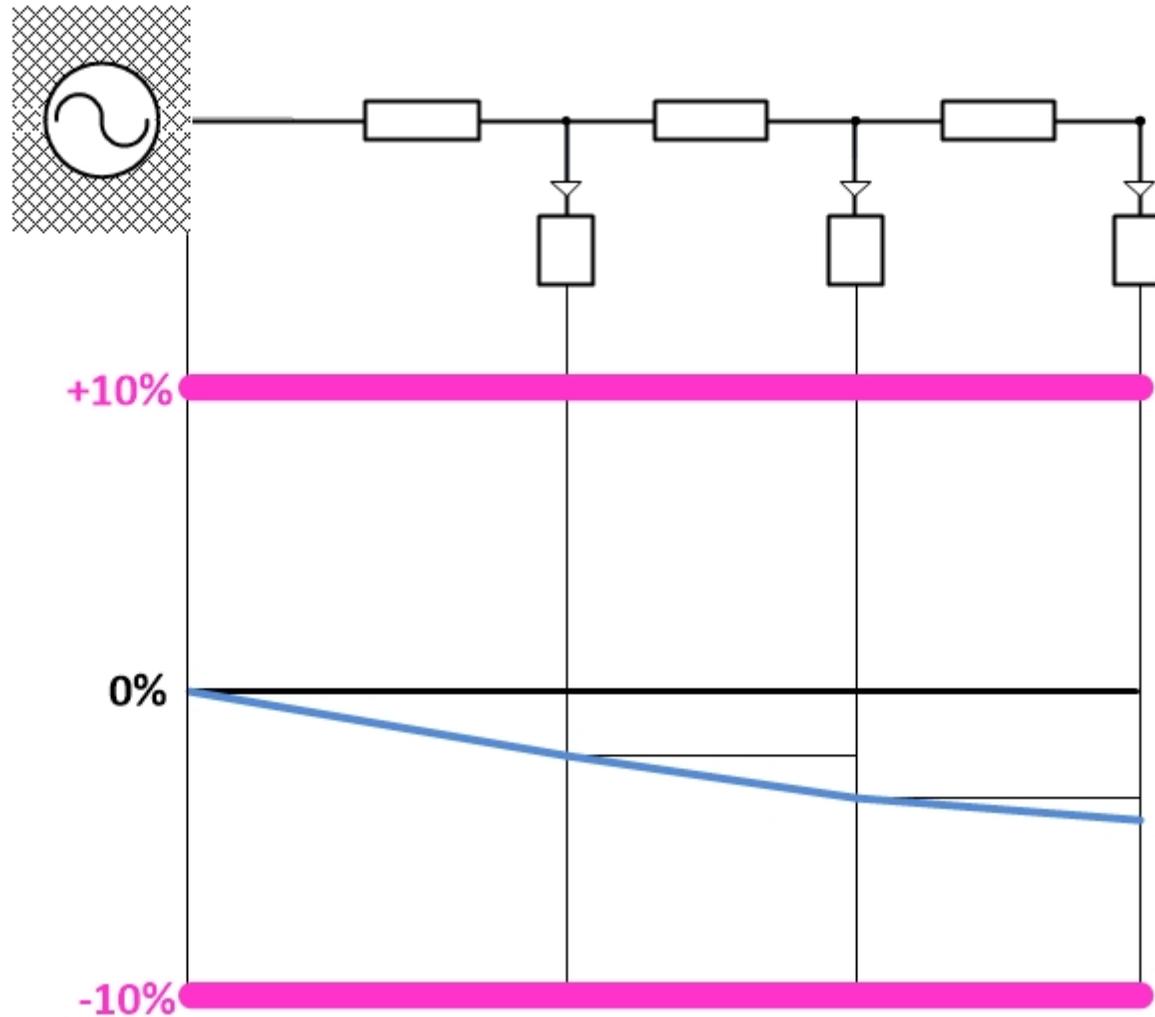
$$+ |\Delta U_i^+| = - |\sum R_{ik} \cdot \Delta I_k^+| = + \sum R_{ik} \cdot |\Delta I_k^+|$$

### Cauchy-Schwarz'sche Ungleichung

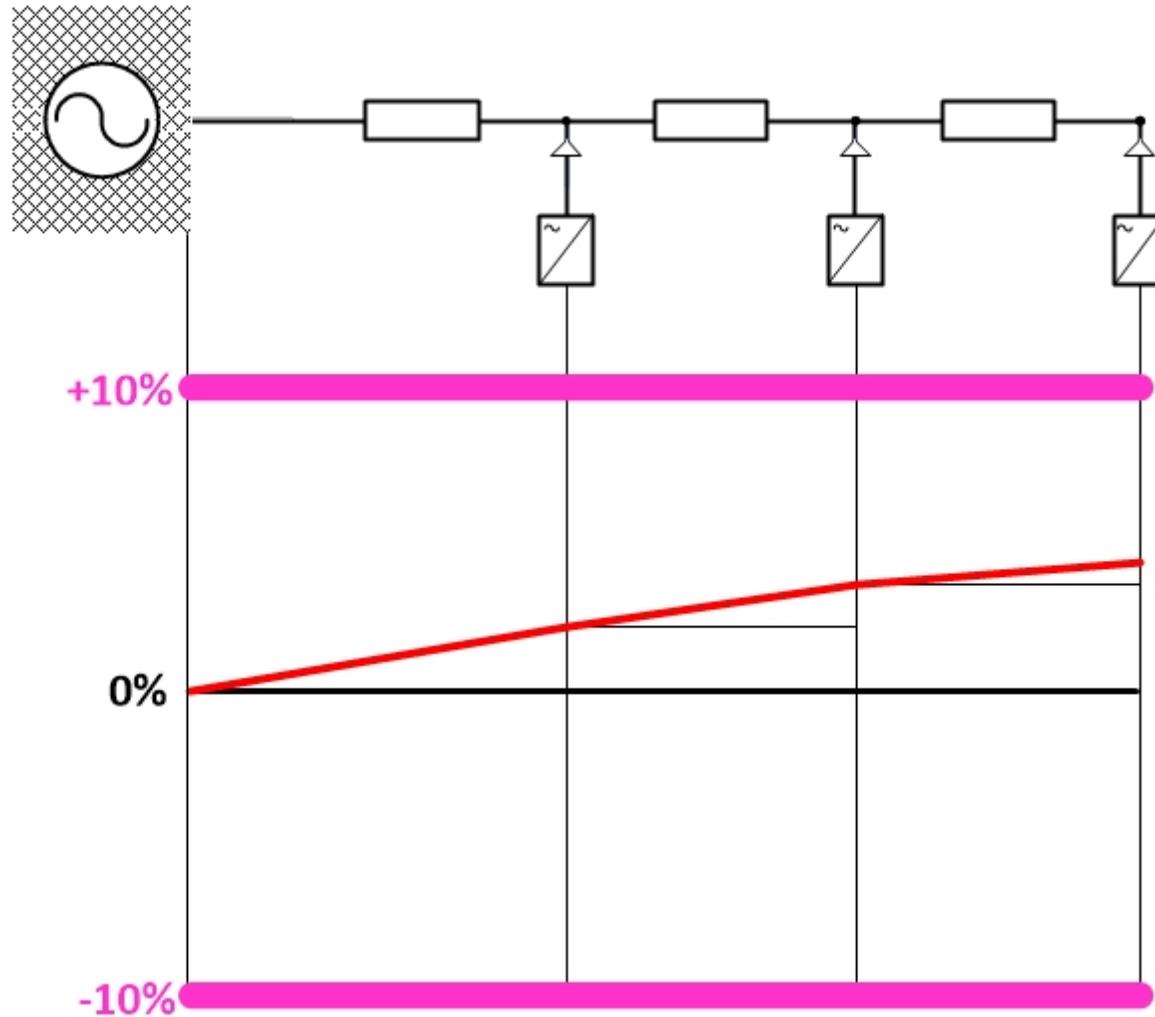
$$|a+b| \leq |a| + |b|$$

$$|\Delta U_i^+| = |\sum R_{ik} \cdot \Delta I_k^+| \leq \sum R_{ik} \cdot |\Delta I_k^+| \leq \text{typ. } 4\%$$

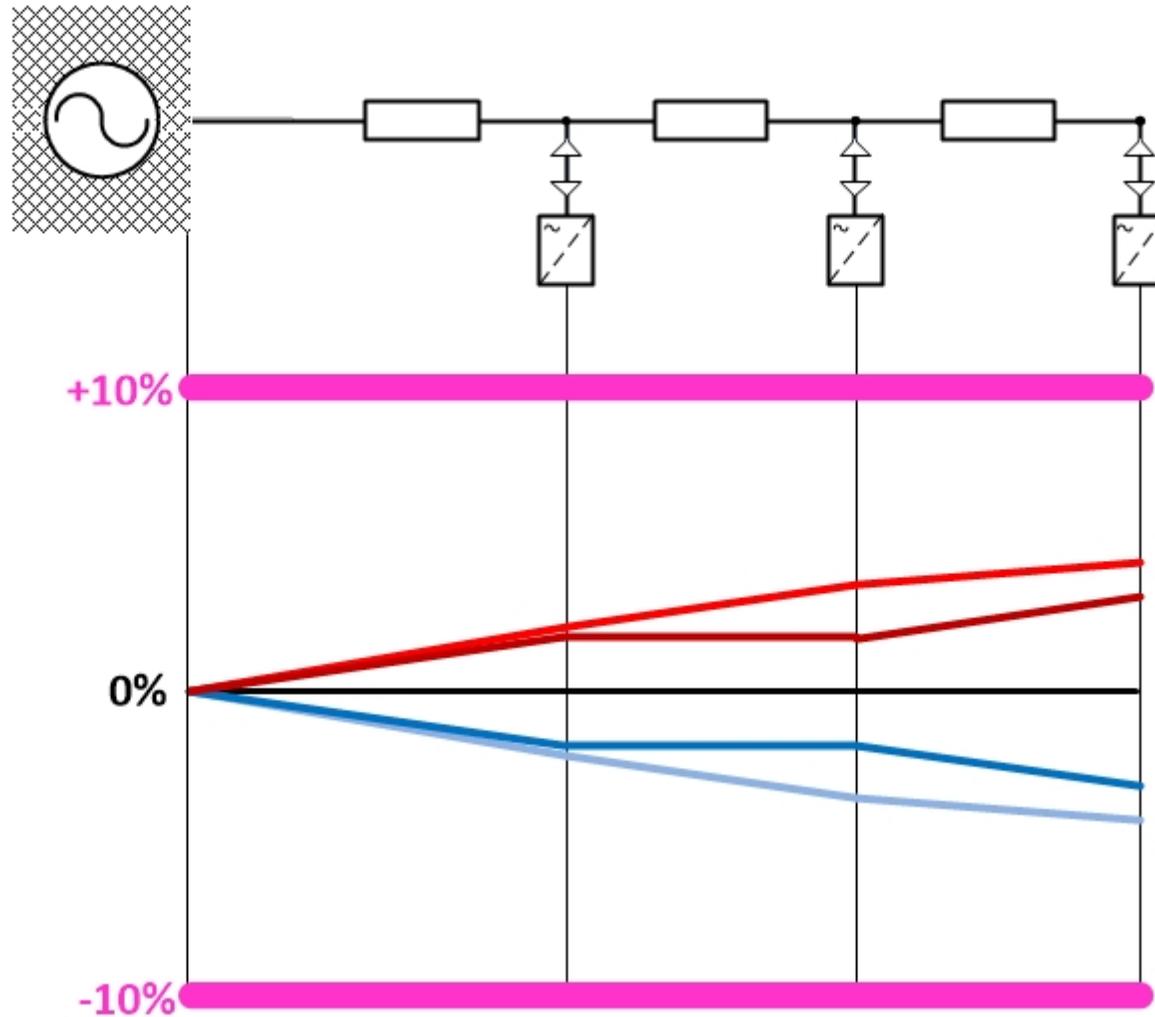
## Spannungsverlauf auf einer Leitung (2)



## Spannungsverlauf auf einer Leitung (2)



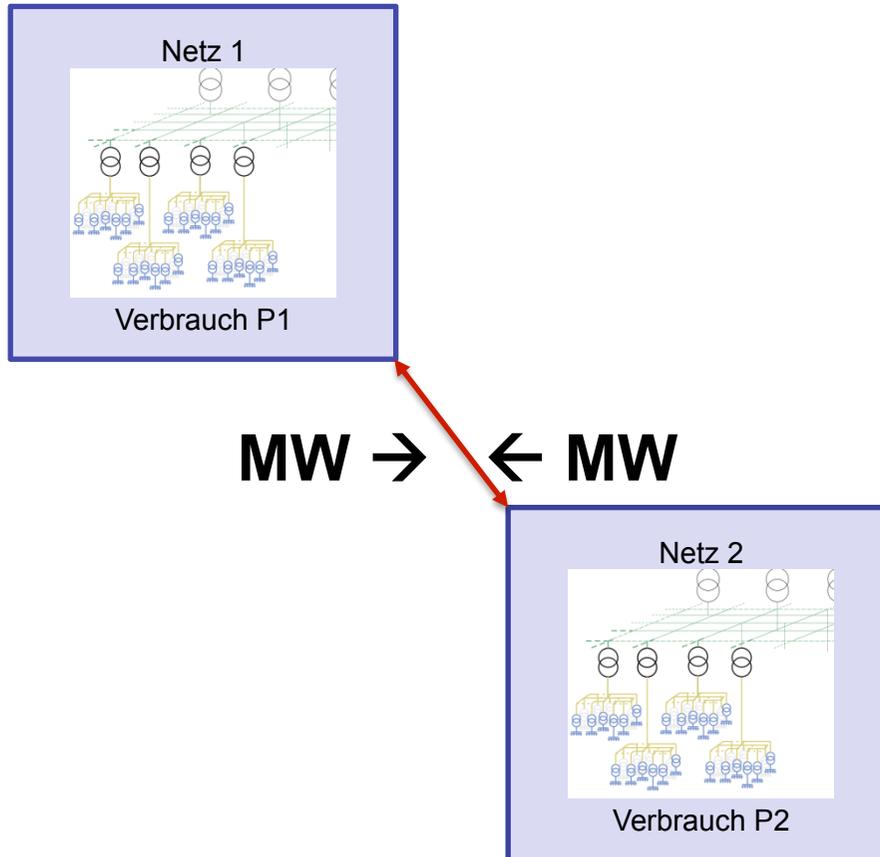
## Spannungsverlauf auf einer Leitung (2)



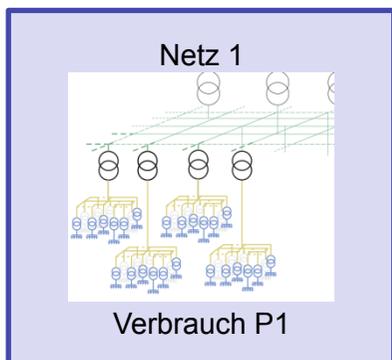


# Stromtragfähigkeit und Leitungslängen

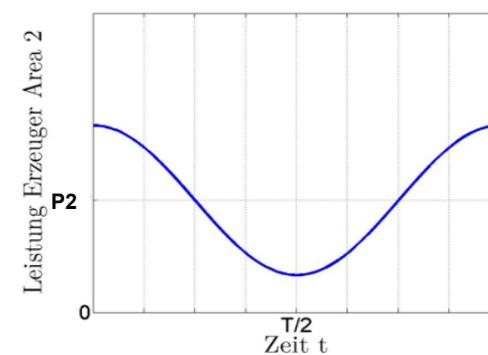
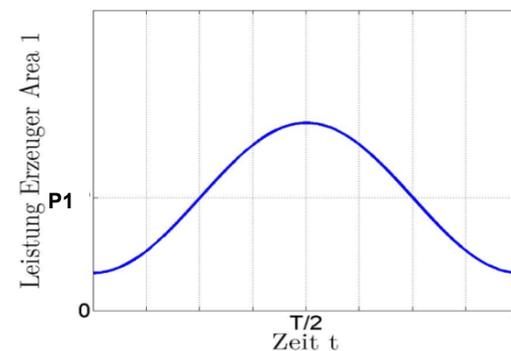
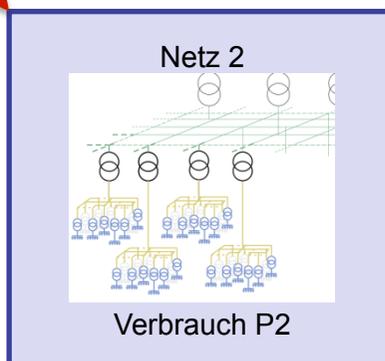
# Zeitliche und räumliche Dislozierung



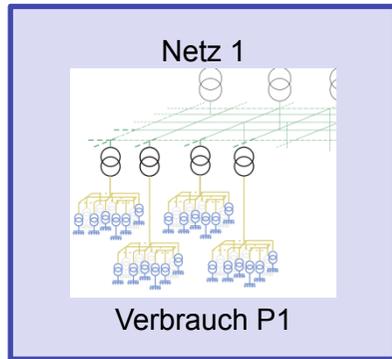
# Zeitliche und räumliche Dislozierung



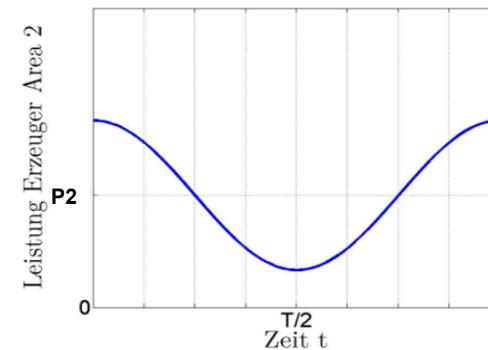
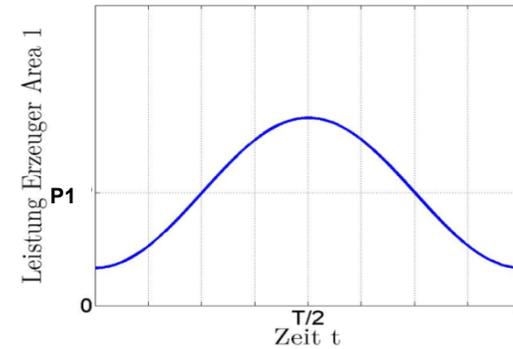
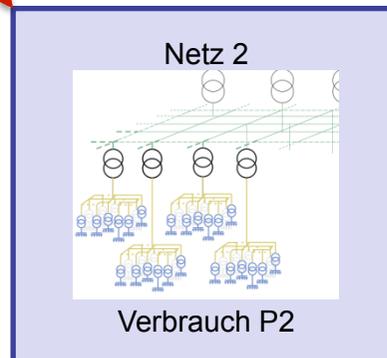
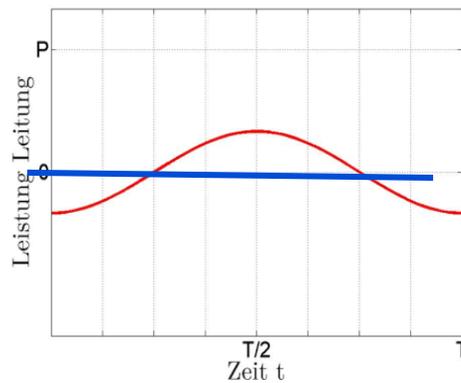
MW → ← MW



# Zeitliche und räumliche Dislozierung



**MW → ← MW**



# Reichweite des Stromtransportes: „ MVA = kV“

## „MVA = kV“

## im Vollastbetrieb

Allgemein

Typische Werte

$$\delta_E = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \kappa}}$$

$D = 2\delta_E$  wegen Wirtschaftlichkeit

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$I_N = \sigma_N \cdot A$$

$$S_N = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N = \sqrt{3} \cdot U_{N,kV} [kV] \cdot I_{N,kA} [kA]$$

$$S_{N,MVA} = \sqrt{3} \cdot U_{N,kV} \cdot I_{N,kA}$$

$$\omega = 314 s^{-1}$$

$$\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$$

$$\kappa = 52 \frac{Am}{Vmm^2} \text{ für Cu}$$

$$\delta_E = 9,9 mm$$

$$A = 306 mm^2$$

$$\sigma_N = 2 \frac{A}{mm^2}$$

$$I_N = 306 \cdot 2 = 612 A$$

$$S_{N,MVA} = \sqrt{3} \cdot 0,6 \cdot U_{N,kV} = 1 \cdot U_{N,kV}$$

## „MVA = kV“



1 MVA = 1 kV

# Reichweite des Stromtransportes: „kV = km“

## „kV = km“

Allgemein

$$\frac{\delta U}{U_N} = \frac{PR + QX}{U_N^2} \stackrel{!}{\leq} \varepsilon \text{ (z.B.: 0,05)}$$

$$P_N = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N \cdot \cos\varphi_N$$

$$Q_N = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N \cdot \sqrt{1 - \cos^2\varphi_N}$$

$$R^* = r' \cdot l^*$$

$$X^* = x' \cdot l^*$$

$$l^* = \frac{\varepsilon U_N}{\sqrt{3} \cdot I_N \cdot (r' \cos\varphi + x' \sqrt{1 - \cos^2\varphi})}$$

## im Vollastbetrieb

Typische Werte

$$I_N = \sigma_N \cdot A = 2 \frac{A}{\text{mm}^2} \cdot A \text{mm}^2$$

$$A = \pi \cdot \rho^2 = \pi \cdot \delta_E^2 = \frac{2\pi}{\omega\mu\kappa} =$$

$$= \frac{2\pi}{314\text{s}^{-1} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot 52 \frac{\text{Am}}{\text{Vmm}^2}} = 306\text{mm}^2$$

$$I_N = 612\text{A}$$

$$r' = \frac{1000\text{m}}{306\text{mm}^2 \cdot 52 \frac{\text{Am}}{\text{Vmm}^2}} = 0,06 \frac{\Omega}{\text{km}} \quad x' = 0,13 \frac{\Omega}{\text{km}}$$

$$l_{km}^* = \frac{0,05 \cdot U_{N,kV} \cdot 1000\text{V}}{\sqrt{3} \cdot 300\text{A} \cdot \left(0,06 \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot 0,9 + 0,13 \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot 0,44\right)} =$$

$$= \frac{50}{58} U_{N,kV} \sim 1 \cdot U_{N,kV}$$

## „kV = km“



1 km = 1 kV

## Reichweite des Stromtransportes: Faustformeln

Maxwells Gleichungen &  $\sigma 1,5\text{A/mm}^2$



**Regel:  
kV = MVA**

**„Die Anschlussleistung in MVA bestimmt die Anschlussspannung in kV“**

Maxwells Gleichungen & Spannungsabfall < 5%



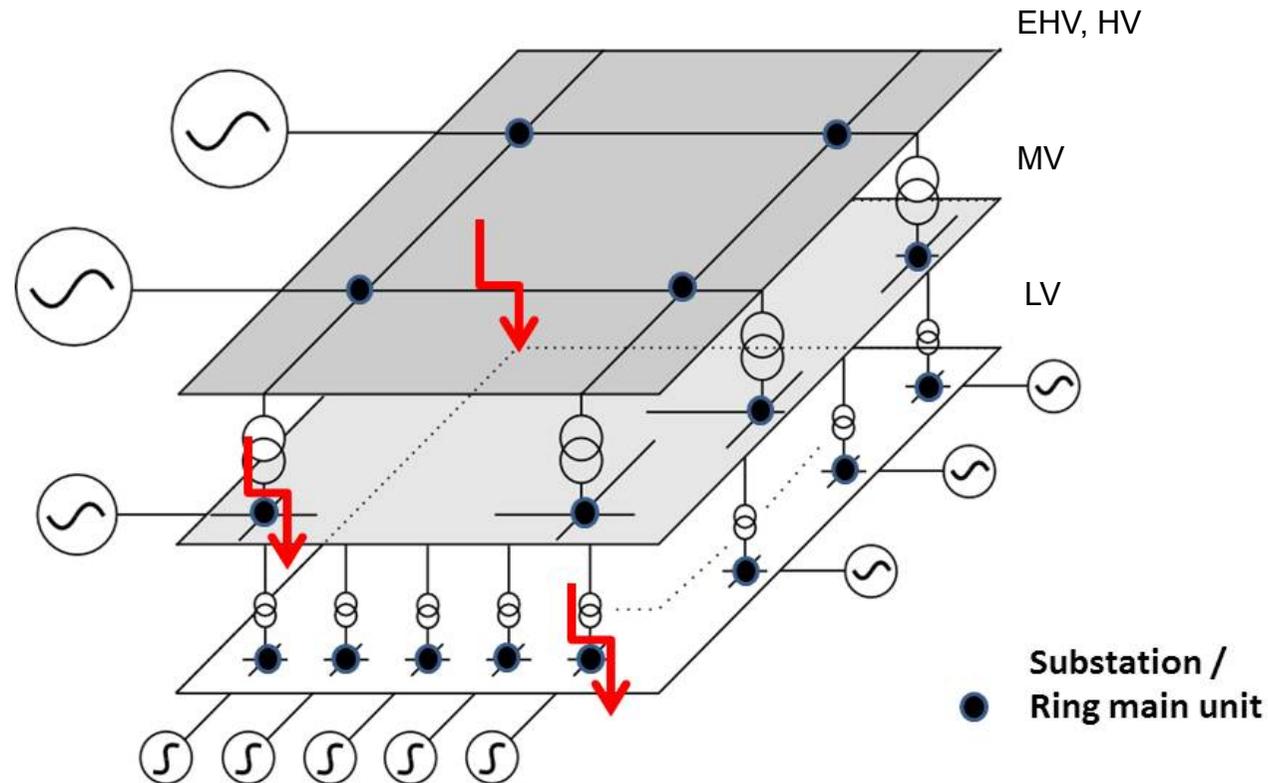
**Regel:  
kV = MVA**

**„Man kann die elektrische Energie sinnvoll nur soweit transportieren,  
wie die Nennspannung in kV beträgt“**



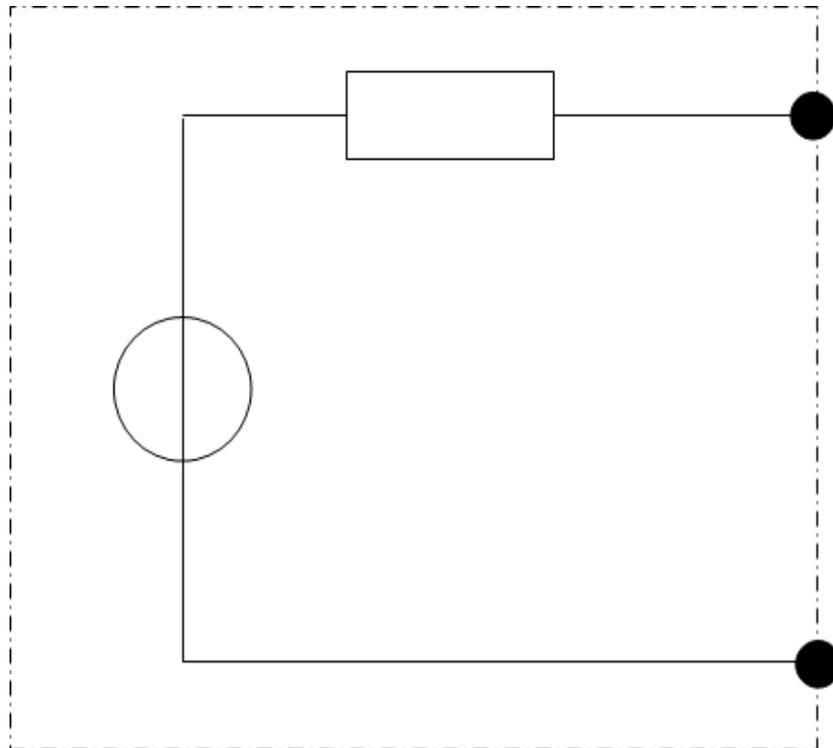
# Resilienz

# Das elektrische System – Netzfehler

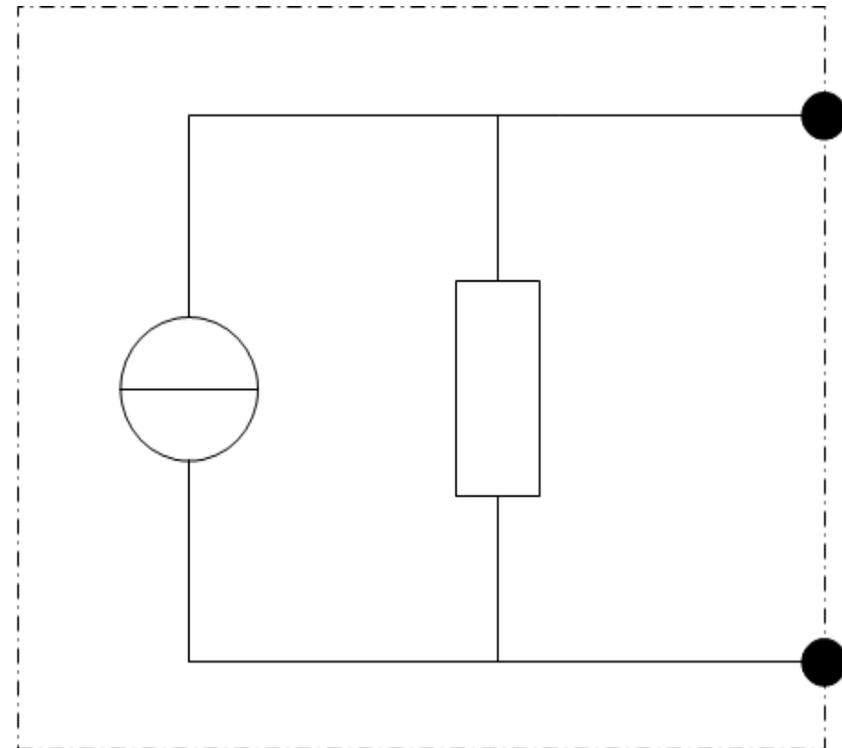


# Spannungsquelle vs. Stromquelle

## Spannungsquelle

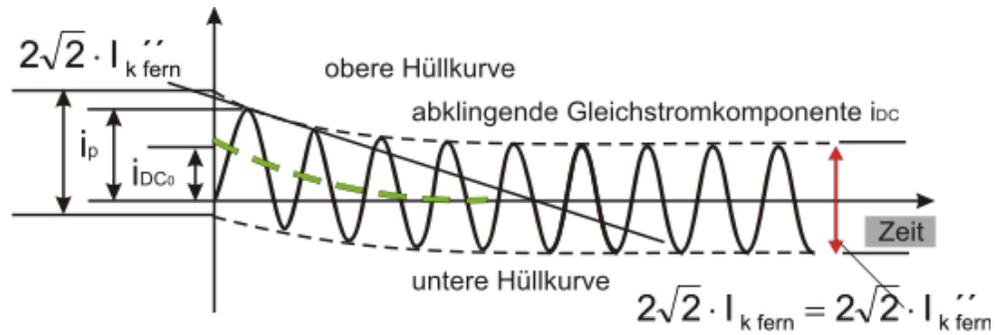


## Stromquelle



# Spannungsquelle vs. Stromquelle

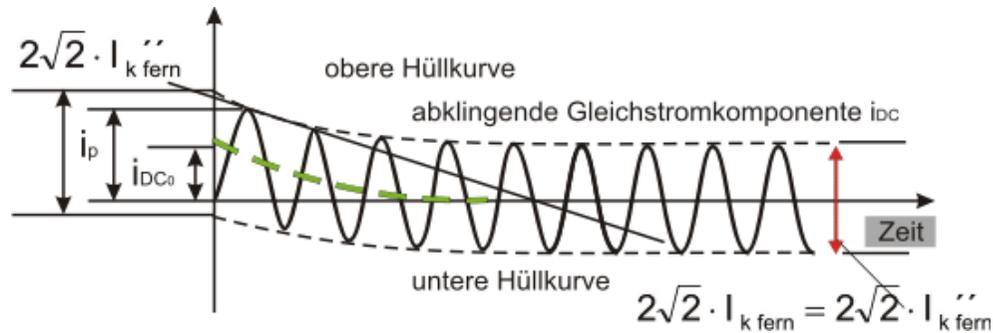
## Spannungsquelle



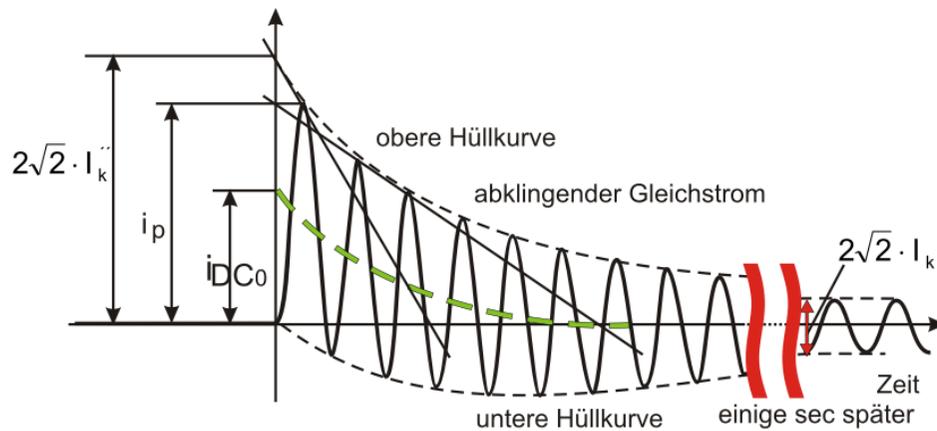
# Spannungsquelle vs. Stromquelle

## Spannungsquelle

### Generatorferner Kurzschluss



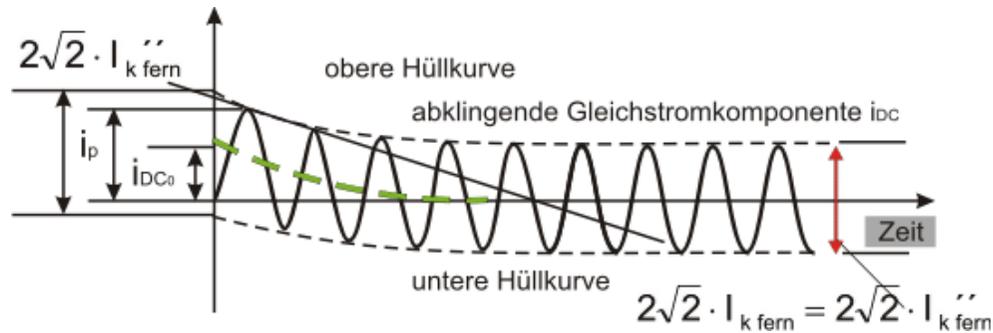
### Generatornaher Kurzschluss



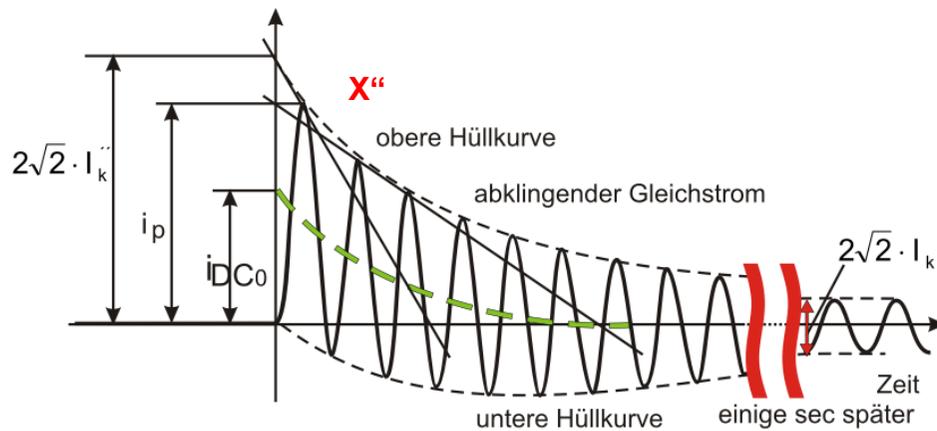
# Spannungsquelle vs. Stromquelle

## Spannungsquelle

### Generatorferner Kurzschluss



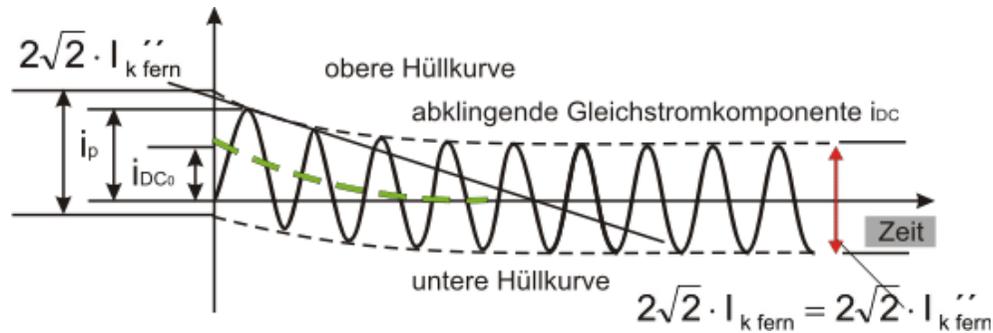
### Generatornaher Kurzschluss



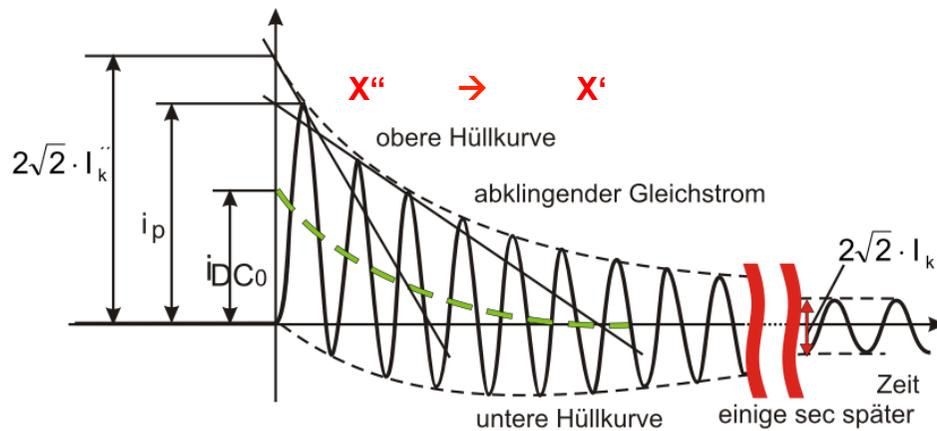
# Spannungsquelle vs. Stromquelle

## Spannungsquelle

### Generatorferner Kurzschluss



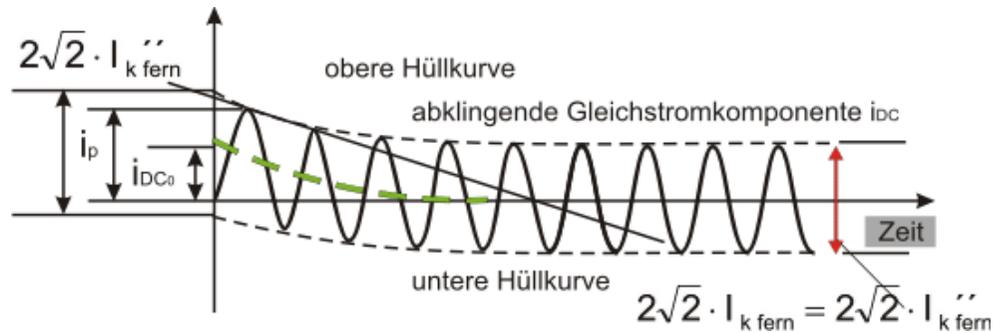
### Generatornaher Kurzschluss



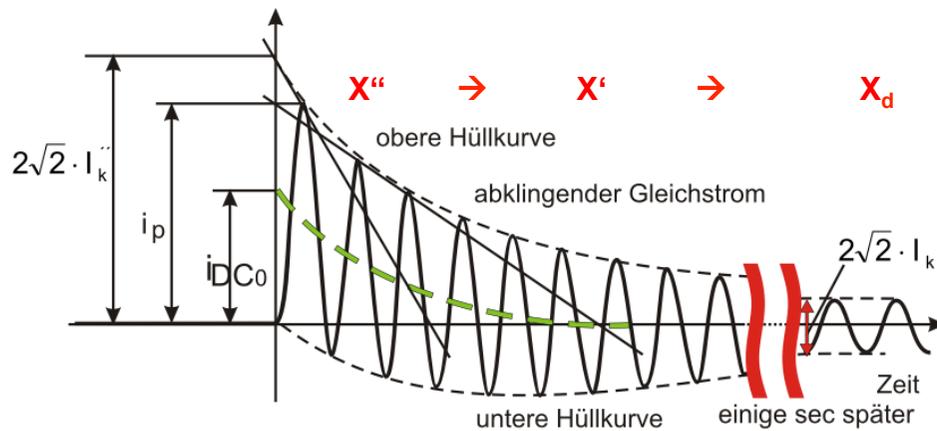
# Spannungsquelle vs. Stromquelle

## Spannungsquelle

### Generatorferner Kurzschluss



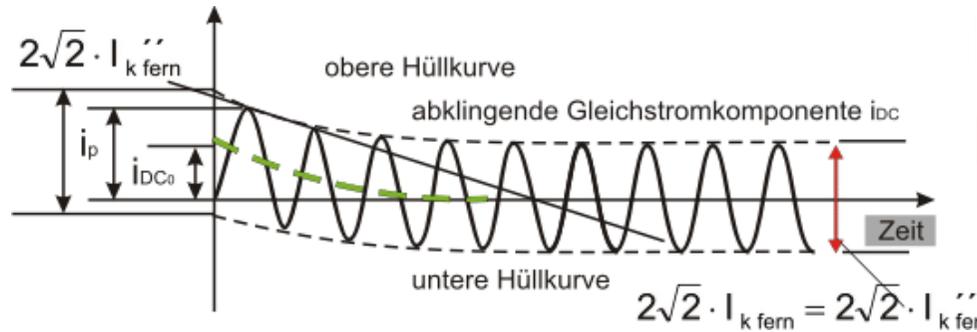
### Generatornaher Kurzschluss



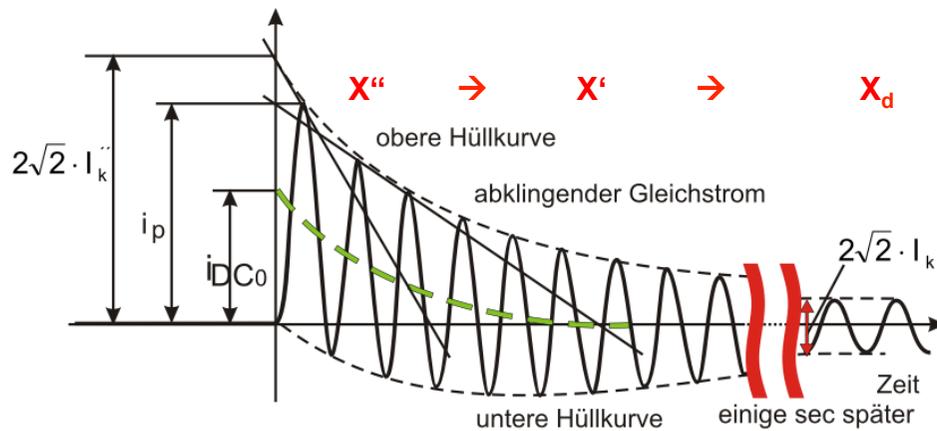
# Spannungsquelle vs. Stromquelle

## Spannungsquelle

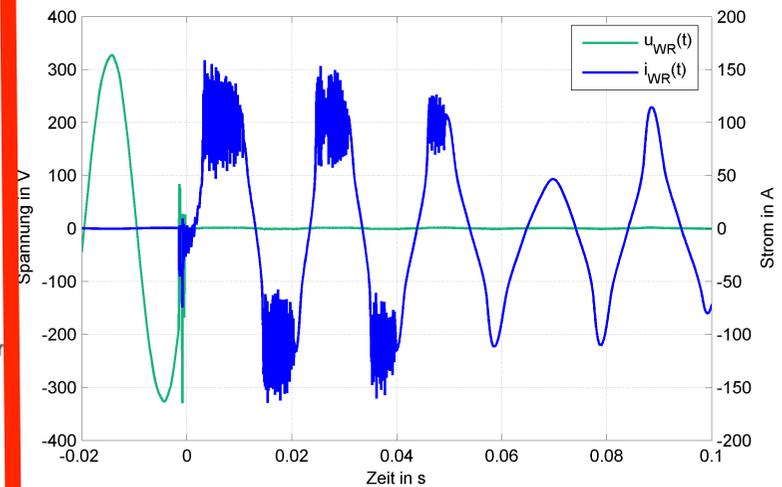
### Generatorferner Kurzschluss



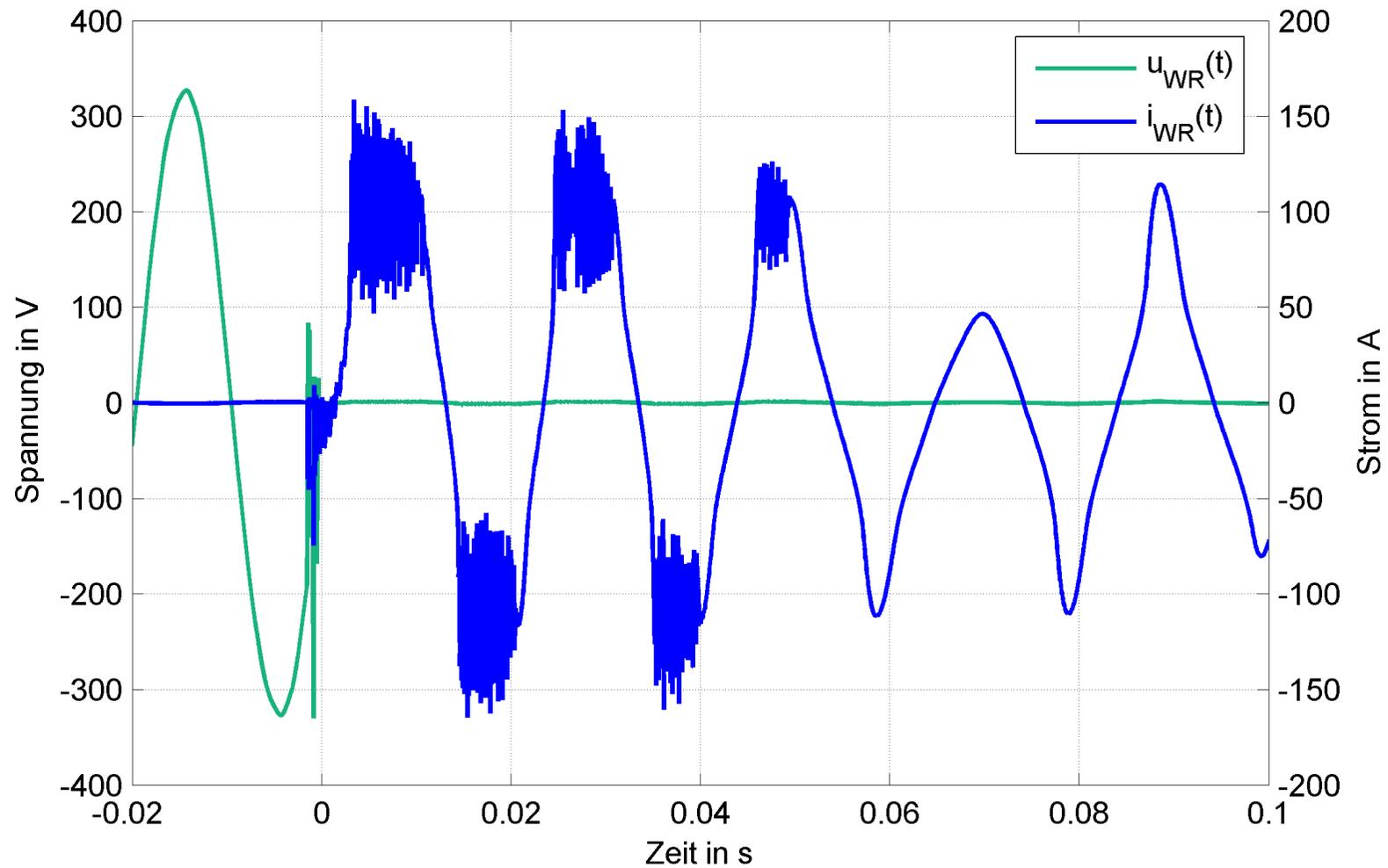
### Generatornaher Kurzschluss



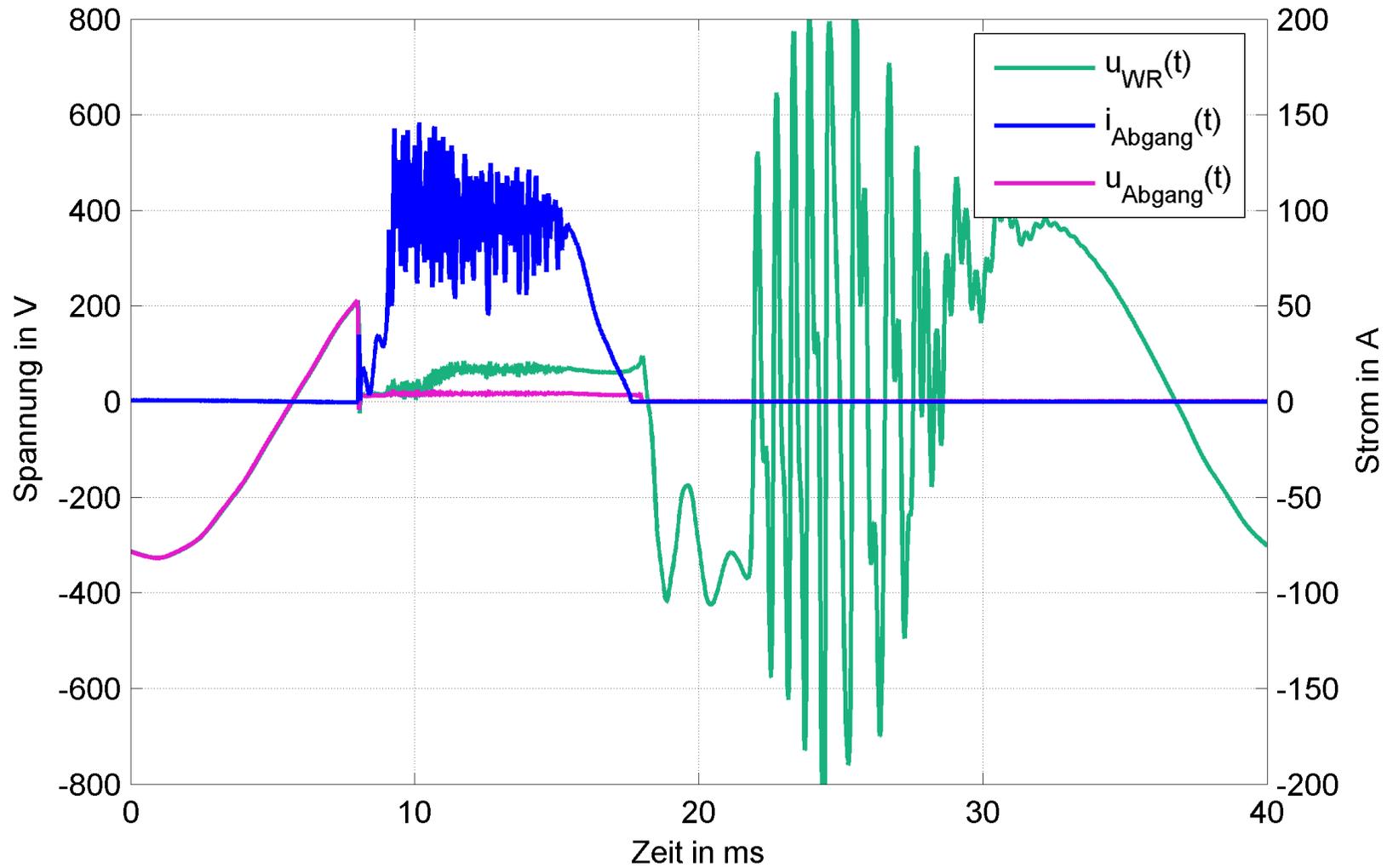
## Stromquelle



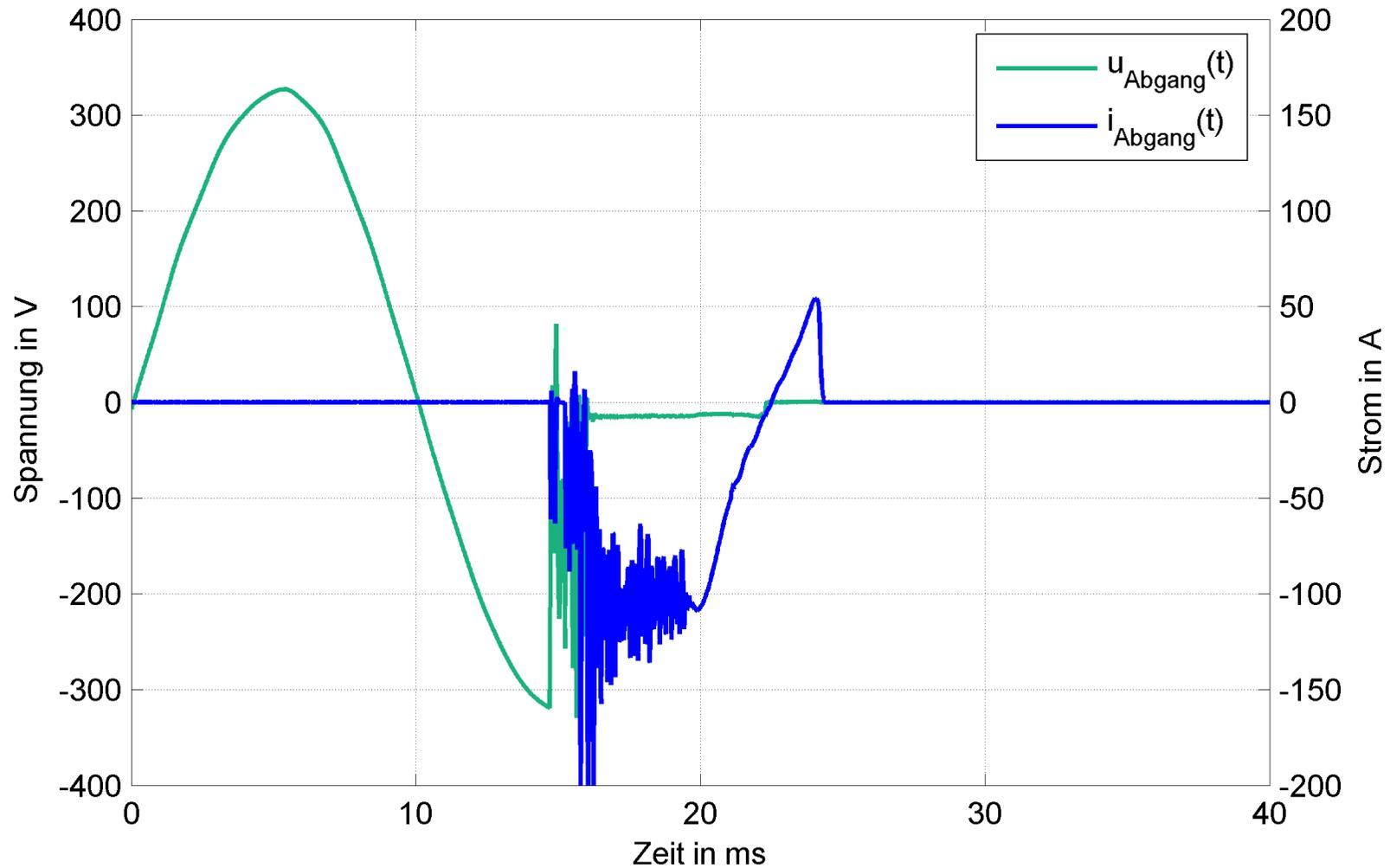
# LVRT – Wechselrichter-Verhalten



# LVRT – Wechselrichter-Verhalten



# LVRT – Wechselrichter-Verhalten



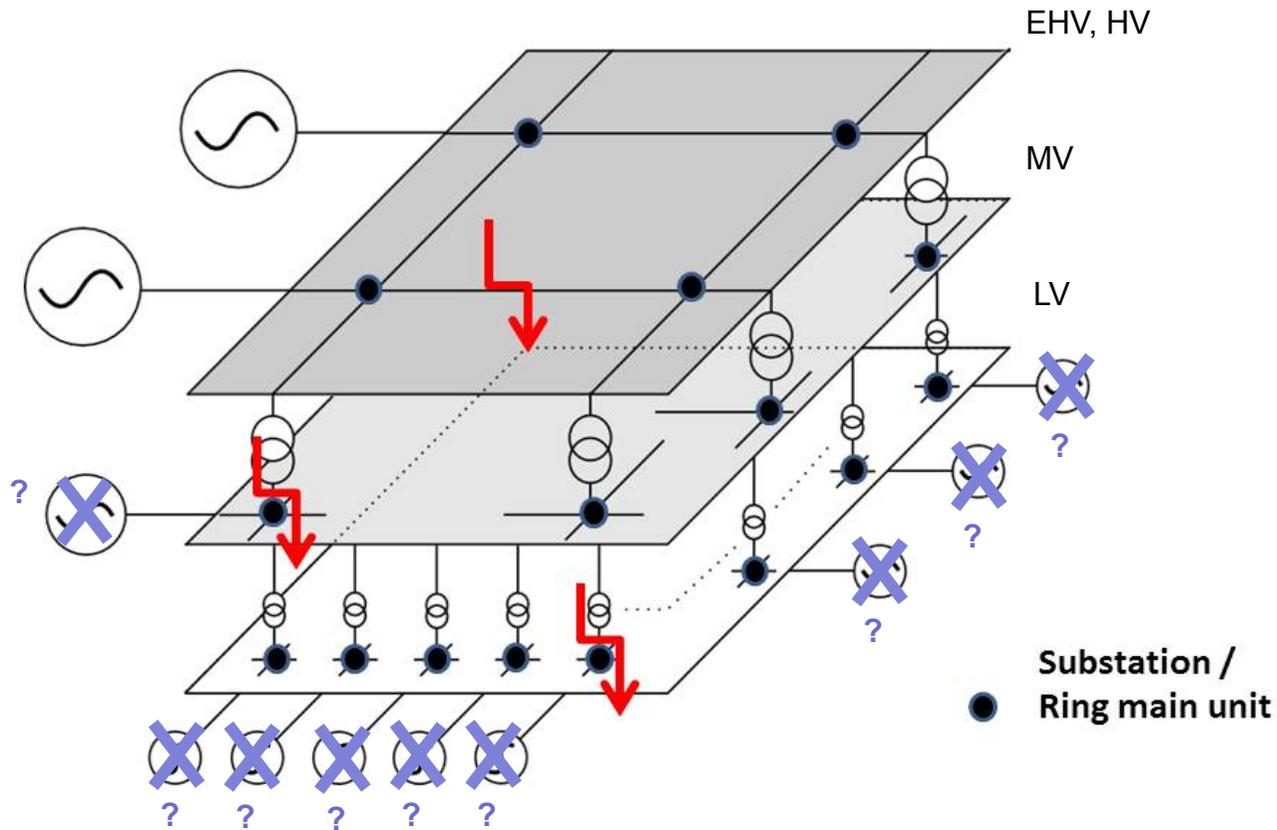
# Kurzschluss-Ströme

$$S_{kk}^* = \sqrt{3} * U_N * I_{kk}$$

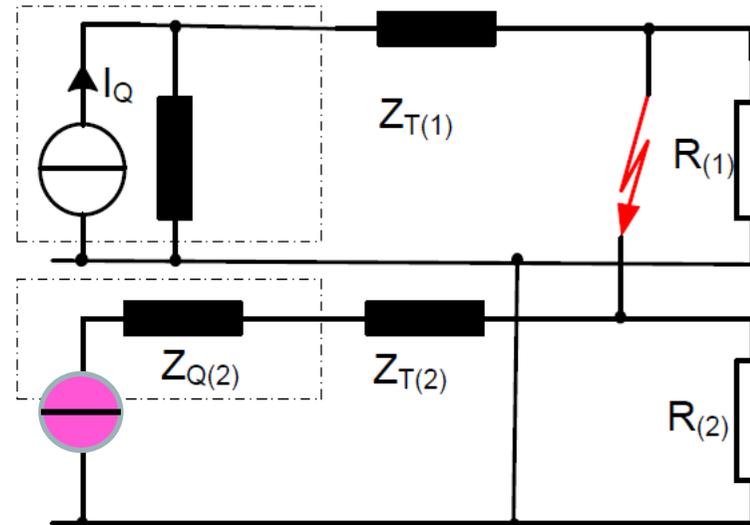
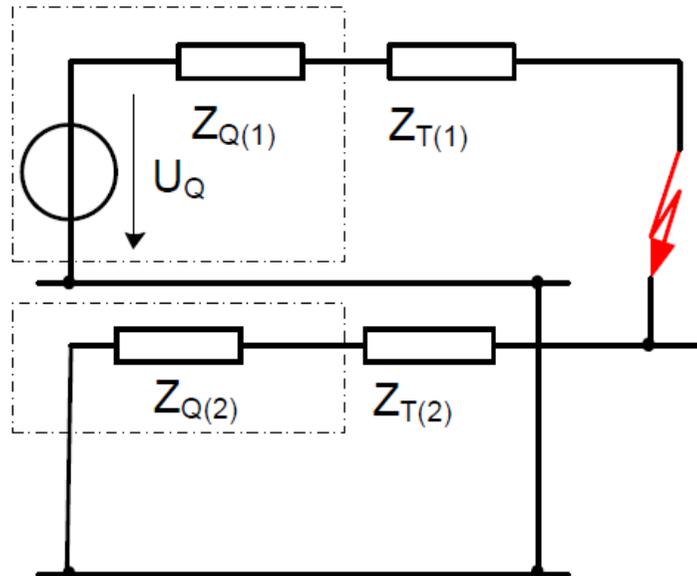
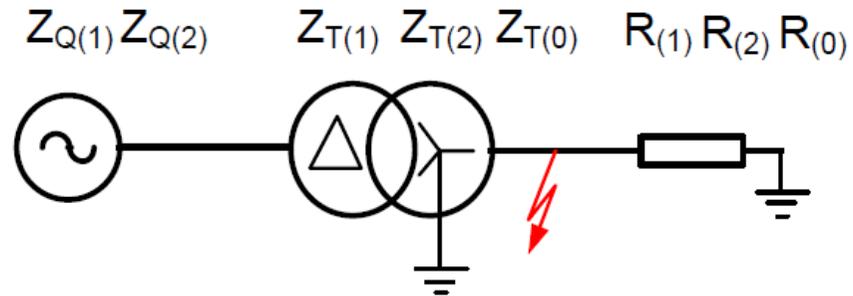
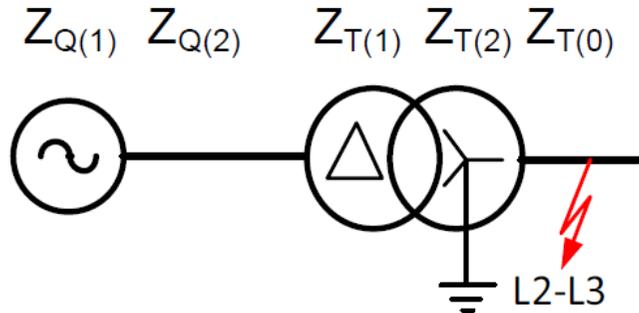
$$Z_{kk}^* = U_N / S_{kk}^*$$

$$I^* = (1,1) * U / Z_{kk}^* = ??$$

# Das elektrische System – Netzfehler

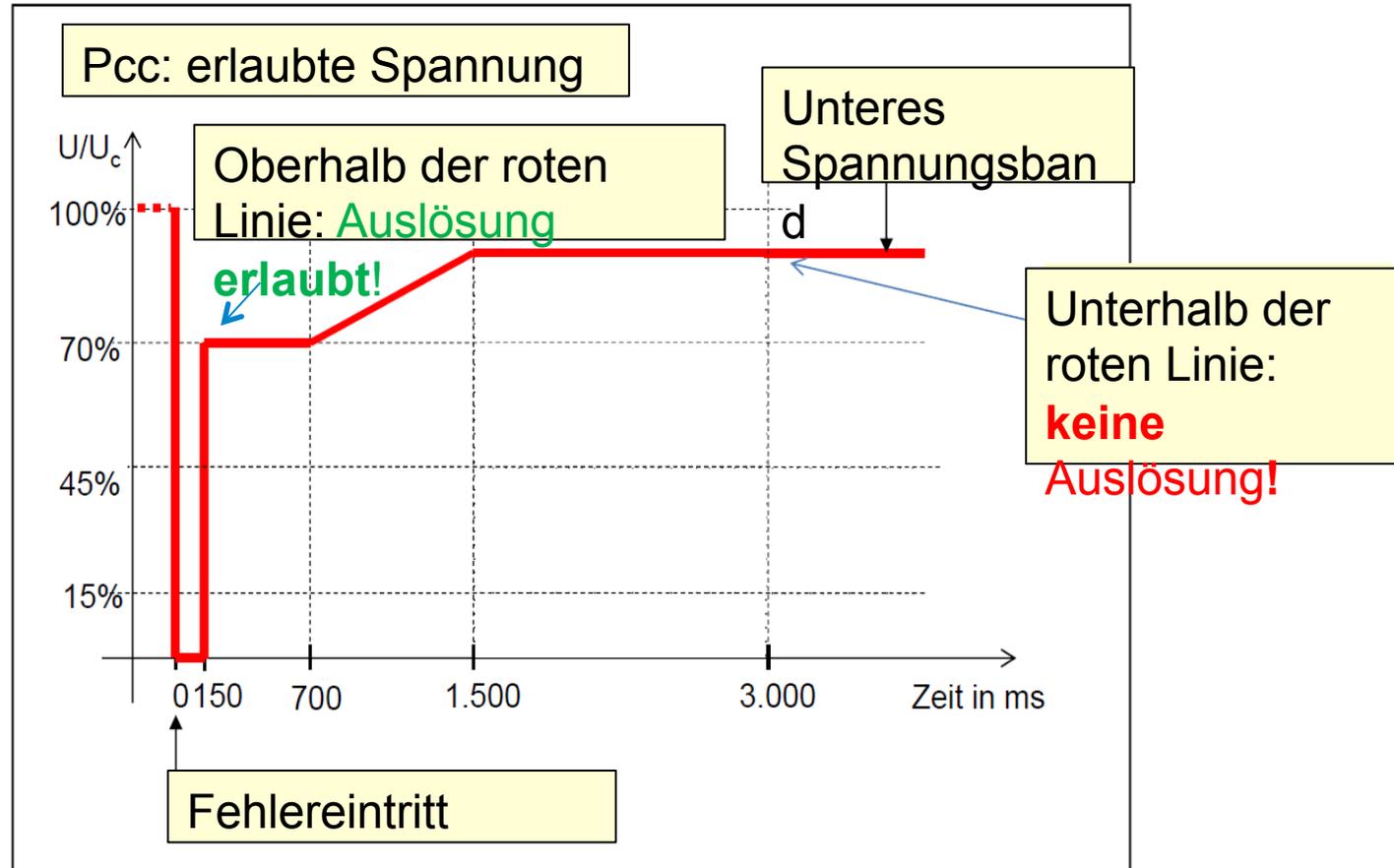


# Das elektrische System – Netzfehler mit Stromquellen



Quelle: H. Kühn, Tennet

# LVRT – Grundanforderungen



**Rückwirkung ← Spannungsstützung ← (Blind-)Stromeinspeisung !!  
Modelle ?!**



# Wechselseitige Einflussnahmen und Kritikalität



## Zusammenfassung

**Es geht nichts über ein**

**über ein solide konstruiertes Netz [K. Cermak]**

# Einfluss-Matrix

Wirkung von	Wirkung auf					A (Aktivsumme)	Q=A/PS (Aktivität)	P=A*PS (Kritikalität)
	V	A	s	€	§			
V	X	1	0	1	0	2	0,3	14
A	2	X	1	3	0	6	1	36
s	1	1	X	2	0	4	0,8	20
€	2	2	2	X	1	7	0,77	63
§	2	2	2	3	X	9	9	9
PS (Passivsumme)	7	6	5	9	1			

**Hohe Aktivität → als Steuerelement geeignet**

**Hohe Kritikalität → starke Auswirkung auf System**



## Zusammenfassung

**Es geht nichts über ein**

über ein solide konstruiertes Netz [K. Cermak]

**solide konstruiertes Energiesystem [V, A, s, € §]**



# Das elektrische Energiesystem im Spannungsfeld zwischen Technik und Markt

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Lothar Fickert

**Institut für Elektrische Anlagen  
Technische Universität Graz**