Rekapitulation Maxwellgleichungen

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{j} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$$

Lorenz-Kraft: $\vec{F} = q \left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} \right)$

+ Newtonsches Gesetz + Gravitation

⇨ <u>Gesamte klassische Physik</u>

Rekapitulation Maxwellgleichungen

in der Materie

$$\boxed{\begin{aligned} \nabla \cdot \vec{D} &= \rho_{\mathrm{frei}} \\ \nabla \cdot \vec{B} &= 0 \\ \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{H} &= \vec{j}_{\mathrm{frei}} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \end{aligned}}$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$$

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu_0}\vec{B} - \vec{M}$$

Ch. 5 Wechselstrom & elektrotechnische Anwendungen

- **Wechselstrom, komplexe Darstellung**
- **Einfache Schaltelemente**
- **Leistung des Wechselstromes**
- **Beispiele:**
  - **R-C Schaltkreise und Filter**
  - **Gleichrichter**
- **Transformator**
- **Überlandleitung und Hausleitungsnetz**
- **Drehstrommotor, Tesla-trafo**

Komplexe Zahlen

$i^2 = -1$

$$\hat{Z} = A\cdot e^{i\varphi} = A\cdot \cos\varphi + i\cdot A \sin\varphi$$

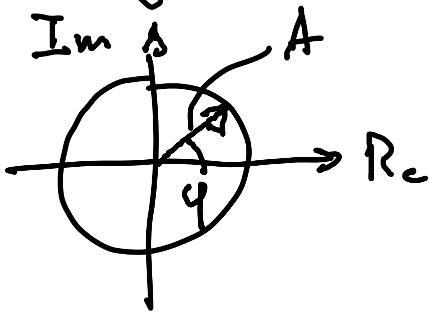
(Amplitude) Betrag A

Phase $\varphi = \varphi(t) = \omega\cdot t + \varphi_0$

Def:

$$\hat{U} := U_0\cdot e^{i\omega t} = U_0\cdot \cos(\omega t) + U_0\cdot i\cdot \sin(\omega t)\,,\quad \varphi_0 = 0$$

Zeigerdiagram

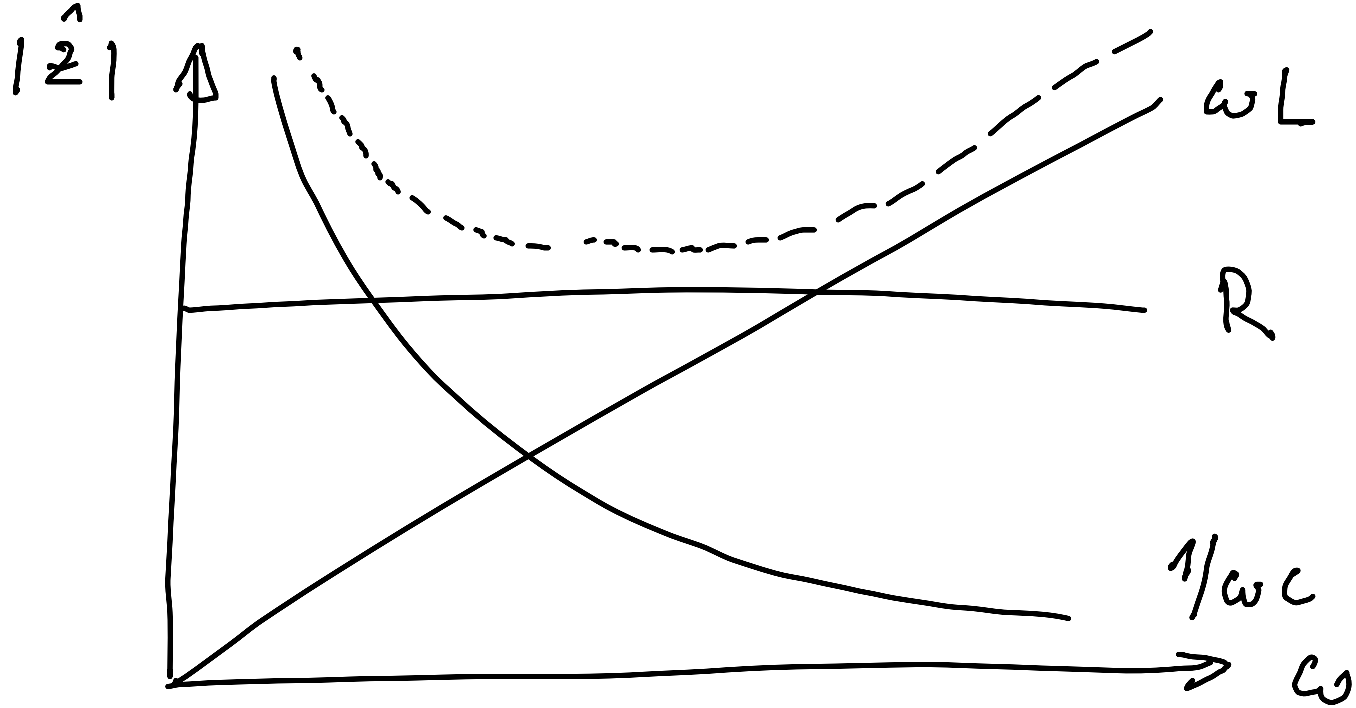


Reale $U(t) = Re(\hat{U}) = U_0 \cdot \cos(\omega t)$

Frequenzabhängigkeit

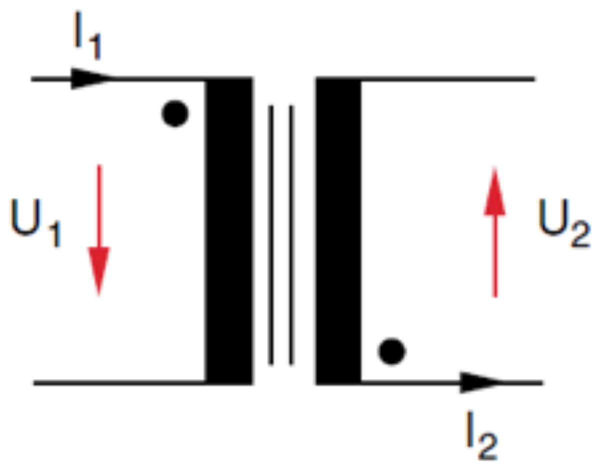
$\hat{Z}_R = R, \quad \hat{Z}_L = i\omega L,$

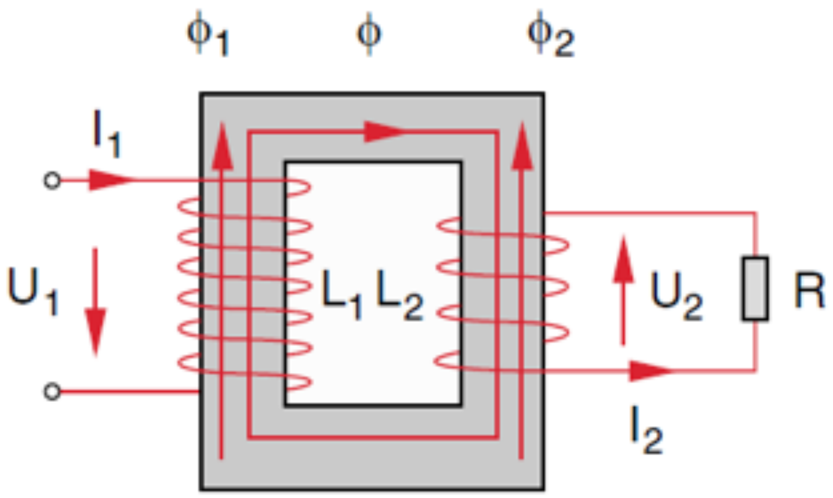
$\hat{Z}_C = \dfrac{1}{i\omega C}$



$\omega \to 0$ $\quad Z_C \to \infty$	$\omega \to \infty$ $\quad Z_C \to 0$
$Z_L \to 0$	$Z_L \to \infty$

Transformator



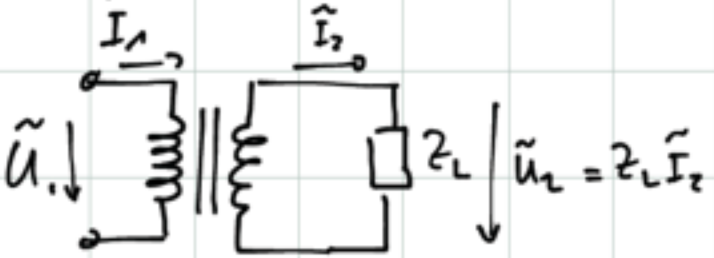


Spannung und Strom am Ausgang (Betrag)

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} \qquad \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2}$$

Belasteter Transformator

c.) Mit Last Z_L („reale Situation“)



wie vorher:

$$\tilde{U}_1 = L_1 i\omega \tilde{I}_1 + M i\omega \tilde{I}_2 \qquad (1)$$

$$\tilde{U}_2 = -L_2 i\omega \tilde{I}_2 - M i\omega \tilde{I}_1 = Z_L \tilde{I}_2 \qquad (2)$$

$$(2) \rightarrow \frac{\tilde{I}_2}{\tilde{I}_1} = \frac{-i\omega M}{i\omega L_2 + Z_L}$$

$$\frac{(2)}{(1)} \longrightarrow \underline{\underline{\frac{\tilde{U}_2}{\tilde{U}_1}}} = \frac{Z_L I_2}{L_1 i\omega I_1 + M i\omega I_2} = \frac{Z_L}{L_1 i\omega \,(i\omega L_2 + Z_L)/_{-i\omega M} + i\omega M}$$

$$= \frac{-i\omega M Z_L}{-L_1 L_2 \omega^2 + i\omega Z_L L_1 + M\omega^2} = \frac{-i\omega M Z_L}{i\omega Z_L L_1 + \omega^2 (M^2 - L_1 L_2)}$$

$$\kappa = 1 \quad \overset{?}{=} \frac{-M}{L_1} = -\sqrt{\frac{L_2}{L_1}} = \underline{\underline{\frac{-N_2}{N_1}}}$$

unabh. von Last nur für k=1!

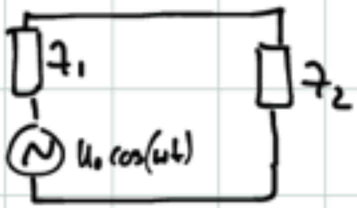
Energie-erhaltung: $\tilde{U}_1 \tilde{I}_1 = \tilde{U}_2 \tilde{I}_2 \longrightarrow \underline{\frac{\tilde{I}_1}{\tilde{I}_2} = \frac{-N_2}{N_1}}$

$$\underline{\underline{\frac{U_1}{I_1}}} = \frac{N_1/N_2 \; U_2}{N_2/N_1 \; I_2} = \underline{\underline{\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 Z_L}}$$

Impedanz Anpassung

Reale Quellen haben stets eine interne "Eigen-impedanz".

Q: Welches ist die optimale Eigen-impedanz Z_1 um eine Last mit Impedanz Z_2 zu treiben?



$$Z_i = R_i + i\left(\omega L_i - \frac{1}{\omega C_i}\right) \quad ; \quad Z_{tot} = Z_1 + Z_2$$

- eff. Strom durch System: $I_{eff} = U_{eff}/Z_{tot}$
- In Z_2 dissipierte Leistung: $\overline{P}_{el} = I_{eff}^2 R_2 = \frac{U_{eff}^2}{|Z|^2}\cdot R_2$

$$= \frac{U_{eff}^2 \cdot R_2}{(R_1+R_2)^2 + \underbrace{\left[\omega(L_1+L_2) - \frac{1}{\omega}\left(\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}\right)\right]^2}_{(*)}}$$

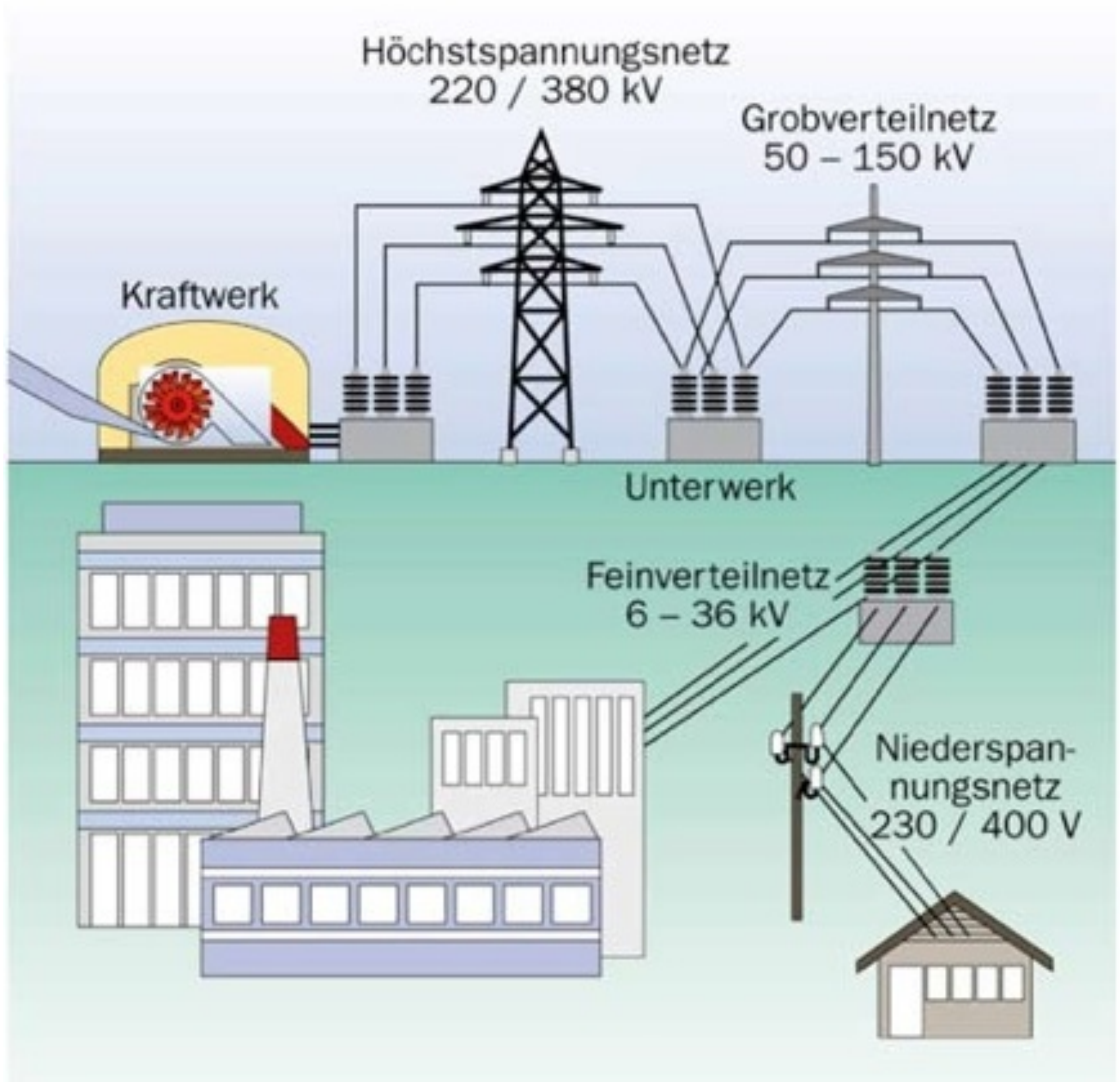
$\Rightarrow \overline{P}_{el}$ maximal wenn $(*) = 0$

Dann: $\overline{P}_{el} = \frac{U_{eff}^2 R_2}{(R_1+R_2)^2} \longrightarrow \frac{d\overline{P}_{el}}{dR_2} = U_{eff} \frac{(R_1+R_2)^2 - 2R_2(R_1+R_2)}{(R_1+R_2)^4} \overset{!}{=} 0$

$$\rightarrow R_1^2 + \cancel{2R_1R_2} + R_2^2 - \cancel{2R_1R_2} - 2R_2^2 = R_1^2 - R_2^2 \overset{!}{=} 0 \Rightarrow \underline{\underline{R_1 = R_2}}$$

$\Rightarrow$ Maximale Leistungsübertragung von Quelle zu Verbraucher für $\boxed{Z_1 = Z_2}$

Spannungsnetz

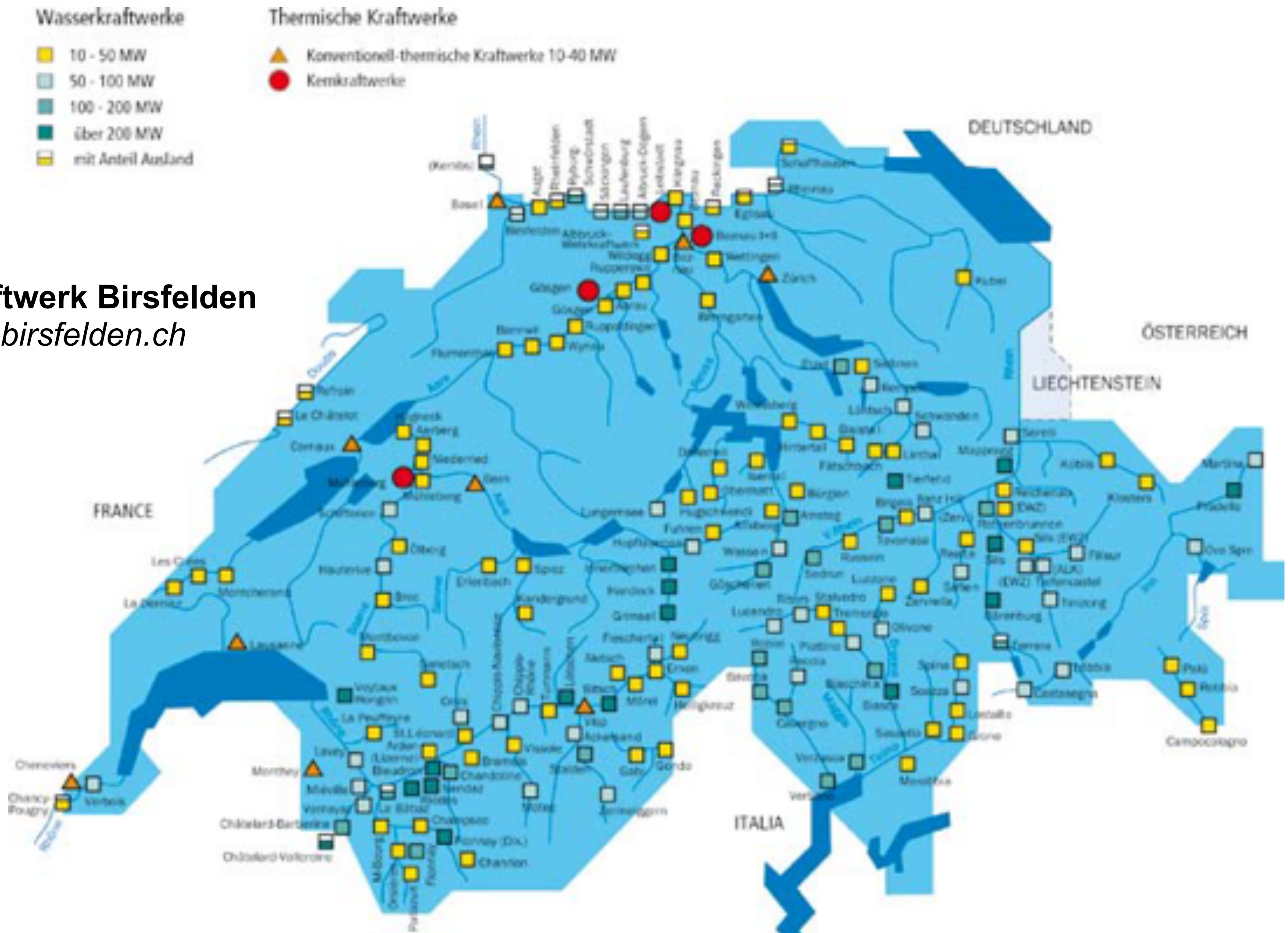


strom.ch

Schweizer Kraftwerke

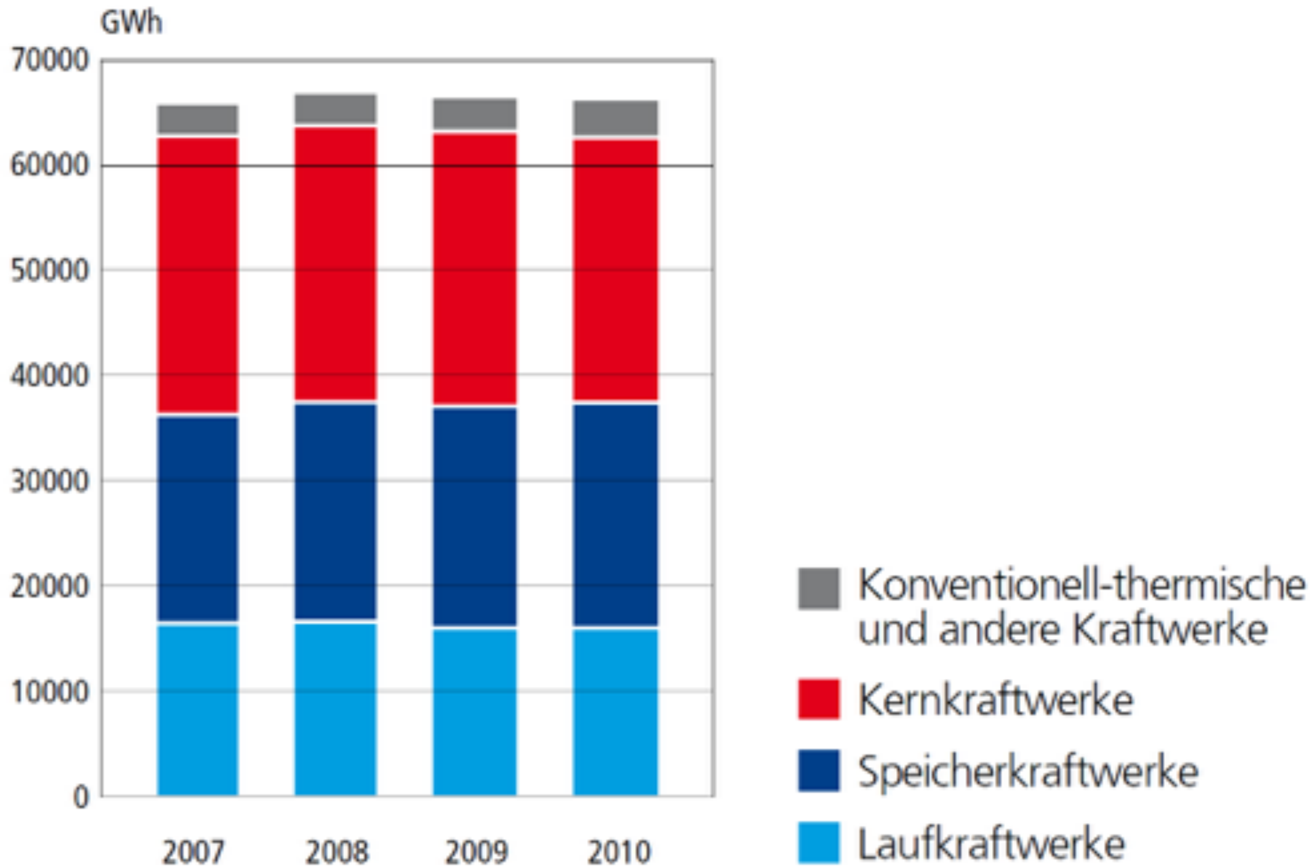
Mit Leistung > 10 Megawatt (MW)

z.B: **Kraftwerk Birsfelden**
www.kw-birsfelden.ch



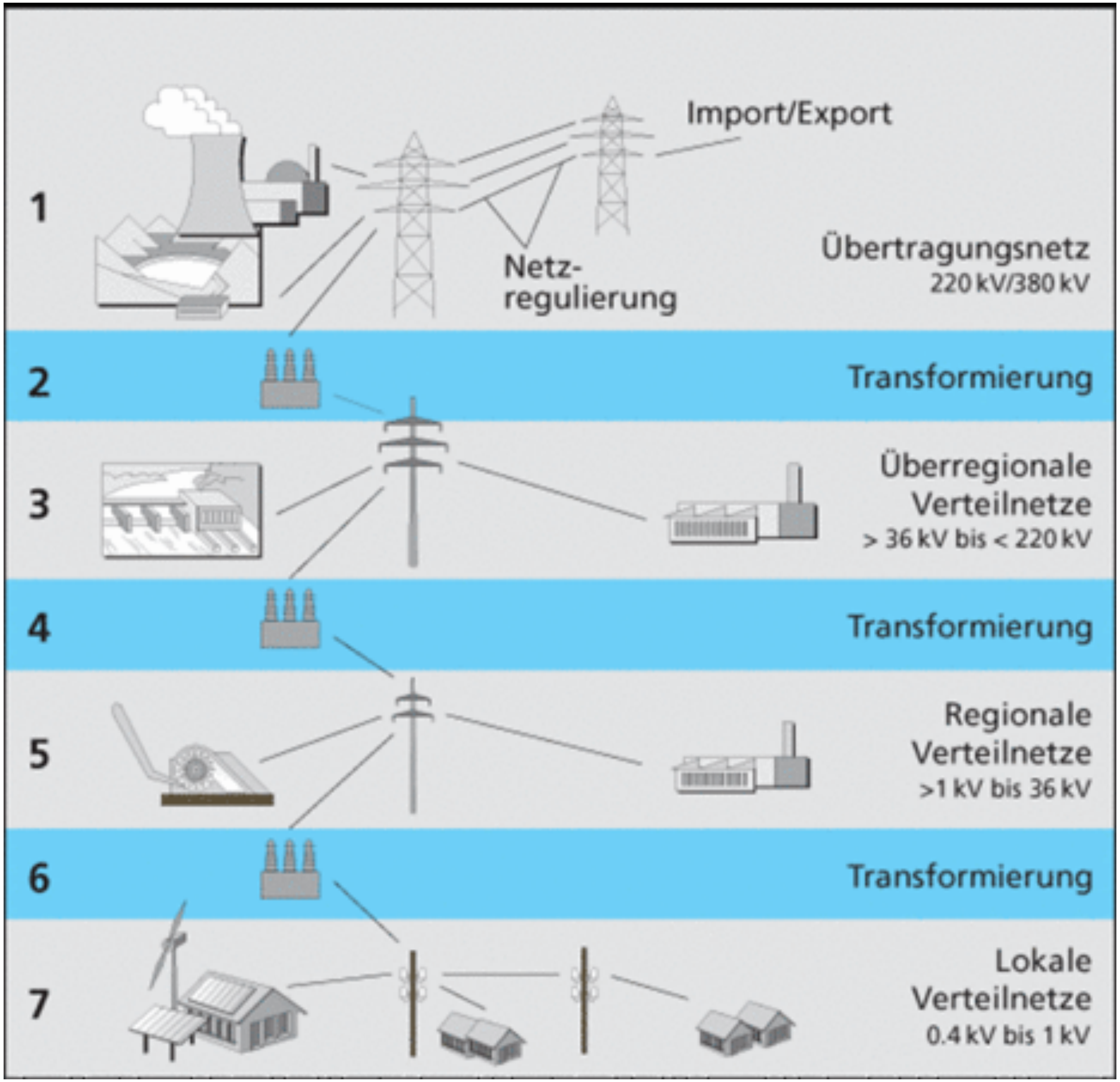
strom.ch

Schweizer Stromproduktion
nach Kraftwerkstypen (2007-2010)



strom.ch

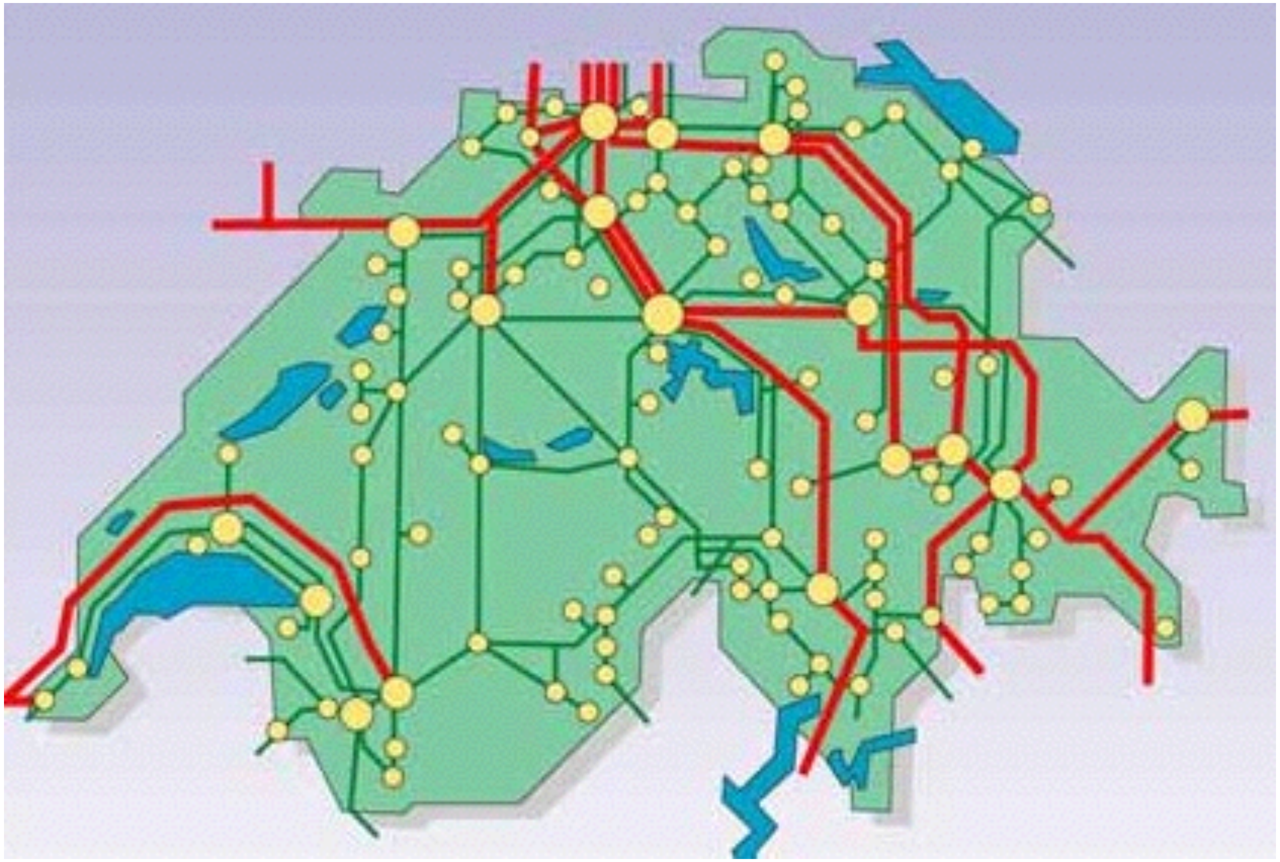
Spannungsnetz



strom.ch

Spannungsnetz

Höchstspannungsnetz 7000 km
International: 220kV / 380kV

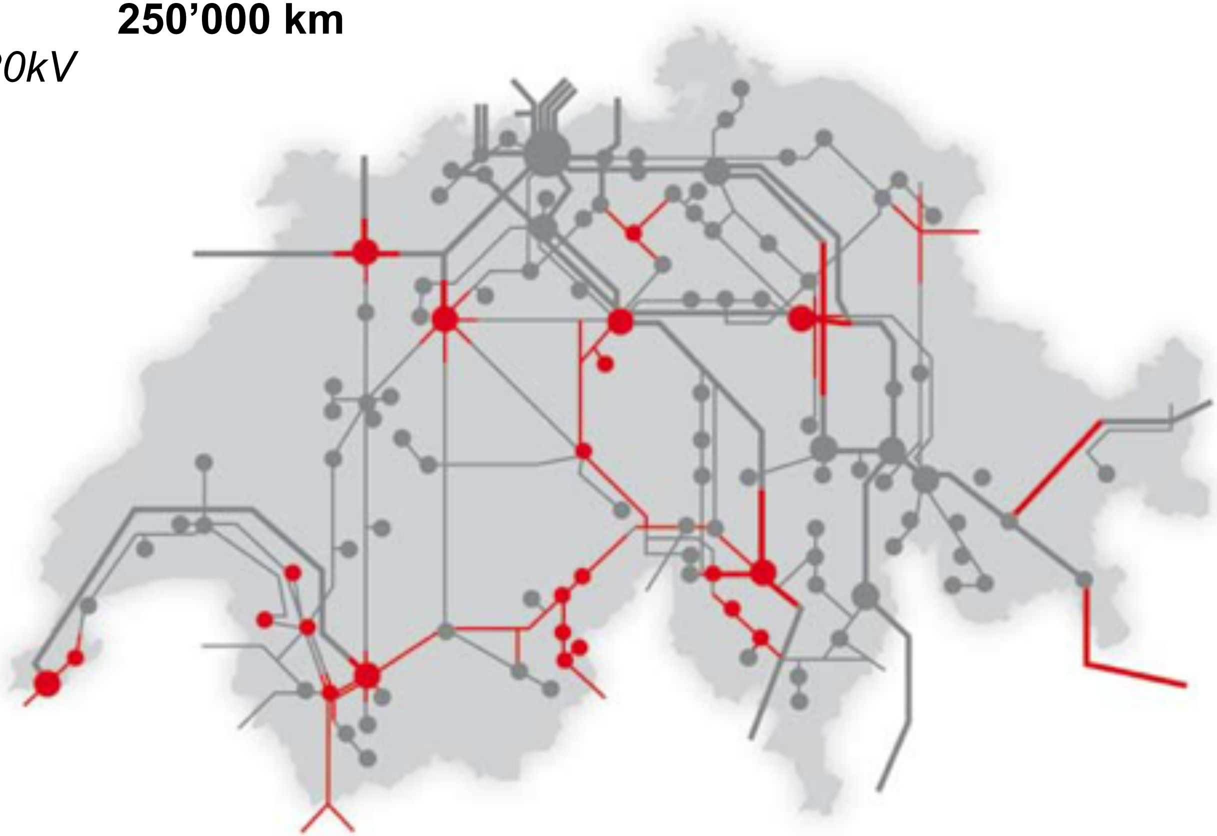


IWB.ch / strom.ch

Spannungsnetz

Höchstspannungsnetz **7000 km**
International: 220kV / 380kV

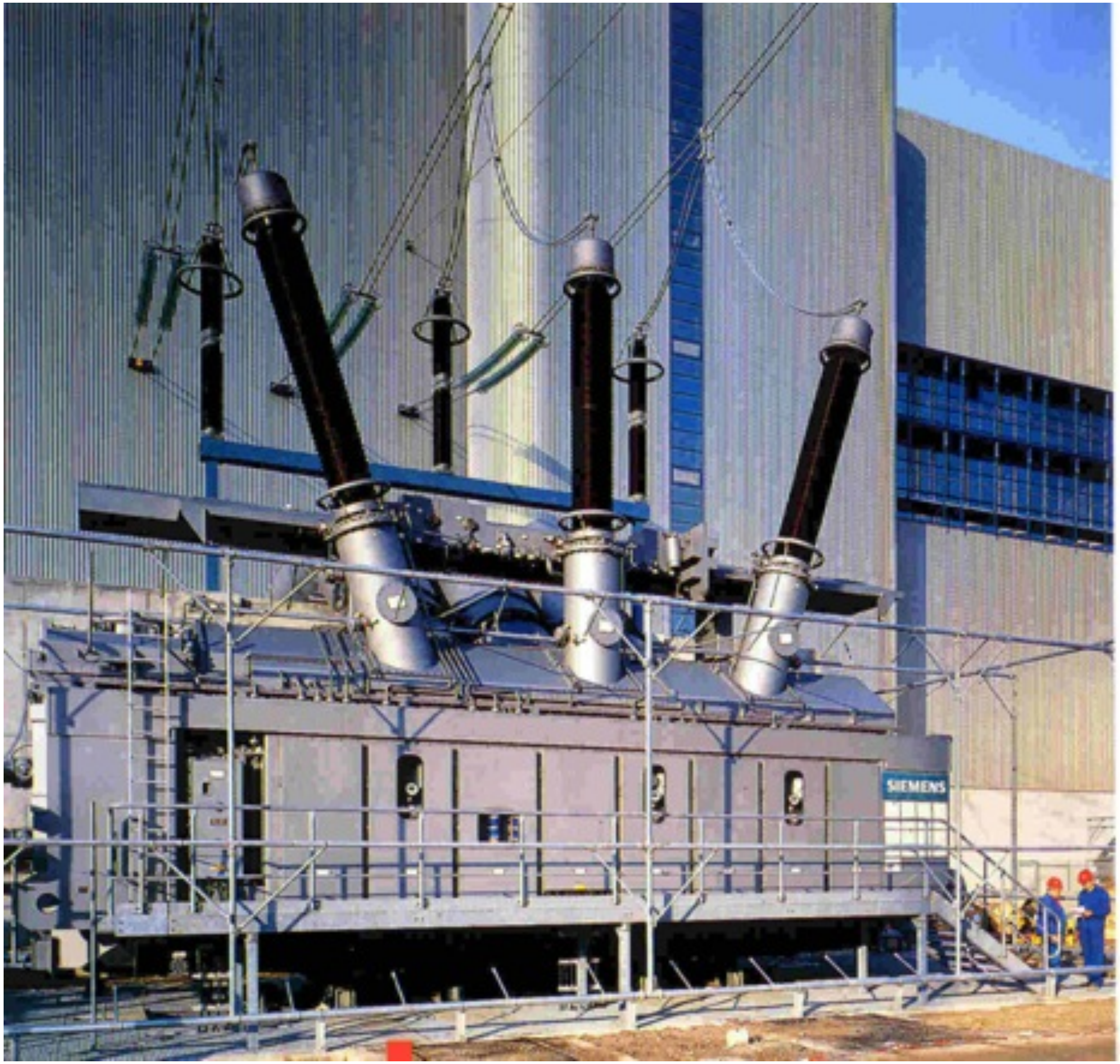
Verteilnetze **250’000 km**
Überregional: 36kV – 220kV
Regional: 1kV – 36kV
Lokal: 0.4kV – 1kV



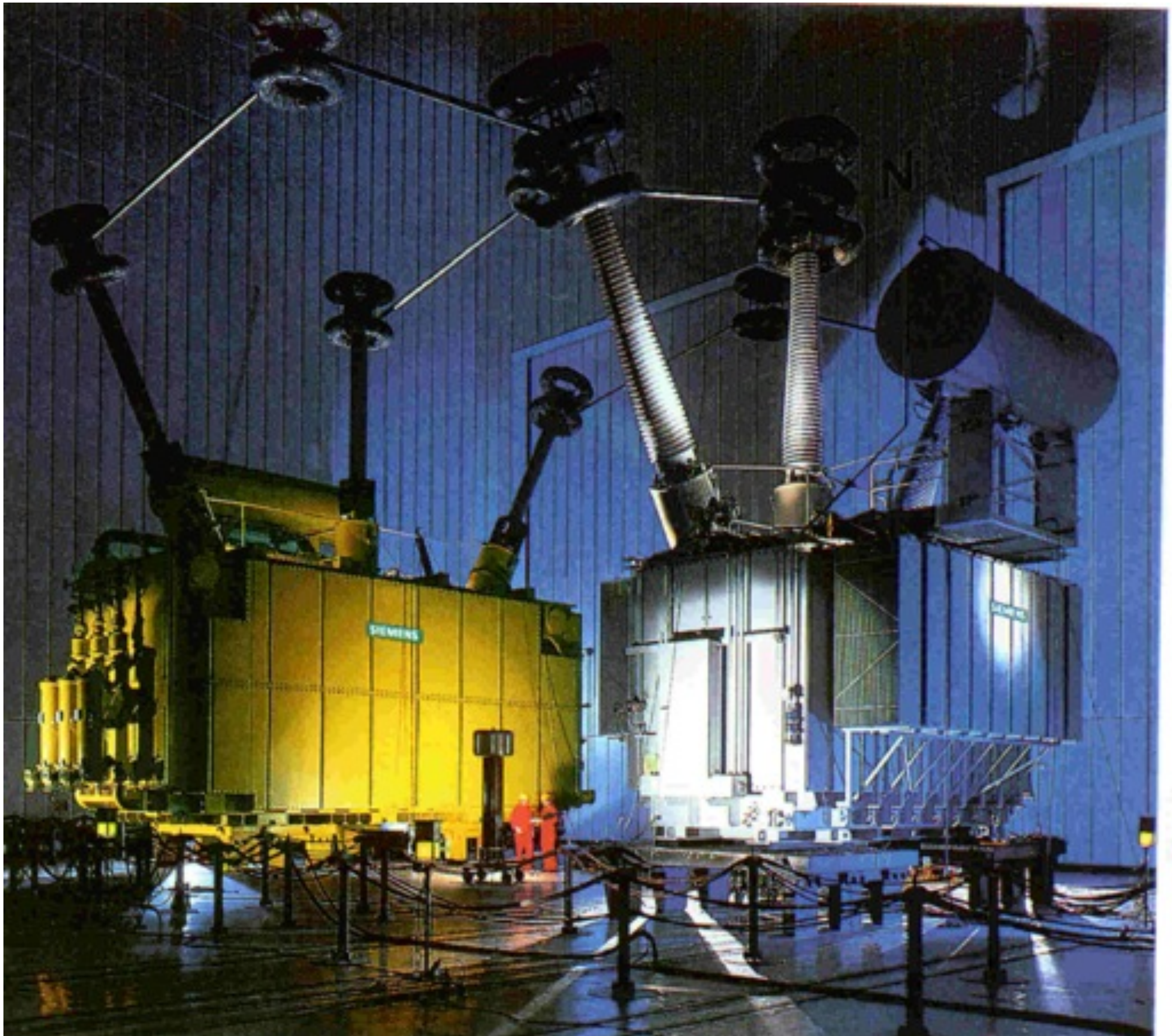
Rot: Netzengpässe

strom.ch

Transformator



Transformator



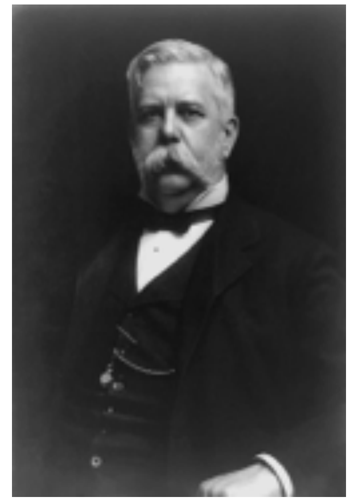
AC vs. DC - “The war of currents”

Thomas Edison, “DC”

- lange Zeit standard in USA
- Kompatibilität mit Glühlampen und Motoren (keine AC Motoren zu dieser Zeit!)
- Verbraucher erhält Spannung die er braucht

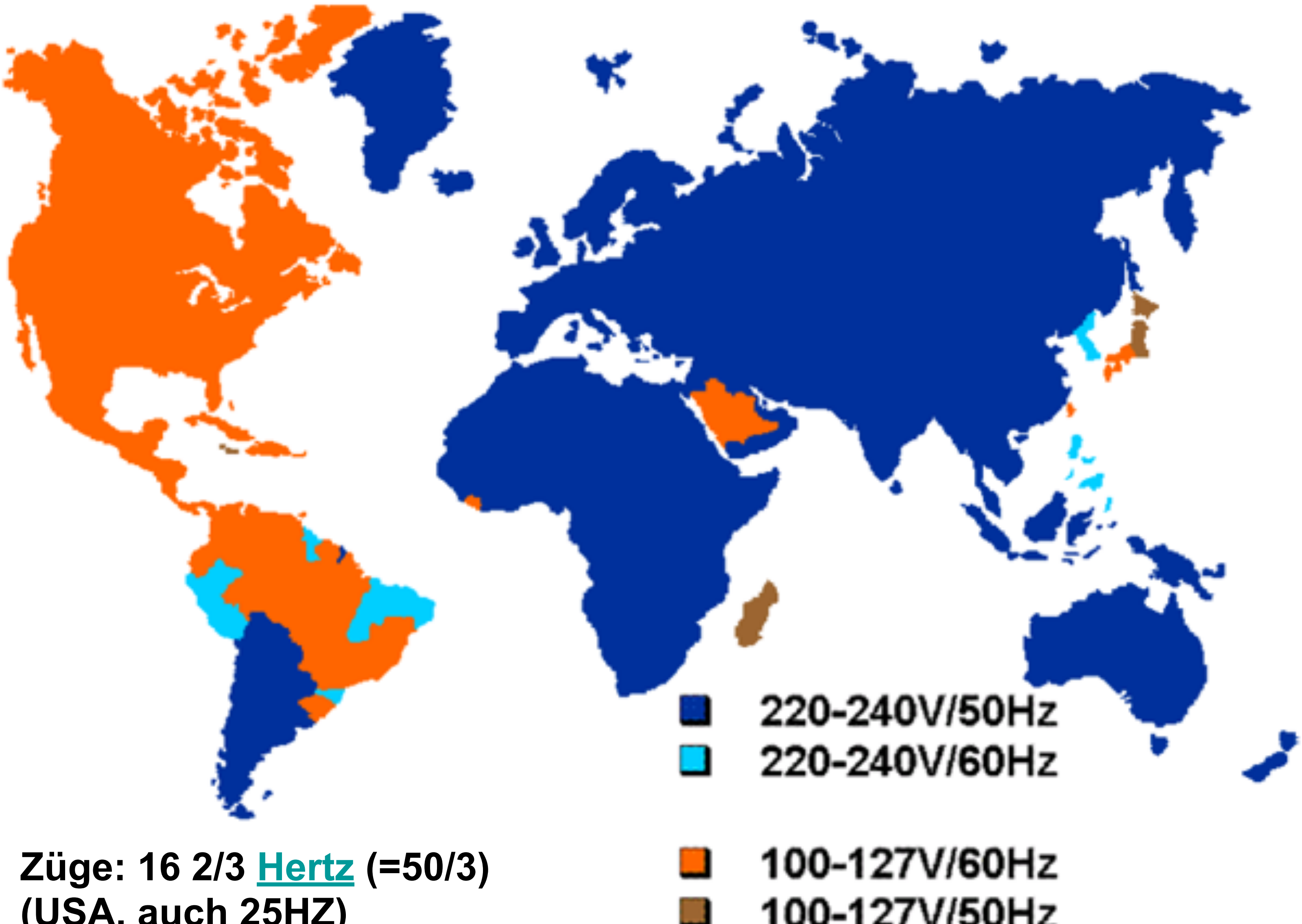
- Distanz Kraftwerk<->Verbraucher <2km

George Westinghouse and Nikola Tesla, “AC”



- Einfache Stannungs-Transformation
- Verlustarme Energieübertragung

Quelle: wikipedia



Züge: 16 2/3 Hertz (=50/3)
(USA, auch 25HZ)

Dreiphasenstrom - Drehstrom

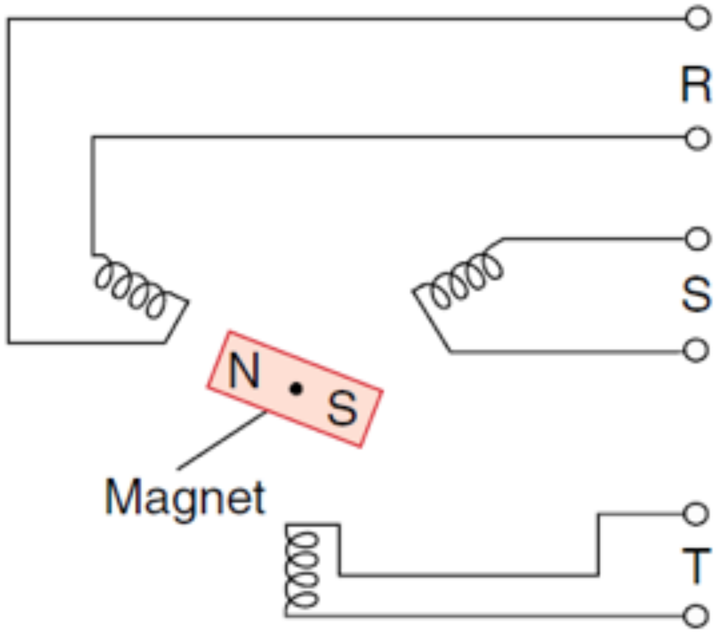


Abb. 5.19. Demonstration des magnetischen Drehfeldes des Drehstroms

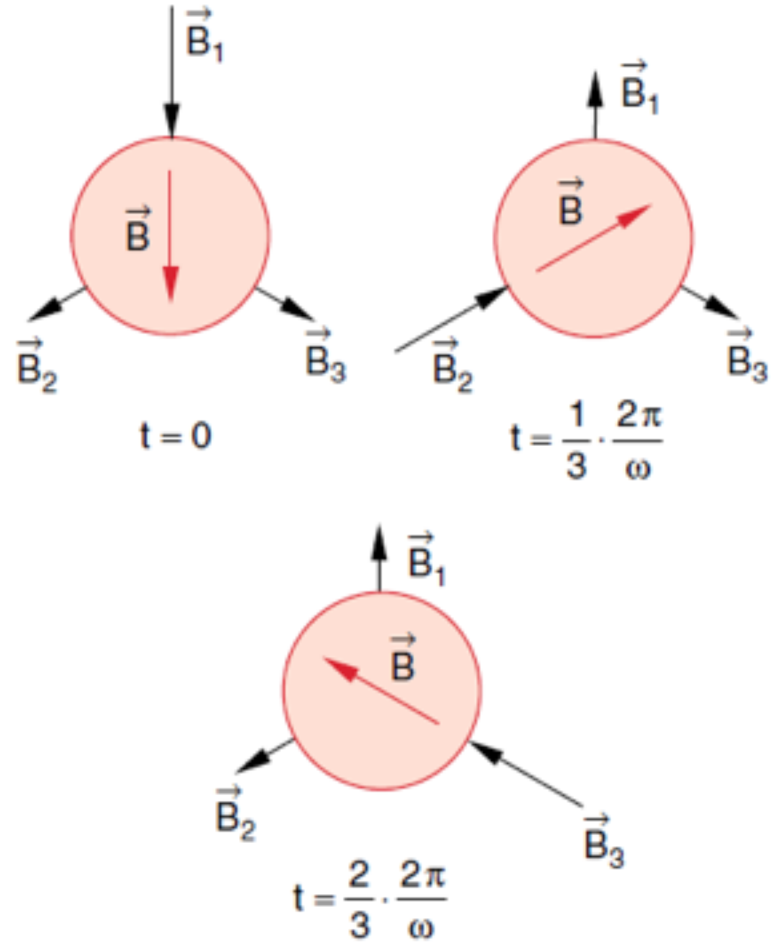
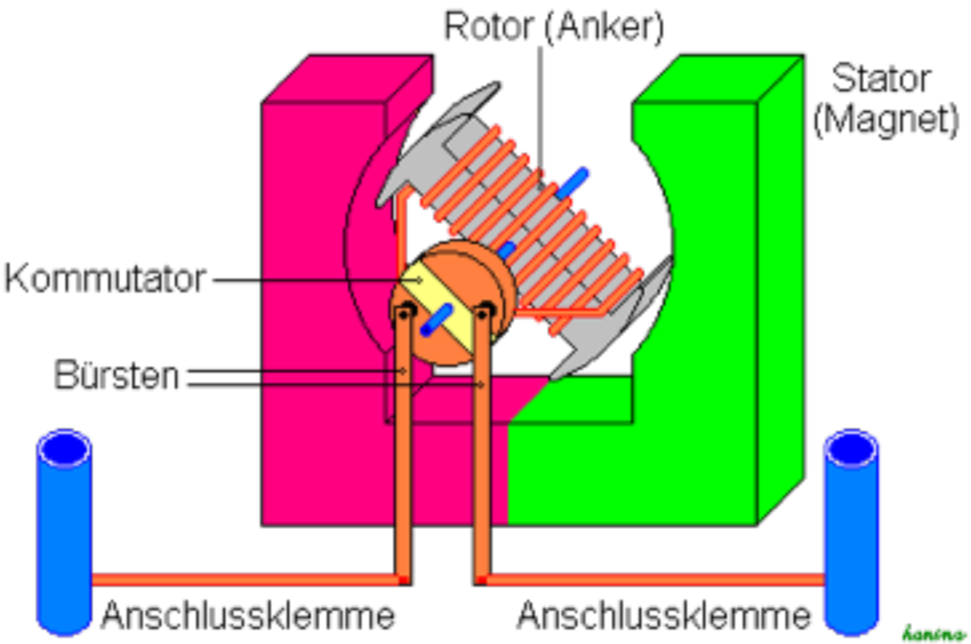
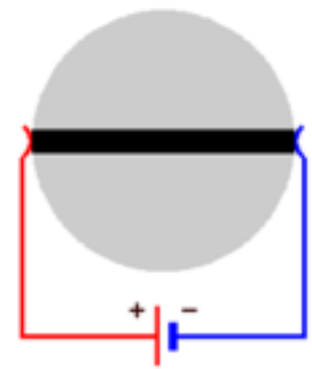


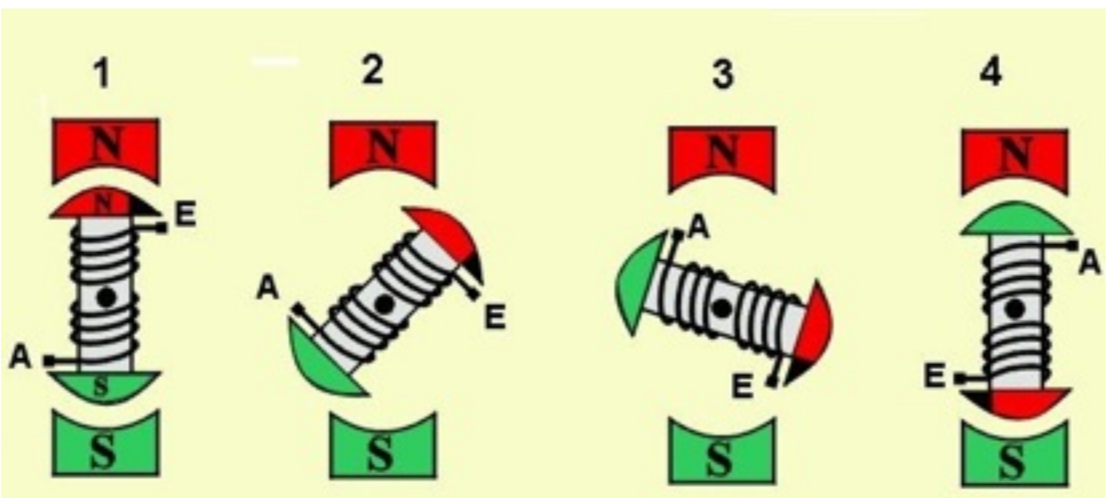
Abb. 5.20. Vektoraddition der Magnetfelder in den drei Spulen des Magnetfeldes

Elektromotor



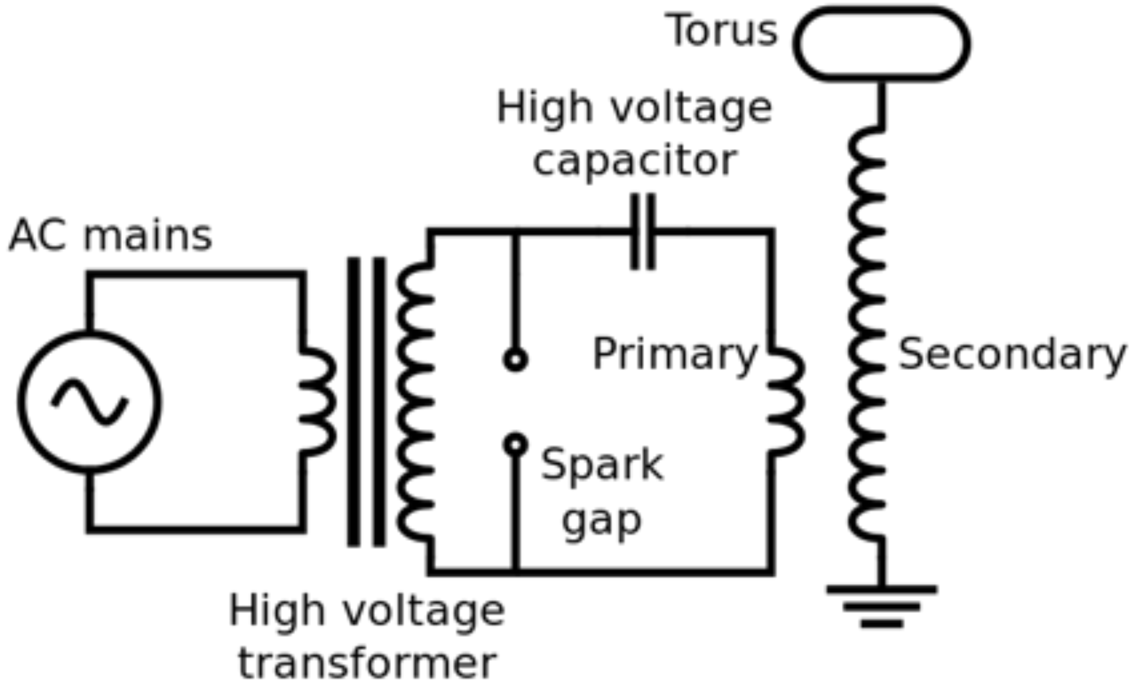
Kommutator: Polwender



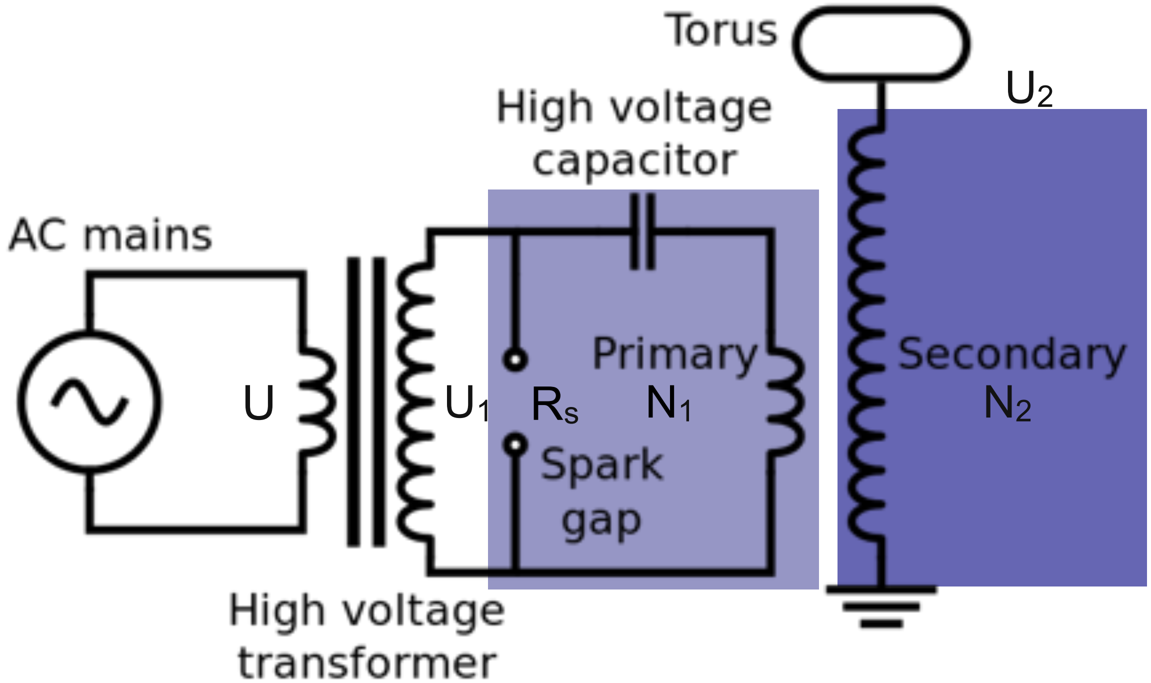


http://44428.nibis.de/physik/elektromotor/elektromotor.php

Teslatrafo


Torus
High voltage capacitor
AC mains
Primary
Secondary
Spark gap
High voltage transformer

Teslatrafo



1. Netzspannung U (50Hz) transformiert zu U_1 (~10keV)
2. Kondensator lädt sich auf (in t~1/50Hz=20ms)
3. Sobald U_1 gross genug: Durchschlag auf “Spark gap” -> R_s=0
4. Primäroszillator schwingt gedämpft ($\omega_1=1/(L_1C_1)^{½}$~100kHz)
5. Induzierte Spannung in Sekundäroszillator ($\omega_2=1/(L_2C_2)^{½}\sim\omega_1$): $U_2= U_1*N_2/N_1$ ~ 100-1000kV
6. Sobald Schwingung ausgeklungen: Funken erlischt. Neustart bei 1.

Teslatrafo

Teslatrafo

"Transienter" Spannungspuls gemessen an Spitze des Tesla-Trafos

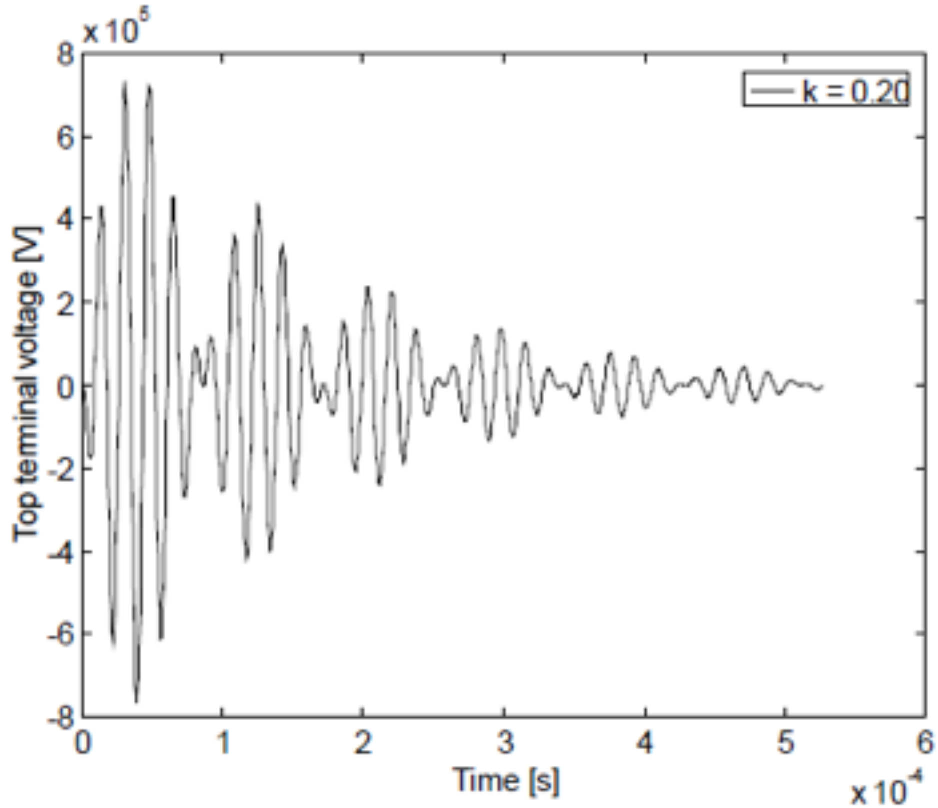
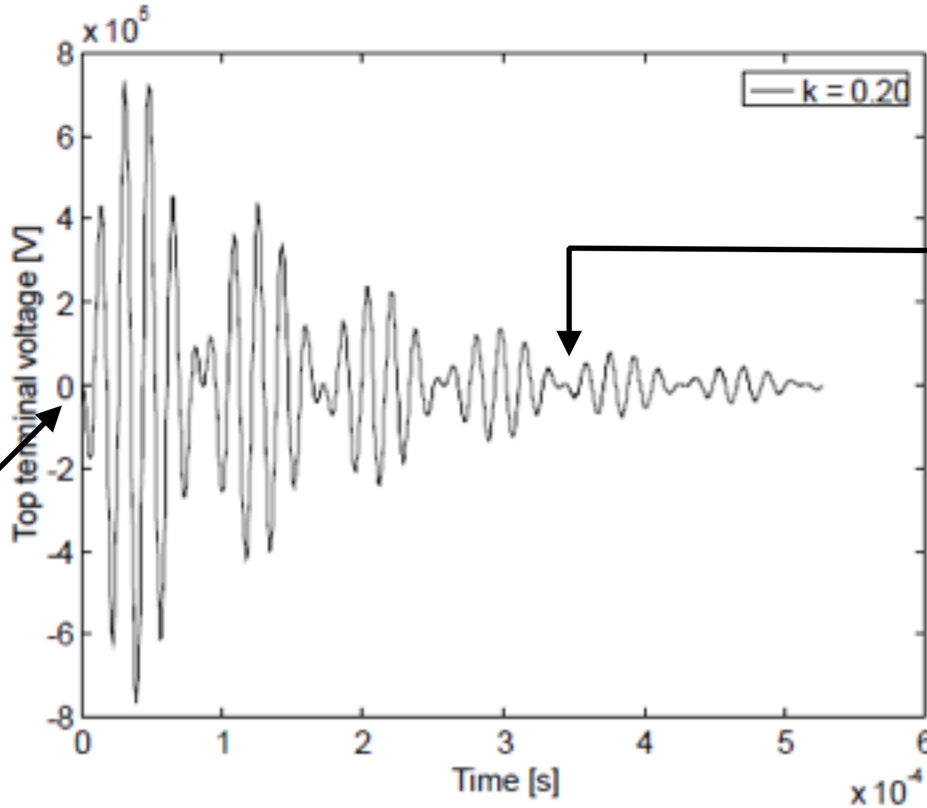


Figure 7: Top terminal voltage for a single spark gap pulse.

M.Denicolai PhD Thesis, 2001

Teslatrafo

“Transienter” Spannungspuls gemessen an Spitze des Tesla-Trafos

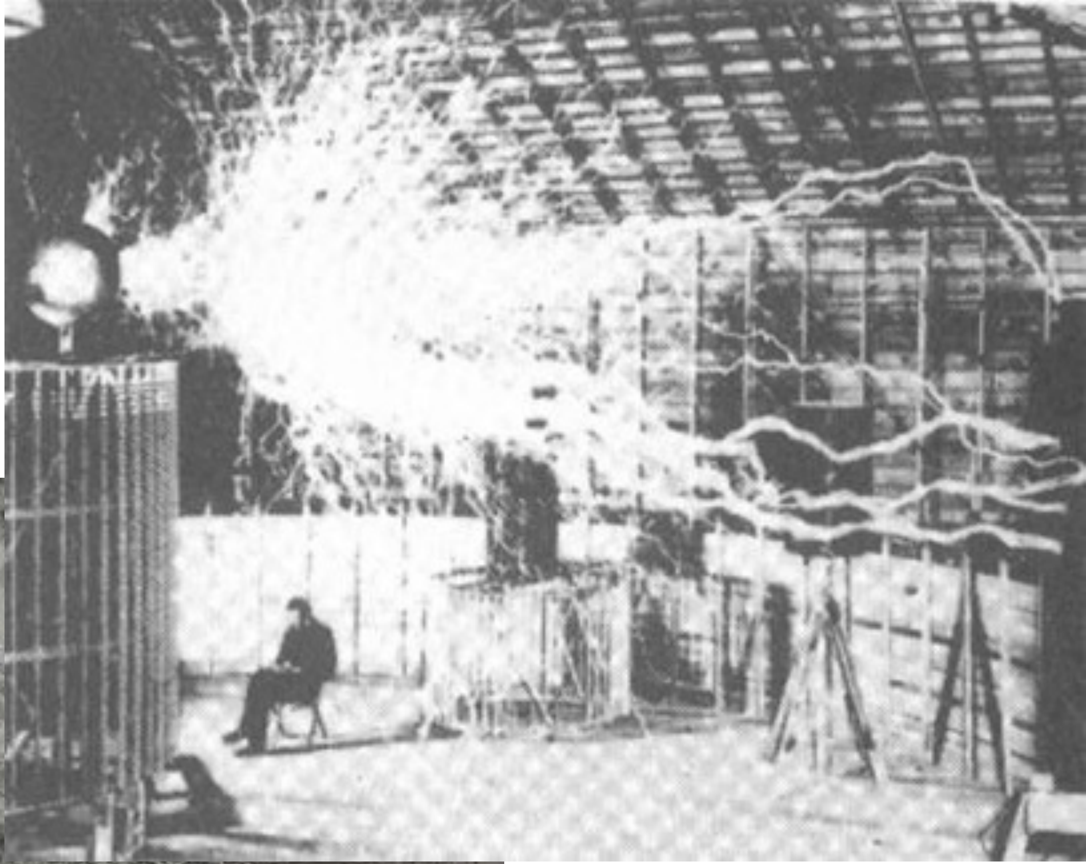


Schwebung: Kopplung von Primär- und Sekundärkreislauf

t=0: Funkenstrecke schliesst

Figure 7: Top terminal voltage for a single spark gap pulse.

M.Denicolai PhD Thesis, 2001



Nikola Tesla

Bemerkung: Es gibt Gerüchte, dies seien Doppelbelichtungen…

http://www.tesladownunder.com/

http://www.tesladownunder.com/

RLC Schwingkreis

$$\hat{U}_L = \hat{Z}_L \cdot \hat{I} \quad , \quad \text{mit} \quad Q = \omega_0 \cdot \frac{L}{R}$$

$$\hat{U}_L(\omega = \omega_0) = i \cdot \hat{U} \cdot Q$$

$$\hat{U}_C(\omega = \omega_0) = -i \cdot \hat{U} \cdot Q$$

Zeitabhängigkeit RLC Serienschaltung

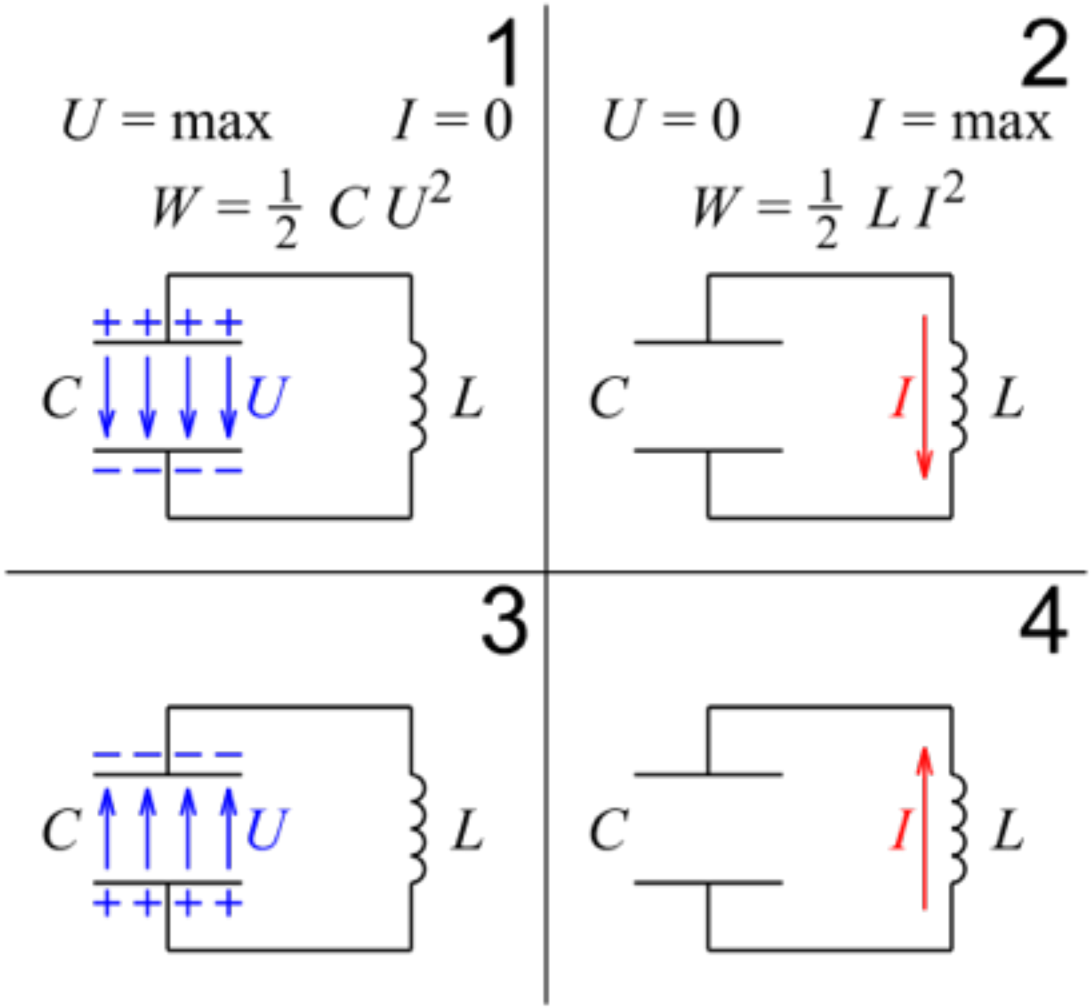
$$U_0 \cdot \cos(\omega t) - R \cdot I - L \cdot \frac{dI}{dt} - \frac{q}{C} = 0$$

$$I = \frac{dq}{dt} \,, \quad \dot{q} = \frac{dq}{dt} \,, \quad \dot{q} = \frac{d^2 q}{dt^2}$$

$$L \cdot \ddot{q} + R \cdot \dot{q} + \frac{q}{C} = U_0 \cdot \cos(\omega t)$$

$$\boxed{\ddot{q} + \frac{R}{L} \cdot \dot{q} + \frac{q}{LC} = U_0 \cdot \cos(\omega t)}$$

LC Schwingkreis



wiki