

Wiederholung vom 12.06.2018

Elektromagnetische Felder

Magnetodynamik - **Induktion**

Faradaysches Induktionsgesetz: $U_{ind} = -\frac{d}{dt} \phi_{mag}$
 $rot \vec{E} = -\frac{d}{dt} \vec{B}$

Beispiel: Wechselspannungsgenerator

Lenzscher Regel $\vec{B}_{ind} \Leftrightarrow -\frac{d}{dt} \phi_{mag}$

Beispiel: Wirbelstrombremse

Selbstinduktion: **Induktivität** L (einer Spule)

$$U_{ind} = -L \frac{dI}{dt}$$

Themen heute (Teil 1)

Selbstinduktion

Beispiel: Induktivität einer Spule mit N Windungen

Gegenseitige Induktion und Transformatoren

Energiedichte des magnetischen Feldes

zeitabhängiges elektrisches Feld: **Verschiebungsstrom**

Allgemeine Form der Maxwellgleichungen

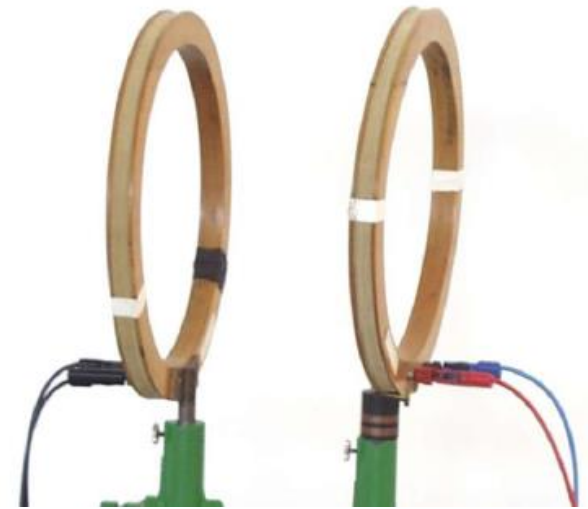
5. Elektromagnetische Felder

gegenseitige Induktion

gegenseitig Induktion zweier Spulen

Stromänderung I_1 in Spule 1

⇒ Induktionsspannung U_{ind} in Spule 2

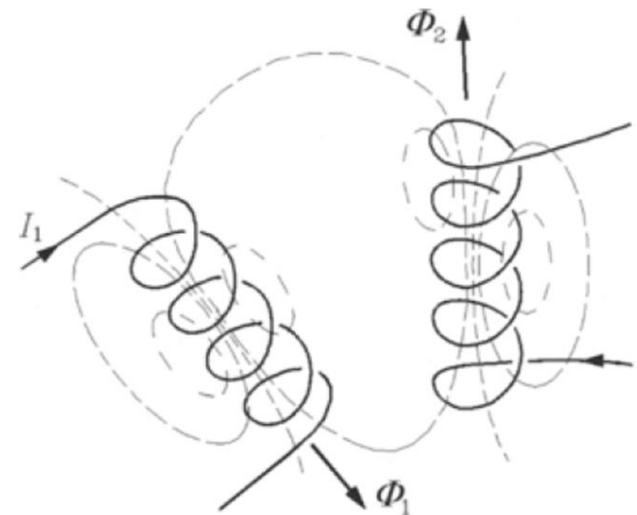


*Demonstration:
gegenseitige Induktion*

Ursache:

Strom I_1 durch Spule 1

⇒ magnetischer Fluss ϕ_2 durch Spule 2



gegenseitige Induktion

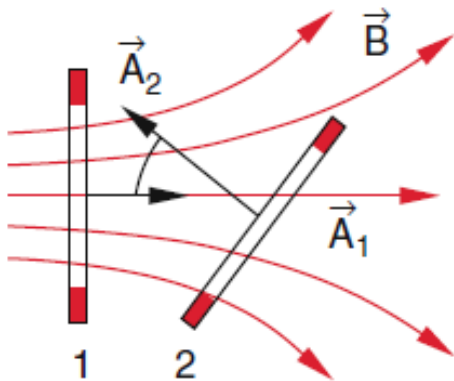
Definition der Gegeninduktivität L_{21} :

$$\phi_2 = L_{21} I_1$$

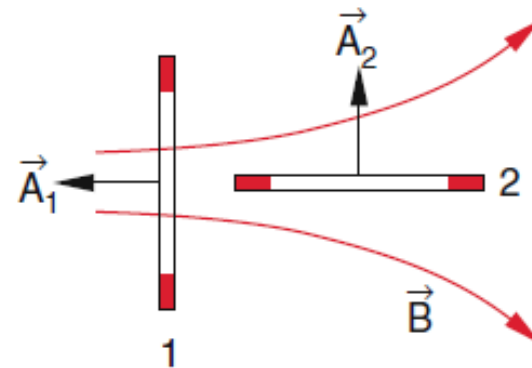
$$\Rightarrow U_2^{ind} = -\frac{d}{dt}\phi_2 = -L_{21} \frac{d}{dt} I_1$$

(i) $L_{21} = L_{12}$

(ii) L_{21} ist abhängig von der relativen Orientierung der Spulen



$$L_{21} \neq 0$$



$$L_{21} = 0$$

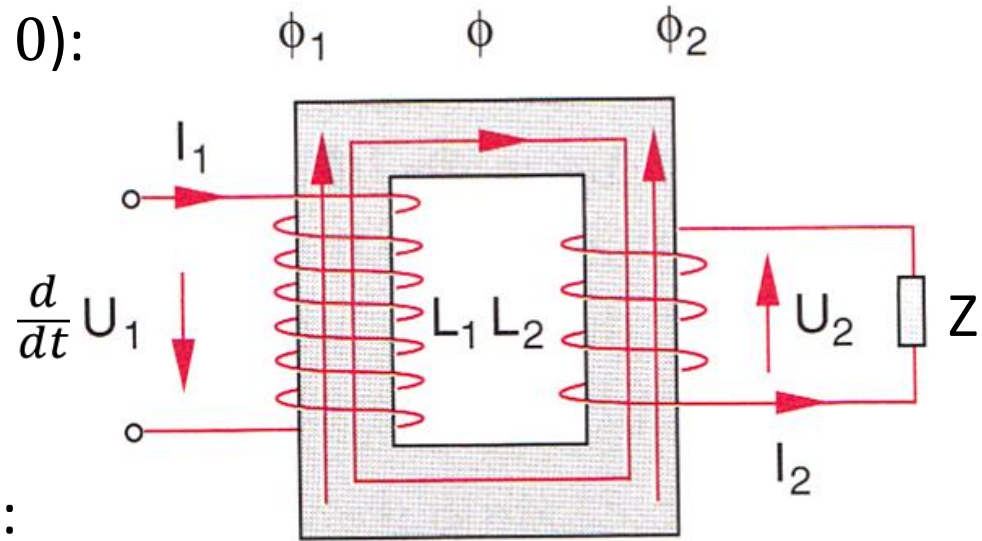
Transformatoren

Anwendung gegenseitige Induktion: Umwandlung von Spannungen

unbelasteter Transformator ($I_2 = 0$):

$$\frac{U_1}{U_2} = - \frac{N_1}{N_2}$$

$$\Delta\varphi = \pi$$



belasteter Transformator ($I_2 \neq 0$):

$$I_2 \Rightarrow \phi_2 \Rightarrow U_1$$

$$\text{Ansatz: } U_1 = L_1 \frac{d}{dt} I_1 + L_{12} \frac{d}{dt} I_2$$

$$U_2 = Z \cdot I_2 = -L_{12} \frac{d}{dt} I_1 - L_2 \frac{d}{dt} I_2$$

$$\Rightarrow \Delta\varphi \neq \pi$$

5. Elektromagnetische Felder

Transformator



*Demonstration:
Niederspannungstrafo*



*Demonstration: Elihu Thomson
Versuch*

Energiedichte des Magnetfeldes

Energiedichte w_{mag} eines Magnetfeldes:

$$w_{mag} = \frac{1}{2\mu_0} |\vec{B}|^2$$

Energiedichte eines elektromagnetischen Feldes:

im Vakuum: $w_{em} = \frac{1}{2} \left(\epsilon_0 |\vec{E}|^2 + \frac{1}{\mu_0} |\vec{B}|^2 \right)$

in Materie: $w_{em} = \frac{1}{2} (|\vec{E}| |\vec{D}| + |\vec{B}| |\vec{H}|)$

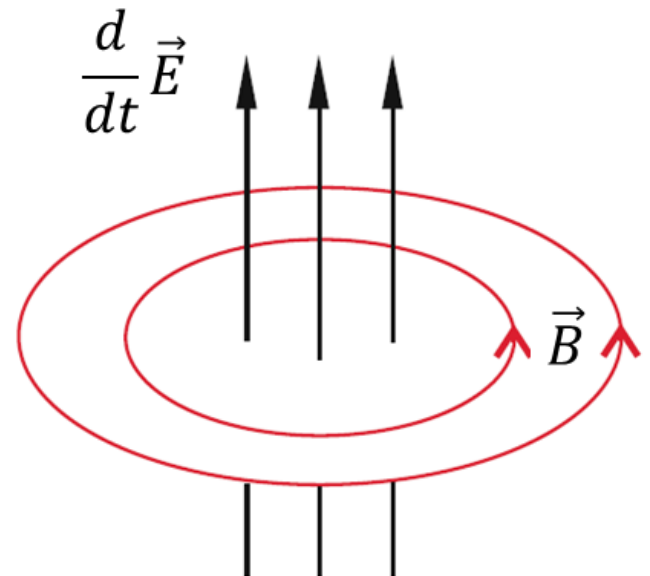
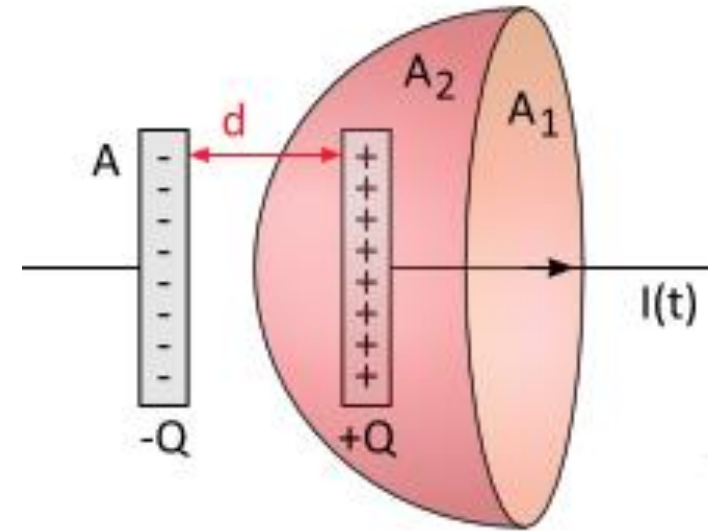
5. Elektromagnetische Felder

Der Verschiebungsstrom

Verschiebungsstrom: $\vec{j}_V = \epsilon_0 \frac{d}{dt} \vec{E}$

Verschiebungsstrom (zeitlich veränderliches $\vec{E}$ -Feld) erzeugt Wirbel im $\vec{B}$ -Feld

$$\text{rot} \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \vec{E}$$



4. Magnetostatik

Maxwell-Gleichungen: *Magnetostatik* $\Leftrightarrow$ *Magnetodynamik*
 Elektrostatik $\Leftrightarrow$ *Elektrodynamik*

$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{1}{\varepsilon_0} \rho$ Ladungen sind Quellen der elektrischen Felder

$\operatorname{div} \vec{B} = 0$ Magnetfelder sind quellfrei

~~$\operatorname{rot} \vec{E} = 0$~~ ~~elektrische Felder sind wirbelfrei~~

$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt}$ zeitlich veränderliche Magnetfelder erzeugen
Wirbel im elektrischen Feld

$\operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt}$ Ströme und zeitlich veränderliche elektrische
Felder erzeugen Wirbel im Magnetfeld

5. Elektromagnetische Felder

allgemeine Form der Maxwellgleichungen:

im Vakuum:

$$1. \operatorname{div} \vec{E} = \frac{1}{\varepsilon_0} \rho \quad 2. \operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad 3. \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt} \quad 4. \operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt}$$

in Materie:

$$1. \operatorname{div} \vec{D} = \rho \quad 2. \operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad 3. \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt} \quad 4. \operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \varepsilon_0 \frac{d\vec{D}}{dt}$$

Grundgleichungen der Elektro- und Magnetodynamik