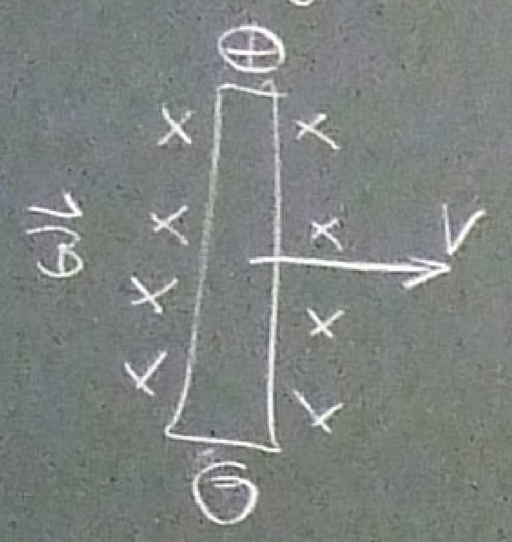
Bewegte Leiter im Magnetfeld



Kupferdraht bewegt sich ⊥ $\vec{B}$
und ⊥ zu seiner Längsachse
mit $\vec{v}$

Bewegliche Elektronen werden
durch die Lorentzkraft verschoben

⇝ Elektromotorische Kraft (EMK) bzw. Potential-
differenz zwischen den Drahtenden:

$$qE + qvB = 0$$

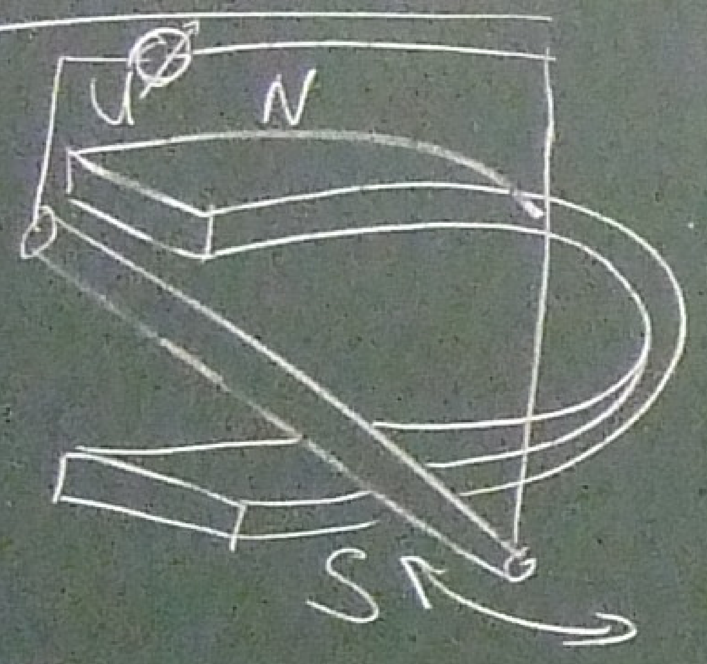
⇝ $E = -vB$

⇝ $U = E \cdot l = -vB \cdot l$

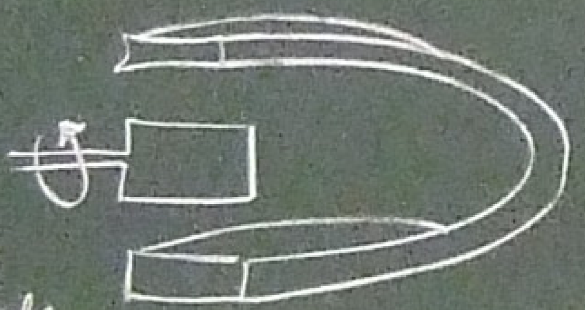
Grundprinzip aller Generatoren

Bewegung von Drähten im Magnetfeld

Leiterschaukel



Modellgenerator:

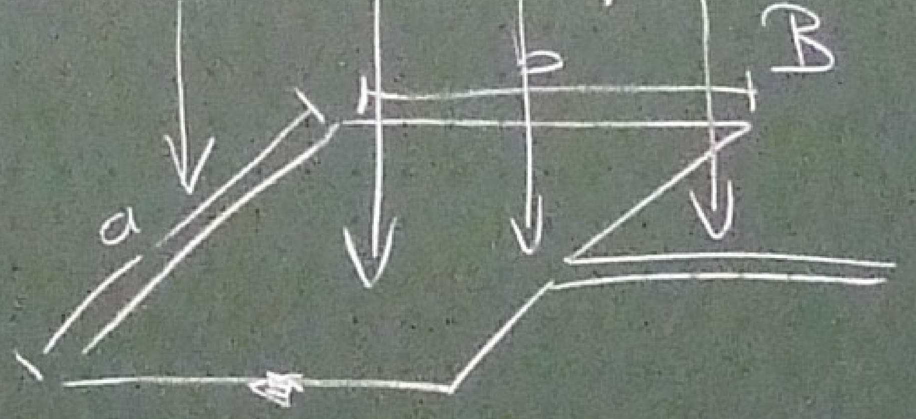


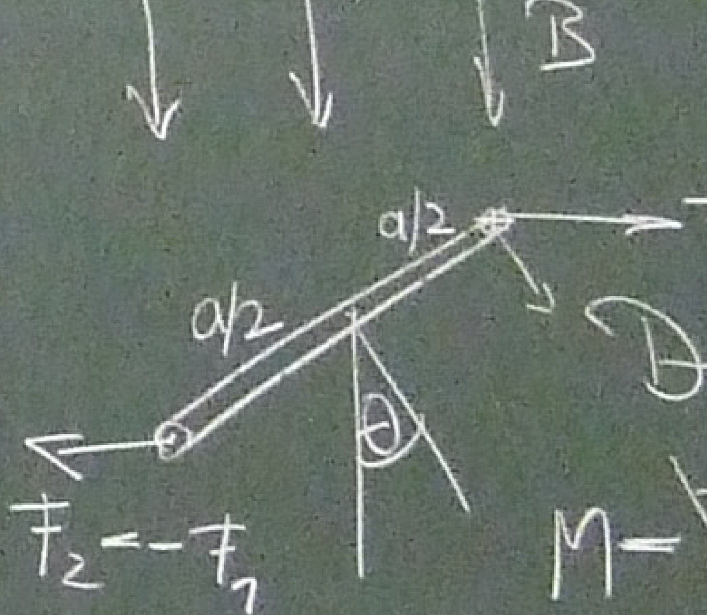
Spulen, die sich im $\vec{B}$-Feld drehen.

Umkehrung

Krafteinwirkung auf stromdurchflossene Spule im Magnetfeld:

Elektromotor-Prinzip





Drehmoment:

$$M = 2 \cdot \frac{a}{2} \cdot IB \cdot b \cdot \sin\theta$$
$$= I \cdot B \cdot ab \cdot \sin\theta$$

mit $I \cdot ab = m$ (Strom um eine Fläche):
magnetische Dipol

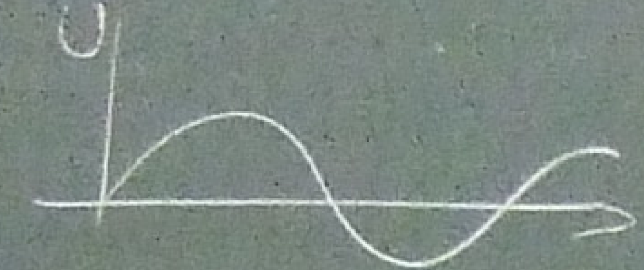
$$\vec{M} = \vec{m} \times \vec{B}$$

Kraft auf (ausgerichteten Dipol) $\vec{F} = m \cdot \mathrm{grad}\, B$

Motor: Spule im Feld, Stromrichtung wird nach 180° Drehung umgepolt.

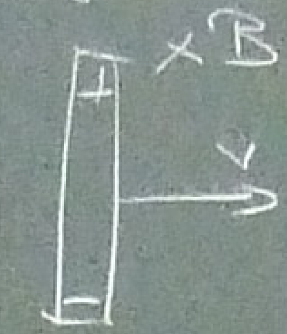
Maximale Drehzahl: Bei Drehung im Feld wird ein EMK induziert (Generatorprinzip). Wenn diese EMK = äußeren Spannung ist, ist max. Drehzahl erreicht

Synchronmotor: Permanentmagnet dreht sich im Feld einer Spule, an die ein Wechselstrom angelegt ist.



Das Induktionsgesetz

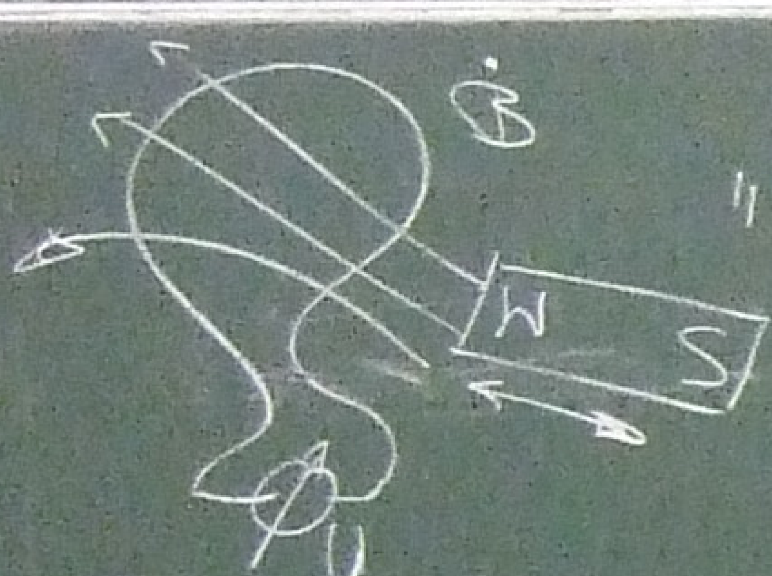
Bewegter Leiter im Feld



$\vec{F} = q(\vec{v}\times\vec{B})$, $\vec{F} = q\vec{E}$

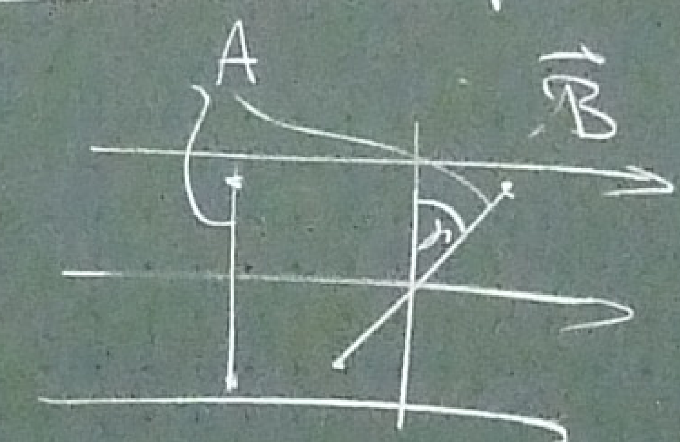
$U = vBl = B\cdot l\cdot\frac{dx}{dt} =$ „$B\cdot\dot{A}$“ + „$\dot{B}\cdot A$“ ?

Nicht nur die Bewegung eines Leiters (dx/dt) ergibt induzierte Spannung. Auch die Veränderung von B induziert Spannung.



„Handdynamo“

Magnetischer Fluß muß sich ändern



Magnetischer Fluß ϕ durch Fläche A

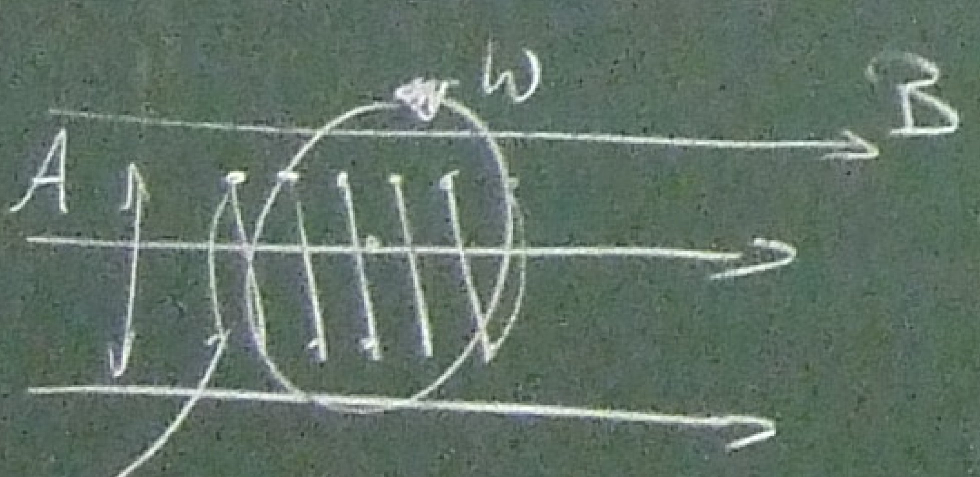
$$\phi = B\,A\cos\alpha$$
$$= \vec{B}\cdot\vec{A} = \iint \vec{B}\,d\vec{A}$$

⇒ allg.: **Induktionsgesetz**

$$U_{induziert} = -\,d\phi/dt$$

mit Widerstand R in Leiterschleife: $I = \frac{U}{R} = -\frac{d\phi/dt}{R}$

Beispiel Stromgenerator

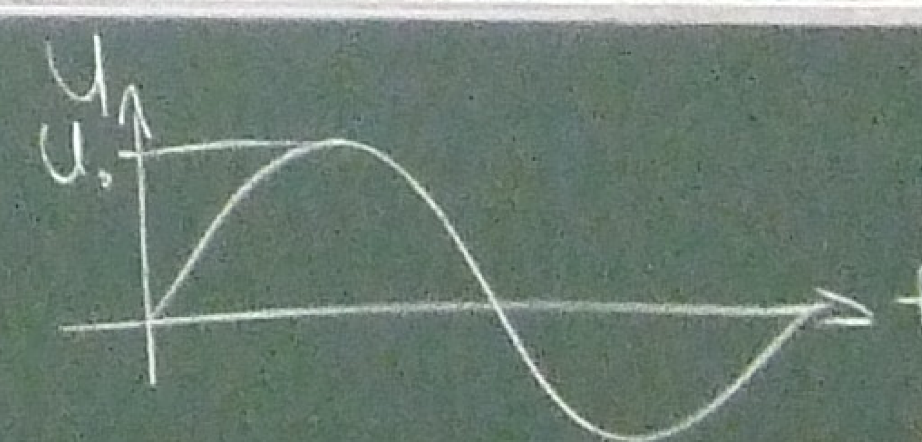


N: Zahl der Wicklungen

$$\phi = B\cdot A\cdot N\cos\omega t$$
$\hookrightarrow \omega = 2\pi f = 2\pi/T$

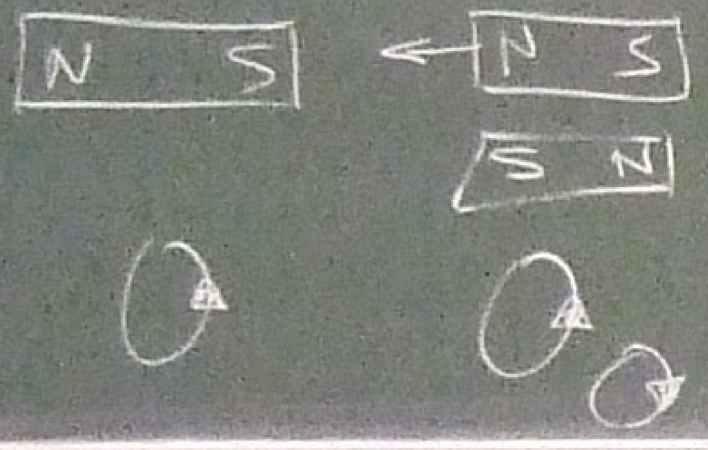
$$\frac{d\phi}{dt} = -\omega B\cdot A\cdot N\sin\omega t$$

$$U_{ind} = \underbrace{\omega BAN}_{U_0}\sin\omega t$$



Richtung des induzierten Stroms?

Induzierte Strom erzeugt Magnetfeld. Aus Kraftwirkung ist das Vorzeichen bestimmbar.



Anziehen

Abstoßung

Anziehung

Abstoßung

Energetische Begründung

$w = \frac{E}{V}$ eines Magnetfeld

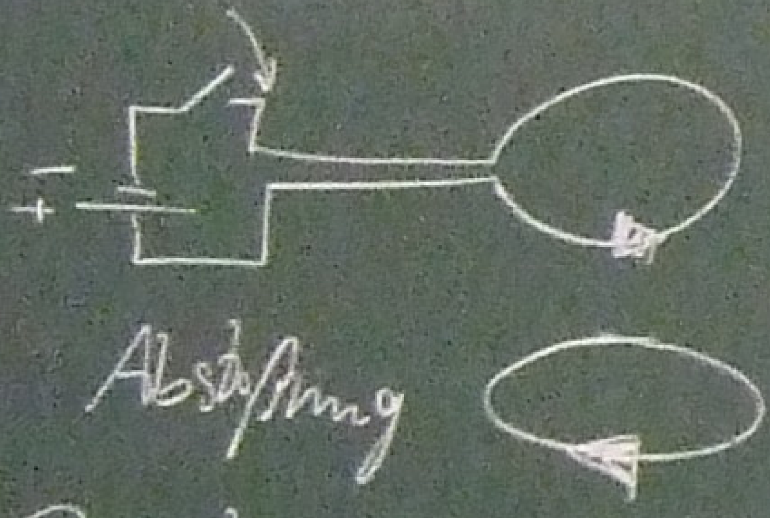
$= \frac{B^2}{2\mu_0}$

Energie wird minimiert, wenn

- verstärkende Überlagerung auf kleinen Raum beschränkt wird $\rightarrow + \rightarrow \;\Rightarrow$ Anziehung
- Abschwächende Überlagerung auf großen Raum ausgedehnt wird. $\rightarrow + \leftarrow \;\Rightarrow$ Abstoßung.

Experiment

Einschalten

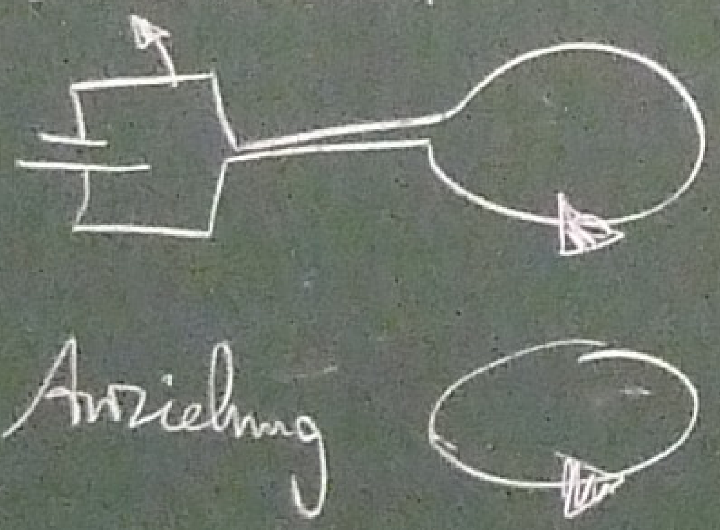


B_1

Abstoßung B_2

B_2 ist gegen B_1 gerichtet

Ausschalten



B_1

Anziehung B_2

B_2 ist B_1 gleichgerichtet

Einschalten: B_1 nimmt zu, B_2 ist dagegen gerichtet, um $B_1 + B_2 = 0$ zu erhalten.

Ausschalten: B_1 nimmt ab, B_2 ist gleichgerichtet, um $B_1 + B_2 = B_1^{(0)}$ zu erhalten.

Lenz'sche Regel: Der induzierte Strom wirkt der Flußänderung, die ihn erzeugt, entgegen.

$$\oint \vec{E}\,d\vec{s} = -\frac{d}{dt}\iint \vec{B}\,d\vec{A}$$

in differentieller Form:

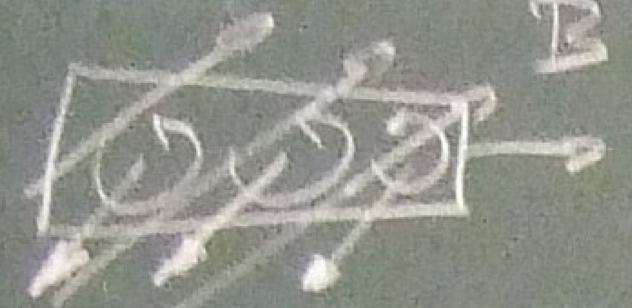
$$\boxed{\mathrm{rot}\,\vec{E} = -\frac{\partial B}{\partial t}}$$

Ergänzung der 3. Maxwellgleichung bei veränderlichen Feldern.

Allg. $U_{in} = \oint \vec{E}\,d\vec{s} = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d}{dt}\iint \vec{B}\,d\vec{A}$

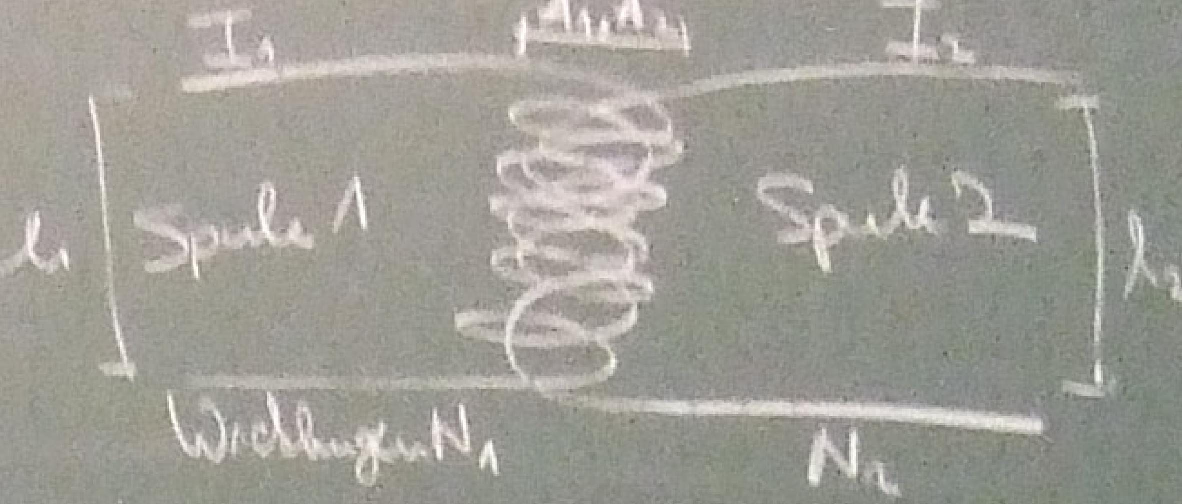
$(\vec{E} = -\mathrm{grad}\,\phi - \dot{\vec{A}})$

Wirbelströme: $d\Phi/dt$ erzeugt nicht nur in Leiterschleifen Ströme/Spannungen, sondern in jedem Leitungsstück: Wirbelströme



Wirbelstrom-bremse

Gegeninduktivität – Selbstinduktivität



2 Spulen ineinander-gewickelt auf gemeinsamen Kern.

I_1 in Spule 1 erzeugt $B_1 = \mu_0 \frac{I_1 N_1}{l_1}$

Fluß durch Fläche A_2: $\Phi_2^{(1)} = A_2 \cdot B_1$

Fluß durch Spule 2:
$$\Phi_2 = N_2 A_2 \cdot B_1 = \mu_0 \frac{N_1 N_2}{l_1} A_2 I_1$$

Induzierter Strom:
$$U_{ind}^{(2)} = -\frac{d\Phi_2}{dt} = -\underbrace{\mu_0 \frac{N_1 N_2}{l_1} A_2}_{L_{12}} \cdot \frac{dI_1}{dt}$$

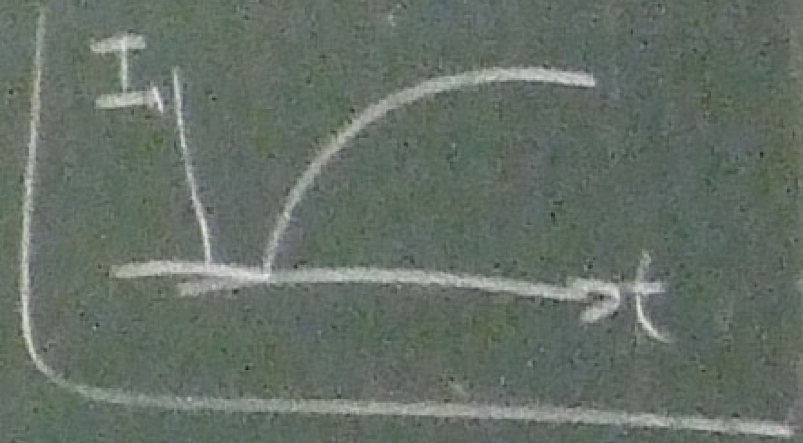
L_{12}: Gegeninduktivität

Fluß Φ_1 in Spule 1
$$\Phi_1 = N_1 B_1 A_1 = \mu_0 \frac{N_1^2 A_1}{l_1} I_1$$

$$U_{ind}^{(1)} = -\frac{d\Phi_1}{dt} = -\underbrace{\mu_0 \frac{N_1^2 A_1}{l_1}}_{L} \frac{dI_1}{dt}$$

L = Selbstinduktivität

L, L_{12} in Vs/A = Hy (Henry)



1 Hy = Änderung der Stromstärke um A pro Sekunde, die 1V induziert.

$$\frac{U_{ind}^{(1)}}{U_{ind}^{(2)}} = \frac{-L\, dI_1/dt}{-L_{12}\, dI_1/dt} = \frac{L}{L_{12}}$$

für $A_1 = A_2$ $\rightsquigarrow$ $\frac{U^{(1)}_{ind}}{U^{(2)}_{ind}} = \frac{N_1}{N_2}$

$$= \frac{\mu_0 \frac{N_1^2 A_1}{l_1}}{\mu_0 \frac{N_1 N_2}{l_1} A_2}$$

Transformator:

Spannungs-umsetzung von Wechsel-strömen

mit $R=0$ $\rightsquigarrow$ $\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$