Inhalt der Vorlesung Physik A2 / B2

3. Wärmelehre

Druck und Temperatur: Das ideale Gas
Wärmemenge, spezifische Wärme
Die Hauptsätze der Wärmelehre

4. Elektrizitätslehre, Elektrodynamik

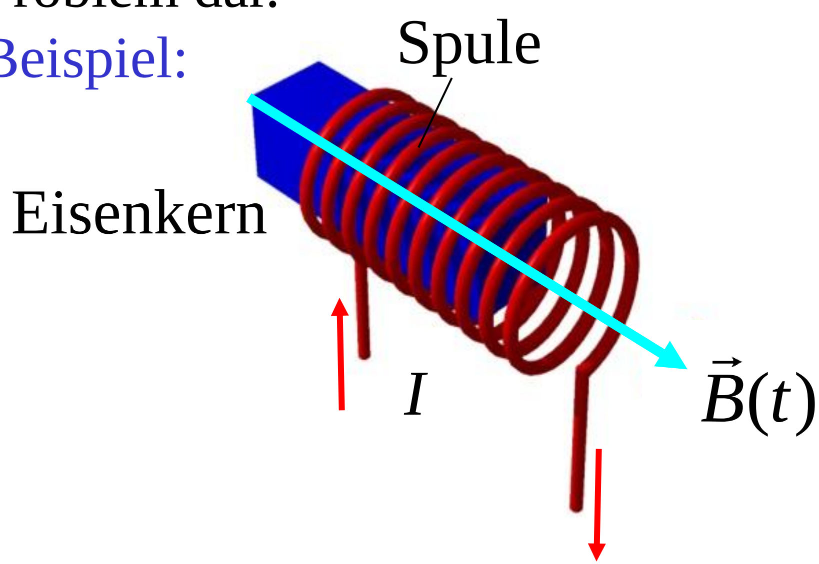
Die Ladung und elektrostatische Felder
- SEMESTERENDE -
Elektrischer Strom
Magnetische Felder und Magnetostatik
Zeitlich veränderliche Felder, Elektrodynamik
Wechselstromnetzwerke
Die Maxwellschen Gleichungen
Elektromagnetische Wellen und Strahlung
Relativität der Felder – Relativitätstheorie

Wirbelströme

In Leitern induzierte Ringspannungen erzeugen ***Wirbelströme*** (englisch: „eddy currents“), die wegen endlicher Leitfähigkeit des Materials zu ohmschen Verlusten führt.

Wirbelstromverluste stellen ein großes technisches und wirtschaftliches Problem dar.

Beispiel:



Bei Wechselstrombetrieb einer Spule mit Eisenkern induziert das sich ändernde Magnetfeld Wirbelströme im Eisenkern.

Transformatorverluste sind volkswirtschaftlich außerordentlich bedeutend !

Abhilfe:

- Materialien mit guten magnetischen Eigenschaften, aber schlechter Leitfähigkeit (Ferrite)
- geschlitzte Materialien
- Materialen aus isolierten Blechen (Blechkerne)

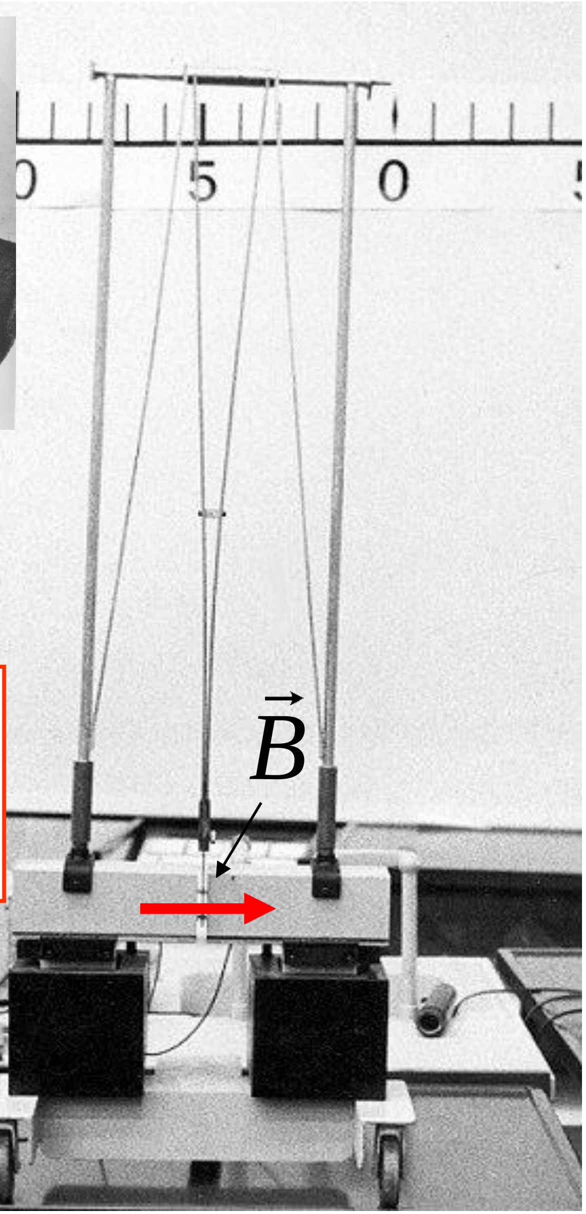
Experiment: *Das Waltenhofen-Pendel*

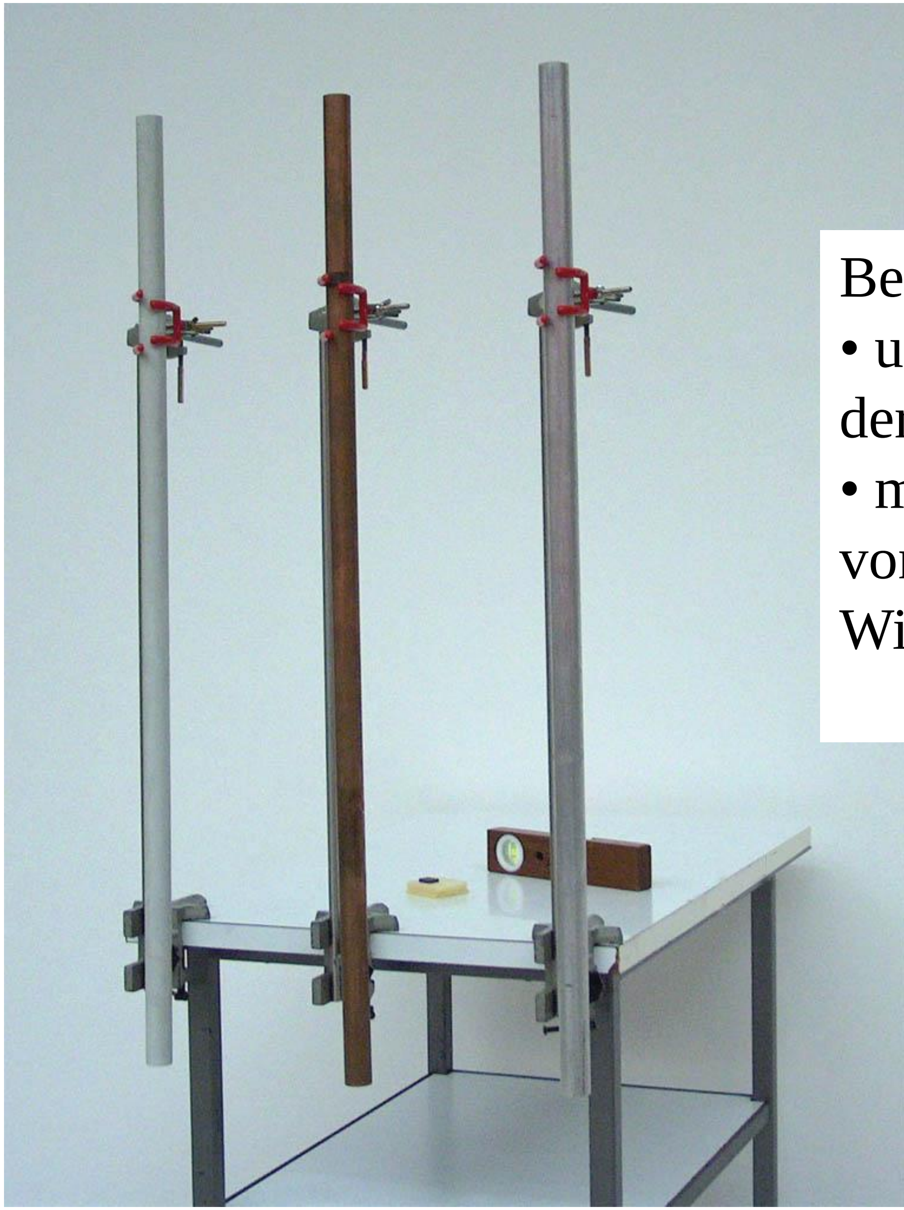
Ein Pendel, an dem ein Leiter befestigt ist, wird in einem Magnetfeld stark abgebremst. Der Grund dafür ist das durch Wirbelströme verursachte Magnetfeld im Leiter (⇒ „Wirbelstrombremse“).

Die Bremskraft ist ~ v !!!

Adalbert von Waltenhofen (1828 - 1914)

elektrodynamische Bremse:
- Schienenfahrzeuge
- Messinstrumente





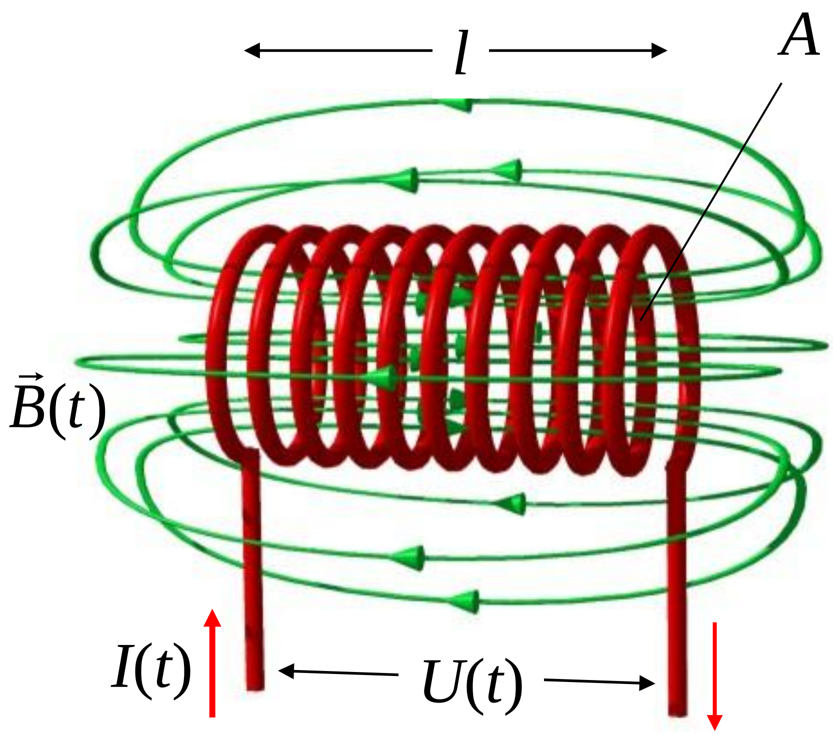
Experiment: *Fallversuche unter Wirbelstromdämpfung*

Beobachtung:

- unmagnetische Fallkörper fallen ungehindert (freier Fall).
- magnetische Fallkörper unterliegen abhängig von der Leitfähigkeit des Rohrmaterials einer Wirbelstrom-"Hemmung".

Die „Hemmkraft“ durch Wirbelströme ist proportional zur Geschwindigkeit v ! Es stellt sich eine konstante Fallgeschwindigkeit ein.

Beispiel: Induktivität einer Spule



Für das *B*-Feld im Inneren einer langen Spule galt:

$$B(t) = \mu_0 \frac{n \cdot I(t)}{l}$$

Durch Einbringen von magnetisierbarem Material (etwa Eisen) kann das *B*-Feld bei gleichem Strom *I* um den Faktor μ_r, die dimensionslose relative Permeabilität, gesteigert werden, also

$$B(t) = \mu_0 \mu_r \frac{n \cdot I(t)}{l}$$

mit dem magnetischen Fluss

$$\Phi(t) = \mu_0 \mu_r A \frac{n \cdot I(t)}{l}$$

Hier ist A die Querschnittsfläche der Spule.

Da das Feld zeitlich veränderlich ist, entsteht eine Induktionsspannung

$$U_{ind}(t) = -n\dot{\Phi} = -\dot{\Phi}_{ind} = -L \cdot \dot{I}(t)$$

$$U_{ind}(t) = -\mu_0 \mu_r A \frac{n^2}{l} \cdot \dot{I}(t)$$

Für die ***Induktivität*** (genauer: die ***Selbstinduktivität***) der Spule erhalten wir

$$L_{Spule} = \mu_0 \mu_r A \frac{n^2}{l}$$

Beispiel:

Eine Luftspule habe die Länge l = 10 cm und den Durchmesser D = 5 cm. Sie hat n = 50 Windungen. Wie groß ist die Induktivität L ?

Die Querschnittsfläche A ist dann:

$$A = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 = 1.963 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{m}^2$$

Mit $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am ergibt sich dann:

$$L = \frac{\mu_0 A N^2}{l} = 6.17 \cdot 10^{-5}\,\mathrm{H} = 61.7\,\mu\mathrm{H}$$

1 Henry ist also eine recht große Einheit.

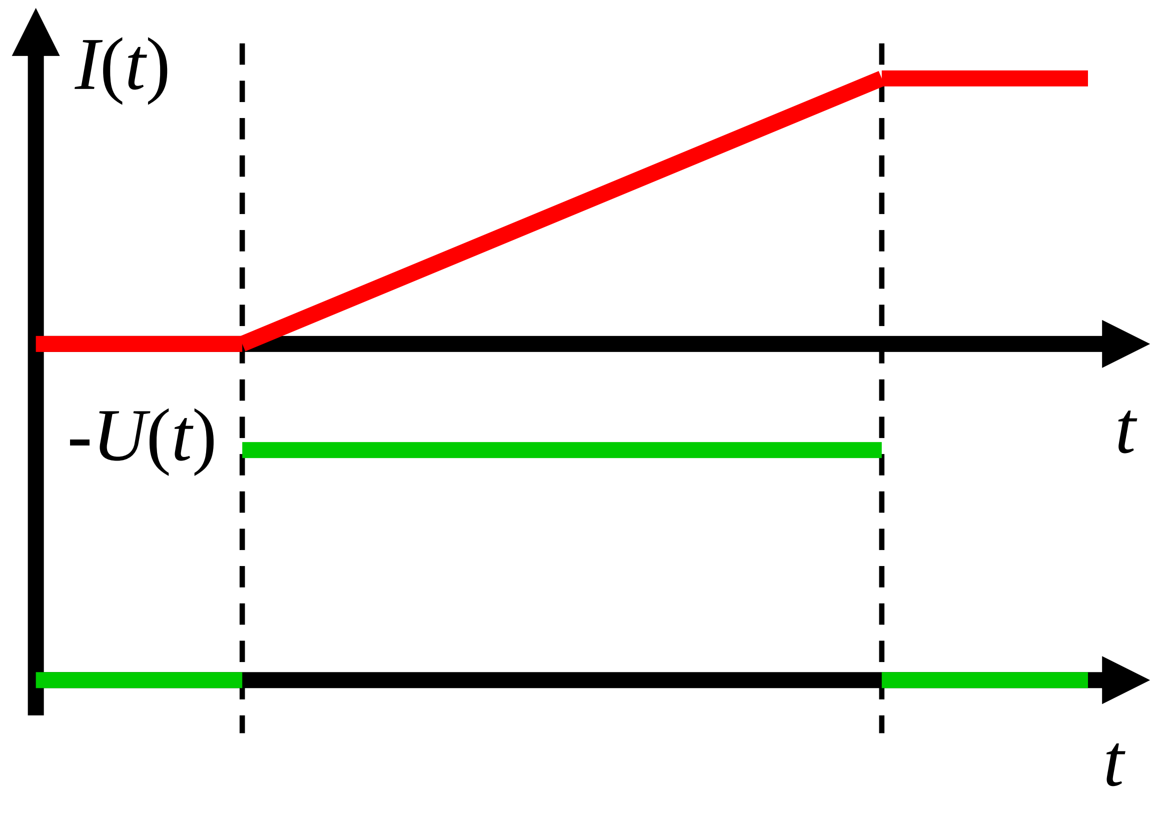
Joseph Henry
(1766-1844)

Der zeitlich variable Strom $I(t)$ durch die Spule bewirkt über das Phänomen der ***Selbstinduktion*** eine Spannung *U(t)* zwischen den Anschlüssen der Spule:

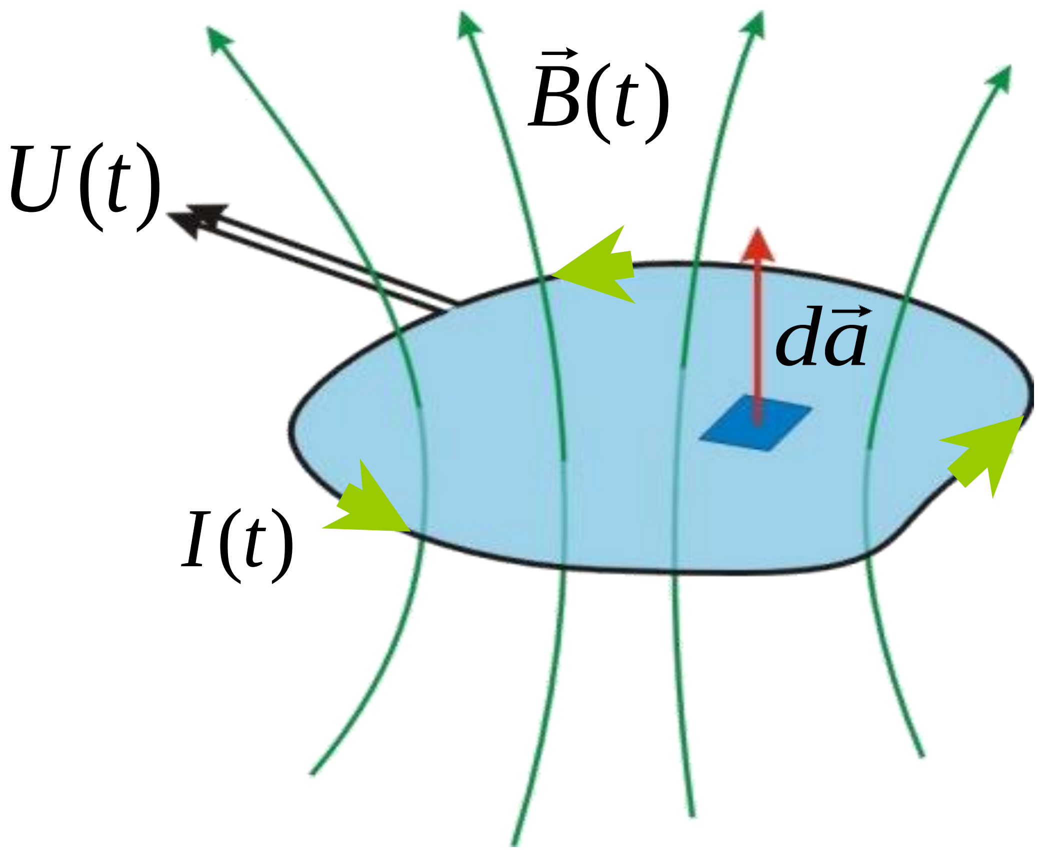
$$U(t) = -L\frac{dI}{dt}$$

Beispiel:

Steigt der Strom I linear in der Zeit t an, so ist die induzierte Spannung U(t) konstant.



Der Begriff der ***Selbstinduktion*** lässt sich auch für eine beliebige Leiterschleife verallgemeinern.



Durch jeden Stromkreis greift ein Magnetfluss, der von seinem eigenen Magnetfeld herrührt. Da das Magnetfeld proportional zum Strom $I(t)$ ist, gilt:

$$\Phi = \iint \vec{B}(t) \cdot d\vec{a} = \frac{L}{n} I(t)$$

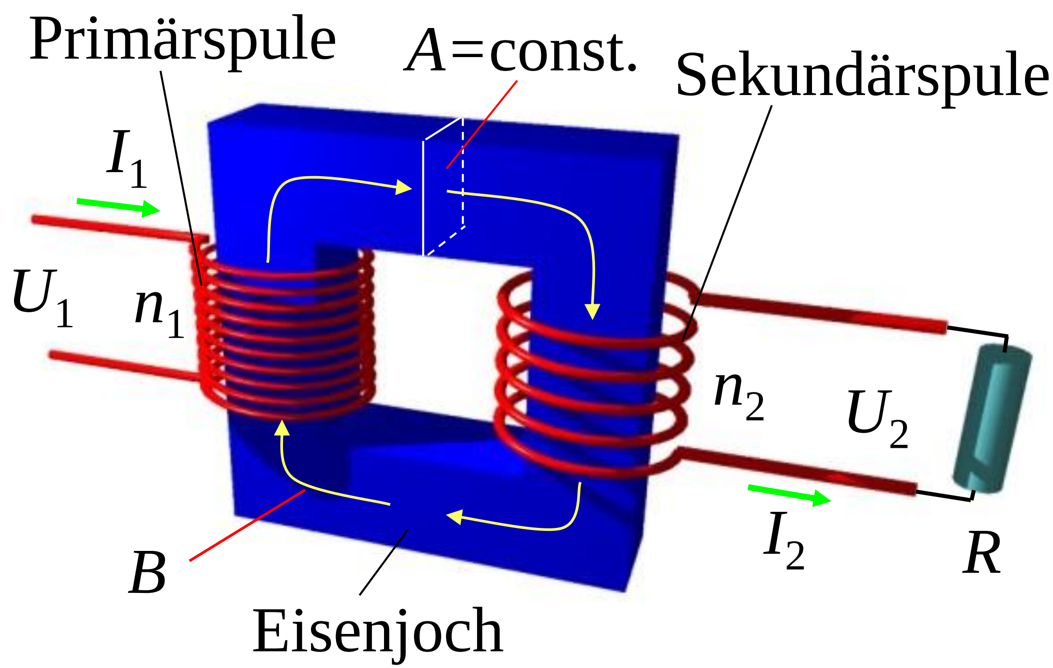
Hierbei ist L die Selbstinduktion der Leiterschleife.

Es ergibt sich also wieder mit n als Anzahl der Windungen:

$$U_{ind}(t) = -n\dot{\Phi} =$$

$$= -\dot{\Phi}_{ind} = -L \cdot \dot{I}(t)$$

Transformator



Ein Transformator besteht im wesentlichen aus drei Komponenten:

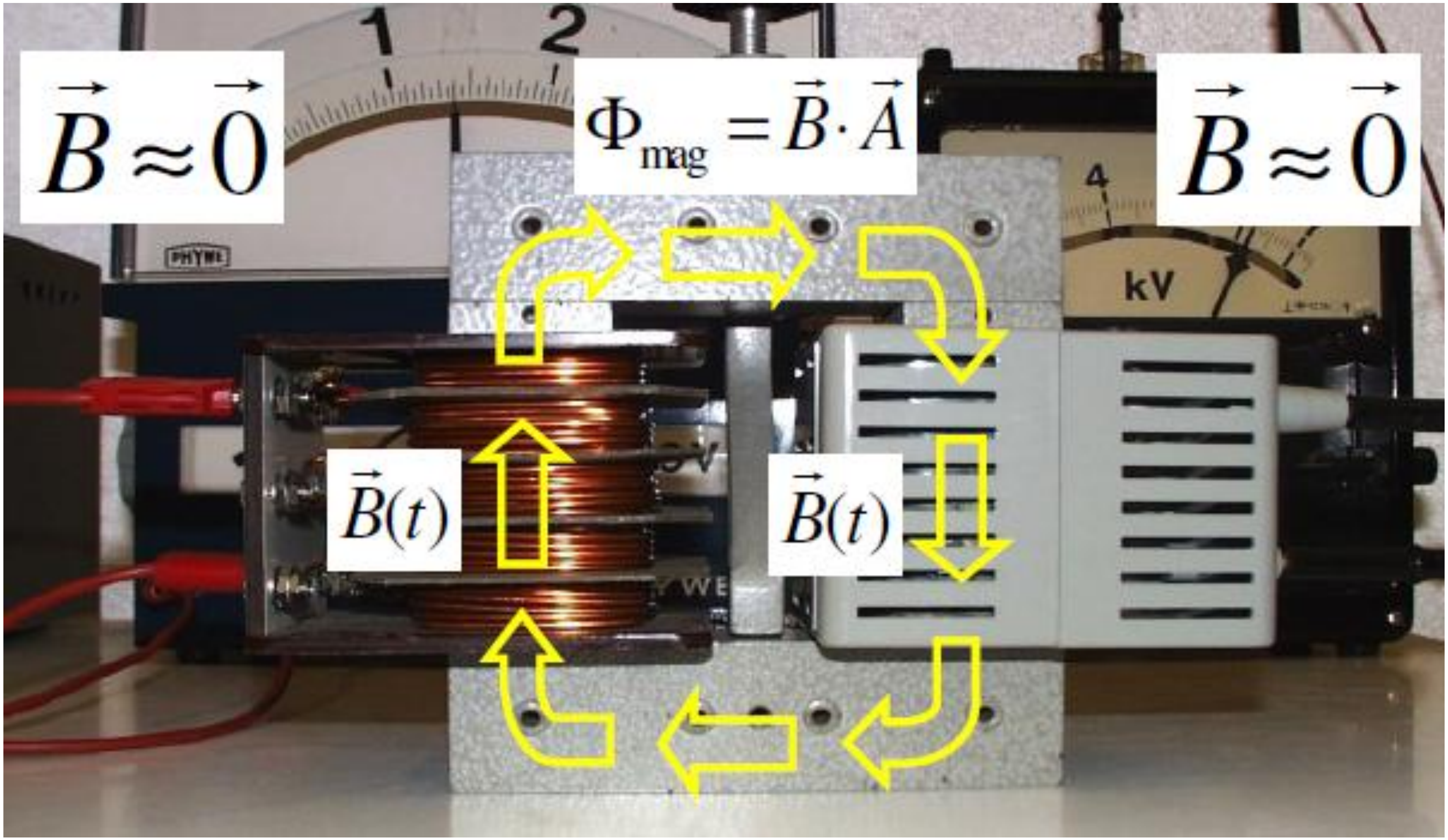
- der Primärspule
- dem Eisenjoch
- der Sekundärspule

Magnetische Feldlinien bevorzugen Bereiche, in denen μ_r sehr groß ist, d.h. in ferromagnetischen Materialien (Fe, Co, Ni). Damit kann der gesamte Magnetfluss innerhalb des Eisenjochs gehalten werden.

***Idealer Transformator*:**

- Spulen haben $R_i = 0$
- kein magnetischer Streufluss
- keine Wirbelstromverluste
- keine Ummagnetisierungs-verluste (Hysterese-Verluste), d.h. die wechselnde Ausrichtung der Weißschen Bezirke geschieht verlustfrei

Prinzipieller Aufbau des Transformators



Wegen $R_i = 0$ ist die Spannung auf der Primärseite U_1 gegeben durch

$$|U_1| = n_1\dot{\Phi}_1 = n_1\dot{\Phi}$$

Mit $\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi$ folgt dann für die Sekundärseite im Leerlauf-Fall

$$R \to \infty \qquad I_2 = 0$$

$$|U_2| = n_2\dot{\Phi}$$

und damit die ***Leerlauf-Spannungs-über- bzw. untersetzung***

$$\frac{|U_2|}{|U_1|} = \frac{n_2}{n_1}$$

Bei dieser Annahme wird der Fluss Φ nur durch den Strom I_1 erzeugt.

Im Belastungsfall (I_2 verschieden von Null) erzeugt I_2 Zusatzfluss, der auch die Primärspule durchsetzt. Primär- und Sekundärseite „reden“ über den Fluss miteinander. In erster Näherung folgt aber schon aus Gründen der Energieerhaltung die ***Stromüber- bzw. Strom-untersetzung***

$$\frac{|I_2|}{|I_1|} \approx \frac{n_1}{n_2}$$

Anwendungen:

Spannungs- und Stromtransformation

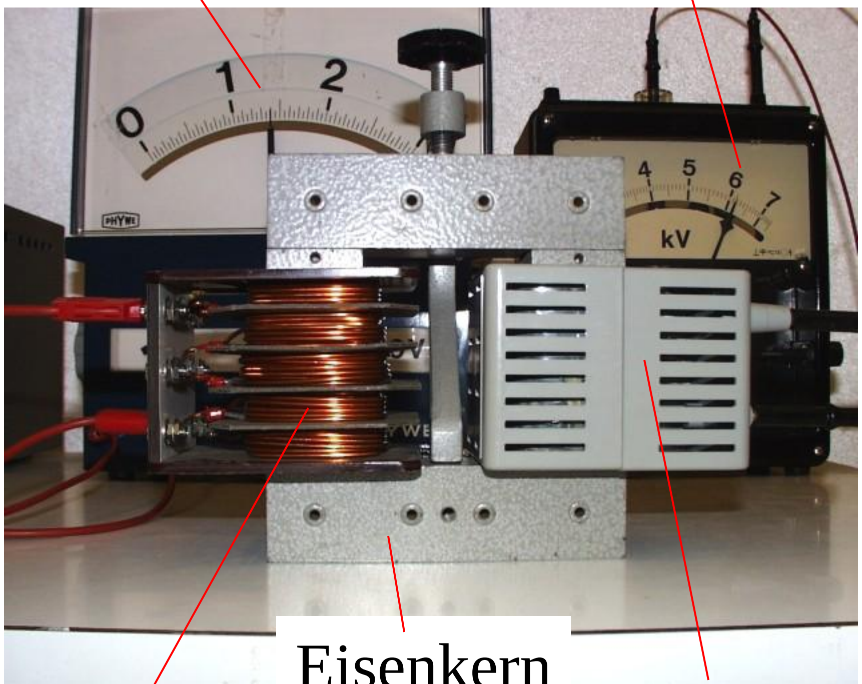
Widerstands-(Impedanz)-Anpassung

Galvanische Entkopplung von Stromkreisen

Experiment: *Erzeugung hoher Spannung durch einen Transformator*

$U_\mathrm{p} = 15\ \mathrm{V}$

$U_\mathrm{s} = 6\ \mathrm{kV}$

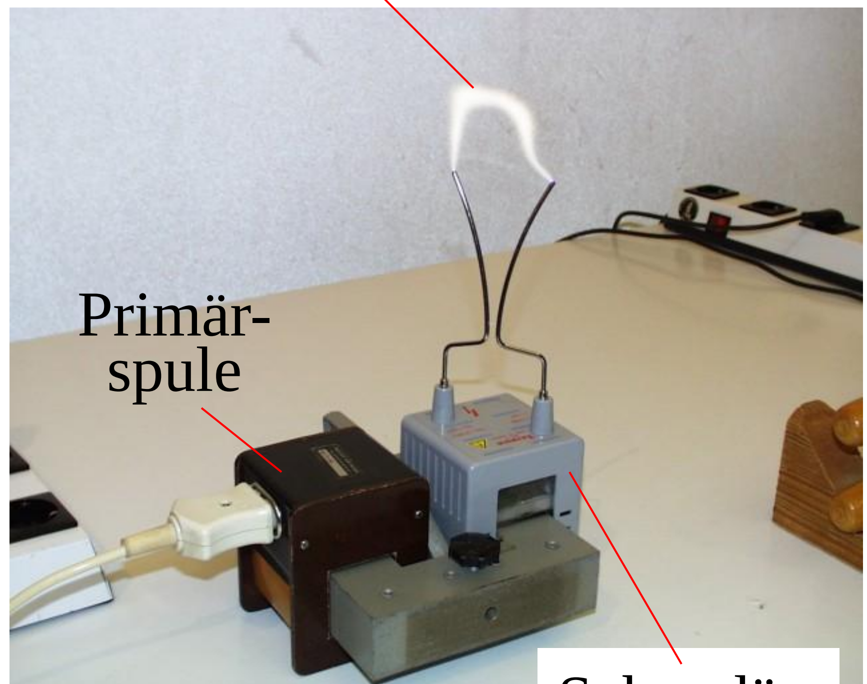


Eisenkern

Primär-spule

Sekundär-spule

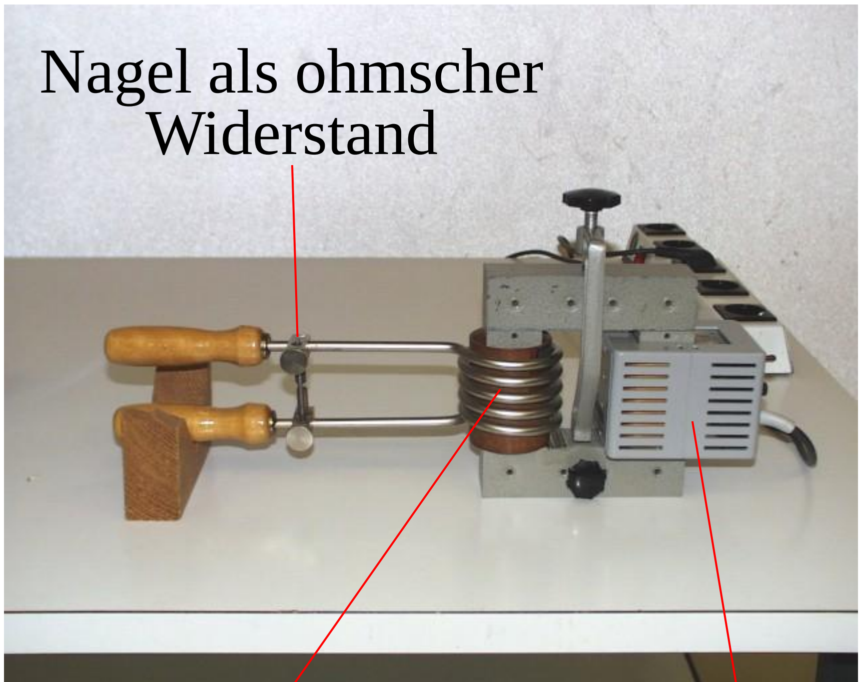
Lichtbogen

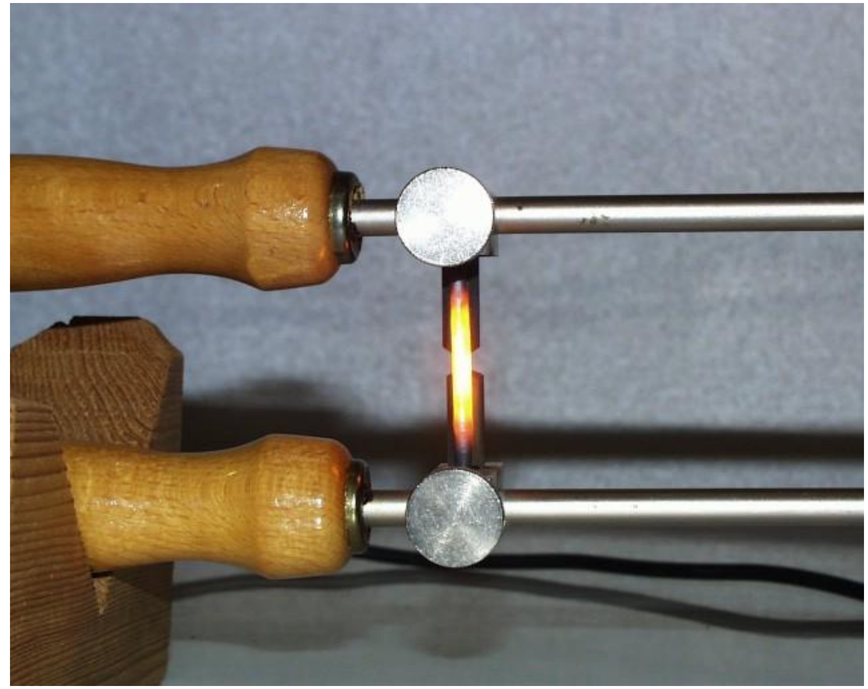


Primär-spule

Sekundär-spule

Experiment: *Erzeugung hoher Ströme durch einen Transformator*



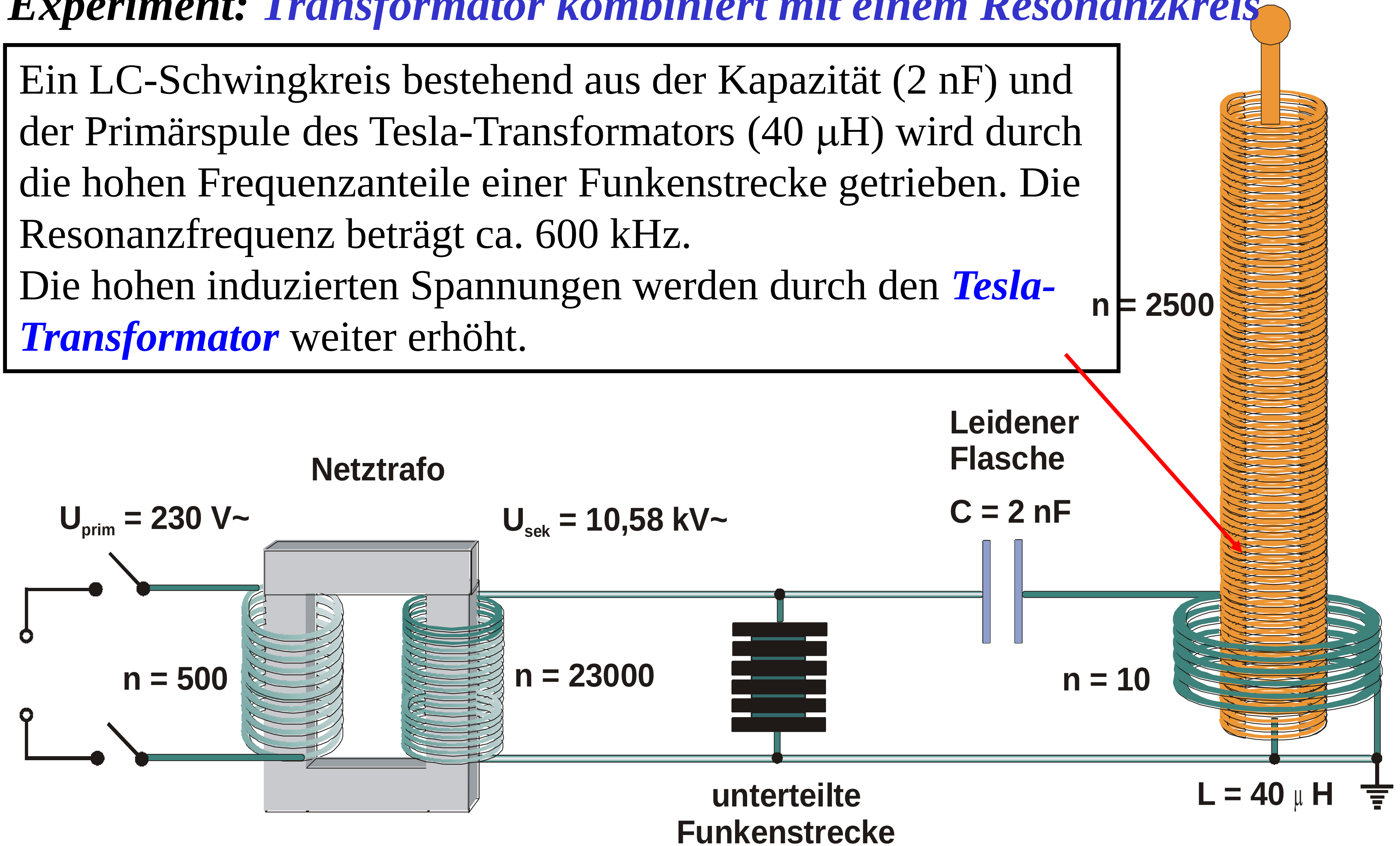


Durch den hohen Strom beginnt der Nagel zu glühen bis er durchbrennt:

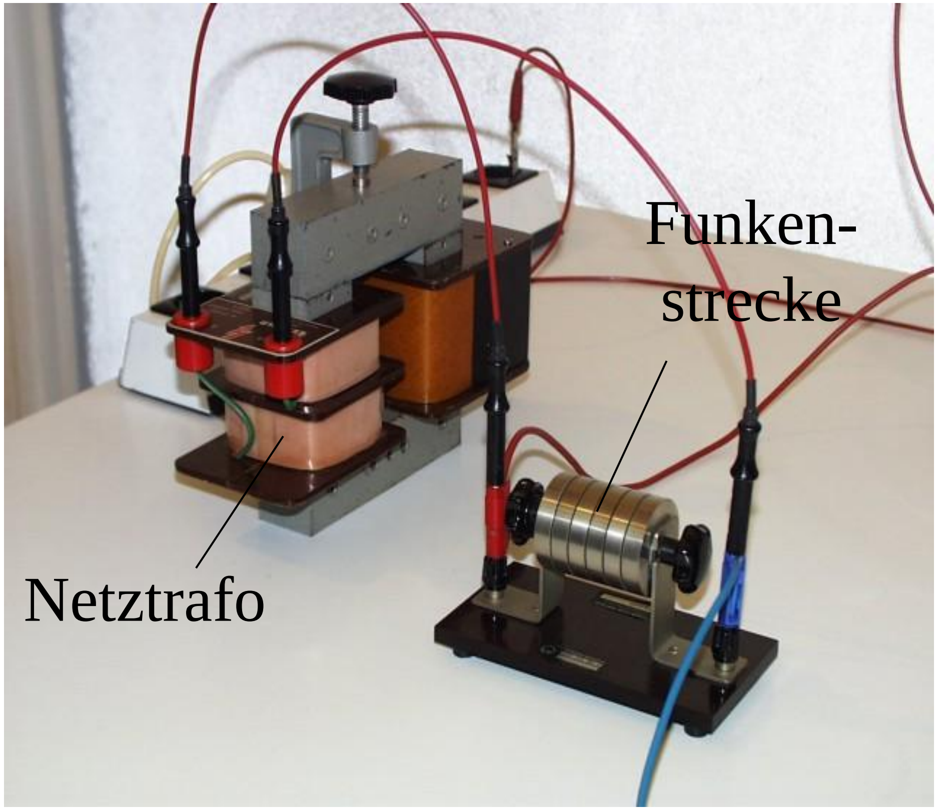
Prinzip der Schmelzsicherung

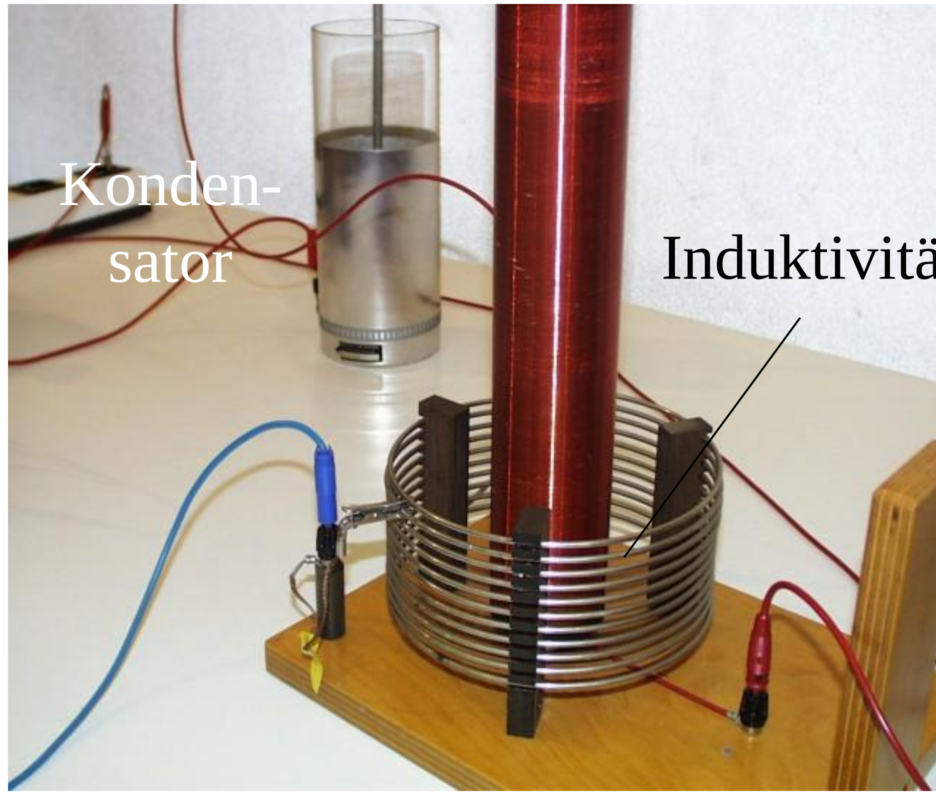
Experiment: Transformator kombiniert mit einem Resonanzkreis

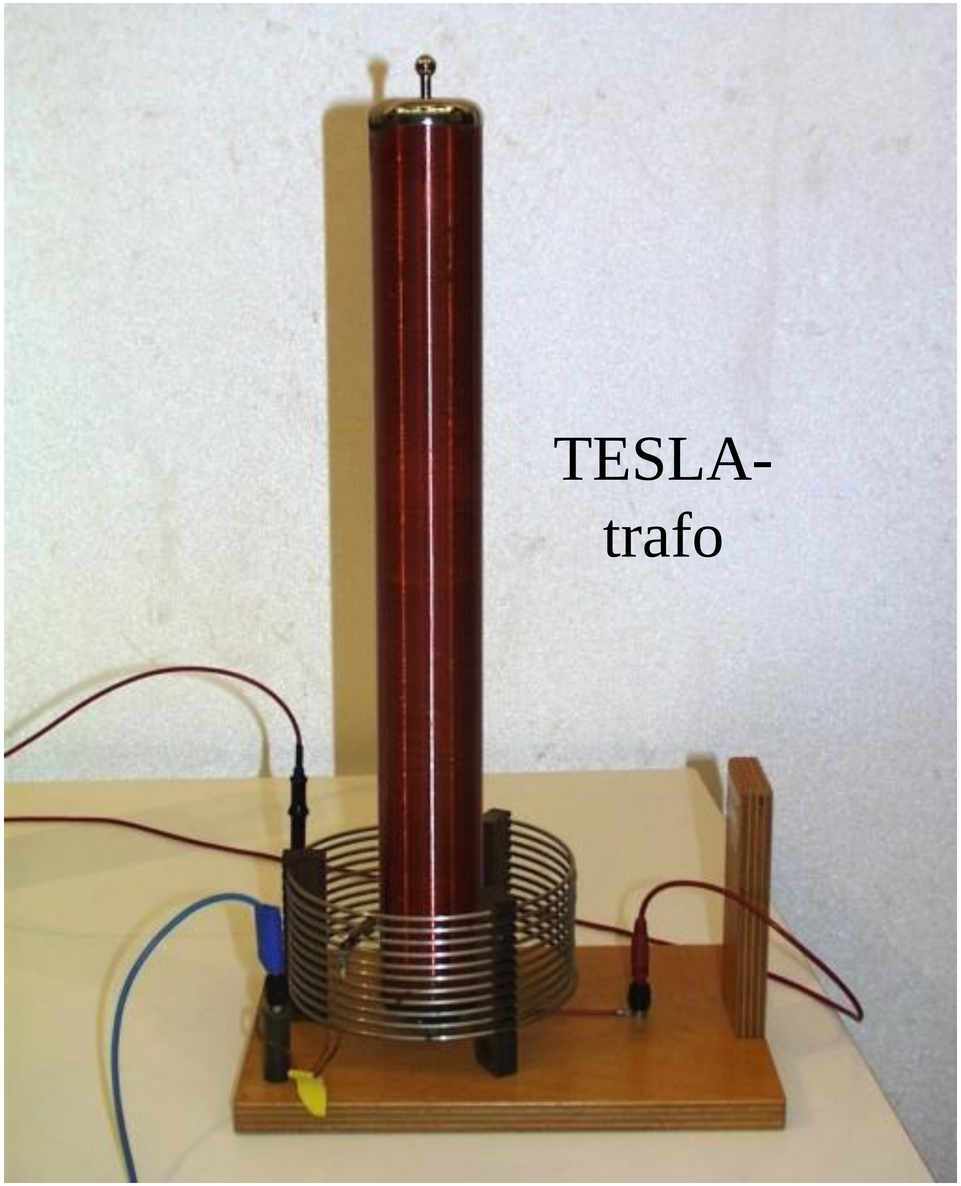
Ein LC-Schwingkreis bestehend aus der Kapazität (2 nF) und der Primärspule des Tesla-Transformators (40 µH) wird durch die hohen Frequenzanteile einer Funkenstrecke getrieben. Die Resonanzfrequenz beträgt ca. 600 kHz.
Die hohen induzierten Spannungen werden durch den ***Tesla-Transformator*** weiter erhöht.



Die Einzelkomponenten des TELSA-Transformators






TESLA-
trafo


Korona-
bildung


Gasentladungs-
röhre

Zeitlich veränderliche Felder / Elektrodynamik

$$\partial/\partial t \neq 0$$

elektrisches Feld E:

$$div\vec{E}(\vec{r}) = \frac{\rho(\vec{r})}{\varepsilon_0}$$

$$\oiint_{a(V)} \vec{E}d\vec{a} = \frac{Q}{\varepsilon_0} = \frac{1}{\varepsilon_0}\iiint_{V(a)} \rho(\vec{r})dV$$

$$rot\vec{E}(\vec{r}) = 0 \quad \boxed{+?????}$$

$$\oint_S \vec{E}d\vec{s} = 0 \quad \boxed{+?????}$$

Es gibt ein elektrisches Wirbel-feld. Ursache ist ***die magnetische Induktion***

magnetisches Feld B:

$$div\vec{B}(\vec{r}) = 0$$

$$\oiint_{a(V)} \vec{B}d\vec{a} = 0$$

$$rot\vec{B}(\vec{r}) = \mu_0 \vec{j}(\vec{r}) \quad \boxed{+?????}$$

$$\oint_{S(a)} \vec{B}d\vec{s} = \mu_0 I = \mu_0 \iint_{a(S)} \vec{j}(\vec{r})d\vec{a} \quad \boxed{+??????}$$

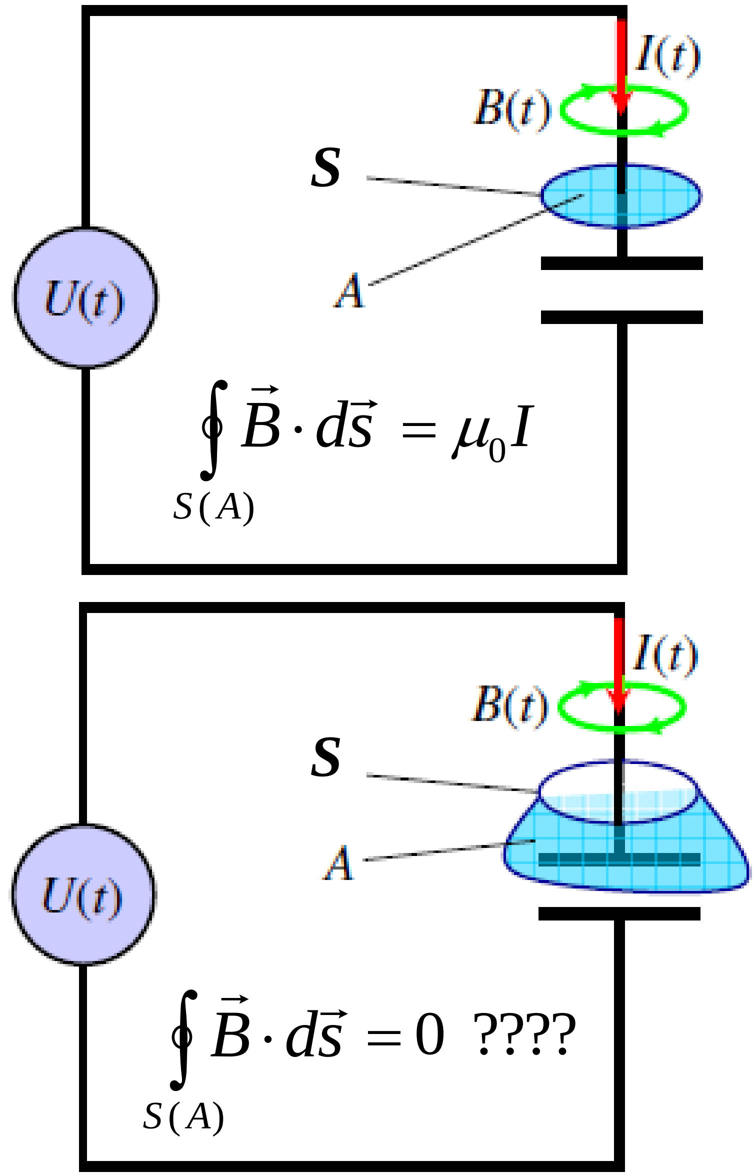
Es gibt eine weitere Ursache für Magnetfelder : ***der elektrische Verschiebungsstrom***

Verschiebungsstrom, endgültige Form der Maxwellgleichungen

Wir betrachten noch einmal das Ampere-sche Gesetz:

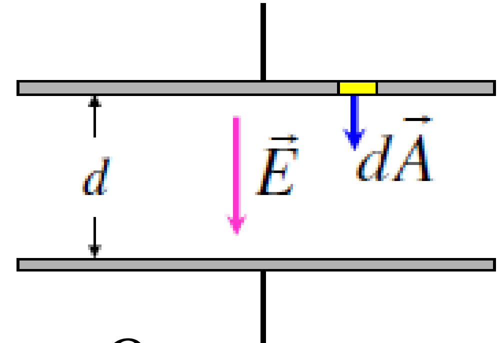
$$\oint\limits_{S(A)} \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \iint\limits_{A(S)} \vec{j} \cdot d\vec{A} = \mu_0 I$$

Die Fläche *A* kann bei bestehendem Rand der Fläche *S(A)* prinzipiell beliebig gewählt werden.
Im rechten Bild erkennt man, dass dann der Leitungsstrom I zwar die obere Fläche durchsetzt, nicht aber die Fläche im unteren Bild. Der Integralausdruck (Linienintegral über S) ist aber definitiv nicht Null.



Betrachtung des Kondensators:

Der Leitungsstrom *I*, der in den Zuleitungen zum Kondensator frei fließen kann, wird durch den Kondensator unterbrochen, da die durch den Strom bewegten Ladungen *Q* auf den Platten des Kondensators verbleiben (bei Aufladung) bzw. Abfließen (bei Entladung).
Zwischen der Änderung von *Q* auf den Platten und dem Leitungsstrom *I* besteht aber ein eindeutiger Zusammenhang.
Dazu betrachten den Kondensator näher:
Wir benutzen dazu den Zusammenhang zwischen Ladung *Q* und *E*-Feld:



$$\oiint_A \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\varepsilon_0}$$

im Fall des Plattenkondensator gilt dann einfach: $Q = \varepsilon_0 E \cdot A$

Die zeitliche Ableitung der gesamten Ladung *Q* des Kondensators als Funktion der Zeit ist gerade gleich dem Leitungsstrom *I* und es folgt

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \oiint_A \vec{E} \cdot d\vec{A} = I$$

Diese Aussage kann verallgemeinert werden. Die zeitliche Änderung eines elektrischen Flusses ist einem Stromfluss I_v äquivalent:

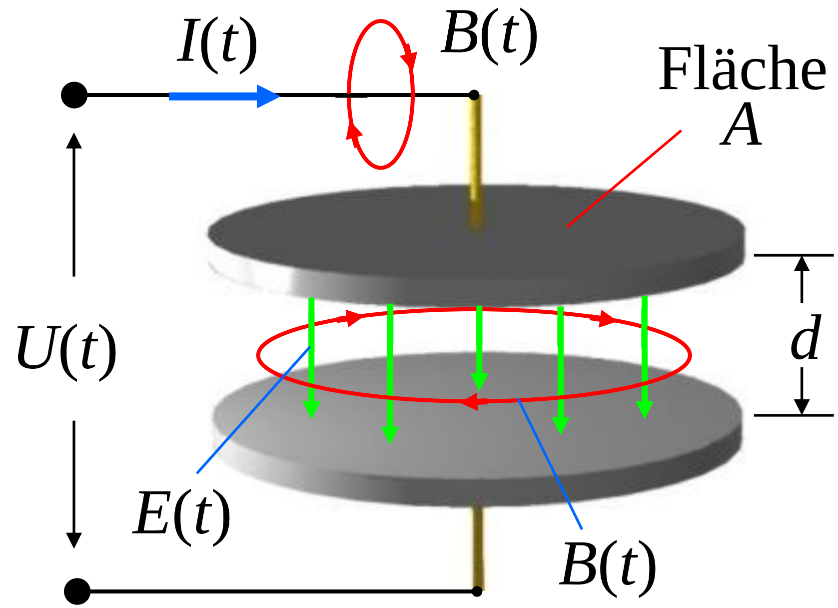
$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \iint_A \vec{E} \cdot d\vec{A} = I_V$$

I_v heißt ***Verschiebungsstrom***

Magnetfelder werden können also neben Strömen auch von Verschiebungs-strömen, d.h. zeitlich sich ändernden elektrischen Flüssen erzeugt werden:

$$\oint_{S(A)} \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \left(I + I_V \right)$$

Innerhalb des Kondensators existiert also auch ein Magnetfeld B.



Wir setzen ein und erhalten endgültig

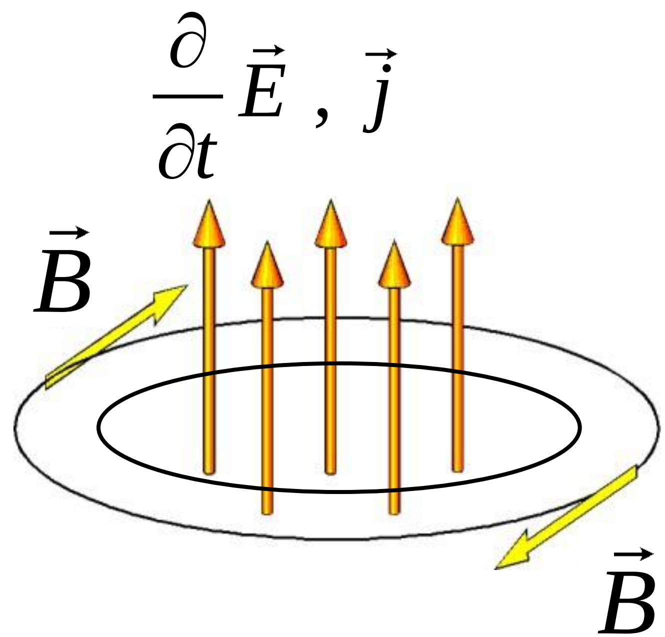
$$\oint_{S(A)} \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \iint_{A(S)} \vec{j} \cdot d\vec{A} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \iint_{A(S)} \vec{E} \cdot d\vec{A}$$

Die integrale Maxwellgleichung kann wieder in die differentielle bzw. lokale Maxwellgleichung überführt werden. Dazu benutzen wird den Satz von Stokes und erhalten:

$$\oint_{S(A)} \vec{B}\cdot d\vec{s} = \iint_{A(S)} \left(\vec{\nabla}\times\vec{B}\right)\cdot d\vec{A} = \iint_{A(S)} rot\vec{B}\cdot d\vec{A} = \iint_{A(S)} \left(\mu_0 \vec{j} + \mu_0\varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t}\vec{E}\right)\cdot d\vec{A}$$

S ist hier wieder die Randkurve der Fläche *A*.
Die Fläche A ist beliebig wählbar, ebenso S, daher müssen auch die Integranden die Gleichung erfüllen:

$$\boxed{\vec{\nabla}\times\vec{B} = rot\vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0\varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t}\vec{E}}$$



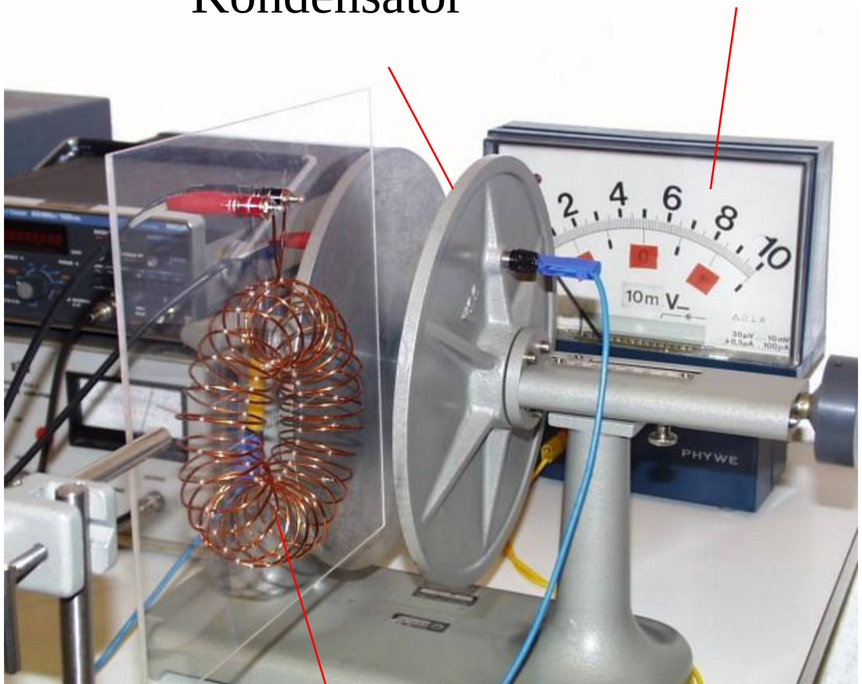
Dies ist die gesuchte Maxwellsche Gleichung in differentieller Form.

Experiment: *Magnetfeld eines Verschiebungsstroms*

Der Kondensator wird durch hoch-frequenten Wechselstrom geladen

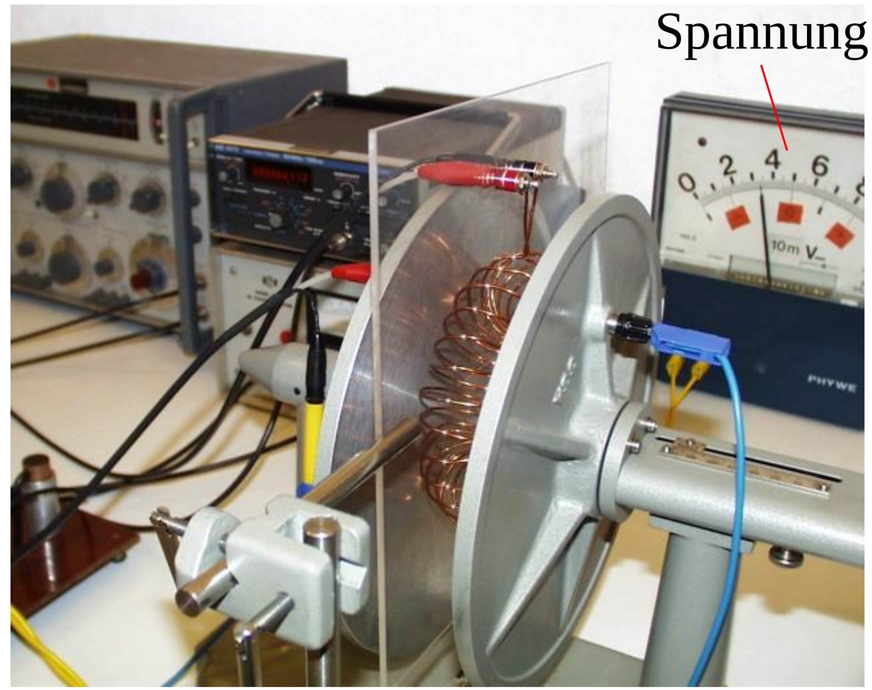
Kondensator

HF-Voltmeter



Toroidspule zur Vermessung der kreisförmigen Magnetfelder

induzierte Spannung



Messanordnung

Übersicht über die Maxwellgleichungen im Vakuum inklusive der offiziellen Nummerierung

Integrale Form $\Leftrightarrow$ **Differentielle Form**

(1) $$\oiint_{A(V)} \vec{E}\cdot d\vec{A} = \frac{1}{\varepsilon_0}\iiint_{V(A)} \rho\, dV \quad\Leftrightarrow\quad \vec{\nabla}\cdot\vec{E} = div\vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

(2) $$\oiint_{A} \vec{B}\cdot d\vec{A} = 0 \quad\Leftrightarrow\quad \vec{\nabla}\cdot\vec{B} = div\vec{B} = 0$$

(3) $$\oint_{S(A)} \vec{E}\cdot d\vec{s} = -\frac{\partial}{\partial t}\iint_{A(S)} \vec{B}\cdot d\vec{A} \quad\Leftrightarrow\quad \vec{\nabla}\times\vec{E} = rot\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}$$

(4) $$\oint_{S(A)} \vec{B}\cdot d\vec{s} = \mu_0\iint_{A(S)}\left(\vec{j}+\varepsilon_0\frac{\partial}{\partial t}\vec{E}\right)\cdot d\vec{A} \quad\Leftrightarrow\quad \vec{\nabla}\times\vec{B} = rot\vec{B} = \mu_0\left(\vec{j}+\varepsilon_0\frac{\partial}{\partial t}\vec{E}\right)$$

Inhalt der Vorlesung Physik A2 / B2

3. Wärmelehre

Druck und Temperatur: Das ideale Gas
Wärmemenge, spezifische Wärme
Die Hauptsätze der Wärmelehre

4. Elektrizitätslehre, Elektrodynamik

Die Ladung und elektrostatische Felder
- SEMESTERENDE -
Elektrischer Strom
Magnetische Felder und Magnetostatik
Zeitlich veränderliche Felder, Elektrodynamik
Wechselstromnetzwerke
Die Maxwellschen Gleichungen
Elektromagnetische Wellen und Strahlung
Relativität der Felder – Relativitätstheorie

Wechselstromnetzwerke

Wechselspannungen und ***Wechselströme*** haben die Form

$$U(t) = U_0 \cos(\omega t + \psi),$$

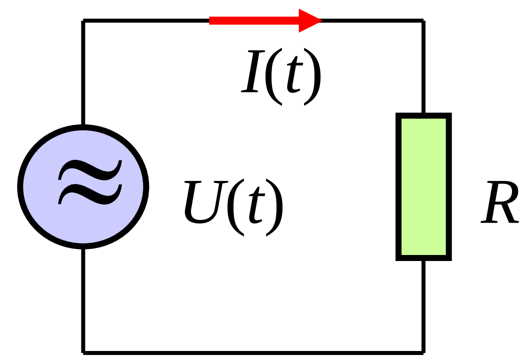
$$I(t) = I_0 \cos(\omega t + \varphi)$$

Dabei sind ψ und φ Startphasen bezüglich $t = 0$. $\omega = 2\pi f$ ist die Kreisfrequenz der Wechselgröße, f seine Frequenz.

Wechselspannungen haben gegenüber Gleichspannungen erhebliche Vorteile. Zunächst entstehen sie quasi automatisch bei der Erzeugung durch Generatoren (Induktion). Über Transformatoren kann man Wechselspannungen und –ströme herauf- und herunter transformieren.

Wir wollen zunächst die Verhältnisse beim Ohmschen Widerstand R betrachten.

Ohmscher Widerstand R



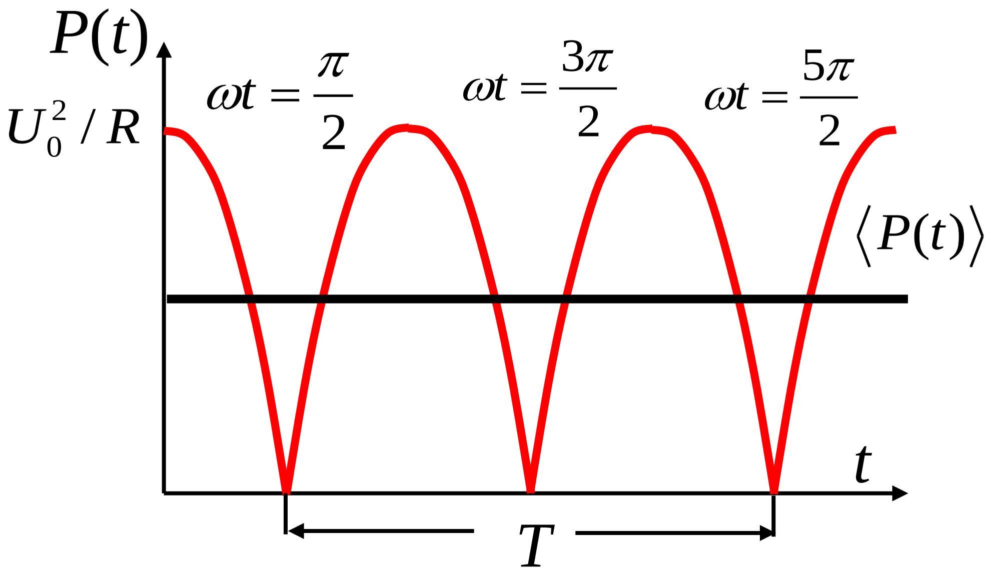
Strom und Spannung sind in Phase.
Aus $U(t) = U_0 \cos(\omega t)$
folgt sofort

$$I(t) = \frac{U(t)}{R} = \frac{U_0}{R}\cos(\omega t)$$

$$I(t) = I_0 \cos(\omega t)$$

Wir können auf einfache Weise sofort die in Wärme umgesetzte elektrische Leistung P angeben

$$P(t) = U(t)I(t) = \frac{U_0^2}{R}\cos^2(\omega t)$$



Die Leistung *P(t)* ist also zeitabhängig. Wir berechnen daher den zeitlichen Mittelwert durch Integration über die Periodendauer T

$$\langle P(t)\rangle = \frac{1}{T}\int_0^T P(t)dt = \frac{U_0^2}{TR}\int_0^T \cos^2 \omega t dt$$

$$= \frac{4U_0^2}{TR}\int_0^{T/4} \cos^2 \omega t dt$$

Wir erhalten schließlich (Übungsaufgabe):

$$\langle P(t)\rangle = \frac{1}{2}\frac{U_0^2}{R} = \frac{1}{2}P_{\max}$$

Im zeitlichen Mittel wird wirkt also nur die Hälfte der maximalen Verlustleistung. Das zeitliche Mittel wird deshalb auch als ***Wirkleistung*** bezeichnet.

Im Fall der Gleichspannung gilt natürlich

$$\langle P(t)\rangle = \frac{U_0^2}{R}$$

Für die ***Wirkleistung*** gilt also:

$$\langle P(t)\rangle_{=} = \frac{U_0^2}{R} \qquad \langle P(t)\rangle_{\approx} = \frac{1}{2}\frac{U_0^2}{R}$$

Man definiert daher eine „effektive Spannung" und „effektiven Strom", die an einem ohmschen Widerstand dieselbe mittlere Leistung bewirken wie eine gleichgroße Gleichspannung.

$$U_{eff} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}, \qquad I_{eff} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$$

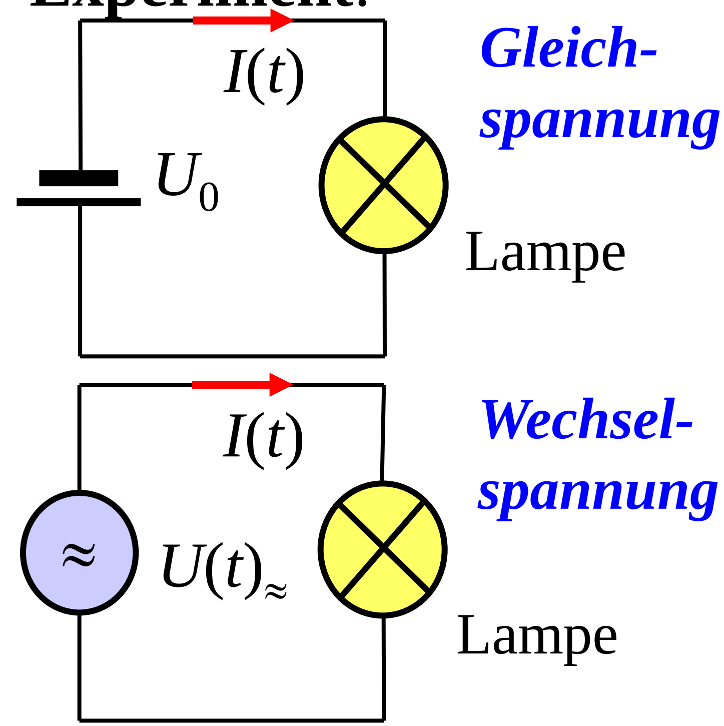
Man rechnet dann formal wie bei der Gleichspannung und erhält

$$\langle P(t)\rangle_{\approx} = U_{eff}\cdot I_{eff} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}\frac{I_0}{\sqrt{2}} = \frac{U_0^2}{2R}$$

Beispiel: Unsere Haushaltsversorgung hat eine Effektivspannung von $U_{eff} = 230$ V. Die Spitzenspannung ist gegeben durch

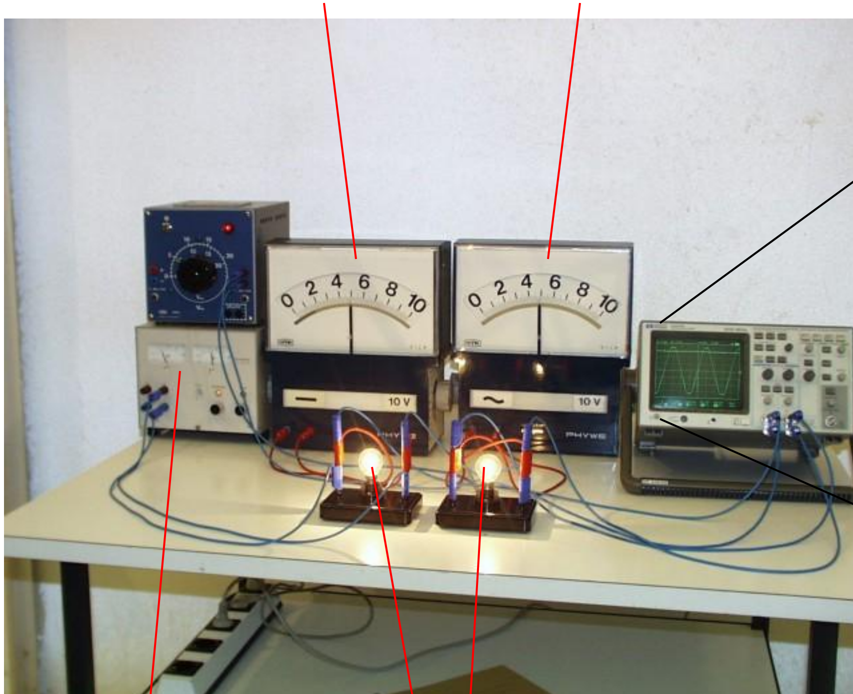
$$U_0 = \sqrt{2}\,U_{\text{eff}} = \sqrt{2}\cdot 230\,\text{V} = 325\,\text{V}\ (!)$$

Experiment:



Experiment: Effektive Spannung

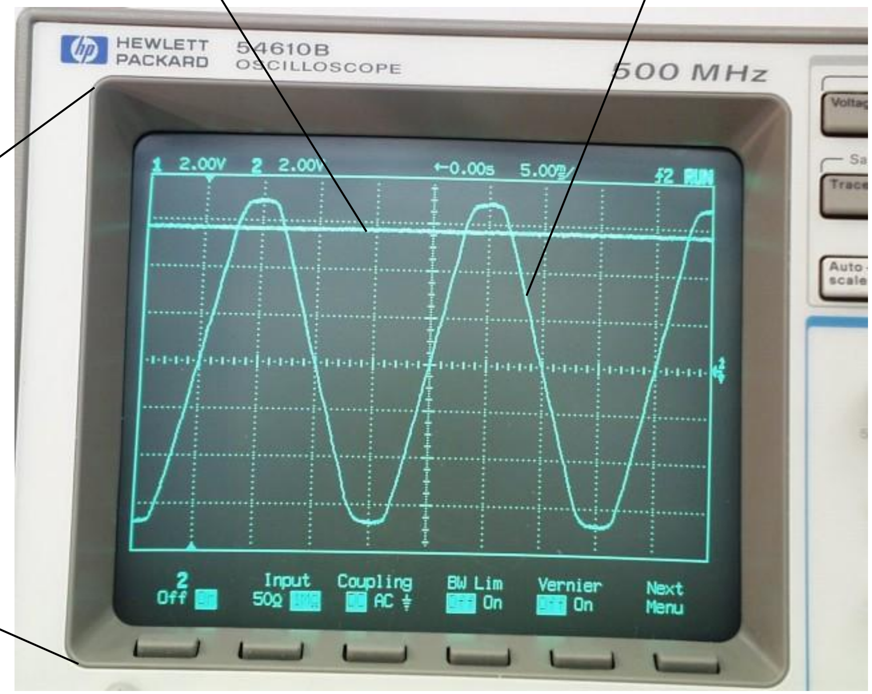
Gleich-spannung Wechsel-spannung



Netz-geräte

Lampen

Gleich-spannung Wechsel-spannung



Die baugleichen Lampen werden auf gleiche Helligkeit eingestellt

Gleiche Helligkeit = gleiche mittlere Leistung = gleiche Wirkleistung