



➤ Magnetismus

3.1 Grunderscheinungen in Experimenten

3.2 Lorentzkraft, Kraft auf bewegte Ladungen

3.3 Quellen des magnetischen Feldes

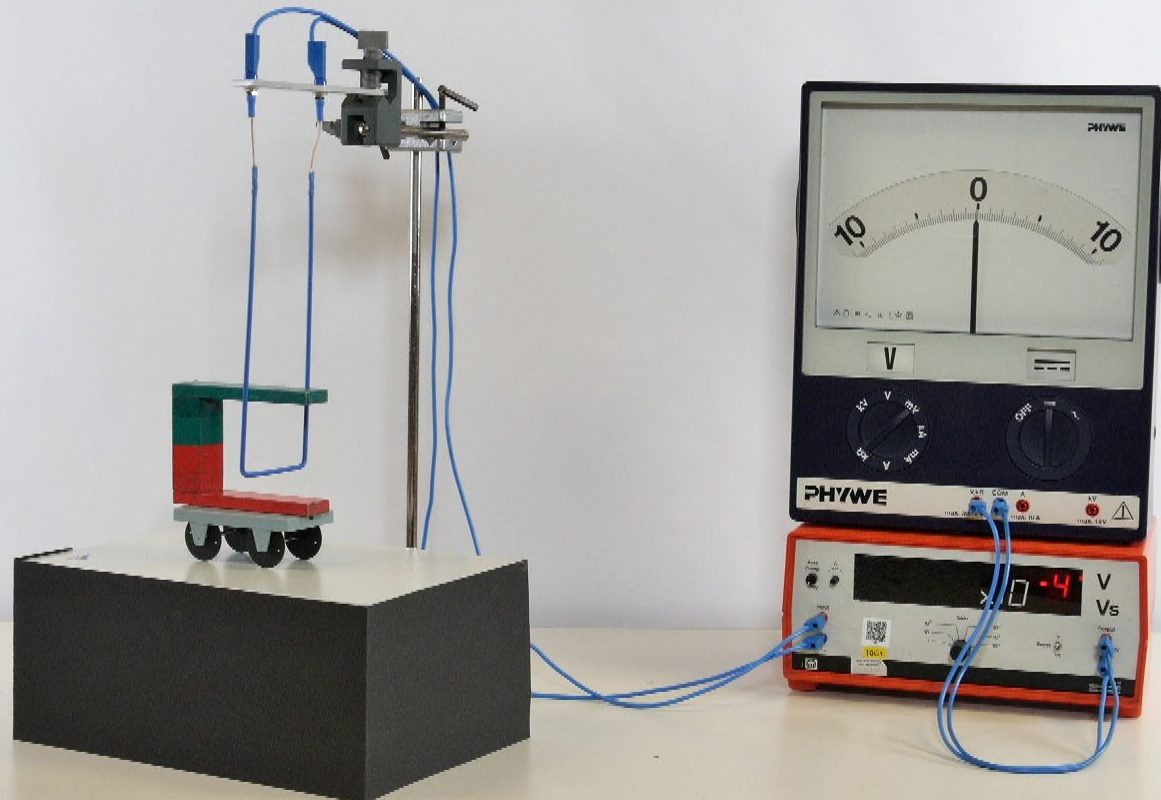
3.4 Materie im Magnetfeld

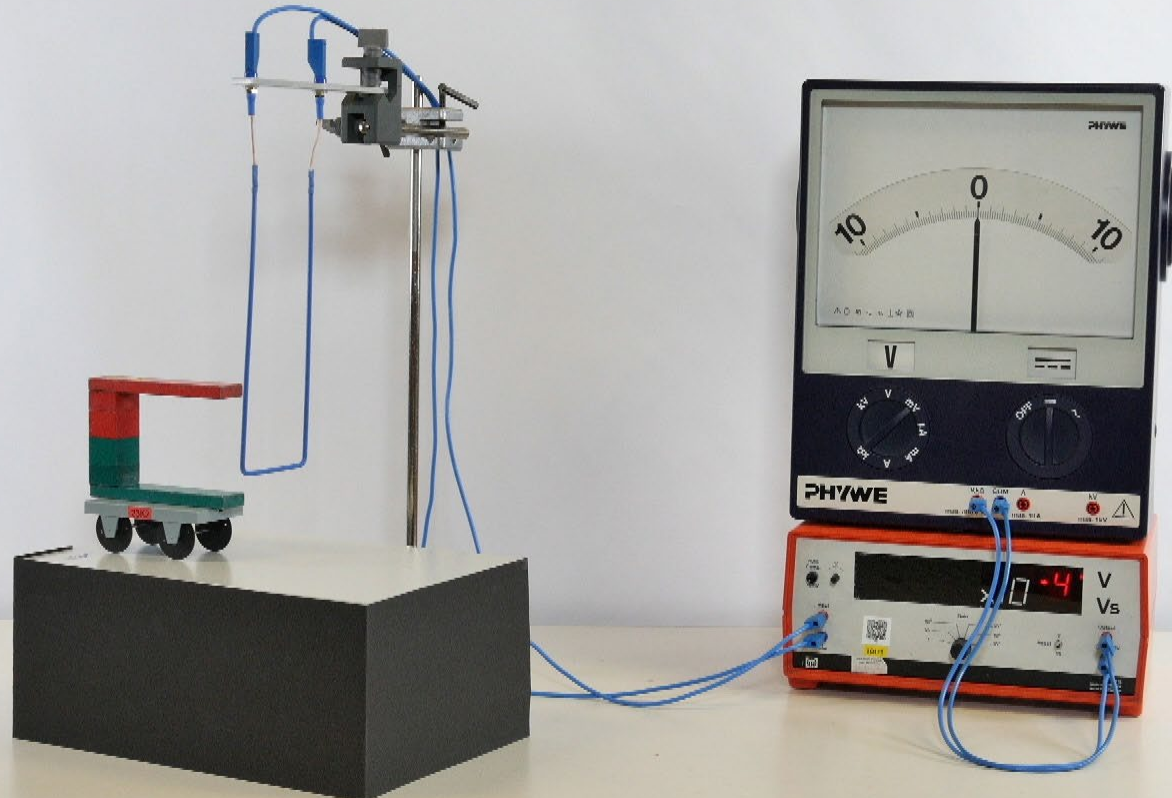
3.5 Induktion

3.6 Energie des Magnetfeldes



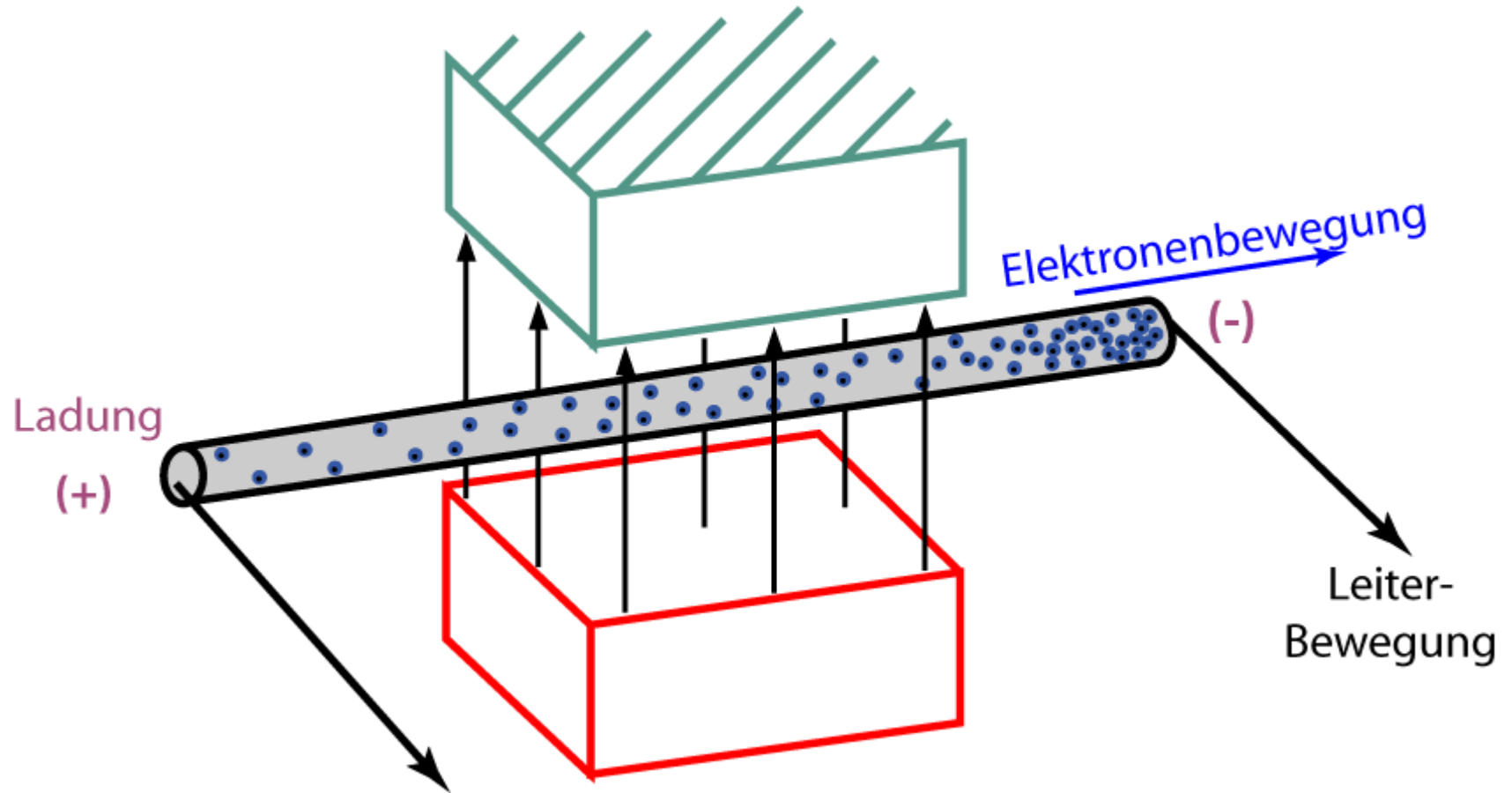
➤ Induktion

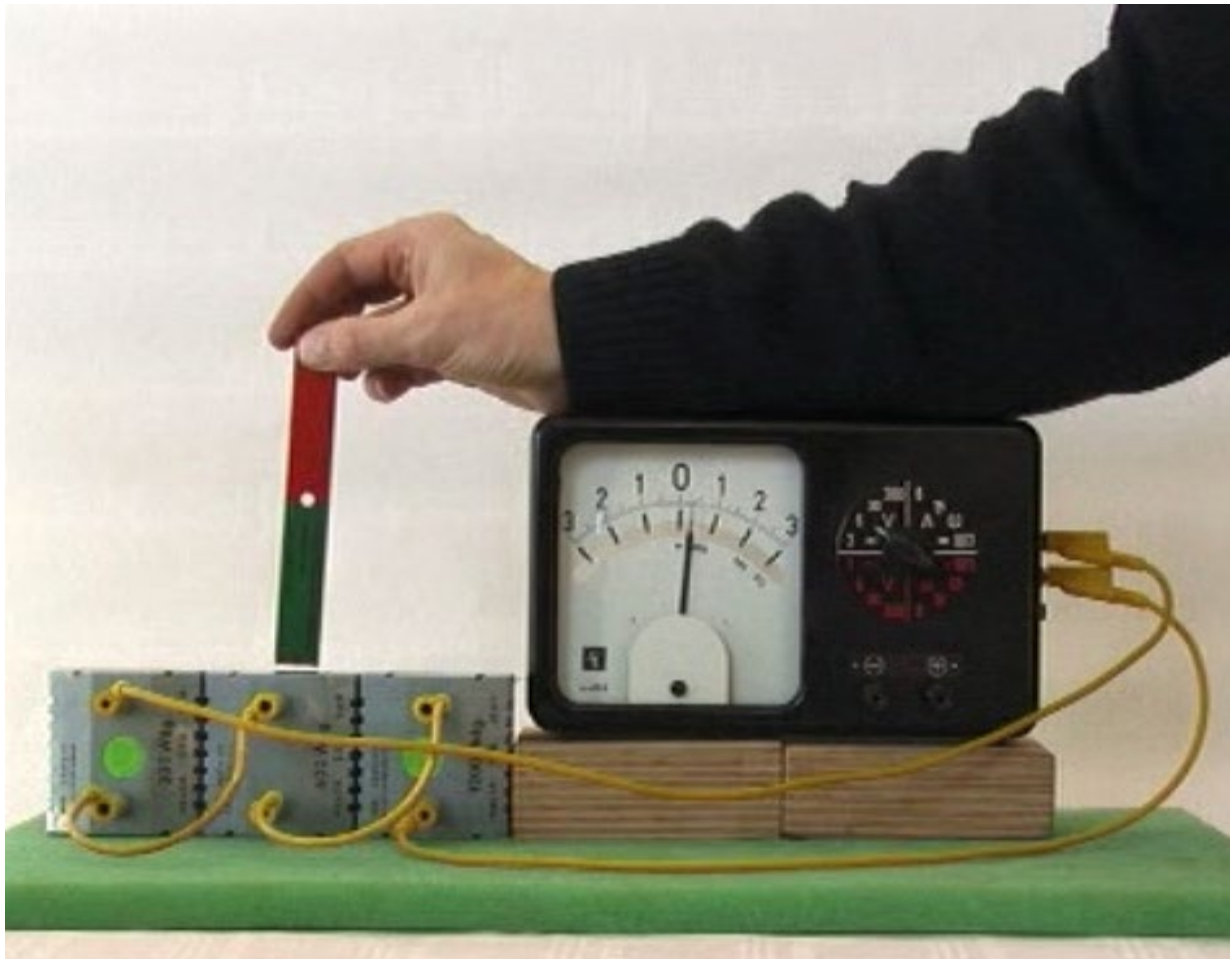






■ Induktion

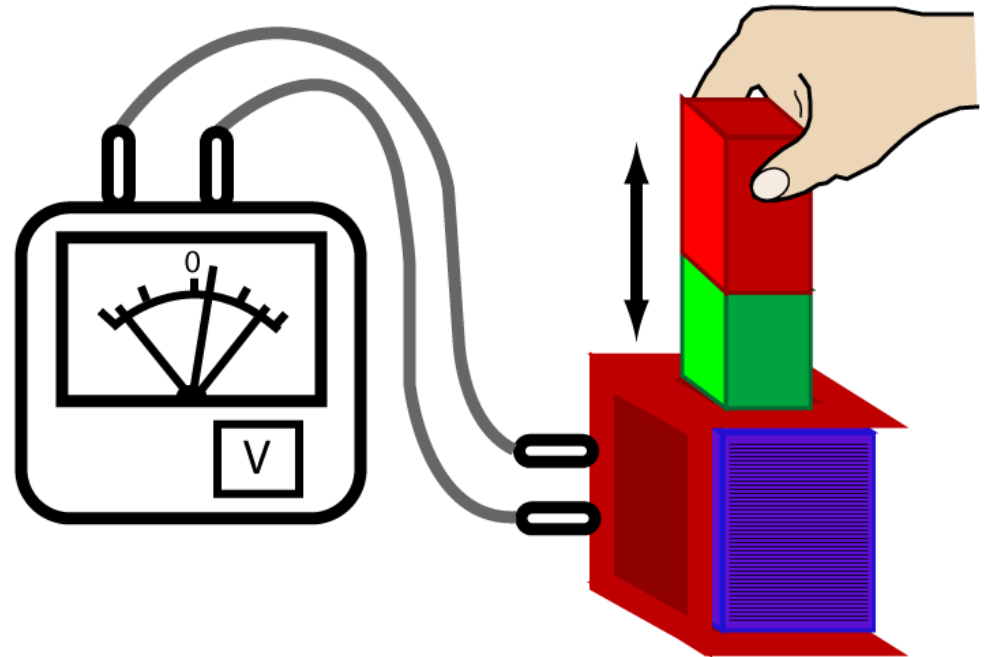




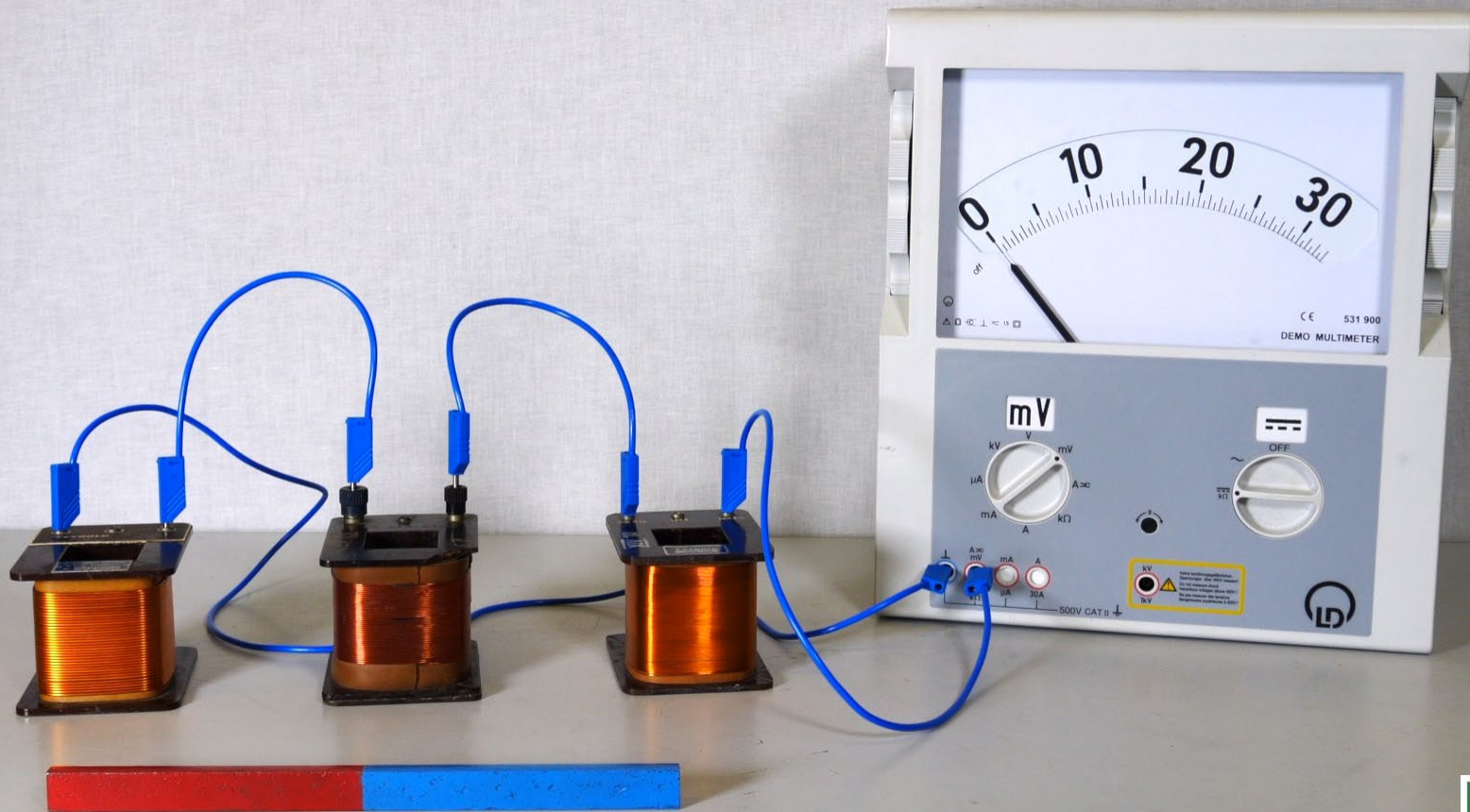
https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/3-5C-Indukti1.m4v



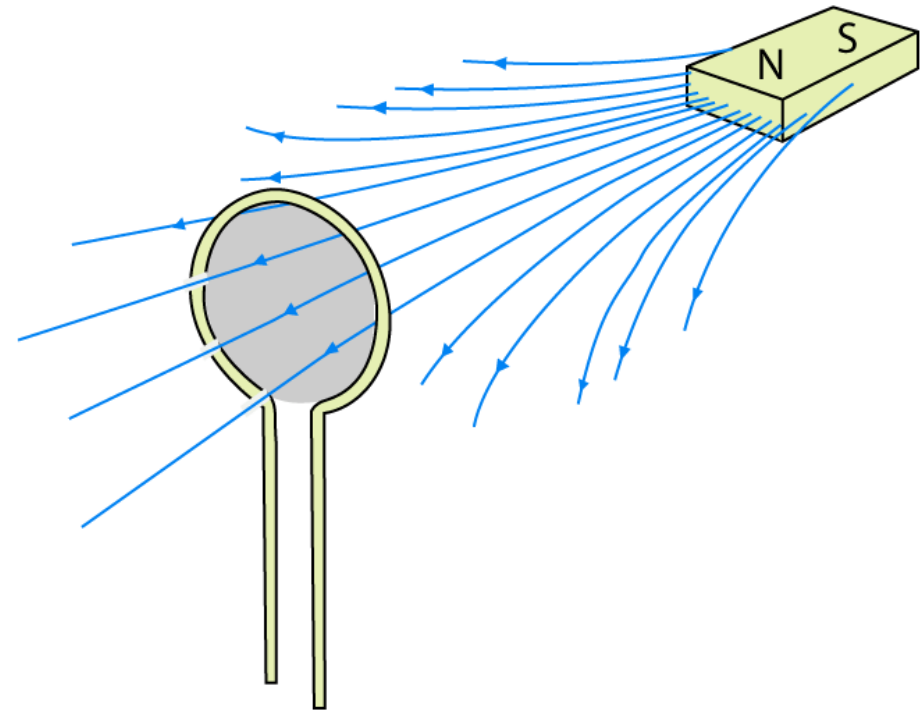
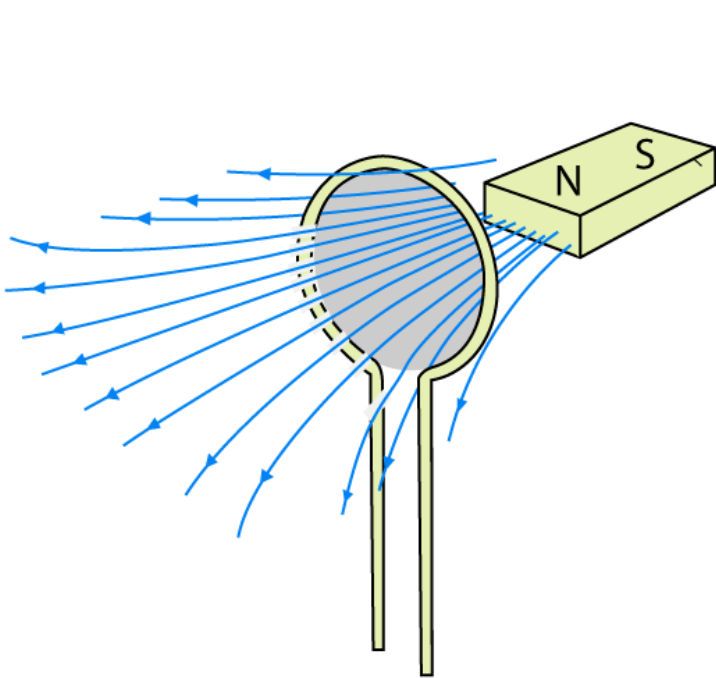
- Induktion



Induktion
Michael Faraday 1831



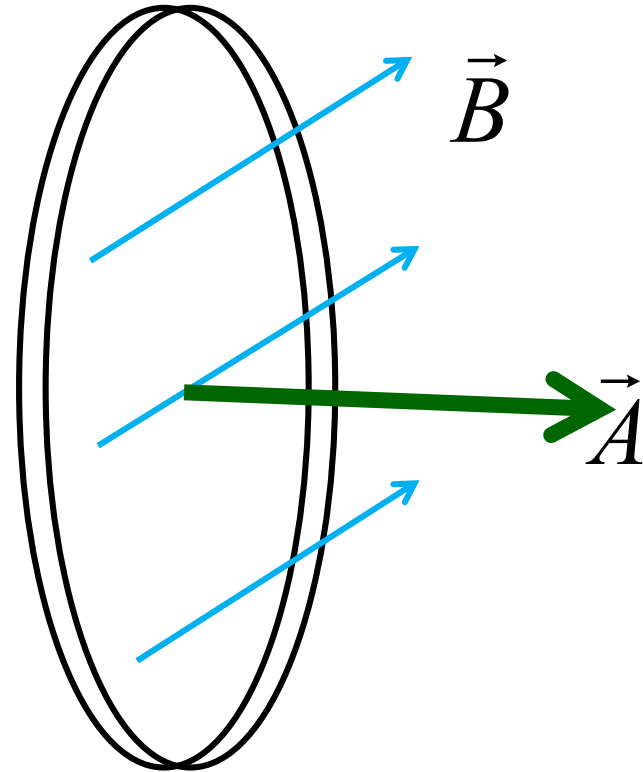
■ Induktion



Der magnetische Fluss

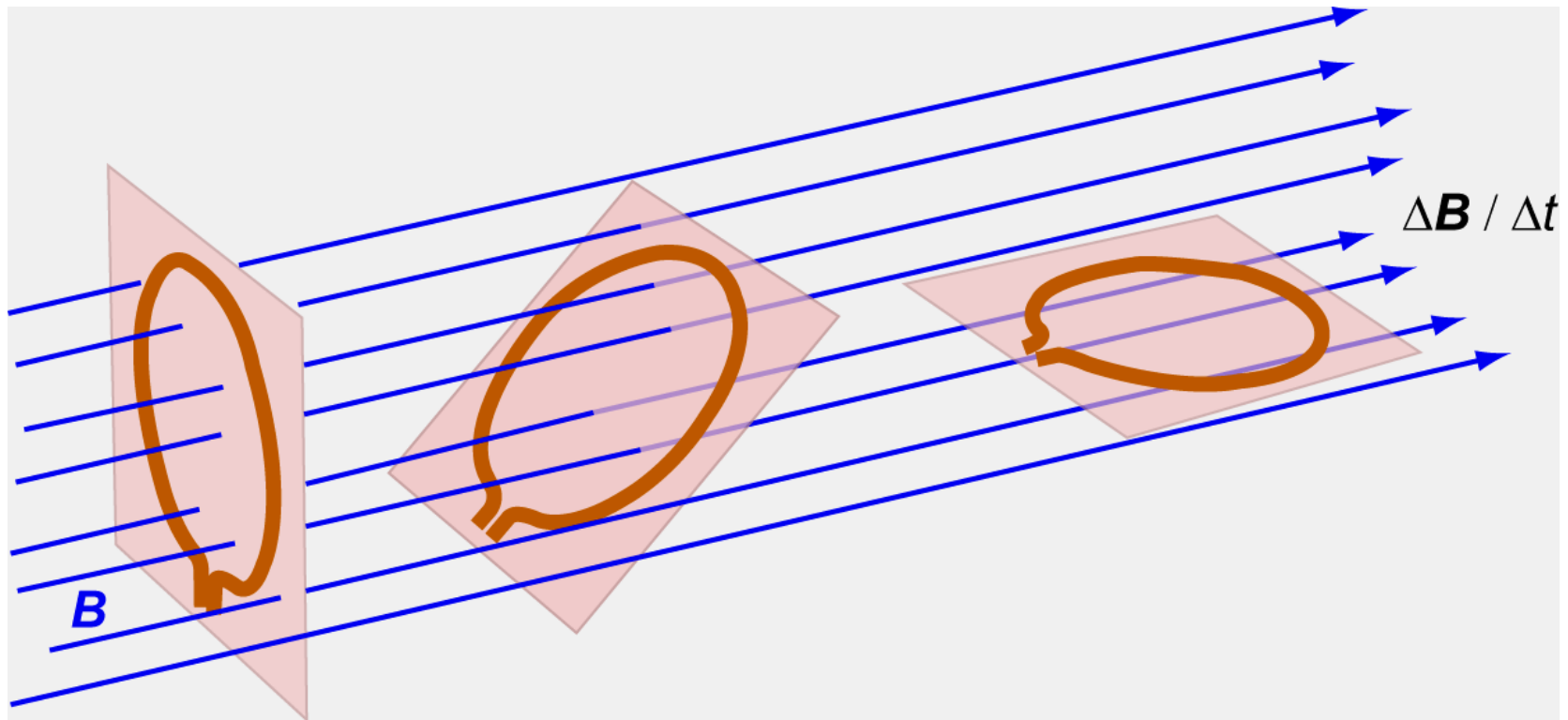
$$\phi_M = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

$$[\phi_M] = 1T \cdot m^2 = 1Wb$$



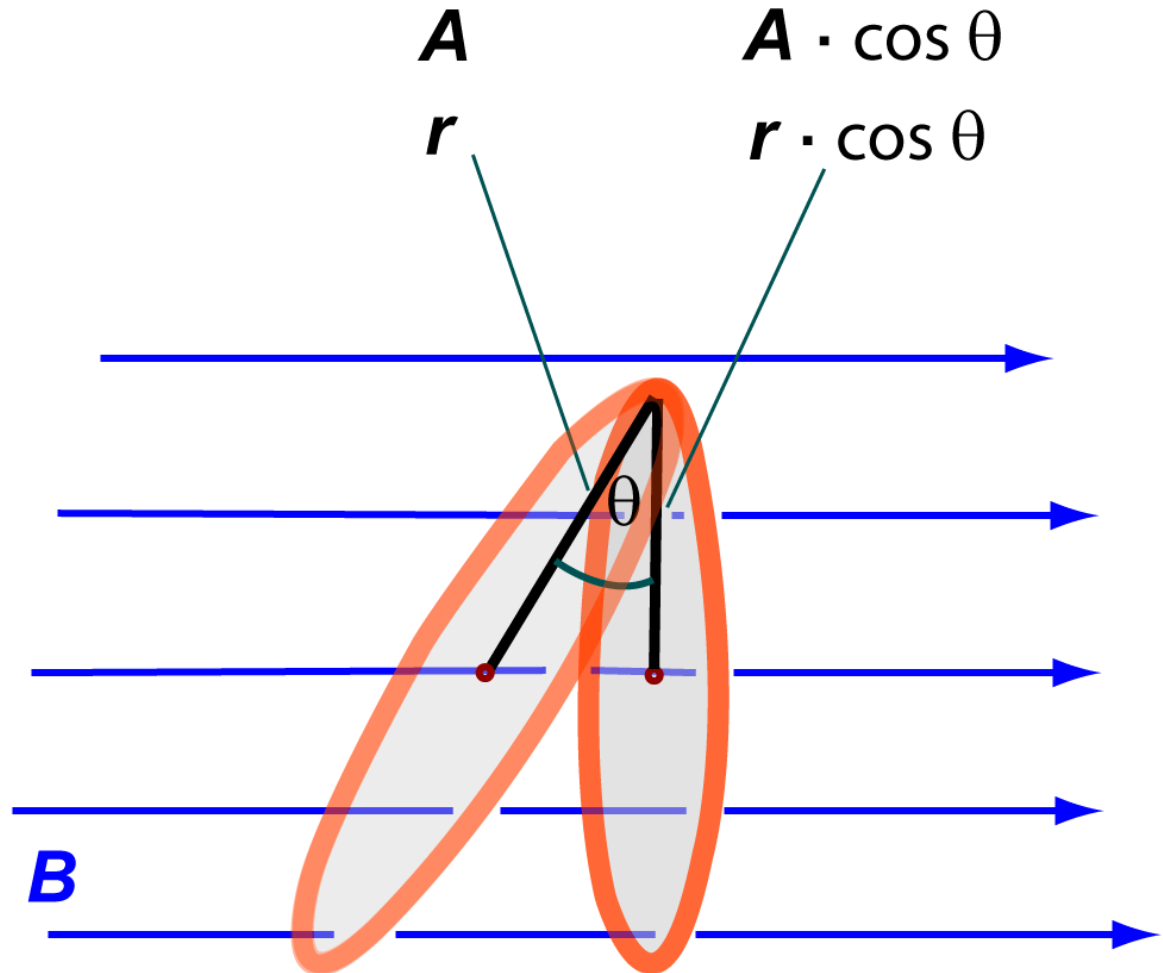
[analog zum elektrischen Fluss]

- Der magnetische Fluss





- Der magnetische Fluss





Beispiel: Wie groß ist der magnetische Fluss durch eine Spule mit einer Länge von 40 cm, einem Radius von 2,5 cm, 600 Windungen und einer Stromstärke von 7,5 A?



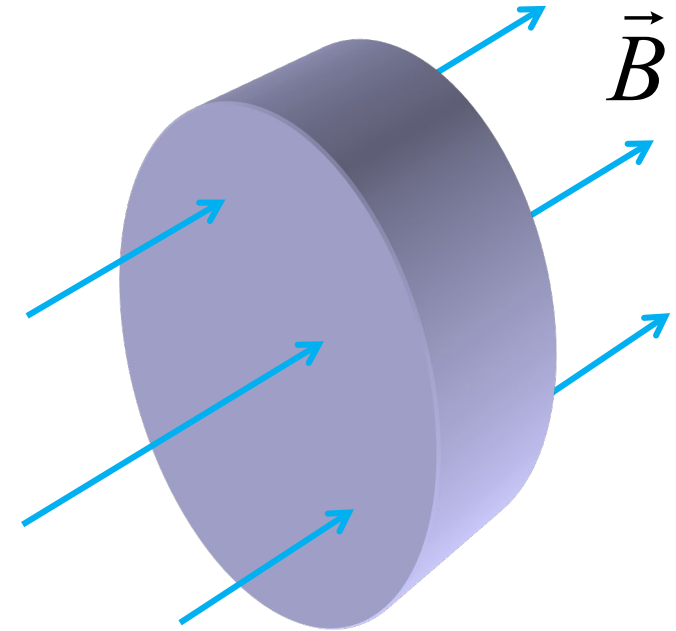
Mitschreiben



Mitschreiben

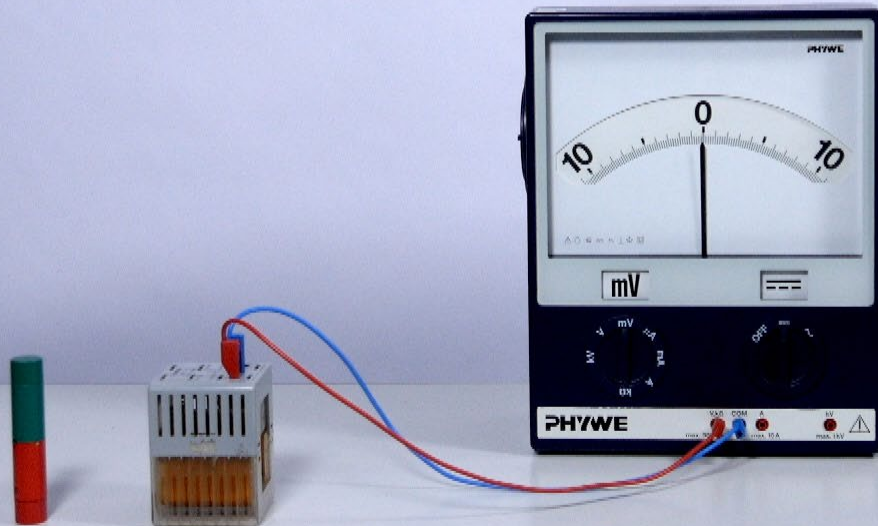
„Gaußsches Gesetz des Magnetismus“:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

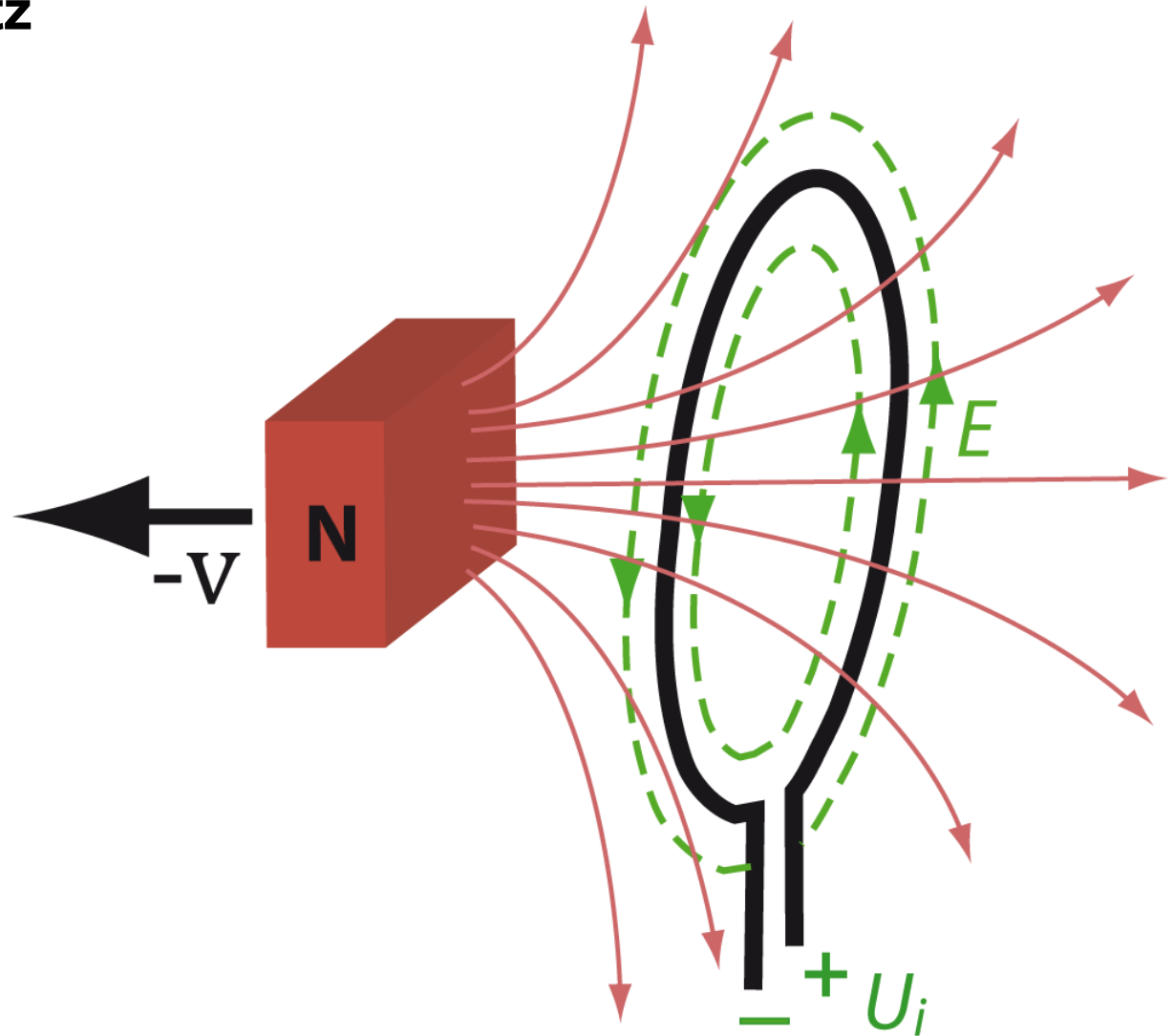


[analog zum elektrischen Fluss] – aber:

(Es gibt keine magnetischen Quellen und Senken;
 B -Feldlinien sind letztlich immer geschlossen)



- Induktionsgesetz





Experimentell: Immer wenn sich das Magnetfeld einer Spule ändert, wird an den Enden der Spule eine Spannung induziert.

$$U_{ind} = -\dot{\phi} = -\frac{d\phi}{dt}$$

"Die Induktionsspannung ist proportional zur Flussänderung."



Experimentell: Immer wenn sich das Magnetfeld einer Spule ändert, wird an den Enden der Spule eine Spannung induziert.

$$U_{ind} = -\dot{\phi} = -\frac{d\phi}{dt}$$

$$\oint \vec{E} d\vec{s} = -\frac{d\phi}{dt} \cdot N$$

bei Spule mit N Windungen

Flussänderung durch

Änderung von \vec{B}

Änderung von \vec{A}

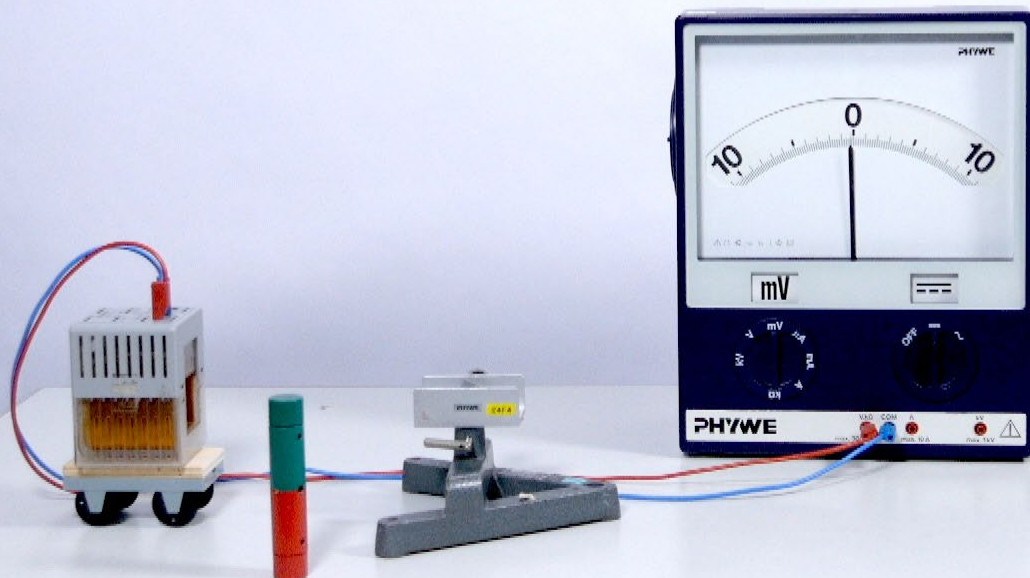


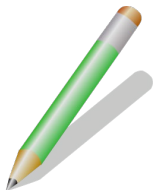
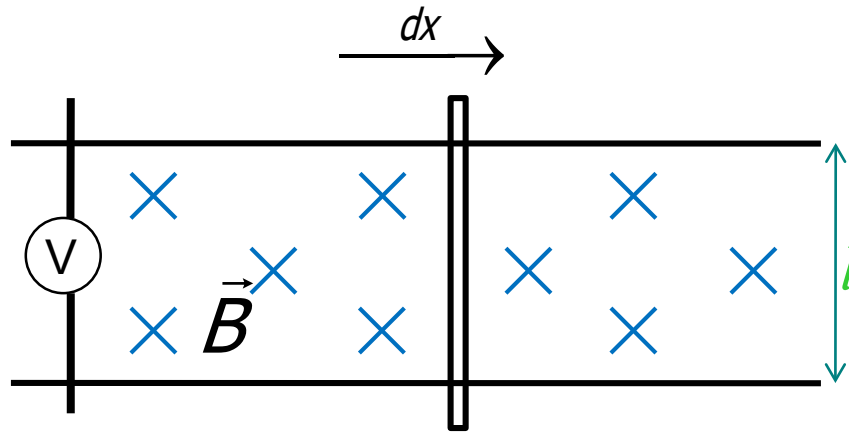
Exkurs zur Mathematik

$$\phi = \phi(A, B)$$

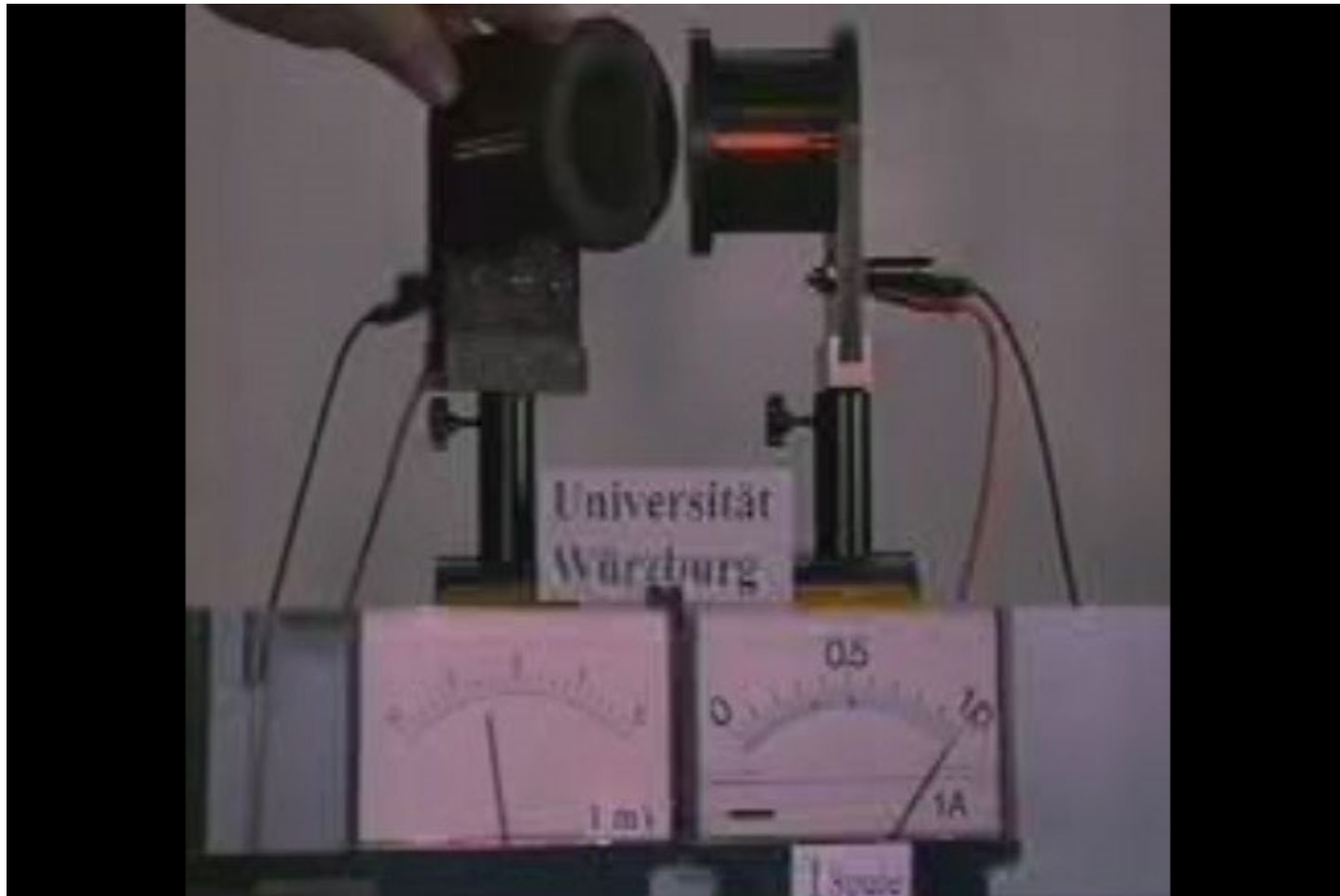
$$\frac{d\phi}{dt} = A \frac{dB}{dt} + B \frac{dA}{dt}$$

=> Zwei Möglichkeiten: A oder B ändern



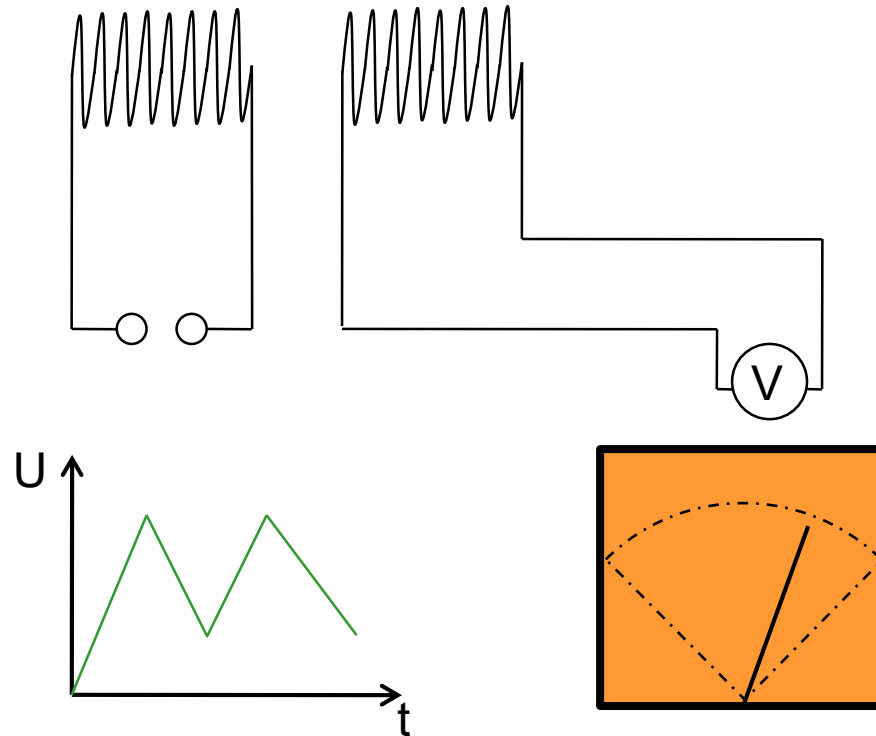


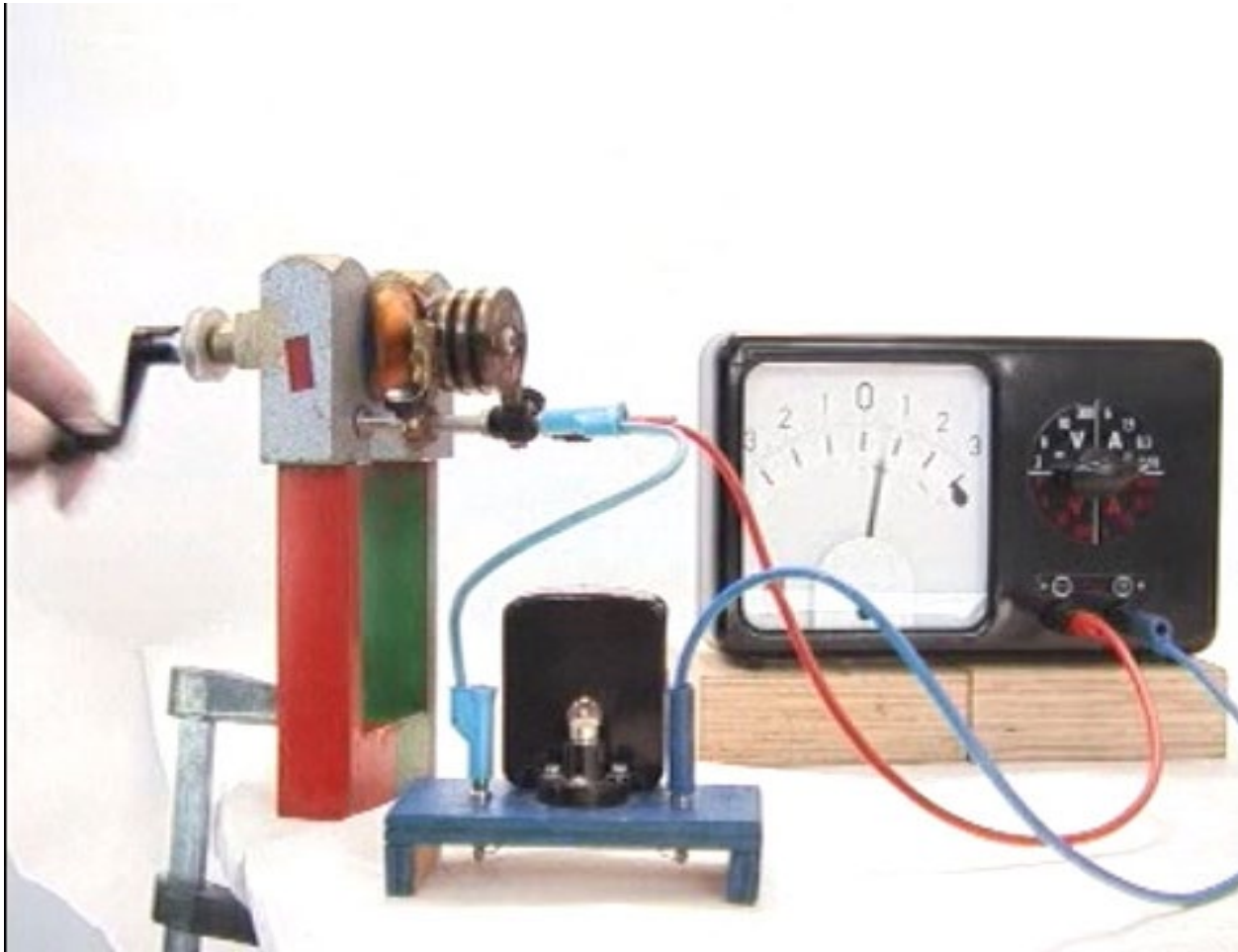
Mitschreiben



https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/3-5H-Induktio.m4v

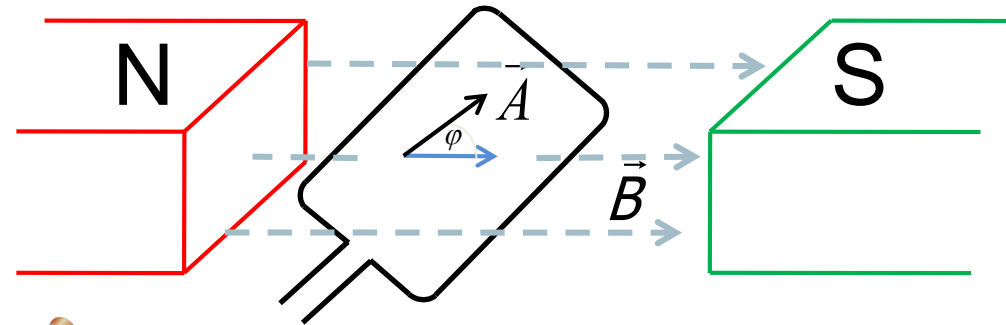
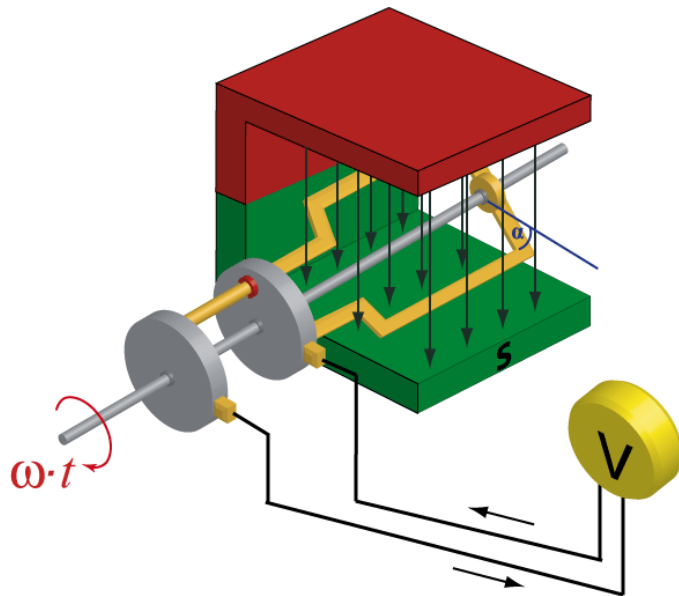
- a) Magnet vor Spule
- b) Spule vor Spule



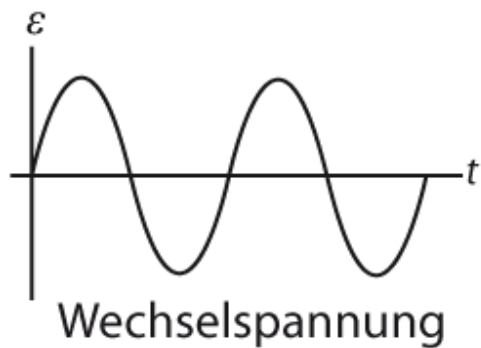
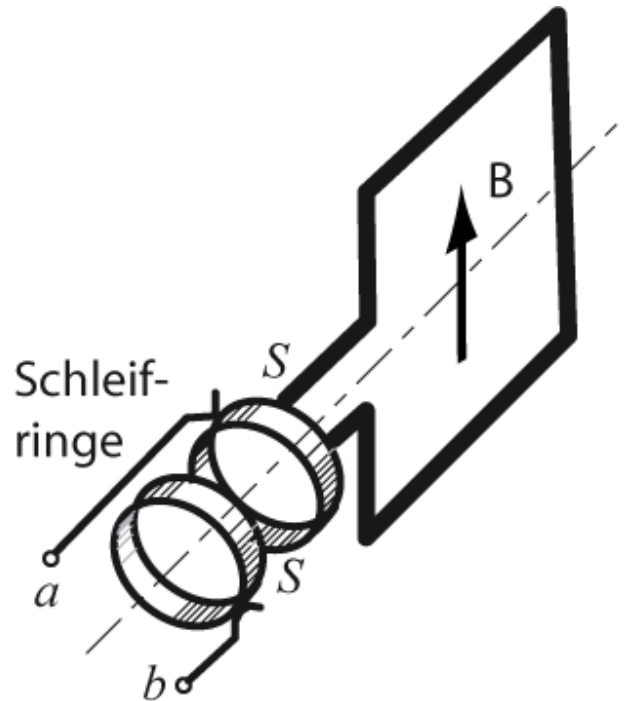


https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/3-5K-Generat1.m4v

Generator: Eine Spule wird im Magnetfeld gedreht.

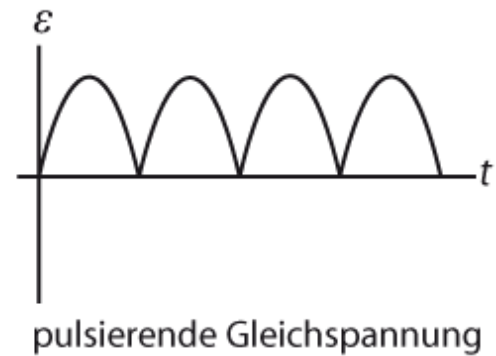
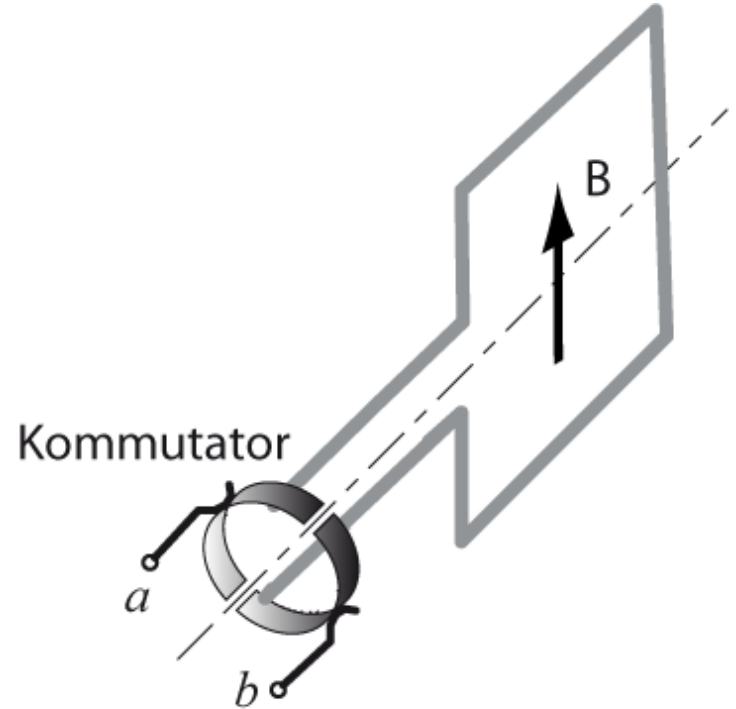
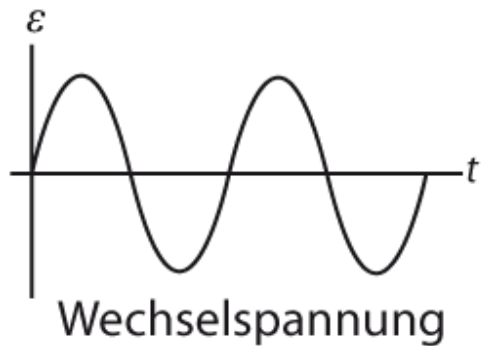
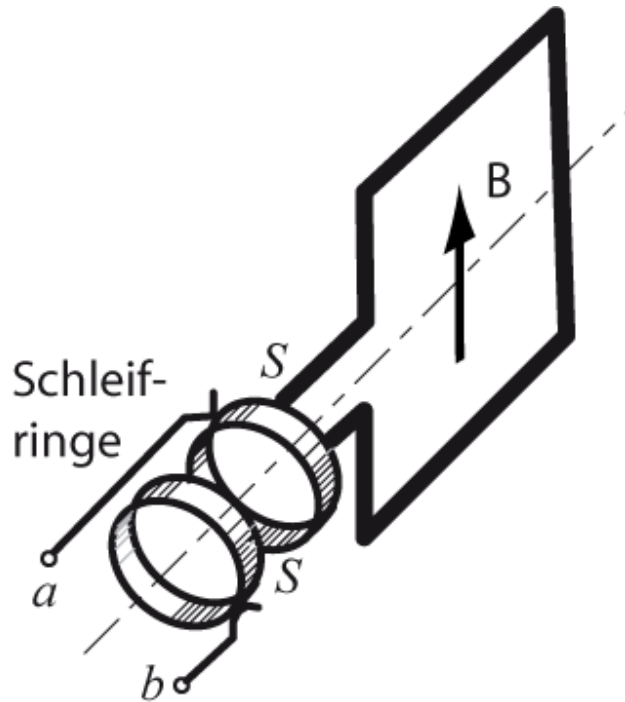


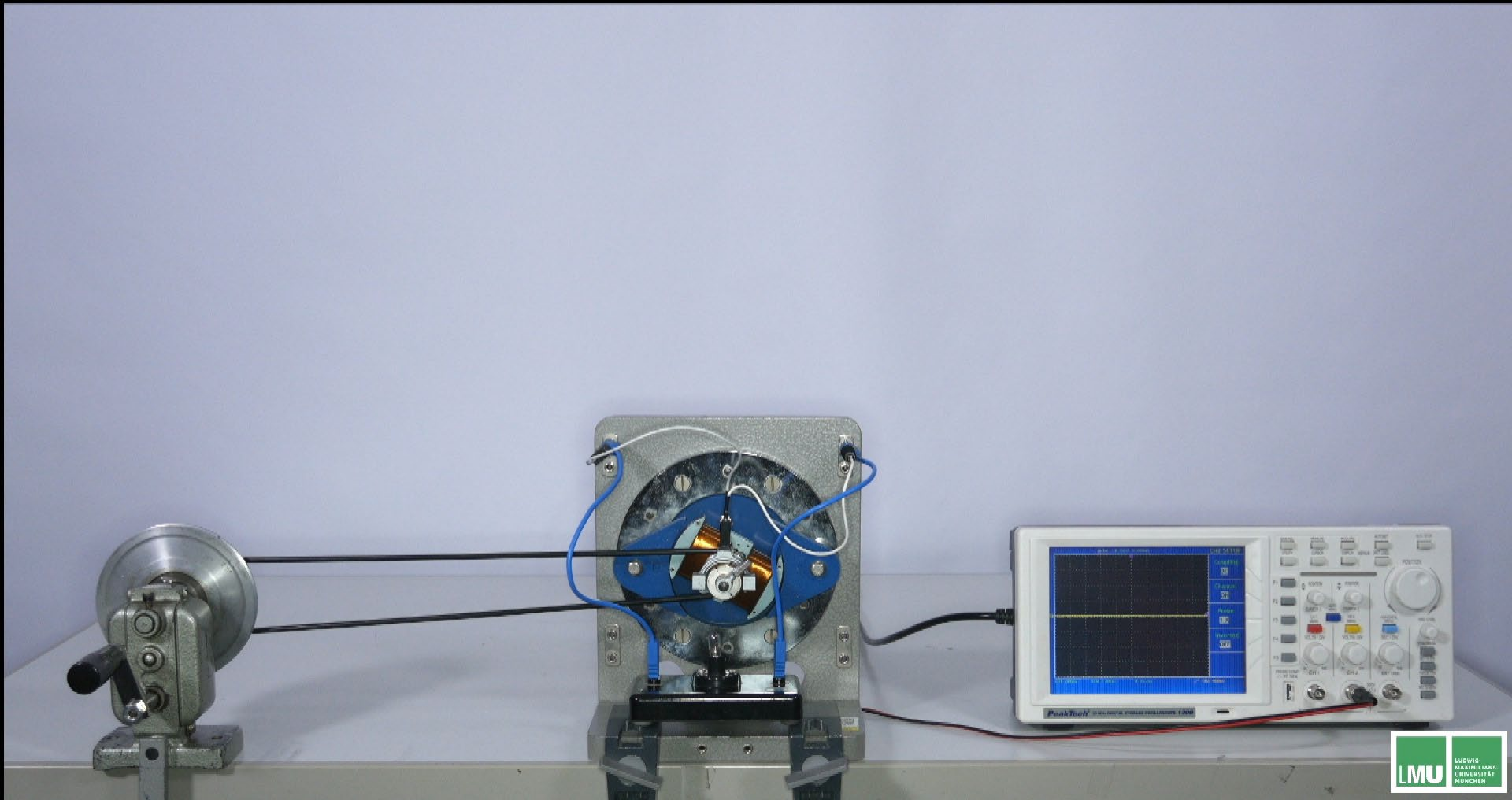
■ Kommutator



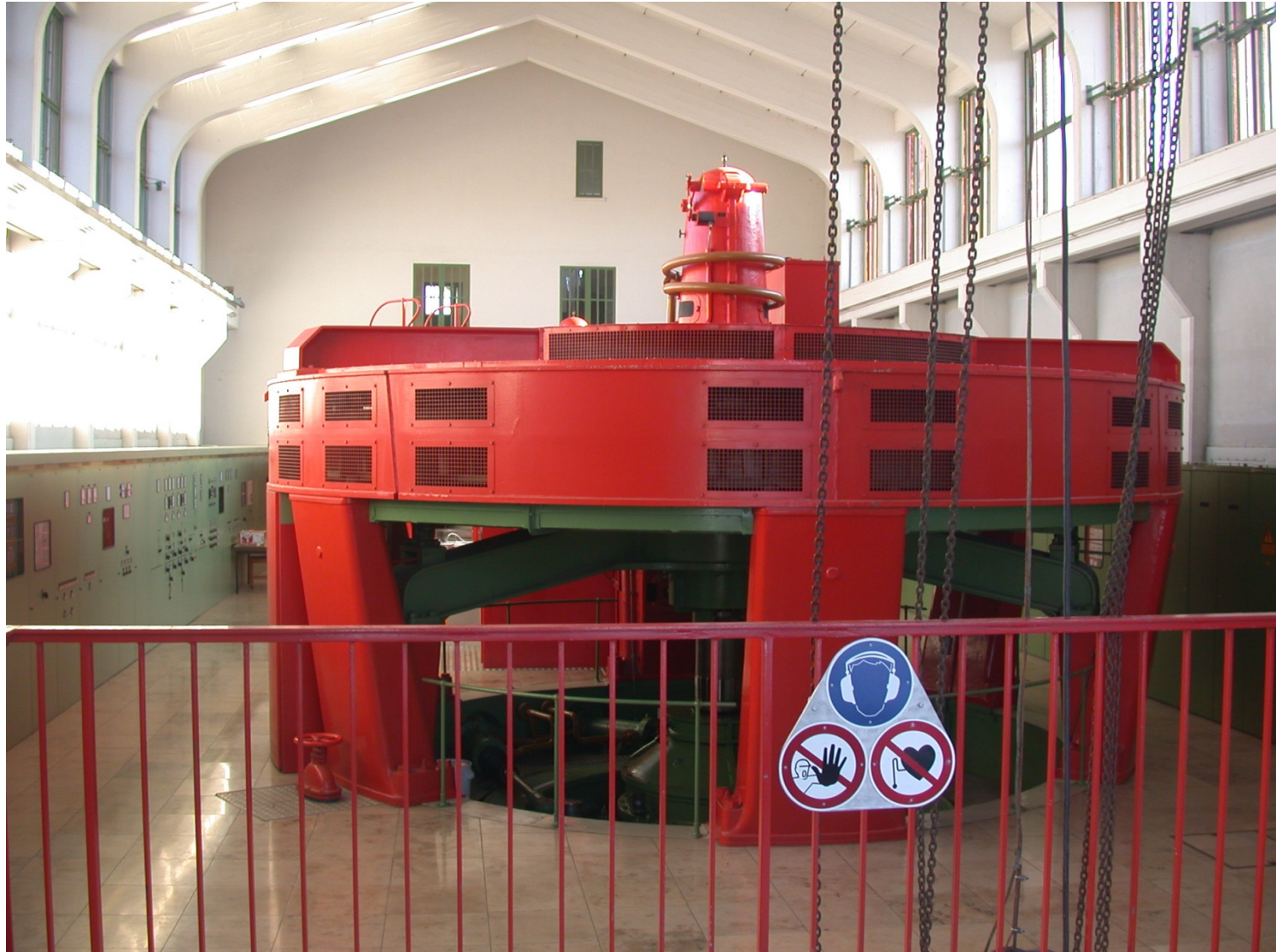


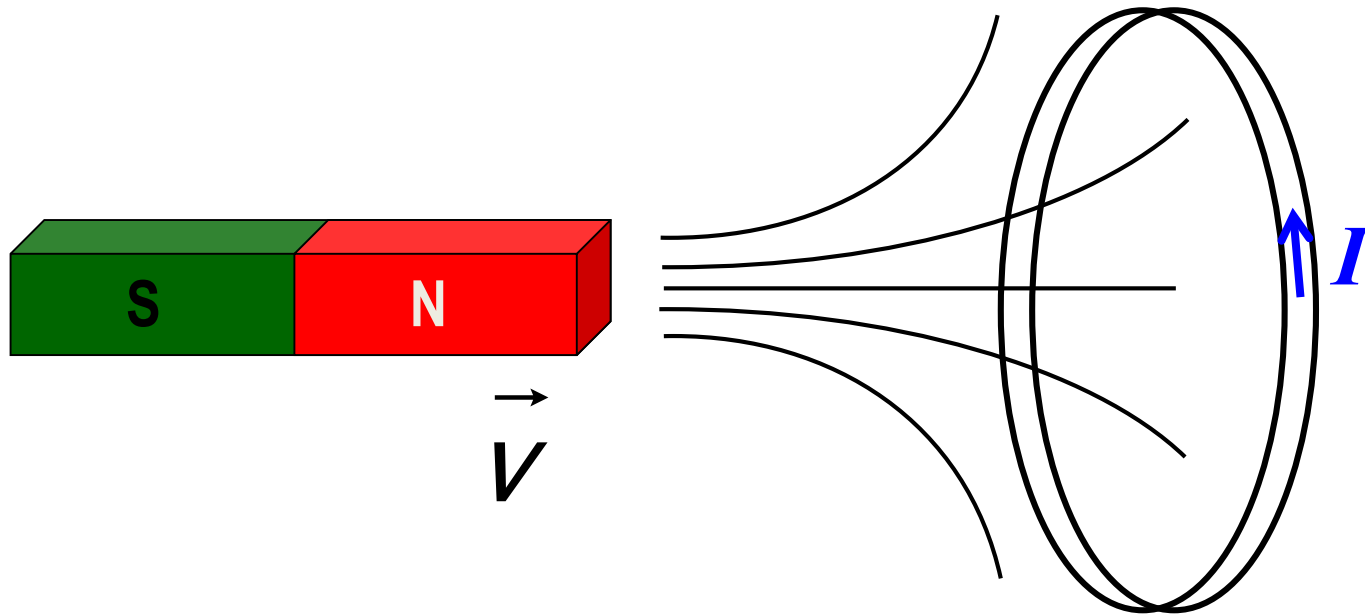
■ Kommutator



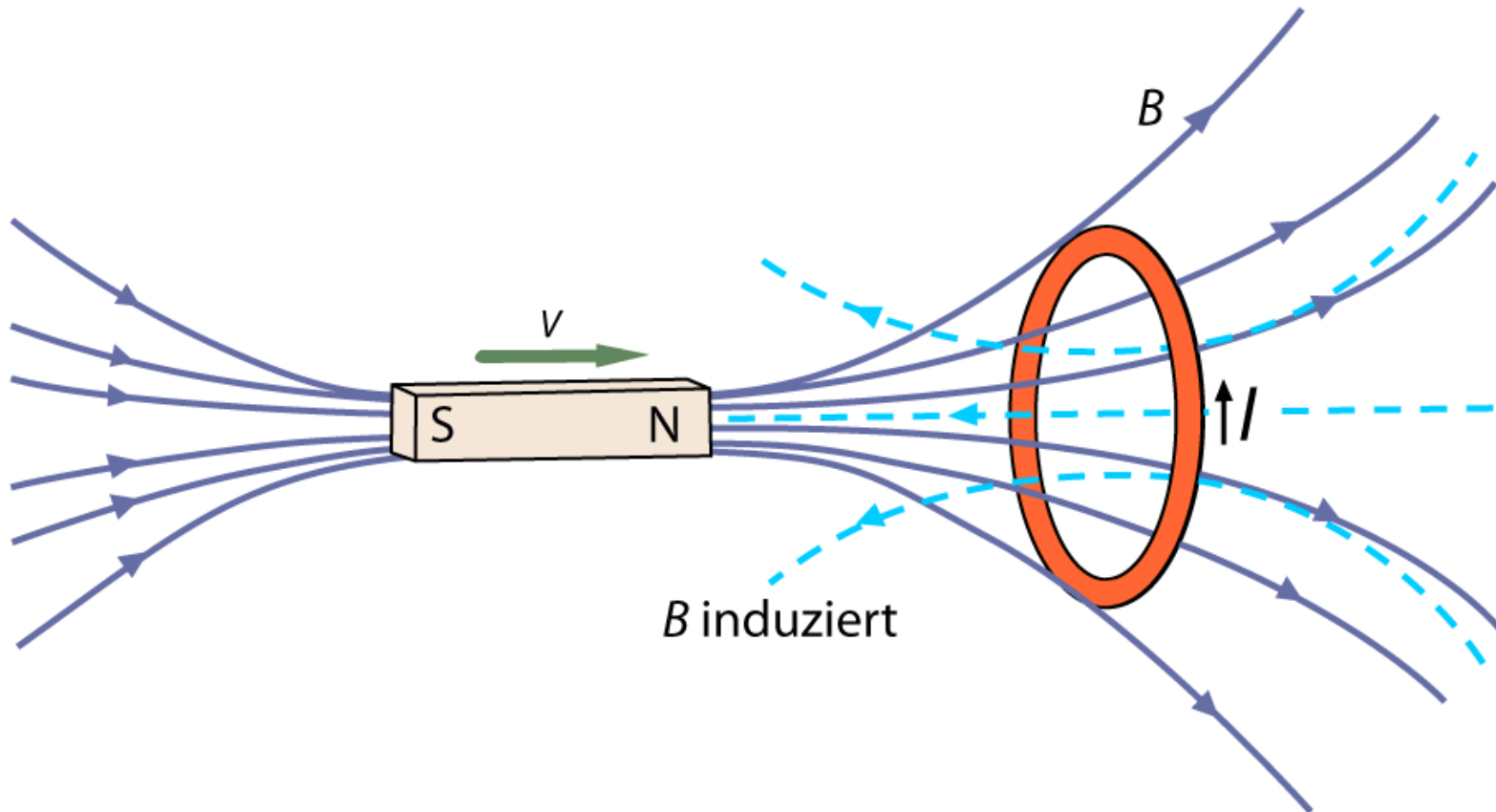


- Induktion, Generator

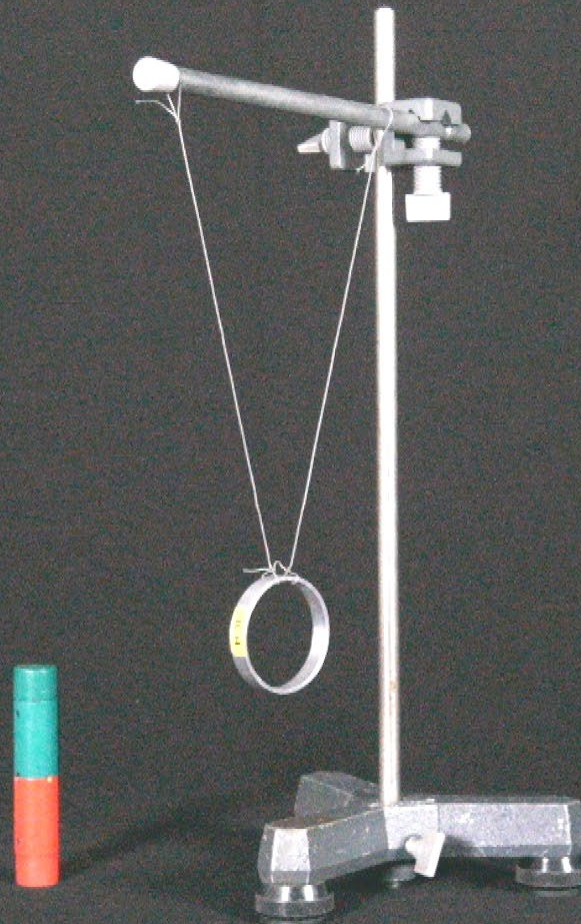


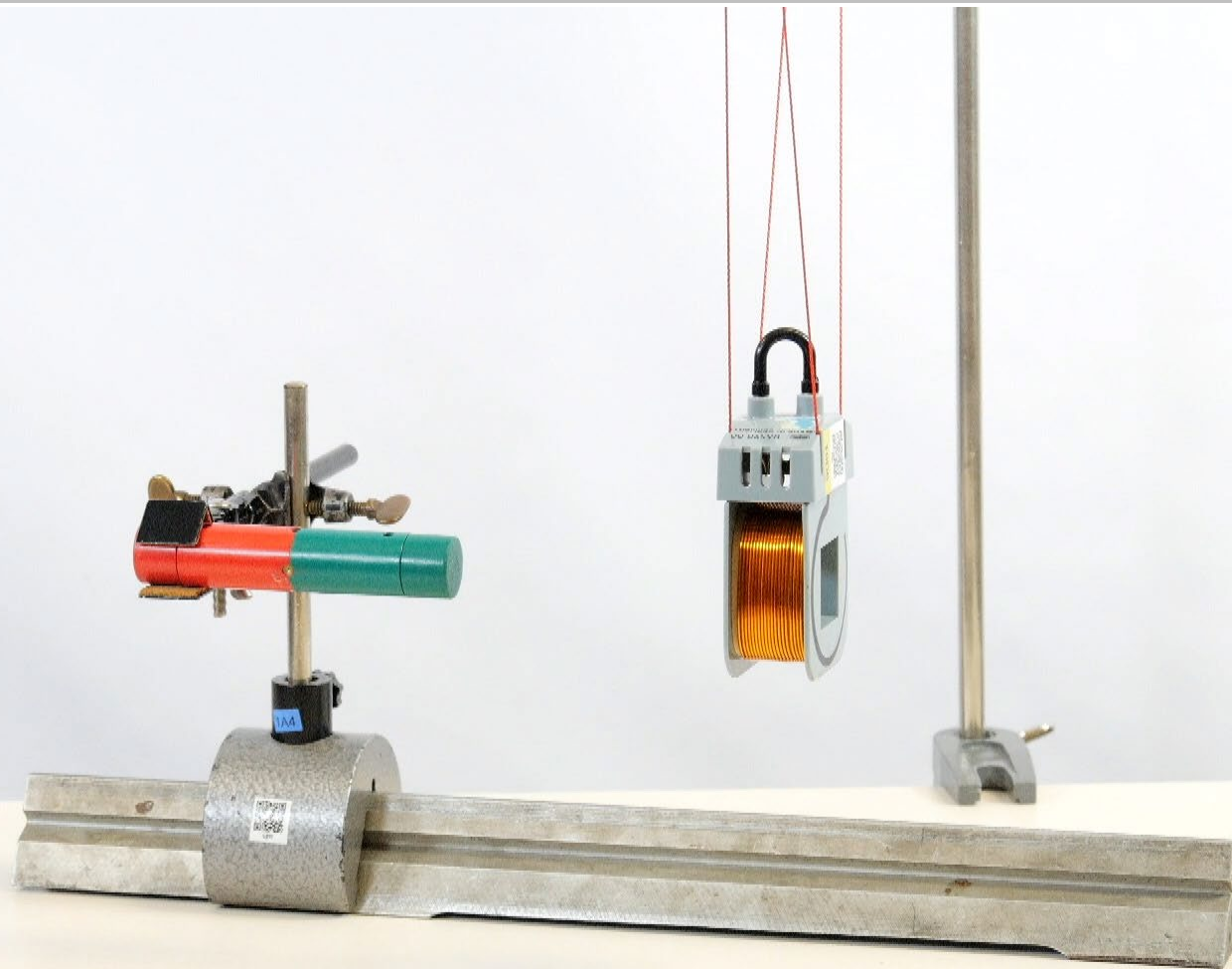


Die Induktionsspannung und der Strom, den sie hervorruft, sind stets so gerichtet, dass sie ihrer Ursache entgegen wirken.



Die Lenzsche Regel folgt bereits aus dem Energieerhaltungssatz.





Durch Flussänderung entstehen im Innern von Metallstücken Kreisströme. Sie wirken gegen die Flussänderung.

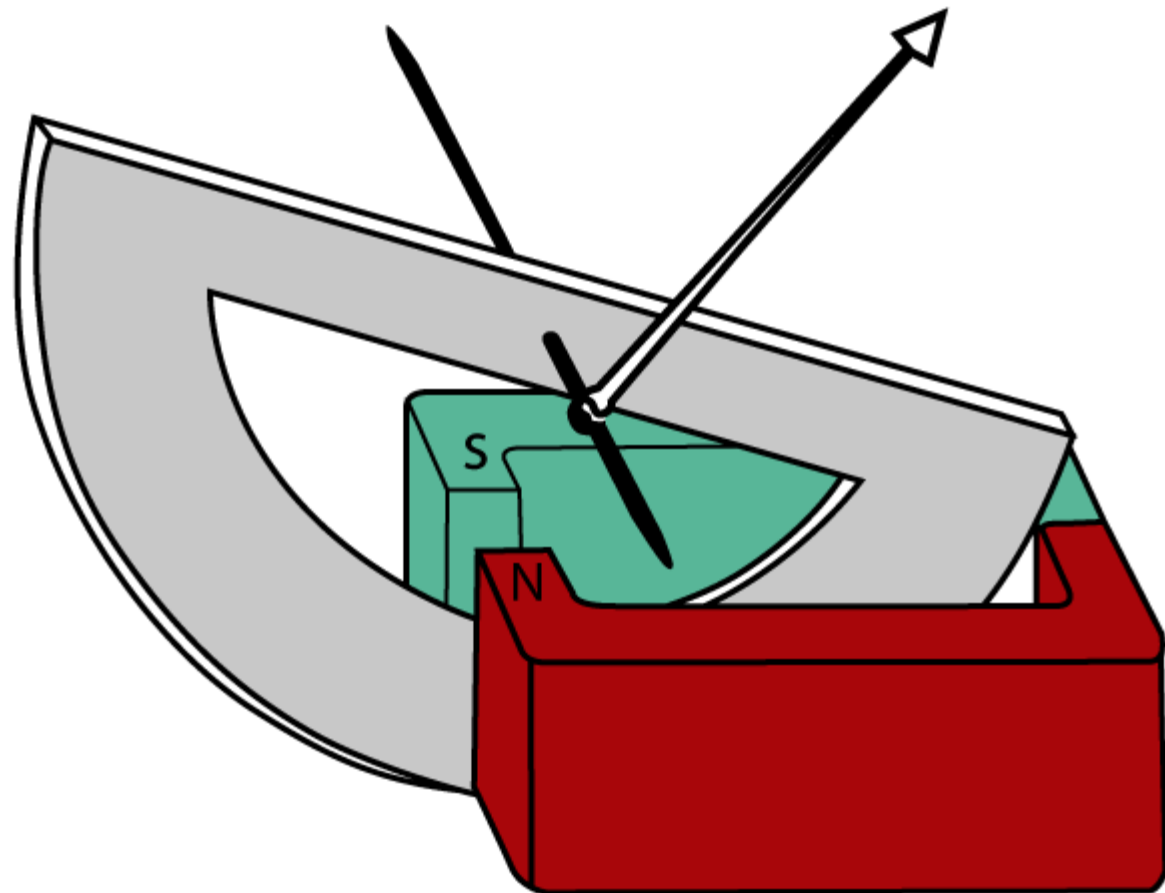
2 Arten von Anwendungen

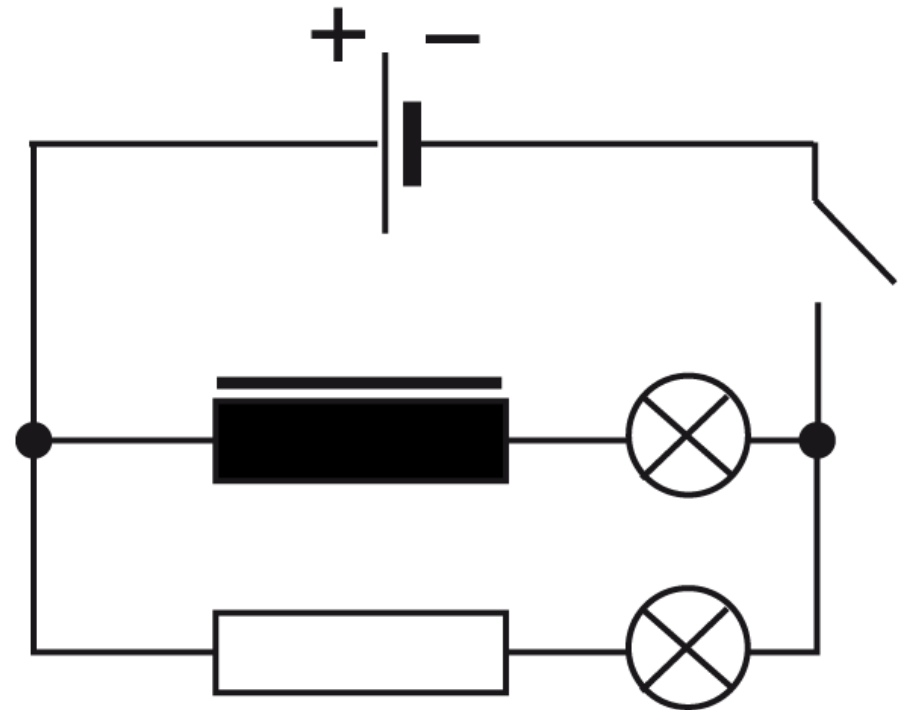
- Wirbelstrombremse
- „Wirbelstrommotor“ (z.B. "Stromzähler")



Zur Veränderung von Wirbelströmen sind Eisenkerne durch isolierte Blechstreifen aufgebaut.

- **Wirbelstrombremse für ein Messgerät**





Versuche zu Ein- und Ausschaltvorgängen an Spule zeigen:

Stromänderung in einer Spule führt zur Flussänderung und entsprechend der Lenzschen Regel zu einer Gegenspannung, die der Stromänderung entgegenwirkt.



Quantifizierung

(Zusammenhang zwischen Stromstärke und Fluss – die Induktivität):

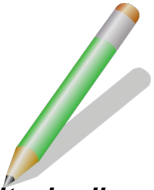
$$\phi_m = L \cdot I$$

L : Induktivität (Selbstinduktivität)

Die Induktivität/Selbstinduktivität beschreibt den Zusammenhang zwischen dem elektrischen Strom und dem magn. Fluss einer Anordnung.



z.B. Induktivität einer Zylinderspule:



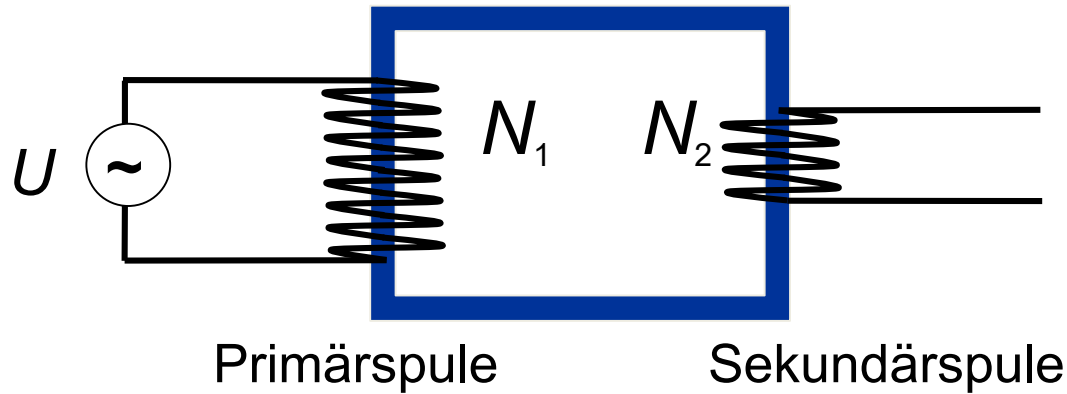
Mitschreiben



- **Selbstinduktionsspannung:**

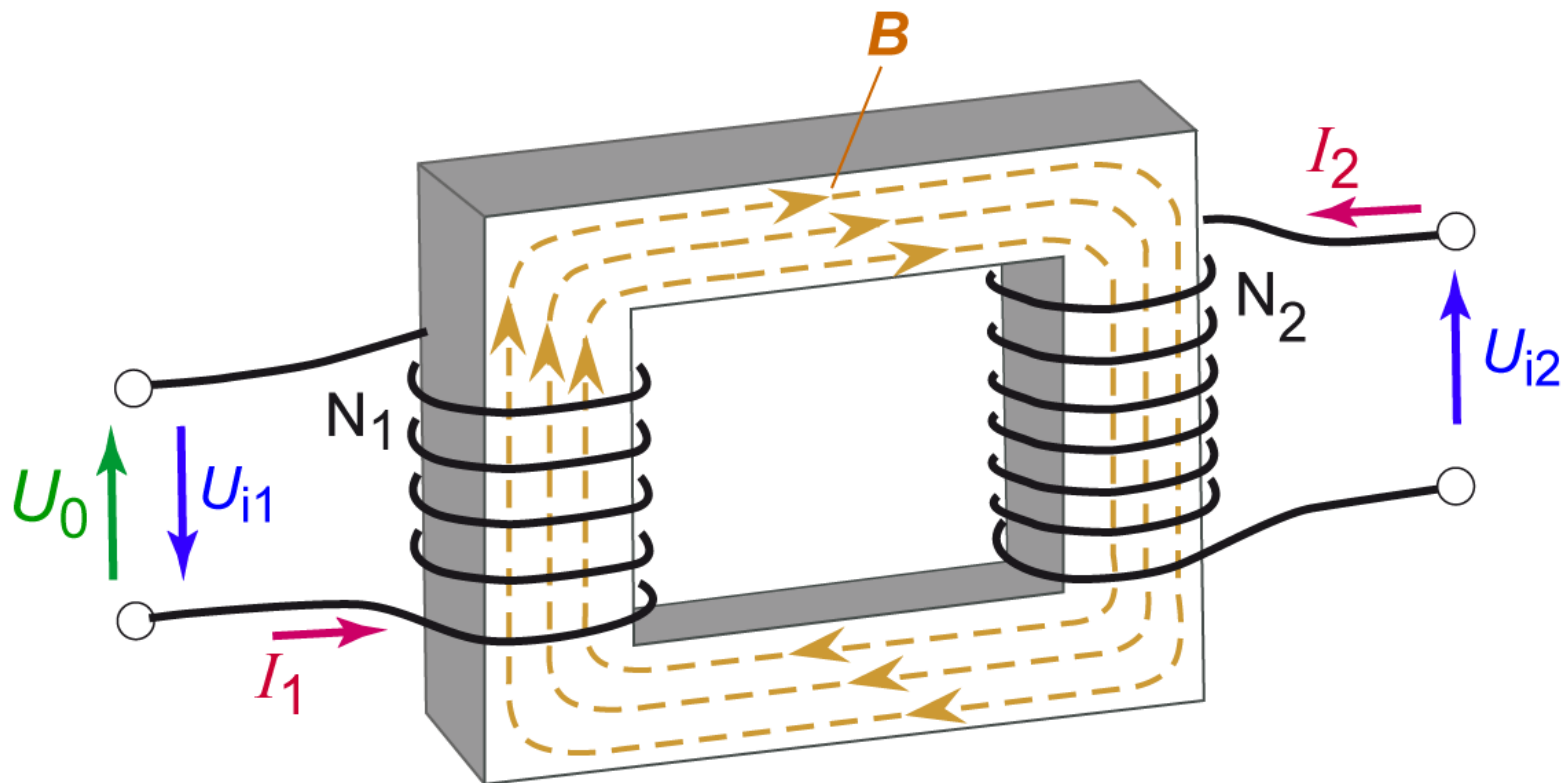
$$U = -\dot{\phi} = -L \frac{dI}{dt}$$

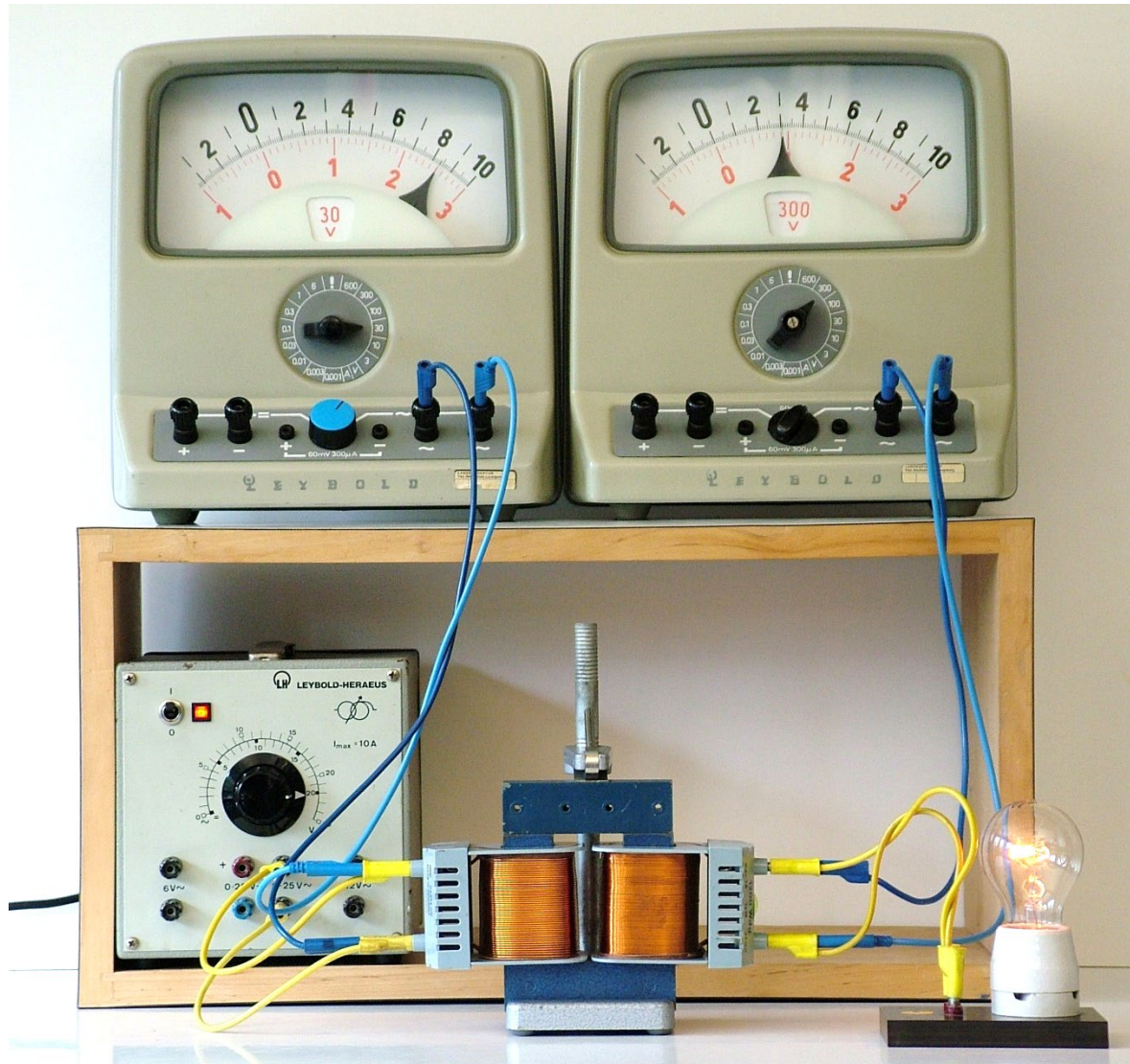
Erfasst „Geometrie“
und „Materialfaktor“



Experimentell:

Spannung bzw. Stromstärke sind durch das Verhältnis der Windungszahlen bestimmt.

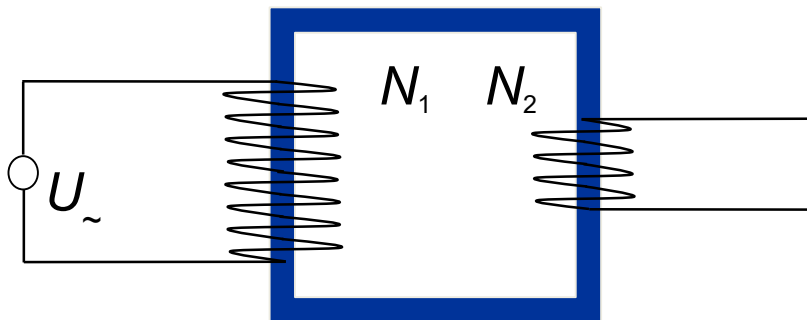




https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/3-5X-Trafo_Spannungen.m4v

Idealisierung:

Der magnetische Fluss von N_1 wird über den Eisenkern praktisch vollständig durch N_2 geführt.



(„reine induktive Last“,
d.h. kein ohmscher Widerstand)

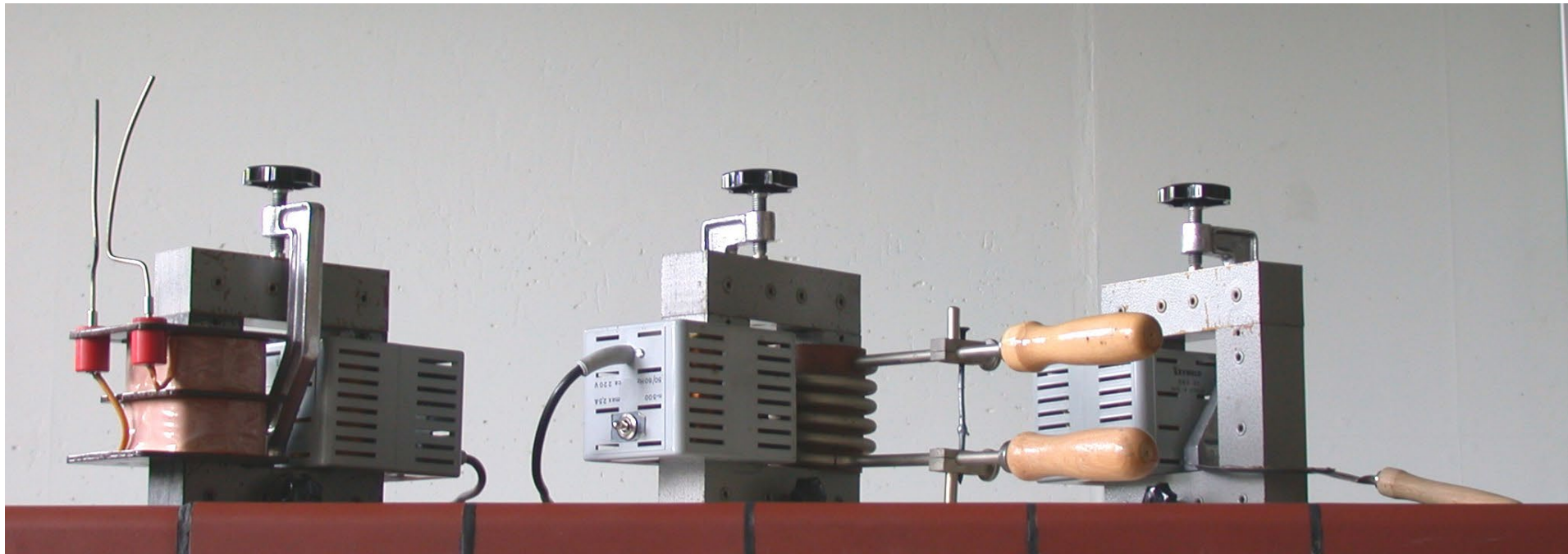
$$U_1 = -U_{L_1} = N_1 \frac{d\phi}{dt}$$

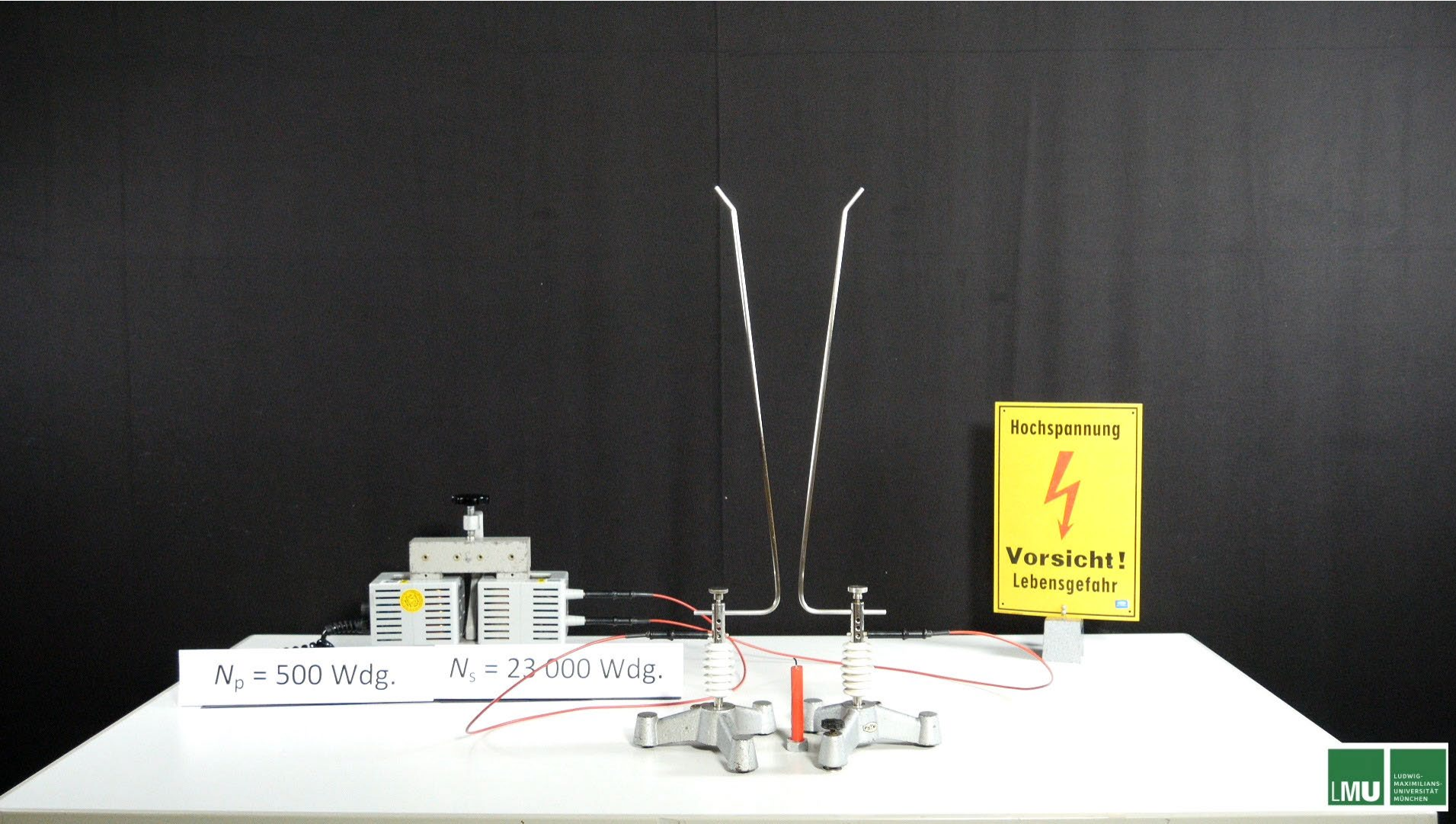
$$U_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt}$$

Sekundärkreis unbelastet:

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

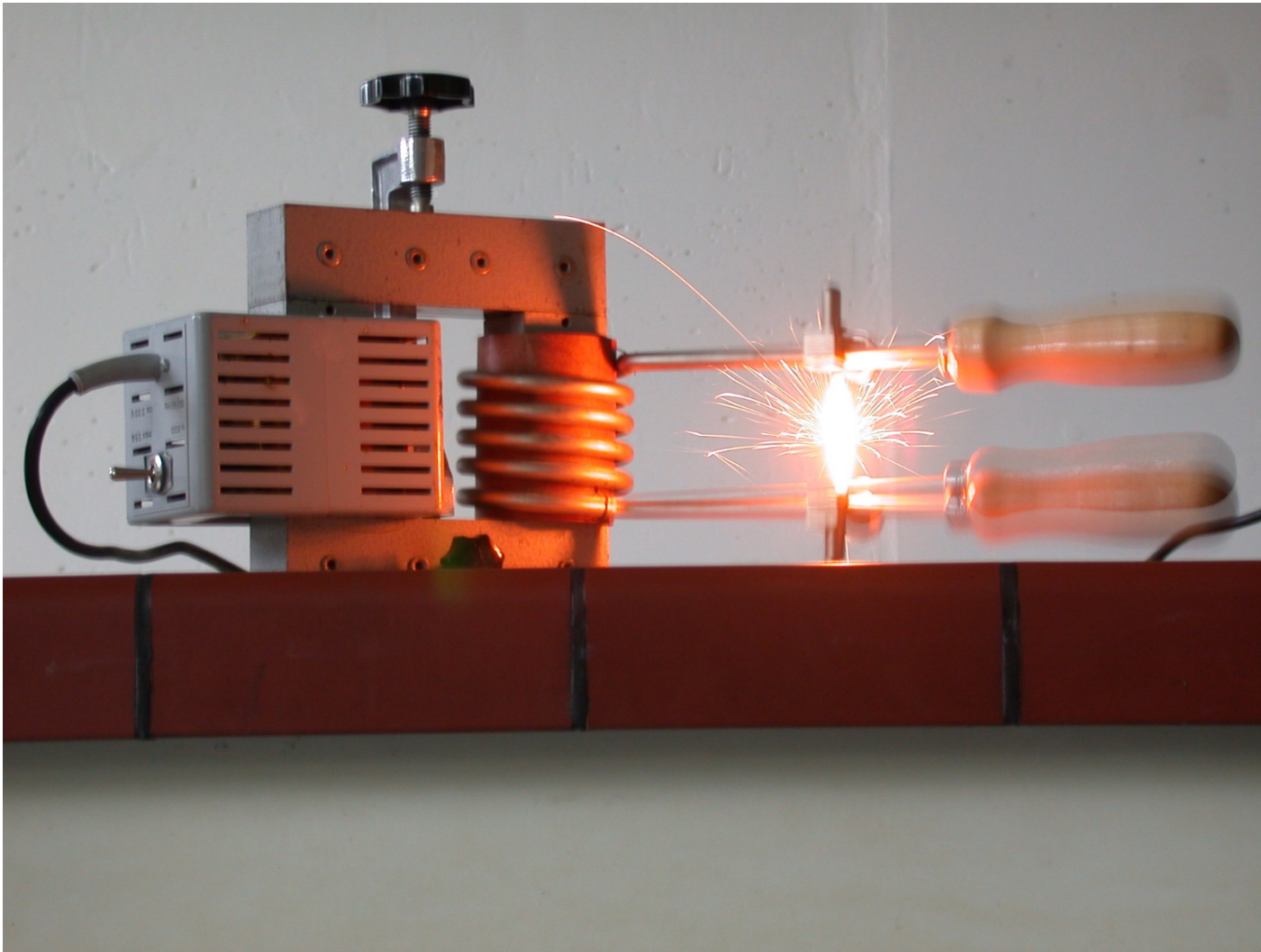
Primärspannung U_p Sekundärspannung U_s  $N_S = 250$ Wdg. $N_p = 1000$ Wdg. $N_p = 250$ Wdg. $N_S = 1000$ Wdg. $N_p = 500$ Wdg. $N_S = 500$ Wdg.







https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/3-5S-Hochspannunganhirschhornern.m4v



[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/3-5T-Gluehender Nagel.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/3-5T-Gluehender_Nagel.m4v)

https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/3-5T-Schweissen.m4v



[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/3-5T-Gluehender Nagel.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/3-5T-Gluehender_Nagel.m4v)

https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/3-5T-Schweissen.m4v



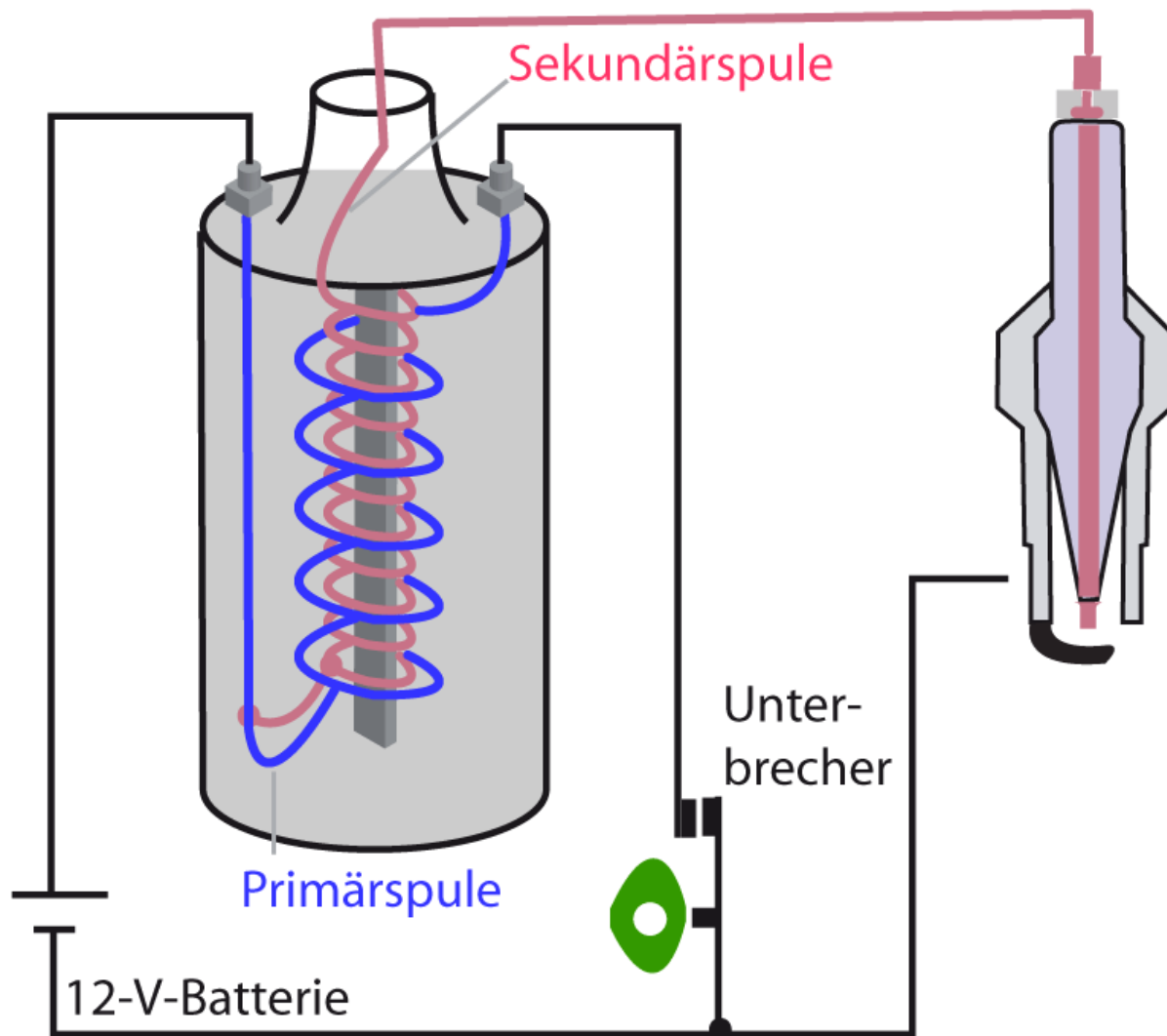
[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/3-5T-Gluehender Nagel.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/3-5T-Gluehender_Nagel.m4v)

https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/3-5T-Schweissen.m4v





Zündspule



Gegeninduktivität (Grundidee)

Die Gegeninduktivität L_{12} beschreibt das Maß der „Felddurchsetzung“ in Spule 2, verursacht durch Spule 1.

Zwei Spulen nah beieinander.

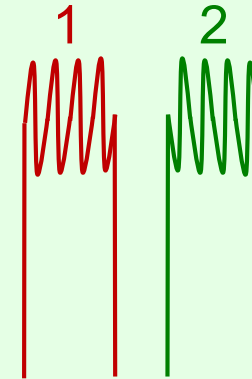
$$\Phi_2 = L_2 I_2 + L_{12} I_1$$



Selbstinduktivität



Gegeninduktivität



Bestimmung der Gegeninduktivität

Spulen eng beieinander/ineinander

=> Gesamtfluss von 1 geht durch 2

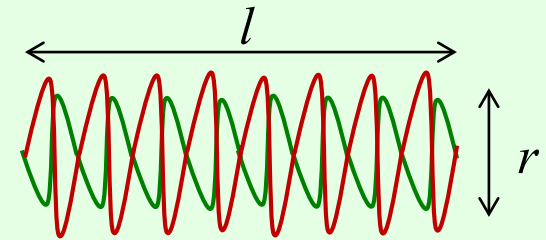
$$\phi_2 = L_{21} I_1$$

$$B_1 = \mu_0 \cdot \frac{N_1}{L_1} I_1$$

$$\phi_{2(1)} = N_2 B_1 A$$

$$= \mu_0 N_2 \frac{N_1}{l} I_1 \cdot (\pi \cdot r^2)$$

$$\Rightarrow L_{12} = \mu_0 N_1 N_2 \frac{\pi \cdot r^2}{l}$$



Fluss von Spule 1 durch 2



Umgekehrt:

Fluss von Spule 2 durch Spule 1

$$B_2 = \mu_0 \frac{N_2}{L_2} I_2 \quad \Rightarrow \quad \phi_{1(2)} = N_1 B_2 A$$
$$= \mu_0 N_1 \frac{N_2}{l} I_2 \cdot (\pi \cdot r^2)$$

$$L_{21} = \mu_0 N_1 N_2 \frac{\pi \cdot r^2}{l}$$

Allgemein: $L_{12} = L_{21}$



"Erinnerung" an das E-Feld:

E-Feld/Kondensator:
$$W = \frac{1}{2} \cdot Q \cdot U = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{U}$$

Funken bei
Ausschalten

Energiedichte:
$$w_e = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_0 \cdot E^2 \quad \text{allg.} \quad = \frac{1}{2} \cdot D \cdot E$$



Magnetfeld:

$$U_0 = IR + L \frac{dI}{dt}$$

$$\underbrace{U_0 \cdot I}_{\text{Batterie-
leistung}} = \underbrace{I^2 \cdot R}_{\text{Wärme-
leistung}} + \underbrace{L \cdot I \cdot \frac{dI}{dt}}_{\text{Zunahme der
Feldenergie pro Zeiteinheit}}$$

Feldenergie:

$$W_m = \int_0^{I_e} L \cdot I \frac{dI}{dt} \cdot dt$$

$$W_m = \frac{1}{2} L \cdot I^2$$



$$W_m = \frac{1}{2} L \cdot I^2$$

$$\text{mit } H = \frac{N}{l} \cdot I$$

$$\Rightarrow I = \frac{H \cdot l}{N}$$

$$L = \mu_r \mu_0 \frac{N^2}{l} \cdot A$$

$$W_m = \frac{1}{2} \mu_r \mu_0 \frac{N^2}{l} \cdot A \cdot \frac{H^2 \cdot l^2}{N^2}$$

$$= \frac{1}{2} \mu_r \mu_0 \cdot H \cdot H \cdot A \cdot l$$

$$W_m = \frac{1}{2} \cdot B \cdot H \cdot V$$

Energiedichte des Magnetfeldes



$$w_m = \frac{1}{2} \cdot B \cdot H$$



Energiedichte des Magnetfeldes:



$$w_m = \frac{1}{2} \cdot B \cdot H$$

Energiedichte des E-Feldes:

$$w_{el} = \frac{1}{2} \cdot D \cdot E$$



Abschätzung der Größenordnungen (Energie im Volumen 1 Liter):



$$E = 10^5 \frac{\text{V}}{\text{m}};$$

$$B = 1\text{T}:$$

el. Batterie:

Öl (1Liter):

Abschätzung der Größenordnungen (Energie im Volumen 1 Liter):



$$E = 10^5 \frac{\text{V}}{\text{m}};$$

$$W_{el} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \cdot E^2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$= \left(\frac{1}{2} \cdot 8,9 \cdot 10^{-12} \cdot 10^{10} \cdot 10^{-3} \right)$$

$$W_{el} = 4,5 \cdot 10^{-5} \text{ J}$$

$$B = 1 \text{ T}:$$

$$W_{\text{mag}} = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} \approx 400 \text{ J}$$

el. Batterie:

$$W_{\text{Batt}} \approx 100 \text{ Wh}$$

Öl (1Liter):

$$W_{\text{chem}} \approx 36 \text{ MJ} = 10 \text{ kWh}$$