



➤ 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

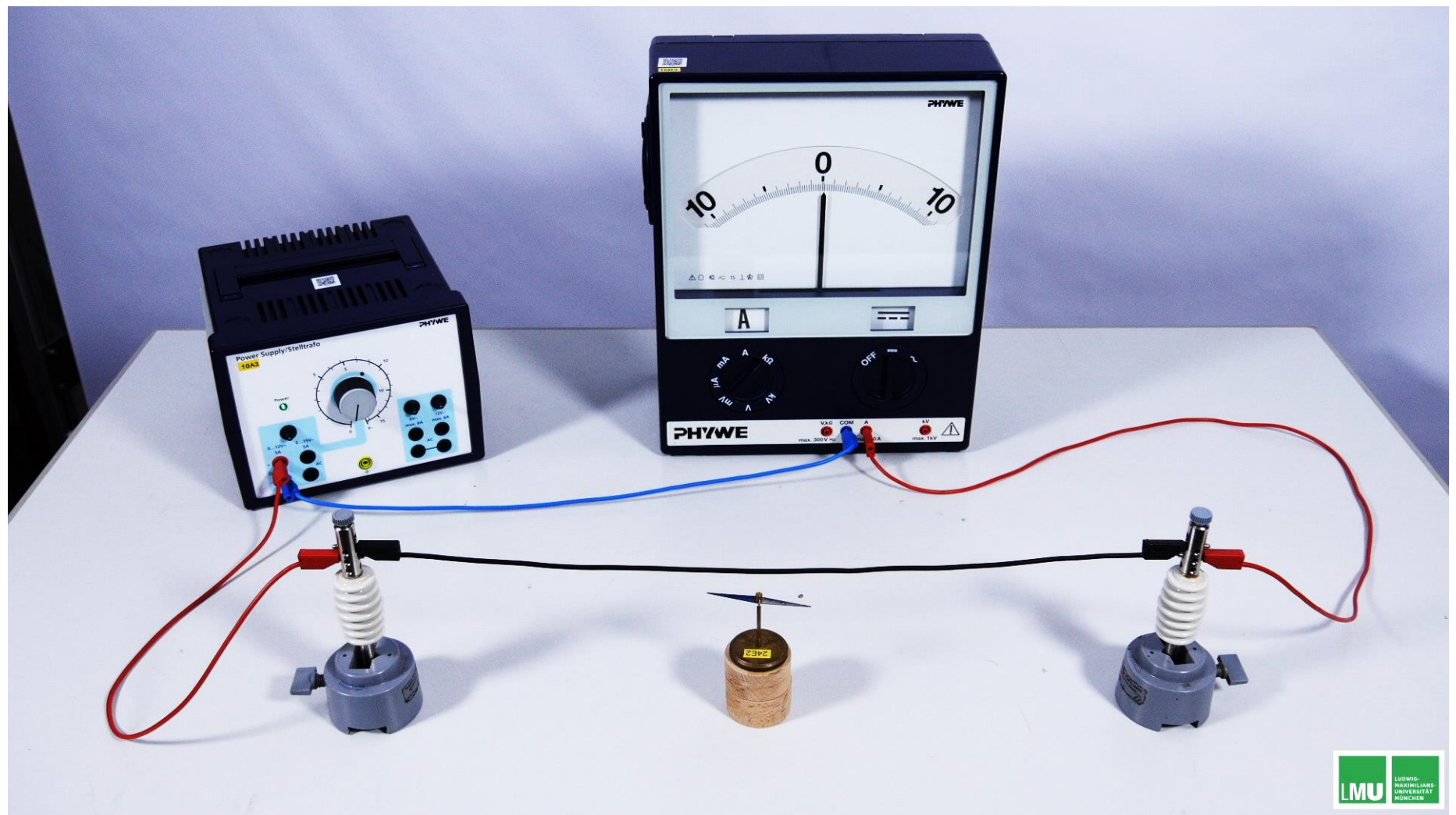


"Quellen" des magnetischen Feldes

- **Biot-Savart-Gesetz**
- **Magnetfeld einer Spule**
- **Magnetfeld eines geraden Leiters**
- **Amperesches Gesetz**

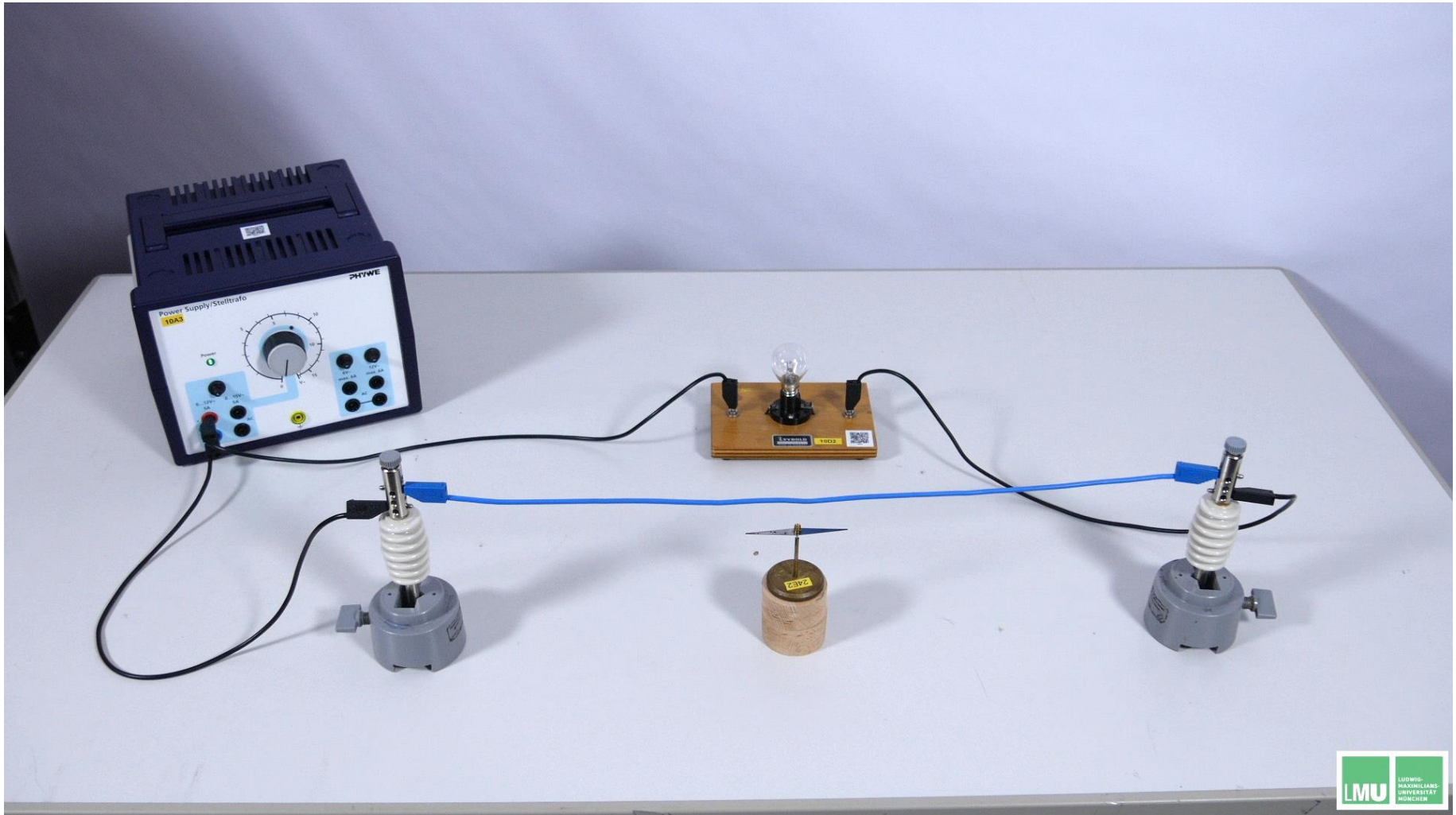


Oersted-Versuch



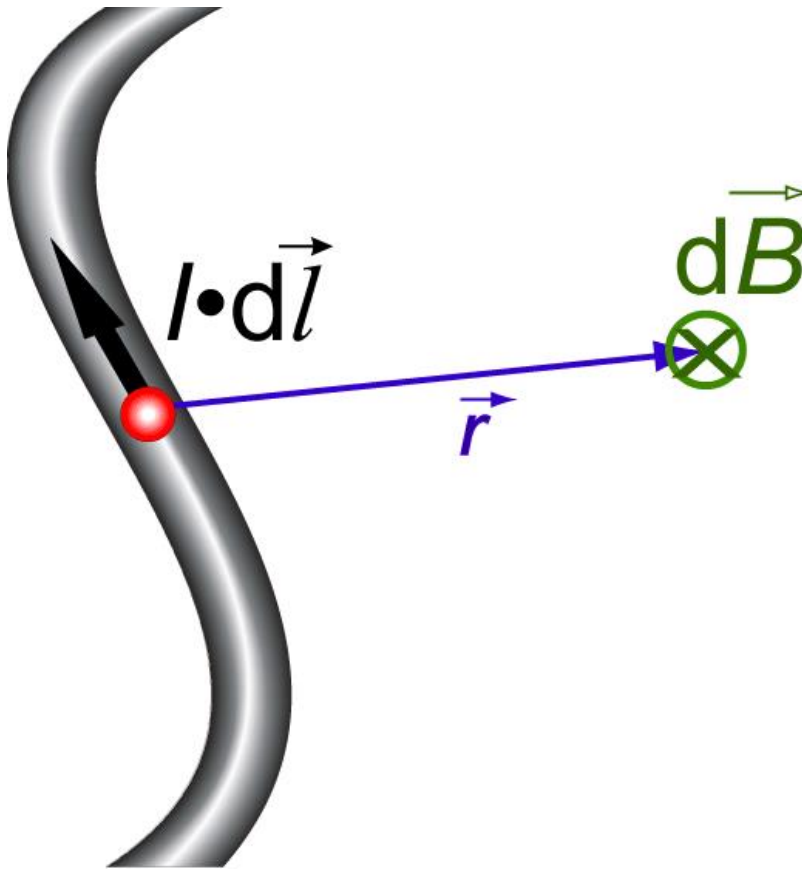
https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/3-3A-Oersted_Amperemeter.m4v

Oersted-Versuch



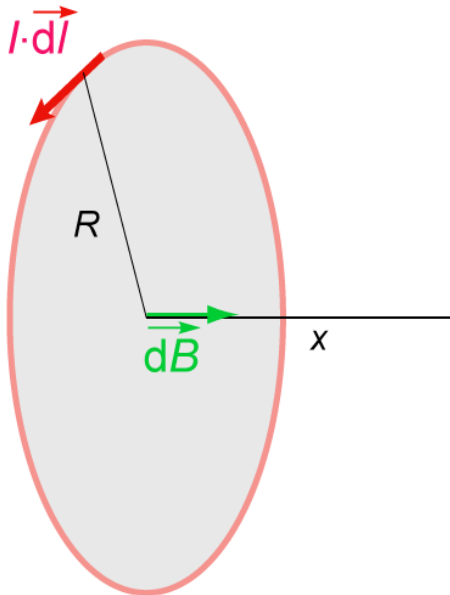


- Magnetfeld eines differentiell kleinen Stromfadens



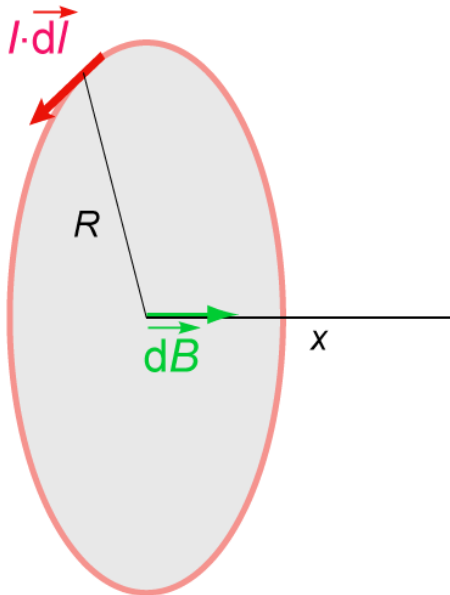


- **Magnetfeld einer Leiterschleife**
a) **Im Schleifenmittelpunkt**

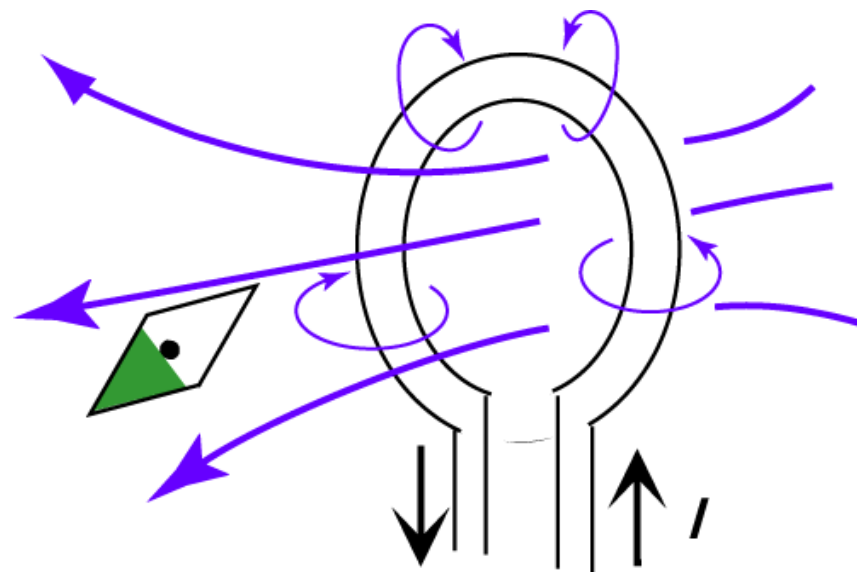
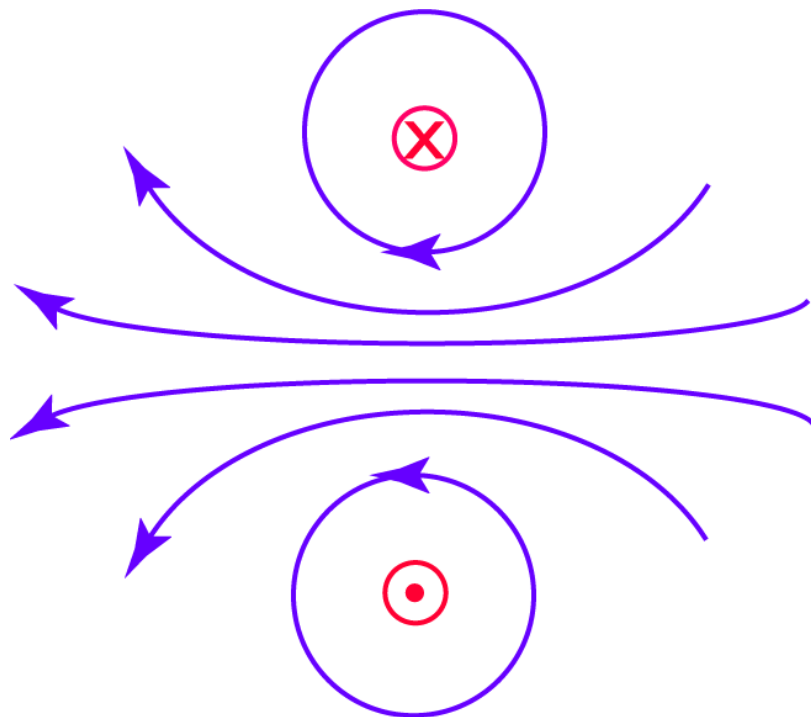




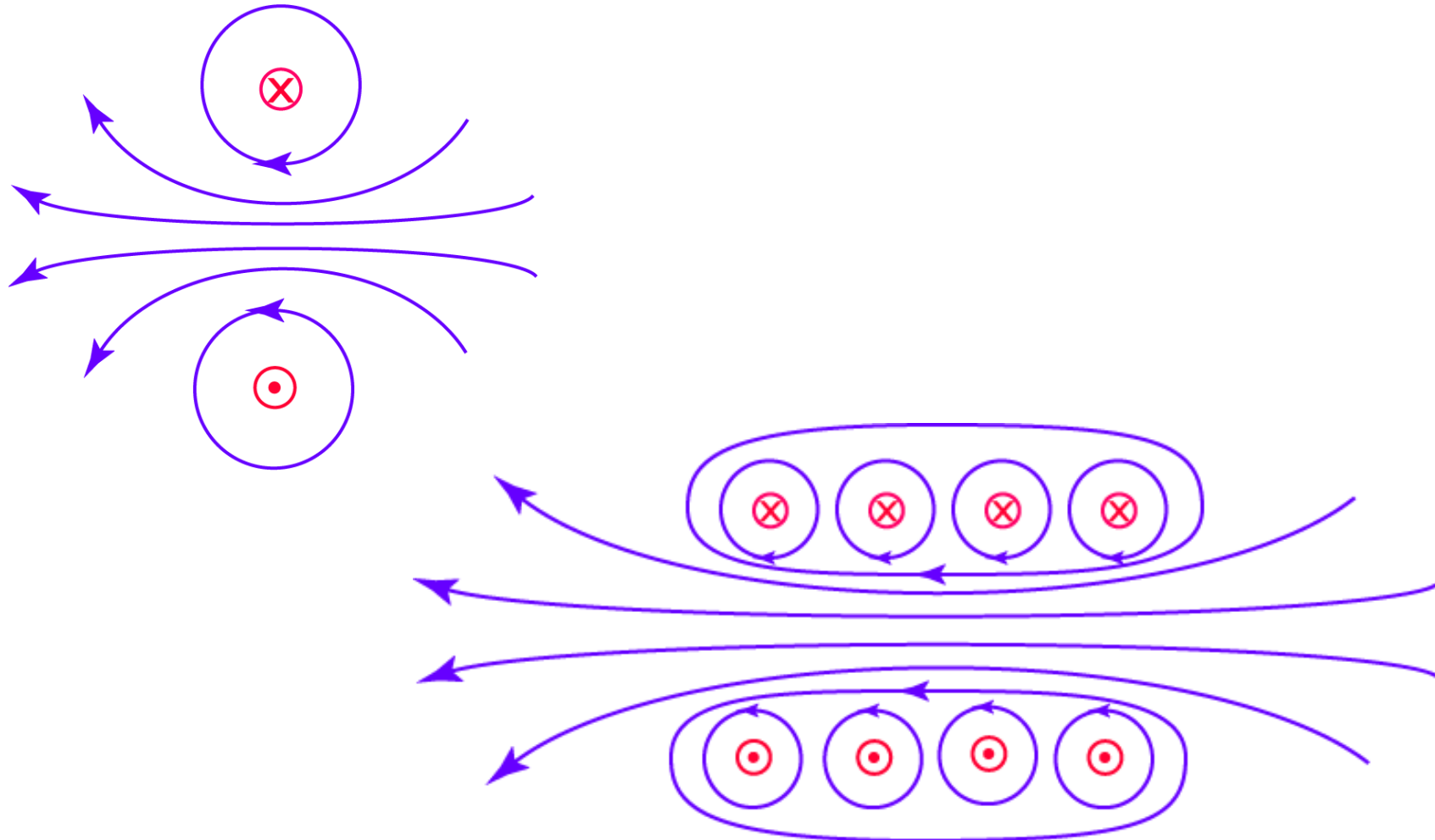
- **Magnetfeld einer Leiterschleife**
a) **Im Schleifenmittelpunkt**



■ Feld eines Kreisstromes



- von der Schleife zur Spule

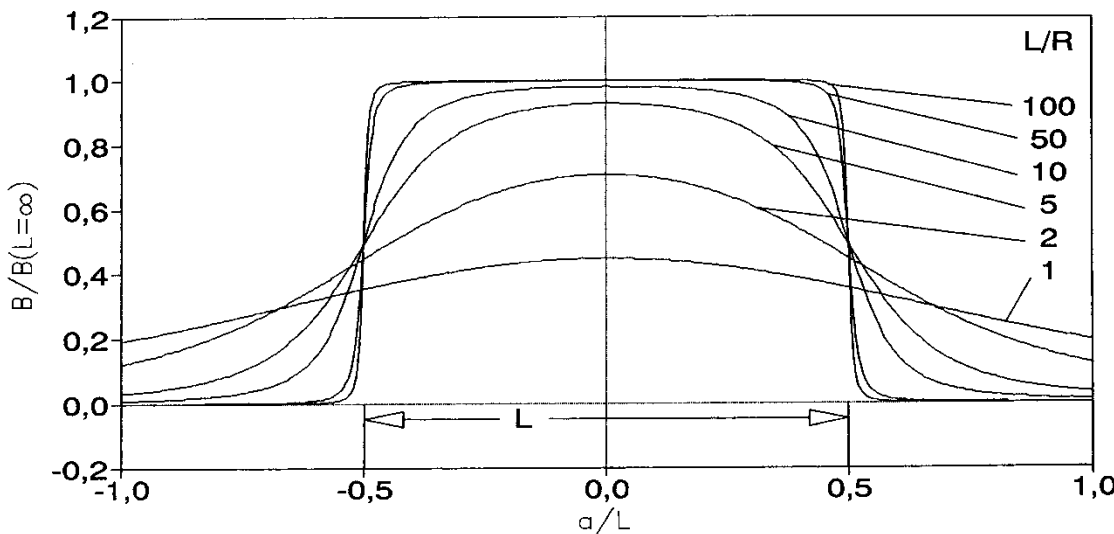


für sog. "lange Spule" (d.h. $a \gg R$; $b \gg R$):

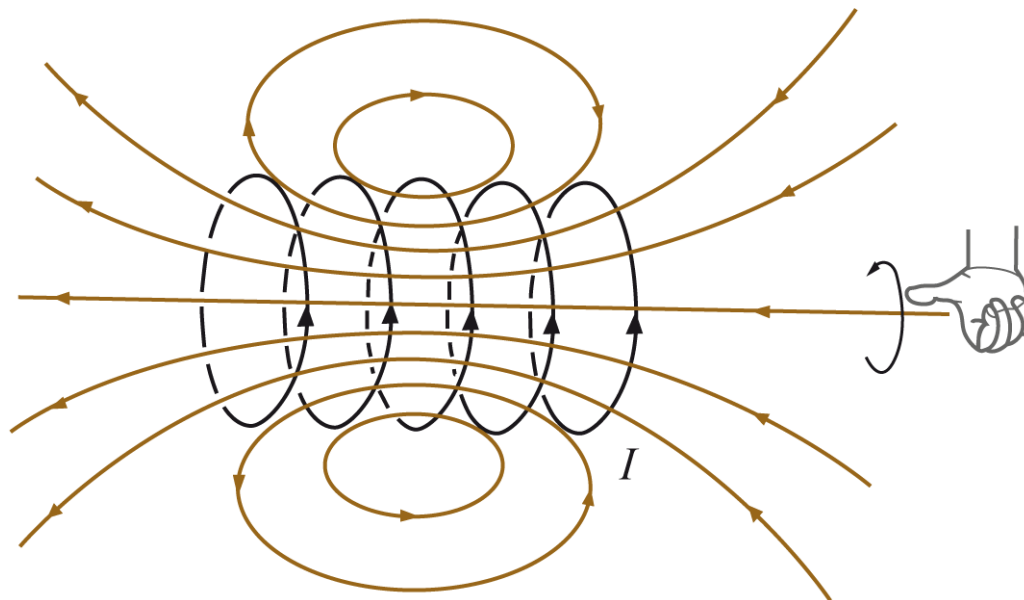
$$B = \mu_0 \cdot n \cdot I = \mu_0 \cdot \frac{N}{L} \cdot I$$

(einfache Herleitung später)

B-Feld einer Spule
mit der Länge L und dem Radius R



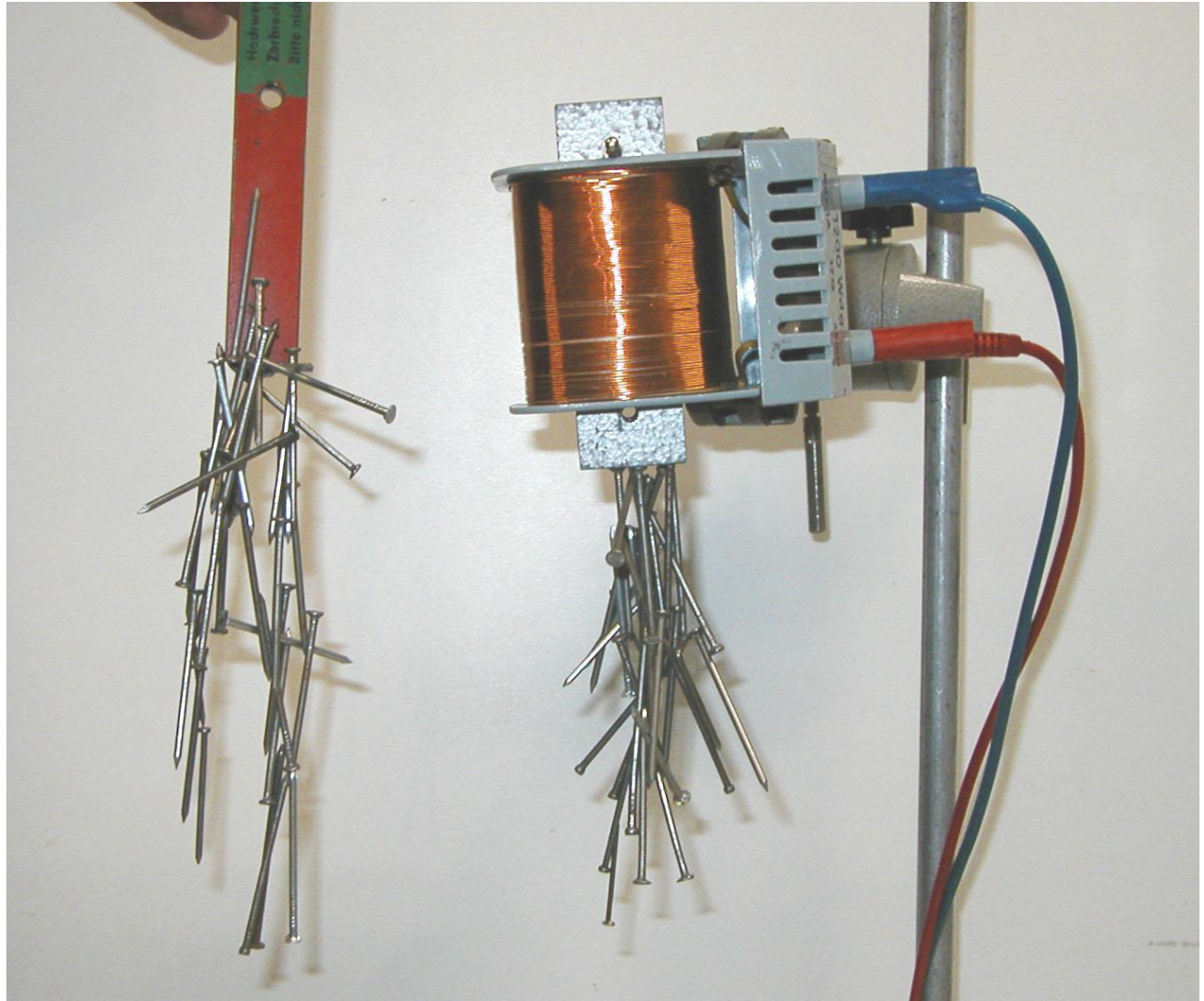
messung mit Hallsonde



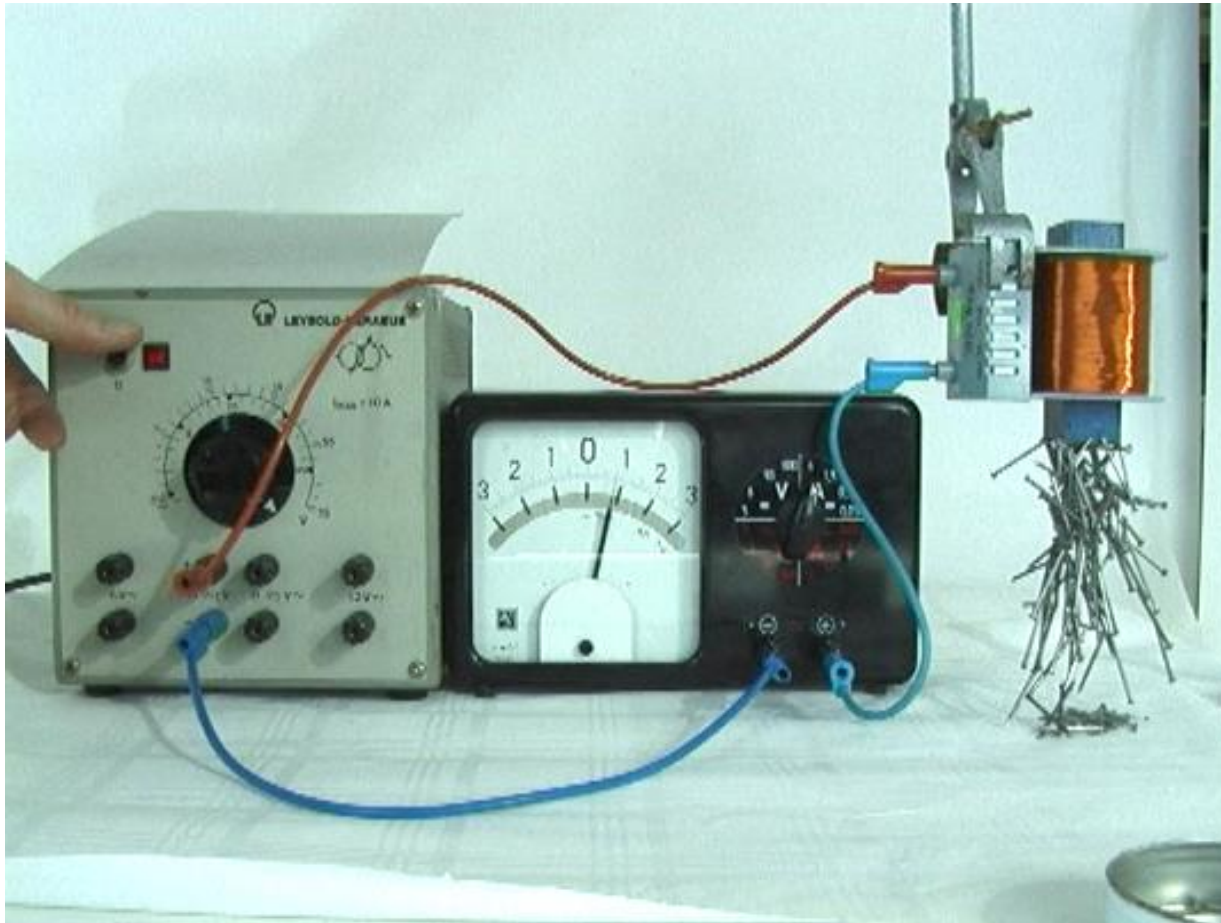
Regel: Sieht man auf die Spulenfläche:



Stabmagnet und Elektromagnet

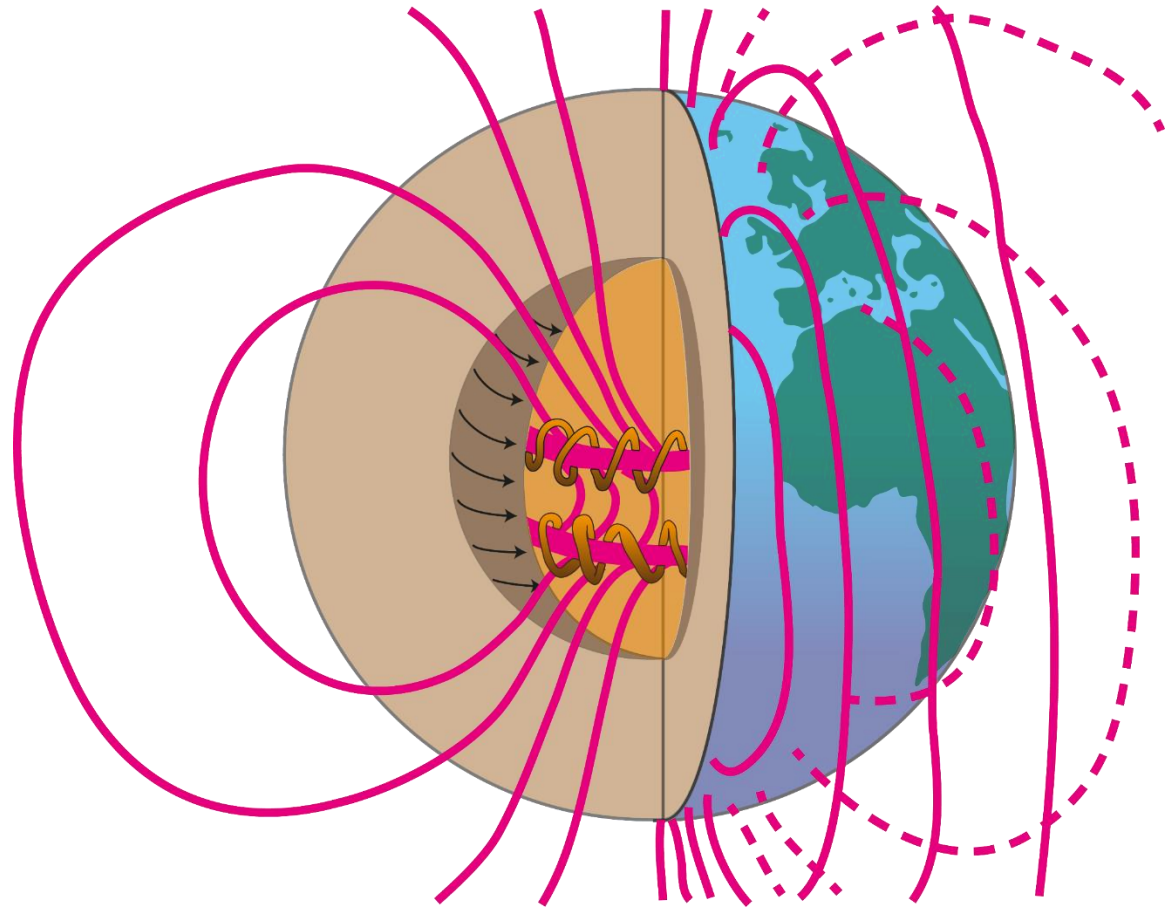


Grundphänomenen Elektromagnet

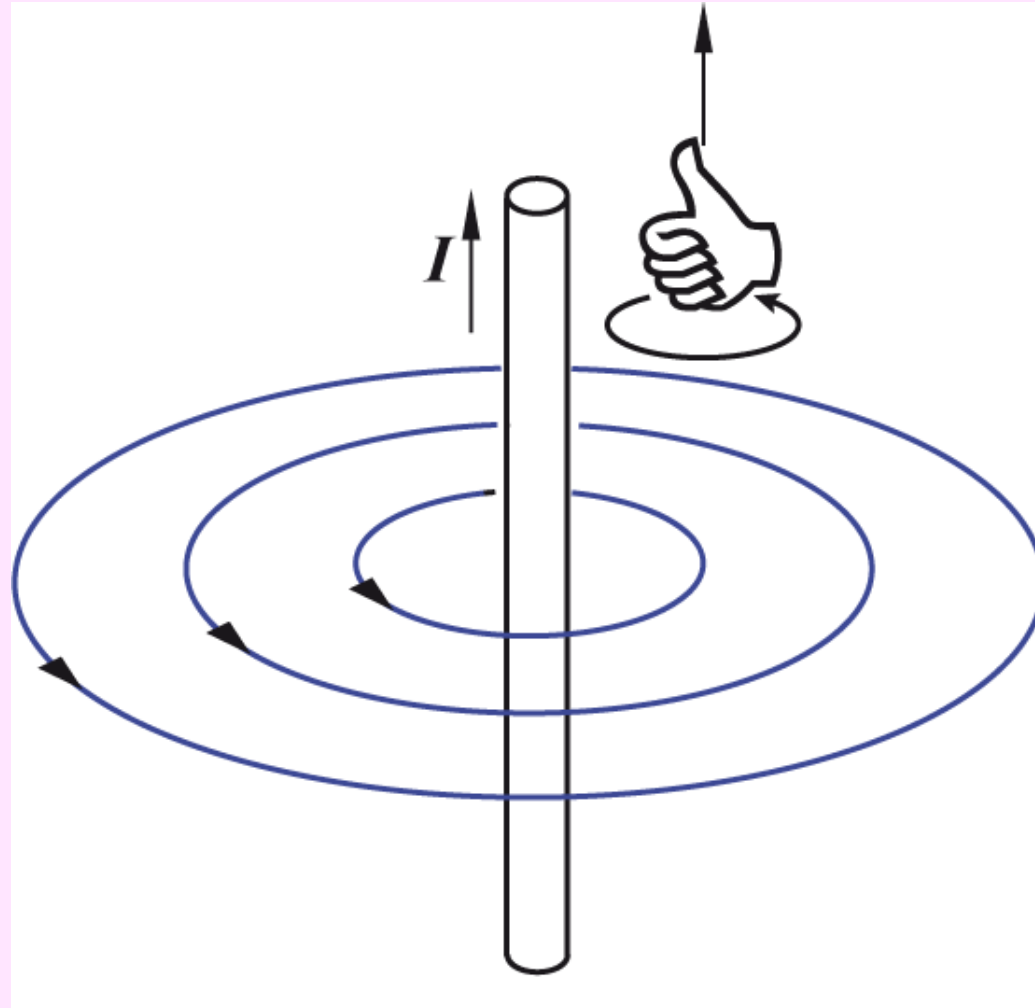


https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/3-2B-Emagus2o.m4v

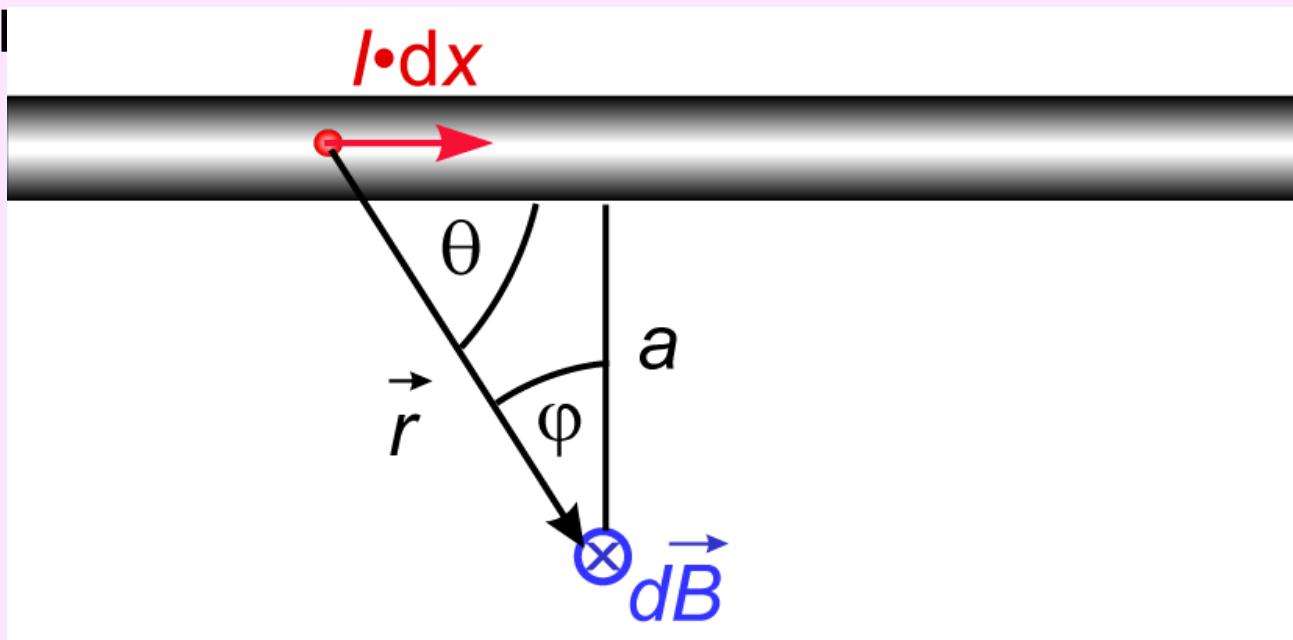
■ Erdfeld



- **Feld eines geraden stromdurchflossenen Leiters**



- **Feld eines geraden stromdurchflossenen**



$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I \cdot dx}{r^2} \cdot \sin\theta$$

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I \cdot dx}{r^2} \cdot \cos\varphi$$



$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I \cdot dx}{r^2} \cdot \cos\varphi$$

"Trick": Integration über φ – Substitution: $x = a \cdot \tan\varphi$

$$\frac{dx}{d\varphi} = a \cdot \frac{1}{\cos^2 \varphi} = a \cdot \frac{r^2}{y^2}$$

$$dx = \frac{r^2}{a} d\varphi$$

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} I \cdot \int_{\varphi_2}^{\varphi_1} \frac{1}{a} \cos\varphi \, d\varphi$$

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I}{a} (\sin\varphi_1 - \sin\varphi_2)$$



$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I}{a} (\sin\varphi_1 - \sin\varphi_2)$$

sehr lange Leiter:

$$\varphi_1 \rightarrow \frac{\pi}{2}; \quad \varphi_2 \rightarrow -\frac{\pi}{2}$$

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi a}$$

für ∞ langen geraden Leiter



Ampere'sches Gesetz

geschlossene Schleife

im Vakuum:

$$\oint B dl = \mu_0 \cdot I$$



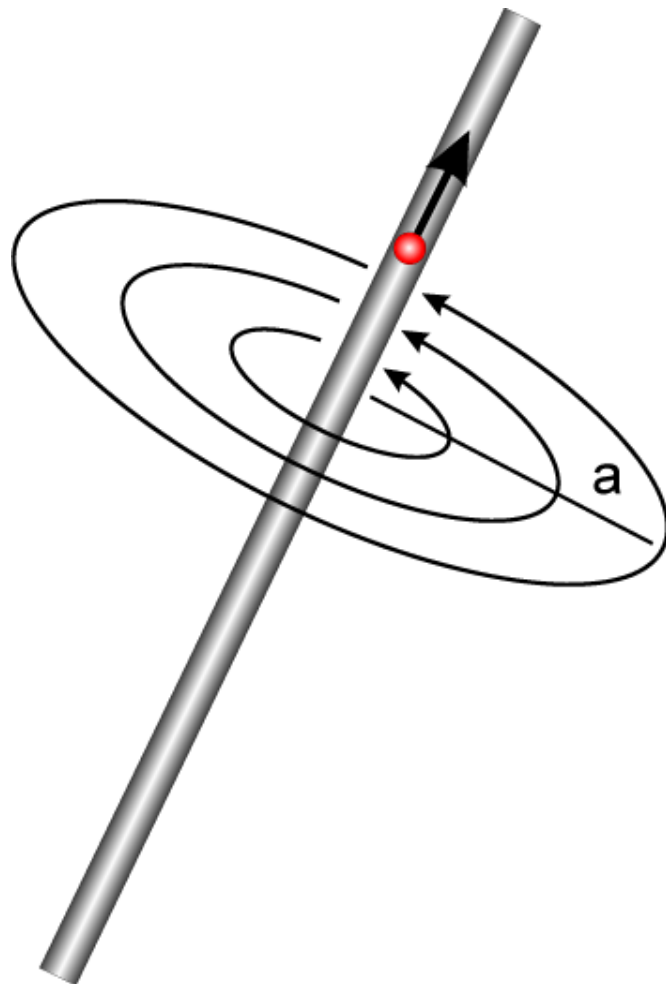
allgemein:

$$\oint H ds = I$$

H : „magn. Umlaufspannung“

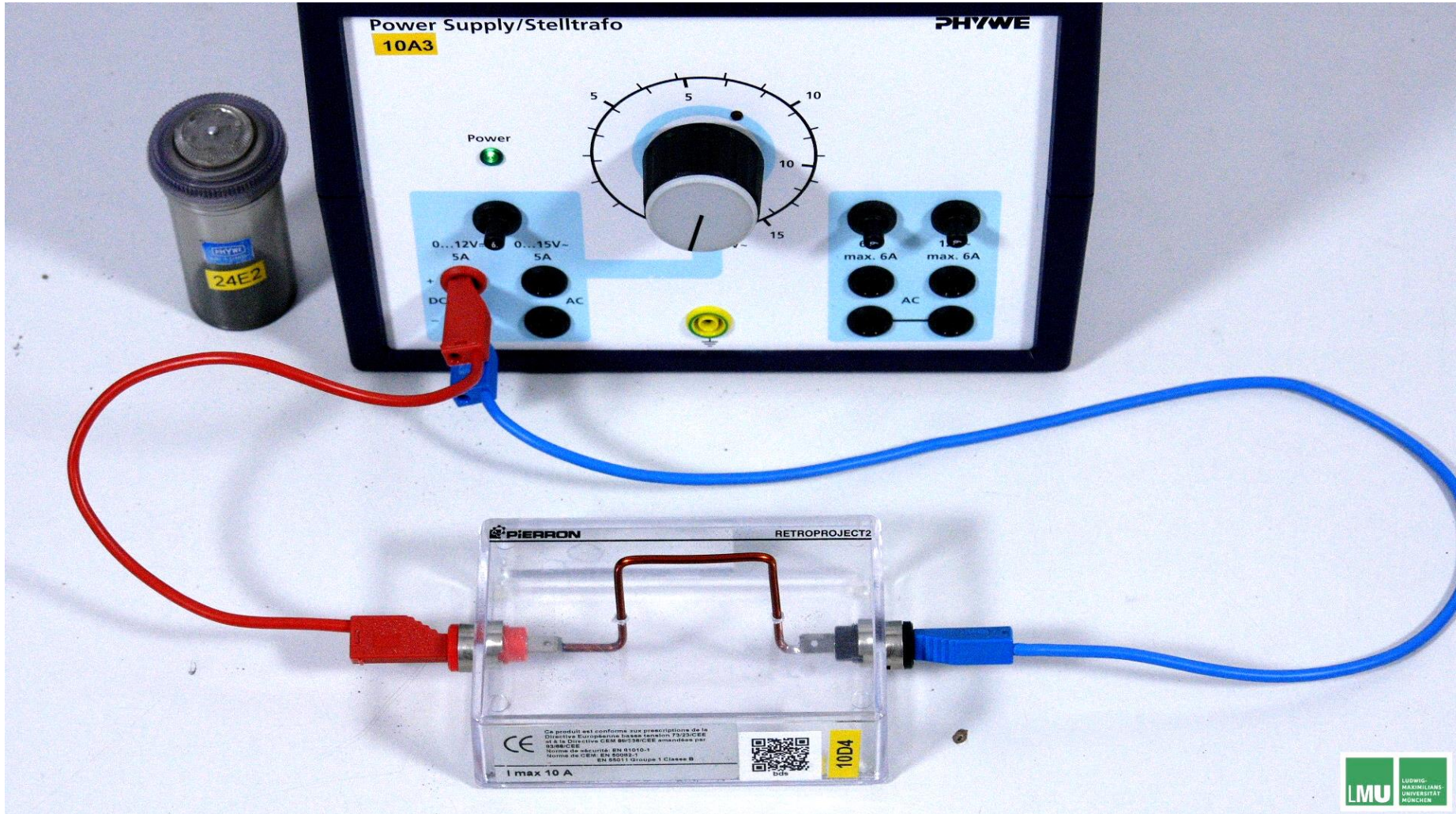
Bei einem geschlossenen Umlauf ist die Wegsumme (Linienintegral) der magnetischen Feldstärke gleich dem umfassten Strom.

- **Beispiel: Gerader Leiter**

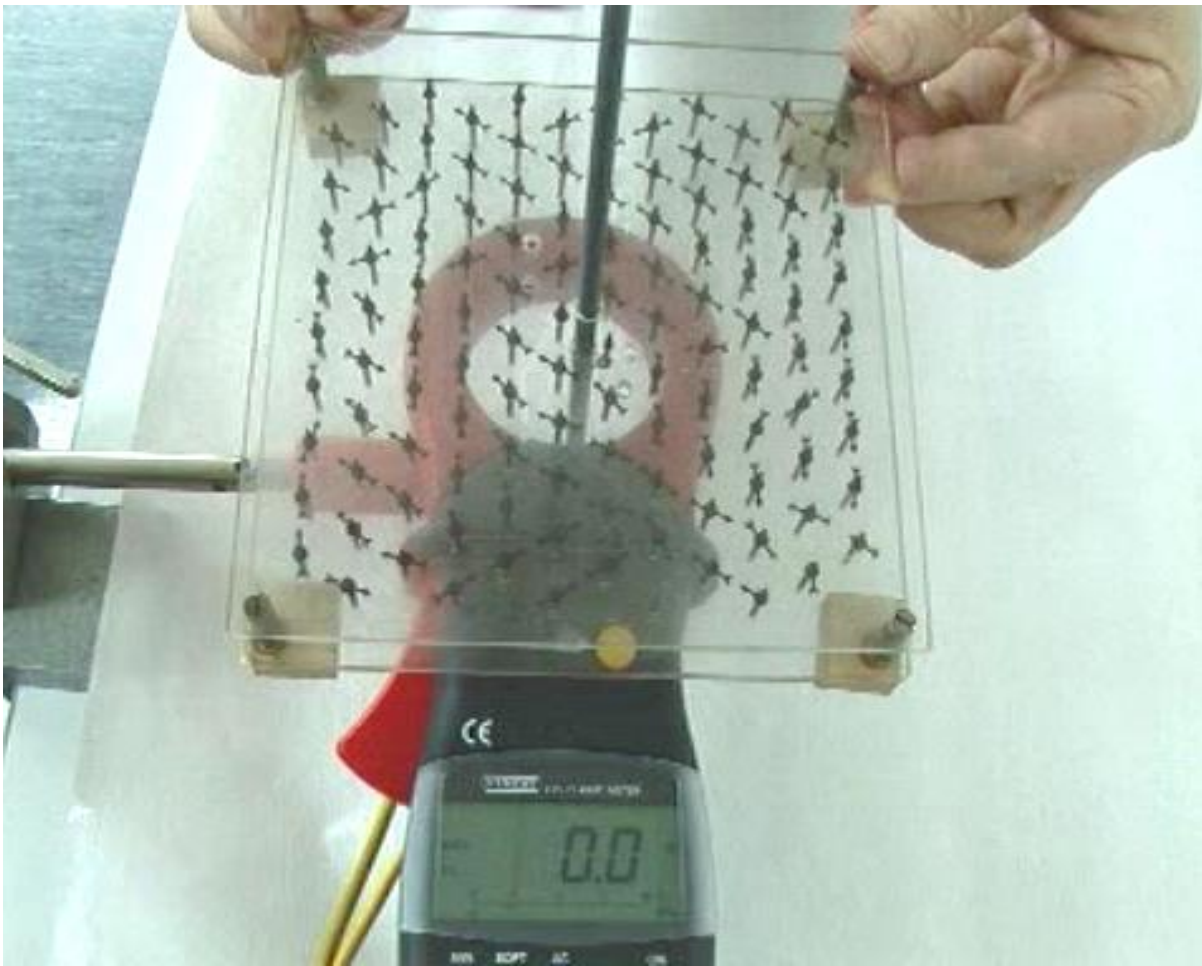


➔ **Feldlinienbild**

Gerader Leiter

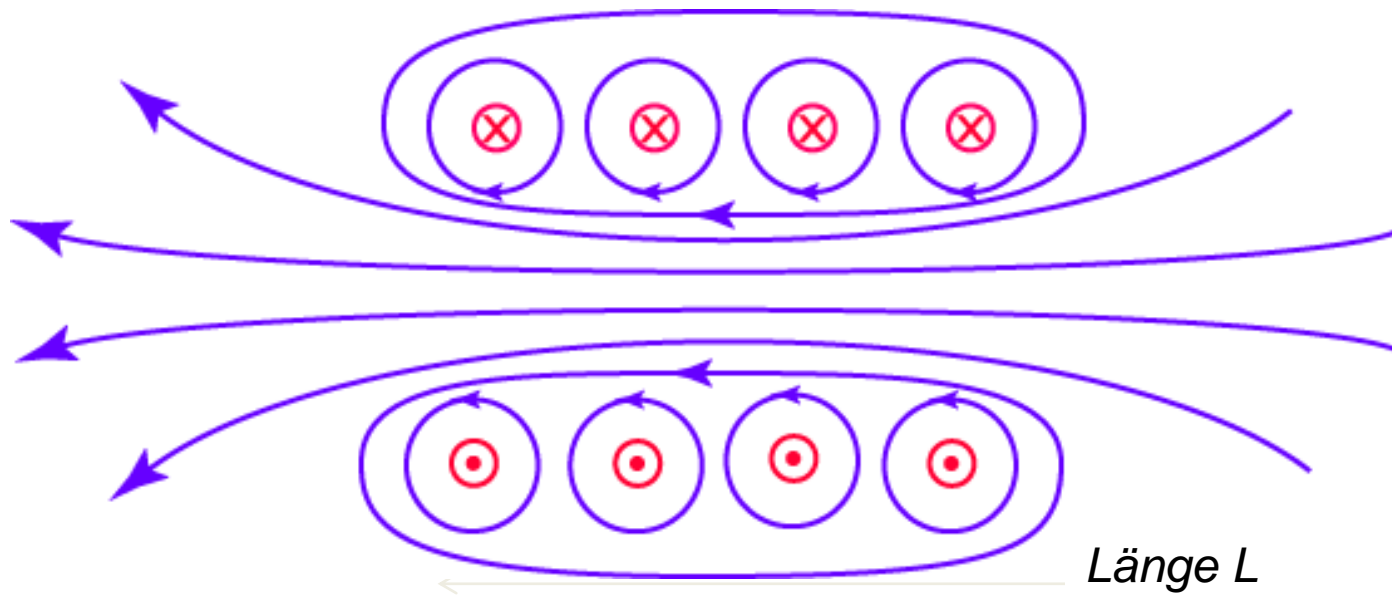


Gerader Leiter



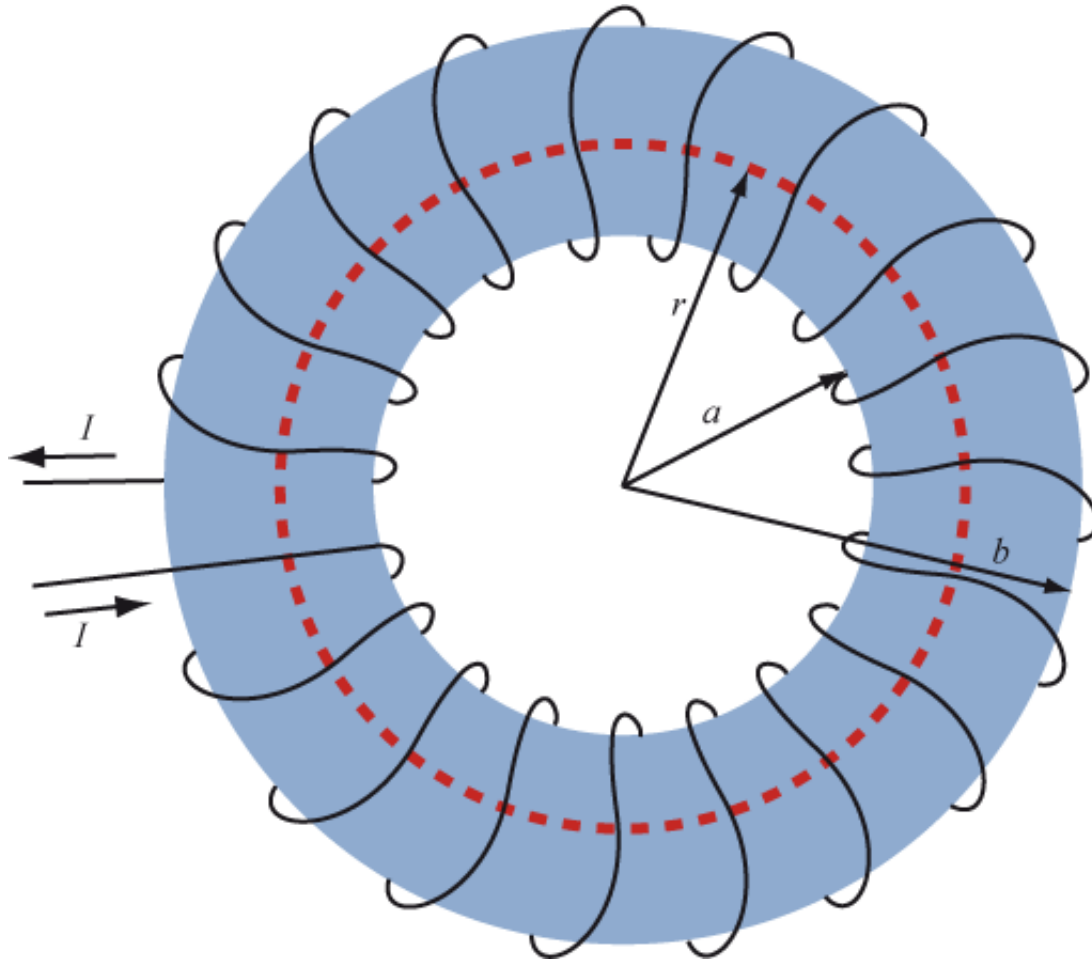
https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/3-3E-Feldsta1.m4v

■ **Beispiel: Lange Spule**



➔ **Feldlinienbild**

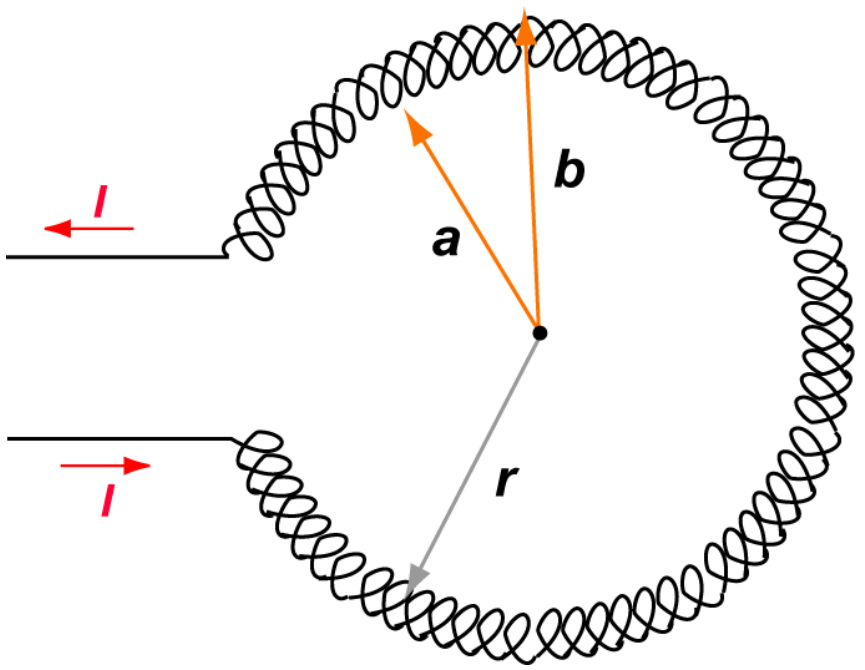
■ Toroidspule



→ Feldlinienbild



■ Toroidspule

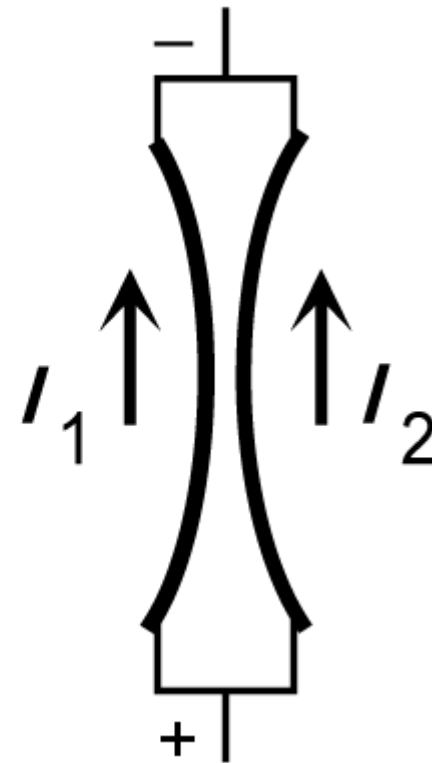
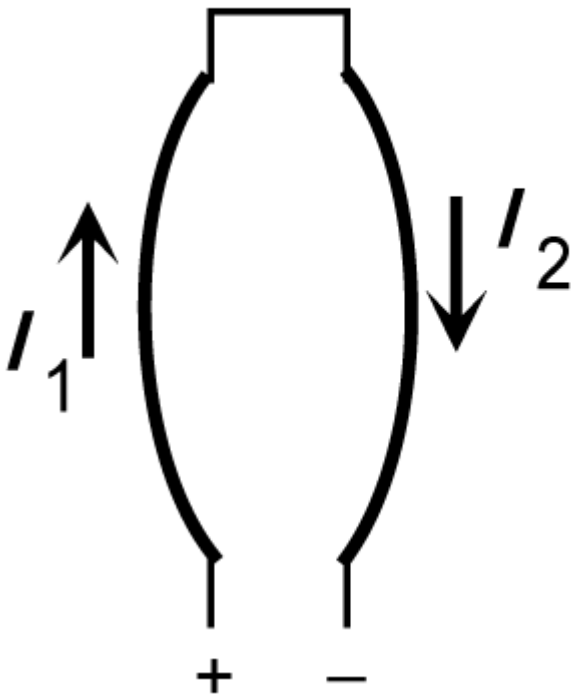


$$a < r < b$$

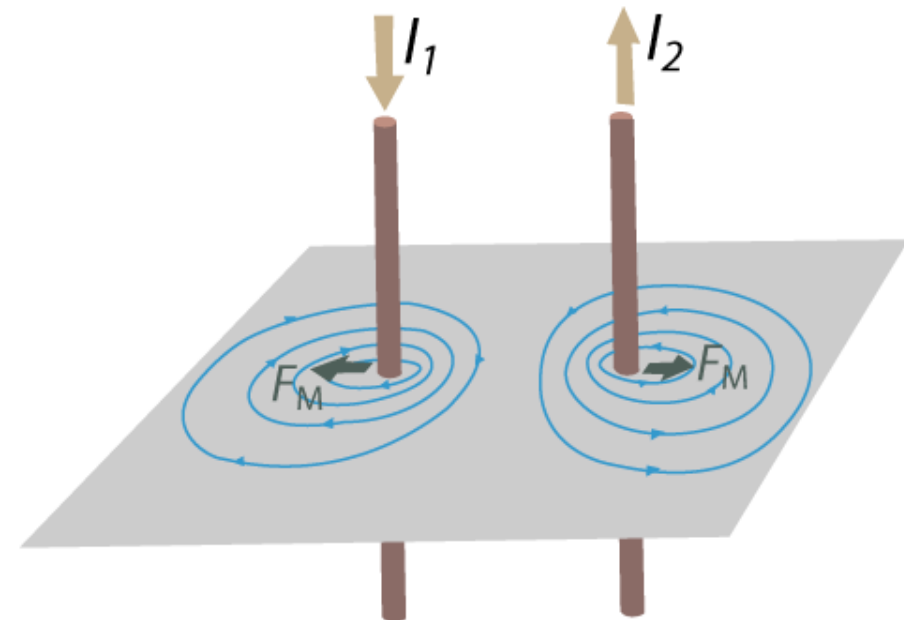
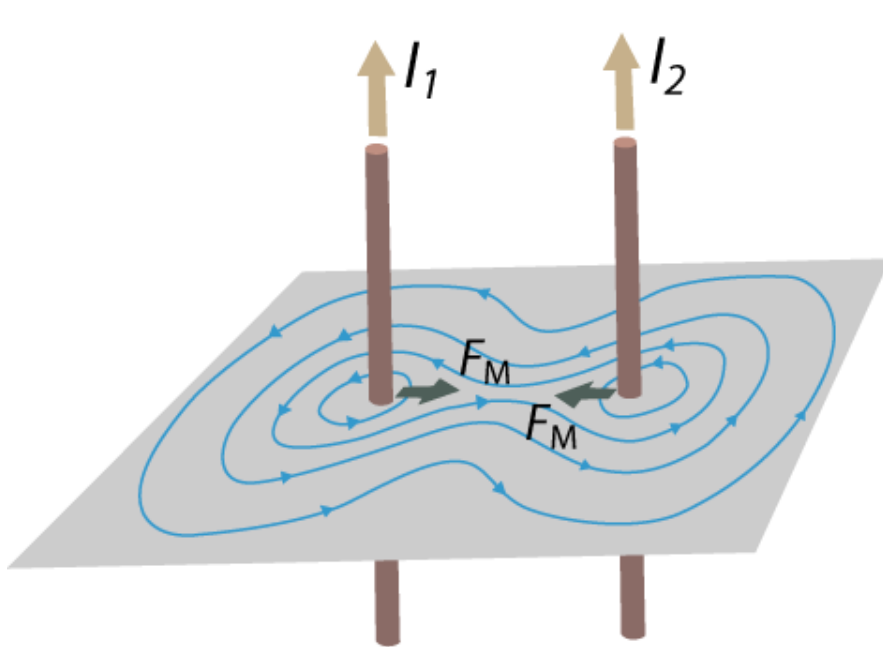


Mitschreiben

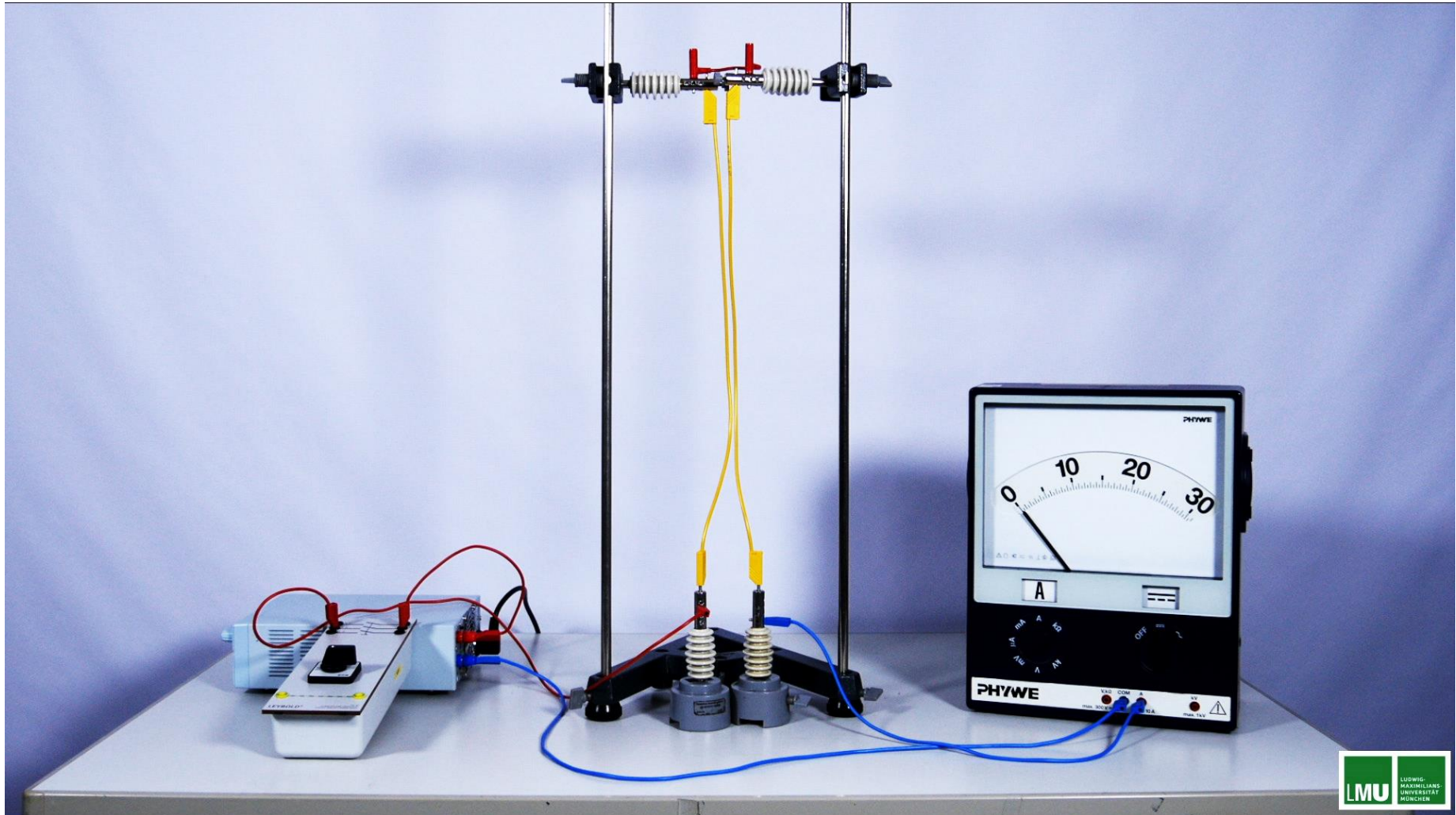
- Definition des Ampere



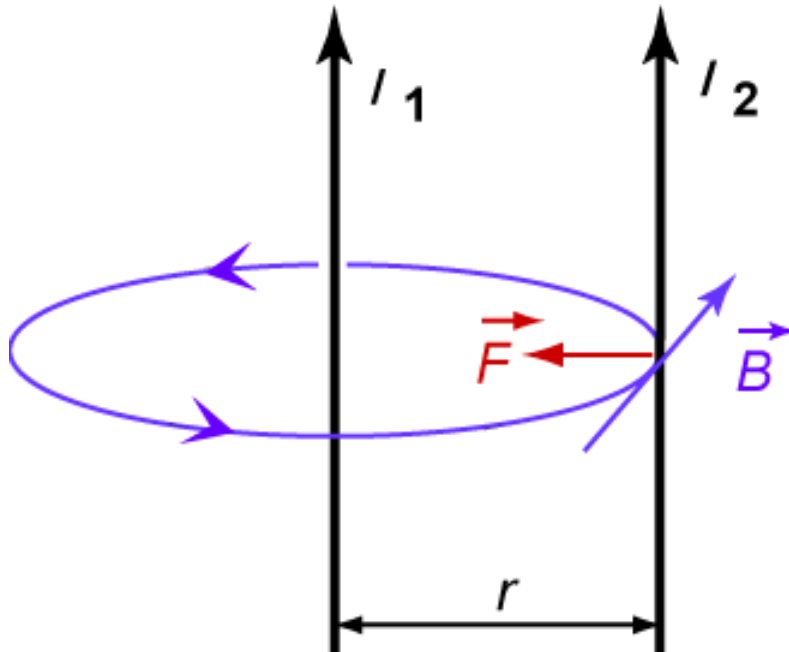
■ **Definition des Ampere**



Zwei parallele Leiter

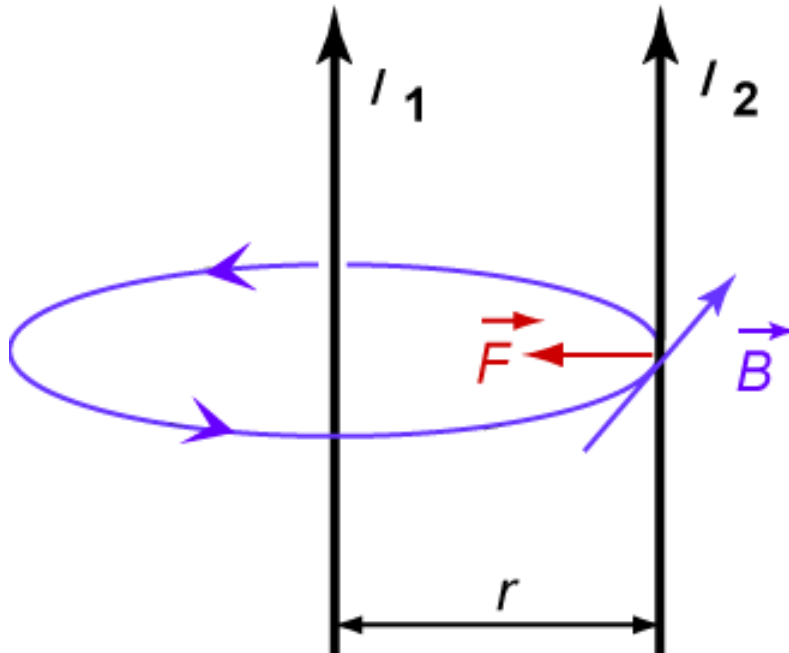


■ Definition der Stromstärke 1 Ampere



Zwei geradlinige, sehr lange parallele Leiter im Abstand 1 m werden von einem Strom 1 A durchflossen, wenn auf 1 m Leiter eine Kraft von $2 \cdot 10^{-7}$ N wirkt.

■ Definition der Stromstärke 1 Ampere



$$F_2 = I_2 \cdot \Delta l \cdot B_1$$

$$F_2 = I_2 \cdot \Delta l \cdot \frac{\mu_0 \cdot I_1}{2\pi r}$$

$$F_2 = I_2 \cdot \Delta l \cdot \frac{\mu_0 \cdot I_1}{2\pi r}$$



Eichung: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{N}{A^2}$

Zwei geradlinige, sehr lange parallele Leiter im Abstand 1 m werden von einem Strom 1 A durchflossen, wenn auf 1 m Leiter eine Kraft von $2 \cdot 10^{-7}$ N wirkt.

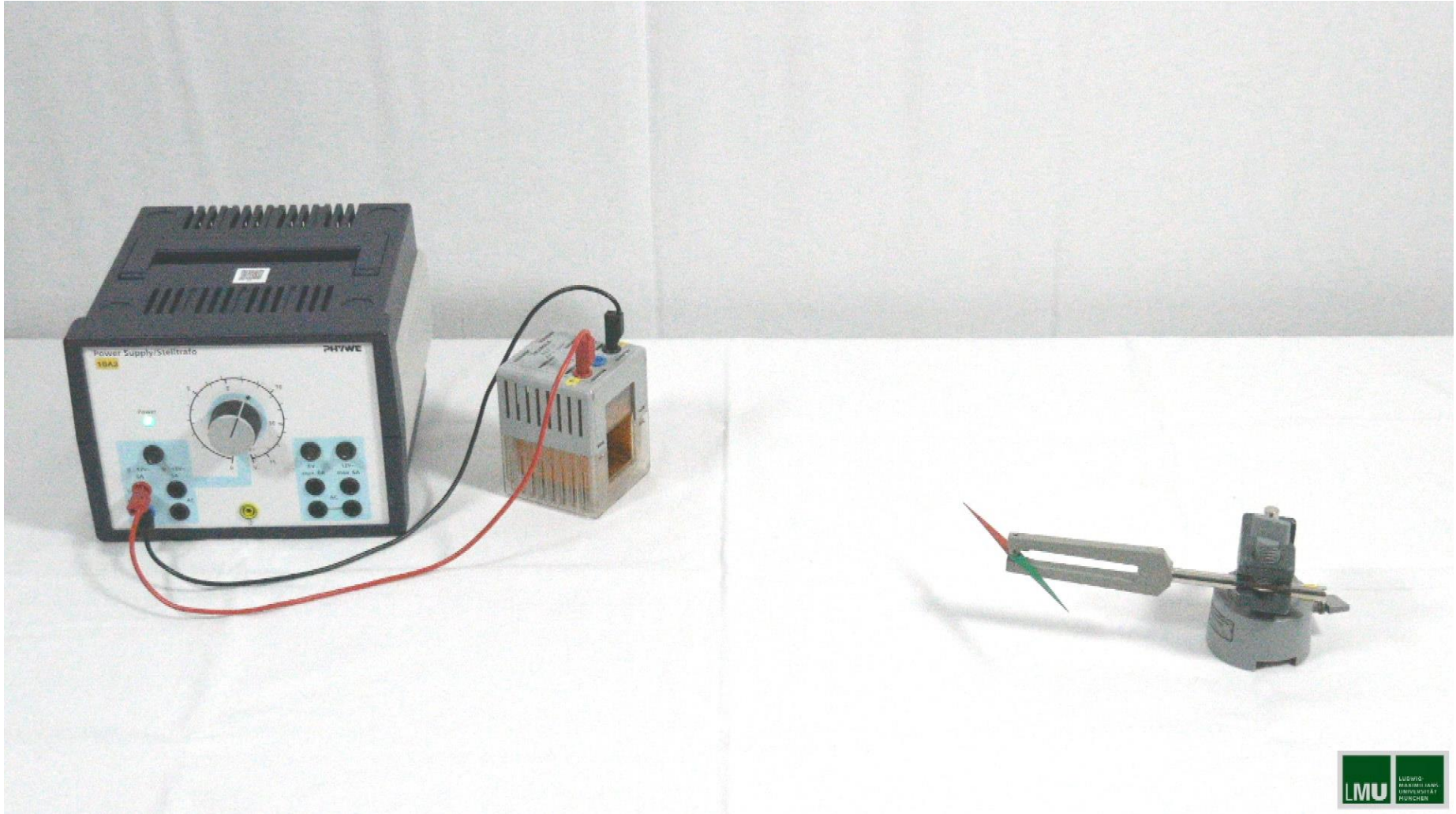


Materie im Magnetfeld

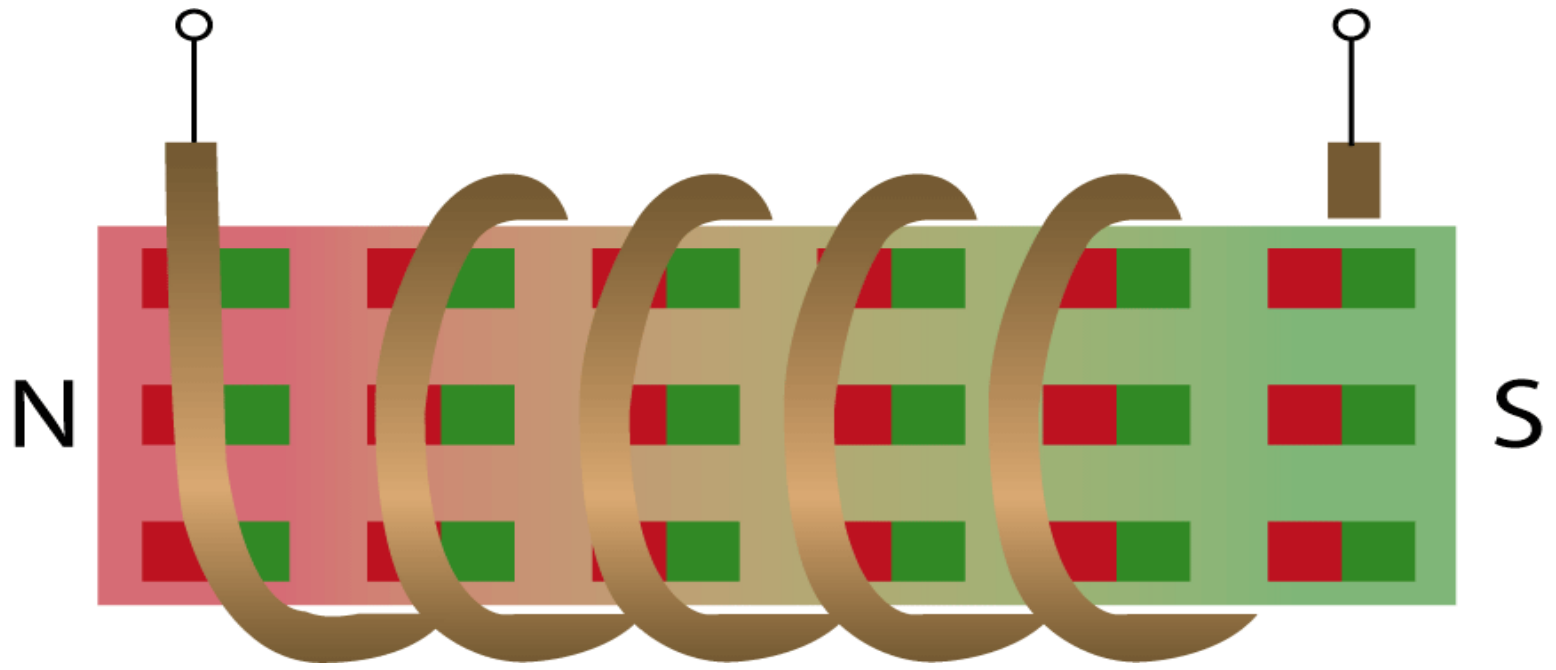


- **Atomare Kreisströme**
- **Diamagnetismus**
- **Paramagnetismus**
- **Ferromagnetismus**

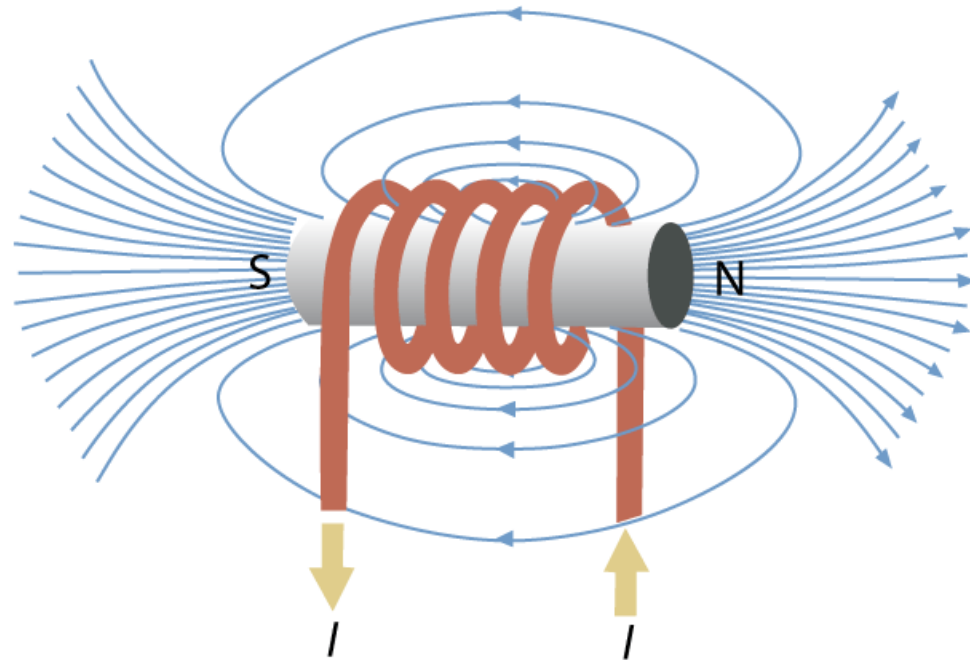
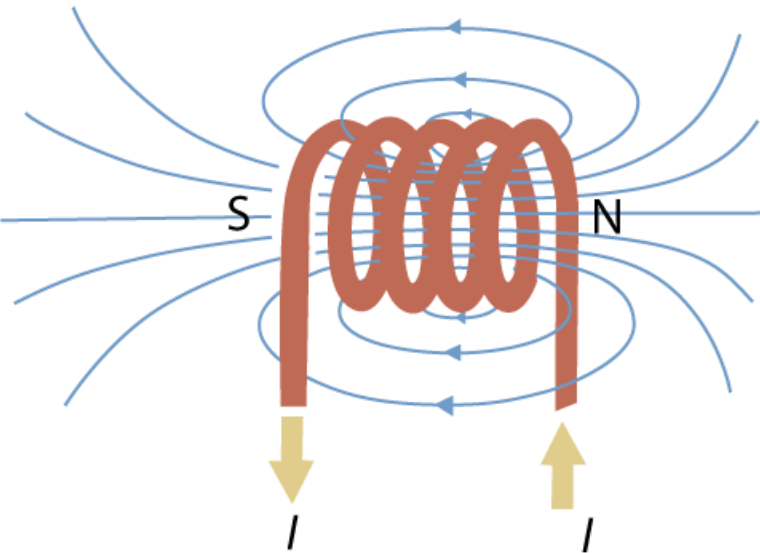
Feldstärkeunterschiede



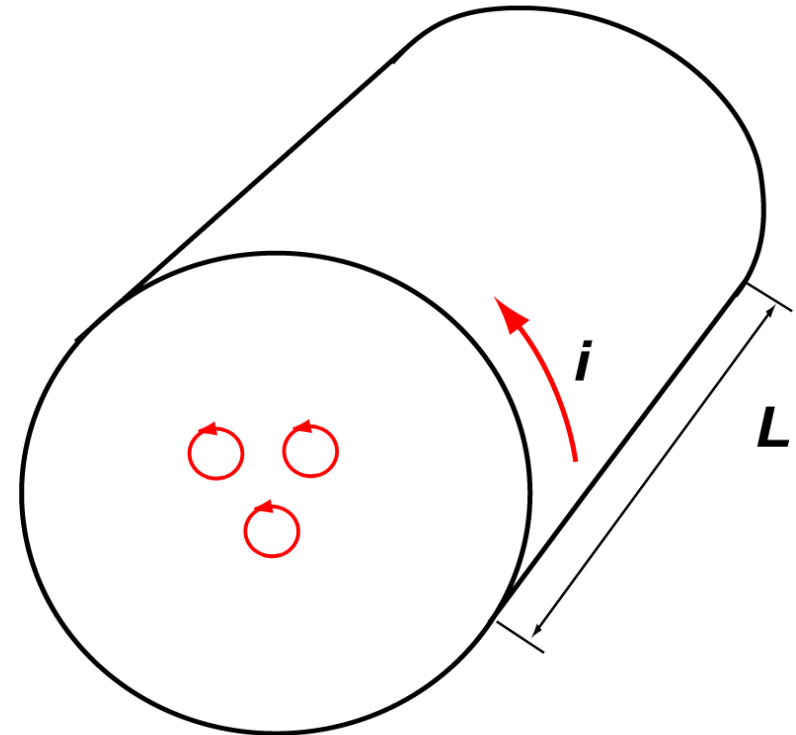
Stromführende Spule mit und ohne ferromagnetischem Kern



Stromführende Spule mit und ohne ferromagnetischem Kern



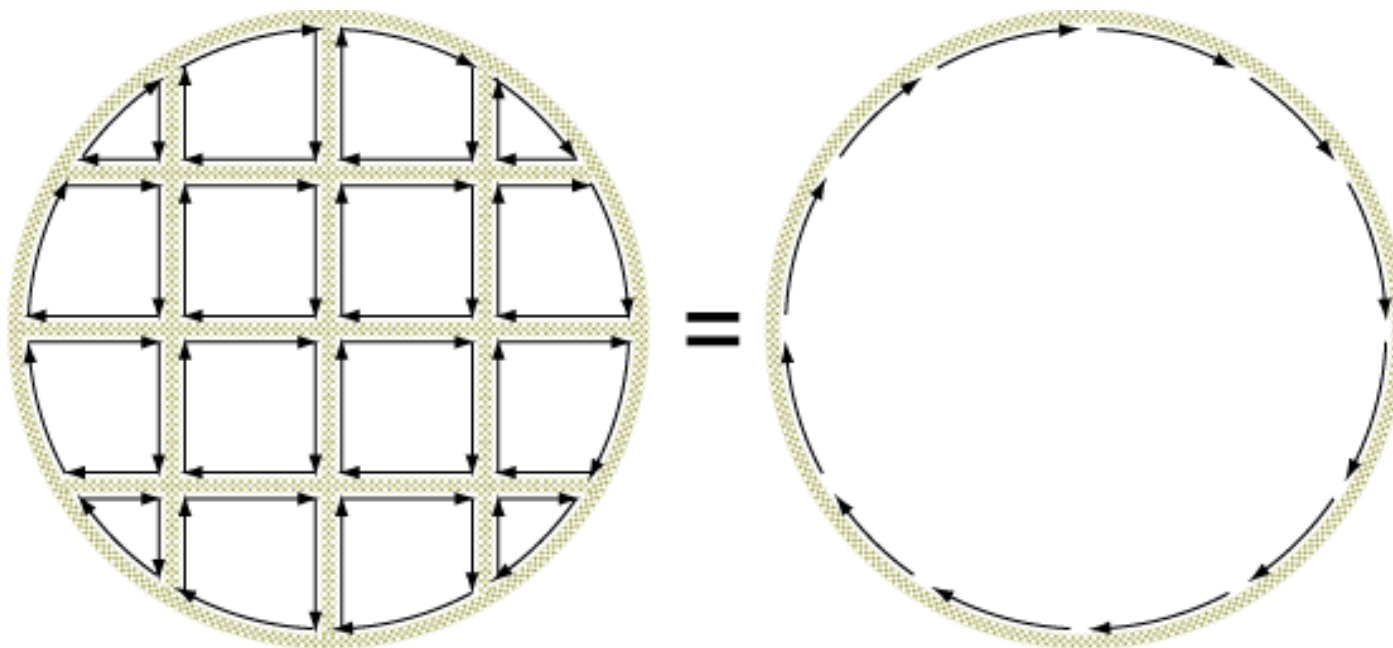
Mikroskopische magn. Momente werden durch atomare Kreisströme erzeugt



**Anschauliche Vorstellungshilfe (nicht korrekt):
Kreisende Elektronen nach dem Bohr'schen Atommodell stellen Ringströme dar.**

Auch mit dem Elektronenspin ist ein magn. Moment verknüpft, das klassisch nicht zu erklären ist.

- **Elementare Kreisströme in Addition**



- **Definition magnetisches Dipolmoment:**

$$\vec{p}_m = I \cdot \vec{A}$$

■ Magnetisierung:

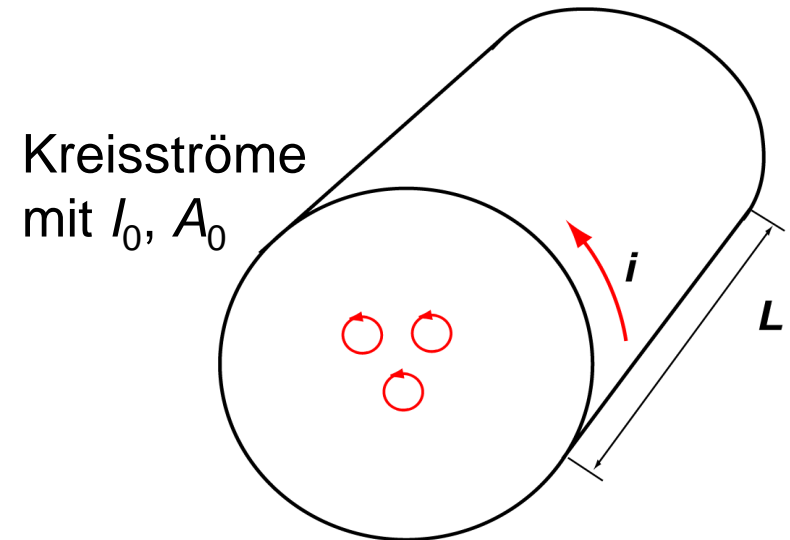
Def.: „Magn. Momente pro Volumen“

Vorstellung vom Zusammenwirken
differentieller Magnetisierungsströme

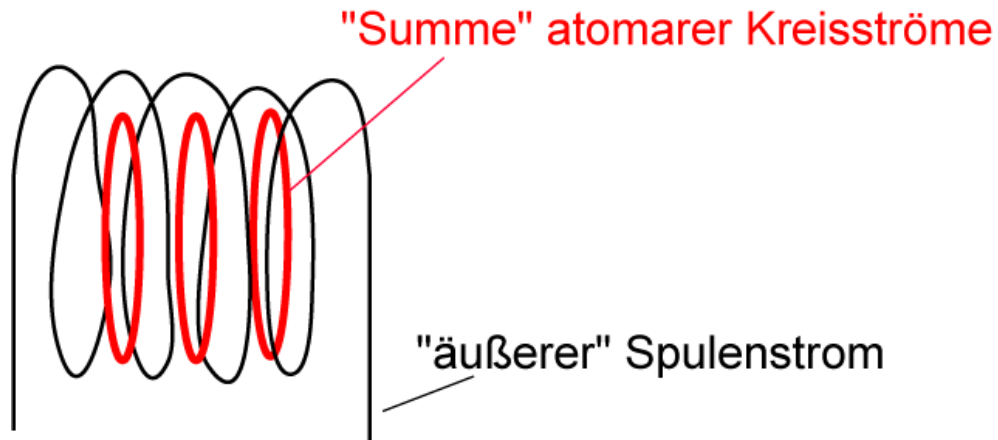
$$M = \left(\frac{\Delta p}{\Delta V} \right) = \frac{dp}{dV}$$

$$M = \frac{\sum(I_n A_n)}{A L} = N \frac{I_0 A}{A} = \frac{N}{L} \cdot I_0$$

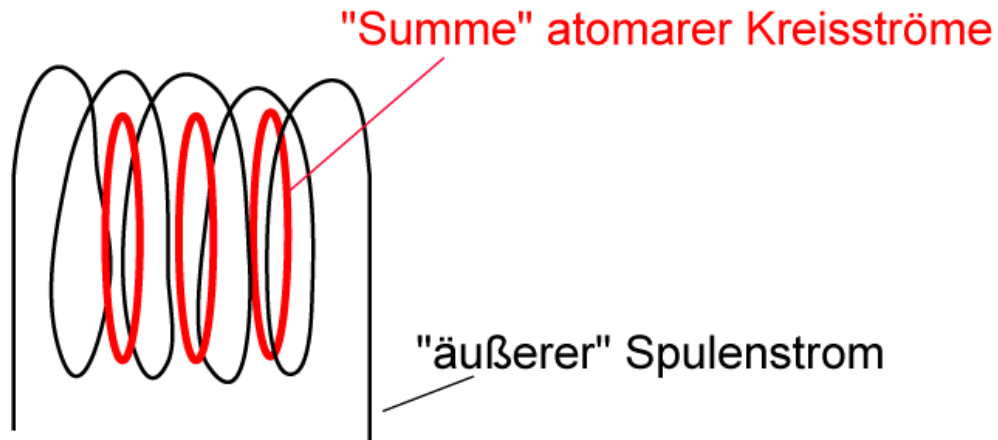
(analog zur Spule)



Die magn. Flussdichte resultiert aus makroskopischen und mikroskopischen Anteilen:



Die magn. Flussdichte resultiert aus makroskopischen und mikroskopischen Anteilen:



$$B = \mu_0 \cdot \underbrace{\frac{N}{L} \cdot I}_H + \mu_0 \cdot M$$



$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M})$$



- Weitere Beschreibungen - Zusammenhang zwischen \vec{B} und \vec{H} :

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M})$$



\vec{M} vom äußeren Feld abhängig:

- Weitere Beschreibungen - Zusammenhang zwischen B und H :

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M})$$



M vom äußeren Feld abhängig:

$$M = \chi_m \cdot H$$



magn. Suszeptibilität

$$B = \mu \cdot H = \mu_0 (1 + \chi_m) \cdot H$$

$$B = \mu \cdot H = \mu_0 \mu_r \cdot H$$

$$\mu_r = 1 + \chi_m$$



Den Zusammenhang zwischen Feldstärke H und Magnetisierung M beschreibt die magnetische Suszeptibilität

$$\chi_m :$$

Al:	$2,3 \cdot 10^{-5}$
Mg:	$1,2 \cdot 10^{-5}$
Ti:	$7,06 \cdot 10^{-5}$
Cu:	$-0,98 \cdot 10^{-5}$
Ag:	$-2,6 \cdot 10^{-5}$
Fe:	5000 – 7000
Permalloy (55% Fe, 45% Ni):	25000



- **Diamagnetismus**

$\chi_m < 0$ „Abschwächung“ des Magn.feldes

Vorstellung: Atomare Kreisströme werden beeinflusst

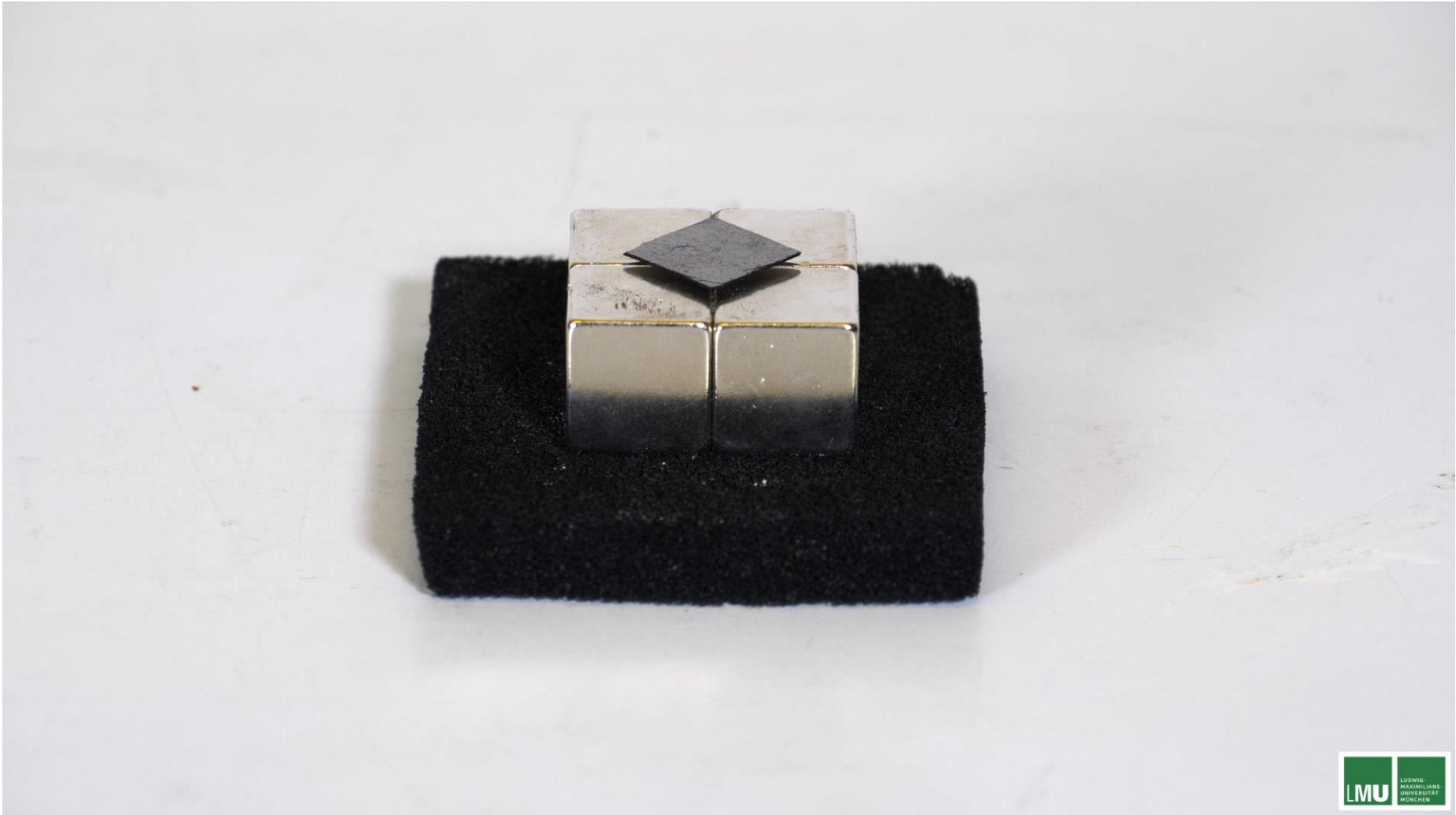
=> Magnetisierung wirkt dem äußeren Feld entgegen

(siehe Lenzsche Regel)

➔ Bi im inhom. Feld

➔ Kerzenflamme im inhom. Feld

Magnetische Levitation mit einem Graphit-Plättchen

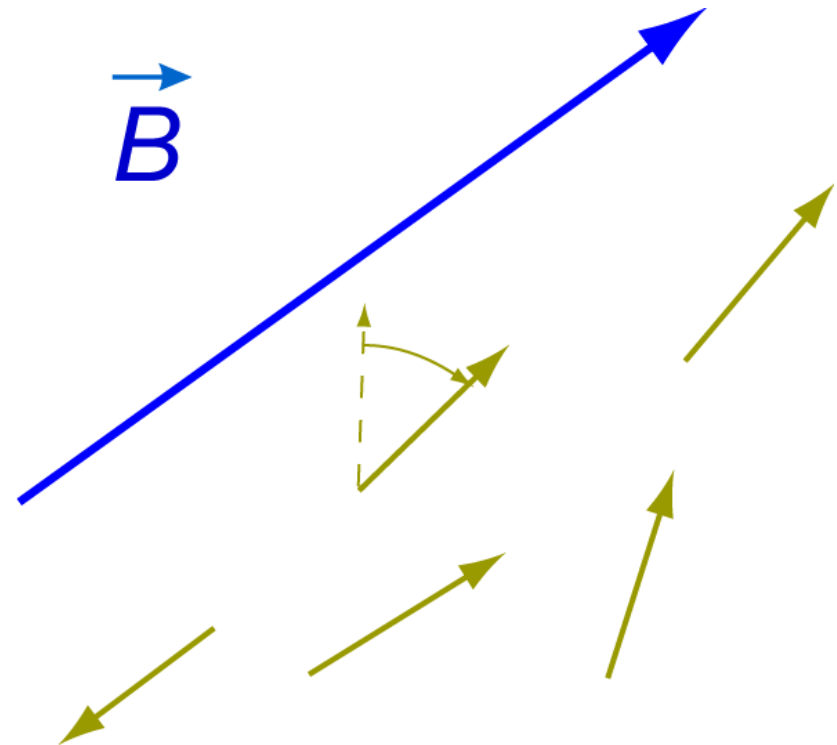


- Paramagnetismus

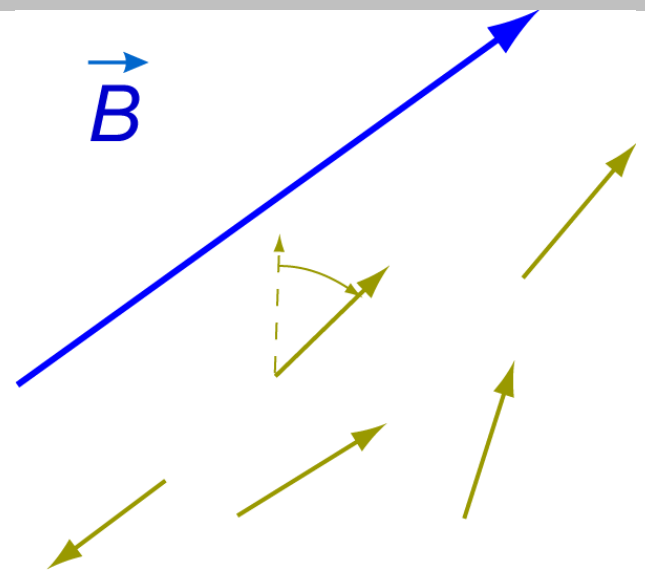
$\chi_m > 0$ "Verstärkung" des Magnetfeldes

Vorstellung:

Ausrichtung permanenter magn. Dipole



■ Paramagnetismus



Energiebetrachtung:

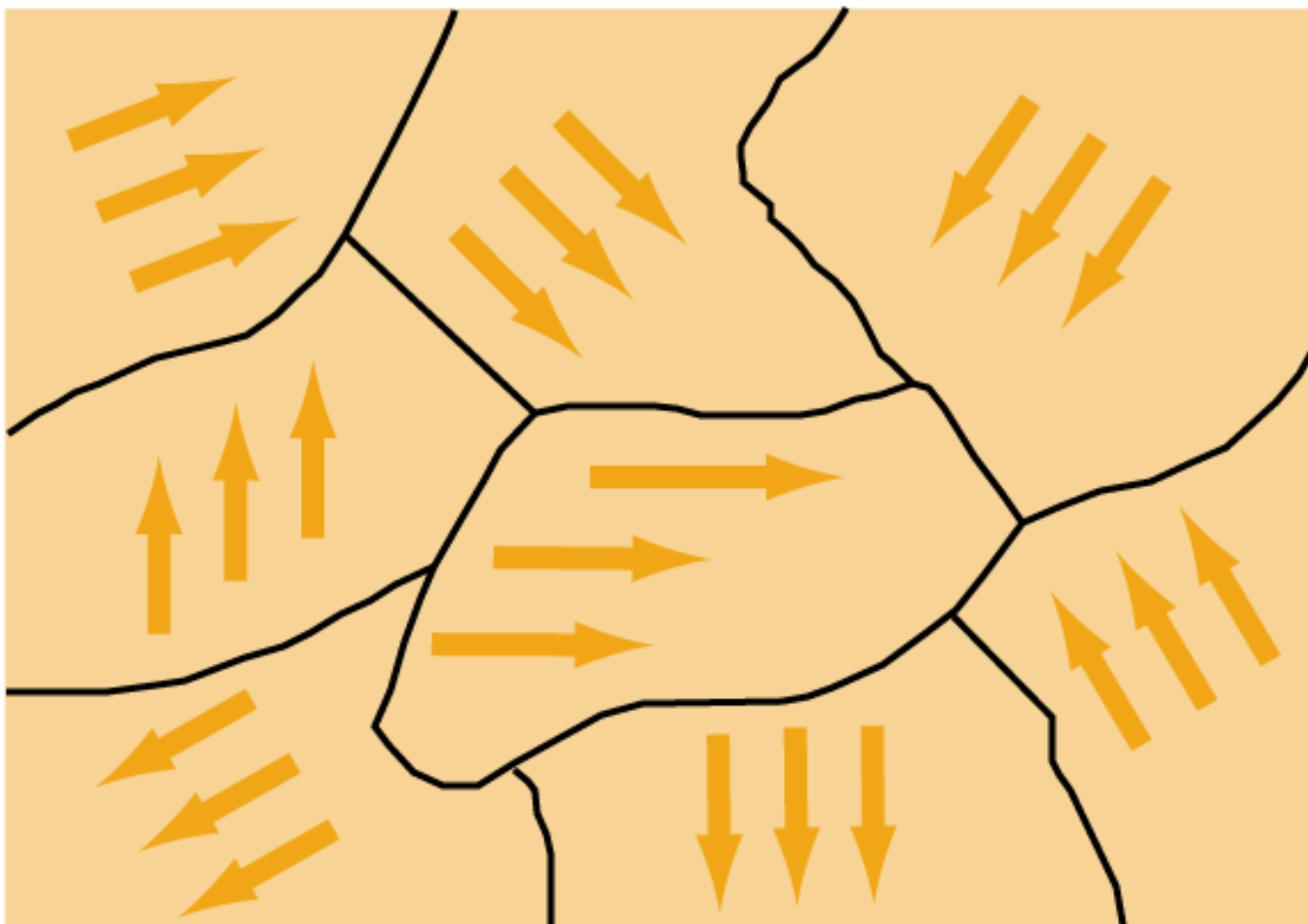
$$E_{pot} = -\vec{p}_m \cdot \vec{B}$$

Analog E-Feld: $E_{pot} = -\vec{p}_e \cdot \vec{E}$

- a) Ausrichtung ist energetisch „günstiger“
- b) Paramagnete werden in ein (inhom.) Feld gezogen - Diamagnete abgestoßen

➔ Paramagnetische Stoffe (z. B. Sauerstoff) wird ins Feld hinein gezogen

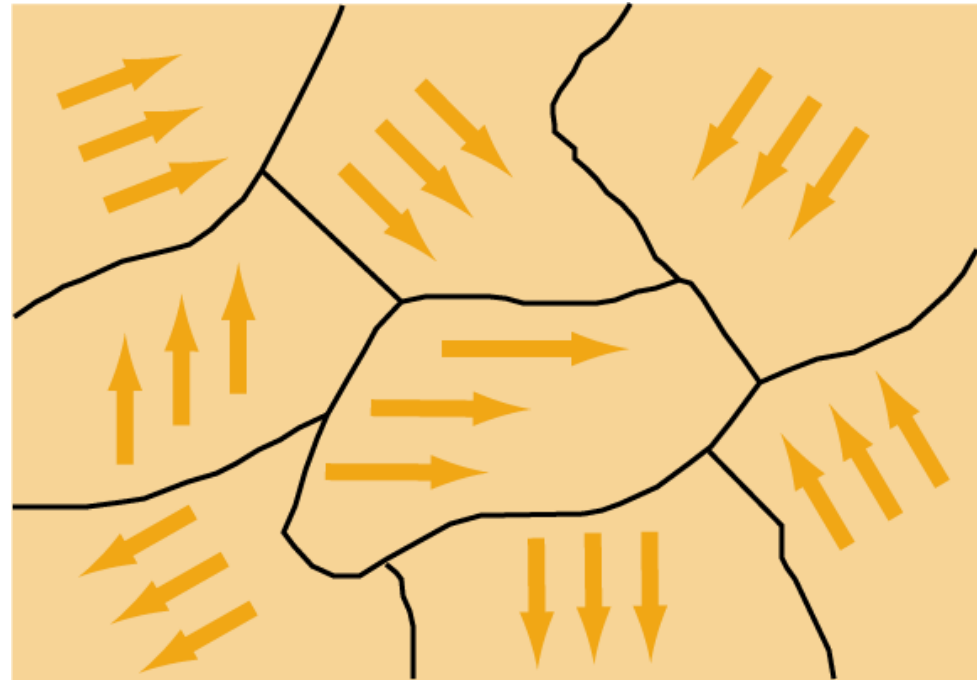
- **Magnetische Domänen**



■ Ferromagnetismus

$\chi_m \gg 0$: (≈ 1000) „große Verstärkung“

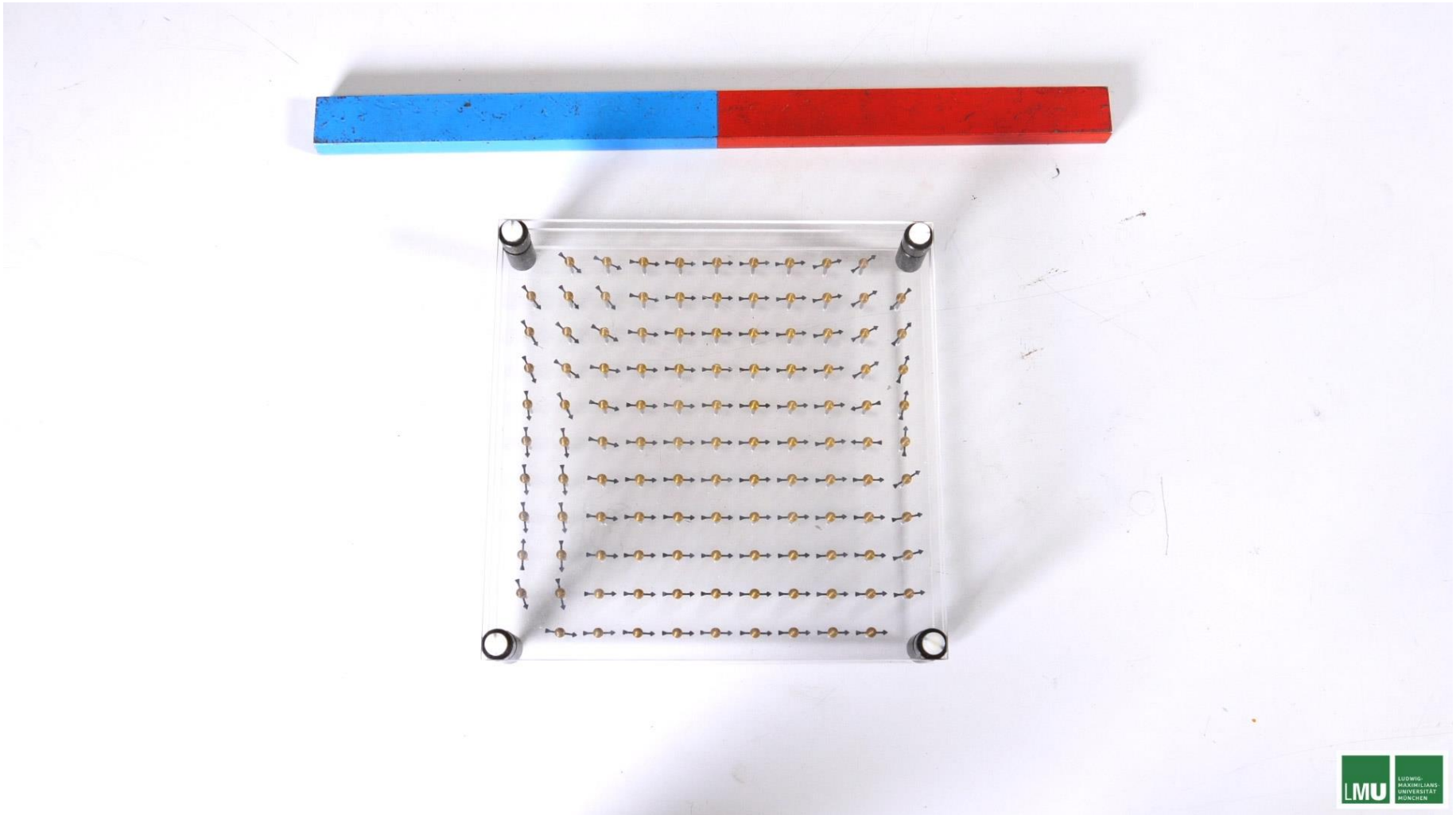
Vorstellung:
Ausrichtung ganzer Domänen



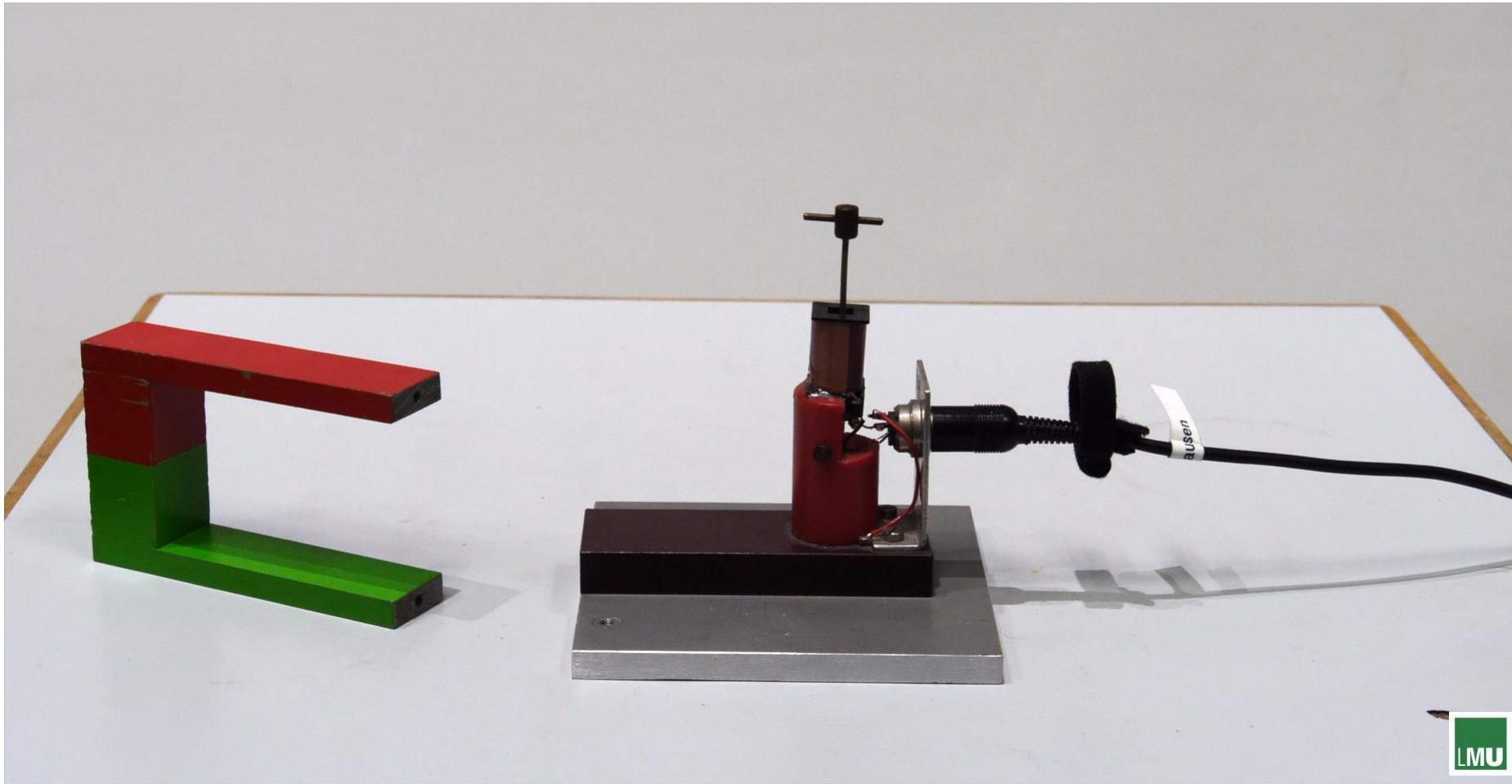
→ Barkhausen-Effekt (akustisch)

→ Magnetnadelmodell

Magnetische Domänen im Modell



Barkhausen-Effekt





- **Ferromagnetismus**

**Ferromagnetismus geht oberhalb der sog. Curie-Temperatur
(Eisen $T_c \approx 1042 \text{ K} = 730 \text{ °C}$) in Paramagnetismus über**

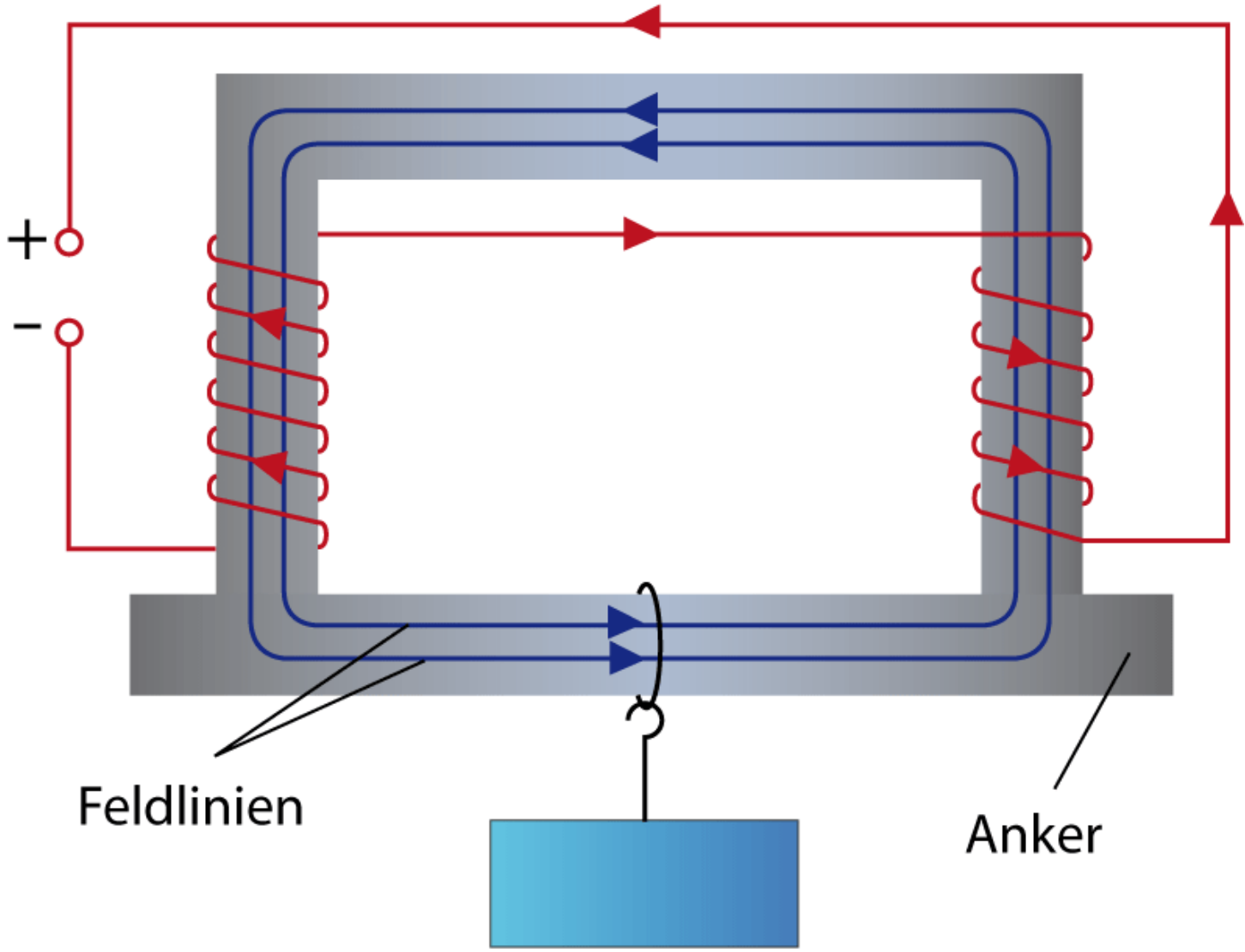
→ magnetisierter Nagel wird erhitzt

Curie-Temperatur



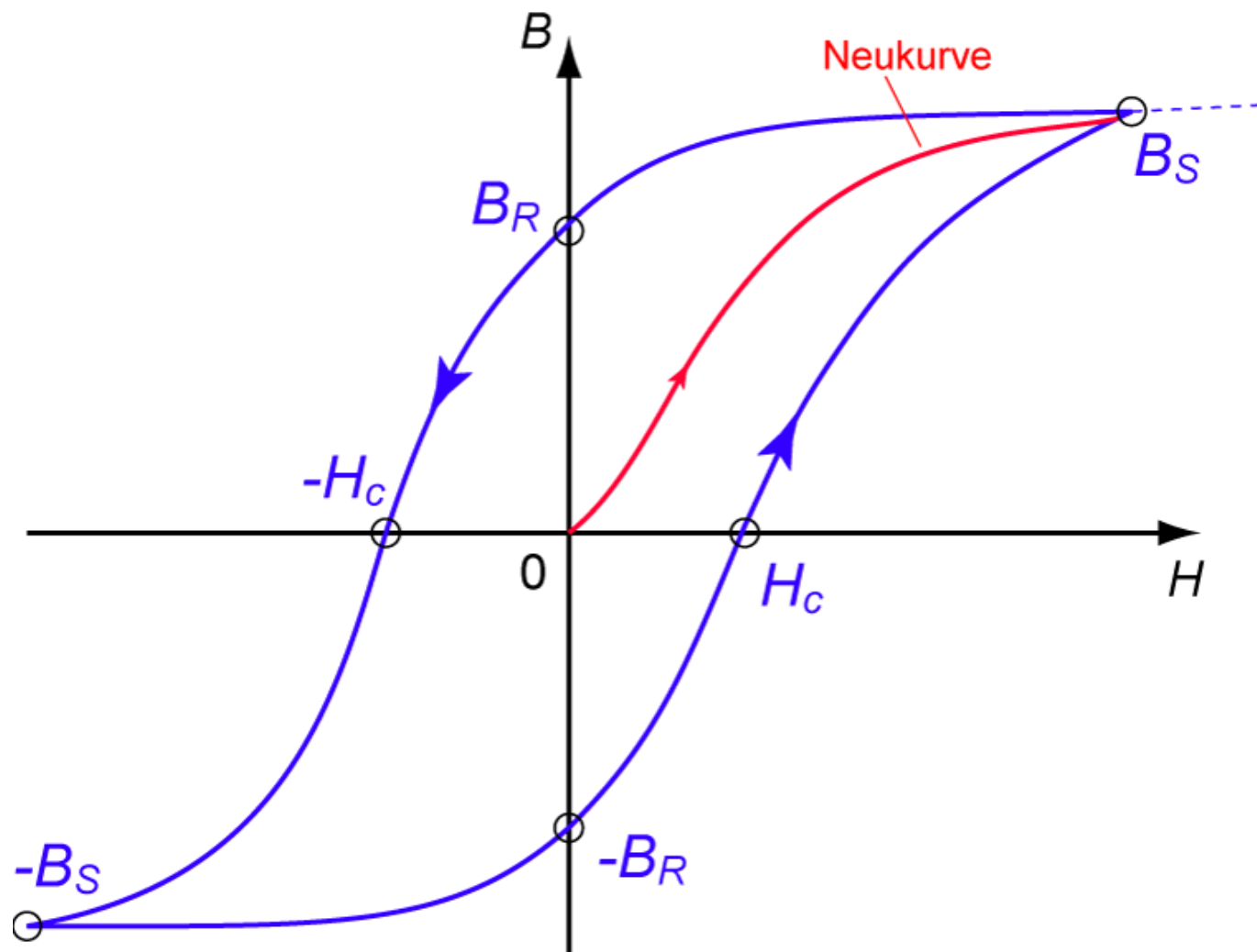
[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/3-4T-Curie Temperatur.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/3-4T-Curie%20Temperatur.m4v)

- Ferromagnetismus – der magnetische Fluss bleibt im Material

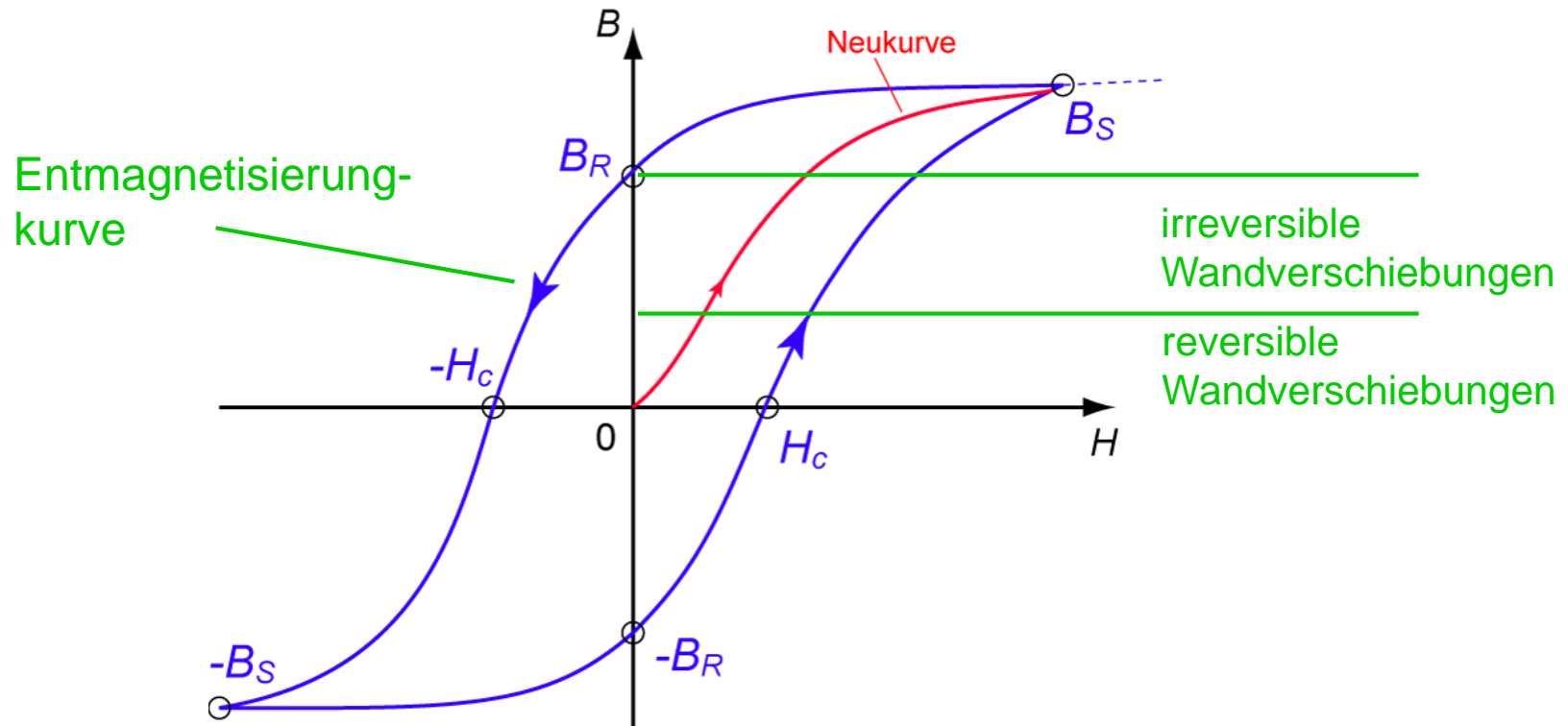


■ Hysterese

(Magnetisierung ist auch von der "Vorgeschichte" abhängig)

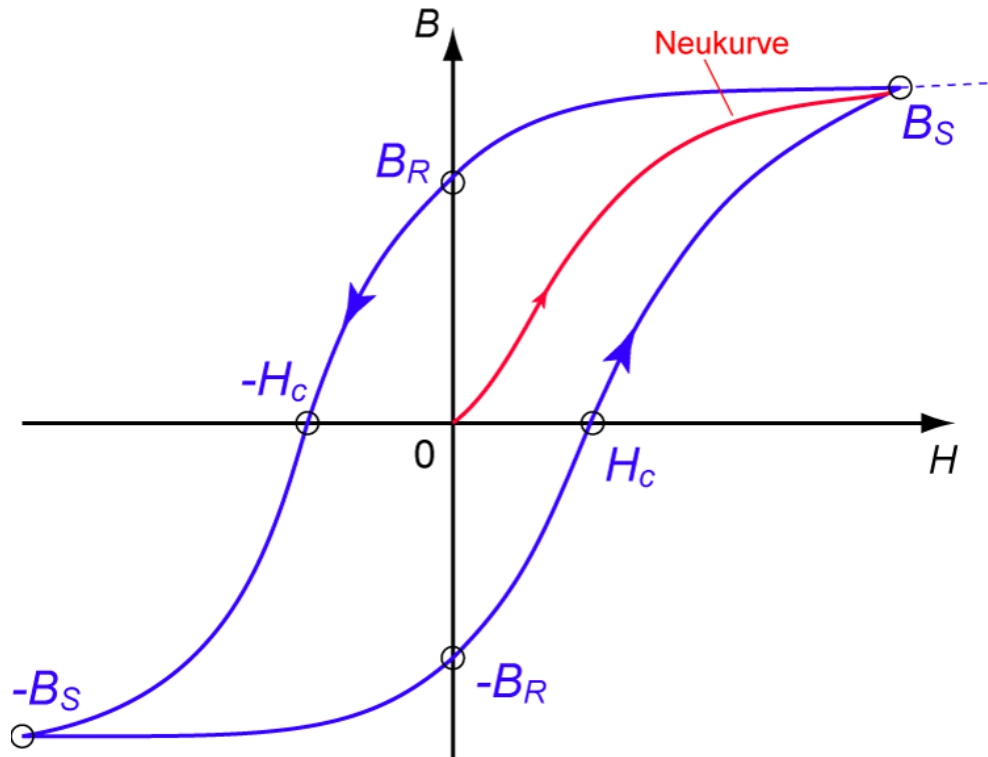


■ Hysterese Ummagnetisierung verlangt Energie



B_R : Remanenzflussdichte; H_c : Koerzitivfeldstärke

■ **Hysterese** Ummagnetisierung verlangt Energie



! Maßstab:
 $B > 1000 \mu_0 H$

B_R : Remanenzflussdichte; H_c : Koerzitivfeldstärke

magnetisch weiche Stoffe: $0,1 < H_c < 10^3 \text{ A/m}$

magnetisch harte Stoffe: $H_c > 10^4 \text{ A/m}$