



## ➤ 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**

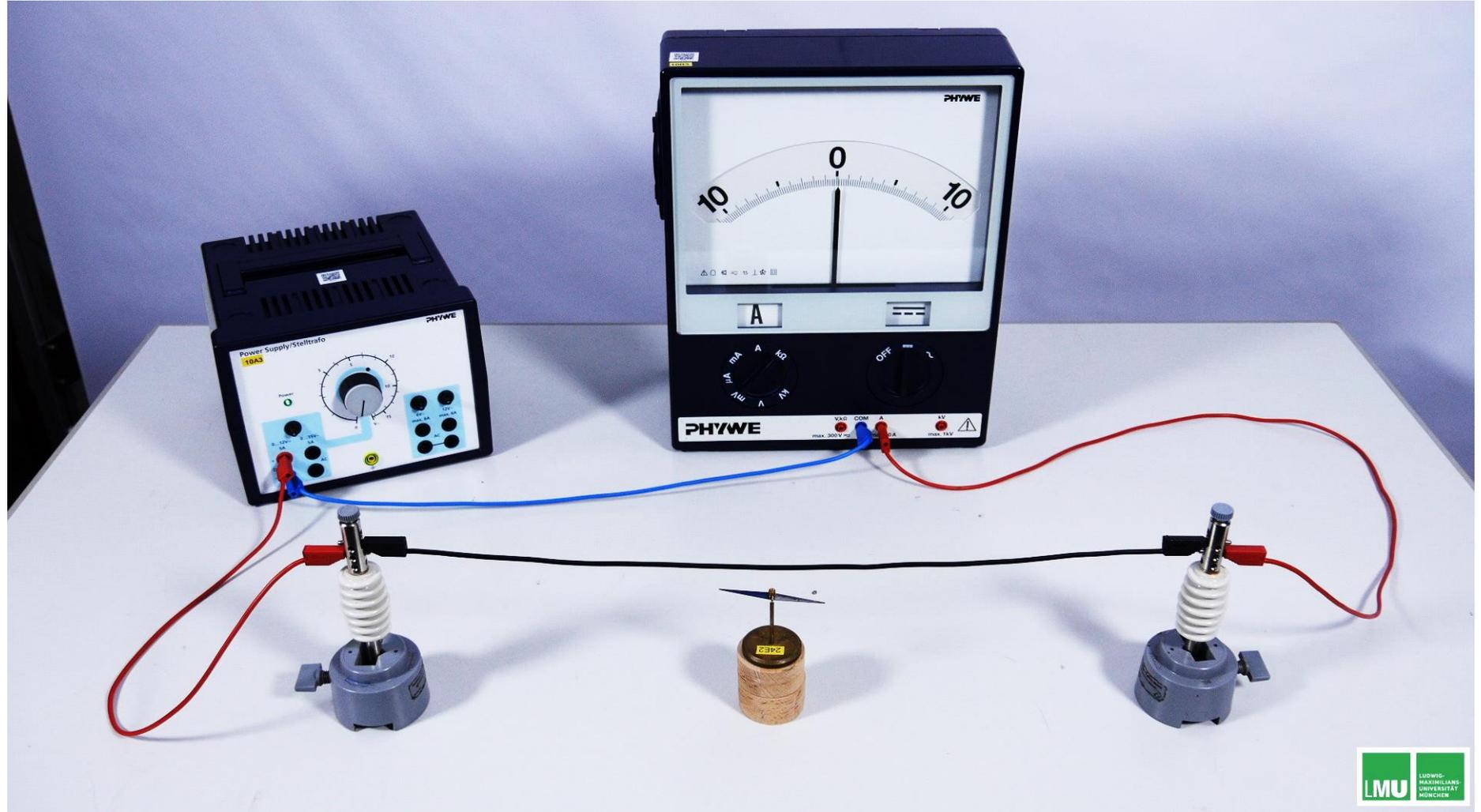


## *"Quellen" des magnetischen Feldes*

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

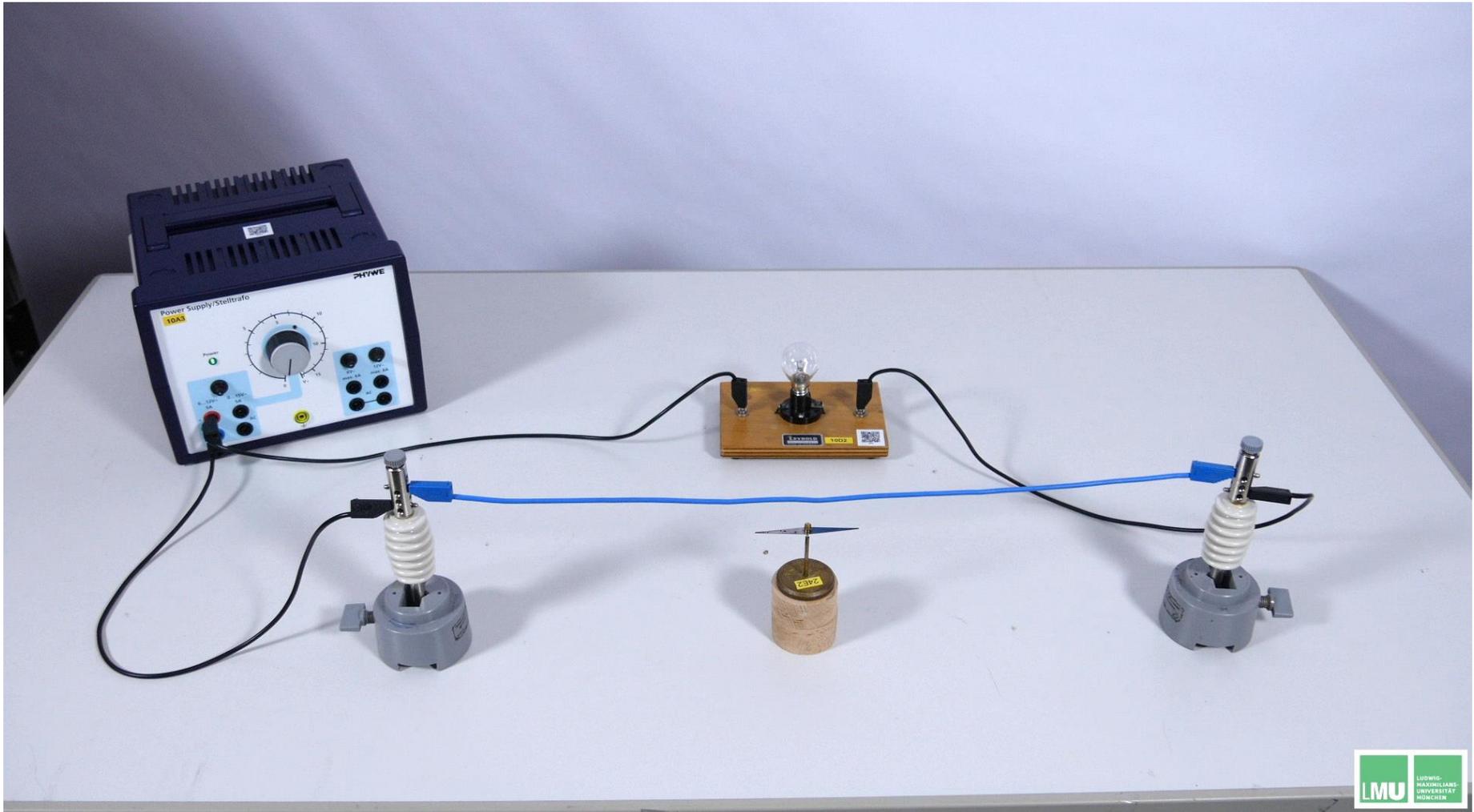


# Oersted-Versuch



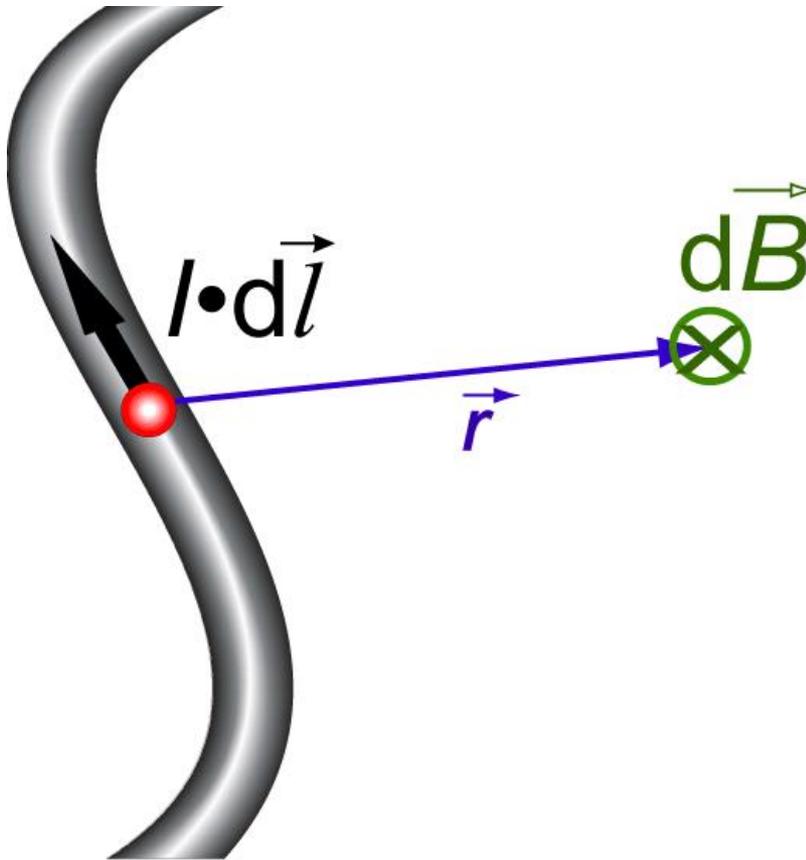
[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2\\_E\\_Video/3-3A-Oersted\\_Amperemeter.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/3-3A-Oersted_Amperemeter.m4v)

## Oersted-Versuch



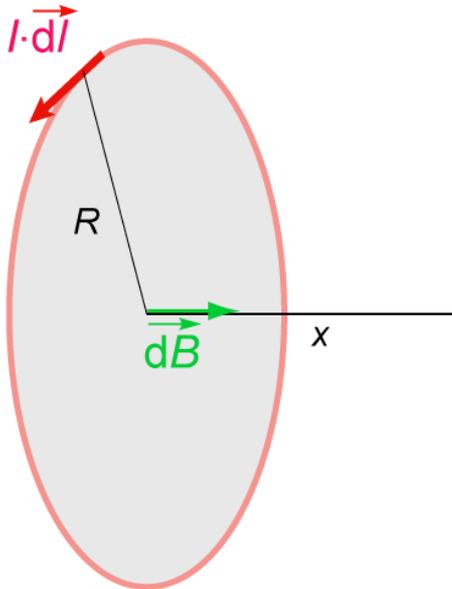


- Magnetfeld eines differentiell kleinen Stromfadens



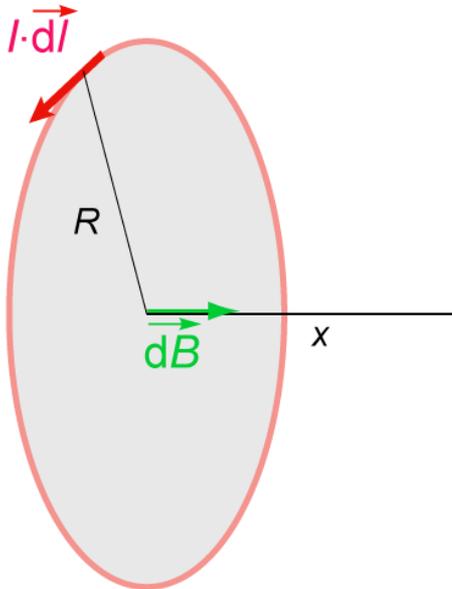


- **Magnetfeld einer Leiterschleife**  
a) **Im Schleifenmittelpunkt**

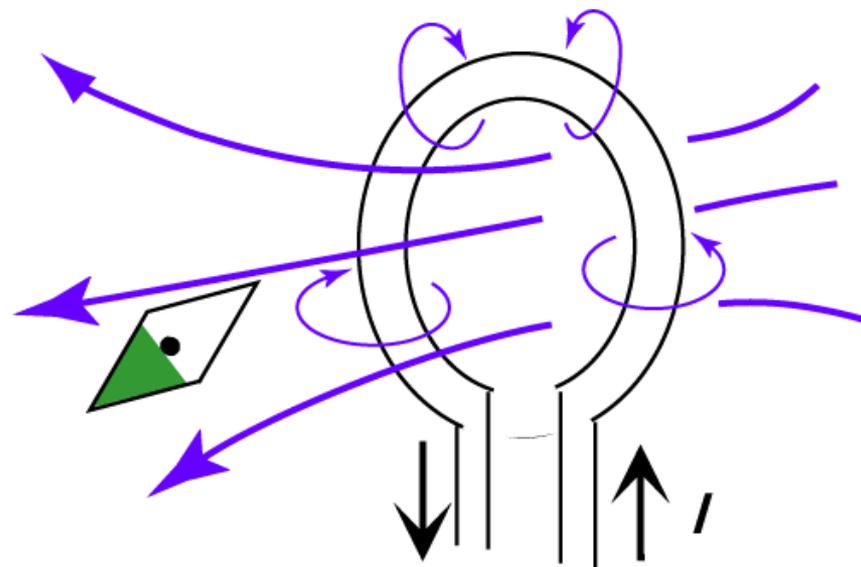
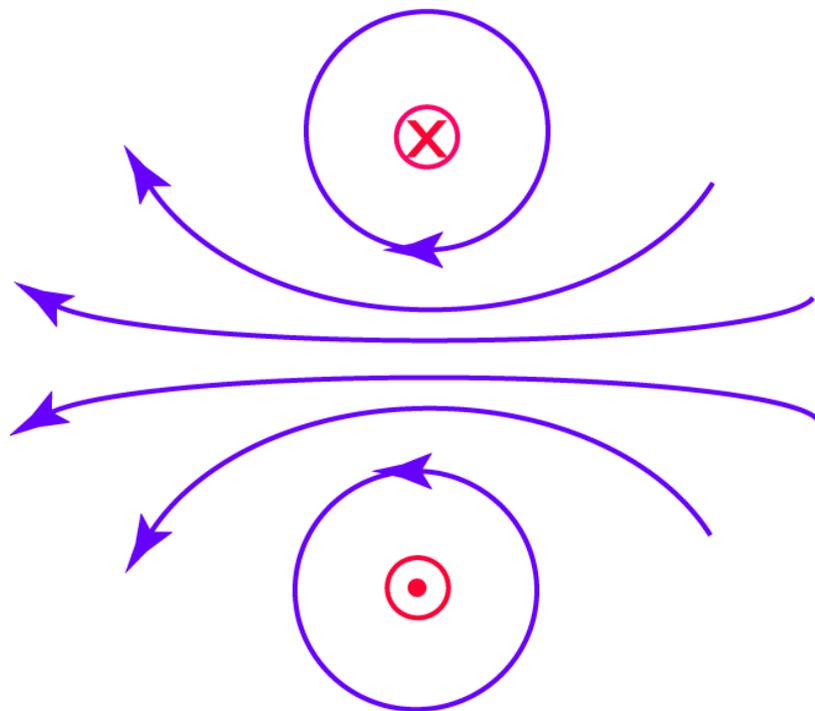




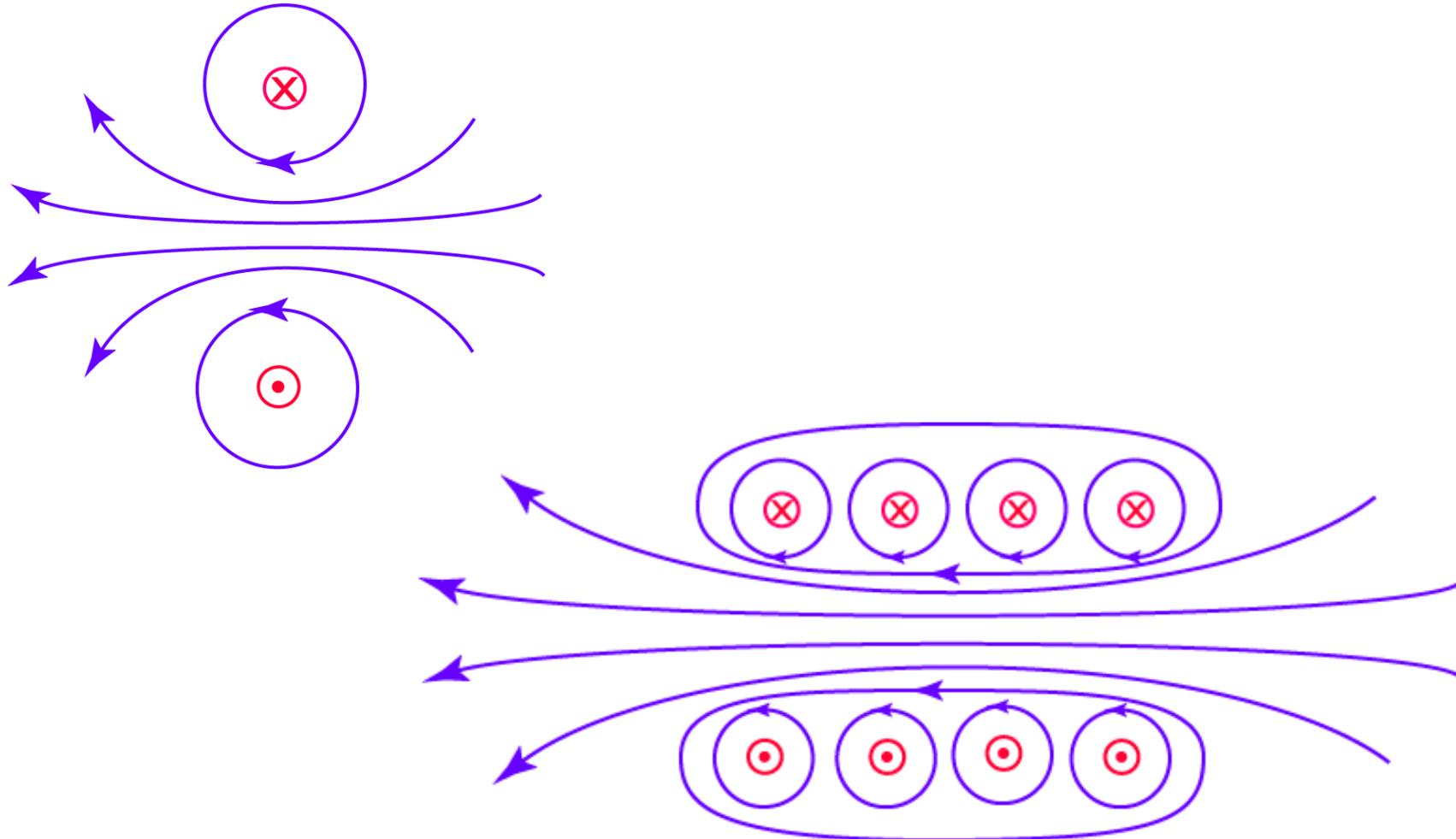
- **Magnetfeld einer Leiterschleife**  
a) **Im Schleifenmittelpunkt**



## ■ Feld eines Kreisstromes



- von der Schleife zur Spule

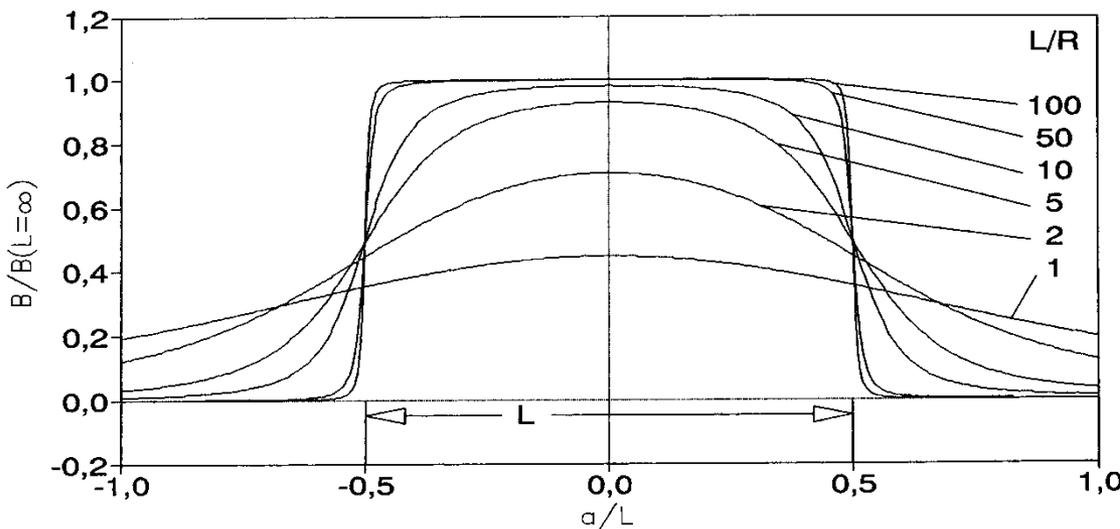


für sog. "lange Spule" (d.h.  $a \gg R$ ;  $b \gg R$ ):

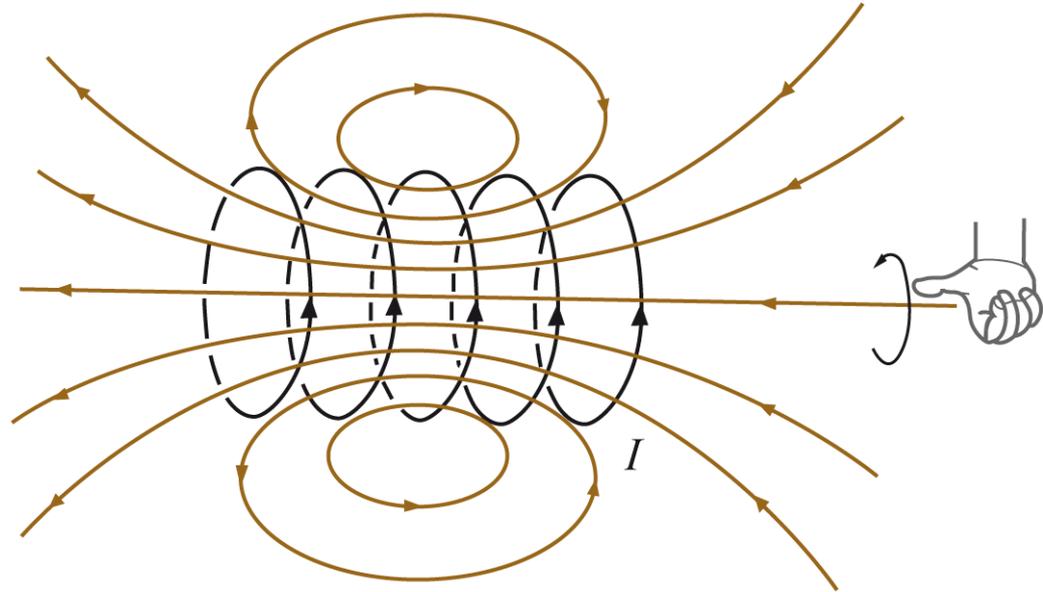
$$B = \mu_0 \cdot n \cdot I = \mu_0 \cdot \frac{N}{L} \cdot I$$

(einfache Herleitung später)

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



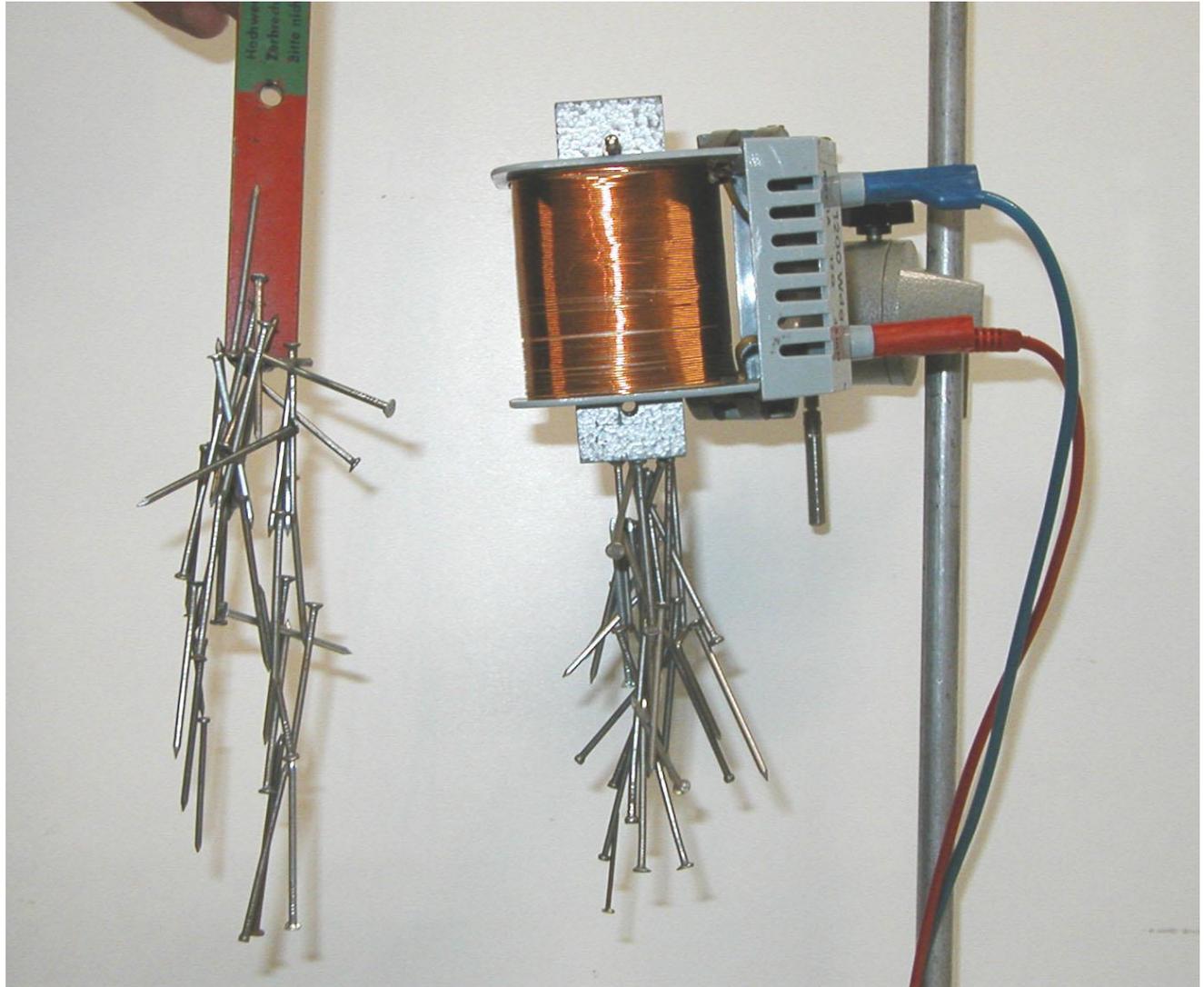
messung mit Hallsonde



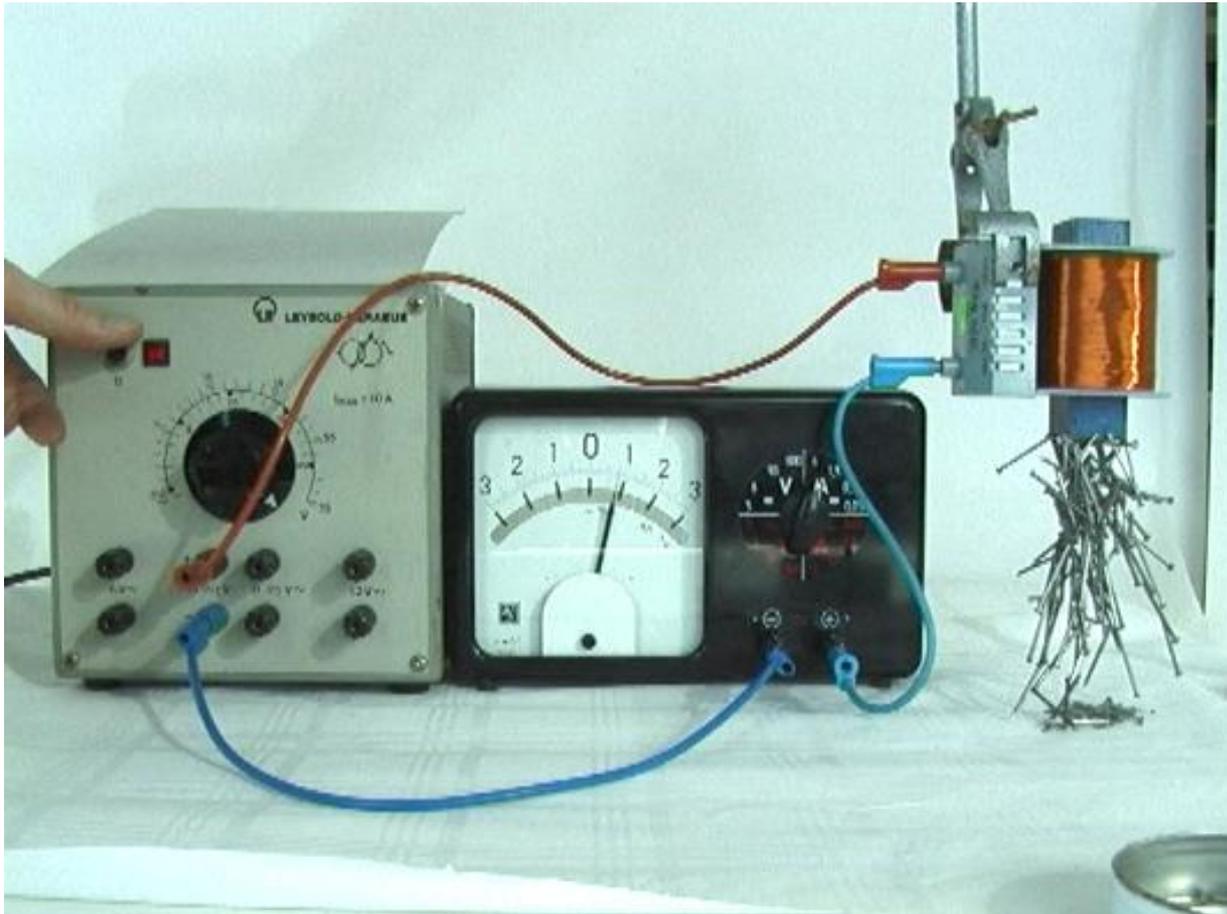
**Regel: Sieht man auf die Spulenfläche:**



## Stabmagnet und Elektromagnet

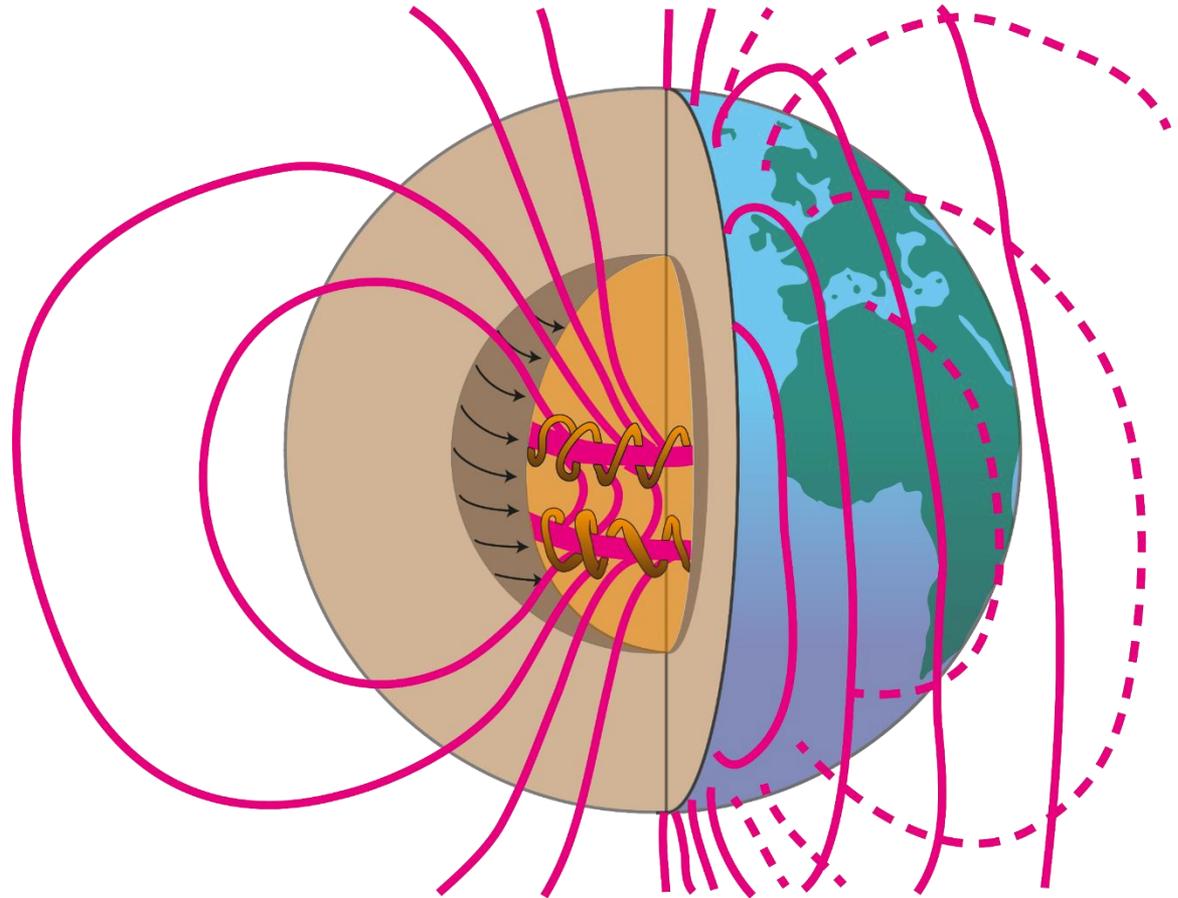


## Grundphänomenen Elektromagnet

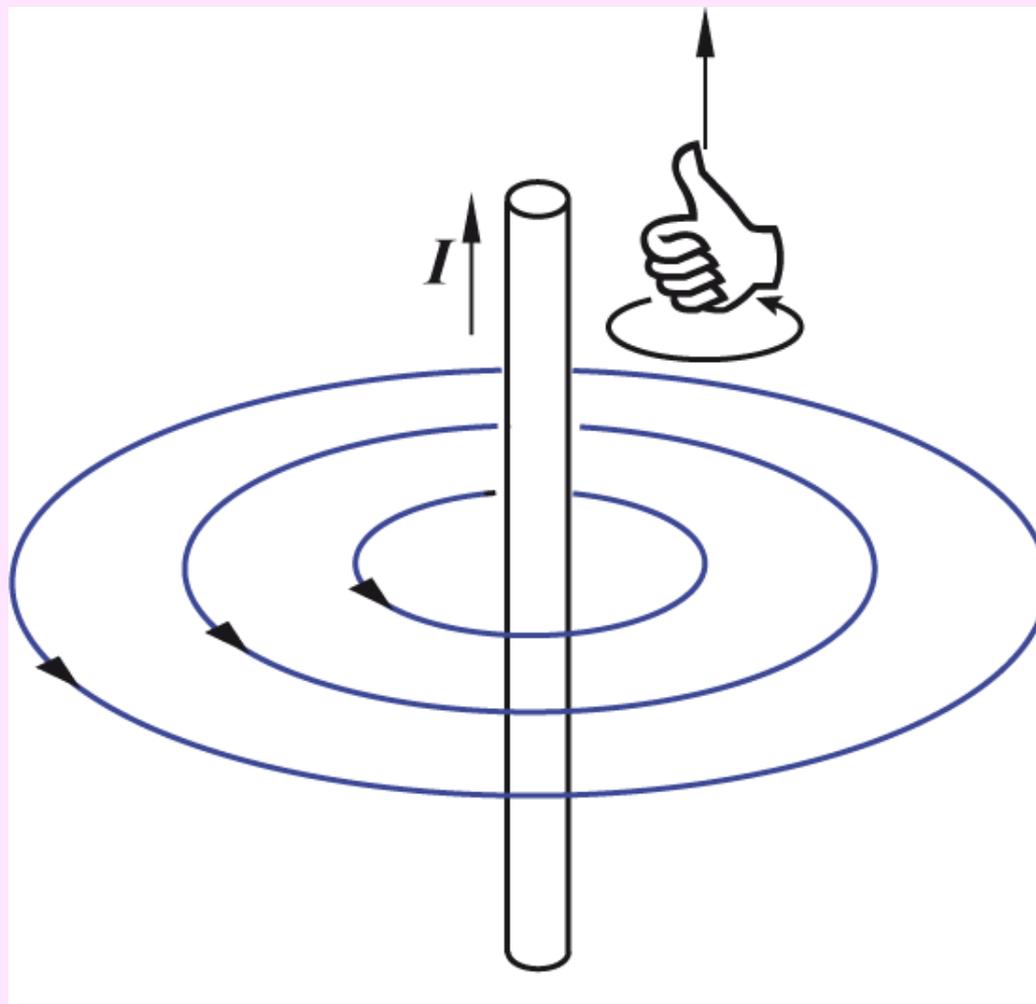


[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2\\_E\\_Video/3-2B-Emagus2o.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/3-2B-Emagus2o.m4v)

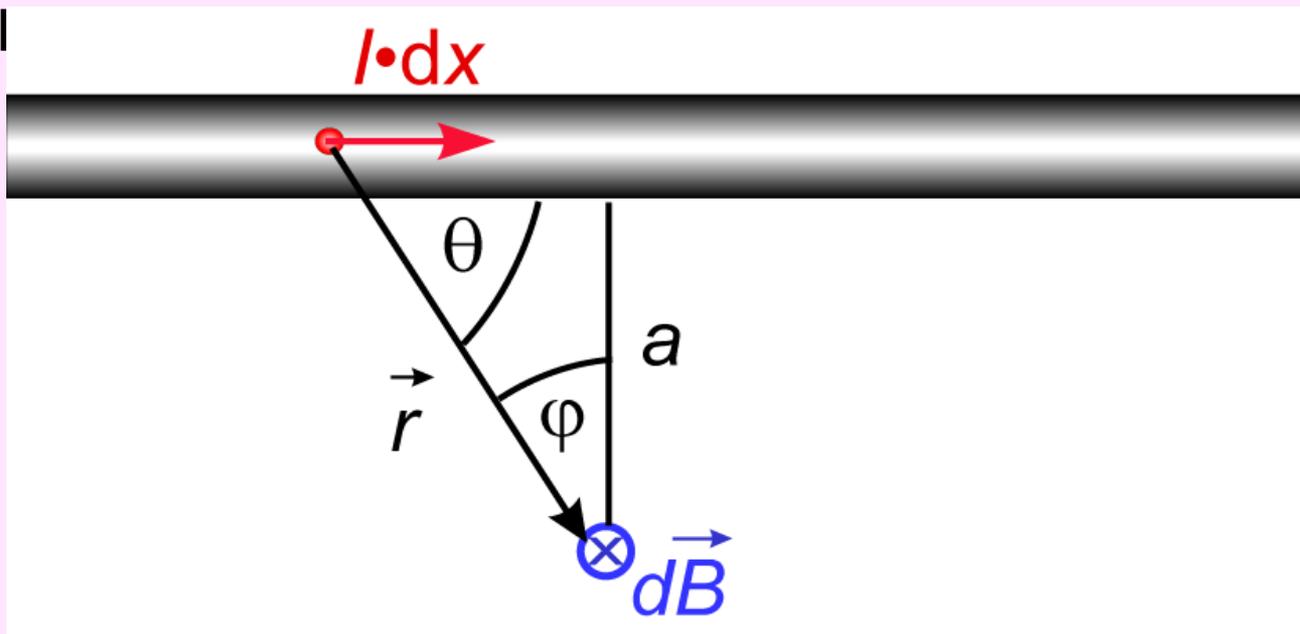
## ■ Erdfeld



- **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  $\varphi$  – 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  $\infty$  langen geraden Leiter**



# Ampere'sches Gesetz

## geschlossene Schleife

im Vakuum:

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



allgemein:

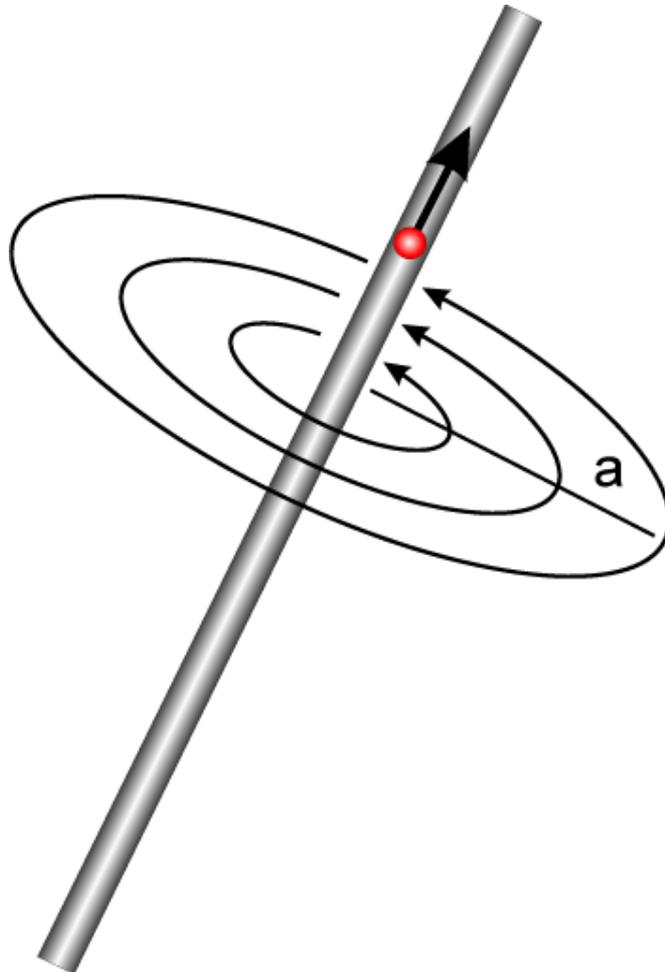
$$\oint H ds = I$$

$H$ : „magn. Umlaufspannung“

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



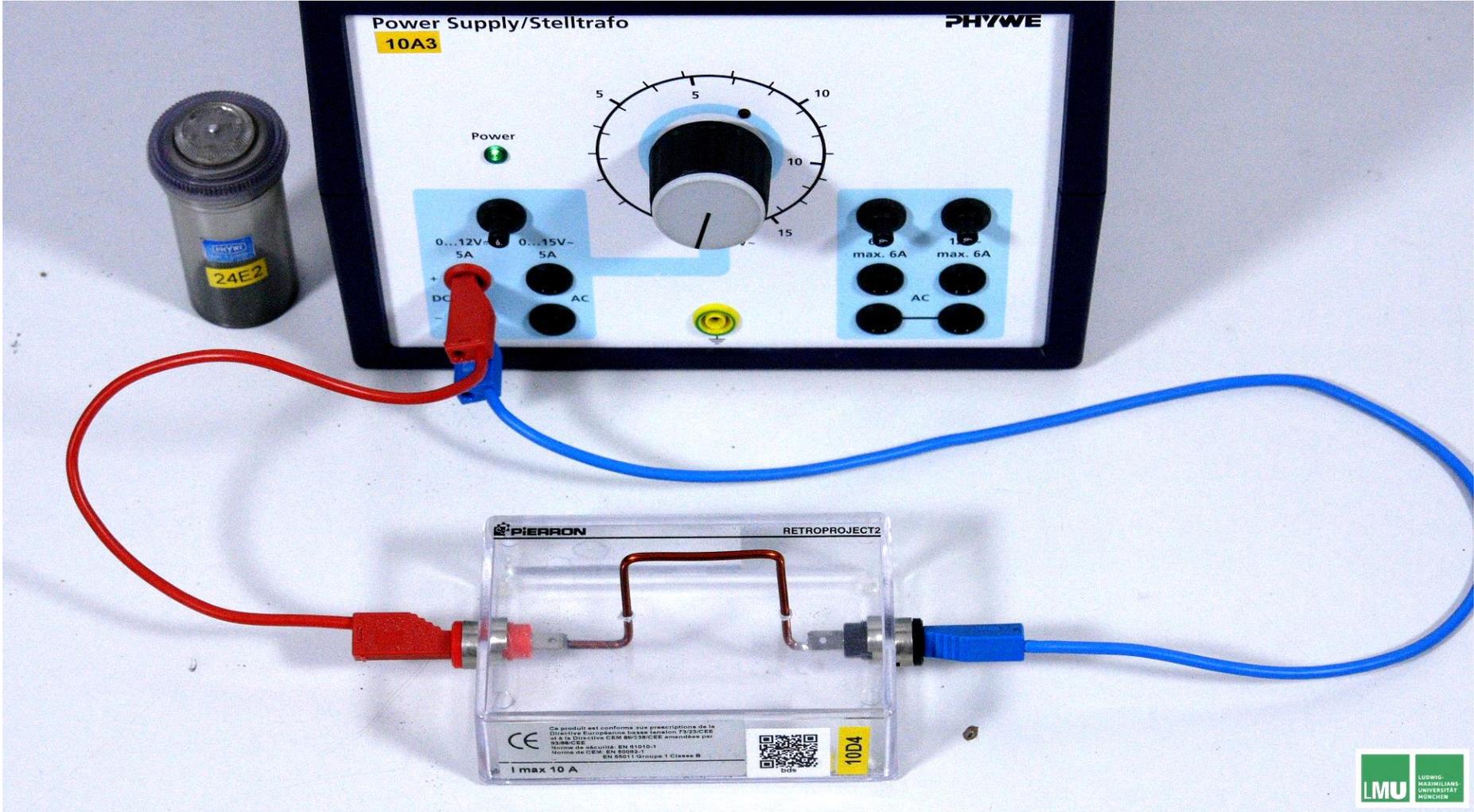
- **Beispiel: Gerader Leiter**



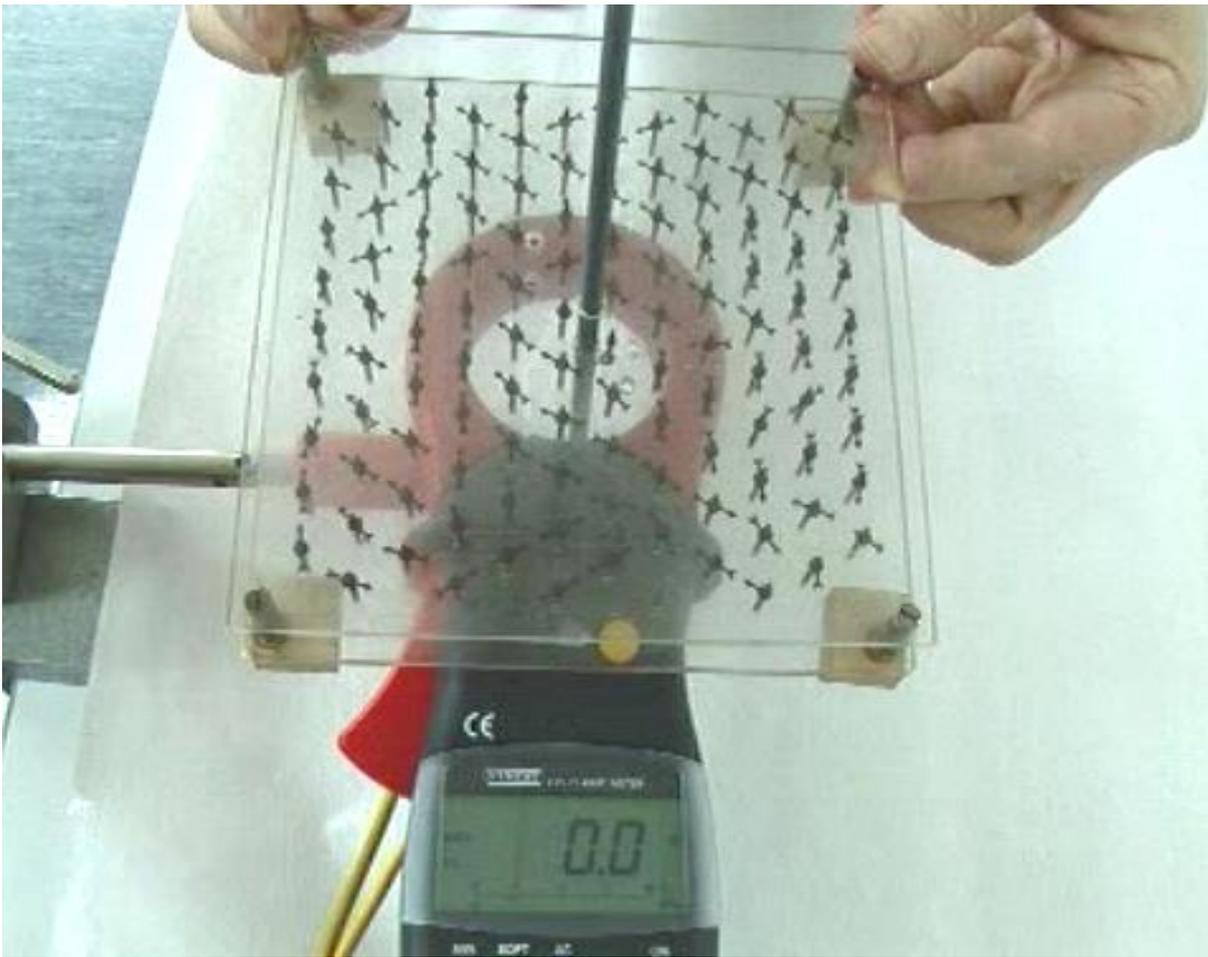
*Mitschreiben*

➔ **Feldlinienbild**

## Gerader Leiter

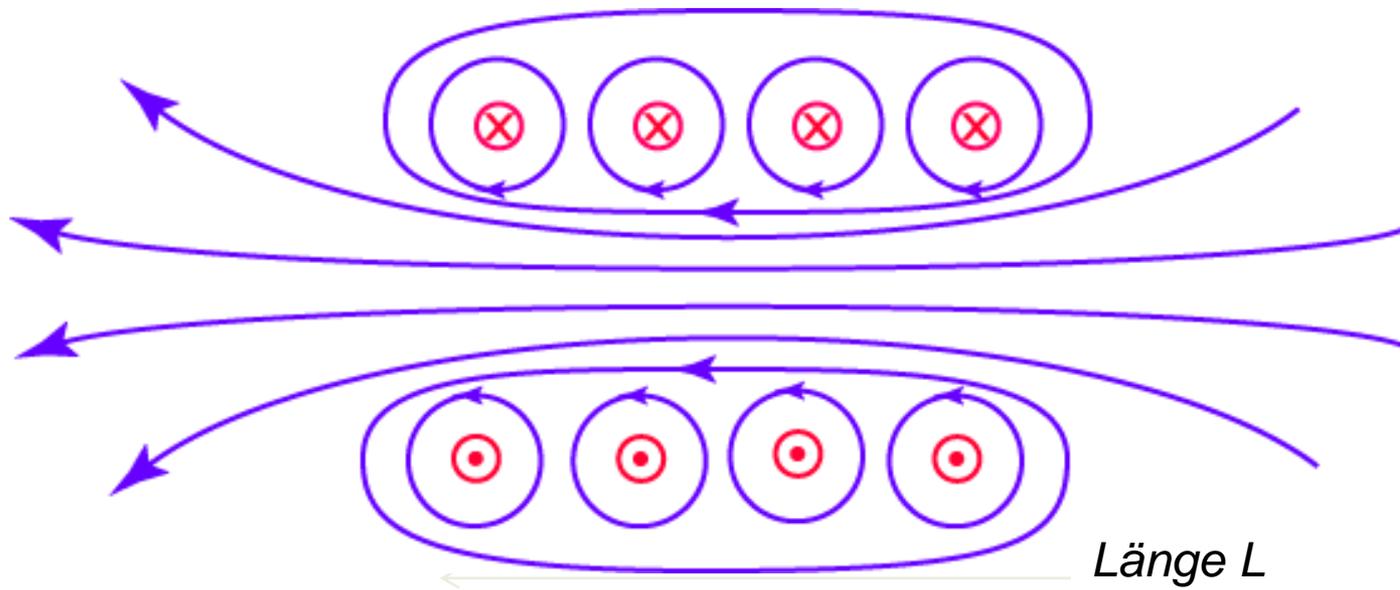


## Gerader Leiter



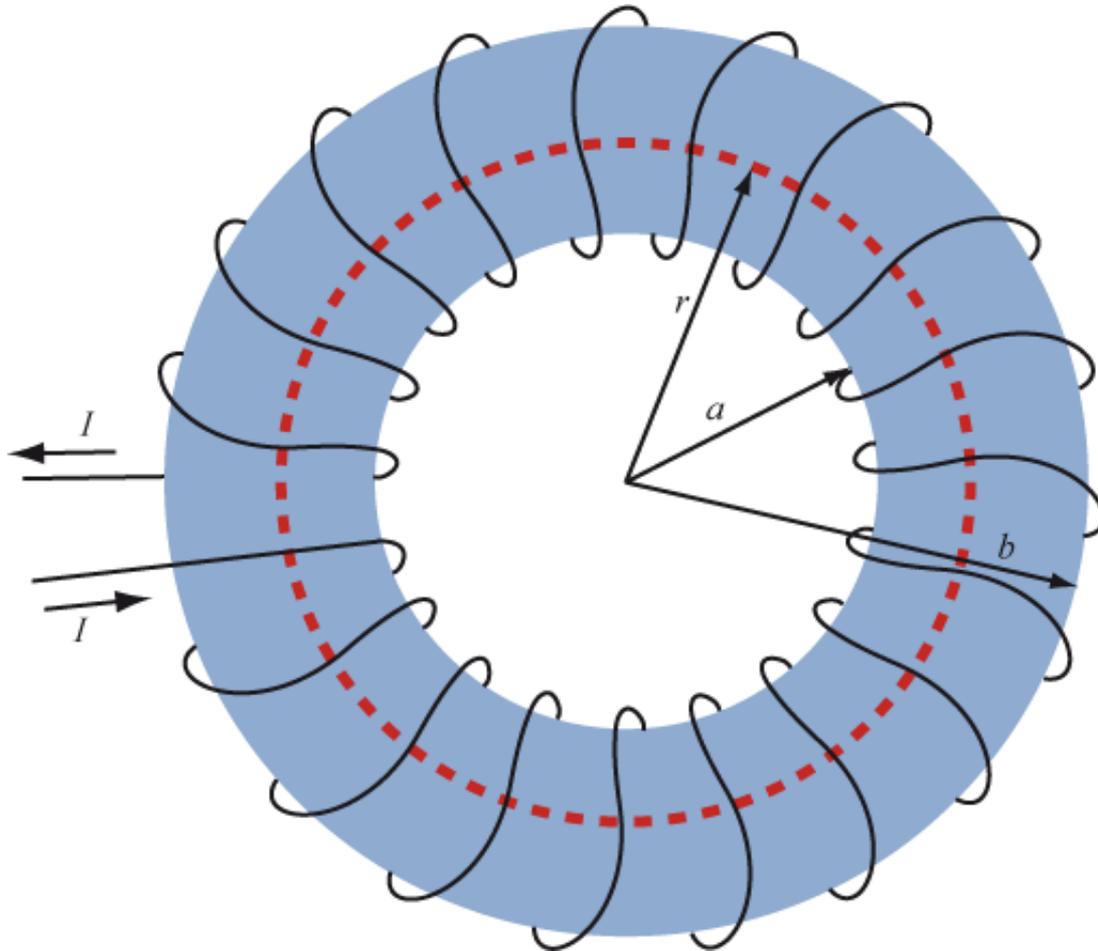
[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2\\_E\\_Video/3-3E-Feldsta1.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/3-3E-Feldsta1.m4v)

■ **Beispiel: Lange Spule**



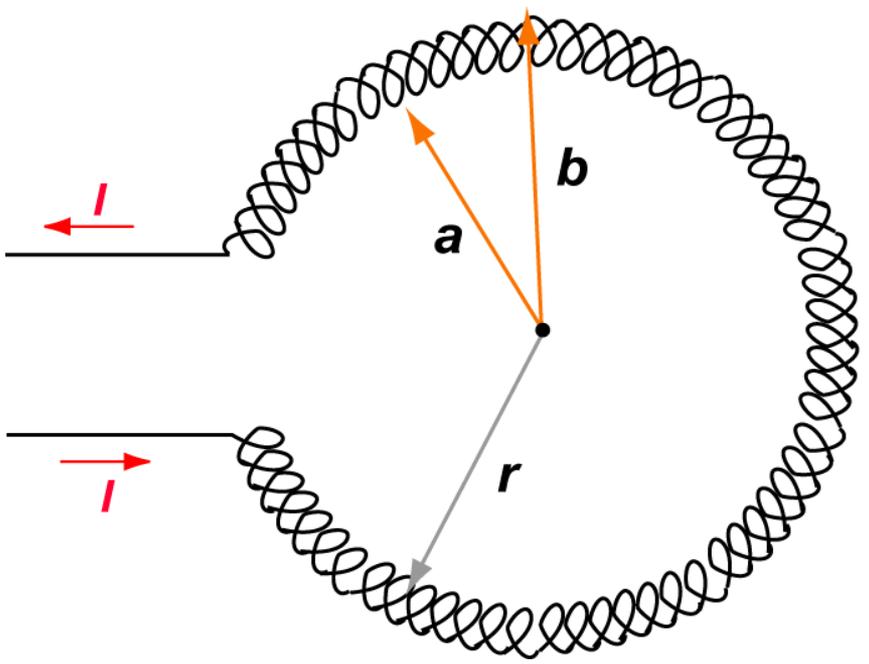
➔ **Feldlinienbild**

## ■ Toroidspule



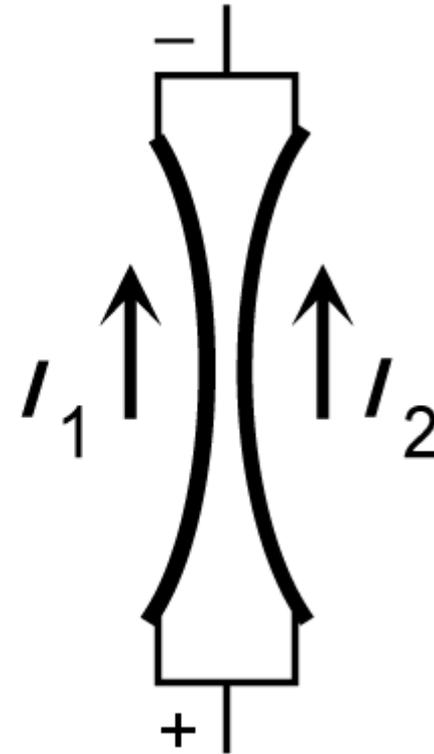
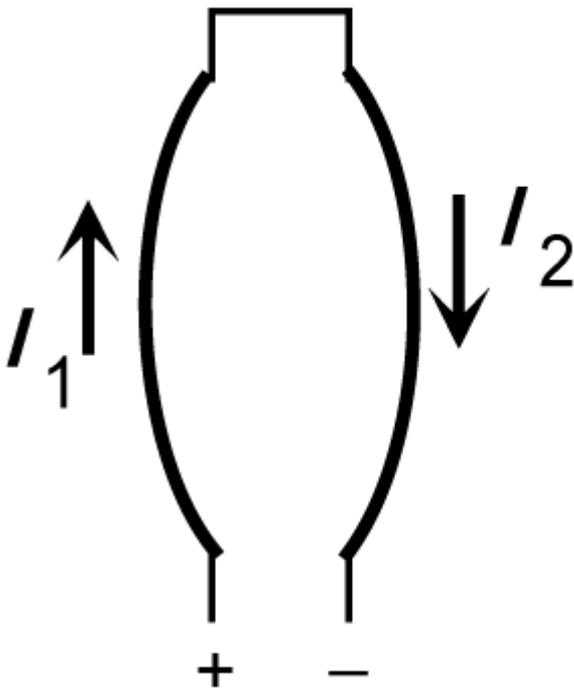
→ Feldlinienbild

■ Toroidspule

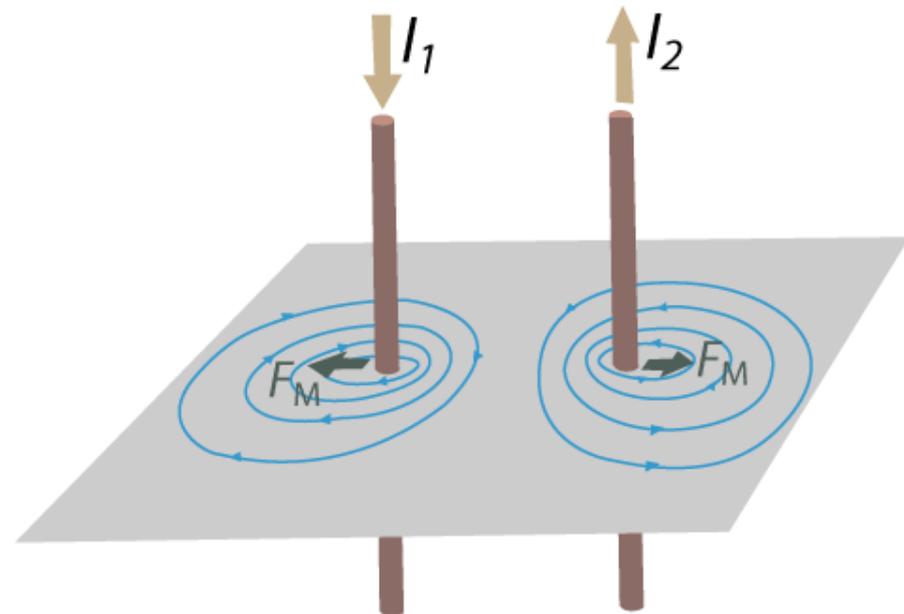
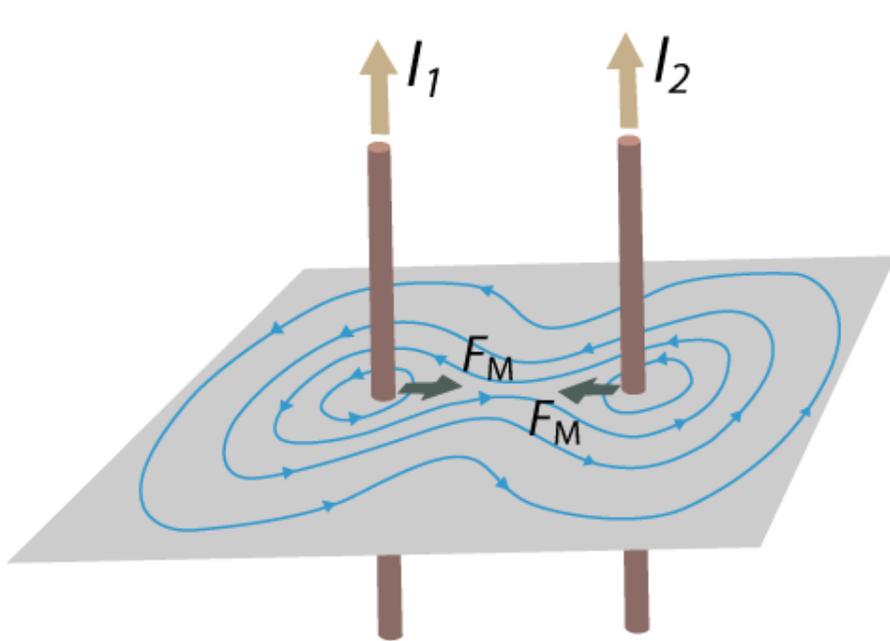


$$a < r < b$$

- Definition des Ampere

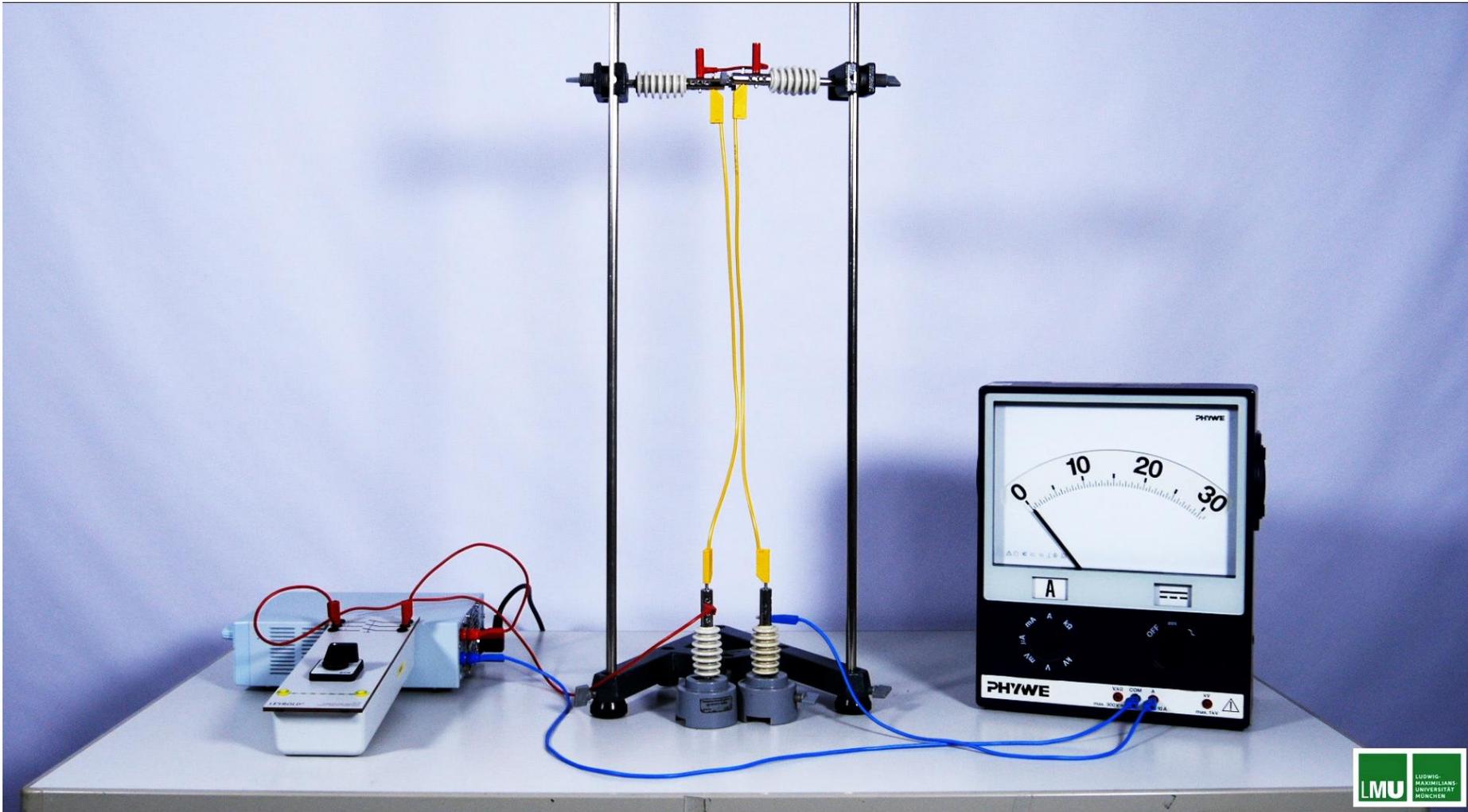


- Definition des Ampere



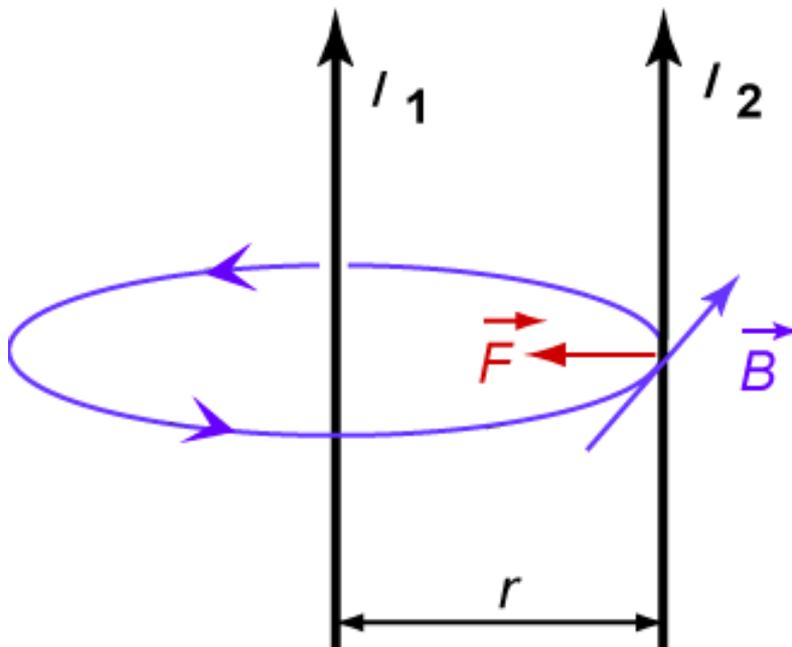


# Zwei parallele Leiter



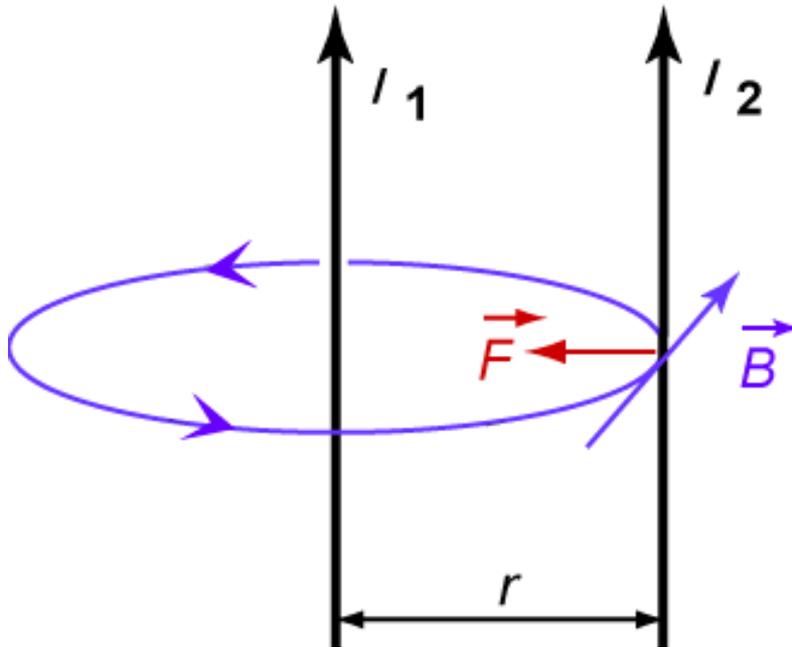
[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2\\_E\\_Video/3-3G-Amperesches\\_Gesetz\\_Beide.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/3-3G-Amperesches_Gesetz_Beide.m4v)

## ■ 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.

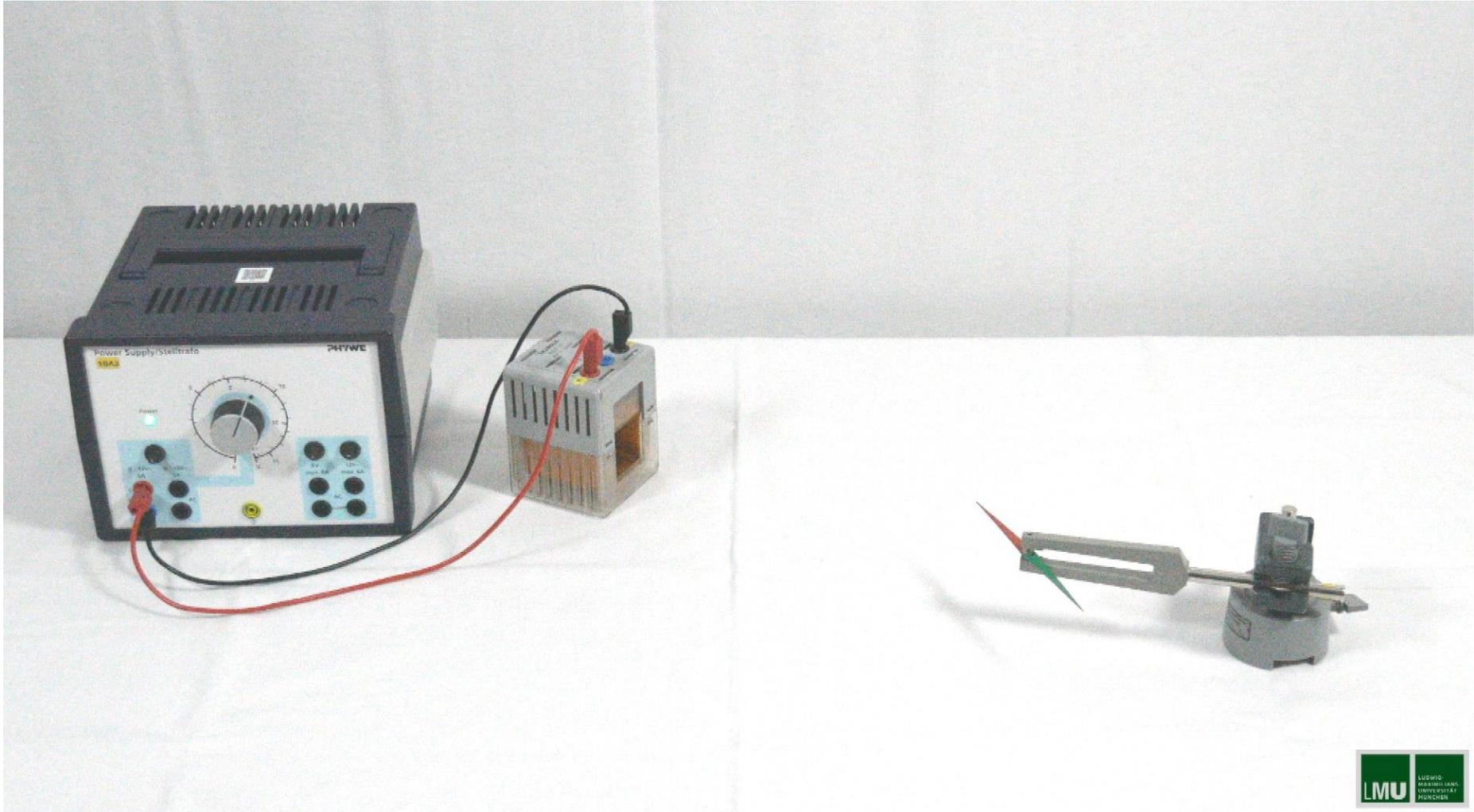


# Materie im Magnetfeld

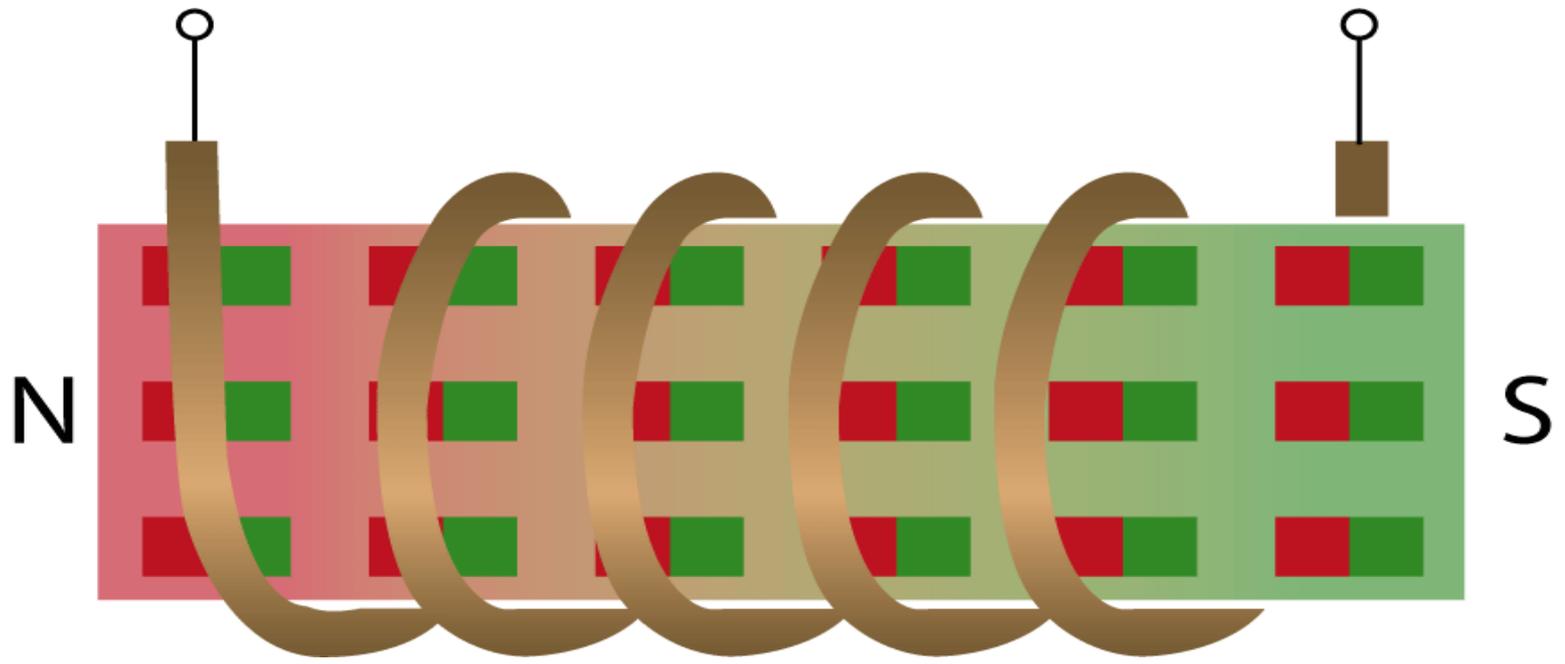


- **Atomare Kreisströme**
- **Diamagnetismus**
- **Paramagnetismus**
- **Ferromagnetismus**

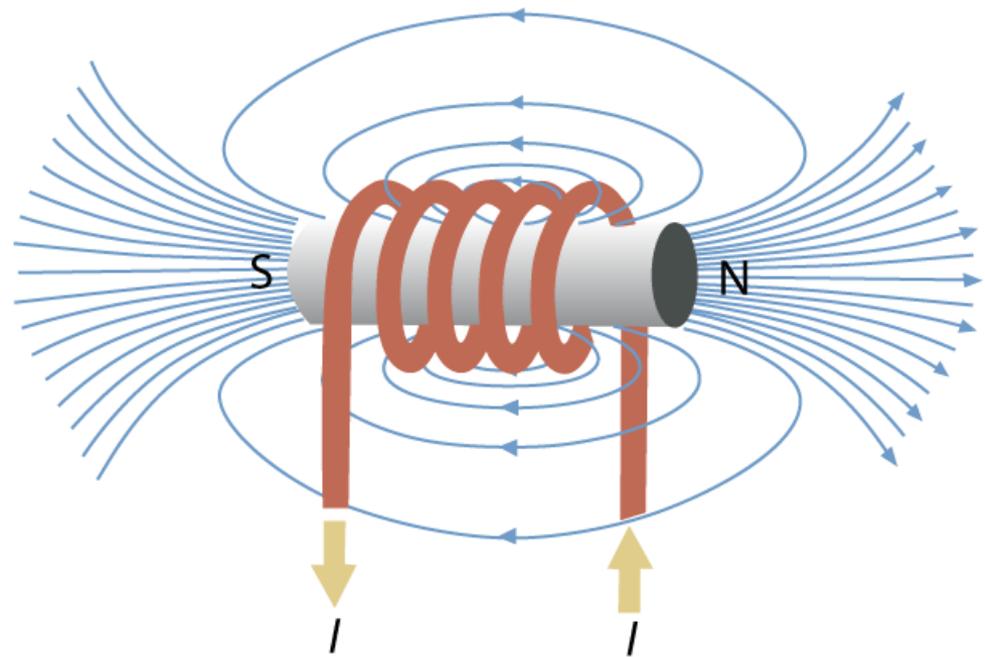
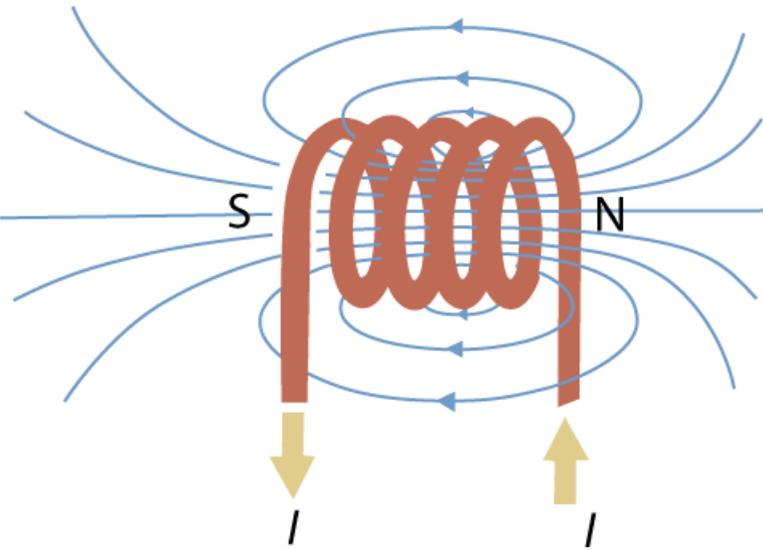
## Feldstärkeunterschiede



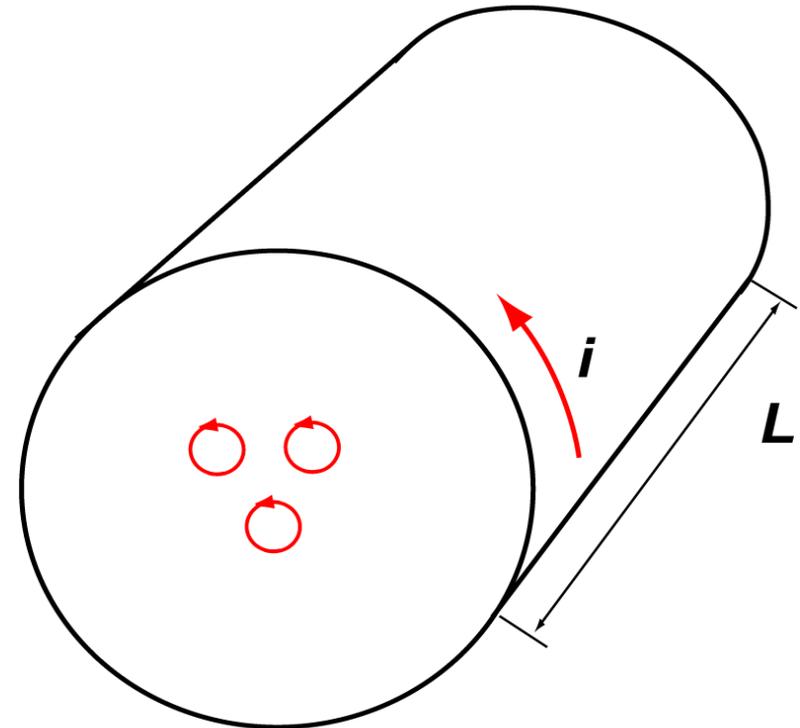
## Stromführende Spule mit und ohne ferromagnetischem Kern



## Stromführende Spule mit und ohne ferromagnetischem Kern



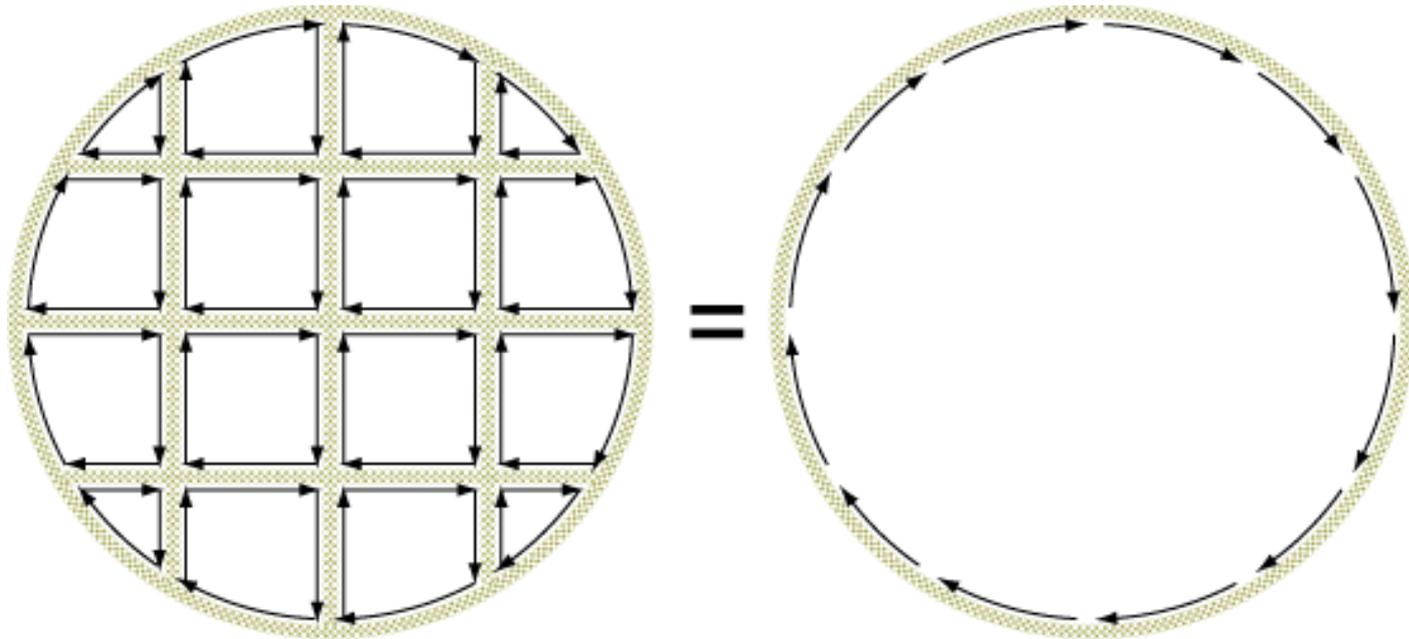
**Mikroskopische magn. Momente werden durch atomare Kreisströme erzeugt**



**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:

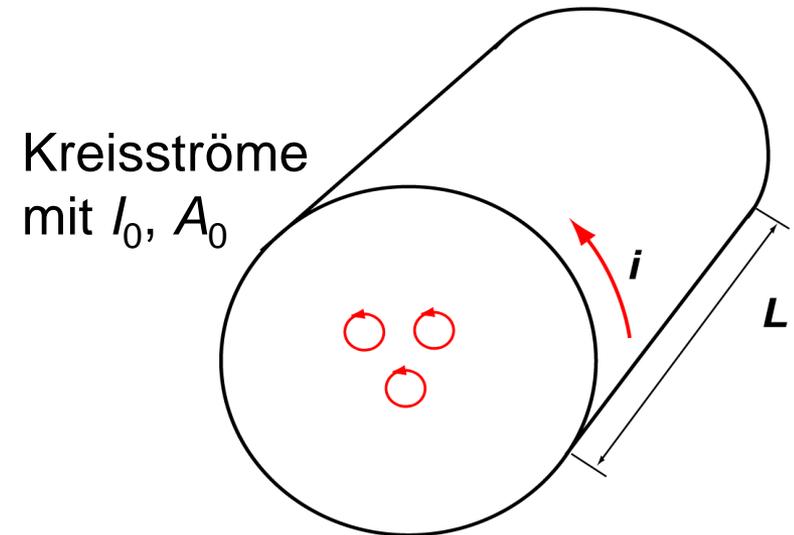
Def.: „Magn. Momente pro Volumen“

Vorstellung vom Zusammenwirken  
differentieller Magnetisierungsströme

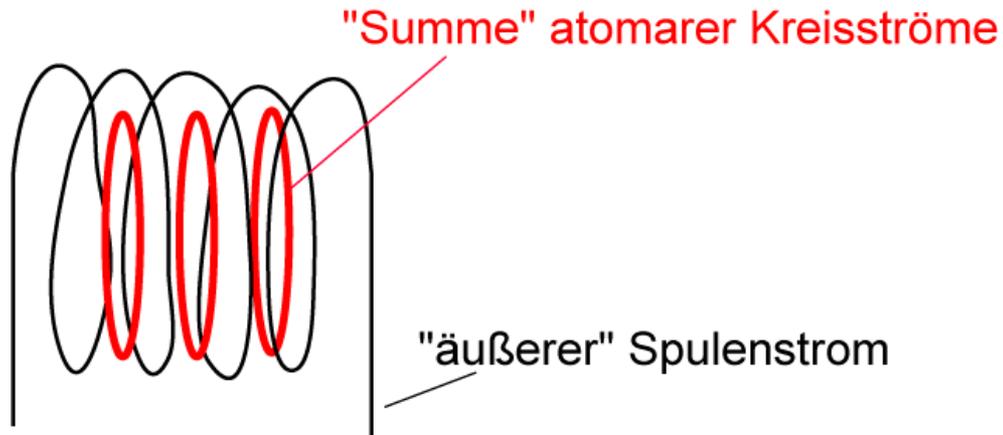
$$M = \left( \frac{\Delta p}{\Delta V} \right) = \frac{dp}{dV}$$

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

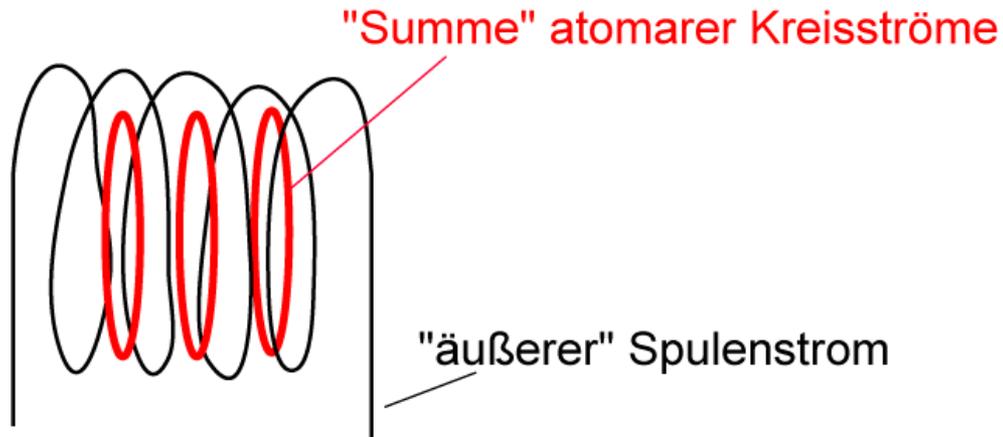
(analog zur Spule)



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

$$\chi_m :$$

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



- **Diamagnetismus**

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

**Vorstellung: Atomare Kreisströme werden beeinflusst**

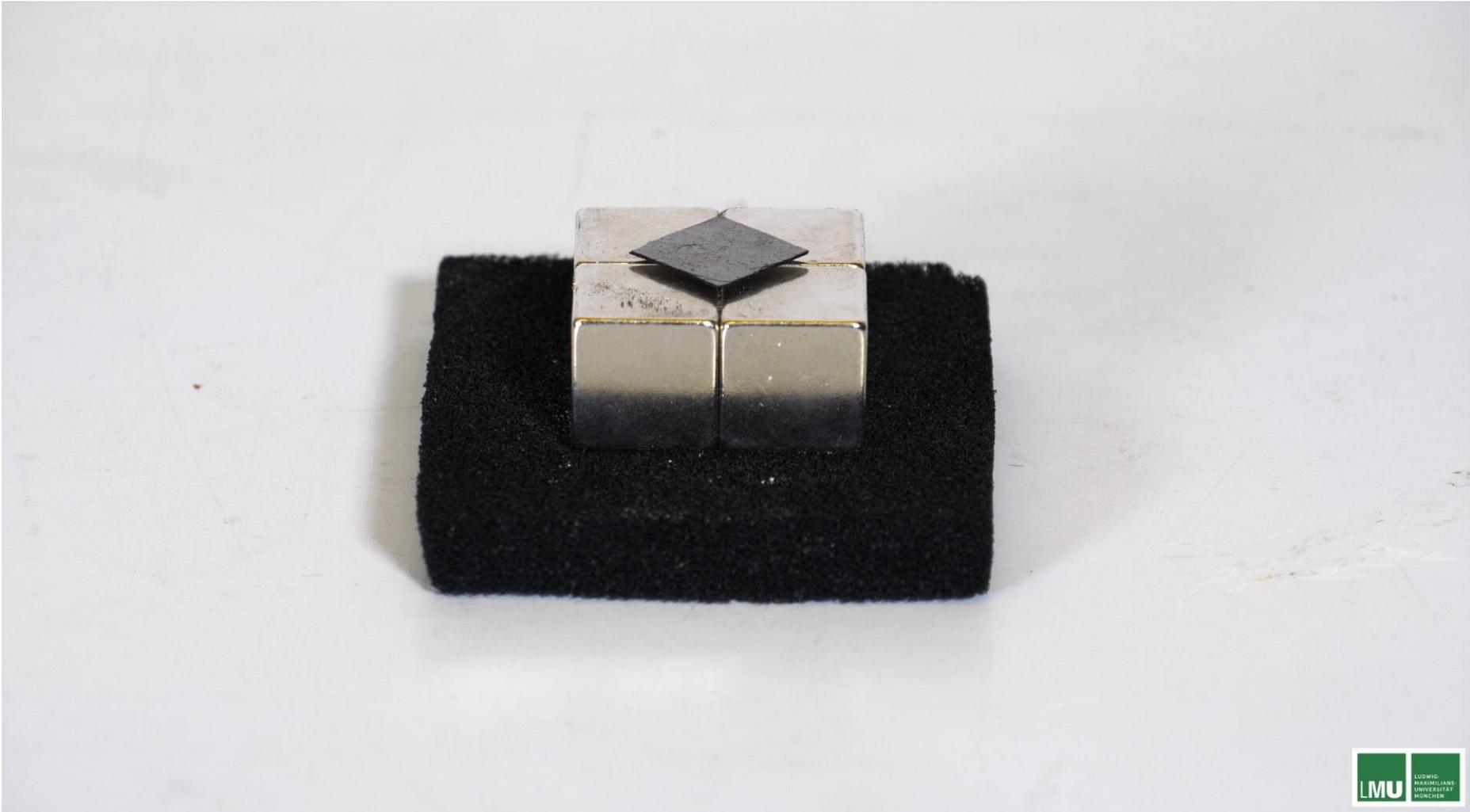
**=> Magnetisierung wirkt dem äußeren Feld entgegen**

**(siehe Lenzsche Regel)**

**➔ Bi im inhom. Feld**

**➔ Kerzenflamme im inhom. Feld**

## Magnetische Levitation mit einem Graphit-Plättchen

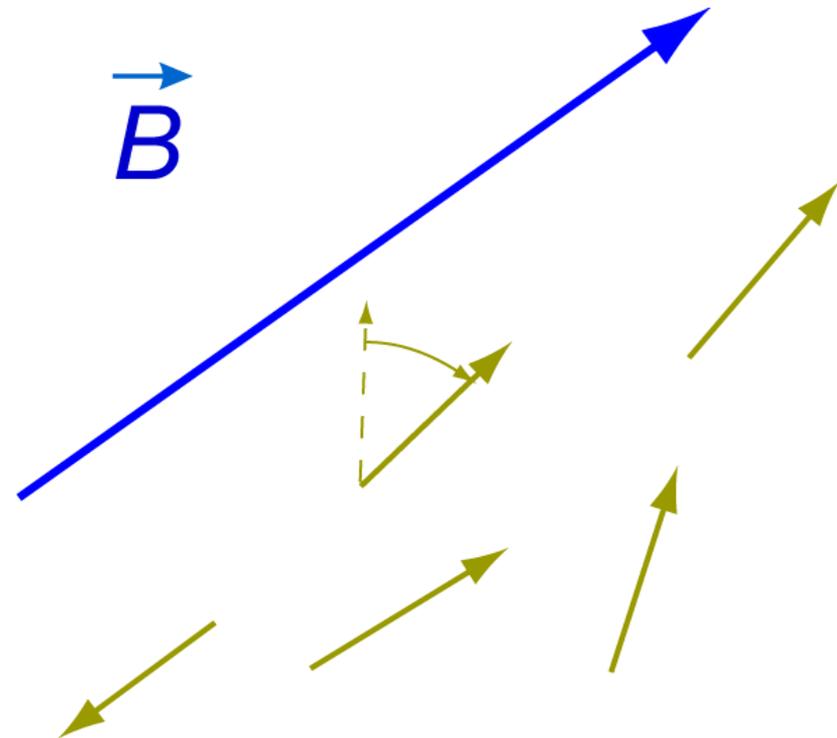


- Paramagnetismus

$$\chi_m > 0 \quad \text{"Verstärkung" des Magnetfeldes}$$

Vorstellung:

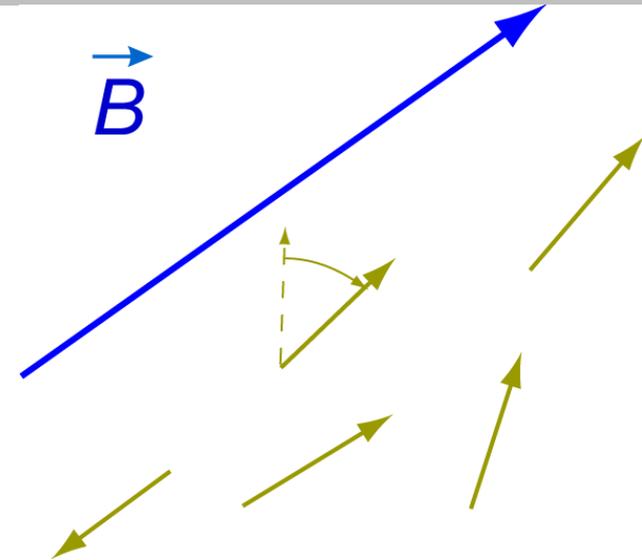
Ausrichtung permanenter magn. Dipole



- Paramagnetismus

Energiebetrachtung:

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



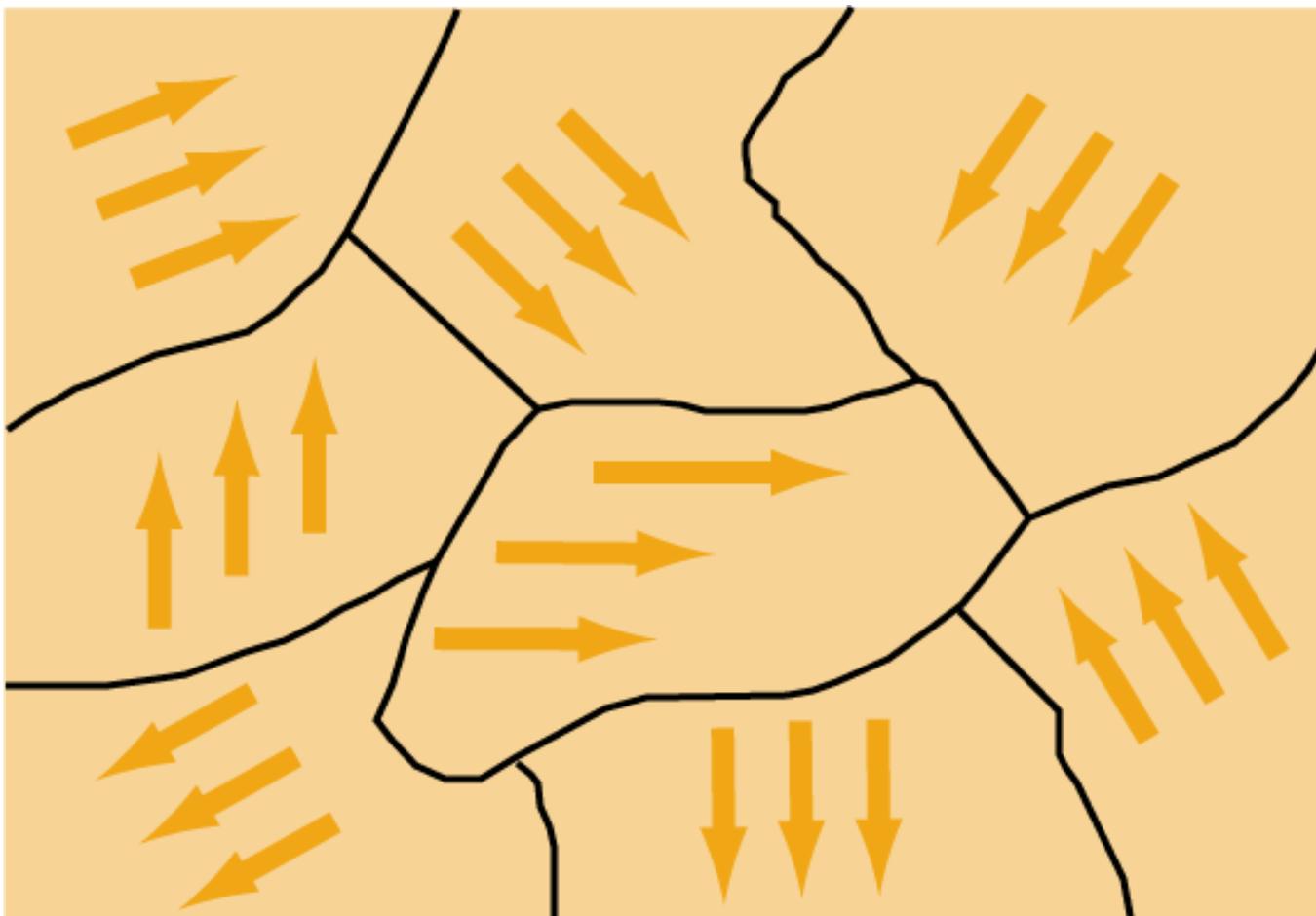
Analog E-Feld:  $E_{pot} = -\vec{p}_e \cdot \vec{E}$

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

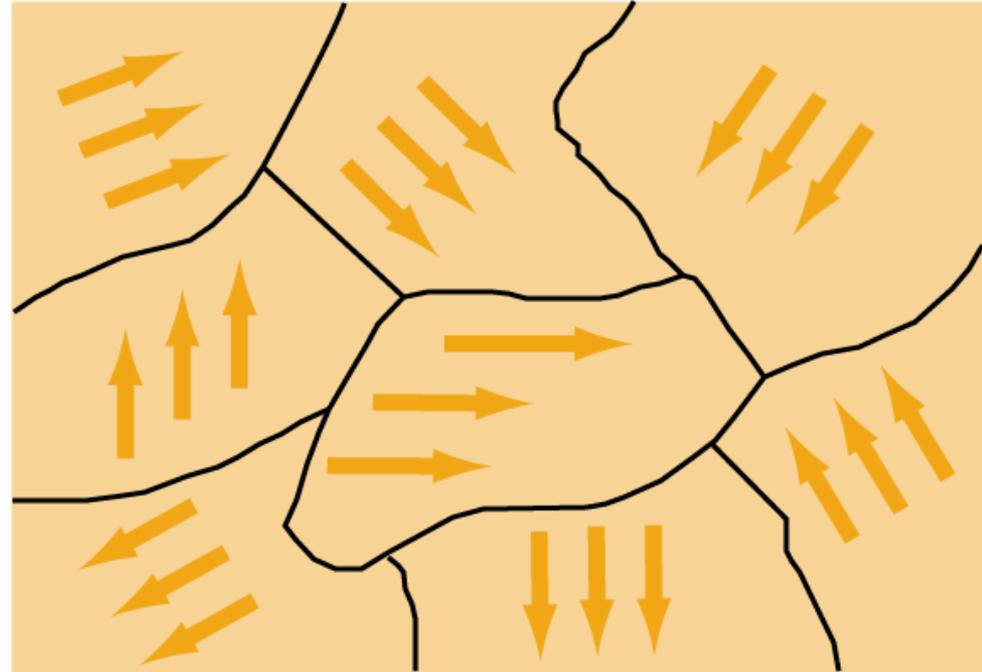
- **Magnetische Domänen**



## ■ Ferromagnetismus

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

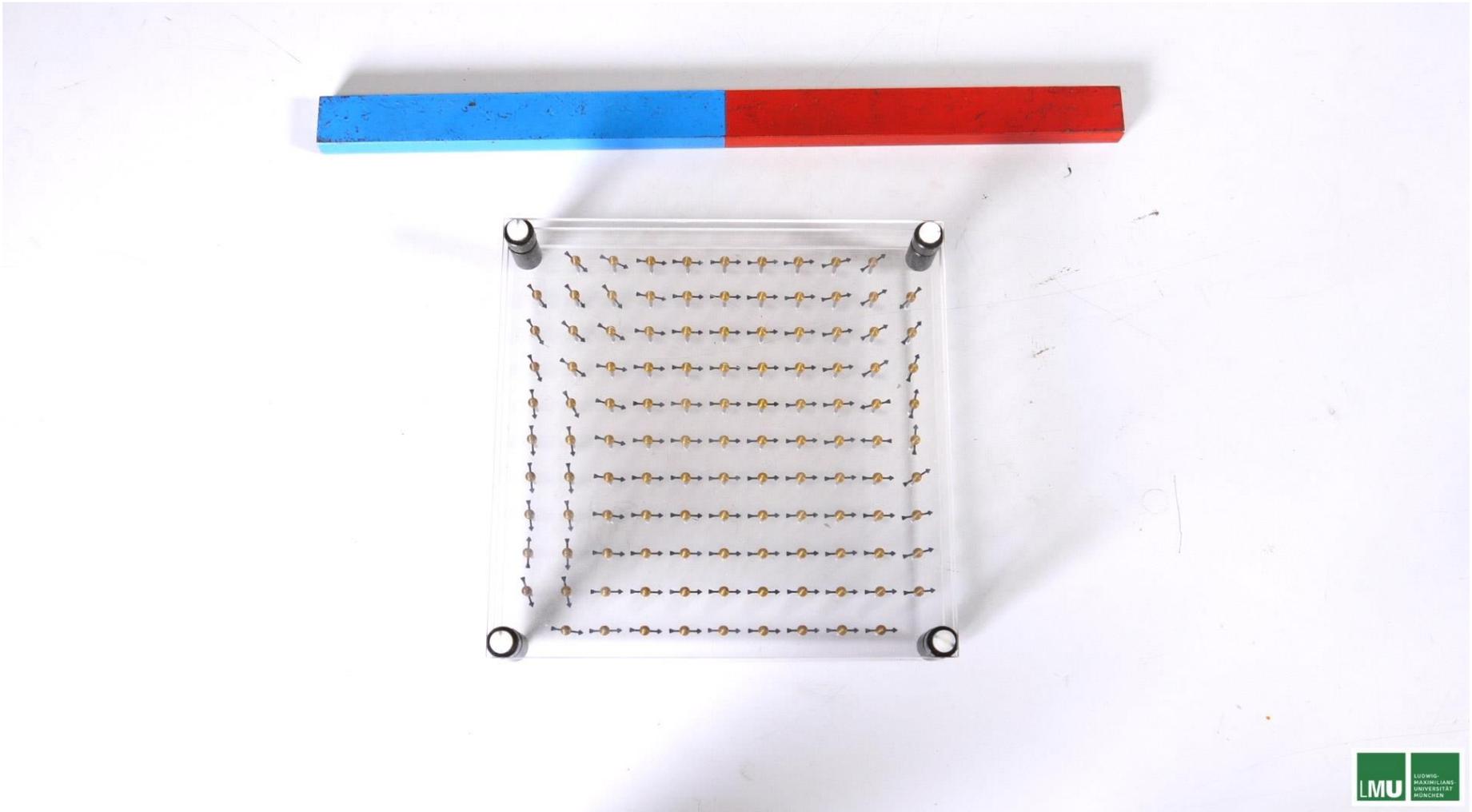
**Vorstellung:**  
**Ausrichtung ganzer Domänen**



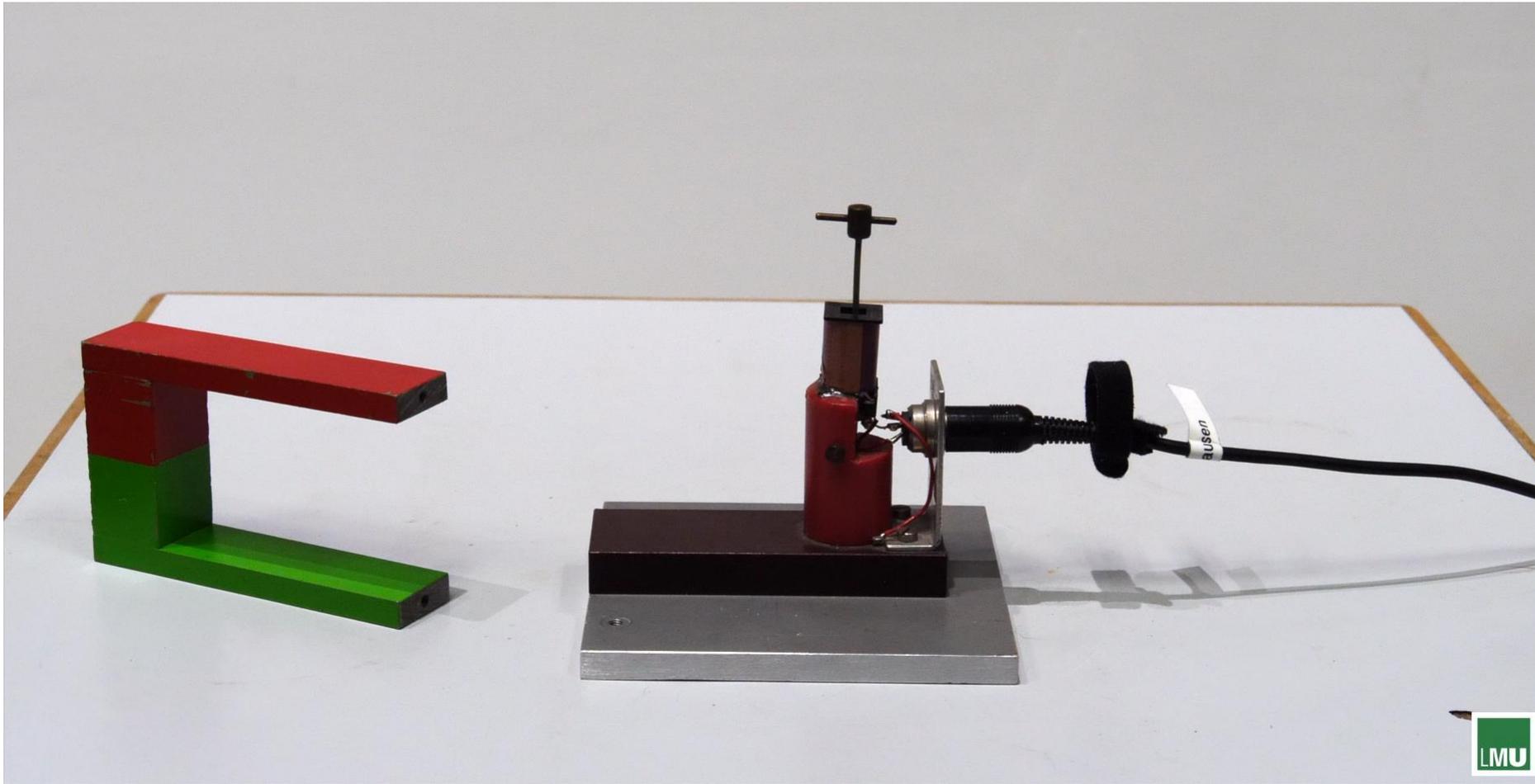
→ Barkhausen-Effekt (akustisch)

→ 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**

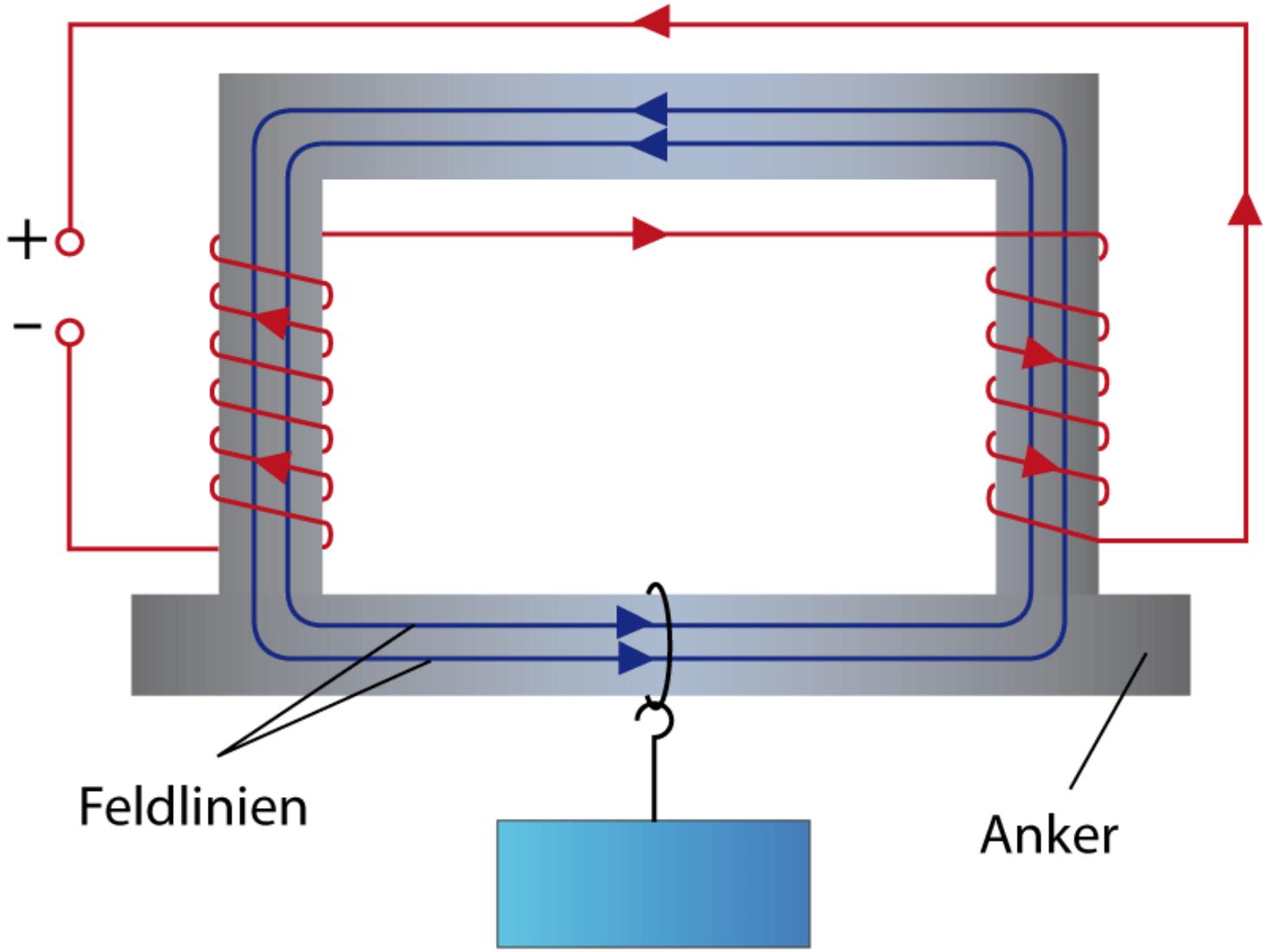
**→ magnetisierter Nagel wird erhitzt**

## Curie-Temperatur



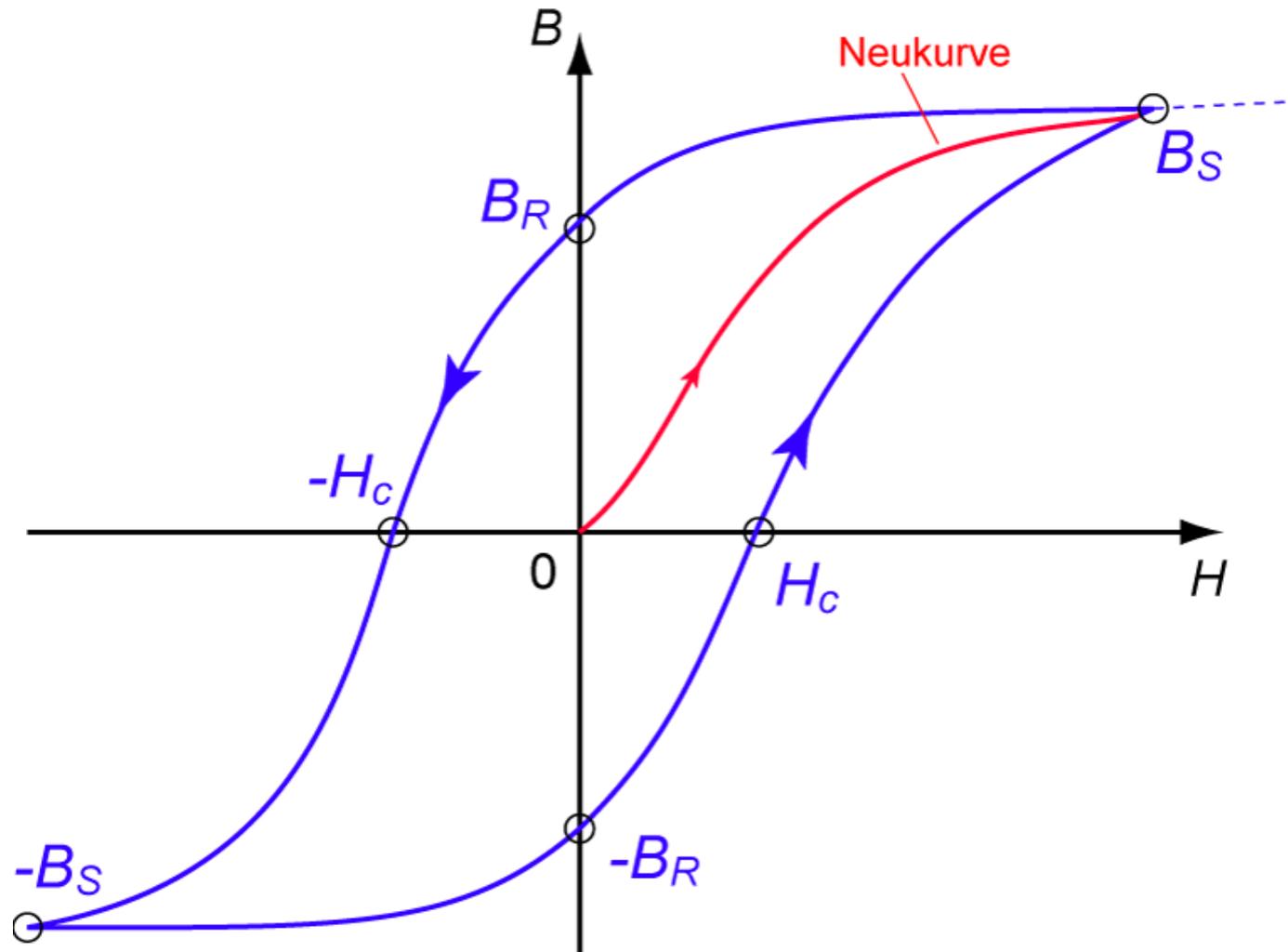
[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2\\_E\\_Video/3-4T-Curie Temperatur.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/3-4T-Curie%20Temperatur.m4v)

- Ferromagnetismus – der magnetische Fluss bleibt im Material

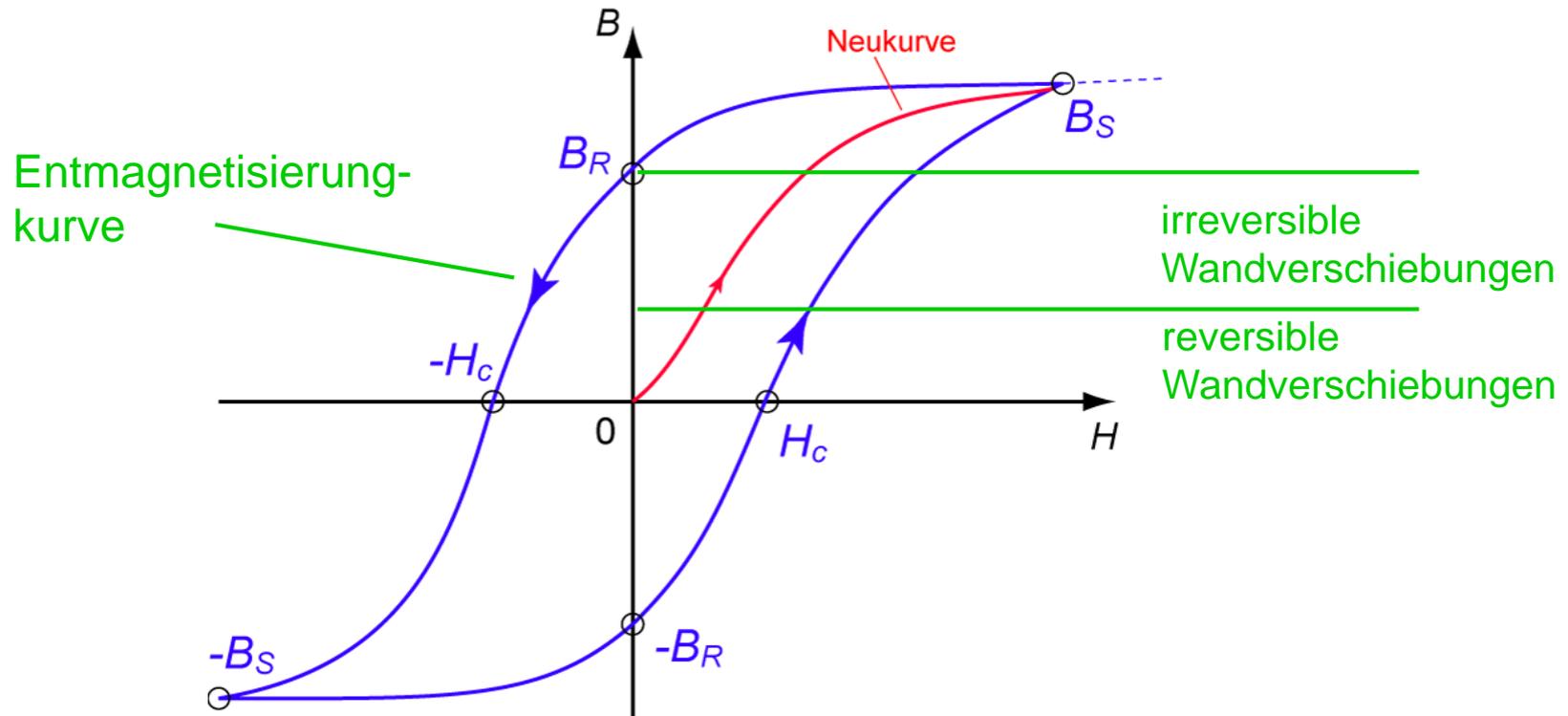


## ■ Hysterese

(Magnetisierung ist auch von der "Vorgeschichte" abhängig)

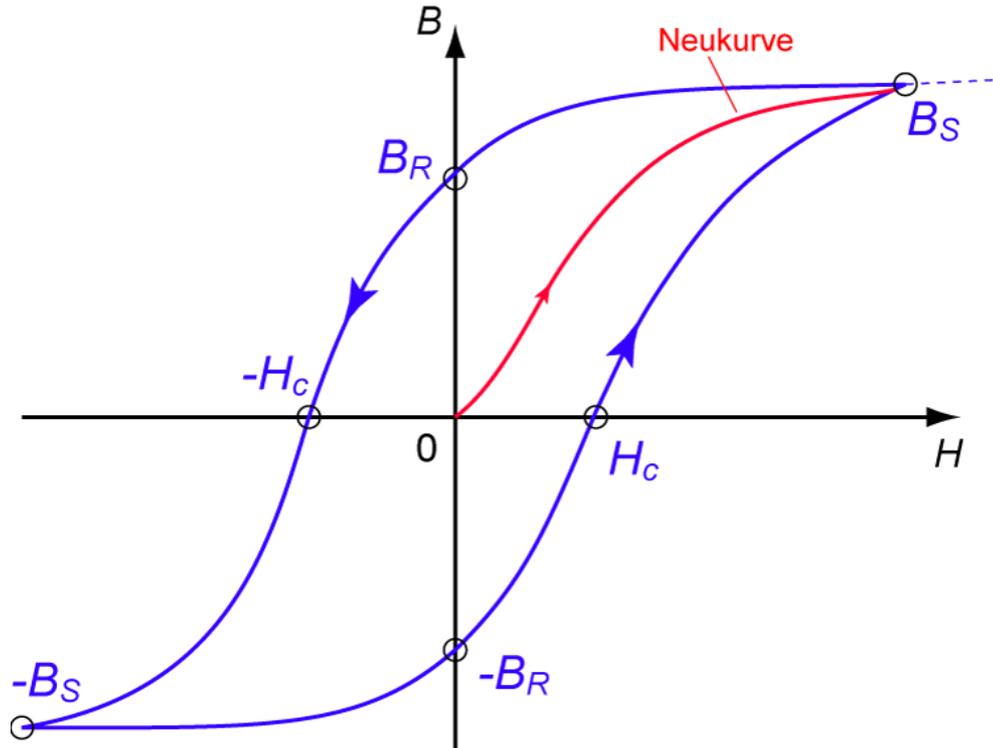


## ■ Hysterese Ummagnetisierung verlangt Energie



$B_R$ : 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:  $H_c > 10^4 \text{ A/m}$