

***B** oder **H***

# Die magnetische Ladung

*Michael Pohlig*  
pohlig@kpk-akademie.de  
pohlig@kit.edu

21. September 2020 - Speyer (Pädagogisches Landesinstitut)

# Physikalische Größen der Elektrodynamik

elektrische Ladung  $Q$

elektrische Ladungsdichte  $\rho_Q$

freie und gebundene el. Ladung

Kapazität  $C$

Polarisation  $\mathbf{P}$

elektrisches Potenzial  $\varphi$

elektrische Spannung  $U$

elektrische Feldstärke  $\mathbf{E}$

elektrische Verschiebung  $\mathbf{D}$

magnetischer Fluss  $\Phi$

Coulombkraft  $\mathbf{F}$

elektrische Stromstärke  $I$

elektrische Stromdichte  $\mathbf{j}$

elektrischer Widerstand  $R$

Induktivität  $L$

Magnetisierung  $\mathbf{M}$

magnetisches Vektorpotenzial  $\mathbf{A}$

magnetisches Skalarpotenzial  $\varphi_m$

magnetische Feldstärke  $\mathbf{H}$

magnetische Flussdichte  $\mathbf{B}$

magnetische Ladung  $Q_m$

Lorentzkraft  $\mathbf{F}_L$

...

Analogie:  $E \leftrightarrow B$

Analogie:  $E \leftrightarrow H$

elektrische Feldstärke  $\mathbf{E}$   $\leftrightarrow$  magnetische Flussdichte  $\mathbf{B}$

elektrische Ladung  $Q$   $\leftrightarrow$  elektrische Stromstärke  $I$

elektrisches Potenzial  $\varphi$   $\leftrightarrow$  magnetisches Vektorpotenzial  $\mathbf{A}$

elektr. Feldkonstante  $\epsilon_0$   $\leftrightarrow$  Kehrwert magn. Feldkonst.  $\frac{1}{\mu_0}$

Häufigste Analogie, auch in Schulbüchern verbreitet,  
dort  $\mathbf{B}$  oft als *magnetische Feldstärke* eingeführt.

$\mathbf{H}$  wird dann häufig als Hilfsgröße bezeichnet.

elektrische Ladung  $Q$

$\leftrightarrow$  elektrische Stromstärke  $I$

Quelle elektrisches Feld

Quelle magnetisches Feld

Definition  $E$

$\leftrightarrow$  Definition  $B$

Kraft auf elektrische Ladung  
im elektrischen Feld

Kraft auf elektrischen Strom  
im magnetischen Feld

$$E = \frac{F}{Q_{\text{el}}}$$

$$B = \frac{F}{s l}$$

elektrische Kraft  $\mathbf{F} = Q\mathbf{E}$   $\leftrightarrow$  Lorentzkraft  $\mathbf{F} = I(\mathbf{s} \times \mathbf{B})$

Coulombsches Gesetz  $\leftrightarrow$  Biot-Savartsches Gesetz

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

$$F = \frac{\mu_0 s}{4\pi} \cdot \frac{I_1 I_2}{r}$$

Ampere-Definition

$$\text{rot } \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j}_{Q,el} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

$$\text{div } \mathbf{B} = 0 \quad \mathbf{B}: \text{quellenfrei}$$

$$\text{rot } \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\text{div } \mathbf{E} = \frac{\rho_{Q,el}}{\epsilon_0}$$

elektrisches Potenzial  $\varphi$  und magnetisches Vektorpotenzial  $\mathbf{A}$ :

$\varphi$  und  $\mathbf{A}$  bilden wie  $\rho$  und  $\mathbf{j}$  (Ladungs- und Stromdichte) einen Vierervektor

$$\mathbf{E} = - \text{grad} \varphi - \dot{\mathbf{A}}$$

$$\mathbf{B} = - \text{rot } \mathbf{A}$$

Analogie:  $E \leftrightarrow B$

Analogie:  $E \leftrightarrow H$



elektrische Feldstärke  $E$   $\leftrightarrow$  magnetische Feldstärke  $H$

elektr. Verschiebung  $D$   $\leftrightarrow$  magn. Flussdichte  $B$

elektrische Ladung  $Q$   $\leftrightarrow$  magnetische Ladung  $Q_m$

elektrisches Potenzial  $\varphi$   $\leftrightarrow$  magnetisches Potenzial  $\varphi_m$

elektr. Feldkonstante  $\epsilon_0$   $\leftrightarrow$  magn. Feldkonstante  $\mu_0$

einfache Einheitenübersetzung:  $V \leftrightarrow A$

Beispiele:  $E$  :  $V/m$   $\leftrightarrow$   $H$  :  $A/m$

$Q$  :  $C = A \cdot s$   $\leftrightarrow$   $Q_m$  :  $Wb = V \cdot s$

$D$  :  $C/m^2 = A \cdot s/m^2$   $\leftrightarrow$   $B$  :  $Wb/m^2 = V \cdot s/m^2$

$\epsilon_0$  :  $As/Vm$   $\leftrightarrow$   $\mu_0$  :  $Vs/Am$

elektrische Ladung  $Q$

magnetische Ladung  $Q_m$

Quelle elektrisches Feld

Quelle magnetisches Feld

Kraft auf elektrische Ladung  
im elektrischen Feld

Kraft auf magnetische Ladung  
im magnetischen Feld

$$E = \frac{F}{Q_{el}}$$

$$H = \frac{F}{Q_m}$$

Definition  $E$

Definition  $H$

$$g = \frac{F}{m}$$

# Ladungsdichten

Analogie:  $E \leftrightarrow H$

elektr. Ladungsdichte  $\rho_Q$   $\leftrightarrow$  magn. Ladungsdichte  $\rho_m$

$$\rho_Q = \rho_{Q, \text{ frei}} + \rho_{Q, \text{ gebunden}}$$

$$\rho_m = 0 + \rho_{m, \text{ gebunden}}$$

gebundene Ladung:

Polarisation  $P$   $\leftrightarrow$  Magnetisierung  $M$   
(magn. Polarisation  $J = \mu_0 M$ )

Dielektrikum

Weichmagnet

$$\text{div } P = -\rho_{\text{el, gebunden}}$$

$$\text{div } M = -\frac{\rho_{m, \text{ gebunden}}}{\mu_0}$$

$$D = \varepsilon_0 E + P$$

$$B = \mu_0 (H + M)$$

außerhalb von Materie:  $B \sim H$

Äquivalente Aussagen:

- es gibt keine magnetischen Monopole
- es gibt keine freie magnetische Ladung
- die gesamte magnetische Ladung eines Körpers ist Null
- jeder Körper/Magnet trägt gleich viel positive Nordpol- wie negative Südpol-Ladung
- teilt man einen Magneten, entstehen neue Pole, so dass jedes Teilstück insgesamt magnetisch neutral bleibt

Magnetpole ohne  $H$  und  $Q_m$  – Zitate:

„Die Orte, wo sich die [Stahl-]Späne konzentrieren, heißen die Pole des Magneten.“

„... Das nach Norden zeigende Ende wird Nordpol des Magneten genannt. Durch Definition wurde festgelegt, dass am Nordpol eines Magneten die Feldlinien aus dem Magneten aus- und an seinem Südpol in ihn eintreten. Deshalb bezeichnet man allgemein bei Elektromagneten oder Permanentmagneten Gebiete, aus denen die Feldlinien austreten, als *Nordpol* und Gebiete, in die sie eintreten, als *Südpol*.

„elektrische“ Kraft

$$F = Q_{\text{el}} E$$

„magnetische“ Kraft

$$F = Q_{\text{m}} H$$

Coulombsches Gesetz

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_{\text{el},1} Q_{\text{el},2}}{r^2}$$

Coulombsches Gesetz

$$F = \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{Q_{\text{m},1} Q_{\text{m},2}}{r^2}$$

Stabmagnet an Kraftmesser,  
ein Pol in einer Spule

Messung zeigt:

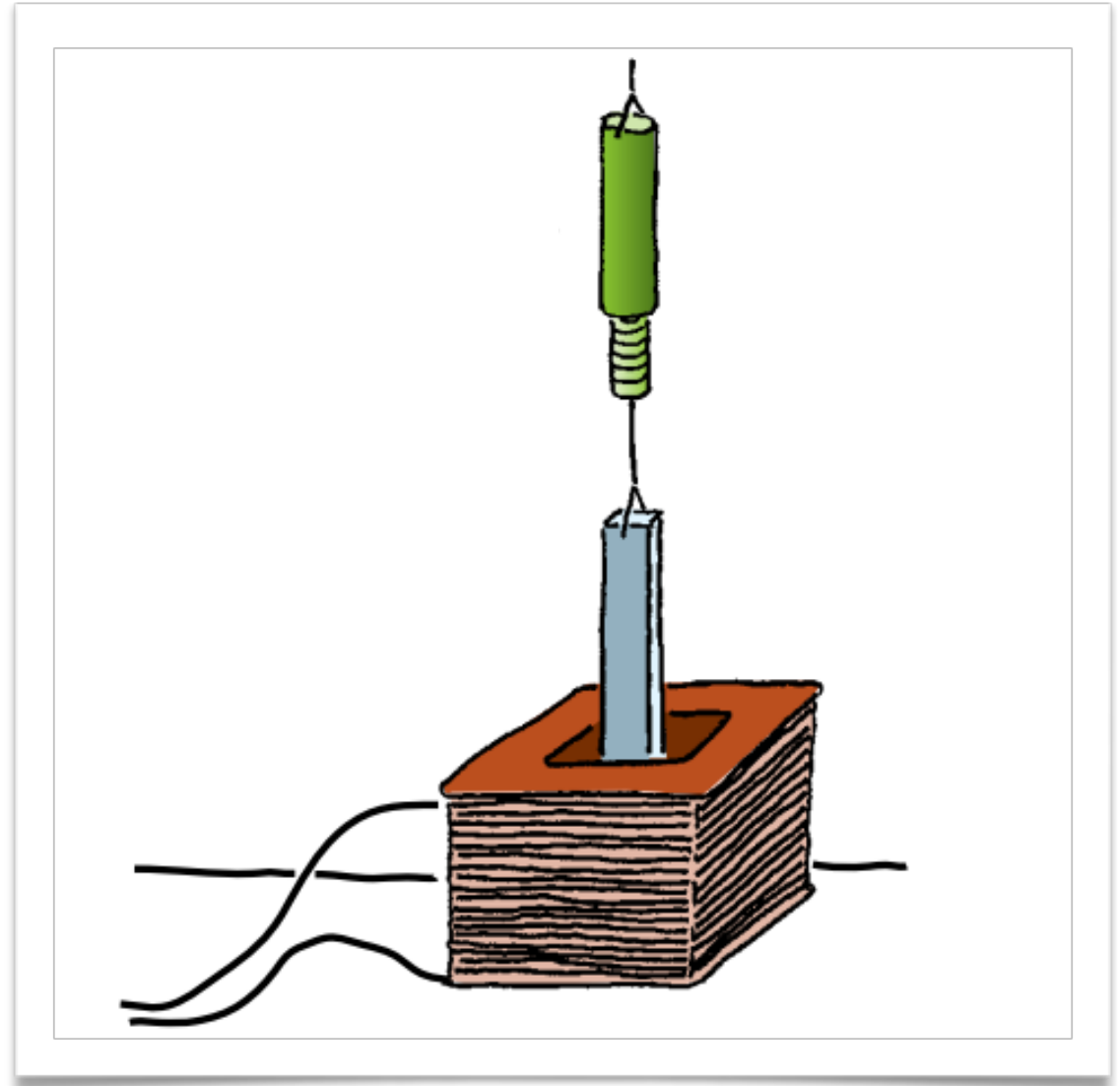
$$F \sim I$$

$$\text{wegen } F = Q_m H \text{ und } H = \frac{nI}{l}$$

$\Rightarrow$

$$Q_m = \frac{F}{H} = \frac{F l}{n I}$$

2. Pol liefert gleichen Wert



**Flussquellen**dichte

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = \frac{\rho_{Q,el}}{\epsilon_0}$$

$$\operatorname{div} \mathbf{H} = \frac{\rho_{m, geb}}{\mu_0}$$

$\mathbf{H}$ : nicht quellenfrei

**Wirbelquellen**dichte

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j}_{Q,el} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$



Analogie:  $E \leftrightarrow B$

Analogie:  $E \leftrightarrow H$

# Fazit

- Die Analogie  $\mathbf{E} \leftrightarrow \mathbf{H}$  ist für die Schule anschaulicher als  $\mathbf{E} \leftrightarrow \mathbf{B}$
- Die Einführung von  $\mathbf{H}$  (und  $Q_m$ ) zusätzlich zu  $\mathbf{B}$  lohnt sich
- $Q_m$  ist eine wohldefinierte, leicht zu messende Größe
- An magnetischen Polen sitzt (gebundene) magnetische Ladung  $Q_m$
- Dass keine magnetischen Monopole existieren, lässt sich mit  $Q_m$  leicht beschreiben:  $Q_{m,\text{gesamt}}$  jedes Körpers ist Null

Die Magnetostatik wird mit  $\mathbf{H}$  und  $Q_m$   
genauso einfach wie die Elektrostatik