

B oder H

Die magnetische Ladung



Holger Hauptmann

Europa-Gymnasium, Wörth am Rhein

holger.hauptmann@gmx.de

Physikalische Größen der Elektrodynamik

elektrische Ladung Q

elektrische Ladungsdichte ρ

freie und gebundene el. Ladung

Kapazität C

Polarisation P

elektrisches Potenzial φ

elektrische Spannung U

elektrische Feldstärke E

elektrische Verschiebung D

magnetischer Fluss Φ

Coulombkraft F

elektrische Stromstärke I

elektrische Stromdichte j

elektrischer Widerstand R

Induktivität L

Magnetisierung M

magnetisches Vektorpotenzial A

magnetisches Skalarpotenzial φ_m

magnetische Feldstärke H

magnetische Flussdichte B

magnetische Ladung Q_m

Lorentzkraft F_L

...

1. Analogie: $E \leftrightarrow B$

elektrische Feldstärke E \leftrightarrow magnetische Flussdichte B

elektrische Ladung Q \leftrightarrow elektrische Stromstärke I

elektrisches Potenzial φ \leftrightarrow magnetisches Vektorpotenzial A

elektr. Feldkonstante ε_0 \leftrightarrow Kehrwert magn. Feldkonst. $1/\mu_0$

Häufigste Analogie, auch in Schulbüchern verbreitet,
dort B oft als *magnetische Feldstärke* eingeführt.

1. Analogie: Definition von E und B

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

$$E = F / Q$$

$$B = F / (s \cdot I)$$

1. Analogie: Kraftgesetze

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

Coulombsches Gesetz \leftrightarrow Biot-Savartsches Gesetz

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

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

Ampere-Definition

1. Analogie: Maxwell-Gleichungen, Potenziale

Maxwell-Gleichungen mit \vec{E} und \vec{B} :

$$\text{rot } \vec{B} = \mu_0 \vec{j}_e + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad \text{div } \vec{B} = 0 \quad \mathbf{B: Quellenfrei}$$

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{div } \vec{E} = \frac{\rho_e}{\varepsilon_0}$$

elektrisches Potenzial φ und magnetisches Vektorpotenzial \vec{A} :

φ und \vec{A} bilden wie ρ und \vec{j} (Ladungs- und Stromdichte) einen Vierervektor

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

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

2. 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 φ \leftrightarrow magnetisches Potenzial φ_m

elektr. Feldkonstante ε_0 \leftrightarrow magn. Feldkonstante μ_0

einfache Einheitenübersetzung: $V \leftrightarrow A$

Beispiele:	E :	V/m	\leftrightarrow	H :	A/m
	Q :	C = A·s	\leftrightarrow	Q_m :	Wb = V·s
	D :	C/m ² = A·s/m ²	\leftrightarrow	B :	Wb/m ² = V·s/m ²
	ε_0 :	As/Vm	\leftrightarrow	μ_0 :	Vs/Am

2. Analogie: Ladungsdichten

elektr. Ladungsdichte ρ_e \leftrightarrow magn. Ladungsdichte ρ_m

$$\rho_e = \rho_{e, \text{frei}} + \rho_{e, \text{gebunden}}$$

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

gebundene Ladung:

Polarisation \mathbf{P}

\leftrightarrow Magnetisierung \mathbf{M}

(magn. Polarisation $\mathbf{J} = \mu_0 \cdot \mathbf{M}$)

Dielektrikum

Weichmagnet

2. Analogie: Ladungsdichten

elektr. Ladungsdichte ρ_e \leftrightarrow magn. Ladungsdichte ρ_m

$$\rho_e = \rho_{e, \text{frei}} + \rho_{e, \text{gebunden}}$$

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

gebundene Ladung:

Polarisation \mathbf{P}

\leftrightarrow Magnetisierung \mathbf{M}

(magn. Polarisation $\mathbf{J} = \mu_0 \cdot \mathbf{M}$)

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

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

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \cdot \mathbf{E} + \mathbf{P}$$

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

außerhalb von Materie: $\mathbf{B} \sim \mathbf{H}$

magnetische Ladung?

Äquivalente Aussagen:

- es gibt keine freie magnetische Ladung
- es gibt keine magnetischen Monopole
- 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

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*.

2. Analogie: Kraftgesetze

elektrische Kraft $F = Q \cdot E \leftrightarrow$ magn. Kraft $F = Q_m \cdot H$

\Rightarrow Definition $H = F / Q_m$

1. Coulombsches Gesetz \leftrightarrow 2. Coulombsches Gesetz

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

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

Messung der magnetischen Ladung Q_m

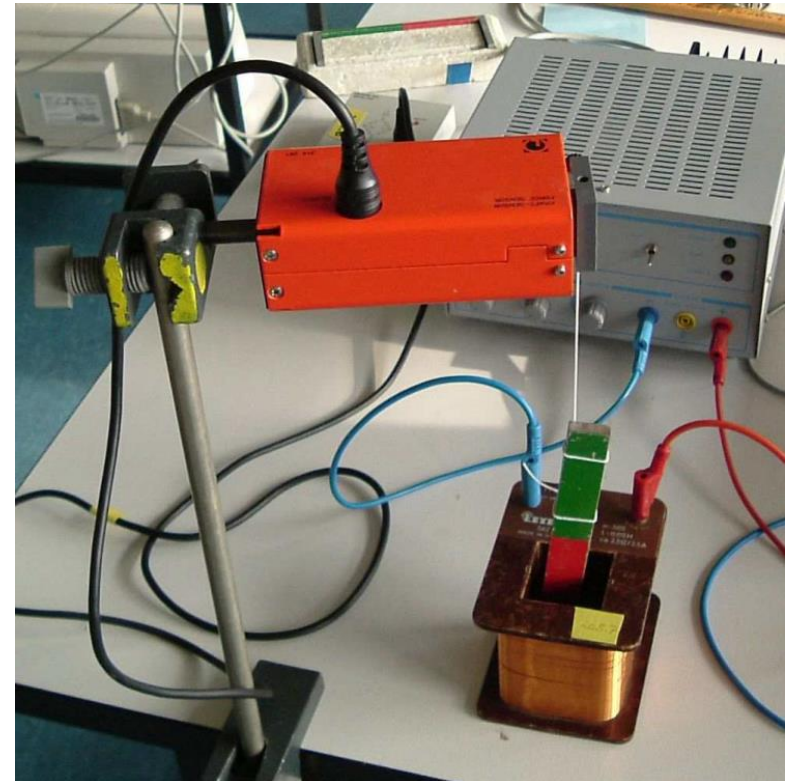
Stabmagnet an Kraftmesser,
ein Pol in einer Spule

Messung zeigt: $F \sim I$

wegen $F = Q_m \cdot H$ und $H = n \cdot I / l \Rightarrow$

$$Q_m = F / H = (F \cdot l) / (n \cdot I)$$

2. Pol liefert gleichen Wert



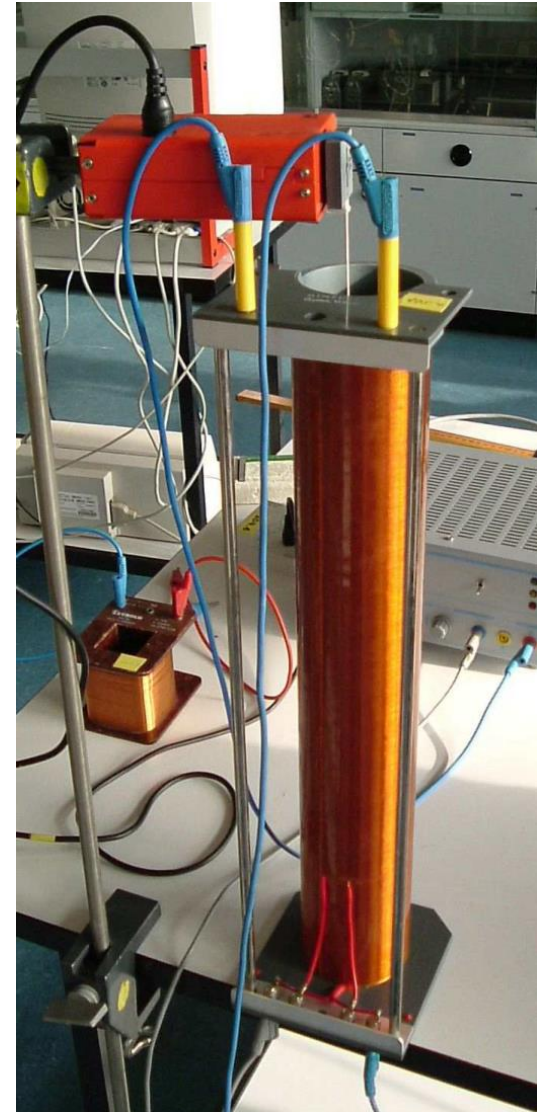
Messung der magnetischen Ladung Q_m

Nachweis, dass $Q_{m,gesamt} = 0$

Stabmagnet in der Mitte einer
langer Spule

Kraft trotz Magnetfeld ≈ 0

$\Rightarrow Q_{m,gesamt} = 0$



2. Analogie: Maxwell-Gleichungen

Maxwell-Gleichungen mit \vec{E} und \vec{H} :

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho_e}{\epsilon_0} \quad \leftrightarrow \quad \operatorname{div} \vec{H} = \frac{\rho_{m,geb}}{\mu_0}$$

Quellendichte

\vec{H} : nicht Quellenfrei

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \leftrightarrow \quad \operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j}_e + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

Wirbeldichte

Fazit

- Die Analogie $E \leftrightarrow H$ ist für die Schule anschaulicher als $E \leftrightarrow B$
 - Die Einführung von H (und Q_m) zusätzlich zu 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 H und Q_m genauso einfach wie die Elektrostatik