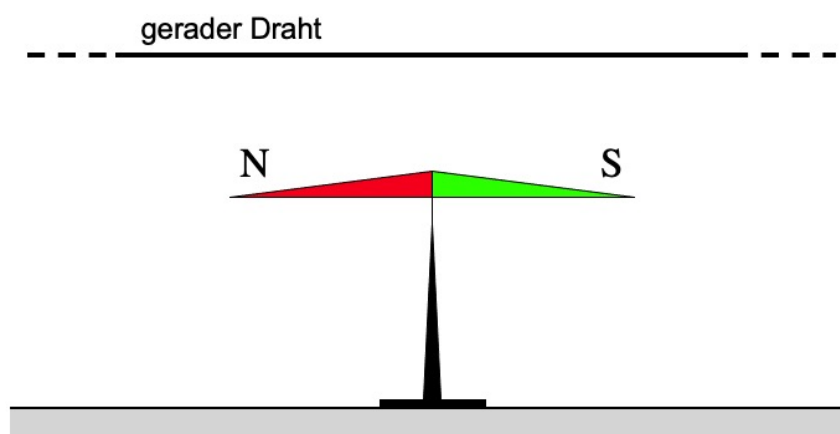


## Übungen zum Elektromagnetismus

### Serie 8: Ströme erzeugen Magnetfelder (Oersted'sche Regel)

#### 1. Die Magnetnadel unterm Kabel

Die folgende Anordnung zeigt einen horizontalen Draht. Welche Stromrichtung liegt vor, wenn sich die darunter aufgestellte Nadel mit ihrem Südpol zu Ihnen (aus dem Blatt heraus) dreht?



#### 2. Quantitatives zu Oersted

Im Jahre 1819 entdeckte der dänische Physiker **Hans Christian Oersted** (1777 – 1851) vermutlich zufällig, dass ein stromdurchflossener Leiter die Ausrichtung einer Kompassnadel beeinflusst. Die Elektromagnetik war geboren.

“Ströme erzeugen Magnetfelder”. In dieser Aufgabe wollen wir uns an verschiedenen Beispielen den quantitativen Aspekt dieser Oersted'schen Erkenntnis vor Augen führen. Dabei erlernst du den Umgang mit der SI-Einheit **Tesla T** für die magnetische Flussdichte, sowie mit der magnetischen Feldkonstante

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$$

die immer dann in der Rechnung auftaucht, wenn eine Verbindung zwischen der Stromstärke  $I$  und der dadurch erzeugten magnetischen Flussdichte  $B$  aufgestellt werden soll.

- (a) Das Magnetfeld eines einzelnen **langen, geraden Leiters** ist nicht besonders stark. Betrachte dazu ein gerades Kabel, durch das ein doch schon recht beträchtlicher Strom von  $5.0 \text{ A}$  fließt, und gib an, wie groß  $B$  in einer Entfernung von  $1.0 \text{ cm}$ ,  $2.0 \text{ cm}$ ,  $4.0 \text{ cm}$ ,  $20.0 \text{ cm}$  und  $1.0 \text{ m}$  ist. Am besten drückst du die Resultate in  $\mu\text{T}$  aus und vergleichst sie jeweils mit der horizontalen Komponente des Erdmagnetfeldes (vgl. Skript S. 58).
- (b) Will man die elektromagnetische Wirkung des Stromes effizient ausnutzen, so empfiehlt sich die Verwendung von **Spulen**. Dadurch fließt derselbe Strom mehrmals an derselben Stelle vorbei – die Wirkung wird entsprechend vervielfacht.

Martin hat selber eine Spule gebastelt, indem er den Karton einer aufgebrauchten WC-Rolle ( $d = 3.8 \text{ cm}$ ) mit einem Kupferdraht auf einer Länge von  $8.5 \text{ cm}$  umwickelt hat. Lässt er nun einen Strom der Stärke  $740 \text{ mA}$  durch diese Eigenbau-Spule fließen, so ist in deren Innenraum ein nahezu homogenes Magnetfeld mit einer Flussdichte von immerhin  $1.4 \text{ mT}$  vorhanden.

Wie viele Male hat Martin beim Bau seiner Spule mit dem Draht den Karton etwa umwickelt?

- (c) Du hast eine lange, aber dünne Spule herzustellen, die in der Mitte eine magnetische Flussdichte von maximal  $24.0 \text{ mT}$  erreichen soll. Als Stromquelle steht dir ein Netzgerät zur Verfügung, welches maximal  $10.0 \text{ A}$  Stromstärke liefern kann. Wie viele Windungen pro Zentimeter wird die Spule mindestens aufweisen müssen?

**Tipp 1:** Für lange und schlanke Spulen ist der Durchmesser vernachlässigbar, denn in diesem Fall ist  $l^2 \gg d^2$  und es gilt:  $\sqrt{d^2 + l^2} \approx l$ .

**Tipp 2:** "Windungen pro Zentimeter", das bedeutet, es geht um die Anzahl Windungen pro Längenabschnitt oder eben formal um die Berechnung des Ausdrucks  $\frac{N}{l}$ !

- (d) Das Helmholtz-Spulenpaar unserer physikalischen Sammlung besitzt 124 Windungen (pro Spule). Spulenradius und -abstand betragen  $15 \text{ cm}$ .

Mit welcher Stromstärke muss dieses Spulenpaar mindestens betrieben werden, damit eine Kompassnadel im Innenraum des Spulenpaares merklich von ihrer normalen Ausrichtung abweicht?

Gib die Antwort in einer anschaulichen Einheit!

**Hinweis:** Für eine merkliche Abweichung muss das Magnetfeld der Spule mindestens  $\frac{1}{10}$  der horizontalen Stärke des Erdmagnetfeldes aufweisen (vgl. Skript S. 58).

### 3. Elektromagnetische Wirkung von Strömen im Haushalt?

Wenn du dich dem stromführenden Kabel eines Staubsaugers mit einer Kompassnadel näherst, schlägt diese nicht aus, obwohl ein Wechselstrom von z.B.  $5.5 \text{ A}$  fließt. Erkläre diesen scheinbaren Widerspruch.

### 4. Magnetfeldtherapie

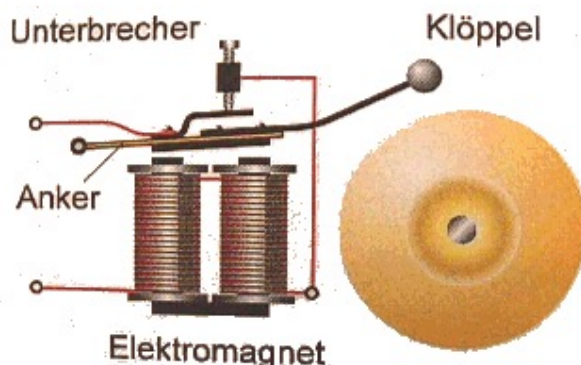
In modernen Kliniken ist die **Magnetfeldtherapie** seit Jahren im Einsatz. Die Therapie wird zur Linderung bei Schmerzzuständen aller Art eingesetzt. Sie kann aber auch die Durchblutung und den Stoffwechsel fördern, was sich positiv auf die Wundheilung auswirkt. Der Aufbau ist verblüffend einfach (siehe Bild unten): eine Flachspule mit z.B. einem Radius von  $37 \text{ cm}$  und  $12 \text{ cm}$  Länge, ist in einem frei beweglichen Ring untergebracht. Je nach Therapie wird ein bis zu  $5.0 \text{ mT}$  starkes Magnetfeld benötigt.

- (a) Welche Stromstärke muss durch die Spule (280 Windungen) fließen, um die gewünschte Magnetfeldstärke in der Mitte zu erreichen?
- (b) In welche Richtung zeigt das Magnetfeld im Inneren der Spule auf dem Bild unten, wenn der Strom von uns aus gesehen im Gegenuhrzeigersinn fließt? Begründe.

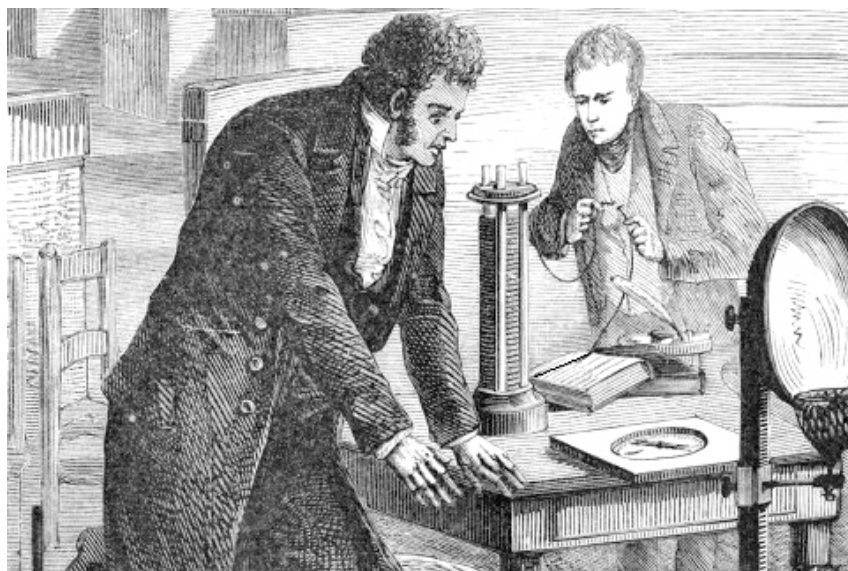


## 5. Die elektrische Klingel

Erkläre die Funktionsweise einer elektrischen Klingel anhand der folgenden Graphik.



## 6. Oersteds "Volta'sche Säule"



Die historische Darstellung zeigt **Hans Christian Oersted** (1777 – 1851) in seinem Kopenhagener Laboratorium. Er beobachtet die Ablenkung eines Kompasses in der Nähe eines stromführenden Drahtes. Zwischen Oersted und seinem Assistenten sehen wir eine **Volta'sche Säule** (= damalige Batterie). Sie erzeugt den Strom im Draht, wenn der Assistent den Kurzschluss zwischen den Batteripolen herstellt.

- (a) **Schätze ab, welche Stromstärke diese Volta'sche Säule zumindest kurzzeitig bereitstellen konnte.**
- Schätze die **ungefähre Distanz** zwischen dem Kompass und dem entscheidenden Drahtabschnitt auf dem Buch beträgt aus dem Bild ab.
  - Das durch den Strom erzeugte Magnetfeld muss bei der Kompassnadel mindestens  $\frac{1}{10}$  der horizontalen Komponente des Erdmagnetfeldes betragen ( $B_{\text{Kopenhagen, horizontal}} \approx 17 \mu\text{T}$ ), damit eine Reaktion der Nadel beobachtet werden kann.
  - Gehe von einem **langen, geraden Draht** aus.
- (b) Im Bild ist der Drahtabschnitt auf dem Buch nicht optimal ausgerichtet, um die Kompassnadel zu beeinflussen. **Welche Ausrichtung wäre dort ideal für eine möglichst starke Beeinflussung der Kompassnadel?** (Antwort mit einer passenden Skizze begründen.)

## 7. Zusatzaufgabe: Das magnetische Bahnmoment – ein Atom als Stromschleife

Wie du in **Anhang C** erfährst, lässt sich der Magnetismus eines Stoffes auf atomarer Ebene auf zwei Ursachen zurückführen. Einerseits besitzen die elementaren Materieteilchen aufgrund ihres **Spins** alle bereits ein eigenes **magnetisches Moment** – sie sind als winzige Stabmagneten zu betrachten. Andererseits kann man die “Bewegung” eines Elektrons in einem Atom als Strom auffassen, der – wie alle anderen Ströme auch – gemäss der Oersted’schen Regel ein Magnetfeld erzeugt. In diesem Zusammenhang spricht man vom **magnetischen Bahnmoment** eines Teilchens.

In dieser Aufgabe soll es um das Bahnmoment eines Elektrons im **Wasserstoff-Atom** gehen. Den Kern eines solchen H-Atoms bildet ein einzelnes Proton. Im **Bohr’schen Atommodell** aus dem Jahre 1913 kreist das Elektron um das Proton, weil es durch die **Coulombkraft**  $F_{\text{el}}$  auf seiner Umlaufbahn gehalten wird. Diese beträgt für zwei Punktladungen  $q_1$  und  $q_2$  im Abstand  $r$  zueinander:

$$F_{\text{el}} = k \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \quad \text{mit} \quad k = 9.00 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$$

- (a) **Niels Bohr** (1885 – 1962) konnte aus seinem Atommodell zum ersten Mal erfolgreich einen theoretischen Wert für den Bahnradius des Elektrons im Grundzustand des H-Atoms herleiten. Dieser Wert wird als **Bohr’scher Radius**  $r_B$  bezeichnet und die Bohr’sche Formel dafür lautet:

$$r_B = \frac{h^2}{\pi \mu_0 m_e c^2 e^2}$$

$h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$  bezeichnet das sogenannte **Planck’sche Wirkungsquantum**,  $c = 2.998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  ist die **Lichtgeschwindigkeit im Vakuum**.

Berechne den Bohr’schen Radius ( $\approx$  Radius eines H-Atoms).

- (b) Setze Zentripetalkraft  $F_Z$  und die Coulombkraft  $F_{\text{el}}$  gleich, um aus dem Bohr’schen Radius Werte für die **Bahngeschwindigkeit**  $v$  und die **Umlaufzeit**  $T$  des Elektrons im Grundzustand des Bohr’schen Modells des H-Atoms zu erhalten.

**Hinweis:** Proton und Elektron tragen je eine einfache Elementarladung  $e$ . Die Masse des Elektrons beträgt  $m_e = 9.109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ .

**Tip:** Der Zusammenhang zwischen Bahngeschwindigkeit und Umlaufzeit lautet  $v = \frac{2\pi r}{T}$  und die Newton’sche Formel für die Zentripetalkraft ist  $F_Z = \frac{mv^2}{r}$ .

- (c) Bewegt sich ein Elektron auf einer Kreisbahn, so können wir das als Kreisstrom interpretieren. Betrachten wir eine Stelle auf der Umlaufbahn, so kommt das Elektron mit Ladung  $e$  pro Umlaufzeit  $T$  genau einmal dort vorbei. Daraus folgt für die Stromstärke:

$$I = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{e}{T}$$

Berechne erstens die Stromstärke  $I$  dieses Elektronenstroms im Atom und daraus zweitens die Stärke  $B$  des Magnetfeldes, die das Elektron am Ort des Protons, also im Innern seiner “Umlaufschleife” erzeugt.

- (d) Vergleiche dein Resultat aus (c) mit der Flussdichte im Innern einer kleinen Stromschleife mit Radius 1 cm, durch die ein Strom der Stärke 1 A fliesst.

**Anmerkung:** Obige Rechnungen zum H-Atom sind zwar hübsch, aber leider versagt das Bohr’sche Atommodell bei der Erklärung des atomaren Magnetismus komplett. Es war halt lediglich ein erstes, sehr rudimentäres Atommodell, das allerdings das “Bild” von Atomen im öffentlichen Denken bis heute prägt. Tatsächlich besitzt das Wasserstoff-Atom in seinem Grundzustand gar kein Bahnmoment. Erst ab dem ersten angeregten Zustand ist ein solches Bahnmoment möglich. Diese Aussagen können nur mit der Quantenmechanik verstanden werden, die in den ausgehenden 20er Jahren des 20. Jahrhunderts formuliert wurde.