Lösung:

- $E = \frac{U}{d}$
- Störung: Äquipotenziallinien schmiegen sich um das metallische Objekt. Das Feld wird inhomogen, die Feldstärke nimmt an den stark gekrümmten Orten hohe Werte an → dort Überschlagswahrscheinlichkeit (Blitzeinschlag) am größten → Blitzableiter: kontrolliertes Abfließen der Ladungen

2. Gegeben: Fadenpendel (metallischer Pendelkörper, Masse m) im Plattenkondensator; U, m, A, d, Auslenkung α bekannt

   Gesucht: wirkende Kräfte; Q

   Lösung:

   - Kräfteparallelgramm aus Gewichtskraft (vertikal) und elektrischer Kraft (horizontal); Resultierende in Fadenrichtung (Gleichgewichtsfall)
   - Gleichgewichtsfall:

     $\tan\alpha = \frac{F_{el}}{F_G} = \frac{E \cdot Q}{m \cdot g} = \frac{U \cdot Q}{d \cdot m \cdot g} \quad \Rightarrow \quad Q = \frac{d \cdot m \cdot g}{U} \cdot \tan\alpha$

1.3 Radiales Feld – Coulombgesetz

Ein radialsymmetrisches elektrisches Feld entsteht in der Umgebung einer **Punktladung**. Ist sie positiv, weisen die **Feldlinien** radial nach außen, ist sie negativ, sind sie auf das Ladungszentrum hin gerichtet.

Coulombgesetz
Zwischen zwei Punktladungen q und Q im gegenseitigen Abstand r wirkt die Coulombkraft. Sie hat den Betrag

$$\mathbf{F(r) = \frac{1}{4\pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{q \cdot Q}{r^2}}.$$

Wegen $F = q \cdot E$ ist $E(r) = \frac{1}{4\pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2}$ die **Coulombfeldstärke** der Ladung Q im Abstand r (entsprechend für q).
Bezogen auf einen Punkt im Unendlichen gilt für das zugehörige **Coulombpotenzial**:

$$\varphi(r) = \frac{1}{4\pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{Q}{r}$$

Die **Äquipotenzialflächen** sind konzentrische Kugelflächen mit dem Ladungszentrum als Mittelpunkt.

1. In dem Feld einer negativen Punktladung q liegt ein Punkt P im Abstand 6,0 cm auf dem Coulombpotenzial –300 V.
   Berechnen Sie q sowie das Coulombpotenzial eines Punktes S, der von der Ladung 5,0 cm entfernt ist.
   Geben Sie die Potenzialdifferenz zwischen P und S an.

   Lösung:
   Coulombpotenzial der Ladung q im Abstand r_P:

   $$\varphi(r_P) = \frac{1}{4\pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{q}{r_P}$$

   $$\Rightarrow \quad q = 4\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varphi(r_P) \cdot r_P \quad (*)$$

   $$= 4\pi \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-12}\,\frac{\text{C}}{\text{Vm}} \cdot (-300\ \text{V}) \cdot 6{,}0 \cdot 10^{-2}\ \text{m} = -2{,}0\ \text{nC}$$

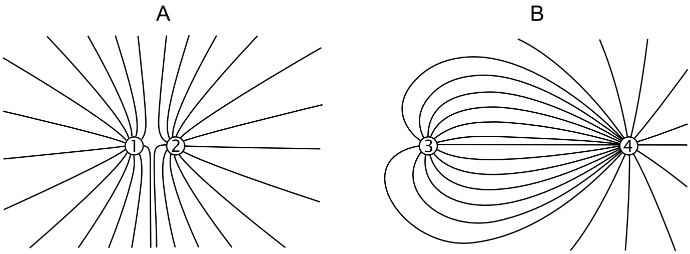
   Für q gilt nach (*) jeweils:

   $$\left.\begin{aligned} q &= 4\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varphi(r_P) \cdot r_P \\ q &= 4\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varphi(r_S) \cdot r_S \end{aligned}\right\} \Rightarrow \ \varphi(r_P) \cdot r_P = \varphi(r_S) \cdot r_S$$

   $$\Rightarrow \ \varphi(r_S) = \frac{r_P}{r_S} \cdot \varphi(r_P) = \frac{6}{5} \cdot (-300\ \text{V}) = -360\ \text{V}$$

   Die Potenzialdifferenz zwischen P und S beträgt 60 V.

2. Vergleichen Sie die Feldlinienbildern A und B hinsichtlich ihrer Ladungen. Welche Aussagen sind möglich, welche nicht?



   Lösung:
   Bild A: $|Q_1| = |Q_2|$ (Symmetrie); Q_1, Q_2 gleichnamig (keine verbindenden Feldlinien)
   Bild B: $|Q_3| < |Q_4|$ (Feldlinien bei Q_3 weichen stärker von der Radialform ab als bei Q_4); Q_3, Q_4 ungleichnamig

   Ladungsvorzeichen unbestimmt, da Feldlinienrichtung unbekannt.

2 Statisches magnetisches Feld

Anwendungsgebiete:

❶ Technik: Elektromagnet; Gleichstromelektromotor; Drehspulinstrument; Ablenkspulen

❷ Natur: Erdmagnetfeld; Van-Allen-Gürtel

Magnetische Felder werden durch **Feldlinien** beschrieben, die in jedem ihrer Punkte tangential zum dortigen magnetischen Kraftvektor verlaufen. Magnetische Feldlinien

- sind stets geschlossen, haben also keinen Anfangs- oder Endpunkt;
- kreuzen und berühren sich nicht;
- verlaufen (außerhalb eines Magneten) vom Nord- zum Südpol;
- sind lokal umso dichter, je stärker dort das Magnetfeld ist.

Magnetfelder entstehen in der Gegenwart von **Dauermagneten** (bestehend aus Eisen, Kobalt, Nickel oder Legierungen daraus) oder in der Umgebung eines **stromdurchflossenen** Leiters. Die den magnetischen Feldlinien zugeordnete physikalische Größe ist die **magnetische Flussdichte** („Stärke" des Magnetfelds). Sie ist durch die Kraft definiert, die ein stromdurchflossener Leiter im Magnetfeld erfährt.

Magnetische Flussdichte

Die Flussdichte $\vec{B}$ eines magnetischen Felds in einem Punkt P ist gegeben durch einen Vektor, der Betrag und Richtung der magnetischen Kraft auf einen von einem elektrischen Strom der Stärke I durchflossenen Leiter der Länge ℓ angibt (Einheit: 1 Tesla):

$$\vec{\mathbf{B}} = \frac{\vec{\mathbf{F}}}{\mathbf{I} \cdot \ell} \qquad [\mathbf{B}] = 1\,\frac{\mathbf{N}}{\mathbf{Am}} = 1\,\frac{\mathbf{Vs}}{\mathbf{m}^2} = 1\,\mathbf{T}$$

Überlagern sich mehrere magnetische Felder, ergibt sich die Gesamtflussdichte analog zum elektrischen Feld durch **vektorielle Addition** der Einzelflussdichten. Ebenso bezeichnet man ein Magnetfeld als **homogen**, wenn $\vec{B}$ = konst. Ein homogenes Feld liegt z. B. vor zwischen den Schenkeln eines **Hufeisenmagneten**, im Zentrum eines **Helmholtz-Spulenpaars** oder im Inneren einer langen **Zylinderspule**, durch deren Drahtwindungen ein konstanter Gleichstrom fließt.

Magnetische Flussdichte einer langen Zylinderspule
Das homogene Magnetfeld im Inneren einer stromdurchflossenen Zylinderspule besitzt die Flussdichte
$\mathbf{B} = \mu_0 \cdot \frac{N}{\ell} \cdot I.$

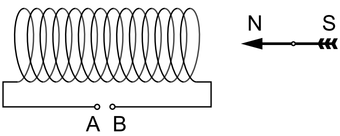
N: Windungszahl
ℓ: Spulenlänge (mit $\ell \gg$ Durchmesser des Spulenquerschnitts)
I: Stärke des Spulenstroms
μ_0: magnetische Feldkonstante ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$)

Das Magnetfeld der Spule ähnelt im Außenraum dem eines **Stabmagneten**. Um sich allgemein die Richtungen der Feldlinien und Kräfte in einem Magnetfeld zu verdeutlichen, verwendet man drei Handregeln:

Handregeln zur Richtungsbestimmung im Magnetfeld
- **Rechte-Faust-Regel:** $\vec{B}$-Richtung beim stromdurchflossenen Leiter (Feldlinien: konzentrische Kreise in Ebenen senkrecht zum Leiter)
  Daumen: $\vec{I}$ (technisch); restliche Finger: $\vec{B}$
- **Rechte-Hand-Regel:** Polung einer stromdurchflossenen Spule
  Daumen: zeigt zum Nordpol; restliche Finger: $\vec{I}$ (technisch)
- **Drei-Finger-Regel der rechten Hand:** Richtung der Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter im homogenen Magnetfeld
  Daumen: $\vec{I}$ (technisch) Zeigefinger: $\vec{B}$ Mittelfinger: $\vec{F}$

Dass ein stromdurchflossener Leiter im Magnetfeld abgelenkt wird, ist ein Spezialfall der Wirkung der **Lorentzkraft**. Sie tritt ganz allgemein immer dann auf, wenn ein geladenes Teilchen sich senkrecht zu den Feldlinien eines Magnetfelds bewegt (vgl. Kap. 4.2, S. 19)

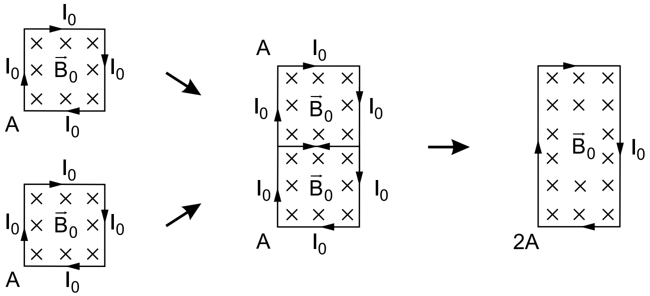
1. Die Achse einer Zylinderspule liegt in West-Ost-Richtung. Geben Sie an, welches Spulenende mit dem Plus- bzw. Minuspol einer Gleichspannungsquelle verbunden werden muss, damit die Magnetnadel die eingezeichnete Richtung einnimmt.



Lösung: Dem Nordpol der Magnetnadel muss ein Spulensüdpol gegenüber liegen. Daher muss am linken Spulenende ein Nordpol liegen. Nach der Rechte-Hand-Regel ist dies der Fall, wenn B mit dem Pluspol und A mit dem Minuspol der Gleichspannungsquelle verbunden wird.

2. Erläutern Sie an einem geeignet gewählten Spulenkörper, warum die magnetische Flussdichte im Inneren einer Zylinderspule nicht vom Spulenquerschnitt abhängt.

   Lösung: In zwei Spulen mit rechteckigem Querschnitt, die in der gleichen Richtung jeweils vom gleichen Strom der Stärke I_0 durchflossen werden, herrscht im Inneren jeder Spule das gleiche Magnetfeld der Flussdichte $\vec{B}_0$ (siehe Abbildung). Ersetzt man die beiden Spulen durch eine einzige Spule mit doppeltem Querschnitt, durch die ein Strom der Stärke I_0 fließt, ändert sich der Betrag von $\vec{B}_0$ im Inneren nicht: Die Feldliniendichte hat sich nicht geändert.



Weitere typische Aufgabenstellungen

1. Gegeben: Metallstab (quer auf zwei Metallschienen) im homogenen $\vec{B}$-Feld, von Gleichstrom durchflossen; Leiterschaukel
   Gesucht: Betrag und Richtung der Lorentzkraft (evtl.: Beschleunigung; erzielte Geschwindigkeit); Auslenkwinkel

   Lösung: Ansatz $F = B \cdot I \cdot \ell$; Newton'sches Grundgesetz $F = m \cdot a$; (evtl.: Gesetze der gleichmäßig beschleunigten Bewegung)

2. Gegeben: Zylinderspule
   Gesucht: Berechnung einer der Größen N, ℓ, I, B

   Lösung: Ansatz Spulenformel $B = \mu_0 \cdot \frac{N}{\ell} \cdot I$