

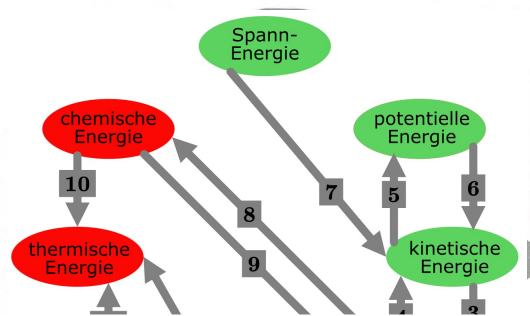

Energieumwandlungen

Suche für jede Nummer ein Gerät bzw. einen Vorgang, bei dem die skizzierte Energieumwandlung stattfindet.

Hinweise:

Es sind verschiedene Lösungen möglich.

Es gibt noch wesentlich mehr mögliche Energieumwandlungen zwischen den dargestellten Energieformen.



Thinking

Responding

Beschreibungen der Geräte/Prozesse

1. ****Solarzelle (Strahlungsenergie → elektrische Energie):****
Eine Solarzelle wandelt Sonnenlicht in elektrische Energie um und wird häufig für die Stromversorgung von Haushalten oder Geräten eingesetzt.
2. ****Leuchtdiode (elektrische Energie → Strahlungsenergie):****
Eine Leuchtdiode (LED) nutzt elektrische Energie, um Licht zu erzeugen, und wird zur Beleuchtung oder in Displays verwendet.
3. ****Dynamo/Generator (kinetische Energie → elektrische Energie):****
Ein Dynamo oder Generator wandelt Bewegungsenergie in elektrische Energie um, wie z. B. bei Fahrraddynamos oder Kraftwerken.
4. ****Wasserfall (elektrische Energie → kinetische Energie):****
Die Energie eines Wasserfalls kann in Wasserkraftwerken genutzt werden, um Turbinen anzutreiben und elektrische Energie zu erzeugen.
5. ****Wasserfall (potentielle Energie → kinetische Energie):****
Die potentielle Energie des Wassers wird durch den Fall in kinetische Energie umgewandelt, die zur Energiegewinnung genutzt werden kann.
6. ****Achterbahn bei Bergfahrt (kinetische Energie → potentielle Energie):****
Beim Hochfahren einer Achterbahn wird kinetische Energie in potentielle Energie umgewandelt, die später für die Abfahrt genutzt wird.
7. ****Armbrust (Spannenergie → kinetische Energie):****
Beim Abschießen eines Pfeils wird die gespeicherte Spannenergie der Armbrust in kinetische Energie umgewandelt, um den Pfeil anzutreiben.
8. ****Akku-Ladegerät (elektrische Energie → chemische Energie):****
Ein Akku-Ladegerät speichert elektrische Energie in chemischer Form, um sie später für Geräte bereitzustellen.
9. ****Entladung eines Akkus (chemische Energie → elektrische Energie):****
Beim Entladen eines Akkus wird chemische Energie in elektrische Energie umgewandelt, um Geräte wie Smartphones oder Laptops zu betreiben.
10. ****Feuer (chemische Energie → thermische Energie):****
Beim Verbrennen von Holz oder anderen Stoffen wird die in ihnen gespeicherte chemische Energie in Wärmeenergie umgewandelt.
11. ****Warmwasserkollektor (Strahlungsenergie → thermische Energie):****
Ein Warmwasserkollektor nutzt die Sonnenstrahlung, um Wasser zu erwärmen, das z. B. für Haushalte oder Heizsysteme verwendet werden kann.
12. ****Atombombe (Kernenergie → thermische Energie):****
In einer Atombombe wird Kernenergie in thermische Energie und Druckwellen umgewandelt, was zu einer enormen Explosion führt.
13. ****Kernkraftwerk (Kernenergie → elektrische Energie):****

Einstieg: Die Potentielle Energie

New York

Du bist in New York im Urlaub und besichtigst das One World Trade Center. Auf dem Rücken hast du natürlich deinen Rucksack mit Verpflegung, Fotoausrüstung usw., der insgesamt die Masse $5,0\text{ kg}$ besitzt.

Zunächst fährst du mit dem Aufzug vom Erdgeschoss, wo dein Rucksack keine potentielle Energie besitzt, in den 27. Stock, der sich in 100 m Höhe (über dem Erdgeschoss) befindet.

a)

Berechne, wie sich die potentielle Energie des Rucksacks durch die Aufzugfahrt verändert hat.

b)

Erläutere, in welche Höhe bzw. in welches Stockwerk du mit dem Aufzug fahren müsstest, damit die potentielle Energie des Rucksacks dreimal so groß ist wie nach der Fahrt in den 27. Stock.

c)

Anschließend fährst du weiter auf die Aussichtsplattform. Hier hat dein Rucksack eine potentielle Energie von ungefähr 19000 J .

Berechne, in welcher Höhe über dem Erdgeschoss sich die Aussichtsplattform etwa befindet.

d)

Auf der Aussichtsplattform liest du, dass auf dem Mond der Ortsfaktor nur $1,6 \frac{\text{N}}{\text{kg}}$ beträgt.

Erläutere, ob sich die potentielle Energie deines Rucksackes bei der gleichen Aufzugfahrt auf dem Mond stärker oder weniger stark verändern würde als auf der Erde.

$$E_{\text{pot}} = mgh$$

a)

$$\Delta E_{\text{pot}} = mg \cdot \Delta h = 5 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \cdot 100 \text{ m} = 4,9 \text{ kJ}$$

b) 300 m 81 Stock

c) $19000 \text{ J} = 5 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \cdot h$

$$h = 387,4 \text{ m} \approx 104-105 \text{ Stock}$$

d) $g = 1,6 \frac{\text{N}}{\text{kg}}$

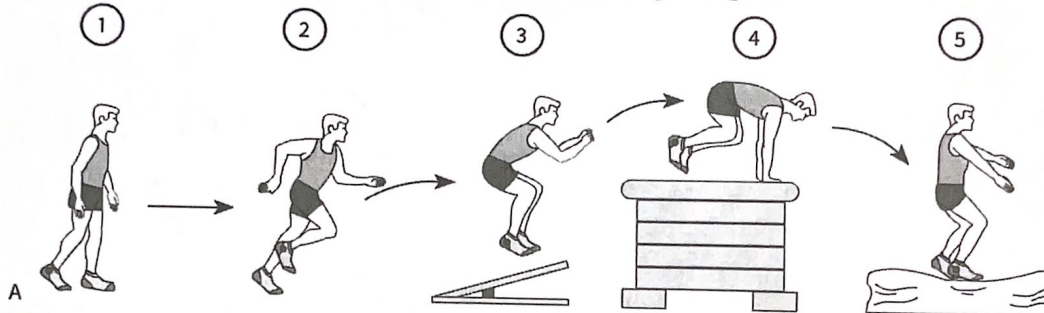
kleiner

Energie

Energieformen

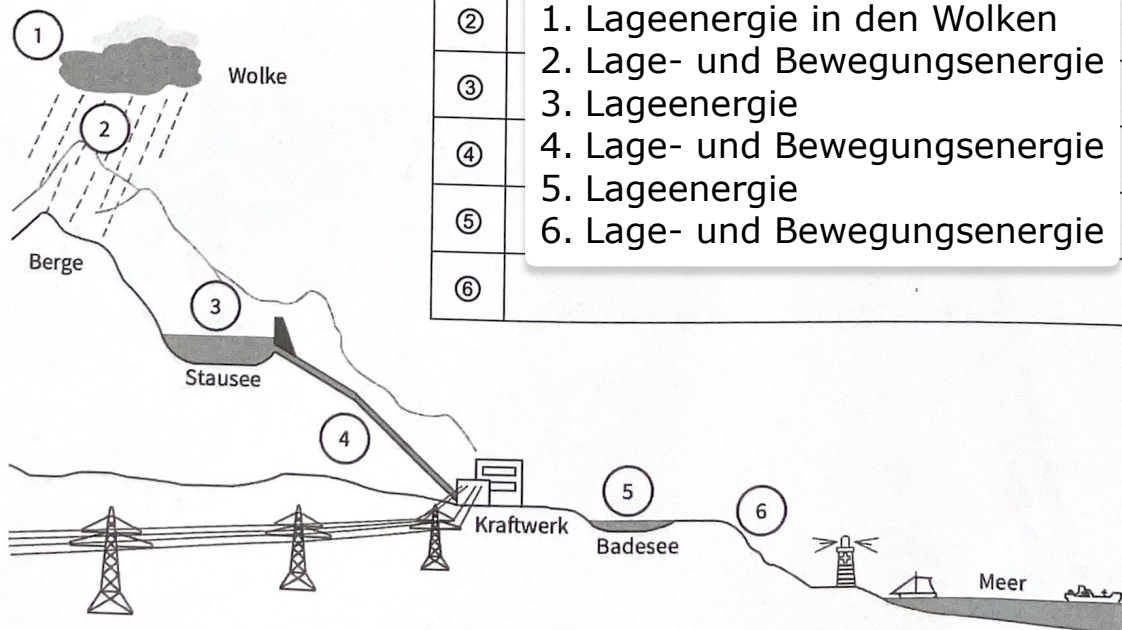
- 1 Ein Turner startet an der Stelle A, springt auf das Sprungbrett und über den Kasten, bevor er auf der Matte ankommt.

Gib die auftretenden Energieformen an den Positionen ① bis ⑤ an:

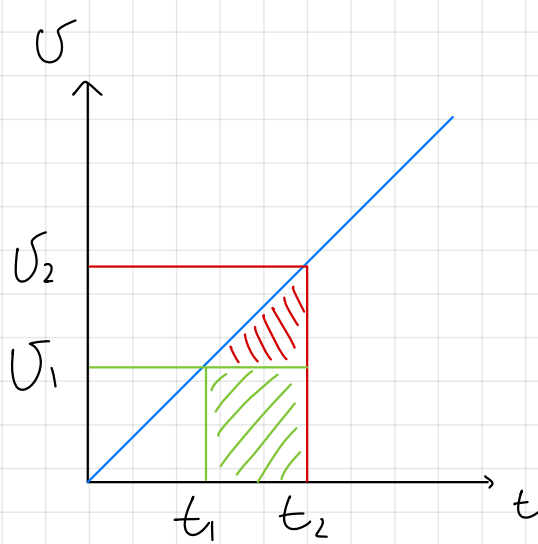


①	1. chemische	
②	2. + kinetische	
③	3. + kinetische + potenzielle	
④	4. - kinetische + potenzielle	
⑤	5. --- kinetische --- potenzielle	

- 2 Unten ist ein Regentropfen auf seinem Lebensweg dargestellt. Gib die auftretenden Energieformen an den Positionen ① bis ⑥ an. Dabei wird seine gesamte Energie immer geringer. Überlege, wo er etwas davon abgegeben hat. Zeichne entsprechende Energiepfeile ein.



①	
②	1. Lageenergie in den Wolken
③	2. Lage- und Bewegungsenergie
④	3. Lageenergie
⑤	4. Lage- und Bewegungsenergie
⑥	5. Lageenergie
⑦	6. Lage- und Bewegungsenergie



$$U_1 = U(t_1) \quad U_2 = U(t_2)$$

$$W = F \cdot s = m \cdot a \cdot \Delta s$$

$$\begin{aligned} \Delta s &= \Delta s_1 + \Delta s_2 = U_1 \cdot (t_2 - t_1) + \frac{1}{2}(U_2 - U_1) \cdot (t_2 - t_1) \\ &= U(t_1)t_2 - U(t_1)t_1 + \frac{1}{2} \cdot U(t_2) \cdot t_2 - \frac{1}{2} U(t_2)t_1 - \frac{1}{2} U(t_1)t_2 + \frac{1}{2} U(t_1)t_1 \\ &= \frac{1}{2} [U(t_1)t_2 - U(t_1)t_1 + U(t_2)t_2 - U(t_2)t_1] \quad (1) \end{aligned}$$

$$a = \frac{\Delta U}{\Delta t} = \frac{U(t_2) - U(t_1)}{t_2 - t_1} = \frac{U(t_2) - U(t_0)}{t_2 - t_0} = \frac{U(t_2)}{t_2} = \frac{U(t_1)}{t_1} \quad (2) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} W &= m \cdot a \cdot \Delta s = m \cdot \frac{1}{2} \cdot a (U(t_1)t_2 - U(t_1)t_1 + U(t_2)t_2 - U(t_2)t_1) = \\ &= m \cdot \frac{1}{2} \cdot [U(t_1)U(t_2) - U(t_1)U(t_1) + U(t_2)U(t_2) - U(t_2)U(t_1)] = \\ &= \frac{1}{2} m \cdot [U(t_2)^2 - U(t_1)^2] = \\ &= \frac{1}{2} m \cdot U_2^2 - \frac{1}{2} m \cdot U_1^2 = E_{kin,2} - E_{kin,1} = \Delta E_{kin} = W \quad \text{Arbeit} \end{aligned}$$

$$v_{Ball} = 120 \frac{km}{h}$$

$$m = 0,4 \text{ kg}$$

$$a) E_{kin} = \frac{1}{2} m_b \cdot v_b^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,4 \text{ kg} \cdot \left(\frac{100}{3} \right)^2 \frac{m^2}{s^2} \approx 222 \text{ J}$$

$$b) E_{kin}' = \frac{1}{2} \cdot 2 m_b \cdot v_b^2 \approx 444 \text{ J}$$

$$c) E_{kin}'' = \frac{1}{2} \cdot m_b \cdot (2 v_b)^2 \approx 888 \text{ J}$$

$$S = 3,3 \cdot 10^6 \text{ km}^2$$

$$h = 50 \text{ km}$$

$$\rho = 3 \text{ g/cm}^3$$

d)

$$E_{kin} = m \cdot v^2 \cdot \frac{1}{2} = \rho \cdot V \cdot v^2 \cdot \frac{1}{2} = \rho \cdot S \cdot h \cdot v^2 \cdot \frac{1}{2} \approx$$

$$\approx 3 \text{ g/cm}^3 \cdot 3,3 \cdot 10^{16} \text{ cm}^2 \cdot 50 \cdot 10^6 \text{ cm} \cdot \left(\frac{0,1 \text{ cm}}{60480 \text{ s}} \right)^2 \approx$$

$$\approx 1,35 \cdot 10^{10} \frac{\text{g} \cdot \text{cm}^2}{\text{s}^2} = 1353 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2} = 1353 \text{ J}$$

$$1) E_{\text{spann}} = \frac{k \cdot (\Delta x)^2}{2} = \frac{F \cdot \Delta s}{2}$$

$$(F = k \cdot \Delta x)$$

$$mgh = \frac{F \cdot \Delta s}{2}$$

$$h = \frac{F \cdot \Delta s}{2mg} = \frac{333 \text{ N} \cdot 0,3 \text{ m}}{2 \cdot 0,04 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 127 \text{ m}$$

$$2) a) E_{\text{pot}} = m_k gh = 75 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 8 \text{ m} = 5886 \text{ J}$$

$$b) m_k gh = m_k \cdot g \cdot \frac{h}{2} + \frac{m_k \cdot v^2}{2} + m_s g \cdot \frac{h}{2} + \frac{m_s \cdot v^2}{2}$$

$$v = 3,47 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$c) m_k gh = m_s \cdot g \cdot h + \frac{m_k v^2}{2} + \frac{m_s \cdot v^2}{2}$$

$$v = 4,91 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

K2

Energie

$$E = \frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot v_1^2 + \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot v_2^2$$



3



Stoß

$$E = \frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot \dot{v}_1^2 + \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot \dot{v}_2^2$$

Energie

Vor dem Stoß

$$\frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot v_1^2 + \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot v_2^2$$

Nach dem Stoß

$$= \frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot v_3^2 + \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot v_3^2 + \Delta E$$



K1



K2

$$\begin{cases} m_1 v_1' = m_1 v_1 + m_2 v_2 - m_2 v_2' \end{cases}$$

$$\begin{cases} m_1 v_1^2 + m_2 v_2^2 - m_1 (v_1')^2 = m_2 (v_2')^2 \end{cases}$$

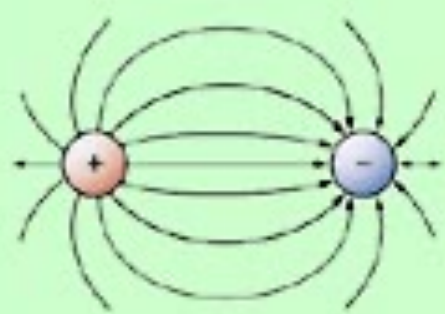
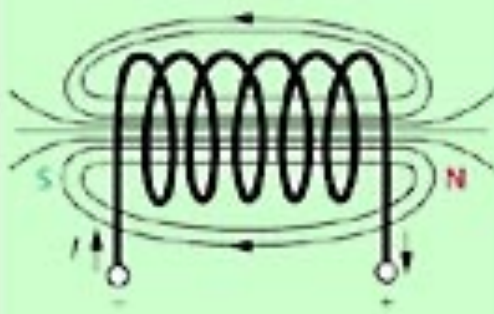
$$m_1 (v_1^2) - m_1 (v_1')^2 = m_2 (v_2')^2 - m_2 v_2^2$$

$$m_1 (v_1^2 - (v_1')^2) = m_2 ((v_2')^2 - v_2^2)$$

$$\begin{cases} m_1 (v_1 - v_1')(v_1 + v_1') = m_2 (v_2' - v_2)(v_2' + v_2) \\ m_1 v_1 - m_1 v_1' = m_2 v_2' - m_2 v_2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} m_1 (v_1 - v_1') = m_2 (v_2' - v_2) \end{cases}$$

$$\begin{cases} m_1 (v_1 - v_1')(v_1 + v_1') = m_2 (v_2' - v_2)(v_2' + v_2) \end{cases}$$

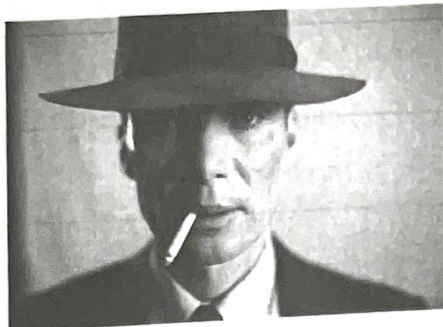
Gravitationsfeld	elektrisches Feld	magnetisches Feld
existiert um Körper mit einer Masse	existiert um elektrisch geladene Körper	existiert um Dauermagnete und um stromdurchflossene Leiter
kann mithilfe von Feldlinienbildern beschrieben werden	kann mithilfe von Feldlinienbildern beschrieben werden; Die Feldlinien beginnen und enden an Ladungen (wirbelfreies Quellenfeld).	kann mithilfe von Feldlinienbildern beschrieben werden; Die Feldlinien sind geschlossene Linien (quellenfreies Wirbelfeld).
		
wirkt auf alle Körper infolge ihrer Masse	wirkt auf geladene Körper und Teilchen (Elektronen, Protonen)	wirkt auf Magnete, magnetische Stoffe, stromdurchflossene Leiter und bewegte Ladungsträger
bewirkt bei Körpern in ihm keine nachweisbaren Veränderungen	bewirkt bei Körpern in ihm Ladungstrennung oder Ladungsverschiebung	bewirkt bei Körpern in ihm eine Magnetisierung

Arbeitsmaterial E 2

Nach dem Film

Wie war der Film?

Sie haben gerade den Spielfilm OPPENHEIMER gesehen. Wahrscheinlich überlegen Sie sofort, ob er Ihnen gefallen hat oder nicht. Das bedeutet: Sie haben eine Meinung zum Film, Sie bewerten ihn.



1) Sie können den Film jetzt mit Schulnoten bewerten:

Ich finde den Film

1 ☐ sehr gut2 ☒ gut3 ☐ befriedigend (mittelmäßig)4 ☐ ausreichend (eher nicht gut)5 ☐ mangelhaft (fast nur schlecht)6 ☐ ungenügend (richtig schlecht).

2) Unterstreichen Sie Begriffe oder finden Sie weitere, die den Film Ihrer Meinung nach beschreiben:

realistisch

abwechslungsreich

informativ

überraschend

bedrückend

unterhaltsam

kämpferisch

beängstigend

spannend

uninteressant

berührend

lehrreich

nichts für mich

gesellschaftsrelevant

motivierend

anstrengend

anregend

ernüchternd

nachdenklich

moralisch

wichtig (auch für andere)

3) Welche Filmszenen sind Ihnen am stärksten in Erinnerung geblieben und warum?

Arbeitsmaterial E 2

Nach dem Film

4) Sprechen Sie danach im Plenum über die Ergebnisse.

- Welche Noten haben Sie dem Film gegeben? Erstellen Sie eine Übersicht, welche Note es wie oft gibt.
- Welche Gründe können Sie für Ihre Noten nennen?
- Welche Begriffe haben Sie unterstrichen oder selbst genannt?
- Welche Gründe können Sie für Ihre Auswahl nennen? Benennen Sie in diesem Zusammenhang auch Inhalte des Films.
- Welche Inhalte der Mindmap (siehe Arbeitsmaterial D 1) finden sich im Film wieder?

5) Würden Sie den Film jemandem empfehlen oder nicht?

- Schreiben Sie einen Kommentar, den Sie auch auf einem Filmblog posten könnten (schauen Sie sich zur Orientierung die Beiträge unter www.jugend-filmjury.com an).
- Verwenden Sie hier auch Ihre Bewertungen und Ihre ausgewählten Begriffe (siehe oben).



Arbeitsmaterial E 4

Nach dem Film

Der Weg zur Atombombe – Vorbild für die Wissenschaft?

Film

Hier ist eine mögliche Lösung für die Aufgabenstellung:

Teil 1: Recherche zum Manhattan-Projekt**Entstehung und Ablauf der Arbeiten**

- Beginn: 1942 unter der Leitung der USA während des Zweiten Weltkriegs.
- Ziel: Entwicklung der ersten Atombombe, um einen strategischen Vorteil im Krieg zu erlangen.
- Finanziert durch die US-Regierung mit einem Budget von etwa 2 Milliarden Dollar.
- Wichtige Orte: Los Alamos (New Mexico), Oak Ridge (Tennessee), Hanford (Washington).
- Ergebnis: Erste erfolgreiche Atomtests im Juli 1945 ("Trinity-Test").

Wissenschaftliche Aspekte der Arbeiten

- Grundlagenforschung in Kernphysik und Uran-/Plutoniumspaltung.
- Entwicklung der Technologie für die Zündung einer Kernexplosion.
- Interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Physikern, Chemikern, Ingenieuren und Militärs.

Beteiligte Personen/Gruppen

- Leitung: General Leslie Groves (Militär) und Robert Oppenheimer (Wissenschaft).
- Wissenschaftler: Enrico Fermi, Richard Feynman, Edward Teller, Niels Bohr u. a.
- Rund 130.000 Personen waren direkt oder indirekt beteiligt.

Standorte des Projekts

- Los Alamos: Hauptforschungszentrum.
- Oak Ridge: Urananreicherung.
- Hanford: Produktion von Plutonium.
- Weitere Standorte in den USA für unterstützende Arbeiten.

Teil 2: Kurztext/Kurzpräsentation zum Manhattan-Projekt

Das Manhattan-Projekt war ein streng geheimes Forschungs- und Entwicklungsprojekt der USA während des Zweiten Weltkriegs. Es hatte das Ziel, die erste Atombombe zu entwickeln und basierte auf den neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen der Kernphysik. Unter der Leitung von General Leslie Groves und Robert Oppenheimer arbeiteten über 130.000 Menschen an verschiedenen Standorten zusammen, darunter Los Alamos, Oak Ridge und Hanford. Das Projekt führte 1945 zum ersten erfolgreichen Atomtest ("Trinity-Test") und der späteren Abwürfe auf Hiroshima und Nagasaki. Es gilt als eines der bedeutendsten, aber auch umstrittensten Forschungsvorhaben der Geschichte.

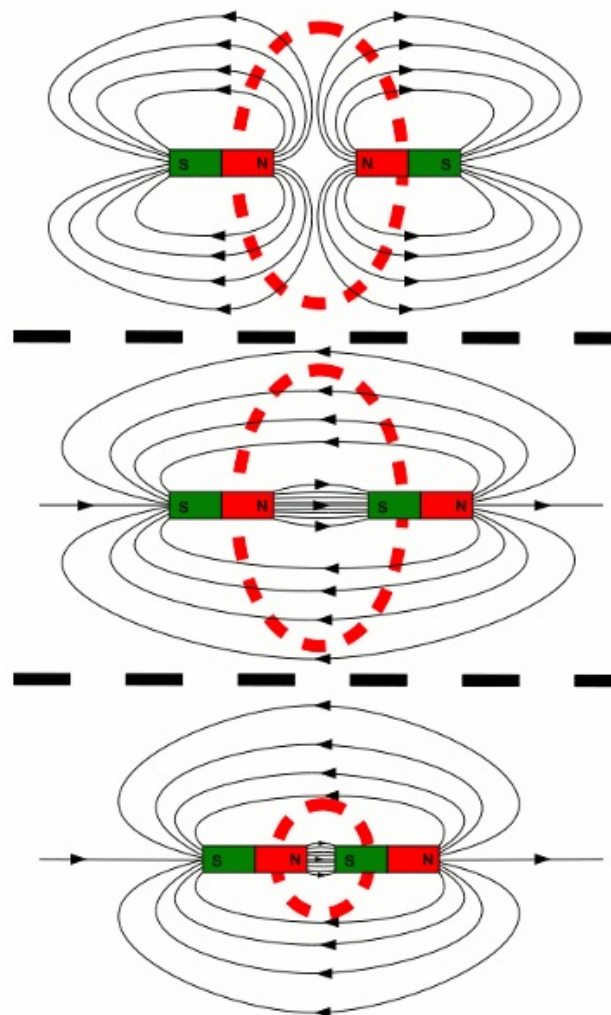
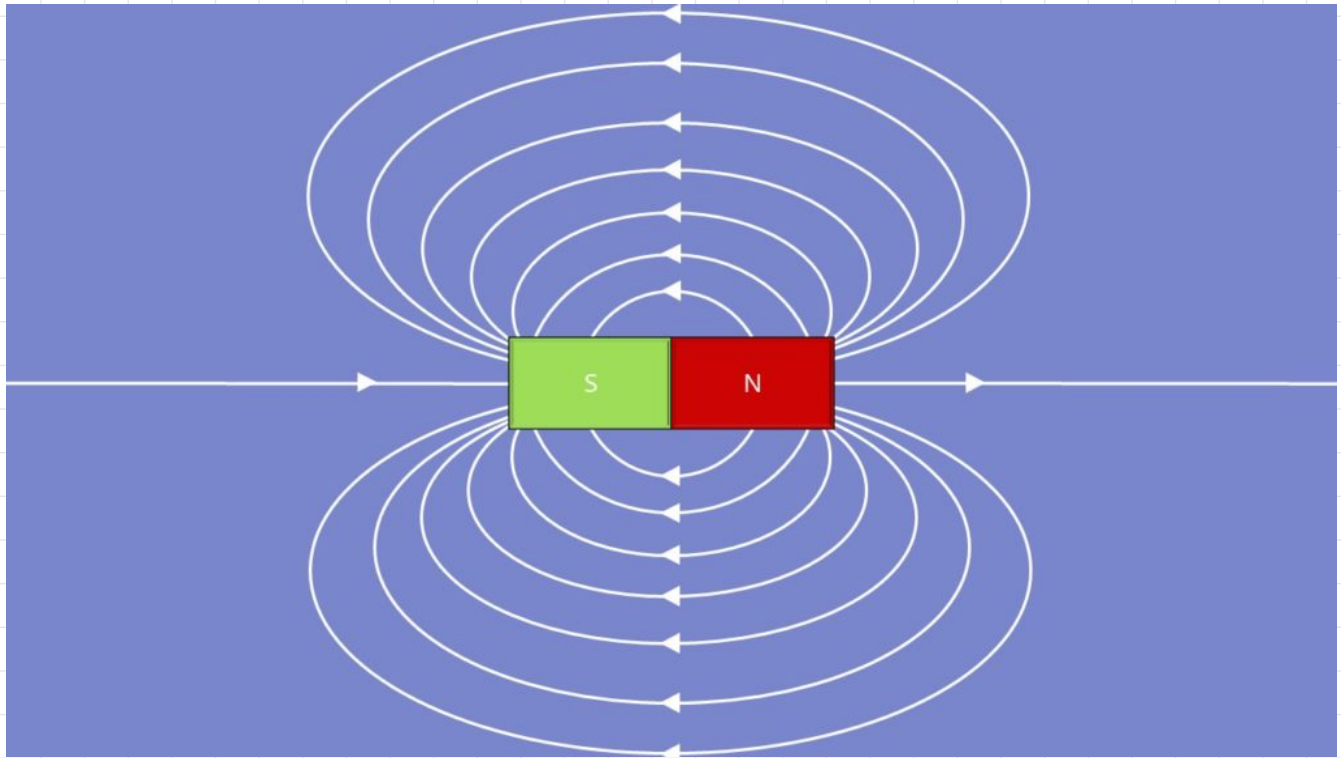
Diskussion (Fragen aus Teil 2)

1. War das Manhattan-Projekt wichtig und richtig oder übertrieben und falsch?
 - Pro: Es führte zur Beendigung des Zweiten Weltkriegs und stellte eine technologische Errungenschaft dar.
 - Contra: Die humanitären und ethischen Folgen, insbesondere die Zerstörung von Hiroshima und Nagasaki, wurden nicht ausreichend bedacht.
2. Wie könnte man das Projekt charakterisieren?
 - Ein ungewöhnliches interdisziplinäres Großprojekt in der Forschung.
 - Es war in seiner Zeit einzigartig und ein Vorreiter für internationale Zusammenarbeit in

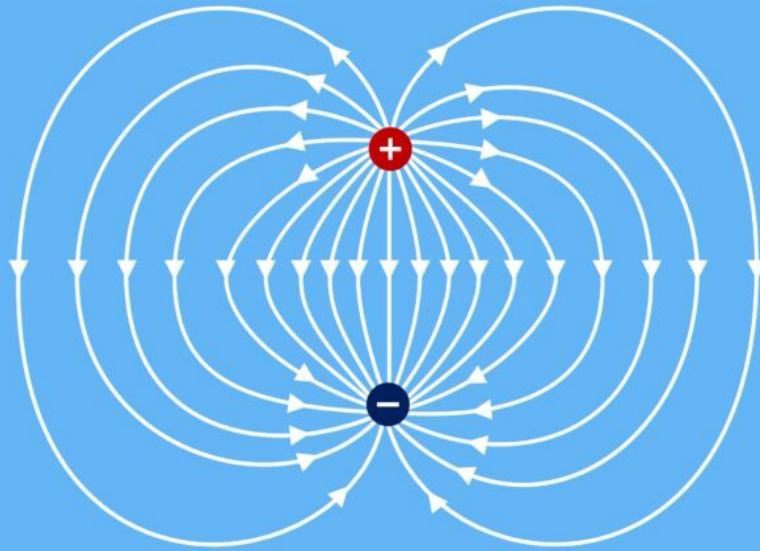
genauso intensiv bearbeitet werden:

Felder

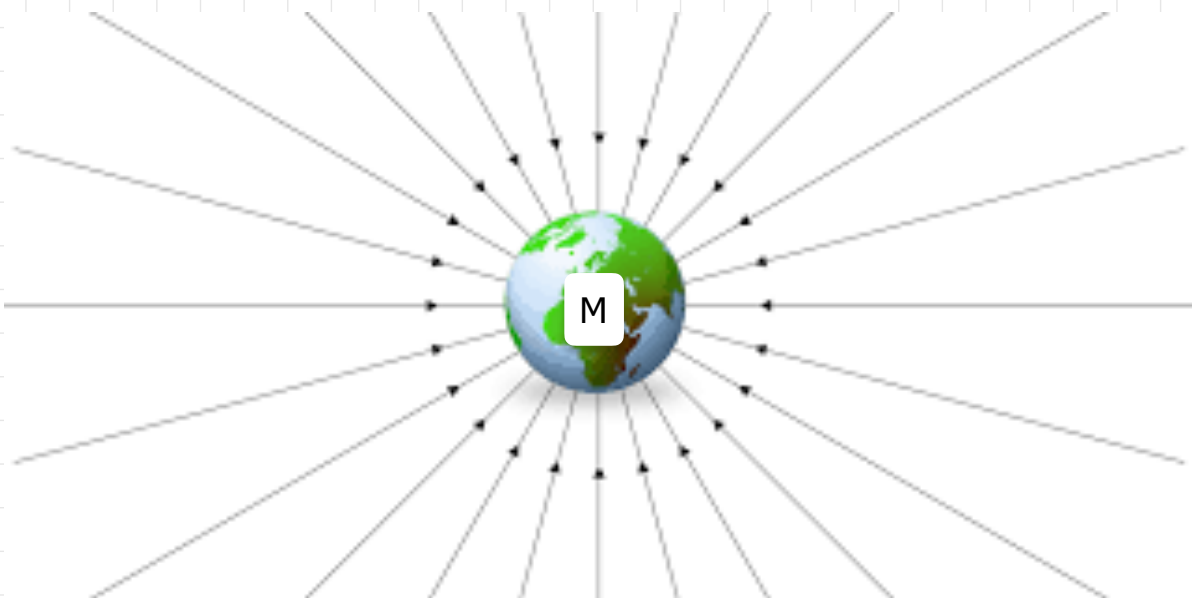
Zur Verdeutlichung der Eigenschaften eines Feldes, kann das Faradaysche Feldlinienbild genutzt werden.



Elektrische Feldlinien



Gravitationsfeld ($M = \text{Masse}$)



Aufgabe: Lest den Text und beschreibt in eigenen Worten nur mit Hilfe des Textes was Inklination und Deklination sind

Inklinationswinkel: Der Winkel zwischen einer zur Erdoberfläche parallelen Ebene und der Feldlinie

Deklination ist der Unterschied zwischen dem geographischen Nordpol und dem, den Kompass zeigt.

$$\frac{1}{2} m v^2 = m g h$$

$$h = \frac{v^2}{2g} = 0,165 \text{ m}$$

$$\eta = \frac{P_{\text{Zaus}}}{P}$$

$$P_{\text{Zaus}} = \frac{m g \sin \theta \cdot s}{P_{\text{Zaus}}} = 5,93$$

Das Faradaysche Feldlinienbild

Zur Visualisierung von Feldern, wird das Faradaysche Feldlinienbild genutzt. Zur Erstellung stellen wir uns vor, dass ein Feld mit einem Probekörper vermessen

Beim elektrischen Feld wird dafür eine positive Ladung genutzt. Die Feldliniendichte zeigt den Betrag der Feldstärke an. Die Tangente an die jeweilige Feldlinie zeigt die Richtung der Kraft auf eine positive Ladung an. Elektrische Feldlinien starten auf positiven und enden auf negativen Ladungen. Feldlinien scheiden sich nie, da es in jedem Punkt eine eindeutige Richtung braucht. Ein Feld von mehreren Ladungen wird durch Überlagerung ein Gesamtfeld ergeben. Die Feldlinien stehen immer senkrecht auf elektrischen Leitern.

Die elektrische Feldstärke

Ein elektrisches Feld ist durch die Feldstärke E gekennzeichnet. Die Richtung von E ist die Richtung der Kraft auf eine positive Ladung.

$$E = N / C \text{ (Coulomb)} = V / m$$

$$E = F/q \text{ (elektrische Kraft / Ladung)}$$

$$F_C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} = k \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$$

$$\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \frac{A \cdot s}{V \cdot m}$$

Elektrische Felder

Aufgabe 1

Ein elektrisches Feld ist der Raum um eine elektrische Ladung, in dem eine elektrische Kraft auf andere geladene Objekte wirkt. Die Richtung des Feldes wird durch die Bewegung einer elektrischen Testladung bestimmt.

Die Feldlinien eines elektrischen Feldes verlaufen von positiven zu negativen Ladungen und geben die Richtung der Feldstärke an.

Die Stärke des elektrischen Feldes E wird definiert als die Kraft pro Einheit Ladung und hat die Einheit N/C. Mathematisch wird sie durch die Formel

$$E = \frac{F}{q}$$

beschrieben, wobei F die Kraft ist, die auf die Ladung q wirkt.

Ein wichtiges Gesetz zur Beschreibung elektrischer Felder ist das Coulombsche Gesetz. Es besagt, dass die elektrische Feldstärke um eine Punktladung Q proportional zu $\frac{1}{r^2}$ abnimmt, wobei r den Abstand von der Ladung angibt.

Aufgabe 2

Berechne die Ladung der Erde unter der Annahme, dass ihr elektrisches Feld in der Nähe der Erdoberfläche einer Feldstärke von $E = 150 \text{ V/m}$ entspricht. Verwende für die Berechnung die Beziehung zur Feldstärke einer kugelförmigen Ladung.

Aufgabe 3

Zwei Punktladungen $Q_1 = 3 \times 10^{-6} \text{ C}$ und $Q_2 = -2 \times 10^{-6} \text{ C}$ befinden sich im Abstand $r = 0.05 \text{ m}$. Berechne die zwischen ihnen wirkende Coulomb-Kraft.

Der allgemeine Feldbegriff

In der Physik tritt der Begriff **FELD** in verschiedenen Zusammenhängen auf. Ein Feld ist im allgemeinen eine physikalische Größe Z , die nicht nur an einem einzigen Ort ('Punkt' im Raum), sondern im *gesamten* Raum wirksam und damit *messbar* ist. Mathematisch kann ein Feld daher wie folgt beschrieben werden:

$$Z = Z(x, y, z; t)$$

Die untenstehende Tabelle zeigt, dass Felder eingeteilt werden können je nach ihrer Unabhängigkeit bzw. Abhängigkeit von bestimmten Größen:

- **Richtung**

Richtungsunabhängige Felder sind *skalare* (z.B. Temperaturfelder) und *richtungsabhängige* Felder sind Vektorfelder.

- **Ort**

Im allgemeinen Fall sind Felder *abhängig vom Ort* (*inhomogen*). Nur in Sonderfällen sind sie *unabhängig vom Ort* (*homogen*), z.B. das elektrische Feld zwischen den Platten eines Plattenkondensators oder das magnetische Feld im Innenraum einer langgestreckten Spule.

- **Zeit**

Zeitunabhängige Felder werden *stationär* (z.B. das Magnetfeld eines ungestörten Dauermagneten) und *zeitabhängige* Felder werden *instationär* genannt. {Die exakte STATIONARITÄT ist eine weitgehende Idealisierung}

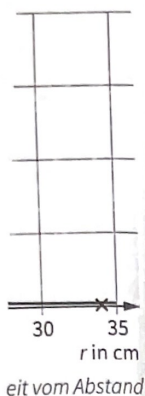
Einteilung der Felder

ABHÄNGIGKEITEN	unabhängig		abhängig
Richtung	skalar * Temperaturfeld T	FELD $Z = Z(x, y, z; t)$	vektoriell (vektoriell) * Gravitationsfeld * Impulsfeld der Moleküle in einer Flüssigkeit * elektrisches Feld * magnetisches Feld
Ort	homogen * E- Feld (Plattenkondensator) * Magnetfeld in langer Spule		inhomogen
Zeit	stationär * ungestörtes Dauermagnetfeld		instationär

Superpositionsprinzip

Die resultierende elektrische Kraft auf eine Probeladung q ist die Summe der elektrischen Kräfte aller im Raum verteilten punkt- und kugelformigen Ladungen. Die Kräfte werden dabei vektoriell addiert $F_{\text{ges}} = F_1 + F_2 + \dots + F_n$

Entsprechend ist die elektrische Feldstärke $E_{\text{ges}} = E_1 + E_2 + \dots + E_n$



$\text{C}^2 \text{N}^{-1} \text{m}^{-2}$, die
met wird.

der Betrag
nde, die größer
geben durch:

(2)

$Q < 0 \text{ C}$ in Rich-
 $> 0 \text{ C}$ radial vom

ei punkt- oder
mit dem Ab-

eine Konstante
erbindungslinie
gesetz wird als

Ladungen. In den
etallische, geladene
htet, die sehr klein
abstand r . Das cou-
und R_2 ab und somit
ce in der Umgebung
Ladungsträger, wie
guter Näherung als

Superposition von Coulombfeldern. Bislang wurden sehr einfache Ladungsverteilungen betrachtet, also eine Probeladung q im Feld einer anderen Ladung Q . Oft sind es mehrere im Raum verteilte Ladungen oder aber eine Vielzahl von Ladungen, die sich auf Leiteroberflächen, z.B. Metallplatten oder -zylindern, verteilen.

Bild B3 zeigt den Fall, dass eine positive und eine negative punkt- oder kugelförmige Ladung von gleichem Betrag Q auf eine Probeladung q Kräfte ausüben. Die resultierende Gesamtkraft $\vec{F}$ setzt sich aus den einzelnen Coulombkräften $\vec{F}_1$ und $\vec{F}_2$ zusammen. $\vec{F}_1$ und $\vec{F}_2$ werden dazu wie in der Mechanik vektoriell addiert: $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$.

Entsprechend ergibt sich die elektrische Feldstärke $\vec{E}$ am Ort der Probeladung q als vektorielle Addition der elektrischen Feldstärken der Coulombfelder beider Ladungen: $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$.

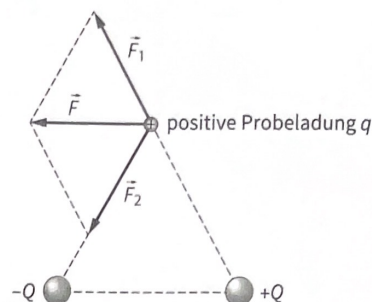
In der Physik bezeichnet man diese unabhängige Überlagerung von einzelnen Kräften oder Feldstärken zu einer resultierenden Kraft bzw. Feldstärke als **Superposition**. Sie findet sich in vielen Gebieten der Physik, so auch in der Mechanik beim waagerechten Wurf ohne Reibung als Überlagerung von zwei Bewegungen oder bei der Überlagerung von Wellen wieder.

Arbeitsaufträge

- ➔ a) Zwei gleiche Kügelchen (0,5 g) sind jeweils an einem 1,0 m langen, oben am selben Punkt befestigten Faden aufgehängt und tragen die gleiche Ladung. Ihre Mitten haben wegen der Abstoßung 20 cm Abstand. Berechnen Sie die Ladungen.
b) Das rechte Kügelchen trägt doppelt so viel Ladung wie das linke. Erfahren beide Kugeln die gleiche Auslenkung? Begründen Sie. Bestimmen Sie die Ladungen für den Mittenabstand 20 cm.

- ➔ Die Erde hat ein elektrisches Feld mit einem Betrag von $E \approx 130 \frac{\text{V}}{\text{m}}$. Schätzen Sie ab, ob nahe dem Erdboden eine kleine, geladene Kunststoffkugel (Ladung $1,5 \cdot 10^{-9} \text{ C}$, Masse 4 g) schweben kann.

- ➔ Das coulombsche Gesetz ähnelt dem newtonschen Gravitationsgesetz. Vergleichen Sie mit Hilfe einer Recherche die strukturellen Ähnlichkeiten und Unterschiede der beiden Gesetze.



B3 Vektorielle Addition von zwei elektrischen Kräften auf eine positive Probeladung q

Die Betrachtung von Coulombkräften und Feldstärken mit zwei Ladungen wie in Bild B3 lässt sich auf mehrere punkt- oder kugelförmige Ladungen erweitern und resultierende Kräfte und elektrische Felder berechnen.

Merksatz

Superpositionsprinzip: Die resultierende elektrische Kraft auf eine Probeladung q ist die Summe der elektrischen Kräfte aller im Raum verteilten punkt- oder kugelförmigen Ladungen. Die Kräfte werden dabei vektoriell addiert $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots$. Entsprechend ist das elektrische Feld der Ladungsverteilung die Summe der elektrischen Feldvektoren $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots$.

- ➔ Berechnen Sie die Kraft auf eine Probeladung q in der Mitte eines Quadrates der Kantenlänge a , an dessen Eckpunkten sich die ortsfesten Ladungen $-q$, $-2q$, $-3q$ und $-4q$ befinden. In welche Richtung bewegt sich die anfangs ruhende Ladung q ?

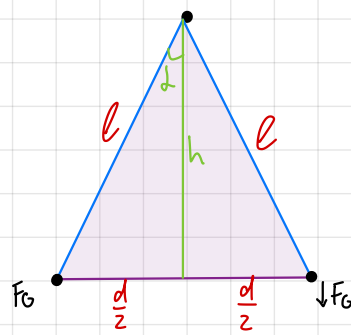
- ➔ **CHARLES COULOMB** untersuchte die elektrischen Kräfte zwischen geladenen Körpern mit einer Torsionswaage. Recherchieren und beschreiben Sie deren Aufbau und Funktionsweise.

- ➔ Die Kraft zwischen zwei geladenen Kugeln ($q_1 = 10 \text{ nC}$, $q_2 = 200 \text{ nC}$) wurde für verschiedene Abstände r der Kugelmitten bestimmt. Bestimmen Sie aus den Messwerten die Konstante k im coulombschen Gesetz. Berechnen Sie dazu eine Hilfsgröße x , sodass der Graph $F(x)$ annähernd linear ist.

r in cm	8	12	16	20	24	28
F in mN	2,81	1,25	0,70	0,45	0,31	0,23

① $m = 5 \cdot 10^{-4} \text{ kg}$ $d = 0,2 \text{ m}$
 $l = 1 \text{ m}$ $q_j = ?$

$$\frac{F_{el}}{F_G} = \frac{\frac{d}{2}}{h} = \tan \alpha$$



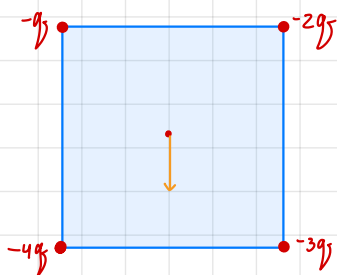
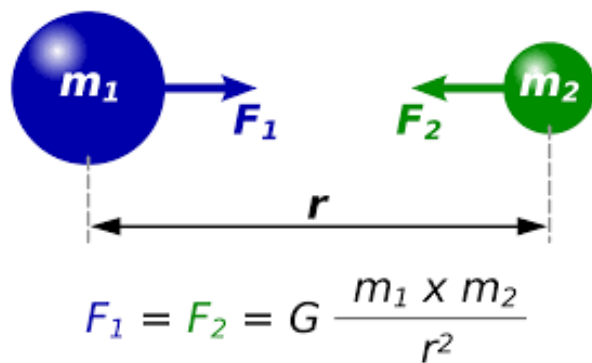
$$\frac{\frac{q_j^2}{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot z^2}}{mg} = \frac{d}{2h} = \frac{d}{2\sqrt{l^2 - \frac{d^2}{4}}}$$

$$\frac{q_j^2}{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot d^2 \cdot mg} = \frac{d}{2\sqrt{l^2 - \frac{d^2}{4}}}$$

$q_1 = 3,3 \cdot 10^{-8} \text{ C}$
 $q_2 = 6,6 \cdot 10^{-8} \text{ C}$

$$q_j = 4,68 \cdot 10^{-8} \text{ C} = 46,8 \text{ nC}$$

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$$



$$F = (-q - 2q) - (-3q - 4q) = -3q + 7q = 4q \quad (\downarrow)$$

$$2\sqrt{2} k \frac{q^2}{a^2}$$



$$\tan(\alpha) = \sin(\alpha) = \frac{\Delta x}{l} = \frac{F_{el}}{F_G}$$

Elektrische Influenz beschreibt die Verschiebung frei beweglicher Ladungen in einem Leiter, wenn ein äußeres elektrisches Feld angelegt wird. Dadurch sammeln sich entgegengesetzte Ladungen an den Enden des Materials, während es insgesamt neutral bleibt.

Polarisation tritt in Isolatoren auf, wo gebundene Ladungen im Material (z. B. Elektronen in Molekülen) leicht verschoben oder ausgerichtet werden, sodass das Material lokal getrennte Ladungsbereiche aufweist, ohne dass Ladungen abfließen.

Unterschied: Influenz betrifft freie Ladungen in Leitern, während Polarisation die Ausrichtung gebundener Ladungen in Isolatoren beschreibt.

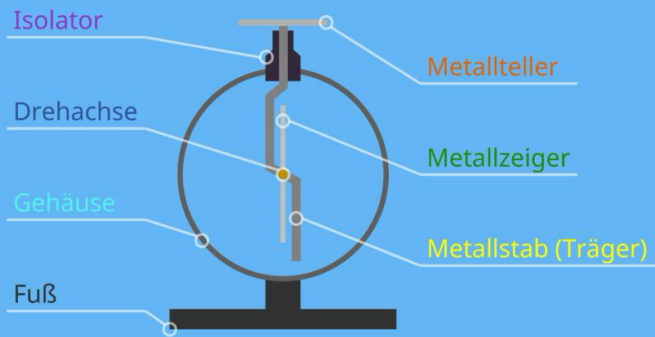
Influenz: Wird ein elektrisch geladener Körper an einen neutralen Leiter gebracht, so werden im Leiter die gleichnamigen Ladungen abstoßen und die ungleichnamigen angezogen.

+ < --- > +
+ --> < -- -

Polarisation: Wird ein elektrisch geladenen Körper an einen Isolator gebracht, so bilden sich Dipole, die sich dann gemäß des äußeren Feldes.

- - - + + -
- - - + - + ==> + + -
- - - - + - + - -
- - + - + -

Elektroskop Aufbau



Bringen wir einen geladenen Stab auf ein Elektroskop, so wird die Nadel sich bewegen. Dies liegt daran, dass zunächst die Ladungen getrennt werden und dann Ladungen zum Ausgleich des Überschusses auf dem Stab umverteilt werden.

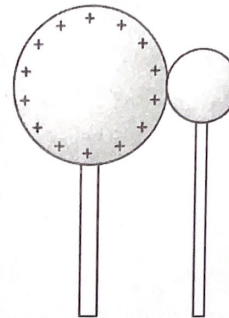
Elektrizität

Influenz

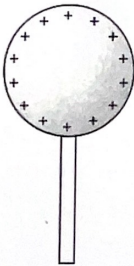
Trage die Ladungsverteilung durch Hinzufügen, Streichen oder Verschieben der Ladungsvorzeichen ein.



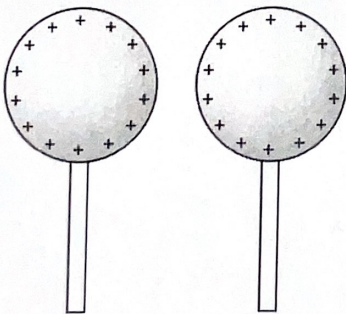
••• 1 Ohne Berührung, rechte Kugel neutral



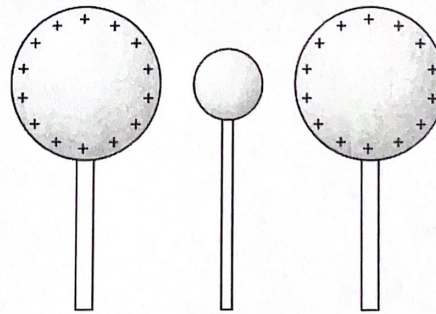
••• 2 Mit Berührung, rechte Kugel zunächst neutral



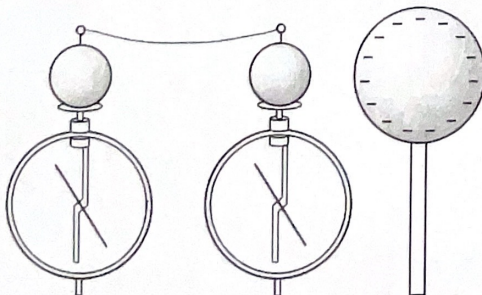
••• 3 Die rechten Kugeln sind neutral und berühren sich



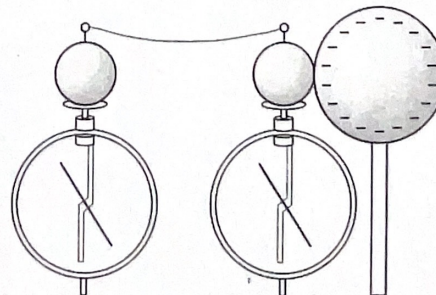
••• 4 Beide Kugeln sind positiv geladen.



••• 5 Die mittlere Kugel ist neutral und berührt nicht.



••• 6 Ohne Berührung



••• 7 Mit Berührung

herangebracht. So bleibt er an ihm „kleben“. Nach einer Weile fällt er wieder ab. Begründe mit der Erhaltung der Ladungen und beschreibe.**

- Beim Reiben des Luftballons am Wollpullover werden Elektronen vom Pullover auf den Luftballon übertragen (oder umgekehrt, je nach Material). Der Luftballon wird dadurch **negativ geladen**, während der Pullover positiv geladen bleibt.
- Wenn der Ballon an den Pullover herangeführt wird, ziehen sich die entgegengesetzten Ladungen an, und der Ballon „klebt“ am Pullover.
- Mit der Zeit verliert der Ballon seine Ladung, da Ladungen durch die Luft oder andere Oberflächen langsam abfließen. Sobald der Ladungsausgleich erfolgt ist, gibt es keine Anziehung mehr, und der Ballon fällt ab.

Aufgabe b:

Der Luftballon wird nochmals am Pullover gerieben. Anschließend wird zunächst der Ballon und dann der Pullover an ein Elektroskop gehalten. Beschreibe, was das Elektroskop anzeigt.

- Nach dem Reiben am Pullover ist der Luftballon wieder negativ geladen, und der Pullover ist positiv geladen.
- **Wenn der Ballon an das Elektroskop gehalten wird:** Die negativen Ladungen des Ballons stoßen die Elektronen im Elektroskop ab. Dadurch bewegen sich die Elektronen im Elektroskop nach unten, und die Blättchen des Elektroskops stoßen sich ab (sie laden sich negativ auf).
- **Wenn der Pullover an das Elektroskop gehalten wird:** Die positiven Ladungen des Pullovers ziehen die Elektronen im Elektroskop nach oben. Die Blättchen des Elektroskops werden positiv und stoßen sich ebenfalls ab.

Aufgabe c:

Nach dem Reiben am Pullover bleibt der Luftballon an einer tapezierten Zimmerwand eine Zeit lang hängen. Erkläre und ergänze in der Zeichnung die Verteilung der Ladungen.

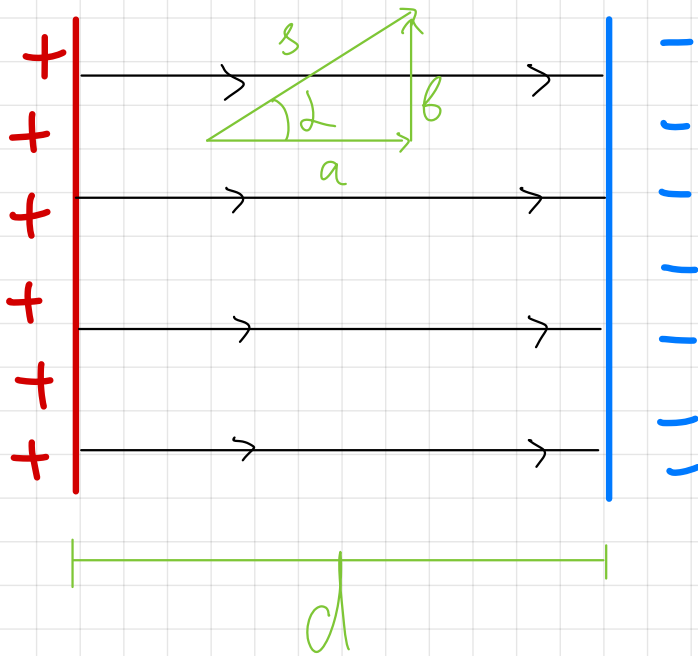
- Der Luftballon ist nach dem Reiben negativ geladen.
- Wenn er an die Wand herangeführt wird, stoßen die negativen Ladungen des Ballons die Elektronen in der Wand zurück (Abstoßung), sodass die Oberfläche der Wand in der Nähe des Ballons **positiv geladen** wird.
- Die entgegengesetzten Ladungen (negative Ladung des Ballons und positive Ladung der Wand) ziehen sich an, und der Ballon bleibt haften.
- Mit der Zeit gleichen sich die Ladungen jedoch aus, wodurch der Ballon von der Wand abfällt.

Ergänzung der Zeichnung:

- Auf der linken Seite (Ballon vor der Wand): Der Ballon ist negativ geladen (-), die Wand hat keine sichtbare Ladung (neutral).
- Auf der rechten Seite (Ballon an der Wand): Der Ballon bleibt negativ geladen (-), und die Wand zeigt in der Nähe des Ballons eine positive Ladung (+).

$$W = F \cdot s$$

18.02.25



$$F_{el} = q \cdot E$$

$$W_{el} = q \cdot E \cdot d = q \cdot \vec{E} \cdot \vec{d}$$

$$W_{el} = q \cdot |\vec{E}| \cdot a = q \cdot |\vec{E}| \cdot s \cdot \cos \alpha$$

Jeder Punkt in einem elektrischen Feld lässt sich dadurch charakterisieren, wie viel Arbeit benötigt wird, um eine Probeladung q von einem Start-/Bezugspunkt B/P_0 zu diesem Punkt P_i zu bewegen. $W_{\{0 \rightarrow i\}}$

Um daraus eine sinnvolle Größe zur Beschreibung des elektrischen Feldes zu erhalten, die unabhängig von der Probeladung ist, wird diese Energie durch die Ladung geteilt. In einem homogenen Feld ergibt sich dann C mit q der Ladung, E der elektrischen Feldstärke und dem Abstand d einer kollinearen Bewegung.

$$W_{el} = q \cdot E \cdot d$$
$$\Delta \varphi = \frac{\Delta W_{el}}{q} = \frac{q E d}{q} = E \cdot d = U \quad [V = \frac{J}{C}]$$

Der Bezugspunkt P_0 des Potentials kann frei gewählt werden. Dementsprechend ist das Potential davon abhängig, wo dieser Ursprung hingelegt wird. Das Potential im Ursprung ist immer 0V. Egal wo der Ursprung hingelegt wird, ist die Differenz zwischen zwei Potentialen (=Spannungen) immer gleich.

Im homogenen Feld zwischen zwei Platten haben alle Punkte mit dem gleichen Abstand d das gleiche Potential. Diese Linien (2D) oder Flächen (3D) werden Äquipotentiallinien bzw. Äquipotentialflächen genannt.

Zwischen zwei Kondensatorplatten mit $d = 2,0 \text{ cm}$ Abstand liegt die Spannung $U = 1,0 \text{ kV}$. In das Feld zwischen den Platten wird eine Probeladung $q = 10 \text{ nC}$ gebracht.

a) Die Feldstärke beträgt

$$E = \frac{U}{d} = \frac{1,0 \cdot 10^3 \text{ V}}{2,0 \cdot 10^{-2} \text{ m}} = 5,0 \cdot 10^4 \frac{\text{V}}{\text{m}}.$$

b) Die Kraft auf die Probeladung ist

$$F = qE = 10 \cdot 10^{-9} \text{ C} \cdot 5,0 \cdot 10^4 \frac{\text{N}}{\text{C}} = 5,0 \cdot 10^{-4} \text{ N}.$$

c) Um die Probeladung von der negativen zur positiven Platte zu transportieren, muss folgende Verschiebungsarbeit verrichtet werden:

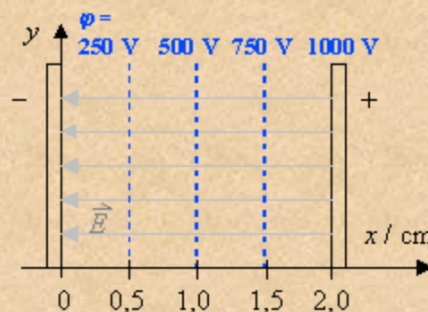
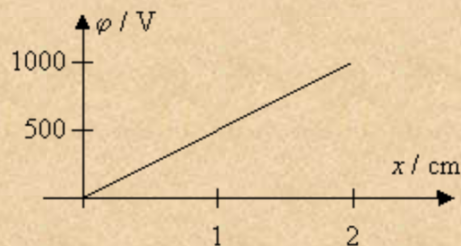
$$W = qEd = qU = 10 \cdot 10^{-9} \text{ C} \cdot 1,0 \cdot 10^3 \text{ V} = 1,0 \cdot 10^{-5} \frac{\text{C} \cdot \text{J}}{\text{C}} = 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ J}$$

Dies ist auch gleich der potentiellen Energie der Probeladung in einem Feldpunkt mit $x = d$.

d) Der Verlauf des Potentials und die Lage der Äquipotentialflächen soll dargestellt werden. Dazu wird angenommen, dass sich die positive Platte rechts bei $x = d$ und die negative Platte links bei $x = 0$ befindet.

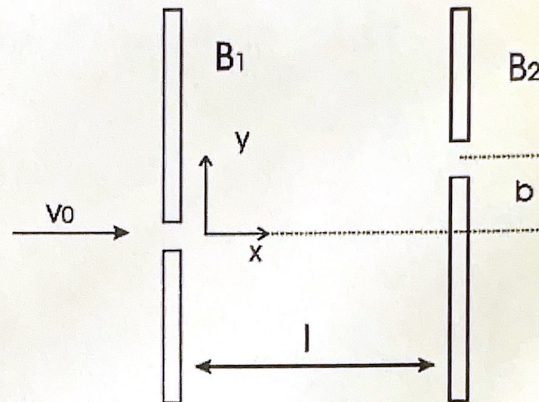
Der Nullpunkt des Potentials wird wieder auf die negative Platte gelegt, so dass gilt

$$\varphi = Ex = \frac{U}{d} \cdot x = U \cdot \frac{x}{d} = 1000 \text{ V} \cdot \frac{x}{2 \text{ cm}} = 500 \frac{\text{V}}{\text{cm}} \cdot x.$$



Ionen zwischen Blenden (a)

Zweifach positiv geladene Ionen mit einer Masse von $m = 1,5 \times 10^{-26} \text{ kg}$ bewegen sich mit einer Geschwindigkeit von $v_0 = 1,64 \times 10^5 \text{ m/s}$ durch eine Blende B1. Nach einer Strecke von $l = 50,0 \text{ mm}$ erreichen sie die Blende B2, die um $b = 12,0 \text{ mm}$ in y-Richtung versetzt ist. Zwischen den Blenden herrscht ein homogenes elektrisches Feld in y-Richtung.



Welche Spannung ist notwendig, um die Ionen auf die Geschwindigkeit v_0 zu beschleunigen?

Theorie zur Bewegung geladener Teilchen durch ein elektrisches Feld

1. Energieerhaltung in elektrischen Feldern

Ein geladenes Teilchen mit der Ladung q erfährt eine **elektrische Beschleunigung**, wenn es durch eine Spannung U bewegt wird. Die Energie, die es dabei aufnimmt, entspricht der elektrischen Energie: $E_{el} = qU$

Diese elektrische Energie wird vollständig in **kinetische Energie** umgewandelt: $E_{kin} = \frac{1}{2}mv_0^2$

Da keine weiteren Kräfte wirken, gilt das **Energieerhaltungsprinzip**: $qU = \frac{1}{2}mv_0^2$

Das auch bedeutet, dass die notwendige Spannung U direkt von der Masse m , der gewünschten Geschwindigkeit v_0 und der Ladung q des Teilchens abhängt.

2. Zusammenhang zwischen elektrischer Kraft und Feld

Ein elektrisches Feld E übt auf eine Ladung q eine Kraft F aus: $F = qE$

Diese Kraft bewirkt eine Beschleunigung a gemäß dem **zweiten Newtonschen Gesetz**: $F = ma$

Setzt man die elektrische Kraft ein, erhält man die Beschleunigung des Ions: $qE = ma$

Dies zeigt, dass das elektrische Feld eine direkte Kraft auf das Ion ausübt, wodurch es beschleunigt wird.

a) Lösung:

Gegebene Werte:

- Masse des Ions: $m = 1,5 \times 10^{-26} \text{ kg}$
- Anfangsgeschwindigkeit des Ions nach der Beschleunigung: $v_0 = 1,64 \times 10^5 \text{ m/s}$
- Ladung des Ions (zweifach positiv geladen): $q = 2e = 2 \times 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$
- Strecke zwischen den Blenden: $l = 50,0 \text{ mm} = 5 \times 10^{-2} \text{ m}$
- Ablenkung in y-Richtung: $b = 12,0 \text{ mm} = 1,2 \times 10^{-2} \text{ m}$

Ansatz:

Die kinetische Energie eines Ions nach der Beschleunigung ist: $E_{kin} = \frac{1}{2}mv_0^2$

Die elektrische Energie, die zur Beschleunigung benötigt wird, ist: $E_{el} = qU$

Da die gesamte elektrische Energie in kinetische Energie umgewandelt wird: $qU = \frac{1}{2}mv_0^2$

Lösen nach U : $U = (\frac{1}{2}mv_0^2)/q$

Einsetzen der Werte:

$$U = \frac{\frac{1}{2} \cdot (1,5 \times 10^{-26} \text{ kg}) \cdot (1,64 \times 10^5 \text{ m/s})^2}{2 \cdot (1,602 \times 10^{-19} \text{ C})}$$

$$U = \frac{\frac{1}{2} \cdot (1,5 \times 10^{-26}) \cdot (2,6896 \times 10^{10})}{3,204 \times 10^{-19}}$$

$$U = \frac{2,0172 \times 10^{-16}}{3,204 \times 10^{-19}}$$

$$U \approx 630 \text{ V}$$

Ergebnis:

Die benötigte Spannung beträgt $U = 630 \text{ V}$.

Eine große Metallkugel (a)

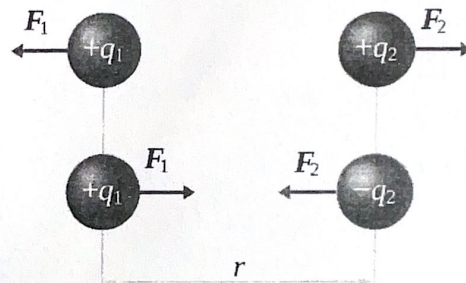
Eine große Metallkugel ($r_1 = 12 \text{ cm}$) ist elektrisch positiv aufgeladen und starr befestigt. Eine weitere positiv geladene Kugel ($m = 2 \text{ g}$ und $r_2 = 2 \text{ cm}$) hängt an einem isolierenden Seidenfaden. Sie wird mit der großen Kugel in Kontakt gebracht und wird durch die elektrostatische Wechselwirkung ausgelenkt. Nach Einstellung des Kräftegleichgewichts liegen die Kugelmittelpunkte auf einer Horizontalen. Gemessen werden die Winkelweite $\alpha = 8,0^\circ$ und der Abstand der Kugelmittelpunkte $r = 16,6 \text{ cm}$.

Berechne den Betrag der Abstoßungskraft, die erforderlich ist, um die Kugel in der Gleichgewichtslage zu halten. Betrachte dabei die Kugeln als Punktladungen. Konstruiere dazu ein Kräftedreieck.

Theorie zur Coulomb-Kraft

Die Coulomb-Kraft beschreibt die elektrostatische Wechselwirkung zwischen zwei geladenen Körpern. Diese Kraft kann anziehend oder abstoßend sein, abhängig von den Vorzeichen der Ladungen:

- **Gleichnamige Ladungen** ($+q$ und $+q$ oder $-q$ und $-q$) stoßen sich ab.
- **Ungleichnamige Ladungen** ($+q$ und $-q$) ziehen sich an.



Diese Wechselwirkung wird durch das **Coulomb-Gesetz** beschrieben:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}, \quad (1)$$

wobei:

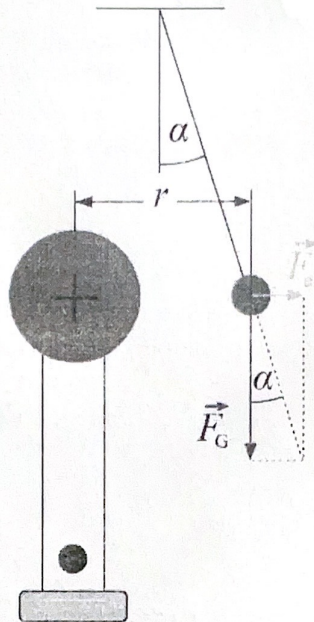
- F die Kraft in Newton (N) ist,
- ϵ_0 die elektrische Feldkonstante ist,
- q_1 und q_2 die Beträge der elektrischen Ladungen in Coulomb (C) sind,
- r der Abstand der Ladungen in Metern (m) ist.

Wichtige Eigenschaften der Coulomb-Kraft:

- **Abstandsabhängigkeit:**
Die Kraft nimmt mit dem Quadrat des Abstands ab. Das bedeutet, wenn der Abstand verdoppelt wird, nimmt die Kraft um den Faktor 4 ab.
- **Direkte Proportionalität zur Ladung:**
Je größer die Ladungen, desto stärker die Kraft.
- **Vektorieller Charakter:**
Die Coulomb-Kraft ist eine gerichtete Kraft, sie wirkt entlang der Verbindungslinie zwischen den beiden Ladungen.

Lösung für „Eine große Metallkugel“ (a):

Graphische Darstellung:



Berechnung der Abstoßungskraft F_{el} :

$$\tan(\alpha) = \frac{F_{el}}{F_G} \Leftrightarrow F_{el} = F_G \cdot \tan(\alpha) = m \cdot g \cdot \tan(\alpha)$$

Einsetzen der gegebenen Werte liefert

$$F_{el} = 2,0 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{N}}{\text{kg}} \cdot \tan(8,0^\circ) = 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ N}$$

Ergebnis:

Die **elektrostatische Abstoßungskraft** beträgt $2,8 \times 10^{-3} \text{ N}$

Coulomb-Kraft 1

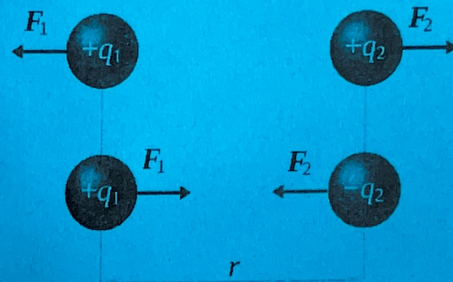
a)

Zwei kleine Kugeln sind 50 cm voneinander entfernt. Der Durchmesser der Kugeln kann gegenüber ihrer Entfernung vernachlässigt werden. Die eine Kugel trägt die Ladung $1,0 \times 10^{-7}$ C, die andere Kugel trägt die Ladung $5,0 \times 10^{-6}$ C. Berechnen Sie den Betrag der Kraft, welche die Kugeln ausüben.

Theorie zur Coulomb-Kraft

Die Coulomb-Kraft beschreibt die elektrostatische Wechselwirkung zwischen zwei geladenen Körpern. Diese Kraft kann anziehend oder abstoßend sein, abhängig von den Vorzeichen der Ladungen:

- **Gleichnamige Ladungen** (+q und +q oder -q und -q) stoßen sich ab.
- **Ungleichnamige Ladungen** (+q und -q) ziehen sich an.



Diese Wechselwirkung wird durch das **Coulomb-Gesetz** beschrieben:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}, \quad (1)$$

wobei:

- F die Kraft in Newton (N) ist,
- $\epsilon_0 \approx 8,854 \times 10^{-12} \text{ A} \times \text{s} / \text{V} \times \text{m}$ die elektrische Feldkonstante ist,
- q_1 und q_2 die Beträge der elektrischen Ladungen in Coulomb (C) sind,
- r der Abstand der Ladungen in Metern (m) ist.

Wichtige Eigenschaften der Coulomb-Kraft:

- **Abstandsabhängigkeit:**
Die Kraft nimmt mit dem Quadrat des Abstands ab. Das bedeutet, wenn der Abstand verdoppelt wird, nimmt die Kraft um den Faktor 4 ab.
- **Direkte Proportionalität zur Ladung:**
Je größer die Ladungen, desto stärker die Kraft.
- **Vektorieller Charakter:**
Die Coulomb-Kraft ist eine gerichtete Kraft, sie wirkt entlang der Verbindungsline zwischen den beiden Ladungen.

Hinweis:

In der gegebenen Aufgabe haben wir zwei positiv geladene Kugeln. Da beide Ladungen positiv sind, wirkt zwischen ihnen eine **abstoßende Kraft**. Mit der Formel (1) kann man berechnen, wie groß die Kraft ist.

a) Lösung:

Gegebene Werte:

- Ladung der ersten Kugel: $q_1 = 1,0 \times 10^{-7} \text{ C}$
- Ladung der zweiten Kugel: $q_2 = 5,0 \times 10^{-6} \text{ C}$
- Abstand zwischen den Kugeln: $r = 50 \text{ cm} = 0,5 \text{ m}$
- Elektrische Feldkonstante $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ A} \times \text{s} / \text{V} \times \text{m}$

Coulomb-Gesetz:

Die Kraft zwischen zwei Punktladungen wird mit der Formel (1) berechnet:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2},$$

Berechnung des Vorfaktors:

$$\begin{aligned} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} &= \frac{1}{4\pi \times (8,854 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \text{N}^{-1} \text{m}^{-2})} \\ &= \frac{1}{1,11265 \times 10^{-10} \text{ C}^2 \text{N}^{-1} \text{m}^{-2}} \\ &\approx 8,99 \times 10^9 \text{ Nm}^2 \text{C}^{-2} \end{aligned}$$

Einsetzen der Werte mit Einheiten:

$$\begin{aligned} F &= \left(8,99 \times 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \right) \cdot \frac{(1,0 \times 10^{-7} \text{ C}) \cdot (5,0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(0,50 \text{ m})^2} \\ F &= \left(8,99 \times 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \right) \cdot \frac{5,0 \times 10^{-13} \text{ C}^2}{0,25 \text{ m}^2} \\ F &= \left(8,99 \times 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \right) \cdot (2,0 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \text{m}^{-2}) \\ F &= 1,798 \times 10^{-2} \text{ N} \end{aligned}$$

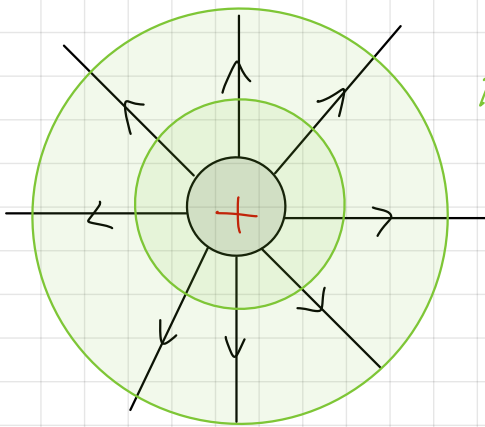
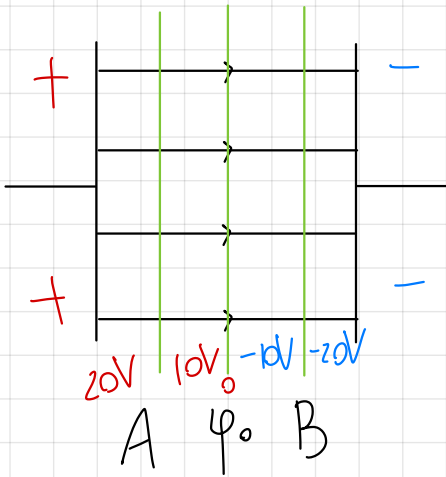
Ergebnis:

Die Kraft, die die Kugeln aufeinander ausüben, beträgt **0,018 N** oder **18 mN**.

$$W_{el} = -q \cdot \vec{E} \cdot \vec{d}$$

$$W_{el} = -q \cdot E \cdot d \cdot \cos \alpha$$

In homogenen Feld zwischen zwei (plan-)parallelen Platten haben alle Punkte im Abstand d zu den Platten das gleiche Potential. Die so entstandenen Mengen an Punkten werden Äquipotentiallinien/-flächen genannt.



Äquipotentiallinien

Die vier Wirkungen des elektrischen Stroms

Der elektrische Strom hat vier grundlegende Wirkungen, die in verschiedenen Anwendungen und Alltagsgegenständen sichtbar werden:

1. **Wärmewirkung:** Wenn elektrischer Strom durch einen Leiter fließt, erzeugt er Wärme. Diese Wirkung wird in vielen Geräten genutzt, wie zum Beispiel in Heizungen oder Toastern. Bei hohen Temperaturen kann der Strom sogar sichtbar werden, wie bei Glühlampen, wo der Draht zu glühen beginnt.
2. **Lichtwirkung:** Diese Wirkung tritt auf, wenn elektrischer Strom durch bestimmte Materialien fließt, die dann Licht emittieren. Ein bekanntes Beispiel sind Leuchtstofflampen oder LED-Lampen, die Licht erzeugen, wenn Strom durch sie fließt.
3. **Magnetische Wirkung:** Der elektrische Strom erzeugt ein Magnetfeld, das in vielen Anwendungen genutzt wird, wie zum Beispiel in Elektromagneten oder bei der Funktionsweise von Motoren. Diese magnetische Wirkung ist auch die Grundlage für viele Technologien, wie z.B. Generatoren und Transformatoren.
4. **Chemische Wirkung:** Diese Wirkung wird häufig in der Elektrolyse verwendet, wo elektrischer Strom chemische Reaktionen auslöst, um Substanzen zu trennen oder zu verändern. Ein Beispiel ist die Gewinnung von Metallen aus ihren Erzen.

Diese vier Wirkungen sind entscheidend für die Funktionsweise vieler elektrischer Geräte und Technologien in unserem Alltag.

Bei einer **Parallelschaltung** von Widerständen (Abb. 203.1) liegt an beiden Bauelementen dieselbe Spannung $U = U_1 = U_2$. Daher gilt wegen $U_1 = I_1 R_1$ und $U_2 = I_2 R_2$:

Die Stromstärken in den Parallelzweigen verhalten sich umgekehrt wie die Widerstände:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}.$$

An der Verzweigungsstelle teilt sich der Strom I in die beiden Teilströme I_1 und I_2 ; dabei gilt $I = I_1 + I_2$. Daraus lässt sich leicht für den Gesamtwiderstand R herleiten:

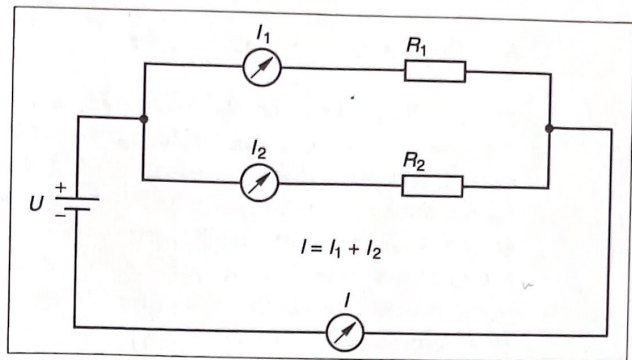
$$\frac{1}{R} = \frac{I}{U} = \frac{I_1}{U_1} + \frac{I_2}{U_2} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$

Allgemein gilt:

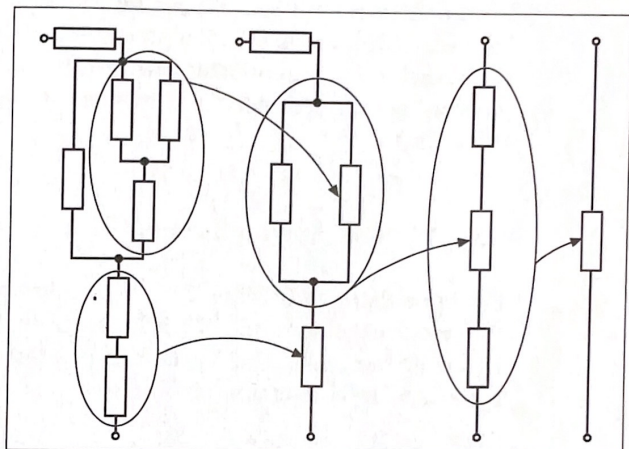
Bei einer Parallelschaltung von Widerständen ist der Kehrwert des Gesamtwiderstandes gleich der Summe der Kehrwerte der Einzelwiderstände:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}.$$

Komplizierte Netzwerke lassen sich häufig auf Reihen- und Parallelschaltungen zurückführen (Abb. 203.2). Man ersetzt nacheinander die einzelnen Widerstände durch die nach den obigen Gleichungen berechenbaren „Ersatzwiderstände“.



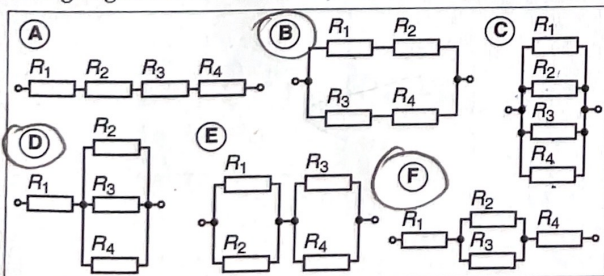
203.1 Parallelschaltung von zwei Widerständen



203.2 Die Reduktion eines Netzwerkes, das nur Reihen- und Parallelschaltungen enthält

Aufgaben

- 1 Erklären Sie die Arbeitsweise eines Drehspulmessgerätes und eines Weicheisenmessgerätes. Erinnern Sie sich dabei an das, was Sie in der Sekundarstufe I über Wirkungen des elektrischen Stroms gelernt haben.
- 2 Wie müssen Strommessgeräte in einen Stromkreis eingeschaltet werden? Wie kann man den Messbereich eines Strommessers ändern?
- 3 Wie sind im Haushalt alle Elektrogeräte geschaltet? Weshalb sind sie so geschaltet?
- 4 Aus vier Widerständen $R_1 = 10 \Omega$, $R_2 = 20 \Omega$, $R_3 = 50 \Omega$, $R_4 = 100 \Omega$ werden die unten abgebildeten Schaltungen aufgebaut. An jede Schaltung wird eine Spannung von 24 V gelegt. Berechnen Sie für jede Schaltung



↑
Zackender
ML

- a) den Gesamtwiderstand;
 - b) die an jedem Widerstand liegende Spannung;
 - c) den durch jeden Widerstand fließenden Strom.
- *5 Eine elektrische Kochplatte wird von zwei Spiralen geheizt, die einzeln, hintereinander oder parallel geschaltet werden können (4 Stufen). Bei einer Spannung von 220 V ist die niedrigste Heizleistung 200 W und die höchste 2000 W. Welche Widerstände haben die Heizspiralen? Wie groß ist die Leistung bei den beiden anderen Schaltstufen?
 - *6 Bei der Sparschaltung eines Heizofens wird die Heizspannung um 15 % gesenkt. Um wie viel Prozent sinkt die elektrische Leistung (Annahme: $R = \text{konstant}$)?
 - *7 Wie ändert sich bei einem Heizofen die aufgenommene Leistung, wenn die angelegte Spannung halbiert wird? (Annahme: $R = \text{konstant}$)
 - *8 Aus Konstantandraht wurde ein Kantenmodell eines Würfels hergestellt. Jede Kante hat einen Widerstand von 1Ω . An zwei gegenüberliegende Ecken des Würfels wird eine Spannung von 2 V gelegt. Welchen Strom muss die Spannungsquelle liefern? (Anleitung: Der Strom verteilt sich an den Eckpunkten auf 3 bzw. 2 gleiche Wege.)

Reihenschaltung

$$R_g = R_1 + R_2 \quad U_g = U_1 + U_2 \quad I_g = I_1 = I_2$$

Parallelschaltung

$$\frac{1}{R_g} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad U_g = U_1 = U_2 \quad I_g = I_1 + I_2$$

Übungsaufgaben z. Th. Plattenkondensator

Aufgabe 1

Die Platten eines Kondensators haben den Radius $r = 18 \text{ cm}$. Der Abstand zwischen den Platten beträgt $d = 1,5 \text{ cm}$. An den Kondensator wird die Spannung $U = 8,2 \text{ kV}$ angelegt. Zwischen den Platten befindet sich ein Material mit der Dielektrizitätszahl $\epsilon_r = 3,5$.

- a) Berechnen Sie die Kapazität des Kondensators, die Ladung die auf den Platten gespeichert ist und die Stärke des elektrischen Feldes zwischen den Platten.

Die Platten des Kondensators werden um 8 mm auseinandergezogen. Dabei bleibt der Kondensator an der Spannungsquelle angeschlossen. Das Material zwischen den Platten wird durch einen anderen Isolator mit der Dielektrizitätszahl $\epsilon_r = 7,4$ ersetzt.

- b) Berechnen Sie für diesen Kondensator ebenfalls die Kapazität, die Ladung und die elektrische Feldstärke.

Aufgabe 2

Ein Plattenkondensator hat die Kapazität $3,9825 \text{ pF}$. Zwischen den Platten befindet sich

zunächst Luft ($\epsilon_r \approx 1$). Die Platten haben den Abstand $d = 2 \text{ mm}$ voneinander.

Im elektrischen Feld des Kondensators ist die Energie $W_{\text{el}} = 2,867 \cdot 10^{-8} \text{ J}$ gespeichert.

- a) Berechnen Sie die Größe der Kondensatorplatten.
- b) Berechnen Sie die Spannung, die am Kondensator anliegt. (Runden Sie auf volle Volt).
- c) Berechnen Sie die Ladung Q , die im Kondensator gespeichert ist.
- d) Berechnen Sie die Flächenladungsdichte σ des Kondensators.
- e) Berechnen Sie auf zwei Arten die elektrische Feldstärke.
- f) Berechnen Sie die Energiedichte des elektrischen Feldes.

Der Kondensator wird von der Spannungsquelle getrennt. Der Plattenabstand wird vervierfacht. Zwischen die Platten wird ein Dielektrikum mit der Dielektrizitätszahl $\epsilon_r = 8$ geschoben.

- g) Nennen Sie die Größen, die beim Auseinanderziehen der Platten und dem Einfügen des Dielektrikums konstant geblieben sind. Bestimmen Sie den Faktor, um den sich die Kapazität des Kondensators verändert hat. Bestimmen Sie auch für den veränderten Kondensator die zuvor in den Teilaufgaben a) – f) berechneten Größen, die nicht konstant geblieben sind.



1

$$a) Q = C \cdot U = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \cdot U = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\pi r^2}{d} \cdot U =$$

$$= 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{A \cdot s}{V \cdot m} \cdot 3,5 \cdot \frac{\pi \cdot (0,18m)^2}{0,015m} \cdot 8200V \approx 1,724 \cdot 10^{-6} C = 1,724 \mu C$$

$$E = \frac{U}{d} = \frac{8200V}{0,015m} = 546\,666,6 \frac{V}{m}$$

$$b) Q = C \cdot U = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \cdot U = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\pi r^2}{d} \cdot U =$$

$$= 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{A \cdot s}{V \cdot m} \cdot 7,4 \cdot \frac{\pi \cdot (0,18m)^2}{0,023m} \cdot 8200V \approx 2,378 \cdot 10^{-6} C = 2,378 \mu C$$

$$E = \frac{U}{d} = \frac{8200V}{0,023m} = 356\,522 \frac{V}{m}$$

2

$$a) A = \frac{C \cdot d}{\epsilon_0} = \frac{3,9825 \cdot 10^{-12} F \cdot 0,002m}{8,854 \cdot 10^{-12} \frac{A \cdot s}{V \cdot m}} = 9 \cdot 10^{-4} m^2 = 9 cm^2$$

$$b) W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 \Leftrightarrow U = \sqrt{\frac{2W}{C}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 2,867 \cdot 10^{-8} J}{3,9825 \cdot 10^{-12} F}} = 120 V$$

$$c) Q = C \cdot U = 3,9825 \cdot 10^{-12} F \cdot 120V = 4,779 \cdot 10^{-10} C$$

$$d) \sigma = \frac{Q}{A} = \frac{4,779 \cdot 10^{-10} C}{9 \cdot 10^{-4} m^2} = 5,31 \cdot 10^{-7} \frac{C}{m^2}$$

$$e) E = \frac{U}{d} = \frac{120V}{0,002m} = 60 \frac{kV}{m}$$

Aufgabe 3

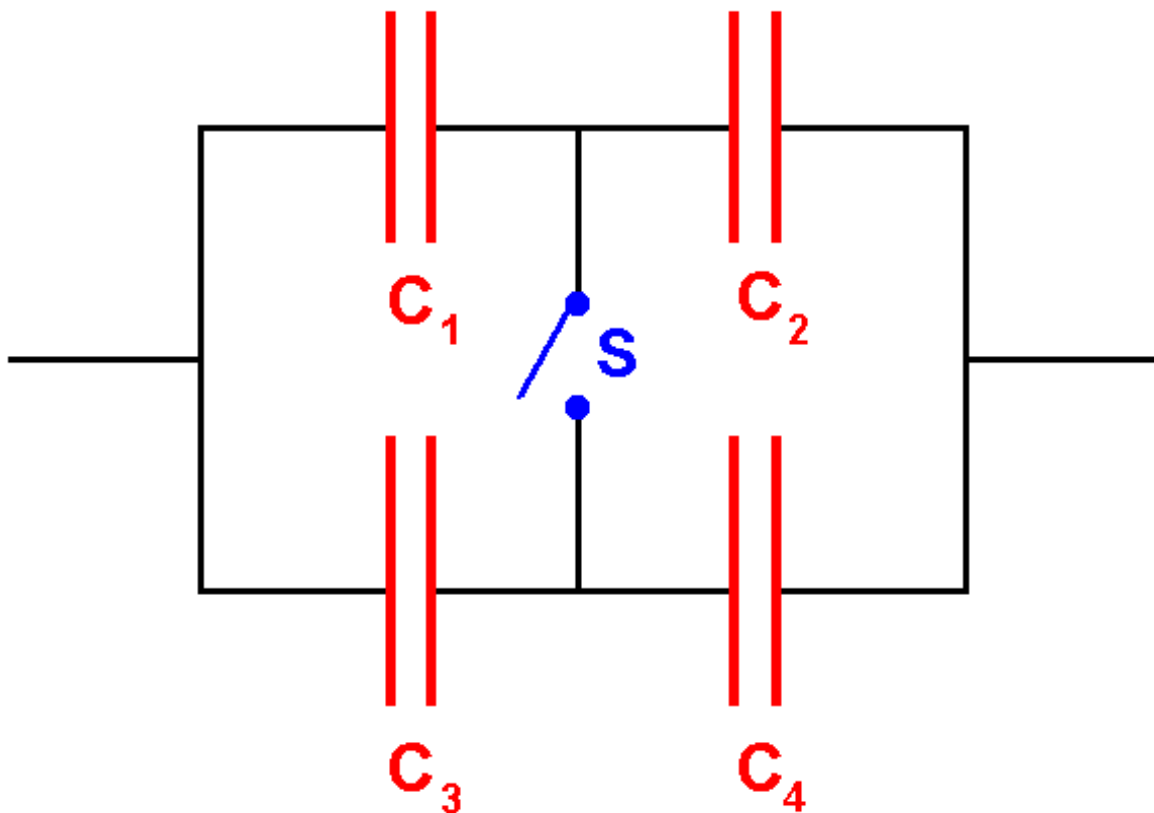
Ein Kondensator K_1 hat die Kapazität $C_1 = 7 \mu\text{F}$. Dieser Kondensator wird mit der Spannung U_1 aufgeladen und dann von der Spannungsquelle getrennt. Im Kondensator ist die Energie W_1 gespeichert.

Zu diesem Kondensator K_1 wird nun ein zweiter Kondensator K_2 mit der Kapazität C_2 parallel geschaltet. Die Energie, die insgesamt in den beiden Kondensatoren K_1 und K_2 gespeichert ist, hat einen um 20% geringeren Wert als die Energie W_1 die vor dem Abtrennen von der Spannungsquelle allein im Kondensator K_1 gespeichert war.

- Berechnen Sie die Kapazität C_2 des Kondensators K_2 .
Zeigen Sie, dass diese Kapazität C_2 unabhängig von der Spannung U_1 ist.
- Berechnen Sie die Spannung $U_{1,2}$ die an den beiden parallel geschalteten Kondensatoren K_1 und K_2 anliegt, wenn der Kondensator K_1 mit der Spannung $U_1 = 380 \text{ V}$ aufgeladen wurde.

Aufgabe 4

Gegeben ist die folgende Schaltung mit den 4 Kondensatoren K_1, K_2, K_3 und K_4 mit den zugehörigen Kapazitäten $C_1 = 8 \mu\text{F}$, $C_2 = 20 \mu\text{F}$, $C_3 = 12 \mu\text{F}$ und $C_4 = 6 \mu\text{F}$.



Fortsetzung von Aufgabe 4

Der Schalter S ist zunächst geöffnet. Die Anordnung der 4 Kondensatoren wird mit an eine Spannungsquelle mit der Spannung U angeschlossen.

- a) Berechnen Sie die Gesamtkapazität der Schaltung, wenn der Schalter S geöffnet ist.

Nun wird der Schalter S geschlossen.

- b) Berechnen Sie die Gesamtkapazität der Schaltung bei geschlossenem Schalter S.

Die 4 Kondensatoren werden entladen. Der Kondensator K_4 wird durch einen Kondensator K_x mit der Kapazität C_x ersetzt. Die Kapazität C_x dieses Kondensators soll gewählt werden, dass bei zunächst geöffnetem Schalter S und dann bei geschlossenem Schalter S die Gesamtkapazität der Schaltung gleich bleibt.

- c) Bestimmen Sie die Größe der Kapazität C_x .

Aufgabe 5

Ein Kondensator K_1 hat die feste Kapazität $C_1 = 40 \text{ nF}$. Zu diesem Kondensator wird ein zweiter Kondensator K_2 mit regelbarer Kapazität C_2 geschaltet.

Der Kondensator K_2 ist ein Drehkondensator, der bei vollständig herausgedrehten Platten (Drehwinkel $\alpha = 0^\circ$) seine kleinste Kapazität $C_{2,\min} = 32 \text{ nF}$.

Beim Hereindreihen der Platten steigt die Kapazität linear zum Drehwinkel an. Bei vollständig hereingedrehten Platten (Drehwinkel $\alpha = 180^\circ$) hat der Drehkondensator K_2 seine größte Kapazität $C_{2,\max} = 167 \text{ nF}$.

- a) Bestimmen Sie die größte Kapazität $C_{\text{ges,max}}$, die man durch das Zusammenschalten der beiden Kondensatoren erreichen kann.
- b) Bestimmen Sie die kleinste Kapazität $C_{\text{ges,min}}$, die man durch das Zusammenschalten der beiden Kondensatoren erreichen kann.
- c) Welchen Drehwinkel muß man am Kondensator K_2 einstellen, damit man die Gesamtkapazität $C_{\text{ges}} = 24 \text{ nF}$ erhält ?

Wie sind die Kondensatoren K_1 und K_2 in diesem Fall geschaltet ?

Elektrische Feldkonstante: $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{A s}}{\text{V m}}$



$$a) Q = C \cdot U = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \cdot U = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\pi r^2}{d} \cdot U = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{A \cdot s}{V \cdot m} \cdot 3,5 \cdot \frac{\pi \cdot (0,18 m)^2}{0,015 m} \cdot 8200 V \approx 1,724 \cdot 10^{-6} F = 1,724 \mu F$$

$$E = \frac{U}{d} = \frac{8200 V}{0,015 m} = 546667 \frac{V}{m}$$

$$a) C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\pi r^2}{d} = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{A \cdot s}{V \cdot m} \cdot 3,5 \cdot \frac{\pi \cdot (0,18 m)^2}{0,015 m} \approx 2,10 \cdot 10^{-10} F$$

Die Kapazität des Kondensators beträgt $C = 210 \text{ pF}$.

$$Q = C \cdot U = 210 \cdot 10^{-12} F \cdot 8200 V = 1,722 \cdot 10^{-6} C$$

Auf den Kondensatorplatten ist die Ladung $Q = 1,722 \cdot 10^{-6} C$ gespeichert.

$$E = \frac{U}{d} = \frac{8200 V}{0,015 m} = 546667 \frac{V}{m}$$

Die Stärke des elektrischen Feldes beträgt $E = 546667 \frac{V}{m}$.

$$b) C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\pi r^2}{d} = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{A \cdot s}{V \cdot m} \cdot 7,4 \cdot \frac{\pi \cdot (0,18 m)^2}{0,023 m} \approx 2,90 \cdot 10^{-10} F$$

Die Kapazität des Kondensators beträgt $C = 290 \text{ pF}$.

$$Q = C \cdot U = 290 \cdot 10^{-12} F \cdot 8200 V = 2,378 \cdot 10^{-6} C$$

Auf den Kondensatorplatten ist die Ladung $Q = 2,378 \cdot 10^{-6} C$ gespeichert.

$$E = \frac{U}{d} = \frac{8200 V}{0,023 m} = 356522 \frac{V}{m}$$

Die Stärke des elektrischen Feldes beträgt $E = 356522 \frac{V}{m}$.

Aufgabe 2

$$a) C = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d} \Leftrightarrow A = \frac{C \cdot d}{\epsilon_0}$$

$$A = \frac{3,9825 \cdot 10^{-12} F \cdot 0,002 m}{8,85 \cdot 10^{-12} \frac{A \cdot s}{V \cdot m}} = 9 \cdot 10^{-4} m^2 = 9 cm^2$$

Die Kondensatorplatten haben die Größe $A = 9 cm^2$.



Fortsetzung von Aufgabe 2

$$b) \quad W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 \Rightarrow U = \sqrt{\frac{2W}{C}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 2,867 \cdot 10^{-8} \text{ J}}{3,9825 \cdot 10^{-12} \text{ F}}} = 120 \text{ V}$$

Am Kondensator liegt die Spannung $U = 120 \text{ V}$ an.

$$c) \quad Q = C \cdot U = 3,9825 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot 120 \text{ V} = 4,779 \cdot 10^{-10} \text{ C}$$

Im Kondensator ist die Ladung $Q = 4,778 \cdot 10^{-10} \text{ C}$ gespeichert.

$$d) \quad \sigma = \frac{Q}{A} = \frac{4,779 \cdot 10^{-10} \text{ C}}{9 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2} = 5,31 \cdot 10^{-7} \frac{\text{C}}{\text{m}^2}$$

Die Flächenladungsdichte beträgt $\sigma = 5,31 \cdot 10^{-7} \frac{\text{C}}{\text{m}^2}$.

e) 1. Möglichkeit

$$E = \frac{U}{d} = \frac{120 \text{ V}}{0,002 \text{ m}} = 60000 \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

2. Möglichkeit

$$\sigma = \epsilon_0 \cdot E \Leftrightarrow E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{5,31 \cdot 10^{-7} \frac{\text{C}}{\text{m}^2}}{8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}} = 60000 \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

Die elektrische Feldstärke beträgt $E = 60000 \frac{\text{V}}{\text{m}}$.

$$f) \quad \rho_{\text{el}} = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_0 \cdot E^2 = \frac{1}{2} \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}} \cdot \left(6 \cdot 10^4 \frac{\text{V}}{\text{m}}\right)^2 = 1,593 \cdot 10^{-2} \frac{\text{J}}{\text{m}^3}$$

Die Energiedichte des elektrischen Feldes beträgt $\rho_{\text{el}} = 1,593 \cdot 10^{-2} \frac{\text{J}}{\text{m}^3}$.

g) Die Größe A der Kondensatorplatten, die gespeicherte Ladung Q und die Flächenladungsdichte σ sind beim Auseinanderziehen der Platten und dem Einfügen eines Dielektrikums unverändert geblieben.

Die Kapazität C ist zunächst 4 mal so klein geworden, weil der Plattenabstand d vervierfacht wurde. Durch Einfügen eines Dielektrikums mit $\epsilon_r = 8$ wird diese um den Faktor 4 verkleinerte Kapazität 8 mal so groß.

Insgesamt hat sich die Kapazität also verdoppelt.



Fortsetzung von Aufgabe 2 g.

Wegen $Q = \text{const} = C \cdot U$ folgt: Die Spannung U ist nur noch halb so groß wie zuvor.

Die Spannung beträgt nun $U = 60 \text{ V}$.

Für die elektrische Feldstärke E gilt:

$$1) \ E = \frac{U}{d} = \frac{60 \text{ V}}{0,008 \text{ m}} = 7500 \frac{\text{V}}{\text{m}} \quad \text{und}$$

$$2) \ E = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r} = \frac{5,31 \cdot 10^{-7} \frac{\text{C}}{\text{m}^2}}{8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}} \cdot 8} = 7500 \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

Die elektrische Feldstärke beträgt $E = 7500 \frac{\text{V}}{\text{m}}$.

Für die Energiedichte des elektrischen Feldes gilt:

$$\rho_{\text{el}} = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot E^2 = \frac{1}{2} \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}} \cdot 8 \cdot \left(7500 \frac{\text{V}}{\text{m}}\right)^2 = 1,99 \cdot 10^{-3} \frac{\text{J}}{\text{m}^3}$$

Die Energiedichte des elektrischen Feldes beträgt $\rho_{\text{el}} = 1,99 \cdot 10^{-3} \frac{\text{J}}{\text{m}^3}$.

Aufgabe 3

- a) Nach dem Aufladen und Trennen von der Spannungsquelle enthält der Kondensator K_1 die Energie $W_1 = \frac{1}{2} \cdot C_1 \cdot U_1^2$

Durch die Parallelschaltung des Kondensators K_2 fließt ein Teil der Ladung von K_1 auf diesen. Dabei sinkt die gemeinsame Spannung auf den Wert U_2 .

Beide Kondensatoren haben zusammen die Kapazität

$$C_{1,2} = C_1 + C_2 \quad \text{und die Energie} \quad W_{1,2} = \frac{1}{2} \cdot (C_1 + C_2) \cdot U_2^2$$

Nach Aufgabenstellung gilt:

$$W_{1,2} = \frac{4}{5} W_1 \quad \text{also} \quad \frac{1}{2} \cdot (C_1 + C_2) \cdot U_2^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{5} \cdot C_1 \cdot U_1^2 \quad \Leftrightarrow$$
$$(C_1 + C_2) \cdot U_2^2 = \frac{4}{5} \cdot C_1 \cdot U_1^2 \quad (\alpha)$$

Da nach dem Abtrennen des Kondensators K_1 von der Stromquelle die Ladung Q im System erhalten bleibt, gilt:

$$Q = C_1 \cdot U_1 \quad \text{und} \quad Q = (C_1 + C_2) \cdot U_2$$



Fortsetzung von Aufgabe 3 a

Durch Gleichsetzen erhält man:

$$C_1 \cdot U_1 = (C_1 + C_2) \cdot U_2 \quad \Leftrightarrow \quad U_2 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \cdot U_1$$

Einsetzen in Gleichung (α) ergibt:

$$(C_1 + C_2) \cdot \left(\frac{C_1}{C_1 + C_2} \right)^2 \cdot U_1^2 = \frac{4}{5} \cdot C_1 \cdot U_1^2$$

Durch Division durch U_1^2 erhält man:

$$(C_1 + C_2) \cdot \left(\frac{C_1}{C_1 + C_2} \right)^2 = \frac{4}{5} \cdot C_1$$

In dieser Gleichung kommt die Spannung U_1 nicht mehr vor.

Die Kapazität C_2 ist folglich unabhängig von U_1 .

Auflösen der Gleichung nach C_2 ergibt:

$$C_2 = \frac{1}{4} \cdot C_1 = \frac{1}{4} \cdot 7 \mu\text{F} = 1,75 \mu\text{F}$$

Die Kapazität des Kondensators K_2 beträgt C_2 1,75 μF .

$$\text{b) } U_2 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \cdot U_1 = \frac{7 \mu\text{F}}{7 \mu\text{F} + 1,75 \mu\text{F}} \cdot 380 \text{ V} = 304 \text{ V}$$

An den beiden parall geschalteten kondensatoren liegt die Spannung

$$\underline{\underline{U_2 = 304 \text{ V.}}}$$

Aufgabe 4

- a) Bei geöffnetem Schalter sind die Kapazitäten C_1 und C_2 , sowie die Kapazitäten C_3 und C_4 in Serie geschaltet. Die Ersatzkapazitäten $C_{1,2}$ und $C_{3,4}$ betragen:

$$C_{1,2} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} = \frac{8 \mu\text{F} \cdot 20 \mu\text{F}}{8 \mu\text{F} + 20 \mu\text{F}} = 5\frac{5}{7} \mu\text{F} \quad \text{und}$$

$$C_{3,4} = \frac{C_3 \cdot C_4}{C_3 + C_4} = \frac{12 \mu\text{F} \cdot 6 \mu\text{F}}{12 \mu\text{F} + 6 \mu\text{F}} = 4 \mu\text{F}$$

Die Ersatzkapazitäten $C_{1,2}$ und $C_{3,4}$ sind zueinander parallel geschaltet.

$$C_{\text{ges}} = C_{1,2} + C_{3,4} = 5\frac{5}{7} \mu\text{F} + 4 \mu\text{F} = 9\frac{5}{7} \mu\text{F} \approx 9,714 \mu\text{F}$$

Die Gesamtkapazität der Schaltung beträgt bei geöffnetem Schalter

$$\underline{\underline{C_{\text{ges}} = 9,714 \mu\text{F.}}}$$



Fortsetzung von Aufgabe 4

- b) Bei geschlossenem Schalter sind die Kapazitäten C_1 und C_3 , sowie die Kapazitäten C_2 und C_4 parallel geschaltet. Die Ersatzkapazitäten $C_{1,3}$ und $C_{2,4}$ betragen:

$$C_{1,3} = C_1 + C_3 = 8 \mu\text{F} + 12 \mu\text{F} = 20 \mu\text{F} \quad \text{und}$$

$$C_{2,4} = C_2 + C_4 = 20 \mu\text{F} + 6 \mu\text{F} = 26 \mu\text{F}$$

Die Ersatzkapazitäten $C_{1,3}$ und $C_{2,4}$ sind in Serie geschaltet.

$$C_{\text{ges}} = \frac{C_{1,3} \cdot C_{2,4}}{C_{1,3} + C_{2,4}} = \frac{20 \mu\text{F} \cdot 26 \mu\text{F}}{20 \mu\text{F} + 26 \mu\text{F}} = 11 \frac{7}{23} \mu\text{F} \approx 11,304 \mu\text{F}$$

Die Gesamtkapazität der Schaltung beträgt bei geschlossenem Schalter

$$\underline{\underline{C_{\text{ges}} = 11,304 \mu\text{F}}}$$

c) Lösung 1

Da die Spannungsquelle angeschlossen bleibt und beim Schließen des Schalters S die Gesamtkapazität des Systems $C_{\text{ges}} = \frac{Q}{U}$ unverändert bleiben soll, muß die Kapazität C_x so gewählt werden, dass durch den geschlossenen Schalter S keine Ladung fließt. Das bedeutet aber, dass das

Verbindungskabel

zwischen den Kondensatoren K_1 und K_2 und das Kabel zwischen K_3 und K_4 auf dem selben elektrischen Potential liegen, denn nur dann hat die Spannung am geöffnetem Schalter den Wert Null und es kann beim Schließen des Schalters kein Strom fließen.

Weil bei geöffnetem Schalter die Kondensatoren K_1 und K_2 sowie die Kondensatoren K_3 und K_4 jeweils in Serie geschaltet sind, gilt für die Spannung U der Stromquelle:

$$U = U_1 + U_2 \quad \text{und} \quad U = U_3 + U_x$$

Die Bedingung, dass am Schalter keine Spannung anliegt, ist nur erfüllt, wenn gilt: $U_1 = U_2$ und $U_3 = U_x$

Durch Division dieser beiden Gleichungen erhält man: $\frac{U_1}{U_3} = \frac{U_2}{U_x}$

Durch Umformen dieser Gleichung mit der "Kondensatorgleichung" $Q = C \cdot U$ bzw. $U = \frac{Q}{C}$ ergibt sich:

$$\frac{Q_1}{C_1} : \frac{Q_3}{C_3} = \frac{Q_2}{C_2} : \frac{Q_x}{C_x} \Leftrightarrow \frac{Q_1 \cdot C_3}{C_1 \cdot Q_3} = \frac{Q_2 \cdot C_x}{C_2 \cdot Q_x} \Leftrightarrow C_x = \frac{Q_1 \cdot C_3 \cdot C_2 \cdot Q_x}{C_1 \cdot Q_3 \cdot Q_2} \quad (\alpha)$$

Da ja bei geöffnetem Schalter die Kapazitäten C_1 und C_2 sowie die Kapazitäten C_3 und C_x in Serie geschaltet sind, gilt für die Ladungen auf den einzelnen Kondensatoren:

$$Q_1 = Q_2 := Q_{1,2} \quad \text{und} \quad Q_3 = Q_x := Q_{3,x}$$



Fortsetzung von Aufgabe 4 c

Durch Einsetzen in Gleichung (α) erhält man für die Kapazität C_x :

$$C_x = \frac{Q_{1,2} \cdot C_3 \cdot C_2 \cdot Q_{3,x}}{C_1 \cdot Q_{3,x} \cdot Q_{3,2}} = \frac{C_3 \cdot C_2}{C_1} = \frac{12 \mu\text{F} \cdot 20 \mu\text{F}}{8 \mu\text{F}} = 30 \mu\text{F}$$

Für die Kapazität $C_x = 30 \mu\text{F}$ sind die Kapazitäten bei geöffnetem und geschlossenem Schalter gleich groß.

c) Lösung 2

Bei geöffnetem Schalter gilt: $C_{1,2} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$ und $C_{3,x} = \frac{C_3 \cdot C_x}{C_3 + C_x}$

Damit erhält man für die Gesamtkapazität, wenn der Schalter auf ist:

$$C_{\text{ges, auf}} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} + \frac{C_3 \cdot C_x}{C_3 + C_x}$$

Bei geschlossenem Schalter gilt: $C_{1,3} = C_1 + C_3$ und $C_{2,x} = C_2 + C_x$

Damit erhält man für die Gesamtkapazität, wenn der Schalter zu ist:

$$C_{\text{ges, zu}} = \frac{(C_1 + C_3) \cdot (C_2 + C_x)}{C_1 + C_2 + C_3 + C_x}$$

C_x soll so gewählt werden, dass gilt: $C_{\text{ges, auf}} = C_{\text{ges, zu}}$, also folgt:

$$\frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} + \frac{C_3 \cdot C_x}{C_3 + C_x} = \frac{(C_1 + C_3) \cdot (C_2 + C_x)}{C_1 + C_2 + C_3 + C_x} \quad (\alpha)$$

Das Auflösen dieser Gleichung nach C_x unter Verwendung der allgemeinen Größen C_1 , C_2 und C_3 erfordert ohne Computerunterstützung einen hohen Aufwand an Schreib- bzw. Rechenarbeit. Um diesen Aufwand möglichst gering zu halten, setze ich in die Gleichung (α) für C_1 , C_2 und C_3 die gegebenen Werte ein und lasse die Einheit μF weg.

Die Gleichung (α) lautet dann:

$$\begin{aligned} \frac{160}{28} + \frac{12 C_x}{12 + C_x} &= \frac{20 (20 + C_x)}{40 + C_x} \\ \frac{40}{7} + \frac{12 C_x}{12 + C_x} &= \frac{400 + 20 C_x}{40 + C_x} \\ \frac{400 + 40 C_x + 84 C_x}{84 + 7 C_x} &= \frac{400 + 20 C_x}{40 + C_x} \\ (480 + 124 C_x) \cdot (40 + C_x) &= (400 + 20 C_x) \cdot (84 + 7 C_x) \end{aligned}$$



Fortsetzung von Aufgabe 4 c (2. Lösung)

$$\begin{aligned}19200 + 480 C_x + 4960 C_x + 124 C_x^2 &= 33600 + 2800 C_x + 1680 C_x + 140 C_x^2 \\-16 C_x^2 + 960 C_x - 14400 &= 0 \\C_x^2 - 60 C_x + 900 &= 0 \\(C_x - 30)^2 &= 0 \\C_x &= 30\end{aligned}$$

Die Gesamtkapazitäten der Schaltung sind bei geöffnetem Schalter und bei geschlossenem Schalter gleich groß, wenn der Kondensator K_4 die Kapazität $C_4 = 30 \mu\text{F}$ hat.

Aufgabe 5

- a) Die größte Gesamtkapazität $C_{\text{ges,max}}$ erhält man, wenn man die Kondensatoren K_1 und K_2 parallel schaltet und die Platten von K_2 vollständig hereindreht.

$$C_{\text{ges,max}} = C_1 + C_{2,\text{max}} = 40 \text{ nF} + 167 \text{ nF} = 207 \text{ nF}$$

Die größte Kapazität beträgt $C_{\text{ges,max}} = 207 \text{ nF}$.

- b) Die kleinste Gesamtkapazität $C_{\text{ges,min}}$ erhält man, wenn man die Kondensatoren K_1 und K_2 in Serie schaltet und die Platten von K_2 vollständig herausdreht.

$$C_{\text{ges,min}} = \frac{C_1 \cdot C_{2,\text{min}}}{C_1 + C_{2,\text{min}}} = \frac{40 \text{ nF} \cdot 32 \text{ nF}}{40 \text{ nF} + 32 \text{ nF}} = 17\frac{7}{9} \text{ nF}$$

Die kleinste Kapazität beträgt $C_{\text{ges,min}} = 17\frac{7}{9} \text{ nF}$.

- c) Da $C_{\text{ges}} = 24 \text{ nF} < C_{2,\text{min}} = 32 \text{ nF} < C_1 = 40 \text{ nF}$ ist, müssen die beiden Kondensatoren in Reihe geschaltet werden.

Bei einer Parallelschaltung wäre nämlich die kleinste Kapazität

$$C_{\text{p,min}} = C_1 + C_{2,\text{min}} = 40 \text{ nF} + 32 \text{ nF} = 72 \text{ nF} > 24 \text{ nF} = C_{\text{ges}}$$

Für die Reihenschaltung gilt:

$$\frac{1}{C_{\text{ges}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad \Leftrightarrow \quad C_2 = \frac{C_1 \cdot C_{\text{ges}}}{C_1 - C_{\text{ges}}} = \frac{40 \text{ nF} \cdot 24 \text{ nF}}{40 \text{ nF} - 24 \text{ nF}} = 60 \text{ nF}$$

Der Drehwinkel α am Kondensator K_2 muß also so eingestellt werden, dass seine Kapazität $C_2 = 60 \text{ nF}$ beträgt.



Fortsetzung von Aufgabe 5 c

Die Formel für die Kapazität C_2 in Abhängigkeit des Drehwinkels α lautet:

$$C_2 = C_{2,\min} + \frac{C_{2,\max} - C_{2,\min}}{180} \cdot \alpha \quad \Leftrightarrow$$
$$\alpha = \frac{(C_2 - C_{2,\min}) \cdot 180}{C_{2,\max} - C_{2,\min}} = \frac{(60 \text{ nF} - 32 \text{ nF}) \cdot 180^\circ}{167 \text{ nF} - 32 \text{ nF}} = 37,3^\circ$$

Um die Gesamtkapazität von 24 nF zu erhalten, muß der Drehwinkel $\alpha = 37,3^\circ$ betragen.



27.03.25

$$e = -1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$\frac{1}{2} m v^2 = U \cdot e$$

$$v = \sqrt{\frac{2 U e}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 100 \text{ V} \cdot |-1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C}|}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}}} =$$

$$= 5\,934\,070,004 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

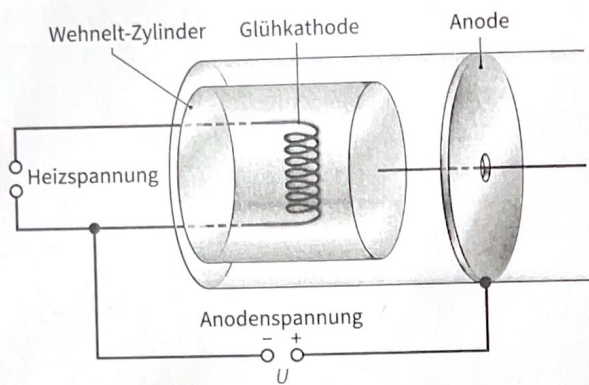
$$s = -\frac{1}{2} a t^2 + v_0 t + s_0 =$$

$$= \frac{1}{2} \cdot (-1,23 \cdot 10^{14} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}) \cdot t^2 + 5\,934\,070,004 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot t - 0,1 \text{ m}$$

$$t_1 = 2,19818 \cdot 10^{-8} \text{ s}$$

$$t_2 = 7,22 \cdot 10^{-8} \text{ s}$$

4.6 Bewegung von Ladungsträgern in elektrischen Feldern



B1 Aufbau einer Elektronenkanone

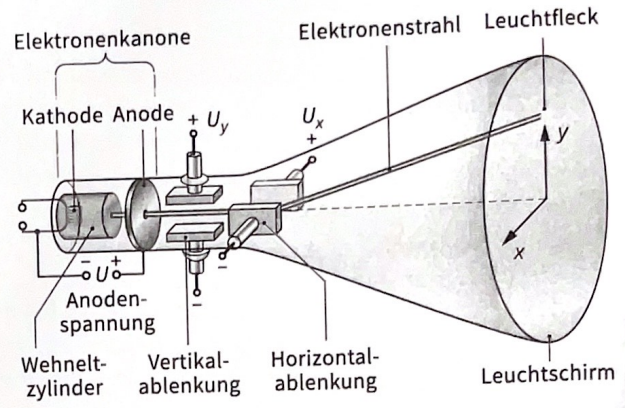
Elektrische Felder und geladene Teilchen. In der Physik finden sich viele Beispiele, bei denen die Bewegung von Ladungsträgern durch Felder gezielt beeinflusst wird: Bei der Erzeugung von Elektronenstrahlen (Elektronenkanone), in Messinstrumenten (Oszilloskope) oder in Experimenten zur Bestimmung physikalischer Größen (Millikan-Versuch).

Elektronenkanone. Elektronenkanonen sind Geräte, aus denen Elektronen mit einstellbaren Geschwindigkeiten in schmalen Bündeln austreten. Sie werden in vielen Geräten und Experimenten der Physik verwendet. Bild B1 zeigt die wesentlichen Komponenten: Glühkathode, Wehnelt-Zylinder und Anode. Zur Erzeugung des Elektronenstrahls nutzt man aus, dass Elektronen bei genügend hoher Temperatur (einige hundert °C) die Glühkathode verlassen können. Dieser Effekt wird **glühelektrischer Effekt** genannt. Die Anzahl der austretenden Elektronen hängt von der Temperatur und der Oberflächenbeschaffenheit des Materials ab. Legt man eine Beschleunigungsspannung U (auch Anodenspannung genannt) zwischen der Glühkathode und der Anode an, werden die Elektronen beschleunigt. Sie treten durch eine kleine Bohrung in der Anode. Der gegenüber der Glühkathode negativ geladene **Wehnelt-Zylinder** dient der Bündelung der Elektronen zu einem feinen Strahl. Treten die anfangs nahezu ruhenden Elektronen durch die Anode, so entspricht deren kinetische Energie der im elektrischen Feld zwischen Kathode und Anode aufgenommenen Energie:

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m \cdot v^2 = e \cdot U \quad (e: \text{Ladung der Elektronen}).$$

Die Geschwindigkeit der Elektronen ist daher:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot U}{m}}. \quad (1)$$



B2 Braunsche Röhre

! Merksatz

Elektronenkanonen erzeugen schmale Bündel von Elektronen, die in einem elektrischen Feld beschleunigt werden. Ruhende Elektronen werden durch die Beschleunigungsspannung U auf die Geschwindigkeit $v = \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot U}{m}}$ gebracht.

Braunsche Röhre. Schnell veränderliche Vorgänge werden oft durch Sensoren in elektrische zeitabhängige Spannungsabläufe umgewandelt. Dazu gehören Schallschwingungen in der Luft oder Druckänderungen in einem Motor. Damit sie unser Auge verfolgen kann, benutzt man Oszilloskope. Das zentrale Teil eines Röhren-Oszilloskops ist die braunsche Röhre (Bild B2).

In einer luftleeren Röhre befindet sich eine Elektronenkanone, die mit einer Beschleunigungsspannung U betrieben wird. Sie erzeugt einen schmalen Elektronenstrahl, der sich in horizontaler Richtung durch die Röhre ausbreitet. Die Elektronen bewegen sich durch zwei hintereinander angeordnete homogene elektrische Kondensatorfelder und treffen auf einen Leuchtschirm. Die beiden Kondensatoren sind um 90° gegeneinander verdreht. Kondensator 1 (Spannung U_y) lenkt die Elektronen in der Vertikalen ab, Kondensator 2 (Spannung U_x) in der Horizontalen.

Versuch V1 zeigt, dass in einer braunschen Röhre mit nur einem vertikalen Kondensator die vertikale Ablenkung y proportional zur Spannung U_y am Kondensator ist: $y \sim U_y$. Aus der auf dem Leuchtschirm gemessenen Ablenkung y lässt sich somit die Kondensatorspannung U_y bestimmen, die in der Regel proportional zu einer unbekannten, zu messenden Spannung ist.

Die Ablenkung ist zudem proportional zum Kehrwert $\frac{1}{U}$ der Beschleunigungsspannung. Die Ablenkung in x -Richtung im horizontalen Kondensator der braunschen Röhre ist ebenso proportional zur Spannung U_x . Beide Ablenkungen lassen sich zur Darstellung zeitabhängiger Spannungen nutzen (siehe S. 148).

! Merksatz

Die Ablenkung y eines Elektronenstrahls in einer braunschen Röhre ist proportional zur Ablenkspannung U_y und zum Kehrwert $\frac{1}{U}$ der Beschleunigungsspannung.

Bahngleichung. In Versuch **v1** werden die Elektronen auf die Geschwindigkeit v_x beschleunigt. Dann treten sie in das vertikale elektrische Feld des Kondensators ein. Da in x -Richtung keine Kräfte wirken, bleibt v_x konstant. Aufgrund der an den Kondensatorplatten anliegenden Spannung U_y ist die elektrische Feldstärke im Kondensator mit Plattenabstand d gegeben durch:

$$E_y = \frac{U_y}{d}.$$

Gegen die Richtung des elektrischen Kondensatorfeldes werden die Elektronen beschleunigt mit:

$$a_y = \frac{F_y}{m} = \frac{e \cdot E_y}{m} \quad (\text{Schwerkraft vernachlässigt}).$$

Sie bewegen sich somit gleichförmig in x -Richtung und gleichmäßig beschleunigt in y -Richtung. Die Bewegungsgleichungen sind also:

$$y(t) = \frac{1}{2} \cdot a_y \cdot t^2 \quad \text{und} \quad x = v_x \cdot t.$$

Eliminieren von t ergibt die Bahngleichung der Elektronen:

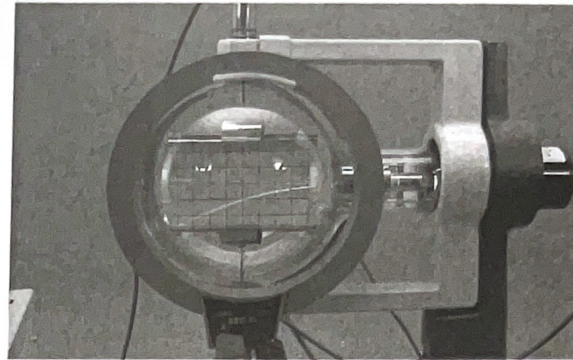
$$y = \frac{1}{2} \cdot a_y \cdot \frac{x^2}{v_x^2}. \quad (2)$$

Es handelt sich in Übereinstimmung mit den Beobachtungen in Versuch **v1** um eine Parabelgleichung. Nach Gleichung (2) werden die Elektronen nach Durchlaufen eines Kondensators der Länge l abgelenkt um y_1 mit

$$y_1 = \frac{1}{2} \cdot e \cdot U_y \cdot \frac{l^2}{m \cdot d \cdot v_x^2}. \quad (3)$$

Die Ablenkung ist also umso stärker, je größer die Kondensatorspannung ist. Verdoppelt man die Länge, so vervierfacht sich die Ablenkung. Die Proportionalität zu $\frac{1}{d}$ bedeutet, dass die Ablenkung stärker ist, wenn die Platten näher zusammenstehen. Da nach Gleichung (1) $v_x^2 \sim U$ ist, kann man Gleichung (3) auch die Proportionalität der Ablenkung y_1 zu $\frac{1}{U}$ entnehmen.

v1 Elektronenablenkung im Kondensator



Elektronen aus einer Elektronenkanone mit Beschleunigungsspannung U treten in ein homogenes, vertikales elektrisches Feld eines Plattenkondensators (Plattenabstand d , Länge l , Spannung U_y) ein. Auf einem schräg im Kondensator platzierten Leuchtschirm wird die Bahn der Elektronen sichtbar und kann vermessen werden.

Die Ablenkung in y -Richtung wird in Messreihen bestimmt, bei denen

- U konstant ist und U_y variiert wird und
- U variiert wird und U_y konstant ist.

* Beispielaufgabe: Elektronenkanone

- a) Berechnen Sie die Geschwindigkeit von Elektronen, die mit $U = 100 \text{ V}$ beschleunigt wurden.
- b) Ermitteln Sie die Spannung, nach der die Elektronen rechnerisch die Lichtgeschwindigkeit $c = 3,0 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ erreichen.

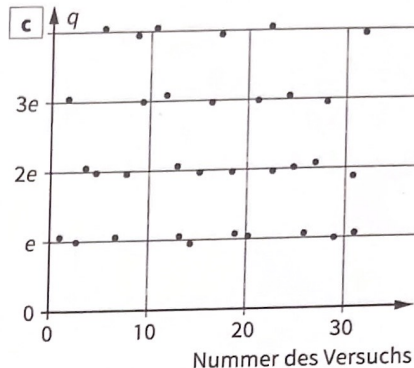
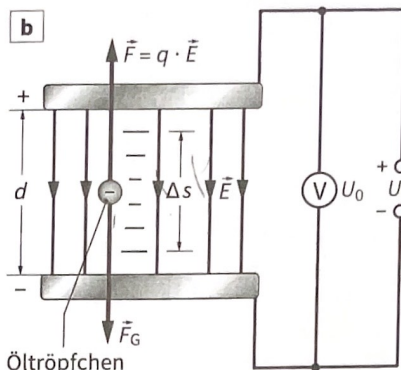
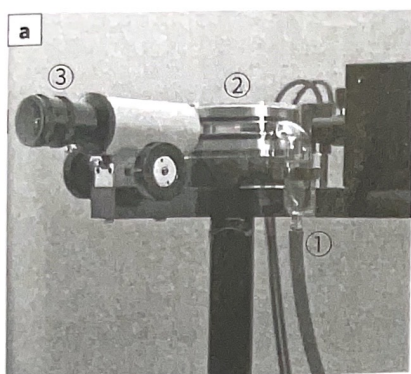
Lösung:

- a) Mit der Elektronenmasse $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ ergibt sich aus Gleichung (1) für $U = 100 \text{ V}$ die Geschwindigkeit

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot U}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 100 \text{ V}}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}}} \approx 6,0 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Umformen von Gleichung (1) und Einsetzen der Lichtgeschwindigkeit c führt rein rechnerisch auf eine Spannung von 260 kV. Experimente zeigen jedoch im Einklang mit der Speziellen Relativitätstheorie von A. EINSTEIN, dass die Lichtgeschwindigkeit nicht erreicht wird. Der Energieaufwand zum Beschleunigen wird immer weiter zunimmt. Gleichung (1) kann also bei hohen Teilchengeschwindigkeiten nicht verwendet werden.

V1 Millikan-Versuch



Mit einem Zerstäuber ① werden kleine Öltröpfchen zwischen die horizontalen Platten des Kondensators ② gebracht. Viele Tröpfchen werden dabei elektrisch geladen. Mit dem Mikroskop ③ beobachtet man den Raum zwischen den beiden Kondensatorplatten und misst die Bewegung einzelner Tröpfchen. Liegt am Kondensator keine Spannung an, sieht man Tröpfchen, die aufgrund der Schwerkraft sinken. Wird über das Steuerungsgerät an den Kondensator eine Spannung angelegt (obere Platte positiv), steigen die negativ geladenen Tröpfchen zur oberen Platte auf.

Bei der **Schwebemethode** wird ein einzelnes Öltröpfchen im Kondensator zunächst durch Einstellung der Kondensatorspannung U mit dem Steuergerät zum Schweben gebracht. Die auf das Tröpfchen wirkende elektrische Kraft $F_{el} = q \cdot \frac{U}{d}$ (q : Ladung des Tröpfchens, d : Plattenabstand und U : Spannung) und die Gewichtskraft F_G sind dann im Kräftegleichgewicht, sofern Auftrieb vernachlässigt wird:

$$F_{el} = F_G.$$

Die elektrische Ladung des Tröpfchens beträgt daher

$$q = F_G \cdot \frac{d}{U} \quad (1)$$

Die Spannung U lässt sich sehr genau messen und der Plattenabstand d ist präzise bekannt. Die Tröpfchen sind jedoch so klein, dass ihr Radius nicht direkt gemessen und F_G nicht aus der Dichte des Öls, dem Radius r und dem Ortsfaktor g berechnet werden kann. Es ist eine zweite Messung am selben Tröpfchen nötig: Die Kondensatorspannung wird dazu auf 0 V geregelt; auf das Tröpfchen wirkt nun keine elektrische Kraft. Es sinkt im Gravitationsfeld der Erde zur unteren Kondensatorplatte. Aufgrund der Luftreibung stellt sich nach kurzer Zeit eine konstante Fallgeschwindigkeit v ein, die durch eine Längen- und Zeitmessung bestimmt wird. Die Analyse der Reibungsgesetze zeigt, dass Gewichtskraft F_G und Geschwindigkeit v nach $F_G = k \cdot v^{\frac{1}{2}}$ zusammenhängen, wobei k eine Konstante ist, in die u. a. Eigenschaften des Öls eingehen. F_G ist damit bestimmt und die Ladung kann mit Gleichung (1) berechnet werden. Bild c zeigt Messwerte in einer grafischen Darstellung.

Arbeitsaufträge

- 1 ➔ Berechnen Sie, um welchen Faktor die Geschwindigkeit von Elektronen in einer Elektronenkanone zunimmt, wenn die Beschleunigungsspannung verdoppelt, verdreifacht und vierfold wird.

$$\sqrt{2} \quad \sqrt{3} \quad 2$$

- 2 Eine braunsche Röhre wird mit der Beschleunigungsspannung $U = 250$ V betrieben. Bei $U_y = 45$ V beträgt die Ablenkung $y = 1,5$ cm.

a) Berechnen Sie die Kondensatorspannung U_y für $y = 5$ cm.

$$\frac{45V}{x} = \frac{1,5cm}{5cm}$$

$$x = 150V$$

- b) U wird auf 200 V reduziert. Berechnen Sie die Ablenkung y für $U_y = 45$ V und die zu $y = 5$ cm gehörende Spannung U_y .

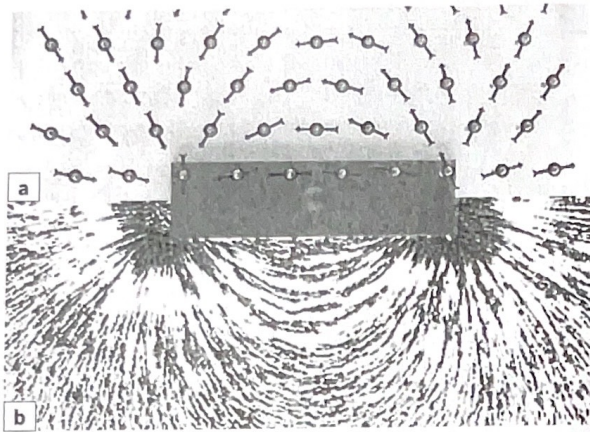
$$U_{y,2} = 120V$$

- 3 ↑ Bei einem Versuch zur Bestimmung der Elementarladung e ergeben sich Häufungen der Messwerte bei folgenden Ladungen der Öltröpfchen:

$$6,4 \cdot 10^{-19} \text{ C}; 9,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}; 16,0 \cdot 10^{-19} \text{ C}.$$

Begründen Sie, auf welchen größtmöglichen Wert für e aufgrund dieser Messergebnisse geschlossen werden kann.

4.8 Magnetische Flussdichte und Lorentzkraft



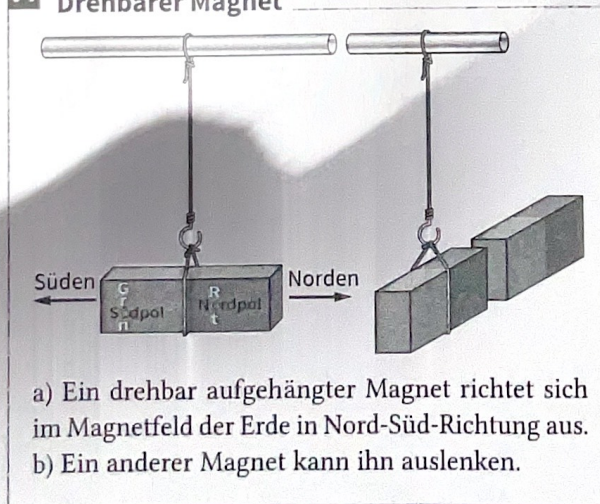
B1 Ein Stabmagnet liegt a) auf einem Plastikbrett mit Kompassnadeln, b) auf einer mit Eisenfeilspänen bestreuten Glasplatte

Magnetisches Feld. Magnete ziehen magnetisierbare Stoffe wie Eisen an. Auf nicht magnetisierbare Stoffe üben Magnete keine Kräfte aus, sie haben keine Wirkung. Magnete wirken auch über große Entfernungen hinweg.

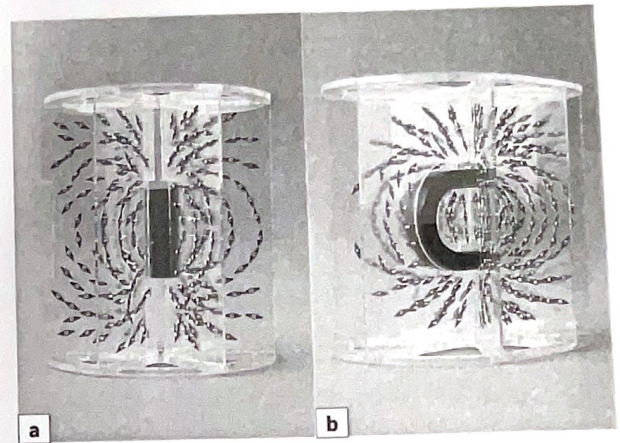
Ein Permanentmagnet hat **Pole**. Das sind die Stellen, an denen magnetisierbare Stoffe am stärksten angezogen werden. Sie tragen die Namen **Nord-** und **Südpol**. Hängt man wie in Versuch **V1** einen Stabmagneten drehbar auf, so stellt er sich in Nord-Süd-Richtung ein. Der nach Norden zeigende Pol heißt Nordpol (oft rot gekennzeichnet), der nach Süden weisende Pol heißt Südpol (häufig grün).

Verschiedenartige Pole ziehen sich an, gleichartige Pole stoßen sich ab. Nord- oder Südpole treten nie einzeln

V1 Drehbarer Magnet



a) Ein drehbar aufgehängter Magnet richtet sich im Magnetfeld der Erde in Nord-Süd-Richtung aus.
b) Ein anderer Magnet kann ihn auslenken.



B2 Dreidimensionale Veranschaulichung des magnetischen Feldes a) eines Stabmagneten und b) eines Hufeisenmagneten

auf, anders als positive oder elektrische Ladungen. Es gibt nur magnetische Dipole mit Nord- und Südpol. Teilt man einen Stabmagneten in zwei Teile, so erhält man wieder zwei Dipole.

Magnetische Kräfte wirken sogar durch den luftleeren Raum. Diese Wirkung wird auf das vom Magneten erzeugte **magnetische Feld** (oder **Magnetfeld**) zurückgeführt: Ein Magnet erzeugt ein Magnetfeld, das den umgebenden Raum erfüllt; ein Eisenkörper im Magnetfeld erfährt eine Kraft. Das Magnetfeld wird – wie das elektrische Feld – mit **Feldlinien** veranschaulicht. Magnetische Feldlinien zeigen stets in die Richtung, in die der Nordpol einer Kompassnadel oder eines kleinen Stabmagneten zeigt. Die Gesamtheit der Feldlinien in einem Magnetfeld bezeichnet man als **Feldlinienbild**.

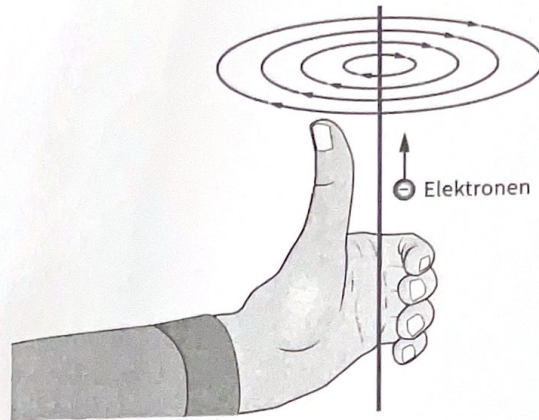
! Merksatz

Ein Magnet erzeugt ein Magnetfeld. Es lässt sich mit Feldlinien veranschaulichen. Die Feldlinien zeigen stets in die Richtung, in die sich der Nordpol einer Kompassnadel ausrichtet.

Das Feldlinienbild eines Magneten lässt sich mit kleinen Kompassnadeln oder magnetisierbaren Stoffen wie Eisenfeilspänen (kleine Eisennadeln) sichtbar machen (Bild **B1**, **B2**). Dort, wo Feldlinien geradlinig und parallel laufen, bezeichnet man das Feld als **homogen**. Ein homogenes Feld liegt in guter Näherung zwischen den entgegengesetzten Polen eines Hufeisenmagneten vor (Bild **B2b**).

Magnetfelder stromdurchflossener Leiter. Nicht nur Permanentmagnete, sondern auch stromdurchflossene Leiter haben ein magnetisches Feld. Ein stromdurchflossener gerader Draht erzeugt ein Magnetfeld, dessen Feldlinien geschlossene Kreise um den Draht bilden (Bild B3).

Die Richtung dieses Magnetfeldes bestimmt man nach der **Linke-Faust-Regel**: Man umfasst den Leiter so mit der linken Faust, dass der abgespreizte Daumen in Richtung des Stromes der Elektronen zeigt (von – nach +). Die gekrümmten Finger geben die Richtung der Magnetfeldlinien an (Bild B3).

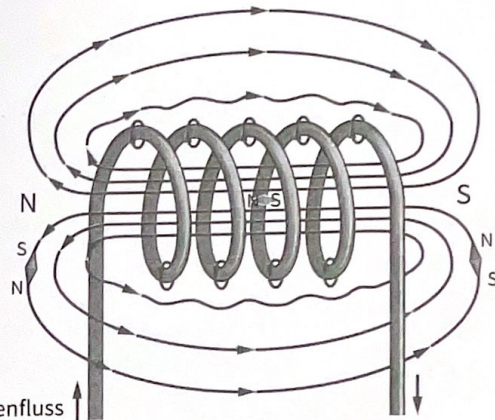


B3 Magnetfeld um einen stromdurchflossenen Draht

In stromdurchflossenen Spulen überlagern sich die Magnetfelder der einzelnen Leiterschleifen (Windungen). Für kleine, näherungsweise gerade Leiterteilstücke lässt sich auch hier die Linke-Faust-Regel verwenden. Die Feldlinien sind geschlossen (Bild B4). Im Innern einer langen Spule ist das Feld homogen. Außerhalb der Spule ähnelt das Feldlinienbild dem eines Stabmagneten mit Nord- und Südpol.

! Merksatz

Stromdurchflossene Leiter erzeugen magnetische Felder mit geschlossenen Feldlinien.

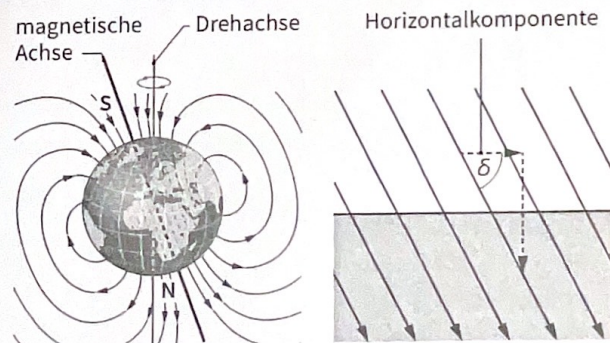


B4 Magnetfeld um eine stromdurchflossene Spule

≡ Exkurs: Das Magnetfeld der Erde

Eine Kompassnadel richtet sich in Nord-Süd-Richtung aus – die Erde hat also ein Magnetfeld. Der Nordpol der Nadel weist nach Norden. Folglich liegt der magnetische Südpol in der Nähe des geografischen Nordpols. Die genaue Position ändert sich ständig, denn die Pole wandern im Laufe der Jahre geringfügig. Das Magnetfeld der Erde sieht vereinfacht aus wie das eines Stabmagneten, dessen Pole im Erdinneren liegen. Da die Magnetpole nicht mit den geografischen Polen übereinstimmen, zeigt eine Kompassnadel nicht genau nach Norden. Die Abweichung von der Nordrichtung heißt **Misweisung** oder **Deklination**. Sie beträgt in Deutschland nur wenige Grad nach Westen.

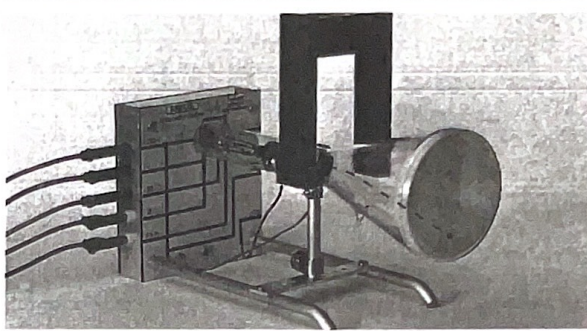
Die Feldlinien des Erdmagnetfeldes schneiden die Erdoberfläche unter dem Inklinationswinkel δ . Dieser ist in Äquaturnähe 0° , an den Magnetpolen 90° groß. In Deutschland nimmt er von Süden nach Norden zu, von 63° bis 70° .



Die Feldlinien des Erdmagnetfeldes stehen schräg zur Erdoberfläche. Man unterscheidet beim Erdmagneten zwischen einer Vertikalkomponente senkrecht zur Erdoberfläche und einer Horizontalkomponente parallel zur Erdoberfläche. Eine übliche Kompassnadel reagiert nur auf die Horizontalkomponente, da sie sich nur in der Horizontalebene drehen kann. Das Erdmagnetfeld ist recht schwach. Dennoch kann es bei Präzisionsexperimenten stören.

V3 Ablenkung freier Elektronen im Magnetfeld

In einer evakuierten Röhre werden mit einer Elektronenkanone (vgl. Seite 146) Elektronen der Geschwindigkeit v erzeugt, die sich in horizontaler Richtung bewegen. Sie treten in das annähernd homogene Magnetfeld eines Hufeisenmagneten ein, werden dort abgelenkt und treffen auf einen Leuchtschirm auf der Röhrenwand. Diese Anordnung führt zu einer Ablenkung der Elektronen nach unten. Wird der Magnet um 180° vertikal gedreht, werden die Elektronen nach oben abgelenkt.



! Merksatz

Ist I die Stromstärke in einem Leiter, l_w die wirksame Leiterlänge und $\vec{F}$ die darauf wirkende Kraft in einem Magnetfeld, dann heißt der Vektor $\vec{B}$ mit Betrag

$$B = \frac{F}{I \cdot l_w} \text{ und der Einheit } [B] = 1 \frac{\text{N}}{\text{Am}} = 1 \text{ T (Tesla)}$$

magnetische Flussdichte (auch: magnetische Feldstärke). Seine Richtung ist gleich der Richtung der magnetischen Feldlinien.

Versuch V3 zeigt, dass auch auf freie, bewegliche Elektronen in einem Magnetfeld eine Kraft wirkt: Elektronen mit einer Geschwindigkeit v werden in einem Magnetfeld abgelenkt, wobei die Ablenkung am größten ist, wenn $\vec{v}$ und $\vec{B}$ senkrecht zueinander stehen. Die Richtung der Kraft $\vec{F}$ kann mit der Drei-Finger-Regel der linken Hand bestimmt werden. Auf ruhende elektrische Ladungen wirkt keine Kraft. Ebenso wirkt keine Kraft, wenn sich die Ladungen parallel zu den magnetischen Feldlinien bewegen. Die magnetische Kraft auf bewegte Ladungen heißt **Lorentzkraft**.

Nimmt man vereinfacht einen Elektronenfluss aus N Elektronen (Ladung e) mit konstanter Geschwindigkeit v senkrecht zum Magnetfeld der Flussdichte B an, dann ist die Stromstärke gegeben durch

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{N \cdot e}{t}$$

Während der Zeit t legen die Elektronen eine Strecke $s = v \cdot t$ zurück. Damit gilt also:

$$I = \frac{N \cdot e \cdot v}{l}$$

Gemäß der Definition der magnetischen Flussdichte B wirkt auf diesen Elektronenstrom die Kraft

$$F = B \cdot I \cdot l = B \cdot N \cdot e \cdot v$$

Auf ein einzelnes Elektron wirkt daher die Kraft:

$$F_L = e \cdot v \cdot B$$

! Merksatz

Elektronen, die sich mit der Geschwindigkeit v senkrecht zu einem Magnetfeld mit magnetischer Flussdichte B bewegen, erfahren die Lorentzkraft mit dem Betrag

$$F_L = e \cdot v \cdot B$$

Die Richtung der Lorentzkraft bestimmt man mit der Drei-Finger-Regel der linken Hand.

Arbeitsaufträge

- Ein Eisenstück wurde magnetisiert. Erläutern Sie Ihr Vorgehen zur Bestimmung der Pole, wenn
a) ein zweiter Magnet mit bekannten Polen,
b) kein zweiter Magnet vorhanden ist.
- ➡ Ein Leiter von 4 cm Länge führt einen Strom von 10 A. Er erfährt die Kraft 20 cN, wenn er senkrecht zu den Feldlinien eines Magnetfeldes steht. Berechnen Sie die magnetische Flussdichte.
- ➡ In Versuch V2 habe B den Wert 0,4 T, die wirksame Leiterlänge sei $l_w = 5$ cm, die Stromstärke im Rahmen sei $I = 5$ A. Berechnen Sie den Betrag der Kraft, mit der der Rahmen nach unten gezogen wird.

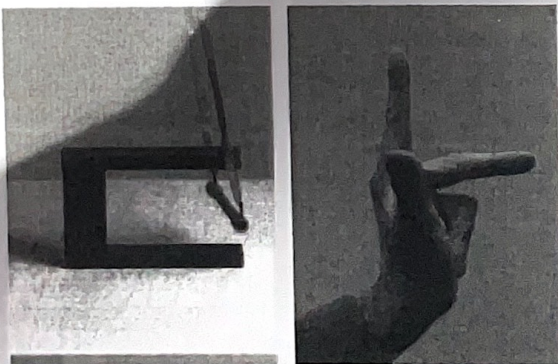
$$2) B = \frac{0,2 \text{ N}}{10 \text{ A} \cdot 0,04 \text{ m} \cdot \sin 90^\circ} = 0,5 \text{ T}$$

$$3) F_L = B \cdot I \cdot l = 0,4 \text{ T} \cdot 5 \text{ A} \cdot 0,05 \text{ m} = 0,1 \text{ N}$$

Magnetische Kraft auf bewegte Ladungen. Versuch V1 zeigt, dass auf einen stromdurchflossenen Leiter in einem äußeren Magnetfeld eine Kraft wirkt, sofern der Leiter nicht parallel zu den Feldlinien dieses Feldes orientiert ist. Die Kraft ist maximal, wenn der Leiter senkrecht zu den Feldlinien steht. Die Richtung der Kraft lässt sich mit der **Drei-Finger-Regel der linken Hand** feststellen: Der Daumen der linken Hand zeigt in Richtung des Elektronenflusses im Leiter (von – nach +), der Zeigefinger zeigt in Richtung der Feldlinien des äußeren Magnetfeldes. Der Mittelfinger wird nun senkrecht zu Daumen und Zeigefinger gestellt. Er weist in die Richtung der wirkenden Kraft. Sie steht also stets senkrecht zu Stromrichtung und Feldlinien.

Mit Versuch V2 lässt sich ein Maß für die Stärke eines Magnetfeldes festlegen, ähnlich wie beim elektrischen Feld. Dazu wird eine Leiterschleife von einem Strom der Stärke I durchflossen und in ein homogenes Magnetfeld gehängt, das in die Zeichenebene zeigt (gekennzeichnet durch: $\otimes$; aus der Zeichenebene heraus: $\odot$). Die Kraft F ist proportional zur Stromstärke I ($F \sim I$) und zur wirksamen Leiterlänge l_w ($F \sim l_w$). Dies wird auch in **Abschnitt 4.9** in den Stromwaageversuchen untersucht.

V1 Leiterschaukelversuch



Eine Leiterschaukel besteht aus einem stromdurchflossenen geraden Leiter, der an seinen Stromzuführungen beweglich aufgehängt ist und schaukeln kann.

Der Leiter wird in das magnetische Feld eines Hufeisenmagneten gebracht. Fließt kein elektrischer Strom, so bewegt sich der Leiter nicht. Im anderen Fall bewegt sich die Leiterschleife aus dem Hufeisenmagneten heraus oder in ihn hinein. Die Richtung der Kraft auf den Leiter lässt sich stets mit der Drei-Finger-Regel der linken Hand bestimmen.

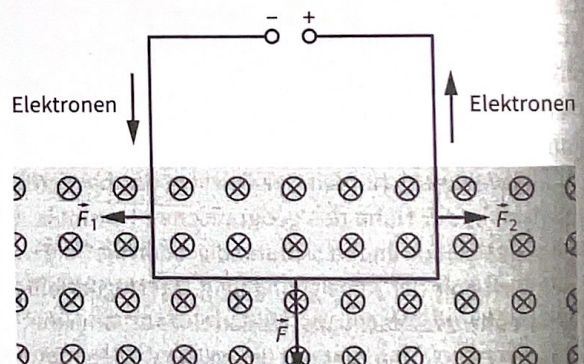
Die Beziehung $F \sim l_w$ drückt aus, dass der Betrag der Kraft davon abhängt, wie die Leiterschleife im Magnetfeld ausgerichtet ist. Im allgemeinen Fall ist l_w die Projektion von l senkrecht zur Feldlinienrichtung, also stets $l \geq l_w$. Insgesamt gilt somit $F \sim I \cdot l_w$. Die Quotienten

$$B = \frac{F}{I \cdot l_w} \quad (1)$$

sind konstant und unabhängig von speziellen Werten der Stromstärke I und der wirksamen Leiterlänge l_w , jedoch für unterschiedliche Magnetfelder unterschiedlich groß. Es wird dasjenige Feld als das stärkere angesehen, das auf den Rahmen bei gleichen I und l_w die größere Kraft ausübt. Nach Gleichung (1) ist somit auch B größer. B ist also eine Größe, die zur Kennzeichnung der Stärke von Magnetfeldern geeignet ist.

Als Maß für die Stärke von Magnetfeldern führt man daher den Vektor $\vec{B}$ ein. Sein Betrag ist durch Gleichung (1) definiert, seine Richtung ist gleich der Richtung der Magnetfeldlinien. $\vec{B}$ bezeichnet man aus historischen Gründen als **magnetische Flussdichte**. Sie wird heute auch magnetische Feldstärke genannt. Ihre Einheit ist $1 \frac{\text{N}}{\text{Am}}$, auch 1 Tesla genannt. Statt von „Magnetfeld“ spricht man oft auch kurz vom „B-Feld“.

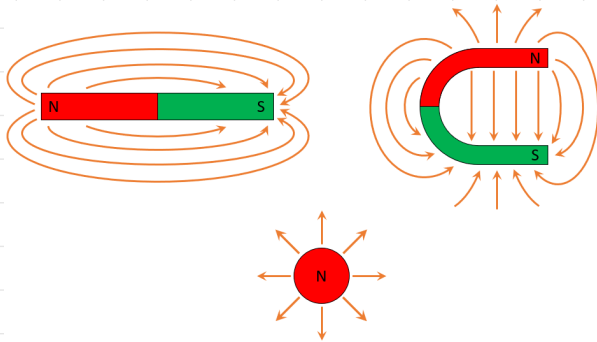
V2 Drahtrahmen im homogenen Magnetfeld



Eine rechteckförmige, stromdurchflossene Leiterschleife wird in ein homogenes Magnetfeld eingebracht. Die drei Seitenteile erfahren unterschiedliche Kräfte $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$ und $\vec{F}$. Nach der Drei-Finger-Regel der linken Hand sind $\vec{F}_1$ und $\vec{F}_2$ entgegengesetzt gerichtet. Sie sind gleich groß und heben sich auf, so dass auf die Leiterschleife keine resultierende Kraft in horizontaler Richtung wirkt, sondern nur die Kraft $\vec{F}$ vertikal nach unten. Der Betrag von $\vec{F}$ ist am größten, wenn das untere Seitenteil des Rahmens senkrecht zu den Magnetfeldlinien steht. $\vec{F}$ ist null, wenn es parallel zu den Feldlinien steht.

Magnetismus

Die Richtung der magnetischen Feldlinien ist die Richtung, in die sich der Nordpol einer dort frei beweglich aufgestellten Magnetradel einstellt.



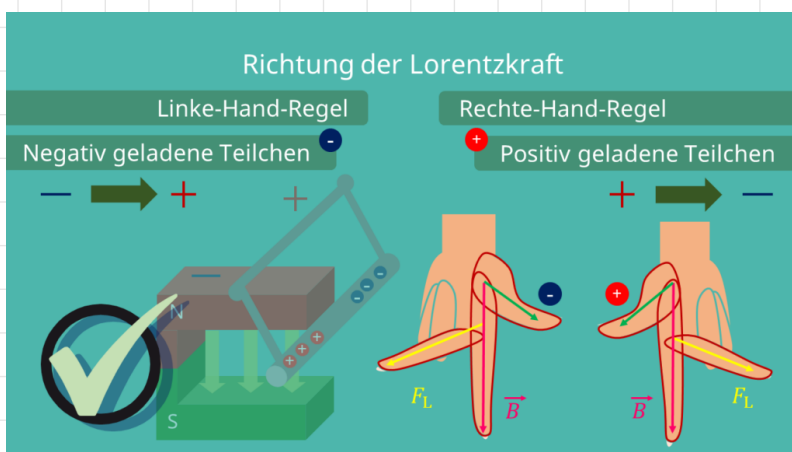
Magnetische Feldlinien haben keinen Anfang und kein Ende, sie sind stets geschlossen.

Ein im Magnetfeld senkrecht zu Feldrichtung verlaufender stromdurchflossener Leiter erfährt eine Kraft, die sowohl senkrecht zur Feldrichtung als auch zur Richtung des Stroms.

Die können wir uns durch die drei Finger Regel der linken Hand merken.

Der Daumen zeigt die Bewegungsrichtung der Elektronen, der ausgestreckte Zeigefinger die Feldrichtung und der ausgestreckte Mittelfinger zeigt die Richtung der auf den Leiter wirkenden Kraft an.

Diese Kraft ist die Lorentzkraft und wird durch folgende Formel beschrieben.



Die Lorentzkraft

Kraft auf einen Leiter

$$F = q \cdot v \cdot B$$

↓

$$F = I \cdot L \cdot B$$

! Merksatz

Ist I die Stromstärke in einem Leiter, l_w die wirksame Leiterlänge und $\vec{F}$ die darauf wirkende Kraft in einem Magnetfeld, dann heißt der Vektor $\vec{B}$ mit Betrag

$$B = \frac{F}{I \cdot l_w} \text{ und der Einheit } [B] = 1 \frac{\text{N}}{\text{Am}} = 1 \text{ T (Tesla)}$$

magnetische Flussdichte (auch: magnetische Feldstärke). Seine Richtung ist gleich der Richtung der magnetischen Feldlinien.

Die magnetische Fluss dichte B hat den Betrag

$$B = \frac{F_L}{I \cdot l \cdot \sin \alpha}$$

$$F_L = I \cdot l \cdot \sin \alpha = \frac{Q}{t} \cdot l \cdot B \cdot \sin \alpha = Q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha =$$

$$= n \cdot e \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha$$

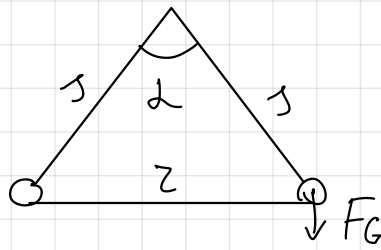
Anzahl der Teilchen → *Elementarladung* → *Geschwindigkeit der Teilchen*

$$1) m = 7 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

$$s = 0,25 \text{ m}$$

$$\angle = 10^\circ$$

$$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{V} \cdot \text{m}}$$



$$F_G = m \cdot g$$

$$F_c = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{z^2} = 6,01 \text{ mN}$$

$$\frac{F_c}{F_G} = \tan \frac{\angle}{2}$$

$$b) q_1 = q_2 = q$$

$$F_c = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q^2}{z^2}$$

$$q^2 = F_c \cdot 4\pi \cdot \epsilon_0 \left(2 \cdot \sin \frac{\angle}{2} \cdot s \right)^2$$

$$q = \sqrt{F_c \cdot 4\pi \cdot \epsilon_0 \left(2 \cdot \sin \frac{\angle}{2} \cdot s \right)^2}$$

$$q_{ges} = 2q = 4,82 \cdot 10^{-8} \text{ C}$$

$$26 \quad 312,05 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$\frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} k x^2$$

$$⑤ \quad 2,74 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$⑥ \quad U = E_{\text{kin}} \cdot 4 \sin L \cdot \cos L \cdot \frac{d}{g \cdot b}$$

$$F = g \cdot E = g \cdot \frac{U}{d}$$

$$s_x = -\frac{1}{2} a_x t^2 + U_{0,x} t = 0$$

$$s_y = U_{0,y} \cdot t$$

$$t = \frac{s_y}{U_{0,y}} = \frac{b}{U_{0,y}}$$

$$U_{0,x} = U_0 \cdot \cos L$$

$$U_{0,y} = U_0 \cdot \sin L$$

$$F = ma \Rightarrow a = \frac{F}{m}$$



$$0 = -\frac{1}{2} \cdot \frac{F_{\text{el}}}{m} \cdot \left(\frac{b}{U_{0,y} \sin L} \right)^2 + U_0 \cos L \cdot \frac{b}{U_0 \sin L}$$

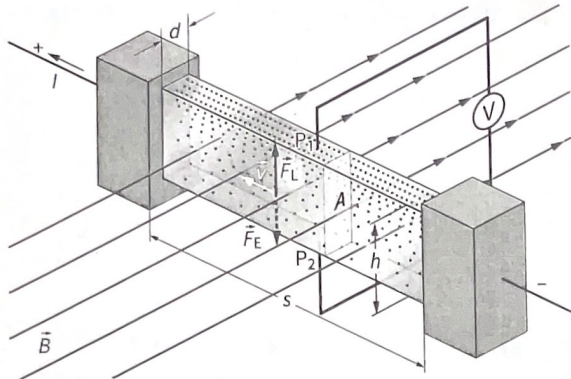
$$0 = -\frac{1}{2} g \cdot \frac{U}{d \cdot m} \cdot \left(\frac{b}{U_{0,y} \sin L} \right)^2 + \cancel{U_0} \cdot \cos L \cdot \frac{b}{\cancel{U_0} \sin L}$$

$$\frac{g U b^2}{2 d m U_{0,y}^2 \sin^2 L} = \frac{\cos L \cdot b}{\sin L}$$

$$4 E_{\text{kin}} = 2 m U^2$$

$$U = \frac{2 m U_0^2 \cdot d \cdot \sin^2 L \cdot \cos L \cdot b}{g \cdot b^2 \sin L} = E_{\text{kin}} \cdot 4 \cdot \sin L \cdot \cos L \cdot \frac{d}{g \cdot b}$$

4.10 Halleffekt und Messung magnetischer Flussdichten



B1 Halleffekt an einem Leiterplättchen

Halleffekt. Statt aus einer aufwendigen Kraftmessung lässt sich die Flussdichte B auch aus einer Spannungsmessung gewinnen. Die Elektronen im Leiterplättchen (Höhe h , Dicke d) in Bild **B1** werden im homogenen Magnetfeld $\vec{B}$ durch die Lorentzkraft abgelenkt und sammeln sich oben im Plättchen, während unten ein Überschuss an positiver Ladung entsteht. Dieser Vorgang dauert aber nur so lange an, bis das durch diese Ladungstrennung erzeugte elektrische Feld der Feldstärke $\vec{E}$ so groß ist, dass die nach unten gerichtete elektrische Kraft vom Betrag F_{el} auf die Elektronen genauso groß ist wie der Betrag der Lorentzkraft F_L . Es gilt also: $F_{el} = F_L$. Zwischen zwei gegenüberliegenden Punkten P_1 und P_2 am oberen und unteren Rand des Plättchens lässt sich jetzt die **Hallspannung** $U_H = E \cdot h$ messen, benannt nach E. HALL (1855–1938). Für die Kraft im elektrischen Feld gilt:

$$F_{el} = e \cdot E = e \cdot \frac{U_H}{h}.$$

Wegen $F_{el} = F_L$ und $F_L = e \cdot v \cdot B$ erhält man somit

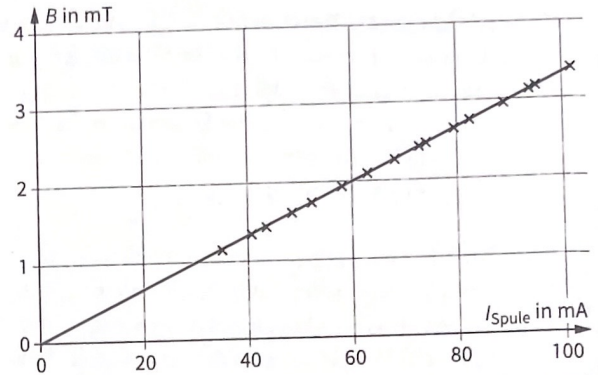
$$e \cdot \frac{U_H}{h} = e \cdot v \cdot B \Leftrightarrow U_H = B \cdot v \cdot h. \quad (1)$$

Im einfachsten Modell der elektrischen Leitung wird angenommen, dass sich die frei beweglichen Elektronen im Material aufgrund der Stöße an den festen Atomrümpfen mit einer konstanten Driftgeschwindigkeit v bewegen. Der elektrische Strom hängt von der Anzahl der freien Elektronen N pro Volumenelement V des Plättchenmaterials ab, d. h. von der Elektronendichte n . U_H ergibt sich dann zu (Herleitung s. S. 165):

$$U_H = R_H \cdot I \cdot \frac{B}{d},$$

mit der nur vom Material des Plättchens abhängigen **Hallkonstante**

$$R_H = \frac{1}{n \cdot e}.$$



B2 Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit vom Spulenstrom I

! Merksatz

Die Hallspannung U_H ist proportional zur Stromstärke I , zur magnetischen Flussdichte B und zum Kehrwert der Dicke d des Leiters:

$$U_H = R_H \cdot I \cdot \frac{B}{d}.$$

R_H ist die materialabhängige Hallkonstante.

Hallsonden. Geräte zur präzisen Messung von Magnetfeldern auf Basis des Halleffekts heißen Hallsonden. Sie bestehen aus Materialien mit einer großen Hallkonstante, damit eine gut messbare Hallspannung entsteht. Um aus der Proportionalität $B \sim U_H$ auf den Betrag von B (in Tesla) schließen zu können, muss man die Hallsonde in einem bekannten Magnetfeld kalibrieren.

Wird eine Hallsonde in einem Magnetfeld $\vec{B}$ gedreht, so ändert sich die Anzeige. Sie misst nur Komponenten von $\vec{B}$ senkrecht zum Plättchen. Aufgrund von Störfeldern und anderen Einflüssen zeigen Hallsonden eine **Offset-Spannung** an, obwohl sie weit von dem zu messenden Magnetfeld entfernt sind. Messwerte für U_H müssen um diese Offset-Spannung korrigiert werden.

Magnetische Flussdichte und Stromstärke. Eine Hallsonde wird in der Umgebung einer stromdurchflossenen Spule, zum Beispiel im Mittelpunkt, platziert. Spule und Hallsonde sind ortsfest. Die Stärke I_{Spule} des Spulenstroms wird verändert. Aus den korrigierten Hallspannungswerten wird mit dem Kalibrierungsfaktor der Sonde der Betrag der magnetischen Flussdichte B in Abhängigkeit von I_{Spule} bestimmt. Bild **B2** zeigt den proportionalen Zusammenhang zwischen B und I_{Spule} . Es gilt also: $B \sim I_{Spule}$.

Magnetfeld einer Leiterschleife. Versuch v1 zeigt, wie die magnetische Flussdichte von Leiterschleifen oder Spulen räumlich mit einer Hallsonde untersucht wird. Das Magnetfeld kann entlang der Symmetrieachse oder in dazu parallelen Achsen im Inneren und außerhalb der Spulen untersucht werden.

Stromdurchflossene Leiterschleifen und gerade Spulen, die im Vergleich zu ihrem Durchmesser eine geringe Länge haben (**kurze Spulen**), erzeugen ein inhomogenes Magnetfeld. Bild B3 zeigt die magnetische Flussdichte entlang der Symmetrieachse einer stromdurchflossenen kurzen Spule. Die Richtung des magnetischen Feldes zeigt an jeder Position auf der Symmetrieachse in Richtung der Achse. Der Betrag von B ist maximal im Mittelpunkt der Spule und nimmt nichtlinear mit dem Abstand zum Mittelpunkt auf 0 T ab.

Magnetfeld im Inneren einer langen Spule. Mit einer Hallsonde werden wie in Versuch v1 magnetische Flussdichten in geraden, sehr langgestreckten Spulen (kurz: **lange Spulen**) untersucht. Das Magnetfeld im Inneren langer Spulen ist homogen, d. h. in Richtung und Betrag konstant (Bild B4). Es ist parallel zu Spulenachse orientiert. Außerhalb der Spule fällt B auf 0 T ab. In verschiedenen Messreihen zeigt sich, dass der Betrag von $\vec{B}$ proportional zur Stromstärke I durch die Spule, zur Windungszahl N und umgekehrt proportional zur Länge l der Spule ist, wenn die jeweils anderen Parameter konstant bleiben. B hängt jedoch nicht von der Größe der Querschnittsfläche der Spule ab. Es ist also $B \sim N \cdot \frac{I}{l}$ bzw. als Gleichung:

$$B = \mu_0 \cdot \frac{N}{l} \cdot I.$$

Die Proportionalitätskonstante μ_0 heißt **magnetische Feldkonstante**. Sie ist eine Naturkonstante:

$$\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}.$$

! Merksatz

Für den Betrag der magnetischen Flussdichte $\vec{B}$ im Inneren einer langen Spule gilt:

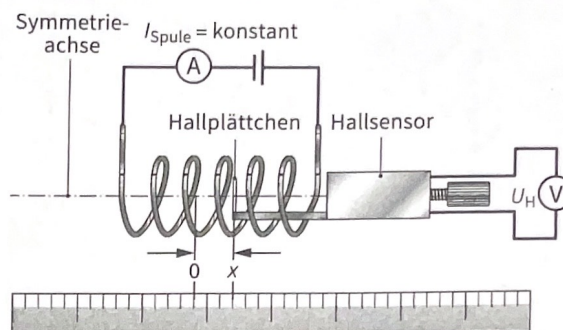
$$B = \mu_0 \cdot \frac{N}{l} \cdot I.$$

Dabei ist N die Anzahl der Windungen, l die Länge der Spule, I die Stromstärke in einer Windung.

μ_0 ist die magnetische Feldkonstante:

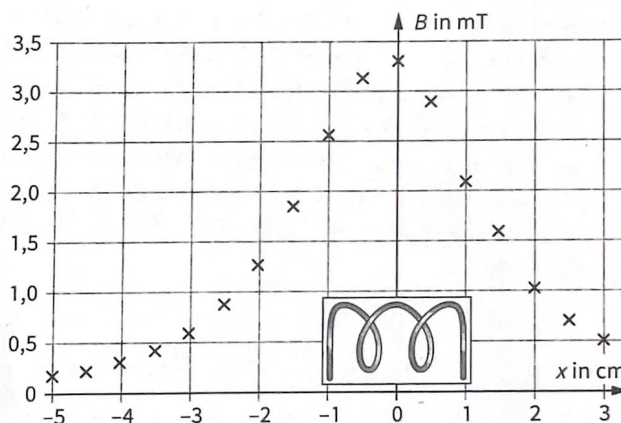
$$\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}.$$

v1 Messung der magnetischen Flussdichte

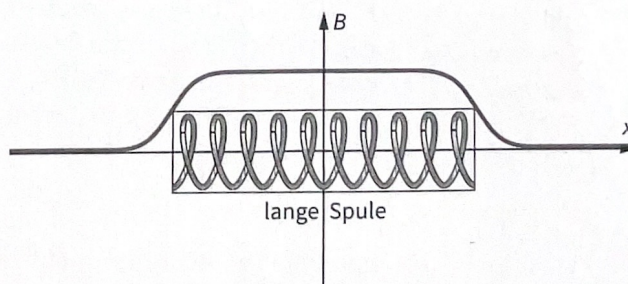


Zur Messung der magnetischen Flussdichte B entlang der Symmetrieachse einer stromdurchflossenen, raumfesten Spule wird eine kalibrierte Hallsonde entlang der Achse verschoben. Die Hallspannungswerte werden an Positionen x gemessen.

Nach der Korrektur um die Offset-Spannung werden aus den Messwerten die Werte für die magnetische Flussdichte an den Positionen x mit Hilfe des Kalibrierungsfaktors der Sonde berechnet.



B3 Magnetische Flussdichte in einer kurzen Spule entlang der Symmetrieachse



B4 Magnetische Flussdichte in einer langen Spule entlang der Symmetrieachse

Einfluss des Materials. Spulen zur Erzeugung von Magnetfeldern sind häufig mit Material gefüllt, um die magnetischen Felder zu vergrößern. Der Elektromagnet ist dafür ein Beispiel. In Versuch V1 wird untersucht, welche Materialien den gewünschten Effekt haben.

Es gibt kaum einen Unterschied zwischen mit Luft gefüllten Spule und Spulen im Vakuum. Dagegen führen mit Eisen gefüllte Spulen zu deutlich größeren Magnetfeldern. Das Verhältnis der Flussdichten mit Materie (B_m) und ohne (B_0) wird **Permeabilitätszahl** genannt:

$$\mu_r = \frac{B_m}{B_0}$$

Sie ist eine nicht immer konstante Materialeigenschaft ohne Dimension (Tabelle T1). Sie variiert über viele Größenordnungen. Für Materialien wie beispielsweise reines Eisen hängt sie von der anfänglichen Magnetisierung ab.

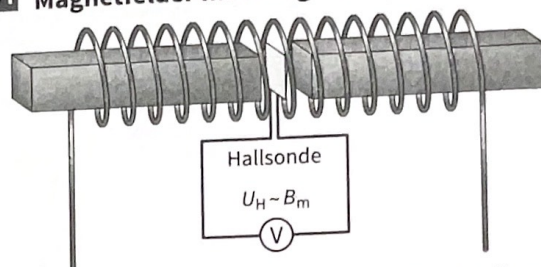
! Merksatz

Die magnetische Flussdichte B_m in einer mit Materie gefüllten langen Spule ist

$$B_m = \mu_r \cdot B_0$$

Dabei ist B_0 die magnetische Flussdichte der mit Luft gefüllten Spule und μ_r die Permeabilitätszahl des Materials.

V1 Magnetfelder materiegefüllter Spulen



Bei konstanter Stromstärke wird mit einer Hallsonde die Flussdichte B_m innerhalb einer mit unterschiedlichen Stoffen gefüllten langen Spule gemessen.

Die magnetische Flussdichte B_m ist im Vergleich zur Flussdichte B_0 einer mit Luft gefüllten Spule in der Regel deutlich erhöht. Die Permeabilitätszahl

$$\mu_r = \frac{B_m}{B_0}$$

variiert sehr stark (Tabelle T1).

Material	Permeabilitätszahl μ_r
Luft	≈ 1
Gold, Silber, Kupfer	≈ 1
Eisen	≈ 500 bis $15\,000$
μ -Metall	$\approx 12\,000$ bis $45\,000$

T1 Permeabilitätszahlen: typische Werte und Wertebereiche

Arbeitsaufträge

1 → Durch eine Silberfolie ($h = 1\text{ cm}$, $d = 0,1\text{ mm}$) fließt ein Strom der Stärke $I = 1,9\text{ A}$. Sie wird von einem Magnetfeld der Flussdichte $B = 0,3\text{ T}$ durchsetzt. Man misst die Hallspannung $U_H = 0,51\text{ }\mu\text{V}$. Berechnen Sie die Dichte n der freien Elektronen und deren Driftgeschwindigkeit v .

2 ↗ Die Länge einer Spule mit 40 Windungen kann man wie bei einer Ziehharmonika ändern.
a) Berechnen Sie die Stromstärke, die im Inneren der Spule bei einer Länge von 30 cm eine magnetische Feldstärke $B = 0,02\text{ mT}$ erzeugt.
b) Die Spule wird nun auf 20 cm zusammengedrückt. Berechnen Sie den neuen Wert für B .

3 ↑ Begründen Sie, warum an den Enden einer langen Spule die magnetische Flussdichte genau halb so groß ist wie in ihrer Mitte.

4 ↗ Die magnetische Flussdichte einer stromdurchflossenen Leiterschleife (Radius r) ist entlang der Symmetrieachse (x -Achse) gegeben durch:
 $B(x) = (k \cdot r^2) / [(r^2 + x^2)^{3/2}]$ mit $k = \text{konstant}$ und $x = 0\text{ m}$: Mittelpunkt der Spule.

Berechnen Sie den Abstand z vom Mittelpunkt, bei dem $B(x)$ auf
a) 50% , b) 1% des Maximalwertes abgefallen ist.

5 ↗ Die Messung zur Bestimmung der horizontalen Komponente des Erdmagnetfeldes (vgl. S. 163) ergibt: Bei einer Stromstärke von $I = 1,1\text{ mA}$ durch die beiden Spulen dreht sich der Magnet um 45° . Wenn die Stromstärke 50 mA beträgt, misst man mit der Hallsonde am Ort des Magneten eine Flussdichte von $B = 1250\text{ }\mu\text{T}$. Berechnen Sie die horizontale Komponente des Erdmagnetfeldes.

$$\textcircled{1} U_H = R_H \cdot I \cdot \frac{B}{d} \quad 29.04.25$$

$$R_H = U_H : \left(I \cdot \frac{B}{d} \right) = 0,51 \cdot 10^{-6} \text{ V} \cdot \left(1,9 \text{ A} \cdot \frac{0,3 \text{ T}}{0,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}} \right) =$$

$$= 8,947 \cdot 10^{-11}$$

$$R_H = \frac{1}{n \cdot e}$$

$$n = \frac{1}{R_H \cdot e} = \frac{1}{8,947 \cdot 10^{-11} \cdot 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C}} = 6,976 \cdot 10^{28}$$

$$U = \frac{U_H}{B \cdot h} = \frac{0,51 \cdot 10^{-6} \text{ V}}{0,3 \text{ T} \cdot 0,01 \text{ m}} = 1,7 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Halleffekt

Zwischen zwei gegenüberliegenden Randpunkten eines stromdurchflossenen Leiters, der sich in einem Magnetfeld befindet, entsteht senkrecht zur Richtung des Stromes und senkrecht zur Richtung des Magnetfeldes eine Spannung.

Diese Spannung wird größer, wenn auch das Magnetfeld größer wird.

$$F_L = F_{el}$$

$$q \cdot v \cdot B = q \cdot E = q \cdot \frac{U_H}{h} \Rightarrow v \cdot B = \frac{U_H}{h}$$

Höhe des Plättchens

Geschwindigkeit

$$v = \frac{d}{t} \quad I = \frac{Q}{t}$$

$$v = \frac{d}{Q} \cdot I \quad t = \frac{Q}{I}$$

$$\frac{d}{Q} \cdot I \cdot B = \frac{U_H}{h}$$

$$U_H = \frac{d}{Q} \cdot I \cdot h \cdot B$$

$$Q = n \cdot e$$

Teilchendichte

$$n = \frac{N \text{ Teilchenzahl}}{V \text{ Volumen}}$$

$$U_H = \frac{d \cdot I \cdot h \cdot B}{n \cdot e \cdot V} = \frac{I \cdot B}{n \cdot e} \cdot \frac{1}{d}$$

$$V = s \cdot d \cdot h$$

$$R_H = \frac{1}{n \cdot e}$$

$$A4) \quad d = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$U_H = 12 \cdot 10^{-6} \text{ V}$$

$$B = 0,28 \text{ T}$$

$$U_H = B \cdot v \cdot d$$

$$v = \frac{U_H}{B \cdot d} = \frac{12 \cdot 10^{-6} \text{ V}}{0,28 \text{ T} \cdot 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}} = 1,714 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$A5) \quad d = 10^{-5} \text{ m} \quad B = 0,43 \text{ T} \quad V_{\text{Kupfer}} = 1 \text{ mol}$$

$$I = 10 \text{ A} \quad U_H = 2,2 \cdot 10^{-5} \text{ V}$$

$$U_H = R_H \cdot \frac{B \cdot I}{d}$$

$$R_H = \frac{1}{e \cdot n} = \frac{U_H \cdot d}{B \cdot I} = 5,116 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{C}}$$

$$R_H = \frac{1}{n \cdot e} \Rightarrow n = \frac{1}{e \cdot R_H} = 1,22 \cdot 10^{29} \frac{1}{\text{m}^3}$$

1.40.2 Buch Seite 231, Aufgabe 5

Eine Kupferfolie ($d = 10 \mu\text{m}$) wird von einem Strom der Stärke $I = 10 \text{ A}$ durchflossen. Im Magnetfeld $B = 0,43 \text{ T}$ wird die Hallspannung $U_H = 22 \mu\text{V}$ gemessen. Berechnen Sie die Hallkonstante von Kupfer und die Dichte n der Elektronen. Berechnen Sie daraus die Anzahl der freien Elektronen in $n_{\text{Kupfer}} = 1 \text{ mol}$ Kupfer und vergleichen Sie sie mit der Avogadro-Konstante.

$$U_H = R_H \frac{BI}{d} \Rightarrow R_H = \frac{1}{en} = \frac{U_H d}{BI} \approx 5,1 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{C}}$$

$$R_H = \frac{1}{ne} \Rightarrow n = \frac{1}{e R_H} \approx 1,2 \cdot 10^{29} \frac{1}{\text{m}^3}$$

$$\left. \begin{array}{l} \varrho_{\text{Kupfer}} V = m = n_{\text{Kupfer}} M_{\text{Kupfer}} \\ nV = N; \end{array} \right\} \Rightarrow N = n_{\text{Kupfer}} n M_{\text{Kupfer}} \frac{1}{\varrho_{\text{Kupfer}}} \approx 8,5 \cdot 10^{23}$$

(Benötigte Zeit: 26 min)

$$n \cdot e = \frac{1}{R_H} e \quad | : e$$

Magnetfelder und Kreisbewegung

Auf einen Körper, der sich gleichförmig auf einer Kreisbahn bewegt, wirkt eine Kraft von konstantem Betrag. Die Kraft ist stets zum Mittelpunkt des Kreises hin gerichtet. Sie wird **Zentripetalkraft** genannt.

Der Betrag der Zentripetalkraft ist proportional:

- zur Masse des rotierenden Körpers m ;
- zum Radius der Kreisbahn r ;
- zum Quadrat der Winkelgeschwindigkeit w .

Es gilt:

$$F_{zp} = m \cdot \overbrace{r \cdot w^2}^{m \cdot a_{zp}} = m \cdot \frac{v_B^2}{r}$$

$$a_{zp} = r \cdot w^2 = \frac{v_B^2}{r}$$

Bei einer gleichförmigen Kreisbewegung wird der Körper ständig zum Kreismittelpunkt hin beschleunigt.

Beispielaufgabe: Ein Körper der Masse $m = 0.3\text{kg}$ bewegt sich auf einer Kreisbahn mit dem Radius $r = 1.7\text{m}$. Für 10 Umläufe benötigt er 6s. Ermitteln Sie Zentripetalkraft und Zentripetalbeschleunigung.

$$a_{zp} = r \cdot w^2 = r \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 = 1,7\text{m} \cdot \left(\frac{2\pi}{9,6\text{s}} \right)^2 = 186 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F_{zp} = m \cdot a_{zp} = 0,3\text{kg} \cdot 186 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \approx 56 \text{ N}$$

$$a_{zp} = r \cdot w^2 = r \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 = 9,28\text{m} \cdot \left(\frac{2\pi}{1,3\text{s}} \right)^2 = 9949 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F_{zp} = m \cdot a_{zp} = 2001 \cdot a_{zp} = 9,949 \text{ N}$$

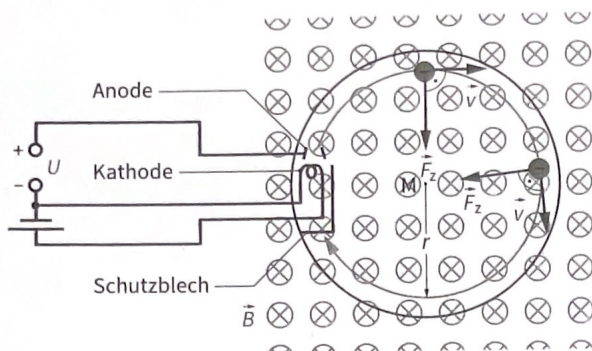
$$a_{zp} = \frac{v^2}{z} = \frac{\left(217\,700 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2,46 \cdot 10^{20} \text{ m}} = 1,927 \cdot 10^{-10} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F_{zp} = m \cdot a_{zp} = 1,989 \cdot 10^{30} \cdot a_{zp} = 3,832 \cdot 10^{20} \text{ N}$$

$$T = \frac{2\pi z}{v} = \frac{2\pi \cdot 2,46 \cdot 10^{20} \text{ m}}{2,177 \cdot 10^5 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 7,1 \cdot 10^{15} \text{ s}$$

226 Millionen
Jahre

4.11 Elektrische Ladungen in magnetischen Feldern



B1 Elektronen in einem homogenen Magnetfeld

Elektrische Ladungen werden abgelenkt. Auf bewegte Elektronen und andere Ladungsträger wirkt im Magnetfeld die Lorentzkraft, wenn die Geschwindigkeit der Teilchen nicht parallel zu den magnetischen Feldlinien orientiert ist. Steht die Geschwindigkeit der Ladungsträger wie in Bild B1 senkrecht zum B -Feld, so werden die Ladungsträger durch die Lorentzkraft auf eine Kreisbahn gezwungen.

Kreisbahnen. Elektronen (Ladung e , Masse m) werden in einer Elektronenkanone (vgl. Seite 146) erzeugt. Sie haben nach Durchlaufen der Beschleunigungsspannung U eine Geschwindigkeit vom Betrag

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot U}{m}} \quad (1)$$

Treten diese Elektronen in ein homogenes Magnetfeld der Flussdichte B ein und steht die Geschwindigkeit der Elektronen senkrecht zur Richtung der magnetischen Feldlinien, so wirkt zu jedem Zeitpunkt auf die Elektronen die Lorentzkraft F_L vom Betrag

$$F_L = e \cdot v \cdot B \quad (2)$$

Sie ist senkrecht zu den magnetischen Feldlinien und senkrecht zur Geschwindigkeit gerichtet. Der Betrag der Geschwindigkeit der Elektronen ändert sich also nicht, sondern nur die Richtung der Geschwindigkeit. Innerhalb des Magnetfeldes bewegen sich die Elektronen daher auf Kreisbahnen vom Radius r (Bild B1). Die Lorentzkraft F_L liefert die dafür notwendige Zentripetalkraft F_Z ($F_L = F_Z$). Für deren Betrag gilt immer:

$$F_Z = m \cdot \frac{v^2}{r} \quad (3)$$

Setzt man die Gleichungen (2) und (3) gleich und v aus Gleichung (1) ein, ergibt sich:

$$\frac{e}{m} = \frac{2 \cdot U}{B^2 \cdot r^2} \quad (4)$$

Die Größen U , B und r in Gleichung (4) können experimentell bestimmt werden. Der Term $\frac{e}{m}$ wird als **spezifische Ladung** des Elektrons bezeichnet.

Messungen ergeben für die spezifische Ladung des Elektrons

$$\frac{e}{m} \approx 1,76 \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{kg}}$$

Mit der aus dem *Millikan-Versuch* bekannten Elementarladung e ergibt sich die Elektronmasse zu

$$m \approx 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

Das Proton trägt im Gegensatz zum Elektron eine positive Elementarladung und hat die fast 2000-mal so große Masse $m_p \approx 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.

! Merksatz

Elektronen (Ladung e , Masse m), die mit einer Spannung U beschleunigt werden und in ein Magnetfeld der Flussdichte B senkrecht zu den magnetischen Feldlinien eintreten, bewegen sich auf Kreisbahnen mit Radius r . Damit lässt sich die spezifische Ladung $\frac{e}{m}$ bestimmen:

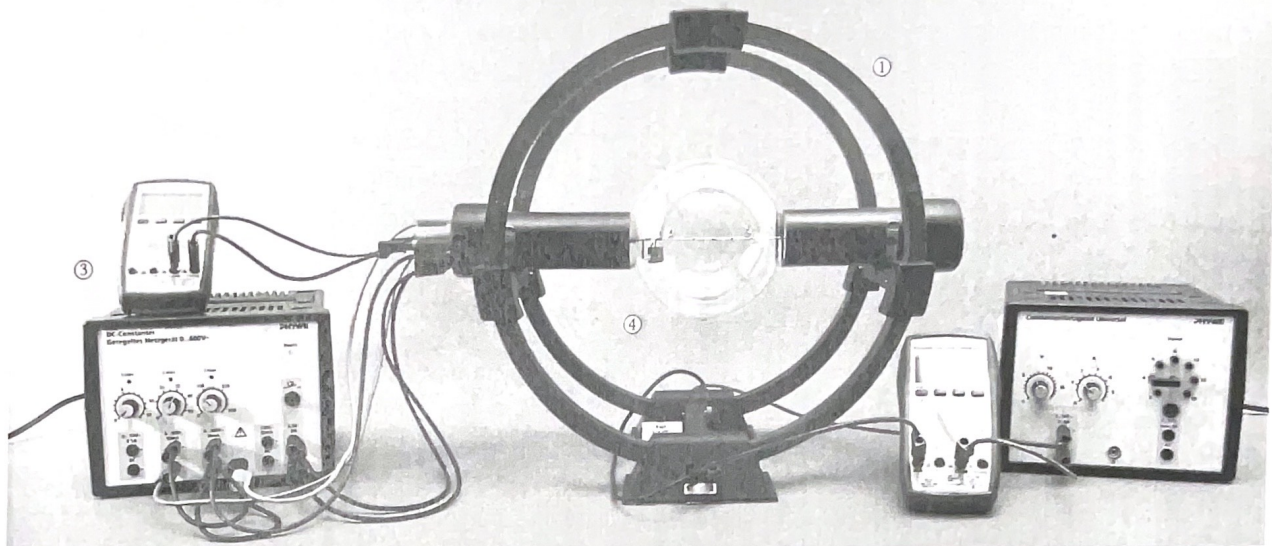
$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{B^2 \cdot r^2}$$

Mit Versuch **v1**, dem **Fadenstrahlrohrexperiment**, lässt sich die spezifische Ladung bestimmen. Die Flussdichte B des Magnetfeldes wird dabei durch eine genaue Messung der Stromstärke bestimmt, der Radius r durch bekannte Abstände von Messstegen, die beim Auftreffen von Elektronen fluoreszieren (Bild B2).

Die Überlegungen zu Elektronen im homogenen Magnetfeld können auf andere elektrisch geladene Teilchen (Ladung q und Masse m_T) wie Protonen oder Ionen übertragen werden. Zu beachten ist, dass die Richtung der Lorentzkraft bei positiven Ladungen im Vergleich zu negativen Ladungen entgegengesetzt ist.

Ist die Geschwindigkeit $\vec{v}$ nicht senkrecht zu den magnetischen Feldlinien orientiert, bewegen sich elektrische Ladungsträger nicht auf Kreisbahnen. Aufgrund der Geschwindigkeitskomponenten senkrecht und parallel zu den magnetischen Feldlinien wirkt im ersten Fall eine Lorentzkraft und im letzten Fall nicht.

V1 Fadenstrahlrohr



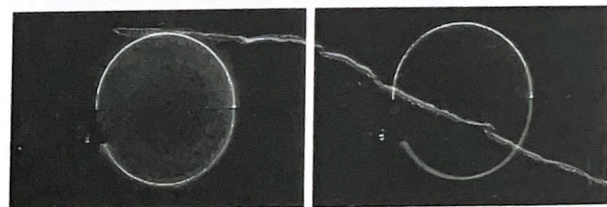
B2 ① Helmholtzspulenpaar, ② Betriebsgerät für den Spulenstrom I und Amperemeter ③ Betriebsgerät für die Elektronenkanone und Multimeter zur Messung der Beschleunigungsspannung, ④ Fadenstrahlröhre mit Messstegen zur Bestimmung des Radius r

In einer mit Neongas gefüllten Röhre befindet sich eine Elektronenkanone, die einen fein gebündelten Strahl von Elektronen liefert. Die Geschwindigkeit v der Elektronen ist über die Beschleunigungsspannung U der Elektronenkanone einstellbar. Durch ein Helmholtzspulenpaar wird ein homogenes Magnetfeld der Flussdichte B im Inneren des Rohrs erzeugt. Die Geschwindigkeitsrichtung der Elektronen wird so eingestellt, dass sie senkrecht auf den Feldlinien des Magnetfeldes steht.

- Ohne Magnetfeld erkennt man in der Röhre einen leuchtenden, geraden und dünnen Strahl (Faden), der die Bahn der Elektronen kennzeichnet. Die Bewegung der Elektronen wird sichtbar, da die Elektronen durch Stöße das Gas im Rohr zum Leuchten anregen.
- Mit einem Magnetfeld der Flussdichte B werden die Elektronen auf Kreisbahnen gelenkt (Bild **B3**).

Gemessen werden der Radius r der Kreisbahn und die Beschleunigungsspannung U der Elektronen. Die Flussdichte des Magnetfeldes ergibt sich aus der gemessenen Stärke I_{Spule} des elektrischen Stroms durch das Helmholtzspulenpaar und den Eigenschaften dieser Spulen (z. B. Windungszahl, Radius). Aus diesen Größen berechnet sich das Verhältnis von Elektronenladung e zu Elektronenmasse m zu

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{B^2 \cdot r^2}$$



B3 Sichtbare Fäden auf Kreisbahnen mit Radius r

Arbeitsaufträge

- Elektronen, die durch eine Spannung von 150 V beschleunigt worden sind, beschreiben in einem homogenen Magnetfeld mit $B = 0,85 \text{ mT}$ einen Kreis. Berechnen Sie die Geschwindigkeit der Elektronen und ihre Umlaufzeit.

$$F = e \cdot U \cdot B = m \cdot a_{\text{zp}}$$

- In Versuch **V1** wurden für $U = 223 \text{ V}$ folgende Radien der Kreisbahnen und magnetische Flussdichten gemessen. Bestimmen Sie daraus $\frac{e}{m}$.

r in cm	2	3	4	5
B in mT	2,55	1,70	1,23	0,98

$$1,7147 \quad 1,7147 \quad 1,8424 \quad 1,8575$$

Übungen zur Lorentzkraft und Kräften im elektrischen Feld

Aufgabe 1

Einem elektrischen Feld ist ein magnetisches Feld derart überlagert, dass ein mit der Geschwindigkeit $v_0 = 10^7 \frac{m}{s}$ senkrecht zum Magnetfeld eingeschossenes Elektron nicht abgelenkt wird.

a)

Welche Winkel bilden die beiden Felder und der einfliegenden Elektronen miteinander.

b)

Zur Erzeugung des elektrischen Feldes wird an ein Plattenpaar (Abstand $d = 10 \text{ mm}$) die Spannung U angelegt. Wie groß muss die magnetische Flussdichte B sein?

c)

Beschreibe was passiert, wenn Elektronen mit anderen Geschwindigkeiten einfliegen.

Aufgabe

Beschreibe wie es möglich wäre, dass ein Teilchen sich durch ein Magnetfeld bewegt ohne abgelenkt zu werden.

Wiederholung Kräfte im elektrischen Feld

Ein Elektron, das die Beschleunigungsspannung $U_0 = 150 \text{ V}$ durchlaufen hat, fliegt senkrecht zum elektrischen Feld in die Mitte zwischen zwei parallele geladene Platten mit dem Abstand $d = 1,5 \text{ cm}$. Zwischen den Platten liegt die Spannung $U = 250 \text{ V}$ an.

a)

Berechne wie lange es dauert bis das Elektron auf einer der Platten auftrifft.

b)

Berechne wie weit der Auftreffpunkt vom Eintrittsort entfernt ist.

20.05.2025