

1 Ladung und Spannung

Teste dein Wissen 1:

Finde Beispiele aus dem Alltag, bei denen elektrische Spannung einen Funken verursacht. Beschreibe den Vorgang und erkläre ihn.

Beispielantwort:

Typische Alltagsbeispiele sind z.B. der Funke beim Berühren einer Metalltür nach dem Gehen über einen Teppichboden oder das Entladen eines Blitzes bei Gewittern.

Wenn sich zwei Personen im Auto küssen und auf Autositzen sitzen, kann es sein, dass die Personen durch den Kontakt der Kleidung mit den Sitzen unterschiedlich elektrisch aufgeladen werden. Vorzeichen und Stärke der Aufladung hängen von den Materialien ab, die einander berührten. Wolle gibt leicht Elektronen ab, Acrylfasern (flauschig, und daher gerne für Pullover verwendet) nehmen Elektronen auf. Seide und Baumwolle laden sich im Kontakt mit Nylon oder Wolle negativ, im Kontakt mit Acrylfasern positiv auf. Ladung kann bei Berührung übertragen werden.

Teste dein Wissen 2:

Wie kann man ein Elektroskop mit einem negativ geladenen Gummistab positiv aufladen? Kreuze die richtige Antwort an.

- a) Das geht nicht.
- b) Man kann die negative Ladung abstreifen, denn am Elektroskop ist der negative Ausschlag gleich dem positiven.
- c) Man hält den negativen Stab nahe an das Elektroskop. Durch elektrische Kräfte werden die Elektronen abgestoßen. Mit kurzer Berührung der Zeiger leitet man die Elektronen ab. Entfernt man den Stab, dann ist das Elektroskop positiv geladen.

Antwort:

Die richtige Antwort ist c) Man hält den negativen Stab nahe an das Elektroskop. Durch elektrische Kräfte werden die Elektronen abgestoßen. Mit kurzer Berührung der Zeiger leitet man die Elektronen ab. Entfernt man den Stab, dann ist das Elektroskop positiv geladen.

Teste dein Wissen 3:

Ein Elektroskop zeigt Ladung an. Du überträgst mit einem geriebenen Hartgummistab negative Ladungen. Das Elektroskop geht im Ausschlag zurück und lädt sich dann wieder auf. Was kann man über die Ladung des Elektroskops sagen? Kreuze die richtige Antwort an.

- a) Es war negativ geladen.
- b) Es war positiv geladen.
- c) Man kann nichts darüber aussagen.

Antwort:

Der geriebene Hartgummistab ist negativ geladen und trägt damit negative Ladungen (Überschuss an Elektronen). Da nun das Elektroskop im Ausschlag zunächst zurückgeht, deutet dies auf einen Ausgleich der **positiven Ladungen des geladenen Elektroskops** mit den zugeführten negativen Ladungen des Hartgummistabs. Es werden in Folge noch weitere negative Ladungen übertragen, wodurch das Elektroskop nun negativ geladen ist.

Die richtige Antwort ist daher: b) Es war positiv geladen.

Teste dein Wissen 4:

Eine negativ geladene Hartgummikugel befindet sich genau in der Mitte zwischen zwei gleich großen aber entgegengesetzt geladenen Platten. Was geschieht? Kreuze die richtige Antwort an.

- a) Die Kugel bewegt sich auf die positive Platte zu.
- b) Die Kugel bewegt sich auf die negative Platte zu.
- c) Die Kugel bewegt sich überhaupt nicht.

Antwort:

Da sich gleichartig elektrisierte Körper abstoßen und ungleichartig elektrisierte Körper anziehen, wird die Kugel von der negativen Platte abgestoßen und von der positiven Platte angezogen.

Die richtige Antwort ist daher:

a) Die Kugel bewegt sich auf die positive Platte zu

Teste dein Wissen 5:

Der italienische Physiker Volta (1745–1827) erkannte, dass zwischen zwei übereinander liegenden Platten aus verschiedenen Metallen, die ein zwischen ihnen liegendes mit Säure getränktes Papier trennt, eine elektrische Spannung entsteht. Durch eine äußere leitende Verbindung fließt elektrischer Strom von einem Metall zum anderen. Erkläre den Vorgang.

Beispielantwort:

Wenn zwei unterschiedliche Metalle einander berühren, tritt eine Kontaktspannung auf: Die „unedleren“ Metalle geben leichter Elektronen ab als die „edleren“, so dass Elektronen fließen. Dies gilt auch, wenn die Metalle indirekt durch einen Metalldraht verbunden sind. Damit ein dauernder Strom fließt, müssen an der negativen Elektrode laufend Elektronen freigesetzt und an der positiven „entsorgt“ werden. Dies wird durch chemische Reaktionen des Elektrodenmaterials (z.B. Metallplatten) mit weiteren (säurehaltigen) Substanzen ermöglicht. Die säurehaltigen Zwischenlage zwischen den beiden Platten wirkt somit als Elektrolyt und ermöglicht den Ladungsausgleich durch Ionenwanderung. Die frei gesetzte elektrische Energie kann genutzt werden.

Teste dein Wissen 6:

Erkläre, warum es ungünstig ist, Zähne mit Gold- und Zähne mit Amalgamfüllung gleichzeitig im Mund zu haben.

Beispielantwort:

Amalgam ist eine Quecksilberlegierung und damit unedler als Gold. In Verbindung mit dem Speichel als Elektrolyt bildet dies eine galvanische Zelle und es fließt dadurch im Mund ständig ein (kleiner) elektrischer Strom. Dieser Strom verursacht eine elektrochemische Reaktion, welche das Amalgam zersetzen und dadurch Quecksilber im Mund freisetzen kann. Weil Quecksilber giftig ist, führt dies nicht nur zu Reizungen, sondern kann auch schwerwiegendere gesundheitliche Folgen haben.

Teste dein Wissen 7:

Erkläre die Grundlagen, die du brauchst, um Abb. 85.1 zu verstehen.

Antwort:

Die Abbildung 85.1 zeigt den Effekt eines Van-de-Graaff-Generators (Bandgenerator) in Aktion. Die Haare der Person stehen aufgrund der gleichartigen elektrischen Ladungen, die sie durch Berührung der Metallkugel erhalten hat, voneinander ab. Dies wird durch die elektrische Abstoßung der gleichartigen (positiven) Ladungen verursacht.

Der grundlegende Vorgang eines Bandgenerators:

Der Bandgenerator, auch Van-de-Graaff-Generator genannt, erzeugt durch Reibung hohe elektrische Spannungen.

Ein isolierendes Band läuft über zwei Rollen und wird an einer Stelle durch eine Bürste gerieben, wodurch Ladungen entstehen. Dieses Band transportiert die Ladungen in eine hohle Metallkugel, wo sie von einer weiteren Bürste abgenommen werden und sich auf der Kugeloberfläche verteilen. Durch die Berührung fließt ein Teil der auf der Metallkugel angesammelten Ladung auf den Körper der Person über.

Teste dein Wissen 8:

Markiere die wichtigsten Begriffe im Text zur „Antwort auf die Eingangsfrage“ und notiere alle Begriffe, die aus der Medizin stammen könnten. Schreibe eine kurze Erklärung zu den jeweiligen Begriffen.

Beispielantwort:

Begriffe aus der Medizin:

- 1. Sinusknoten:** Der Sinusknoten ist ein Bereich im rechten Vorhof des Herzens, der als natürlicher Schrittmacher dient und elektrische Impulse zur Steuerung der Herzfrequenz erzeugt.
- 2. Ruhepotenzial:** Dies beschreibt den Zustand einer Herzmuskelzelle während der Ruhephase (Diastole), bei dem das Zellinnere negativ gegenüber dem Zelläußeren geladen ist.
- 3. Systole und Diastole:** Die Systole ist die Phase, in der das Herz Blut aus den Kammern pumpt, während in der Diastole Blut in die Kammern fließt.
- 4. Elektrokardiogramm (EKG):** Ein EKG zeichnet die elektrischen Spannungsänderungen auf, die durch die Aktivität des Herzmuskels entstehen. Es dient zur Diagnose von Herzerkrankungen.
- 5. Defibrillator (AED):** Ein automatisierter externer Defibrillator (AED) gibt elektrische Impulse ab, um das Herz bei Kammerflimmern oder Herzstillstand wieder in den normalen Rhythmus zu bringen.
- 6. Herzschrittmacher:** Ein implantiertes Gerät, das elektrische Impulse erzeugt, um die Herzfrequenz bei gestörter Funktion des Sinusknotens zu regulieren.
- 7. Kammerflimmern:** Die Muskelzellen kontrahieren unkoordiniert, wodurch kein Blut gepumpt werden kann.

Rechenaufgabe 1:

Ein Klein-PKW wird in zwei Varianten produziert. Der E-PKW hat eine Batterie, die 44 kWh elektrische Energie speichert. Der mit Benzin betriebene B-PKW hat einen 40-Liter-Tank. Vom Hersteller wird ein Normverbrauch für 100 km Fahrtstrecke von 17 kWh (E-PKW) bzw. 5,6 Liter (B-PKW) angegeben. Ein Liter Benzin liefert bei der Verbrennung ca. 9 kWh.

- Berechne, wie weit der E-PKW bzw. B-PKW mit einer Batterieladung bzw. Tankfüllung bei Normverbrauch fahren könnten.
- Wieviel mehr Energie benötigt der B-PKW als der E-PKW für eine Fahrtstrecke von 100 km bei Normverbrauch? Berechne und gib das Ergebnis sowohl in Kilowattstunden als auch in Prozenten an.

Antwort:

a)

Die Reichweite ergibt sich aus der Batterieladung bzw. Tankfüllung geteilt durch den Verbrauch:

E-PKW Reichweite:

$$\text{Reichweite} = \frac{\text{Batterieladung}}{\text{Verbrauch}} = \frac{44 \text{ kWh}}{17 \text{ kWh}/100 \text{ km}} \approx 259 \text{ km}$$

B-PKW Reichweite:

$$\text{Reichweite} = \frac{\text{Tankfüllung}}{\text{Verbrauch}} = \frac{40 \text{ L}}{5,6 \text{ L}/100 \text{ km}} \approx 714 \text{ km}$$

Der E-PKW kann bei einer Batterieladung von 44 kWh und Normverbrauch etwa 259 km und der B-PKW bei einer Tankfüllung von 40 Liter und Normverbrauch etwa 714 km weit fahren.

b)

Für die Differenz müssen wir den Benzinverbrauch des B-PKW zuerst in kWh umrechnen:

$$\text{Energieverbrauch (per 100 km)} = 5,6 \text{ L} \cdot 9 \text{ kWh/L} = 50,4 \text{ kWh}$$

Energiedifferenz in kWh:

$$\Delta E = 50,4 \text{ kWh} - 17 \text{ kWh} = 33,4 \text{ kWh} = 33\,400 \text{ Wh}$$

Prozentuelle Energiedifferenz:

$$\text{Prozentuale Differenz} = \frac{\Delta E}{\text{Verbrauch}_{\text{E-PKW}}} \cdot 100 = \frac{33,4 \text{ kWh}}{17 \text{ kWh}} \cdot 100 \approx 196,5\%$$

Der B-PKW benötigt für 100 km zusätzliche 33,4 Kilowattstunden an Energie.

Dies entspricht einem Mehrverbrauch von etwa 196,5 Prozent im Vergleich zum E-PKW.

2 Der Stromkreis

Teste dein Wissen 1:

Wie lautet das Ohm'sche Gesetz? Interpretiere es verbal!

a) $U = I \cdot R$

b) $I = U \cdot R$

c) $U = I \cdot R$

Antwort:

Das Ohm'sche Gesetz besagt, dass in einem Leiter die **Stromstärke I** direkt proportional zur **Spannung U** und indirekt proportional zum **Widerstand R** ist. Je größer die Spannung, desto größer ist die Stromstärke bei gleichem Widerstand. Je größer der Widerstand, desto kleiner ist die Stromstärke bei gleicher Spannung.

Die richtige Antwort ist daher:

c) $U = I \cdot R$

Teste dein Wissen 2:

Was versteht man unter Supraleitung? Kreuze die richtige Antwort an!

a) Bei Zimmertemperatur besonders gut leitende Metalle.

b) Elektrische Leiter mit sehr kleinem Widerstand bei 0 °C.

c) Elektrische Leitung ohne Widerstand unterhalb einer bestimmten, sehr tiefen Temperatur.

Antwort:

Bei sehr tiefen Temperaturen (kleiner als 20 K) verlieren viele Metalle ihren elektrischen Widerstand zur Gänze. Man nennt dieses Phänomen „Supraleitung“. Diese materialabhängige Grenztemperatur wird als kritische Temperatur bezeichnet.

Die richtige Antwort ist daher:

c) Elektrische Leitung ohne Widerstand unterhalb einer bestimmten, sehr tiefen Temperatur.

Teste dein Wissen 3:

Nenne verschiedene Energieformen, in die elektrischer Strom umgewandelt werden kann (inkl. Beispiele).

Antwort:

Elektrischer Strom kann in folgende Energieformen umgewandelt werden:

Wärmeenergie: Beispiele: Heizgeräte wie ein E-Herd, Wasserkocher oder elektrische Heizungen

Lichtenergie: Beispiele: Glühlampen, LED-Lampen, Laser, Fernseher/Monitore

Bewegungsenergie: Beispiele: Elektromotoren in Ventilatoren, Elektrofahrzeugen, Triebwerken

Schallenergie: Beispiele: Lautsprecher oder Klingeln

Chemische Energie: Beispiele: Elektrolyse oder Laden von Batterien

Teste dein Wissen 4:

Erkläre, was man unter dem elektrischen Widerstand versteht.

Antwort:

Unter dem **elektrischen Widerstand R** versteht man das **Verhältnis der Spannung U** zwischen den Enden des Leiters zur **Stärke des Stroms I** im Leiter:

$$R = U/I$$

Die entsprechende Einheit des Widerstands ist **Ohm (Ω): $\Omega = 1 \text{ V/A}$**

Teste dein Wissen 5:

Was versteht man unter dem Begriff des spezifischen Widerstands und wie kannst du ihn erklären? Nimm auch Bezug auf die Temperaturabhängigkeit des Widerstands.

Antwort:

Der **spezifische Widerstand ρ** ist eine temperaturabhängige Materialkonstante, die angibt, wie stark ein Material den Stromfluss hemmt, unabhängig von der Form oder Größe des Leiters. Er wird durch Messungen bei konstanter Temperatur bestimmt und tritt in folgender Formel

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

(**R** ... elektrischer Widerstand, **l** ... Länge des Leiters, **A** ... Querschnittsfläche)

als Proportionalitätskonstante zwischen dem Widerstand R und den geometrischen Abmessungen auf.

Bei Halbleitern sinkt in der Regel der Widerstand beim Erwärmen, weil bei höherer Temperatur die Atome des festen Halbleiters leichter Elektronen abgeben und dadurch mehr Ladungsträger für die Stromleitung verfügbar sind.

Bei metallischen Leitern steigt der Widerstand bei Erhöhung der Temperatur, da die Atome stärker schwingen und den Stromfluss behindern. Umgekehrt sinkt der Widerstand von Metallen, je tiefer die Temperatur wird.

Teste dein Wissen 6:

Markiere die 4–6 wichtigsten Begriffe im Text zur „Antwort auf die Eingangsfrage“ und notiere alle Fachbegriffe, die du nicht kennst. Recherchiere ihre Bedeutung und schreibe dir Stichwörter dazu auf. Schreibe eine kurze Erklärung zu den wichtigsten Begriffen.

Antwort:

1. Metallfadenlampe: Die Metallfadenlampe wurde 1898 vom österreichischen Chemiker und Erfinder Carl Auer von Welsbach zum Patent angemeldet. Die dünne Wolframwendel in einem mit Stickstoff oder Edelgas (Argon, Krypton) gefüllten Glaskolben wird durch den Stromfluss ca. 2 500 °C heiß und weißglühend. Durch das darin befindliche Gas wird die Verbrennung der dünnen Wendel verhindert.

2. Wolframwendel: Ein dünner Draht aus Wolfram, der in der Glühlampe verwendet wird. Er wird durch Stromfluss stark erhitzt, wodurch Licht entsteht. Wolfram hat einen sehr hohen Schmelzpunkt (3 422 °C) und eignet sich daher für den Betrieb bei sehr hohen Temperaturen. Um die Lichtausbeute zu erhöhen, wird der Draht oft gewandelt, sodass er eine größere Oberfläche hat.

3. Halogenlampe: Die Halogenlampe ist eine Glühlampe, bei der das Füllgas einen Halogenzusatz (Iod oder Brom) enthält. Von der Glühwendel abgedampfte Wolframatome bilden mit den Halogenen eine chemische Verbindung, die an der heißen Glühwendel wieder zerfällt und dort Wolframatome abscheidet. Dadurch wird die Lebensdauer verlängert und die Lichtausbeute verbessert.

4. Energiesparlampe (Kompakt-Leuchtstofflampe): Energiesparlampen sind eine kompakte Version von Leuchtstoffröhren. Sie enthalten eine geringe Menge Quecksilberdampf und eine fluoreszierende Beschichtung auf der Innenseite des Glaskolbens. Wenn elektrischer Strom durch den Quecksilberdampf fließt, entsteht ultraviolettes Licht, das durch die fluoreszierende Schicht in sichtbares Licht umgewandelt wird. Diese Lampen sind deutlich energieeffizienter als Glühlampen, stellen jedoch durch den Quecksilbergehalt eine Umweltbelastung dar.

5. LED-Lampe: Eine LED-Lampe (Leuchtdioden-Lampe) verwendet LEDs (eng. light-emitting diode) als Lichtquelle, die elektrische Energie direkt in Licht umwandeln. LEDs sind sehr energieeffizient, langlebig und enthalten keine schädlichen Stoffe wie Quecksilber. Sie haben eine hohe Lichtausbeute und erzeugen kaum Wärme, weshalb sie umweltfreundlicher sind als ältere Lichtquellen wie Glühlampen oder Energiesparlampen.

6. Edelgase (wie Argon, Krypton): Edelgase wie Argon und Krypton werden als Füllgas (bzw. Schutzgas) in Glaskolben von Metallfaden- und Halogenlampen verwendet. Sie verhindern die Oxidation und das Verbrennen des Wolframfadens, indem sie Sauerstoff verdrängen.

Rechenaufgabe 1:

Ein Motor hat den Widerstand $R_M = 10 \Omega$. Er wird mit der Spannung $U = 230 \text{ V}$ betrieben.

Der Widerstand der Zuleitung beträgt $R_L = 1 \Omega$.

a) Bestimme, wie groß die Stromstärke im Kreis ist.

b) Ermittle, wie groß der Spannungsabfall an den Zuleitungen ist.

Antwort:

a) Der Gesamtwiderstand R_{ges} im Stromkreis ist die Summe der Widerstände:

$$R_{ges} = R_M + R_L = 10 \Omega + 1 \Omega = 11 \Omega = 11 \text{ V/A}$$

Nun verwenden wir das Ohm'sche Gesetz, um die **Stromstärke I** im Kreis zu berechnen:

$$I = \frac{U}{R_{ges}} = \frac{230 \text{ V}}{11 \text{ V/A}} \approx 20,9 \text{ A}$$

Die Stromstärke I im Stromkreis beträgt etwa 20,9 A.

b) In einem Stromkreis mit mehreren Widerständen teilt sich die angelegte Spannung U gemäß den Widerstandswerten auf. Das heißt, die Spannungen an der Zuleitung und am Motor ergeben zusammen die Gesamtspannung: $U_{ges} = U_L + U_M$

Da der Zuleitungswiderstand 1 Ohm beträgt, gilt für den Spannungsabfall U_L :

$$U_L = I \cdot R_L = 20,9 \text{ A} \cdot 1 \text{ V/A} = 20,9 \text{ V}$$

Für die Spannung U_M am Motor gilt:

$$U_M = U_{ges} - U_L = 230 \text{ V} - 20,9 \text{ V} = 209,1 \text{ V}$$

Der Spannungsabfall in den Zuleitungen beträgt 20,9 V und 209,1 V am Motor.

Rechenaufgabe 2:

Berechne, wie groß die Stromstärke durch eine Lampe ist, deren Widerstand 60Ω beträgt, wenn sie an 12 V angeschlossen ist.

Antwort:

Hierfür verwenden wir das Ohm'schen Gesetz: ($1 \Omega = 1 \text{ V/A}$)

$$I = \frac{U}{R} = \frac{12 \text{ V}}{60 \text{ V/A}} = 0,2 \text{ A}$$

Die Stromstärke I der Lampe beträgt somit $0,2 \text{ A}$.

Rechenaufgabe 3:

Durch ein Elektrogerät fließen 12 A , wenn es an eine Spannung von 230 V angeschlossen wird. Berechne die Größe seines Widerstands.

Antwort:

Hierfür verwenden wir die Formel für den elektrischen Widerstand R : ($1 \Omega = 1 \text{ V/A}$)

$$R = \frac{U}{I} = \frac{230 \text{ V}}{12 \text{ A}} \approx 19,17 \Omega$$

Der Widerstand R des Elektrogeräts beträgt somit etwa $19,17 \text{ Ohm}$.

Rechenaufgabe 4:

Bestimme, wie groß die Stromstärke durch den menschlichen Körper ist, wenn man die Pole einer 12-V -Batterie berührt (Tipp: Man kann annehmen, dass der menschliche Körper einen Widerstand von ca. $100 \text{ k}\Omega$ aufweist).

Antwort:

($R_{Mensch} = 100 \text{ k}\Omega = 100\,000 \Omega$)

Hierfür verwenden wir das Ohm'schen Gesetz: ($1 \Omega = 1 \text{ V/A}$)

$$I = \frac{U}{R_{Mensch}} = \frac{12 \text{ V}}{10 \cdot 10^4 \text{ V/A}} = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ A} = 0,12 \text{ mA}$$

Wenn man die Pole einer 12-V Batterie berührt, dann beträgt die Stromstärke im menschlichen Körper $0,12 \text{ mA}$.

Rechenaufgabe 5:

Öffne die Stromkreis-Baukasten-Simulation in der Quickmedia-App (**93.1**). Baue einen einfachen Stromkreis mit dem Stromkreis-Baukasten und analysiere die Funktionen der einzelnen Bauteile.

Antwort: (offene Frage)

Funktionen der Bauteile:

Batterie: Eine Batterie ist eine Spannungsquelle, die chemische Energie in elektrische Energie umwandelt. Sie liefert eine konstante Gleichspannung zur Versorgung des Stromkreises. Sie dient hauptsächlich zur Versorgung kleinerer Stromkreise, wenn keine externe Stromquelle verfügbar ist.

Netzgerät: Ein Netzgerät stellt elektrische Energie aus der Steckdose bereit. Es kann Gleichspannung (DC) oder Wechselspannung (AC) liefern und ermöglicht oft die Einstellung von

Spannung und Stromstärke. Es wird verwendet, wenn eine regulierbare oder zuverlässige Spannungsquelle benötigt wird.

Schalter: Der Schalter unterbricht oder schließt den Stromkreis, um den Stromfluss zu steuern und ermöglicht somit das Ein- und Ausschalten der angeschlossenen Verbraucher (z. B. Glühlampe).

Glühlampe: Die Glühlampe wandelt elektrische Energie in Licht und Wärme um. Der Glühfaden wird durch den Stromfluss erhitzt und beginnt zu leuchten. Sie dient als Verbraucher im Stromkreis und zeigt an, ob und (grob) wieviel Strom fließt.

Multimeter: Ein Multimeter misst elektrische Größen wie Spannung, Stromstärke und Widerstand. Es kann als Voltmeter, Amperemeter oder Ohmmeter verwendet werden. Es dient damit zur Analyse und Überprüfung der elektrischen Eigenschaften des Stromkreises.

XXX-O-Widerstand: (XXX steht hierbei für eine beliebige Zahl)
Widerstände begrenzen den Stromfluss im Stromkreis. Sie können zur Anpassung von Strom und Spannung oder zum Schutz von Bauteilen vor Überstrom verwendet werden. Jeder Widerstand hat einen definierten Wert, der den Stromfluss entsprechend reduziert. Große Widerstände eignen sich für kleinere Ströme, während kleine Widerstände größere Ströme zulassen.

Draht:

Der Draht leitet den Strom zwischen den Bauteilen und verbindet die verschiedenen Komponenten zu einem geschlossenen Stromkreis. Idealerweise hat er einen sehr geringen Widerstand (sehr leitfähiges Metall + geringer Durchmesser), um Stromverluste zu minimieren.

3 Elektrische Energieversorgung

Teste dein Wissen 1:

Kreuze an, wann der Gesamtwiderstand in einer Parallelschaltung am größten ist.

- a) Wenn man zusätzlich einen kleinen Widerstand parallel schaltet.
- b) Wenn man zusätzlich einen großen Widerstand parallel schaltet.
- c) Wenn man keinen weiteren Widerstand parallel schaltet.

Antwort:

Jeder weitere parallel geschaltete Widerstand macht den Gesamtwiderstand in einer Parallelschaltung kleiner. Je kleiner der neue Widerstand ist, desto größer ist die Verringerung.

Die richtige Antwort ist daher:

c) Wenn man keinen weiteren Widerstand parallel schaltet.

Teste dein Wissen 2:

Kreuze an, wann der Gesamtwiderstand einer Serienschaltung am größten ist.

- a) Wenn man noch einen großen Widerstand hinzufügt.
- b) Wenn man noch einen kleinen Widerstand hinzufügt.
- c) Wenn man keinen weiteren Widerstand hinzufügt.

Antwort:

In einer Serienschaltung addieren sich die Widerstände. Der Gesamtwiderstand ist umso größer, je größer der hinzugefügte Widerstand ist.

Die richtige Antwort ist daher:

a) Wenn man noch einen großen Widerstand hinzufügt.

Teste dein Wissen 3:

Wovon hängt der Widerstand eines Drahtes ab? Kreuze die richtige(n) Antwort(en) an und begründe.

- a) Von seiner Länge.
- b) Von seiner Dicke.
- c) Vom Material.

Antwort:

Laut Formel für den elektrischen Widerstand R gilt der Zusammenhang:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

(ρ ... spezifischer Widerstand, l ... Drahtlänge, A ... Querschnittsfläche)

Je länger der Draht, desto mehr Zusammenstöße der Elektronen mit den Atomen des Metallgitters finden statt. Die Elektronen verlieren mehr Energie als bei einem kurzen Draht. Das wirkt sich als erhöhter Widerstand aus und für den gleichen Strom wird folglich eine höhere Spannung gebraucht. Der Kristallaufbau des metallischen Leiters (Gitterfehler) beeinflusst den Widerstand. Ein größerer Querschnitt lässt mehr Elektronen gleichzeitig fließen, was den Widerstand wiederum verkleinert. Der spezifische Widerstand ρ ist eine Materialkonstante, die abhängig vom verwendeten Material den Widerstand angibt.

Die richtigen Antworten sind daher:

- a) Von seiner Länge.
- b) Von seiner Dicke.
- c) Vom Material.

Teste dein Wissen 4:

Kreuze an, was passiert, wenn man ein Spannungsmessgerät irrtümlich wie ein Strommessgerät in einer Schaltung einbaut. Begründe deine Entscheidung.

- a) Es ist Kurzschluss.
- b) Es fließt (fast) kein Strom.
- c) Es ist kein Unterschied.

Antwort:

Ein Spannungsmessgerät hat einen sehr hohen Innenwiderstand und wird normalerweise parallel geschaltet. Wird es stattdessen wie ein Strommessgerät in Serie geschaltet, so lässt es praktisch keinen Strom durch.

Die richtige Antwort ist daher:

- b) Es fließt (fast) kein Strom.

Teste dein Wissen 5:

Warum kann es zum „Kurzschluss“ kommen, wenn man im Haushalt zu viele Geräte im selben Stromkreis in Betrieb nimmt? Kreuze die richtige Antwort an.

- a) Weil der Gesamtwiderstand der Geräte zu hoch wird.
- b) Weil der Gesamtwiderstand der Geräte zu klein wird.
- c) Weil der Strom durch die Einzelgeräte zu klein wird.

Antwort:

Geräte, die durch dieselbe Sicherung gesichert sind, sind parallel geschaltete Widerstände. In einer Parallelschaltung verringert jeder zusätzliche Verbraucher den Gesamtwiderstand. Ein kleiner Gesamtwiderstand führt zu einer hohen Stromstärke, die die Sicherungen überlasten und einen Kurzschluss auslösen kann.

Die richtige Antwort ist daher:

- b) Weil der Gesamtwiderstand der Geräte zu klein wird.

Teste dein Wissen 6:

Warum leuchtet eine Lampe sofort nach dem Einschalten des Stroms? Wähle die richtige Antwort aus.

- a) Weil die Lampe parallel geschaltet ist.
- b) Weil die Elektronen so schnell durch den Draht kommen.
- c) Weil das Signal über die Veränderung des elektrischen Zustands so rasch an die Elektronen im Glühdraht gelangt.

Antwort:

Die Elektronen bewegen sich relativ langsam, das Signal über die Veränderung des elektrischen Zustands (elektrische Feldänderung) breitet sich aber mit Lichtgeschwindigkeit aus und bewirkt die Bewegung der „freien“ Elektronen im Glühdraht. Damit dieser die richtige Temperatur erreichen kann, so dass sichtbares Licht entsteht, dauert es etwa 10 ms.

Die richtige Antwort ist daher:

c) Weil das Signal über die Veränderung des elektrischen Zustands so rasch an die Elektronen im Glühdraht gelangt.

Teste dein Wissen 7:

Warum wird ein stromführender Draht warm? Kreuze die richtige Antwort an.

- a) Weil sich die Elektronen durch die angelegte Spannung schnell bewegen.
- b) Weil die Elektronen mit den Gitterionen des Metalls zusammenstoßen.
- c) Weil es zu ständigen Zusammenstößen der Elektronen kommt.

Antwort:

Die Elektronen stoßen im Draht ständig mit den Ionen des Metallgitters zusammen und übertragen auf sie Energie. Dies führt zu heftigeren Schwingungen der Ionen, was wiederum eine Erhöhung der Temperatur im Leiter bewirkt.

Die richtige Antwort ist daher:

b) Weil die Elektronen mit den Gitterionen des Metalls zusammenstoßen.

Teste dein Wissen 8:

Wähle die richtige Aussage aus.

- a) 1 kWh = 3 600 kW
- b) 1 kWh = 1 kJ/h
- c) 1 kWh = 3 600 kJ

Antwort:

kWh (Kilowattstunde) ist eine Energieeinheit, bei der eine Leistung von 1 kW eine Stunde lang (3 600 s) geliefert wird. Rechnet man nun in Joule um, so gilt:

$$1 \text{ kWh} = 1\,000 \text{ W} \cdot 3\,600 \text{ s} = 3\,600\,000 \text{ J} = 3\,600 \text{ kJ}$$

Die richtige Antwort ist daher:

c) 1 kWh = 3 600 kJ

Rechenaufgabe 1:

Es stehen 3 gleich große Widerstände von je 6Ω zur Verfügung. Bestimme, welche Gesamtwiderstände sich durch unterschiedliche Kombinationen von Parallel- oder Serienschaltung dieser 3 Widerstände erzeugen lassen.

Antwort:

Alle drei Widerstände in Serie:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 = 6 \Omega + 6 \Omega + 6 \Omega = 18 \Omega$$

Zwei Widerstände in Serie, einer in parallel:

Zwei Widerstände in Serie:

$$R_{1,2} = R_1 + R_2 = 6 \Omega + 6 \Omega = 12 \Omega$$

Gesamtwiderstand:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_{1,2}} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{12 \Omega} + \frac{1}{6 \Omega} = \frac{3}{12 \Omega} = \frac{1}{4 \Omega} \Rightarrow R = 4 \Omega$$

Zwei Widerstände parallel, einer in Serie:

Zwei parallele Widerstände:

$$\frac{1}{R_{1,2}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{6 \Omega} + \frac{1}{6 \Omega} = \frac{2}{6 \Omega} = \frac{1}{3 \Omega} \Rightarrow R_{1,2} = 3 \Omega$$

Gesamtwiderstand:

$$R = R_{1,2} + R_3 = 3 \Omega + 6 \Omega = 9 \Omega$$

Alle drei Widerstände parallel:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{6 \Omega} + \frac{1}{6 \Omega} + \frac{1}{6 \Omega} = \frac{3}{6 \Omega} = \frac{1}{2 \Omega} \Rightarrow R = 2 \Omega$$

Es gibt insgesamt 4 verschiedenen Möglichkeiten der Konfiguration:

1. Sind alle drei Widerstände in Serie geschaltet, dann ergibt sich ein Gesamtwiderstand von 18 Ohm.
2. Sind zwei Widerstände in Serie und einer parallel geschaltet, dann ergibt sich ein Gesamtwiderstand von 4 Ohm.
3. Sind zwei Widerstände parallel und einer in Serie geschaltet, dann ergibt sich ein Gesamtwiderstand von 9 Ohm.
4. Sind alle drei Widerstände parallel geschaltet, dann ergibt sich ein Gesamtwiderstand von 2 Ohm.

Rechenaufgabe 2:

Zwei gleiche Widerstände R_2 und R_3 sind parallel geschaltet. Dieses System ist mit einem dritten gleich großen Widerstand R_1 in Serie geschaltet. Am gesamten System liegt eine Spannung von 230 V, in der Zuleitung wird eine Gesamtstromstärke $I = 1,1$ A gemessen. Ermittle, wie groß $R_1 = R_2 = R_3$ ist.

Antwort:

Gesamtwiderstand berechnen:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{230 \text{ V}}{1,1 \text{ A}} \approx 209,09 \Omega$$

Widerstand der Parallelschaltung:

Die Parallelschaltung von R_2 und R_3 ergibt:

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{2}{R_2} = \frac{2}{R_3} \quad (\text{da } R_1 = R_2 = R_3) \Rightarrow R_p = \frac{R_2}{2} = \frac{R_3}{2}$$

Gesamter Widerstand mit R_1 in Serie:

$$R = R_p + R_1 = \frac{R_3}{2} + R_3 = 209,09 \Omega$$

Wir lösen nun die Gleichung nach R_3 auf:

$$\frac{R_3}{2} + R_3 = \frac{3R_3}{2} = 209,09 \Omega \Rightarrow R_3 \approx 139,39 \Omega$$

Zusammengefasst heißt das für die drei gleich großen Widerstände:

$$R_1 = R_2 = R_3 \approx 139,39 \Omega$$

Rechenaufgabe 3:

An einem Schiebewiderstand (30 cm lang) soll eine Spannung von 5 V abgegriffen werden. Am Widerstand liegt eine Spannung von 12 V. Bestimme, wo der Schieber stehen muss.

Antwort:

Sei l_1 die Länge der abgegriffenen Spule und $l_2 = 30$ cm ist der gesamte Schiebewiderstand.

Proportionalität der Spannung:

Die Spannung ist proportional zur Länge der Widerstandsspule:

$$\frac{U_1}{l_1} = \frac{U_2}{l_2}$$

Stellen wir nun nach l_1 um und setzen die entsprechenden Werte ein:

$$l_1 = \frac{U_1 \cdot l_2}{U_2} = \frac{5 \text{ V} \cdot 30 \text{ cm}}{12 \text{ V}} = \mathbf{12,5 \text{ cm}}$$

Um eine Spannung von 5V abzugreifen, muss der Schieber bei 12,5 cm liegen.

Rechenaufgabe 4:

In einem 5 V-Stromkreis soll ein LED-Lämpchen (Betriebsspannung 2 V) bei einer Stromstärke von 0,02 A betrieben werden. Ermittle, mit welchem Vorwiderstand R es in Serie geschaltet sein muss.

Antwort:

Laut der 2. Kirchhoff'schen Regel gilt im Fall des gegebenen Stromkreises (in Serie geschalten):

$$U = U_L + U_R = 2 \text{ V} + U_R = 5 \text{ V}$$

(U ... Gesamtspannung, U_L ... Betriebsspannung der LED-Lämpchens,

U_R ... Spannungsabfall beim Vorwiderstand)

Folgt für den Spannungsabfall: $U_R = U - U_L = 5 \text{ V} - 2 \text{ V} = \mathbf{3 \text{ V}}$

Nun setzen wir diesen Wert in die Formel für den elektrischen Widerstand ein:

$$R = \frac{U_R}{I} = \frac{3 \text{ V}}{0,02 \text{ A}} = \mathbf{150 \Omega}$$

Der Vorwiderstand muss somit 150 Ohm betragen.

Zusatz: Wir hätten auch genauso den Widerstand des Lämpchens und des Gesamtwiderstands einzeln berechnen und den Vorwiderstand dadurch ermitteln können. Da aber die Spannungen bereits gegeben sind, haben wir uns einen zusätzlichen Rechenschritt gespart.

Rechenaufgabe 5:

Die Pole einer Spannungsquelle von 100 V werden über den Widerstand $R_1 = 498 \Omega$ und einen Widerstand von $R_2 = 2 \Omega$ in Serie miteinander verbunden. Parallel zu R_2 wird ein Voltmeter mit Widerstand $R_3 = 1 \text{ M}\Omega$ angeschlossen. Bestimme, wie groß die Stromstärke durch das Gerät ist.

Antwort:

Berechnung des Gesamtwiderstands der Parallelschaltung von R_2 und R_3 : $1 \text{ M}\Omega = 1 \cdot 10^6 \Omega$

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{2 \Omega} + \frac{1}{1 \cdot 10^6 \Omega}$$

Da R_3 sehr groß im Vergleich zu R_2 ist, wird der Einfluss von R_3 vernachlässigbar klein.

Der Näherungswert für R_p ist daher:

$$R_p \approx R_2 = 2 \Omega$$

Gesamtwiderstand und Stromstärke im Stromkreis:

Die Parallelschaltung von R_2 und R_3 ist in Serie mit R_1 .

Der Gesamtwiderstand lautet daher:

$$R = R_1 + R_p = 498 \Omega + 2 \Omega = 500 \Omega$$

Die Gesamtstromstärke I ergibt sich nach dem Ohm'schen Gesetz: ($1 \Omega = 1 \text{ V/A}$)

$$I = \frac{U}{R} = \frac{100 \text{ V}}{500 \text{ V/A}} = 0,2 \text{ A}$$

Spannung über die Parallelschaltung von R_2 und R_3 :

Die Spannung U_p über R_2 und R_3 ist dieselbe wie die Spannung über R_p , da sie parallel geschaltet sind:

$$U_p = I \cdot R_p = 0,2 \text{ A} \cdot 2 \text{ V/A} = 0,4 \text{ V}$$

Stromstärke durch das Voltmeter R_3 :

Die Stromstärke durch das Voltmeter I_{R_3} wird nach dem Ohm'schen Gesetz berechnet:

$$I_{R_3} = \frac{U_p}{R_3} = \frac{0,4 \text{ V}}{1 \cdot 10^6 \text{ V/A}} = 0,4 \cdot 10^{-6} \text{ A} = 0,4 \mu\text{A}$$

Die Stromstärke durch das Voltmeter ist mit $0,4 \mu\text{A}$ vernachlässigbar klein.

Rechenaufgabe 6:

Ein 1200 W-Föhn ist an 230 V angeschlossen. Berechne den Widerstand des Föhns.

Antwort:

Um den **Widerstand R** des Föhns zu bestimmen, nutzen wir die Formel für den elektrischen Widerstand über die **Leistung P** und setzen die gegebenen Werte ein: ($1 \text{ W} = 1 \text{ V} \cdot \text{A}$, $1 \Omega = 1 \text{ V/A}$)

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{(230 \text{ V})^2}{1200 \text{ V} \cdot \text{A}} = \frac{52900 \text{ V}^2}{1200 \text{ V} \cdot \text{A}} \approx 44 \Omega$$

Der Widerstand des Föhns beträgt somit etwa **44 Ohm**.

Rechenaufgabe 7:

Ein Batterieladegerät weist bei einer Ausgangsspannung von 12 V einen Ladestrom von 6 A auf.

a) Ermittle, wie groß seine Leistung ist.

b) Bestimme die Arbeit, die beim Aufladen innerhalb von 3 h verrichtet wird.

Antwort:

a)

Um die **Leistung P** zu ermitteln, nutzen wir die Formel für die Leistung des elektrischen Stroms:

$$P = I \cdot U = 6 \text{ A} \cdot 12 \text{ V} = 72 \text{ W}$$

Die Leistung des Batterieladegeräts beträgt somit **72 Watt**.

b)

Für die **Arbeit W** beim Aufladen in einer bestimmten **Zeit t** gilt:

$$W = P \cdot t = 72 \text{ W} \cdot 3 \text{ h} = 216 \text{ Wh} = 0,216 \text{ kWh}$$

Um dies in Kilojoule umzurechnen, müssen wir zunächst die Kilowattstunden in Kilowattsekunden umrechnen: ($1 \text{ Ws} = 1 \text{ J}$)

$$W = (0,216 \cdot 3\,600) \text{ kWs} \approx 778 \text{ kJ}$$

Die Arbeit, die beim Aufladen innerhalb von 3 Stunden verrichtet wird, beträgt 0,216 Kilowattstunden, was etwa 778 Kilojoule entspricht.

Rechenaufgabe 8:

Ein elektrisches Heizgerät hat eine Leistung von 1800 W. Bestimme den monatlichen (30 Tage) Energiebedarf, wenn es täglich 8 h eingeschaltet ist

Antwort:

Um den Energiebedarf pro Tag ($t = 8 \text{ h}$) zu berechnen, nehmen wir die Formel für die Arbeit in Abhängigkeit der Leistung zu Hand:

$$W_{\text{Tag}} = P \cdot t = 1\,800 \text{ W} \cdot 8 \text{ h} = 14\,400 \text{ Wh} = 14,4 \text{ kWh}$$

Das Ergebnis müssen wir nur mehr noch mit 30 multiplizieren, um den Energiebedarf pro Monat zu bestimmen:

$$W_{\text{Monat}} = W_{\text{Tag}} \cdot 30 = 14,4 \text{ kWh} \cdot 30 = 432 \text{ kWh}$$

Der Energiebedarf für einen Monat beträgt somit 432 Kilowattstunden.

4 Elektrisches Feld

Teste dein Wissen 1:

Beschreibe, wie Feldlinienbilder für magnetische Kräfte zustande kommen und wie für elektrische.

Antwort:

Magnetische Feldlinienbilder lassen sich mit Eisenfeilspänen oder kleinen Kompassnadeln in der Umgebung von stromführenden Drähten oder Permanentmagneten erzeugen. Sie entstehen durch die Orientierung eines magnetischen Felds, das durch Pole (Nord- und Südpol) bestimmt wird. Sie verlaufen vom Nordpol zum Südpol.

Elektrische Feldlinienbilder stellen die Richtung der elektrischen Feldkraft dar, welche von einer positiven Ladung weg und zu einer negativen Ladung hinzeigt. Feldlinienbilder helfen, die Stärke und die Richtung des Felds zu veranschaulichen. Sie lassen sich mit feinen Körnern aus nichtleitendem Material erzeugen, die sich in einer flachen, mit Öl (z.B. Rizinusöl) gefüllten Glasschale zwischen zwei geladenen Platten zu parallelen Ketten anordnen.

Teste dein Wissen 2:

Beschreibe, was man unter einem elektrischen Feld versteht.

Antwort:

Ein elektrisches Feld existiert in der Umgebung von elektrischen Ladungen und bestimmt Richtung und Größe der elektrischen Kraft zwischen verschiedenen Ladungen.

Teste dein Wissen 3:

Beschreibe, was man unter Feldlinien versteht.

Antwort:

Feldlinien sind grafische Hilfsmittel und dienen der Veranschaulichung. Feldlinien entspringen definitionsgemäß aus positiven Ladungen und enden in negativen Ladungen. Die Stärke der elektrischen Kraft ist proportional zur Flächendichte der Feldlinien. In jedem Punkt entlang einer Feldlinie ist die Feldlinienrichtung gleich der Richtung der Kraft auf eine positive Probeladung.

Teste dein Wissen 4:

Erörtere, welcher Unterschied zwischen der Kraft auf Ladungen und der Feldstärke besteht.

Antwort:

Die (**Gesamt**)Kraft F , die ein System von Punktladungen auf eine Probeladung q ausübt, hängt von deren beliebig wählbaren, möglichst geringen Größe ab und beschreibt die direkte Wirkung des elektrischen Feldes auf die Probeladung. Die **Feldstärke** E ist Kraft pro Ladung und ist für die Ladung (bzw. Ladungsverteilung) charakteristisch, die die Quelle des Feldes ist.

Es gilt der Zusammenhang: $\vec{E} = \vec{F}/q$

Teste dein Wissen 5:

Beschreibe, welche Form das Feld einer Ladungsverteilung in großer Entfernung hat.

Antwort:

In großer Entfernung verhält sich das elektrische Feld einer Ladungsverteilung wie das einer Punktladung mit der Gesamtladung der Verteilung, die gleich der vektoriellen Summe der Feldvektoren der Einzelladungen ist. Das Feld ist radialsymmetrisch und nimmt mit dem Quadrat des Abstands ab:

$$E \propto \frac{1}{r^2}$$

Teste dein Wissen 6:

Erkläre, was man unter elektrischer Spannung versteht.

Antwort:

Die **Spannung** U ist die Potentialdifferenz zwischen zwei Punkten auf verschiedenen Äquipotentialflächen. Sie ist gleich der potenziellen Energie die in Form von **Arbeit** W pro Ladungseinheit benötigt wird, um eine Ladung in einem elektrischen Feld zu bewegen:

$$U = \frac{W}{q}$$

Teste dein Wissen 7:

Nenne die Einheit der elektrischen Spannung.

Antwort:

Die Einheit der elektrischen Spannung ist **Volt** V und entspricht der Energie von **einem Joule** J pro **Coulomb** C Ladung:

$$1 V = 1 J/C$$

Teste dein Wissen 8:

Analysiere, welche Analogien es zwischen dem elektrischen Feld und dem Gravitationsfeld gibt.

Antwort:

Bei beiden Feldern nimmt die Feldstärke bei zunehmender Entfernung von der Quelle wie $1/r^2$ ab. Änderungen dieser Felder breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus. Im elektrischen Feld wird die Feldstärke durch Ladungen erzeugt, während sie im Gravitationsfeld durch Massen verursacht wird. Beide haben Feldlinien, die die Kraftwirkung darstellen, und es gilt eine Feldstärkegleichung ($F = m \cdot g$ für das Gravitationsfeld, $F = q \cdot E$ für das elektrische Feld).

Teste dein Wissen 9:

Beschreibe die Aufgabe von Kondensatoren

Antwort:

Ein Kondensator speichert elektrische Ladung und die damit zusammenhängende Energie und gibt sie bei Bedarf wieder ab. Die zur Ladungstrennung notwendige Arbeit kann bei der Entladung (Stromfluss!) wieder gewonnen werden. Sie werden in Stromkreisen verwendet, um Energie zu speichern, Spannung zu glätten oder Schaltungen zeitlich zu verzögern. Kondensatoren werden in der Praxis in vielen elektrischen Geräten und ganz besonders in der Schwachstrom- und Computertechnik als kurzfristige Ladungsspeicher verwendet.

Teste dein Wissen 10:

Erkläre, was Kapazität von Kondensatoren bedeutet.

Antwort:

Die **Kapazität C** eines Kondensators gibt an, wie viel elektrische **Ladung Q** er bei einer bestimmten angelegten **Spannung U** speichern kann:

$$C = \frac{Q}{U}$$

Teste dein Wissen 11:

Erkläre, wie man die Kapazität von Kondensatoren vergrößern kann.

Antwort:

Eine Kapazitätsvergrößerung erfolgt, wenn die ladungstragenden (**Platten-)Flächen vergrößert** werden, ihr **Abstand zueinander verkleinert** wird und als Medium zwischen den Platten statt Luft ein **besserer Isolator (Dielektrikum)** verwendet wird.

Teste dein Wissen 12:

Erkläre, was im Inneren eines elektrischen Leiters geschieht, wenn man ihn in ein elektrostatisches Feld bringt. Welche praktische Anwendung hat dies?

Antwort:

Im Inneren eines elektrischen Leiters verschieben sich die frei beweglichen Elektronen relativ zu den positiven Metall-Ionen. Dadurch entsteht im Metall ein inneres Feld, das stark genug ist, um eine weitere Verschiebung von Ladungen zu verhindern. Daher hat das innere Feld die gleiche Stärke, jedoch die entgegengesetzte Richtung wie das angelegte Feld. Die Überlagerung der beiden Felder bewirkt, dass das Leiterinnere feldfrei ist. Der Leiter schirmt somit das Innere vollständig ab. Dies wird beispielsweise bei der Abschirmung von Geräten oder auch ganzen Räumen gegen elektromagnetische Störungen/Einwirkungen angewendet. (Faradaykäfig)

Teste dein Wissen 13:

Erkläre, was im Inneren eines Isolators geschieht, wenn man ihn in ein elektrostatisches Feld bringt. Welche praktische Anwendung hat dies?

Antwort:

Isolatoren besitzen keine frei verschiebbaren Ladungen.

Orientierungspolarisation: Allerdings gibt es Isolatoren mit Dipol-Molekülen (eine positive und eine negative Seite) die sich in einem elektrostatischen Feld längs der Feldlinien (teilweise) ausrichten.

Verschiebungspolarisation: In Molekülen, die normalerweise keine Dipole sind, verschieben sich positive und negative Ladungen in einem elektrostatischen Feld in entgegengesetzter Richtung.

Aufgrund der Polarisation wird das Feld im Inneren des Isolators abgeschwächt. Der Isolator ist im Inneren somit nicht vollständig feldfrei. Eine praktische Anwendung findet sich in Kondensatoren, wo die relative Permittivität (Permittivitätszahl ϵ_r) des Dielektrikums die Kapazität erhöht.

Rechenaufgabe 1:

Zwei gleich große Ladungen stoßen einander in einem Abstand $r = 0,1 \text{ m}$ mit einer Kraft $F = 10^{-2} \text{ N}$ ab. Berechne, wie groß die Ladungen sind.

Antwort:

Das Coulomb'sche Gesetz: Die elektrische Kraft F zwischen zwei punktförmigen Ladungen Q_1 und Q_2 ist gegeben durch:

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

wobei $\epsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{N} \cdot \text{m}^2}$ die elektrische Feldkonstante ist.

Da $Q_1 = Q_2 = Q$ vereinfacht sich die Formel zu: (Der Betrag $| \cdot |$ kann ignoriert werden, da die Multiplikation zweier Ladungen gleichen Vorzeichens immer einen positiven Wert ausgibt!)

$$F = k \cdot \frac{Q^2}{r^2} \quad \left(\text{mit } k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \approx 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2} \right)$$

Stellen wir nun die Formel nach Q um und erhalten:

$$Q = \sqrt{F/k} \cdot r = \sqrt{0,01 \text{ N} / (9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2})} \cdot 0,1 \text{ m} \approx 10^{-7} \text{ C} = 0,1 \mu\text{C}$$

Die Ladungen sind etwa 0,1 Mikrocoulomb groß.

Rechenaufgabe 2:

Eine Ladung $Q_1 = 1 \text{ C}$ hat den Abstand $r = 1 \text{ m}$ von der Ladung $Q_2 = 10^{-10} \text{ C}$.

- Berechne, wie groß die Kraft auf die Ladung Q_1 ist.
- Berechne, wie groß die Kraft auf die Ladung Q_2 ist.

Antwort:

Das Coulomb'sche Gesetz: Die elektrische Kraft F zwischen zwei punktförmigen Ladungen Q_1 und Q_2 ist gegeben durch:

$$F = k \cdot \frac{|Q_1 \cdot Q_2|}{r^2} \quad \left(\text{mit } k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \approx 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2} \right)$$

wobei $\epsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{N} \cdot \text{m}^2}$ die elektrische Feldkonstante ist.

Setzen wir die Werte ein:

$$F = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2} \cdot \frac{1 \text{ C} \cdot 10^{-10} \text{ C}}{1 \text{ m}^2} = 0,9 \text{ N}$$

Nach dem allgemeinen Wechselwirkungsgesetz (Drittes Newtonsches Gesetz: „Actio est Reactio“) müssen die Kräfte gleich groß sein. Sie betragen 0,9 Newton.

Rechenaufgabe 3:

Im Wasserstoffatom beträgt der Abstand zwischen Atomkern und Elektron rund 10^{-10} m. Der Atomkern (ein Proton) trägt eine Ladung $Q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C. Das Elektron hat eine gleich große negative Ladung.

- Ermittle, wie groß die elektrische Anziehungskraft zwischen Atomkern und Elektron ist.
- Berechne, wie groß die Gravitationskraft zwischen Atomkern und Elektron ist, wenn deren Massen $m_K = 1,7 \cdot 10^{-27}$ kg und $m_e = 9 \cdot 10^{-31}$ kg betragen.
- Um welchen Faktor ist die elektrische Anziehungskraft größer als die Gravitationskraft?
- Nach dem Rutherford'schen Atommodell bewegt sich das Elektron auf einer Kreisbahn um den Kern. Welche Bahngeschwindigkeit musste Rutherford für das Elektron annehmen?
- Die Bewegung des Elektrons stellt einen kleinen Kreisstrom dar. Berechne, wie groß die Stromstärke ist.

Antwort:

a) Die elektrische Anziehungskraft F_{el} zwischen Elektron und Atomkern (ein Proton) wird mit Hilfe des Coulomb'schen Gesetzes berechnet:

$$F_{el} = k \cdot \frac{|Q \cdot (-Q)|}{r^2} = k \cdot \frac{Q^2}{r^2} \quad \left(\text{mit } k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \approx 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2} \right)$$

(ϵ_0 ... elektrische Feldkonstante, r ... Abstand Atomkern-Elektron,
 $Q/-Q$... Proton-/Elektronladung)

Setzen wir nun die gegebenen Werte ein:

$$F_{el} = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2} \cdot \frac{(1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C})^2}{(10^{-10} \text{ m})^2} \approx 2,3 \cdot 10^{-8} \text{ N}$$

Die elektrische Anziehungskraft zwischen Atomkern und Elektron beträgt in etwa $2,3 \cdot 10^{-8}$ Newton.

b) Die Gravitationskraft F_G zwischen Elektron und Proton wird mit Hilfe des Newtons Gravitationsgesetzes berechnet:

$$F_G = G \cdot \frac{m_K \cdot m_e}{r^2}$$

(G ... Gravitationskonstante, $m_{K/e}$... Kern-/Elektronmasse, r ... Abstand Atomkern-Elektron)

Setzen wir nun die gegebenen Werte ein: ($1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$)

$$F_G = 6,7 \cdot 10^{-11} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \frac{1,7 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot 9 \cdot 10^{-31} \text{ kg}}{(10^{-10} \text{ m})^2} \approx 1,0 \cdot 10^{-47} \text{ N}$$

Die Gravitationskraft zwischen Atomkern und Elektron beträgt in etwa $1,0 \cdot 10^{-47}$ Newton.

c) Das Verhältnis der elektrischen zur Gravitationskraft ist gegeben durch:

$$\frac{F_{el}}{F_G} = \frac{2,3 \cdot 10^{-8} \text{ N}}{1,0 \cdot 10^{-47} \text{ N}} \approx 2,3 \cdot 10^{39}$$

Die elektrische Anziehungskraft ist etwa $2,3 \cdot 10^{39}$ -mal größer als die Gravitationskraft. Beziehungsweise: Die Gravitationsanziehung ist rund 39 Zehnerpotenzen schwächer als die elektrische Anziehung.

d) Für die kinetische Energie des Elektrons gilt $E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v_e^2$. Ein Elektron wird nur bei einer einzigen Geschwindigkeit v_e auf einer Kreisbahn mit dem Radius r gehalten.

Diese Geschwindigkeit kann klassisch bestimmt werden, indem man die elektrische Anziehungskraft (Coulombkraft) F_{el} als Zentripetalkraft F_{ZP} auffasst, welche das Elektron auf seiner Bahn hält. Also gilt:

$$F_{ZP} = F_{el} \Rightarrow \frac{m_e \cdot v_e^2}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q^2}{r^2}$$

Lösen wir nun nach der Bahngeschwindigkeit v_e auf, folgt:

$$v_e = \sqrt{\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q^2}{m_e \cdot r}} = \sqrt{\frac{F_{el} \cdot r}{m_e}}$$

Setzen wir nun die gegebenen Werte ein: ($1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$)

$$v_e = \sqrt{\frac{2,3 \cdot 10^{-8} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 10^{-10} \text{ m}}{9 \cdot 10^{-31} \text{ kg}}} \approx 1,6 \cdot 10^6 \text{ m/s}$$

Rutherford musste somit eine Bahngeschwindigkeit von etwa $1,6 \cdot 10^6$ Metern pro Sekunde für das Elektron annehmen.

e) Das Elektron mit der Ladung $-Q$ stellt einen Kreisstrom dar.

Die **Stromstärke I** ist die transportierte **Ladungsmenge Q** pro **Zeiteinheit t** :

$$I = \frac{Q}{t}$$

wobei wir für die Zeiteinheit die **Umlaufzeit T** des Elektrons um den Atomkern hernehmen:

$$T = \frac{2\pi \cdot r}{v} = \frac{2\pi \cdot 10^{-10} \text{ m}}{1,6 \cdot 10^6 \text{ m/s}} \approx 4 \cdot 10^{-16} \text{ s}$$

Setzen wir nun die gegebenen Werte in die Formel für die Stromstärke ein:

$$I = \frac{Q}{T} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}}{4 \cdot 10^{-16} \text{ s}} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ A}$$

Die Stromstärke beträgt somit $4 \cdot 10^{-4}$ Ampere (bzw. 0,4 Milliampere).

Rechenaufgabe 4:

Ein K^+ -Ion hat einen Radius von etwa 10^{-10} m . Ermittle, wie groß die Kraft auf ein Elektron bei diesem Abstand vom Kern ist. Stelle die Abnahme dieser Kraft grafisch dar, wenn der Abstand schrittweise auf 10^{-9} m vergrößert wird. Beschreibe das Ergebnis!

Antwort:

Ein K^+ -Ion hat **19 Protonen**, aber nur **18 Elektronen**, weil ein Elektron fehlt, wodurch es eine positive Nettoladung (positive Protonladung) von $Q = +1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ hat.

Die elektrische Anziehungskraft F_{el} zwischen Elektron und Atomkern (eine Protonladung) wird mit Hilfe des Coulomb'schen Gesetzes berechnet:

$$F_{el} = k \cdot \frac{|Q \cdot (-Q)|}{r^2} = k \cdot \frac{Q^2}{r^2} \quad \left(\text{mit } k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \approx 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2} \right)$$

(ϵ_0 ... elektrische Feldkonstante, r ... Abstand Atomkern-Elektron,
 $Q/-Q$... Proton-/Elektronladung)

Die Kraft F nimmt mit dem Quadrat des Abstands r ab.

Bei $r = 10^{-10} \text{ m}$ beträgt die Kraft:

$$F_{el} = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2} \cdot \frac{(1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C})^2}{(10^{-10} \text{ m})^2} \approx 2,3 \cdot 10^{-8} \text{ N}$$

Für $r = 10^{-9}$ m beträgt die Kraft:

$$F_{el} = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2} \cdot \frac{(1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C})^2}{(10^{-9} \text{ m})^2} \approx 2,3 \cdot 10^{-10} \text{ N}$$

Die Kraft nimmt reziprok zum Quadrat des Abstands r ($\propto 1/r^2$) ab, beim zehnfachen Abstand ist sie auf 1 % gesunken.

Folgende Grafik veranschaulicht die Abhängigkeit der Kraft mit zunehmendem Abstand:

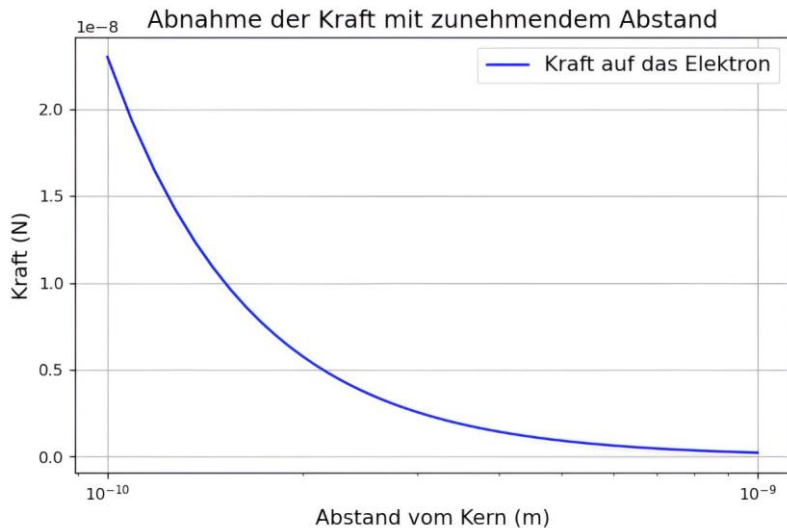


Bild: Nikola Filipovic, Wien

Rechenaufgabe 5:

Eine Wolke befindet sich 420 m hoch über der Erdoberfläche. Sie hat eine Fläche von 10^5 m^2 . Zwischen Wolke und Erde befindet sich ein elektrisches Feld mit der Feldstärke $2 \cdot 10^5 \text{ V/m}$.

- Berechne, wie groß die Spannung zwischen Wolke und Erdboden ist.
- Berechne, wie groß die elektrische Ladung der Wolke ist.

Antwort:

a) Die **Spannung U** in einem elektrischen Feld wird durch folgende Beziehung berechnet:

$$U = E \cdot d$$

(E ... elektrische Feldstärke, d ... Abstand zwischen Wolke-Erdoberfläche)

Wir setzen nun die gegebenen Werte ein und erhalten:

$$U = 2 \cdot 10^5 \text{ V/m} \cdot 420 \text{ m} = 8,4 \cdot 10^7 \text{ V}$$

Die Spannung zwischen Wolke und Erdboden beträgt $8,4 \cdot 10^7$ Volt. (84 Megavolt)

b) Die **Ladung Q** kann mit der Beziehung zwischen der **elektrischen (Flächen)ladungsdichte σ** und der **elektrischen Feldstärke E** berechnet werden:

$$\sigma = \epsilon_0 \cdot E$$

wobei $\epsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{N} \cdot \text{m}^2}$ die elektrische Feldkonstante ist.

Dabei entspricht die **Flächenladungsdichte σ** dem **Verhältnis aus Ladung Q und Fläche A** :

$$\sigma = Q/A$$

Aus den obigen Beziehungen können wir eine Formel zur Berechnung der Ladung Q erstellen:

$$Q = \sigma \cdot A = \epsilon_0 \cdot E \cdot A$$

Nun setzen wir die gegebenen Werte ein und erhalten: (1 N/C = 1 V/m)

$$Q = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 2 \cdot 10^5 \text{ V/m} \cdot 10^5 \text{ m}^2 = \mathbf{0,177 \text{ C}}$$

Die elektrische Ladung der Wolke beträgt 0,177 Coulomb.

Rechenaufgabe 6:

Ein Elektron ($m_e = 9 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$) durchläuft die Spannung $U = 220 \text{ V}$. Ermittle, welche Energie und welche Geschwindigkeit es hat, wenn es anfänglich in Ruhe war.

Antwort:

a) Die **Energie E_e** , die ein Elektron gewinnt, wenn es durch eine **Spannung von 1 Volt** beschleunigt wird, ist definiert als **ein Elektronenvolt (1 eV)**. In Joule ist das:

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} \Rightarrow E_e = 220 \text{ eV} = 220 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} = \mathbf{3,52 \cdot 10^{-17} \text{ J}}$$

Sie kann aber auch aus dem Produkt der **Potentialdifferenz (Spannung U)** und der **Ladung q_e** des Elektrons bestimmt werden:

$$E_e = q_e \cdot U = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 220 \text{ V} = \mathbf{3,52 \cdot 10^{-17} \text{ J}}$$

b) Die berechnete Energie ist gleich der kinetischen Energie des Elektrons:

$$E_e = E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v^2$$

Wir stellen nun nach v um und setzen die gegebenen Werte ein: (1 J = 1 kg·m²/s²)

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{kin}}{m_e}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 3,52 \cdot 10^{-17} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}}{9 \cdot 10^{-31} \text{ kg}}} \approx \mathbf{8,8 \cdot 10^6 \text{ m/s}}$$

Das Elektron hat eine Energie von ca. $3,52 \cdot 10^{-17} \text{ J}$ mit der Geschwindigkeit $8,8 \cdot 10^6 \text{ m/s}$.

Rechenaufgabe 7:

Berechne die Ladungsmenge, die durch Anschluss einer Hochspannungsquelle mit 10 kV zwischen den Platten eines Plattenkondensators verschoben wird, wenn diese bei 1 m² Fläche einen Abstand von 10 cm haben. Welche Stromstärke könnte 1 ms lang erreicht werden? Überlege, ob Plattenkondensatoren als Ladungsspeicher für die Energietechnik brauchbar sind.

Antwort:

Die **Ladungsmenge Q** , die verschoben wird, ergibt sich aus dem **Produkt der Kapazität C** des Plattenkondensators und der **Hochspannungsquelle U** :

$$Q = C \cdot U$$

Für die Kapazität eines Plattenkondensators gilt auch:

$$C = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d}$$

(ϵ_0 ... elektrische Feldkonstante, A ... Fläche einer Plattenseite, d ... Abstand zw. den Platten)

Aus den obigen Beziehungen können wir eine Formel zur Berechnung der Ladung Q erstellen:

$$Q = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d} \cdot U$$

Nun setzen wir die gegebenen Werte ein und erhalten: (1 N/C = 1 V/m)

$$Q = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \frac{1 \text{ m}^2}{0,1 \text{ m}} \cdot 10\,000 \text{ V} = \mathbf{8,85 \cdot 10^{-7} \text{ C}}$$

Die Ladungsmenge beträgt etwa $8,85 \cdot 10^{-7} \text{ Coulomb}$ ($0,885 \mu\text{C}$).

Die **Stromstärke I** ist die **Ladung Q** , geteilt durch die **verstrichene Zeit t** ($1 \text{ ms} = 0,001 \text{ s}$):

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{8,85 \cdot 10^{-7} \text{ C}}{10^{-3} \text{ s}} = 8,85 \cdot 10^{-4} \text{ A}$$

Für eine Millisekunde könnte eine Stromstärke von **0,885 Milliampere** erreicht werden.

Nein, Plattenkondensatoren wären als Ladungsspeicher für die Energietechnik grundsätzlich nicht brauchbar, da bereits für den einstündigen Betrieb einer 100-W-Lampe ein Kondensator mit etwa 6 Farad notwendig wäre. Sie haben eine geringe Kapazität.

Begründung: 100 Watt Leistung erfordern bei der Netzspannung von 230 V einen Strom von 0,435 A. Innerhalb einer Stunde wäre die Ladung von $0,435 \cdot 3600 \text{ As} = 1566 \text{ C}$ geflossen. Um sie zu speichern, braucht man bei 230 V Spannung eine Kapazität von $1566/230 \text{ C/V} = 6,8 \text{ F}$

Stattdessen werden in der Energietechnik oft Superkondensatoren oder Batterien verwendet, die wesentlich höhere Energiedichten bieten.

Rechenaufgabe 8:

Berechne, wie groß die Kapazität eines handlichen Plattenkondensators ($A = 0,01 \text{ m}^2$, $d = 1 \text{ cm}$) ist. Vergleiche mit technischen Kondensatoren.

Antwort:

Die Kapazität eines Plattenkondensators wird mit der Formel berechnet:

$$C = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d}$$

(ϵ_0 ... elektrische Feldkonstante, A ... Fläche einer Plattenseite, d ... Abstand zw. den Platten)

Wir setzen die gegebenen Werte ein und erhalten: ($1 \text{ N/C} = 1 \text{ V/m}$, $1 \text{ C/V} = 1 \text{ F}$)

$$C = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \frac{0,01 \text{ m}^2}{0,01 \text{ m}} = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F}$$

Die Kapazität des handlichen Plattenkondensators beträgt etwa 8,85 Pikofarad (pF).

Vergleich mit technischen Kondensatoren:

Plattenkondensatoren:

Typische handliche Plattenkondensatoren haben Kapazitäten im Bereich von Pikofarad bis Nanofarad (10^{-12} F bis 10^{-9} F). Der berechnete Wert von 8,85 pF passt gut in diesen Bereich.

Technische Kondensatoren:

- **Keramikkondensatoren:** Kapazitäten bis zu 100 Mikrofarad (10^{-4} F) gibt es oft in kleinen Bauformen.
- **Elkos (Elektrolytkondensatoren):** Kapazitäten im Bereich von 1 Millifarad bis zu mehreren Farad.
- **Superkondensatoren:** Kapazitäten von Farad bis Kilofarad, speziell für Energiespeicheranwendungen.

Rechenaufgabe 9:

Die Spannung einer Gewitterwolke in etwa 3 km Höhe beträgt gegen den Erdboden rund 30 Mio. Volt. Die Feldstärke von ca. 10^4 V/m reicht für eine Ionisierung der Luft nicht aus. Wegen der Turbulenz der Luftmassen ist die Ladungsverteilung an der negativen Unterseite der Wolke nicht gleichmäßig, so dass lokal Feldstärken von 10^7 V/m erreicht werden. Es kommt zu einem Blitzüberschlag zwischen Wolkenteilen oder zum Erdboden. Zeige, dass bei diesen Feldstärken die Flächenladung rund 10^{-4} C/m^2 beträgt. Berechne, wie groß abgeführte Ladung und

Stromstärke sind, wenn ein Blitz die Ladung einer Wolkenfläche von rund 10^5 m^2 in etwa 1 ms abführt.

Antwort:

Die **Flächenladungsdichte** σ ist gegeben durch:

$$\sigma = \epsilon_0 \cdot E$$

(ϵ_0 ... elektrische Feldkonstante, E ... elektrische Feldstärke)

Wir setzen die gegebenen Werte ein: ($1 \text{ N/C} = 1 \text{ V/m}$)

$$\sigma = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 10^7 \text{ V/m} = 8,85 \cdot 10^{-5} \text{ C/m}^2$$

Dabei entspricht die **Flächenladungsdichte** auch dem **Verhältnis aus der abgeführten Ladung Q und der Wolkenfläche A** :

$$\sigma = Q/A$$

Aus den obigen Beziehungen können wir eine Formel zur Berechnung der Ladung Q erstellen:

$$Q = \epsilon_0 \cdot E \cdot A = \sigma \cdot A$$

Nun setzen wir die gegebenen Werte ein und erhalten: ($1 \text{ N/C} = 1 \text{ V/m}$)

$$Q = 8,85 \cdot 10^{-5} \text{ C/m}^2 \cdot 10^5 \text{ m}^2 = 8,85 \text{ C}$$

Die **Stromstärke I** ist die **Ladung Q** , geteilt durch die **verstrichene Zeit t** ($1 \text{ ms} = 0,001 \text{ s}$):

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{8,85 \text{ C}}{10^{-3} \text{ s}} = 8,85 \cdot 10^3 \text{ A}$$

Die Flächenladung bei lokalen Feldstärken von 10^7 V/m entspricht tatsächlich $8,85 \cdot 10^{-5} \text{ C/m}^2$ bzw. rund 10^{-4} C/m^2 . Für eine Millisekunde könnte dabei eine Stromstärke von 8,85 Kiloampere erreicht und eine Ladung von etwa 8,85 Coulomb abgeführt werden.

5 Elektrischer Strom und Magnetfeld

Teste dein Wissen 1:

Beschreibe Oersted's Entdeckung.

Antwort:

1820 entdeckte Däne Christian Oersted, dass eine Magnetnadel, über die parallel ein stromführender Draht gespannt ist, aus ihrer Nord-Süd-Stellung abgelenkt wird.

Der Strom erzeugt ein Magnetfeld um den Leiter. Seine Entdeckung legte den Grundstein für das Verständnis des Zusammenhangs zwischen Elektrizität und Magnetismus.

Teste dein Wissen 2:

Erörtere, welches Magnetfeld rund um einen geraden stromführenden Leiter besteht.

Antwort:

Das Magnetfeld um einen geraden stromführenden Leiter besteht aus (konzentrischen) Kreisen, deren Richtung durch die **Rechte-Hand-Regel** bzw. **UVW-Regel** (genannt nach **U**rsache (I), **V**ermittlung (B) und **W**irkung (F)) bestimmt wird: Wenn der Daumen in die technische Stromrichtung zeigt, gibt der Zeigefinger den Umlaufsinn der Feldlinien um den Leiter an.

Teste dein Wissen 3:

Nenne die Einheit des Feldes B . Wie ist sie definiert?

Antwort:

Einheit: **Tesla (T)**. Ein Tesla ist definiert durch die **Kraft(-einwirkung) F** auf einen **Leiter der Länge s** , der vom **Strom I** durchflossen wird und normal zur Feldrichtung steht:

$$B = \frac{F}{I \cdot s}$$

Teste dein Wissen 4:

Beschreibe, wie die Lorentzkraft wirkt.

Antwort:

Im Allgemeinen gilt, dass im **B -Feld** (magnetische Flussdichte) auf einen **Leiter der Länge s** bei der **Stromstärke I** die **Lorentzkraft F** wirkt:

$$F = I \cdot s \cdot B \cdot \sin(\alpha)$$

α ist dabei der **Winkel zwischen Stromrichtung und Feldrichtung**.

Fließt der **Strom normal zur Feldrichtung**, dann ist $\sin(90^\circ) = \sin(\pi/2) = 1$:

$$F = I \cdot s \cdot B$$

Auf Ströme parallel zur Feldrichtung wirkt keine Kraft.

Die Richtungen von Strom I , Feld B und Kraft F folgen einer **Rechte-Hand-Regel** bzw. **UUV-Regel** (genannt nach **U**rsache (I), **V**ermittlung (B) und **W**irkung (F))

Eine weitere Formulierung bezieht sich auf **bewegte Ladungen q** :

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

Da die Lorentzkraft stets normal zur Bewegungsrichtung steht, verändert sie nur die Richtung der **Geschwindigkeit v** , aber nicht deren Betrag.

Teste dein Wissen 5:

Beschreibe, wie sich geladene Teilchen im Magnetfeld bewegen.

Antwort:

Geladene Teilchen bewegen sich im Magnetfeld auf **spiralförmigen** oder **kreisförmigen Bahnen**, wenn sie eine **Geschwindigkeitskomponente v_{\perp} senkrecht zum Magnetfeld** haben, da sie durch die Lorentzkraft normal zur Bewegungsrichtung abgelenkt werden.

Für **homogene Magnetfelder** gilt deshalb:

Geladene Teilchen q mit **Masse m** bewegen sich im homogenen Magnetfeld auf schraubenförmigen Bahnen. Die Achse der Schraubenbahn liegt parallel zur Feldrichtung. Der **Radius r der Schraubenbahn** beträgt:

$$r = \frac{m \cdot v_{\perp}}{q \cdot B}$$

Teste dein Wissen 6:

Erkläre, warum parallele elektrische Ströme aufeinander Kräfte ausüben.

Antwort:

(Anti-)Parallele elektrische Ströme üben Kräfte aufeinander aus, weil jeder stromführende Leiter ein Magnetfeld erzeugt. Fließen die Ströme in dieselbe Richtung (parallel), ziehen sich die Leiter an. Fließen die Ströme in entgegengesetzte Richtung (antiparallel), stoßen sich die Leiter ab. Die Kraft ist direkt proportional zum Produkt ihrer Stromstärken und indirekt proportional zum Abstand der Leiter.

Teste dein Wissen 7:

Erörtere, wovon das Magnetfeld im Inneren einer langen Spule abhängt.

Antwort:

Das Magnetfeld im Inneren einer langen Spule hängt von der **Anzahl der Windungen N** , der **Stromstärke I** und der **Länge l der Spule** ab:

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

wobei μ_0 die magnetische Feldkonstante ist.

Die Feldstärke ist also umso größer, je enger die Spule gewickelt ist, d.h., je mehr Windungen sie bei gleicher Länge enthält.

Zusatz: Genau genommen ist die relative Permeabilität (*Permeabilitätszahl*) in der Luft $\mu_r \approx 1$, weshalb statt der Permeabilität $\mu = \mu_0 \mu_r$ gleich μ_0 (ehem. magnetische Permeabilität des Vakuums) verwendet wird.

Teste dein Wissen 8:

Erkläre, wie man das Feld einer stromdurchflossenen Spule verstärken kann.

Antwort:

Das Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule kann verstärkt werden, indem:

- Der **Strom durch die Spule** erhöht wird.
- Die **Anzahl der Windungen pro Längeneinheit** erhöht wird.
- Ein **ferromagnetischer Kern** (z. B. Eisen) in die Spule eingefügt wird, der das Magnetfeld konzentriert und verstärkt: Die Weiss'schen Bezirke im Kern richten sich parallel zum Magnetfeld der Spule aus und verstärken es.

Teste dein Wissen 9:

Erkläre, was man unter Ferromagnetismus versteht.

Antwort:

Ferromagnetismus beschreibt die Eigenschaft bestimmter Materialien wie Eisen, Nickel und Kobalt, starke Magnetfelder zu erzeugen und zu verstärken. Diese Materialien besitzen mikroskopische Bereiche, die sogenannten **Weiss'schen Bezirke**, die sich in einem äußeren Magnetfeld ausrichten und so das Magnetfeld verstärken. Nach Entfernen des Felds bleibt oft eine **Restmagnetisierung (Remanenz)** bestehen, was sie zu Permanentmagneten macht. Beim Erwärmen über den **Curiepunkt** (z. B. 770 °C bei Eisen) verlieren sie ihre ferromagnetischen Eigenschaften. Anwendungen umfassen Permanentmagnete in Elektromotoren und Generatoren.

Teste dein Wissen 10:

Markiere die 4–6 wichtigsten Begriffe im Text zur „Antwort auf die Eingangsfrage“ und notiere alle Fachbegriffe, die du nicht kennst. Recherchiere ihre Bedeutung und schreibe dir Stichwörter dazu auf. Schreibe eine kurze Erklärung zu den wichtigsten Begriffen.

Beispielantwort:

Wichtigste Begriffe:

- 1. Kernfusion:** Verschmelzung (Fusion) von Wasserstoffkernen zu Helium unter extremen Bedingungen (Temperatur von etwa hundert Millionen Grad).
- 2. Tokamak-Reaktor:** Stammt von einem russischen Akronym, das für „Toroidkammer mit Magnetspulen“ steht. Es ist eine experimentelle Gerätschaft zur Erforschung/Schaffung der Kernfusion und nutzt Magnetspulen, um ein Plasma in einer toroidalen (ringförmigen) Kammer einzuschließen.
- 3. Plasma:** Zustand ionisierter Materie/Teilchen, bestehend aus einem Gemisch aus Ionen, freien Elektronen und meist auch neutralen Atomen oder Molekülen. Es ist leitfähig und reagiert auf elektrische und magnetische Felder.
- 4. Magnetische Flasche:** Durch eine Kombination von Magnetspulen, welche die Vakuumkammer horizontal bzw. vertikal umschließen, wird ein schraubenförmig gewundenes Feld erzeugt, dessen Feldlinien einen Ring durch die Kammer bilden. In diesem Ring ist nun das heiße Plasma eingeschlossen, damit es nicht die Wand der Vakuumröhre berührt und dabei Energie verliert.
- 5. JET** (Joint European Torus): Europäisches Forschungsprojekt zur Kernfusion.
- 6. ITER** (International Thermonuclear Experimental Reactor): Internationales Projekt zur Weiterentwicklung der Kernfusion. Nachfolgerprojekt von JET, welches auf dessen Resultaten aufbaut.

Rechenaufgabe 1:

Eine Zylinderspule hat bei 40 cm Länge 1 000 Windungen. Sie wird von 0,10 A durchflossen. Die relative Permeabilität des Eisenkerns beträgt $\mu_r = 1\,200$. Ermittle die Stärke des B -Feldes

- a) in der luftgefüllten Spule.
- b) in der eisengefüllten Spule.

Antwort:

Das **B -Feld** (magnetische Flussdichte) im Inneren einer Spule wird berechnet durch:

$$B = \mu \cdot I \cdot \frac{N}{l}$$

(I ... Stromstärke, N ... Anzahl der Windungen, l ... Länge der Spule)

wobei $\mu = \mu_0 \mu_r$ die Permeabilität ist. Mit der magnetischen Feldkonstante $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$ und der stoffabhängigen relativen Permeabilität μ_r .

a) Da die relative Permeabilität (*Permeabilitätszahl*) für Luft (nahezu) exakt eins ist, vereinfacht sich die obige Formel zu:

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

Wir setzen die gegebenen Werte in die Formel ein und erhalten: (1 T = 1 N/(A·m))

$$B_{\text{Luft}} = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2} \cdot 0,1 \text{ A} \cdot \frac{1\,000}{0,4 \text{ m}} \approx 3,14 \cdot 10^{-4} \text{ T} = 314 \mu\text{T}$$

Die Stärke des B -Felds in der luftgefüllten Spule beträgt etwa 314 Mikrottesla.

b) Da die relative Permeabilität des Eisenkerns $\mu_r = 1\,200$ beträgt, bestimmen wir zunächst die **Permeabilität μ** :

$$\mu = \mu_0 \mu_r = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2} \cdot 1\,200 = 4,8\pi \cdot 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$$

Fügen wir nun die gegebenen Werte in die Formel für das B -Feld mit der Permeabilität μ ein:

$$B_{\text{Eisen}} = 4,8\pi \cdot 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2} \cdot 0,1 \text{ A} \cdot \frac{1\,000}{0,4 \text{ m}} \approx \mathbf{0,377 \text{ T} = 377 \text{ mT}}$$

Die Stärke des B -Felds in der eisengefüllten Spule beträgt etwa 377 Millitesla.

Rechenaufgabe 2:

Die Stärke eines homogenen Magnetfeldes beträgt $B = 50 \text{ mT}$.

a) Ein Elektron ($m = 9 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$) bewegt sich mit der Geschwindigkeit $v = 10^7 \text{ m/s}$ senkrecht zu den Feldlinien. Berechne, wie groß der Radius der Bahn ist.

b) Welchen Radius hätte die Bahn eines α -Teilchens gleicher Energie ($m = 6,6 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$; $q = 3,2 \cdot 10^{-19} \text{ C}$)?

Antwort:

Der **Radius r der Kreisbahn** eines geladenen Teilchens (Geschwindigkeitsvektor des Teilchens liegt normal zur Richtung des Magnetfeldes $\rightarrow v_{\perp} = v$) im homogenen Magnetfeld B wird durch folgende Formel berechnet:

$$r = \frac{m \cdot v}{q \cdot B}$$

(m ... Masse des Teilchens, v ... Geschwindigkeit des Teilchens, q ... Teilchenladung)

a) Für das Elektron setzen wir die entsprechenden Werte ein: ($1 \text{ T} = 1 \text{ N}/(\text{A} \cdot \text{m})$)

(wobei $50 \text{ mT} = 0,05 \text{ N} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} = 0,05 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1}$)

$$r_e = \frac{9 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 10^7 \text{ m/s}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 0,05 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1}} \approx \mathbf{1,13 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$$

Der Bahnradius des Elektrons beträgt etwa 1,13 Millimeter.

b) Da die (**kinetische**) **Energie E_{kin}** des Elektrons und des α -Teilchens mit:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} m_e \cdot v_e^2 = \frac{1}{2} m_{\alpha} \cdot v_{\alpha}^2$$

gleich ist, können wir den Wert für die **Geschwindigkeit v_{α} des α -Teilchens** bestimmen:

$$v_{\alpha} = \sqrt{\frac{m_e}{m_{\alpha}}} \cdot v_e = \sqrt{\frac{9 \cdot 10^{-31} \text{ kg}}{6,6 \cdot 10^{-27} \text{ kg}}} \cdot 10^7 \text{ m/s} \approx \mathbf{1,17 \cdot 10^5 \text{ m/s}}$$

Nun können wir das Ergebnis samt den gegebenen Werten in die obige Formel einsetzen und erhalten für den Bahnradius des α -Teilchens:

$$r_{\alpha} = \frac{6,6 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot 1,17 \cdot 10^5 \text{ m/s}}{3,2 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 0,05 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1}} \approx \mathbf{4,83 \cdot 10^{-2} \text{ m}}$$

Der Bahnradius des α -Teilchens beträgt etwa 4,83 Zentimeter.

Rechenaufgabe 3:

Durch die Wicklungen der supraleitenden Magnete des LHC fließen Ströme von ca. 12 000 A. Bestimme, welche Kraft auf die Drähte pro Meter wirkt, wenn der Magnet ein *B-Feld* von 8 T erzeugt. Die eng gewickelten supraleitenden Drähte der Magnetspulen haben einen Radius von ca. 3 mm.

Antwort:

Im Allgemeinen gilt, dass im ***B-Feld*** (magnetische Flussdichte) auf einen **Leiter der Länge *s*** bei der **Stromstärke *I*** die **Lorentzkraft *F*** wirkt:

$$F = I \cdot s \cdot B \cdot \sin(\alpha)$$

α ist dabei der **Winkel zwischen Stromrichtung und Feldrichtung**.

Da der Strom normal zur Feldrichtung fließt, ist $\sin(90^\circ) = \sin(\pi/2) = 1$ und die Formel vereinfacht sich zu:

$$F = I \cdot s \cdot B$$

Wir setzen nun die gegebenen Werte ein:

$$F = 8 \text{ T} \cdot 1 \text{ m} \cdot 12\,000 \text{ A} = 96\,000 \text{ N}$$

Das Magnetfeld ruft pro Meter Wicklung bei einer Stromstärke von 12 Kiloampere eine Kraft von 96 Kilonewton hervor.