



**MEHR
ERFAHREN**



ABITUR

Gymnasium

Physik

Elektronik

Relativität

ABITUR-TRAINING

Gymnasium

Physik 2

Aufbau der Materie

STARK



**MEHR
ERFAHREN**

ABITUR-TRAINING

Gymnasium

Physik 1

Elektromagnetisches Feld

Relativitätstheorie

STARK


Inhalt

Vorwort

Statisches elektrisches Feld	1
1 Elektrische Ladung	2
2 Elektrisches Feld und elektrische Feldstärke	5
3 Elektrisches Potenzial und elektrische Spannung	10
4 Potenzial und Feldstärke im homogenen elektrischen Feld	13
5 Der Plattenkondensator als Ladungsspeicher	17
6 Das elektrische Feld als Energiespeicher	21
 7 Das radialsymmetrische Feld	23
8 Überlagerung elektrischer Felder	27
9 Anwendungen in Natur und Technik	30
Statisches magnetisches Feld	33
10 Magnetismus von Dauermagneten	34
11 Magnetfelder stromdurchflossener Leiter	37
 12 Magnetische Flussdichte	42
13 Überlagerung magnetischer Felder	47
 14 Lorentzkraft	48
15 Vergleich zwischen elektrostatischem und magnetostatischem Feld	50
16 Anwendungen in Natur und Technik	52
Bewegung geladener Teilchen in elektrischen und magnetischen Feldern	55
17 Bewegung geladener Teilchen im homogenen elektrischen Längsfeld	56
18 Bewegung geladener Teilchen im homogenen elektrischen Querfeld	62
 19 Bewegung geladener Teilchen in homogenen magnetischen Feldern	66
20 Anwendungen in Natur und Technik	69
Einblick in die spezielle Relativitätstheorie	75
21 Relativistische Kinematik	76
22 Relativistische Masse	80
 23 Relativistische Energie	84
24 Anwendungen in Natur und Technik	86

Elektromagnetische Induktion 89


25 Induktion in geraden Leitern 90

 26 Magnetischer Fluss und Induktionsgesetz 92

27 Die Lenz'sche Regel 98


28 Erzeugung sinusförmiger Wechselspannungen 100

29 Selbstinduktion 102

 30 Das Magnetfeld als Energiespeicher 108

31 Anwendungen in Natur und Technik 110

Elektromagnetische Schwingungen 113

 32 Ungedämpfte elektromagnetische Schwingungen 114

33 Vergleich von mechanischen und elektromagnetischen Schwingungen 122

34 Erzeugung und Nachweis ungedämpfter elektromagnetischer Schwingungen 123

35 Anwendungen in der Technik 125

Elektromagnetische Wellen 129

36 Elektrische Dipolstrahlung 130


37 Dipolstrahlung 136

 38 Nachweis und Begründung von Wellenphänomenen bei der Dipolstrahlung 138

39 Anwendungen in der Technik 145

Licht als Welle 149

40 Kohärenz und Interferenz 150

 41 Interferenz am Doppelspalt 153

42 Beugungsgitter 157

43 Elektromagnetisches Spektrum 163

44 Anwendungen in Natur und Technik 165

Lösungen 167

Stichwortverzeichnis 251

Autor: Horst Lautenschlager



Im Hinblick auf eine eventuelle Begrenzung des Datenvolumens wird empfohlen, dass Sie sich beim Ansehen der Videos im WLAN befinden. Haben Sie keine Möglichkeit, den QR-Code zu scannen, finden Sie die Lernvideos auch unter:
<http://qrcode.stark-verlag.de/943028V>


Vorwort

Liebe Schülerin, lieber Schüler,

das elektromagnetische Feld und die Grundlagen der speziellen Relativitätstheorie bilden im Physikunterricht der gymnasialen Oberstufe einen thematischen Schwerpunkt. Mit dem vorliegenden Trainingsband halten Sie ein Buch in Händen, das Sie bei der Vorbereitung auf Unterricht, Klausuren und die schriftliche Abiturprüfung im Fach Physik unterstützt.

Bei der Aufbereitung des Unterrichtsstoffs wurde berücksichtigt, dass in den Prüfungsaufgaben neben dem „physikalischen Rechnen“ das „physikalische Denken“ an Bedeutung gewonnen hat – Sie sollen also in der Lage sein, physikalische Zusammenhänge zu erkennen, zu bewerten und fachsprachlich zu beschreiben.

Ihre Arbeit mit dem Buch wird durch folgende strukturelle Maßnahmen erleichtert:

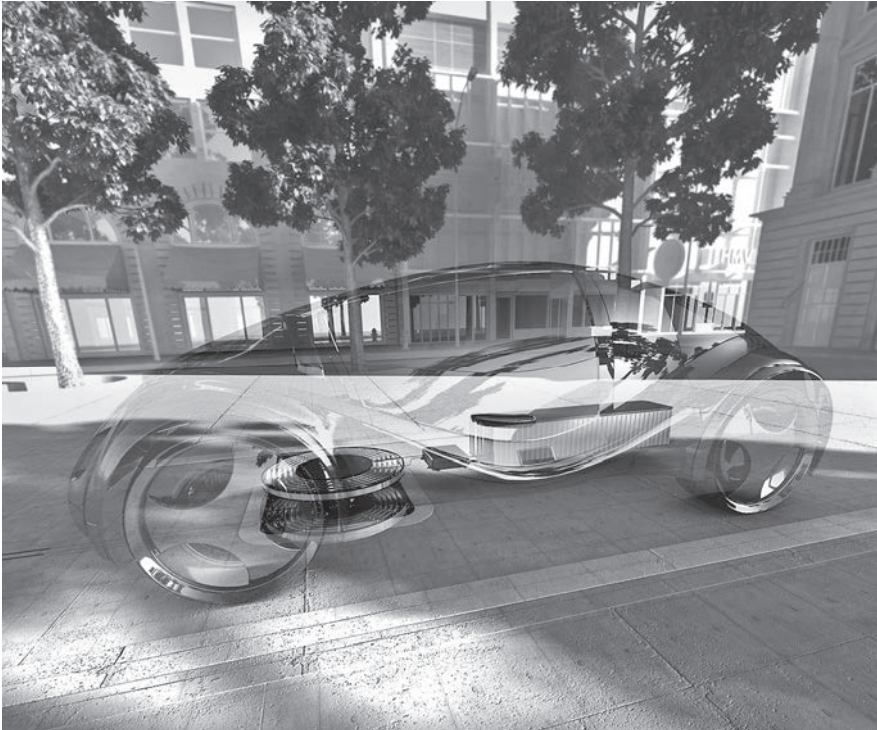
- Die wichtigen **Begriffe** und **Definitionen** eines Lernabschnitts sind in farbig getönten, **Regeln, Lehr-** und **Merksätze** in farbig umrandeten Kästen abgelegt.
- An jeden Theorieteil schließen passgenaue und kommentierte **Beispielaufgaben** an, die Ihnen den gerade behandelten Stoff unmittelbar anhand einer konkreten Problemstellung veranschaulichen.
- Zu wichtigen Themenbereichen gibt es **Lernvideos**, in denen typische Aufgabenstellungen erläutert und Schritt für Schritt gelöst werden. An den entsprechenden Stellen im Buch befindet sich ein QR-Code, den Sie mithilfe Ihres Smartphones oder Tablets scannen können – Sie gelangen so schnell und einfach zum zugehörigen Lernvideo. 
- Jeder Lernabschnitt schließt mit **Übungsaufgaben**. Zur Selbstkontrolle finden Sie die zugehörigen **Lösungen** am Ende des Buchs vollständig ausgearbeitet und kommentiert.
- Den Abschluss eines jeden Hauptkapitels bildet ein Kapitel mit **Anwendungsaufgaben**, die den behandelten Stoff in Bezug zu physikalischen Fragestellungen aus der Praxis setzen. Sie lernen dadurch, Naturphänomene und technische Anwendungen zu verstehen und zu erklären, indem Sie auf das theoretische Wissen zurückgreifen, das Sie im Hauptkapitel erarbeitet haben.

Viel Erfolg wünscht Ihnen



Horst Lautenschlager

Elektromagnetische Induktion



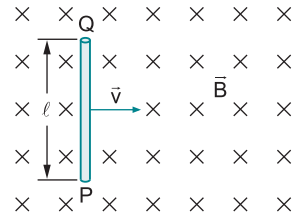
Wie lassen sich zukünftig Elektroautos schnell und komfortabel aufladen? Vielleicht so (Foto): Eine vollständig im Boden versenkte Spule, die Primärspule, bildet die Verbindung zum öffentlichen Energienetz. Unten am Auto ist eine Sekundärspule angebracht. Startet der Fahrer das Laden, wird die Primärspule von Strom durchflossen. Als Folge baut sich ein Magnetfeld auf, das Strom in die Sekundärspule induziert und die Batterie auflädt.

„Convert magnetism into electricity.“ Seit 1820 hatte Michael Faraday versucht, diese in seinem Laborbuch notierte Aufgabe in die Tat umzusetzen und damit das Ergebnis des Ørsted-Versuchs umzukehren, bei dem ein elektrischer Strom ein Magnetfeld erzeugt. 1831 konnte Faraday der Royal Society den lang ersehnten Erfolg vermelden – die elektromagnetische Induktion war entdeckt.

25 Induktion in geraden Leitern

Viele Versuchsergebnisse zur elektromagnetischen Induktion kann man durch Lorentzkräfte auf Elektronen in elektrischen Leitern erklären. Besonders übersichtlich wird die Situation, wenn sich ein gerader Leiter durch ein Magnetfeld bewegt.

Betrachten Sie einen geraden Leiter der Länge ℓ , der wie in der Skizze rechts mit der konstanten Geschwindigkeit \vec{v} senkrecht zu den Feldlinien durch ein homogenes Magnetfeld der Flussdichte \vec{B} gezogen wird. Auf die frei beweglichen Elektronen im Leiter wirkt dann eine Lorentzkraft in Richtung \overline{QP} . Bei P entsteht so ein Überschuss, bei Q ein Mangel an Elektronen. Dieses Konzentrationsgefälle von Ladungsträgern erzeugt im Leiterinneren ein elektrisches Feld, dessen Feldkraft auf die Elektronen parallel, aber entgegengesetzt zur Lorentzkraft wirkt. Hat sich das Konzentrationsgefälle so stark ausgebildet, dass sich elektrische und Lorentzkraft gegenseitig aufheben ($F_{el} = F_L$), so findet keine weitere Verschiebung von Elektronen im Leiter statt, die Spannung U zwischen Q und P ist konstant. U lässt sich mithilfe von B , ℓ und v ausdrücken:



$$F_{el} = F_L \Leftrightarrow e \cdot E = e \cdot B \cdot v \Rightarrow E = B \cdot v \Rightarrow \frac{U}{\ell} = B \cdot v \Rightarrow U = B \cdot \ell \cdot v$$

Regel

B-ℓ-v-Regel

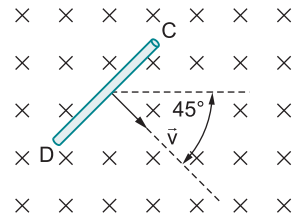
Wird ein gerader Leiter der Länge ℓ mit konstanter Geschwindigkeit \vec{v} so durch ein homogenes Magnetfeld der Flussdichte B gezogen, dass \vec{v} auf dem Leiter und auf B senkrecht steht, so entsteht zwischen den Leiterenden die Spannung

$$U = B \cdot \ell \cdot v.$$

Ist \vec{v} parallel zum Leiter oder zu den Feldlinien gerichtet, entsteht keine Spannung zwischen den Leiterenden.

Beispiel

Ein gerader Leiter der Länge $\ell = 10,0 \text{ cm}$ bewegt sich mit der Geschwindigkeit \vec{v} , $v = 1,0 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$, durch ein homogenes Magnetfeld der Flussdichte $B = 1,0 \text{ mT}$ (Skizze).



- Berechnen Sie die Spannung, die zwischen den Leiterenden entsteht.
- Ermitteln Sie, an welchem Leiterende man einen Mangel bzw. einen Überschuss an Elektronen findet.

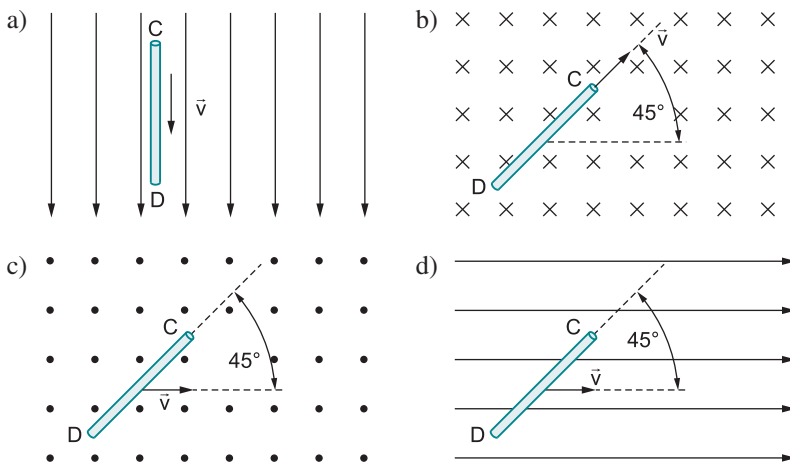
Lösung:

- a) Lassen Sie sich nicht täuschen! v steht senkrecht auf den Feldlinien und auf dem Leiter. Nach der B- ℓ -v-Regel gilt für die Spannung zwischen den Leiterenden:

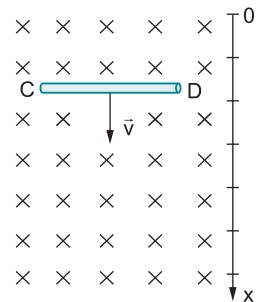
$$U = B \cdot \ell \cdot v = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ T} \cdot 0,100 \text{ m} \cdot 1,0 \cdot 10^{-2} \frac{\text{m}}{\text{s}} = \mathbf{1,0 \cdot 10^{-6} \text{ V} = 1,0 \mu\text{V}}$$

- b) Mit der Drei-Finger-Regel für die Lorentzkraft finden Sie die Ladungsverteilung: Bei C herrscht Elektronenmangel, bei D Elektronenüberschuss.

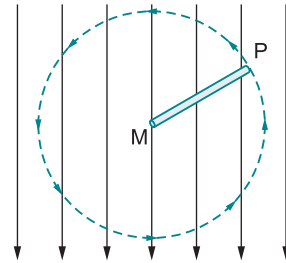
Aufgaben 100. Ein gerader Leiter der Länge $\ell = 10,0 \text{ cm}$ wird jeweils mit der Geschwindigkeit \vec{v} , $v = 1,0 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$, in der angegebenen Richtung durch ein homogenes Magnetfeld der Flussdichte, $B = 1,0 \text{ mT}$, gezogen (siehe Skizzen). Geben Sie für jede der Bewegungen an, ob Spannung induziert wird, wie groß der Betrag dieser Spannung ist und an welchem Leiterende ein Mangel bzw. ein Überschuss an Elektronen entsteht.



- 101.** Ein 12,5 cm langer, gerader Kupferstab wird zum Zeitpunkt $t = 0 \text{ s}$ im Ursprung eines Koordinatensystems losgelassen und fällt dann in einem räumlich hinreichend ausgedehnten homogenen Magnetfeld nur unter dem Einfluss der Schwerkraft nach unten (Flussdichte $B = 26,4 \text{ mT}$). Während des gesamten Falls gilt $\overline{CD} \perp \vec{v}$ und $\overline{CD} \perp \vec{B}$. Berechnen Sie die Fallstrecke x , nach der die Spannung zwischen den Stabenden $U_{CD} = 5,70 \text{ mV}$ beträgt.



- 102.** Ein Metallstab rotiert in einem homogenen Magnetfeld um M. Entscheiden Sie begründet, ob dabei eine Spannung zwischen M und P induziert wird.



26 Magnetischer Fluss und Induktionsgesetz

1831 entdeckten Michael Faraday und Joseph Henry unabhängig von einander, dass die zeitliche Veränderung eines Magnetfelds ein elektrisches Feld erzeugt. Dieses Phänomen lässt sich durch Einführung einer neuen Größe, des magnetischen Flusses, mathematisch elegant beschreiben.

Definition

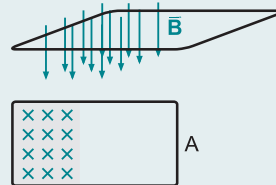
Magnetischer Fluss

Wird die Fläche A einer ebenen Leiterschleife **senkrecht** von den Feldlinien eines homogenen Magnetfelds der Flussdichte \vec{B} durchsetzt, so versteht man unter dem magnetischen Fluss Φ durch die Leiterschleife das Produkt

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{A}.$$

Die Einheit des magnetischen Flusses ist das **Weber (Wb)**:

$$[\Phi] = [B \cdot A] = \frac{V \cdot s}{m^2} \cdot m^2 = V \cdot s = \text{Wb}$$

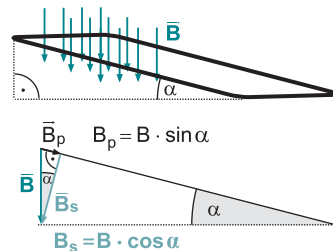


Regel

Wirksame Flussdichte

Durchsetzen die Feldlinien die Leiterebene **nicht senkrecht**, zerlegt man den Vektor \vec{B} in Komponenten \vec{B}_p bzw. \vec{B}_s parallel bzw. senkrecht zu A. Der magnetische Fluss durch die Leiterschleife ist dann durch die wirksame Flussdichte \vec{B}_s bestimmt und beträgt

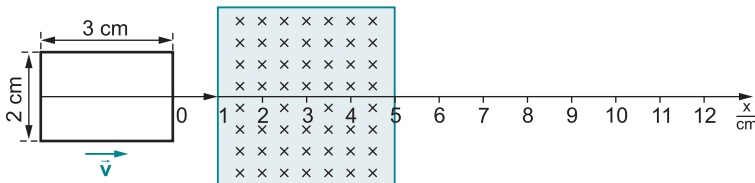
$$\Phi = \vec{B}_s \cdot \vec{A} = \vec{B} \cdot \vec{A} \cdot \cos \alpha.$$



Bei Bildern magnetischer Feldlinien treten im Allgemeinen durch eine zur Feldrichtung senkrechte Einheitsfläche nur so viele Feldlinien, wie der Vektor \vec{B} an dieser Stelle Einheiten besitzt. In diesem Sinn lässt sich der magnetische Fluss Φ durch eine Leiterschleife anschaulich deuten als die Zahl der Feldlinien, die ihre Fläche durchsetzen.

Beispiel

Durch ein homogenes Magnetfeld der Flussdichte $B = 4,0 \text{ mT}$ wird ein rechteckiger Leiterraum mit der konstanten Geschwindigkeit $v = 1 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$ gezogen. Zum Zeitpunkt $t=0 \text{ s}$ befindet sich seine vordere Seite bei $x=0 \text{ cm}$. Die Bewegung wird so lange betrachtet, bis er das Magnetfeld wieder vollständig verlassen hat.



- Berechnen Sie den magnetischen Fluss Φ durch den Leiterraum, wenn sich dieser vollständig im Magnetfeld befindet.
- Zeigen Sie durch Rechnung, dass der Graph der Funktion Φ während des Eintritts ins bzw. des Austritts aus dem Magnetfeld eine Gerade ist.
- Zeichnen Sie den Graphen der Funktion $\Phi(t)$.

Lösung:

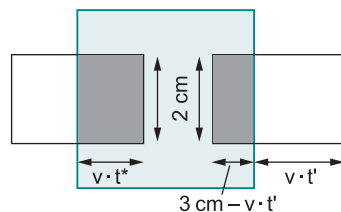
- Befindet sich der Leiterraum vollständig im Magnetfeld, so beträgt der magnetische Fluss durch ihn:

$$\Phi = B \cdot A = 4,0 \cdot 10^{-3} \text{ T} \cdot 3,0 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot 2,0 \cdot 10^{-2} \text{ m} = \mathbf{2,4 \cdot 10^{-6} \text{ Wb}}$$

- Bezeichnen t^* bzw. t' die Zeiten seit dem Eintritt des Leiterraums ins Magnetfeld bzw. seit seinem Austritt aus dem Magnetfeld, so haben die dunkelgrauen Flächen die Inhalte $v \cdot t^* \cdot 2 \text{ cm}$ bzw. $(3 \text{ cm} - v \cdot t') \cdot 2 \text{ cm}$. Daher gilt für den magnetischen Fluss durch den Leiterraum beim Eintritt:

$$\Phi(t^*) = B \cdot v \cdot 2 \text{ cm} \cdot t^*$$

$$= 4,0 \cdot 10^{-3} \text{ T} \cdot 1,0 \cdot 10^{-2} \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 2,0 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot t^* = \mathbf{8,0 \cdot 10^{-7} \text{ V} \cdot t^*}$$



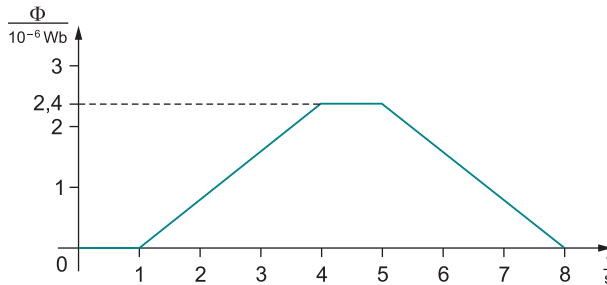
Der Graph dieser Funktion im t^* - Φ -Diagramm ist eine Ursprungsgerade mit der Steigung $8,0 \cdot 10^{-7} \text{ V}$.

Entsprechend gilt beim Austritt:

$$\begin{aligned} \Phi(t') &= B \cdot (3 \text{ cm} - v \cdot t') \cdot 2 \text{ cm} \\ &= 4,0 \cdot 10^{-3} \text{ T} \cdot \left(3 \cdot 10^{-2} \text{ m} - 1 \cdot 10^{-2} \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot t' \right) \cdot 2,0 \cdot 10^{-2} \text{ m} \\ &= \mathbf{2,4 \cdot 10^{-6} \text{ Wb} - 8,0 \cdot 10^{-7} \text{ V} \cdot t'} \end{aligned}$$

Der Graph dieser Funktion ist eine Gerade, welche die Φ -Achse bei $2,4 \cdot 10^{-6} \text{ Wb}$ schneidet und die Steigung $-8,0 \cdot 10^{-7} \text{ V}$ besitzt.

- c) Weil der
- Eintritt ins Magnetfeld zum Zeitpunkt $t = 1 \text{ s}$ beginnt und zum Zeitpunkt $t = 4 \text{ s}$ beendet ist,
 - der Austritt aus dem Magnetfeld zum Zeitpunkt $t = 5 \text{ s}$ beginnt und zum Zeitpunkt $t = 8 \text{ s}$ beendet ist,
- erhält man unter Berücksichtigung der Ergebnisse von Teilaufgabe b das folgende t - Φ -Diagramm:



Faradays Entdeckung ist Ausdruck eines grundlegenden Zusammenhangs zwischen dem zeitlich veränderlichen magnetischen Fluss durch eine Leiterschleife und der elektrischen Spannung, die in der Schleife dabei erzeugt wird. Man bezeichnet diesen Vorgang als **elektromagnetische Induktion**.

Regel

Induktionsgesetz

Jede Änderung des magnetischen Flusses durch eine Spule mit N Windungen ruft zwischen den Spulenden die Induktionsspannung

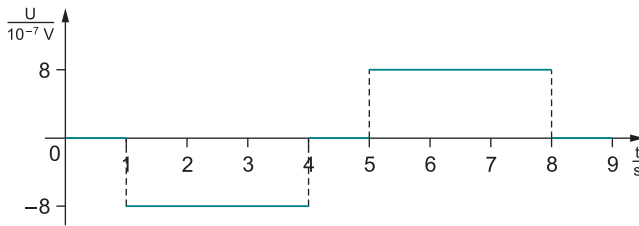
$$U_{\text{ind}}(t) = -N \cdot \dot{\Phi}(t)$$

hervor. $\dot{\Phi}(t)$ bezeichnet dabei die Ableitung $\frac{d\Phi}{dt}$ der Flussfunktion nach der Zeit.

Beispiel


Stellen Sie mithilfe des Induktionsgesetzes die im vorigen Beispiel beschriebene induzierte Spannung als Funktion der Zeit grafisch dar und begründen Sie Ihre Zeichnung.

Lösung:



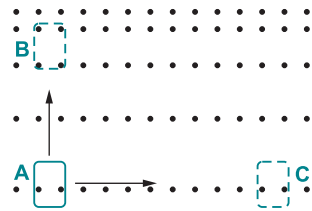
Begründung: Da der Rahmen nur ein Windung besitzt, gilt $U_{\text{ind}}(t) = -\dot{\Phi}(t)$. Die induzierte Spannung ist daher die jeweils mit -1 multiplizierte Steigung der Geraden im t - Φ -Diagramm.



Spannung wird in einem Leiterraum zu einem Zeitpunkt t nur dann induziert, wenn $\dot{\Phi}(t) \neq 0$, wenn sich also die „Anzahl“ der magnetischen Feldlinien durch den Leiterraum ändert. 

Beispiel

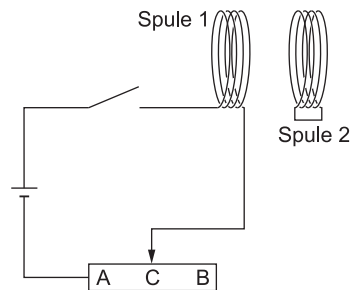
Ein geschlossener Leiterraum wird mit konstanter Geschwindigkeit durch ein nicht homogenes Magnetfeld gezogen, einmal von Position A nach Position B, ein anderes Mal von A nach C. Bei welcher dieser Bewegungen wird im Leiterraum Spannung induziert? Begründen Sie Ihre Antwort.



Lösung

Bei der Bewegung von A nach C ändert sich die „Anzahl“ der Feldlinien, die den Rahmen durchsetzen, nicht. Daher wird keine Spannung induziert. Bei der Bewegung von A nach B nimmt die „Anzahl“ der Feldlinien, die den Rahmen durchsetzen, zu. Daher wird Spannung induziert.

- Aufgaben 103.** Die Enden der Spule 1 sind mit den Polen einer Gleichspannungsquelle verbunden. Im Stromkreis befinden sich auch ein Schalter und ein Schiebewiderstand. Die Enden der Spule 2 sind miteinander verbunden. Geben Sie 9 Möglichkeiten an, wie man mit der skizzierten Versuchsanordnung in der Spule 2 Spannung induzieren kann.



Lösungen



Auf den folgenden Seiten finden Sie die vollständigen Lösungen zu allen Aufgaben im Buch, inklusive ausführlicher Kommentierung des Lösungsweges und der Rechnungen.

1. Da 3,6 g Radium in einer Sekunde $3,6 \cdot 3,7 \cdot 10^{10} \cdot 2$ Elementarladungen auf die Aluminiumfolie abstrahlen und der Ladungsbetrag einer Elementarladung $1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ beträgt, nimmt die Folie in einer Sekunde die Ladung

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{3,6 \cdot 3,7 \cdot 10^{10} \cdot 2 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}}{1 \text{ s}} = 4,3 \cdot 10^{-8} \frac{\text{C}}{\text{s}}$$

auf. Die Zeit t zum Aufladen der Folie auf $Q = 1,0 \mu\text{C}$ beträgt folglich

$$t = \frac{Q}{\frac{\Delta Q}{\Delta t}} = \frac{1,0 \cdot 10^{-6} \text{ C}}{4,27 \cdot 10^{-8} \frac{\text{C}}{\text{s}}} = 23 \text{ s.}$$

2. a) Weil sich die Gesamtladung $Q_1 + Q_2$ durch die Verbindung auf beide Kugeln gleichmäßig verteilt, befindet sich auf jeder Kugel die Ladung

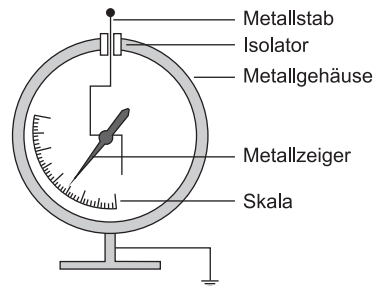
$$\frac{Q_1 + Q_2}{2} = \frac{-6,0 \cdot 10^{-9} \text{ C} + 3,0 \cdot 10^{-9} \text{ C}}{2} = -1,5 \cdot 10^{-9} \text{ C.}$$

- b) Die negative Ladungsmenge auf K_1 hat sich von $-6,0 \text{ nC}$ auf $-1,5 \text{ nC}$ verringert. Daher ist durch den Verbindungsdraht die Ladungsmenge $Q = -6,0 \text{ nC} - (-1,5 \text{ nC}) = -4,5 \text{ nC}$ geflossen. Weil ein Elektron die Ladung $-1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ trägt, sind

$$\frac{-4,5 \cdot 10^{-9} \text{ C}}{-1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}} = 2,8 \cdot 10^{10}$$

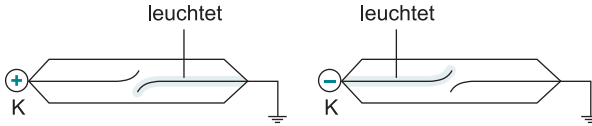
Elektronen durch den Verbindungsdraht geflossen.

3. a) An einem Metallstab ist ein Metallzeiger oberhalb seines Schwerpunkts drehbar befestigt. Fließen Ladungen auf Stab und Zeiger, so schlägt der Zeiger aus, weil sich gleichartig geladene Körper abstoßen. Die Größe des Ausschlags ist ein Maß für die aufgeladene Ladungsmenge.

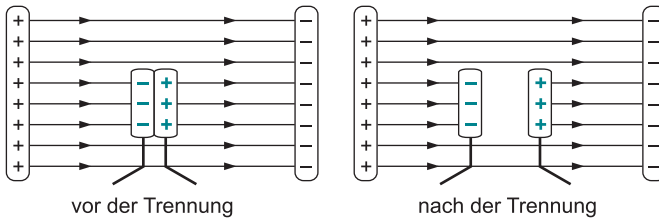


- b) Elektroskope sind für die Messung kleinerer Ladungsbeträge zu ungenau und zeigen die Ladungsart nicht an. Außerdem fließt bei Verbindung des Zeigersystems mit dem Körper, dessen Ladung gemessen werden soll, nicht dessen gesamte Ladung auf das Elektroskop über.
4. Die negative Ladung des Stabes drückt, wenn er sich nahe genug bei der Kugel befindet, frei bewegliche Elektronen des Leitersystems Zeiger–Kugel von der Kugel weg in Richtung Zeiger. Dadurch wächst die negative Ladung auf Stab und Zeiger des Elektroskops, der Ausschlag nimmt zu.

5. Berührt man einen hinreichend stark geladenen Körper K mit einer einseitig geerdeten Glimmlampe, ergibt sich die Ladungsart aus dem Umstand, *welche* der beiden Elektroden aufleuchtet (siehe Skizze).



6. Auf der Platte, die der positiv geladenen Kondensatorplatte zugewandt ist, sammelt sich negative, auf der anderen positive Ladung an. Diese Ladung bleibt nach der Trennung auf jeder Platte erhalten.



7. Die eigentliche Ursache für die Erzeugung von Ladung durch Reibung ist nicht der Reibungsvorgang selbst, sondern die durch die stoffliche Verschiedenheit bedingten unterschiedlichen Anziehungskräfte des einen Körpers auf die Elektronen des anderen. Zieht z. B. K_1 die Elektronen von K_2 stärker an als umgekehrt, so wandern bei innigem Kontakt insgesamt mehr Elektronen von K_2 zu K_1 . K_1 ist nach der Trennung negativ, K_2 positiv geladen. Die Reibung bewirkt nur, dass nacheinander mehr und mehr Stellen der beiden Körper in innige Berührung gebracht und wieder getrennt werden.

$$8. E_e = \frac{\text{Kraft auf das Alphateilchen}}{\text{Ladung des Alphateilchens}} = \frac{F}{2e}$$

$$= \frac{4,6 \cdot 10^{-8} \text{ N}}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}} = 1,4 \cdot 10^{11} \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

Feldstärke des vom Elektron am Ort des Alphateilchens erzeugten Felds

$$E_\alpha = \frac{\text{Kraft auf das Elektron}}{\text{Ladung des Elektrons}} = \frac{F}{e}$$

$$= \frac{4,6 \cdot 10^{-8} \text{ N}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}} = 2,9 \cdot 10^{11} \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

Feldstärke des vom Alphateilchen am Ort des Elektrons erzeugten Felds

**MEHR
ERFAHREN**

ABITUR-TRAINING

Gymnasium

Physik 2


Aufbau der Materie

STARK

Inhalt

Vorwort

	Eigenschaften von Quantenobjekten	1
	1 Der lichtelektrische Effekt.....	2
	2 Teilchencharakter von Photonen	10
	3 De-Broglie-Wellen	13
	4 Verhalten von Quantenobjekten.....	22
	5 Anwendungen in Natur und Technik	28
	Ein Atommodell der Quantenphysik	31
	6 Existenz von Atomen	32
	7 Quantenhafte Emission und Absorption von Energie	35
	8 Die Atommodelle von Rutherford und Bohr	43
	9 Das Modell des linearen Potenzialtopfs	48
	10 Quantenphysikalisches Modell des Wasserstoffatoms	55
	11 Ausblick auf Mehrelektronenatome	59
	12 Der Franck-Hertz-Versuch	63
	13 Röntgenstrahlung	67
	14 Anwendungen in Natur und Technik	74
	Strukturuntersuchungen zum Aufbau der Materie	77
	15 Streuexperimente	78
	16 Das Standardmodell der Teilchenphysik – Elementarteilchen.....	80
	17 Anwendungen in Natur und Technik	84
	Ein einfaches Kernmodell der Quantenphysik	87
	18 Nomenklatur für Atomkerne – Kernradius	88
	19 Massendefekt und Kernbindungsenergie	91
	20 Kernkraft	94
	21 Das Potenzialtopfmodell für den Atomkern	96
	22 Der Alphazerfall	98
	23 Der Betazerfall	100
	24 Der Gammazerfall.....	103
	25 Anwendungen in Natur und Technik	105

Radioaktivität und Kernreaktionen	107
26 Detektoren für radioaktive Strahlung	108
27 Experimente zur Unterscheidung der Strahlungsarten	111
28 Wechselwirkung von radioaktiven Strahlen mit Materie	115
29 Das quadratische Abstandsgesetz	117
30 Zerfallsreihen	119
 31 Das Gesetz des radioaktiven Zerfalls	124
32 Strahlenbelastung und Strahlenschutz	128
33 Energie- und Impulsbilanzen bei Kernreaktionen	132
34 Entdeckung des Neutrons	136
35 Kernspaltung	138
36 Kernfusion	141
37 Anwendungen in Natur und Technik	144
 Lösungen	 147
 Stichwortverzeichnis	 219

Autor: Horst Lautenschlager


Vorwort

Liebe Schülerin, lieber Schüler,

neben der Elektrodynamik bildet das Themengebiet „Aufbau der Materie“ den zweiten inhaltlichen Schwerpunkt im Physikunterricht der gymnasialen Oberstufe. Der vorliegende Trainingsband behandelt den hierfür maßgeblichen Abiturstoff zur Quanten-, Atom- und Kernphysik und unterstützt Sie optimal bei der Vorbereitung auf Unterricht, Klausuren und die schriftliche Abiturprüfung im Fach Physik.

Bei der Aufbereitung des Unterrichtsstoffs wurde berücksichtigt, dass in den Prüfungsaufgaben neben dem „physikalischen Rechnen“ das „physikalische Denken“ an Bedeutung gewonnen hat – Sie sollen also in der Lage sein, physikalische Zusammenhänge zu erkennen, zu bewerten und fachsprachlich zu beschreiben.

Der Aufbau des Buches erleichtert es Ihnen, den Unterrichtsstoff einzüben:

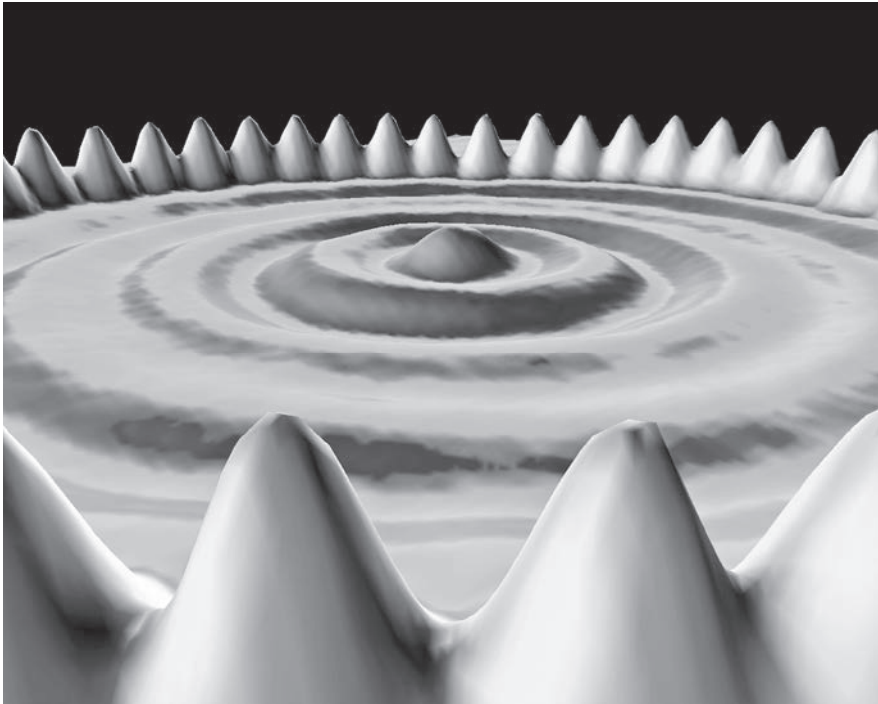
- Die wichtigen **Begriffe** und **Definitionen** eines Lernabschnitts sind in farbig getönten Kästen, **Regeln** und **Merksätze** in farbig umrandeten Kästen abgelegt.
- An jeden Theorieteil schließen passgenaue und kommentierte **Beispielaufgaben** an, die Ihnen den gerade behandelten Stoff unmittelbar anhand einer konkreten Problemstellung veranschaulichen.
- Zu wichtigen Themenbereichen gibt es **Lernvideos**, in denen typische Aufgabenstellungen erläutert und Schritt für Schritt gelöst werden. An den entsprechenden Stellen im Buch befindet sich ein QR-Code, den Sie mithilfe Ihres Smartphones oder Tablets scannen können – Sie gelangen so schnell und einfach zum zugehörigen Lernvideo. 
- Jeder Lernabschnitt schließt mit **Übungsaufgaben**. Zur Selbstkontrolle finden Sie die zugehörigen **Lösungen** am Ende des Buchs vollständig ausgearbeitet und kommentiert.
- Den Abschluss eines jeden Hauptkapitels bildet ein Kapitel mit **Anwendungsaufgaben**, die den behandelten Stoff in Bezug zu physikalischen Fragestellungen aus der Praxis setzen. Sie lernen dadurch, Naturphänomene und technische Anwendungen zu verstehen und zu erklären, indem Sie auf das theoretische Wissen zurückgreifen, das Sie im Hauptkapitel erarbeitet haben.

Viel Erfolg wünscht Ihnen



Horst Lautenschlager

Eigenschaften von Quantenobjekten



Zu Beginn des 20. Jahrhunderts fußte die Weltanschauung der Physik auf zwei Grundüberzeugungen: Alles Materielle besteht aus kleinsten Teilchen und unterliegt den Gesetzen der Newton'schen Mechanik; alle elektrischen, magnetischen und optischen Erscheinungen breiten sich wellenartig aus und gehorchen den Maxwell'schen Gleichungen der Elektrodynamik. Neue experimentelle Befunde wie Fotoeffekt oder Comptoneffekt zwangen die Physiker zum Umdenken und führten zur Entwicklung der Quantenphysik, in der Teilchen- und Wellenkonzept für alle Quantenobjekte vereint sind: Ein solches – etwa ein Elektron oder ein Photon – *ist* nicht starr entweder Teilchen oder Welle, sondern es *verhält* sich zu einem Zeitpunkt wie ein Teilchen, zu einem anderen Zeitpunkt wie eine Welle – je nach physikalischer Situation, in der es sich gerade befindet. Das Bild oben belegt beispielhaft den Wellencharakter des Quantenobjekts „Elektron“: Mit einem Rastertunnelmikroskop aufgenommen zeigt es eine kreisförmige Anordnung von 48 Eisenatomen, zwischen denen sich stehende Elektronenwellen ausgebildet haben.

1 Der lichtelektrische Effekt

1888 entdeckte Wilhelm Hallwachs den Fotoeffekt. Später folgende genaue experimentelle Untersuchungen von Philipp Lenard führten zu Ergebnissen, die mit dem klassischen Wellenmodell des Lichts nicht zu erklären waren. Erst Einsteins Teilchentheorie des Lichts war dazu in der Lage – um den Preis eines radikalen Bruchs mit der klassischen Physik.

Definition

Fotoeffekt

Die Auslösung von Elektronen aus Metalloberflächen durch Licht hinreichend hoher Frequenz bezeichnet man als äußeren Fotoeffekt oder lichtelektrischen Effekt. Lichtelektrisch ausgelöste Elektronen nennt man **Fotoelektronen**.

Systematische experimentelle Untersuchungen führen zu folgenden experimentellen Befunden:

Regel

Experimentelle Befunde zum Fotoeffekt

1. Wenn, dann setzt der Fotoeffekt immer ohne zeitlichen Verzögerung unmittelbar bei Auftreffen des Lichts und unabhängig von dessen Intensität ein.
2. Die kinetische Energie eines Fotoelektrons hängt nur von der Frequenz, nicht von der Intensität des auftreffenden Lichts ab. Sie ist umso größer (kleiner), je größer (kleiner) die Frequenz des einfallenden Lichts ist.
3. Es gibt eine Grenzfrequenz f_G : Licht, dessen Frequenz kleiner als f_G ist, kann keine Fotoelektronen auslösen.
4. Die Anzahl der pro Zeiteinheit ausgelösten Fotoelektronen ist proportional zur Intensität des einfallenden Lichts.

Mit dem Wellenmodell kann man die Befunde 1, 2 und 3 nicht erklären.

Beispiel

Erläutern Sie, warum im Wellenmodell die Aussage 1 nicht zu erklären ist.

Lösung:

Ein potenzielles Fotoelektron ist in der Metalloberfläche mit einer metallspezifischen Energie W_A gebunden. Nach der Wellenvorstellung des Lichts kann es die Oberfläche erst dann verlassen, wenn es mindestens diese Energie aus dem auftreffenden Licht „gesammelt“ hat. Da die Energie der Lichtwelle sich nach dem Wellenmodell aber **gleichmäßig** über die Metalloberfläche verteilt, ist hierfür immer eine bestimmte endliche Mindestzeitspanne Δt erforderlich. Diese ist umso größer, je weniger Lichtenergie pro Zeit und pro Fläche auf die Oberfläche trifft, d. h., je kleiner die Intensität des auftreffenden Lichts ist.

Zur Erklärung aller experimentellen Befunde entwickelte Einstein 1905 das Photonmodell des Lichts, in dem das von Max Planck 1900 entdeckte Wirkungsquantum h eine zentrale Bedeutung hat.

Regel

Photonenmodell des Lichts

Licht ist ein Strom von Teilchen, den sogenannten Photonen. Jedes Photon bewegt sich im Vakuum mit der Lichtgeschwindigkeit $c = 3,0 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und transportiert dabei Energie:

$$E_{\text{Ph}} = h \cdot f$$

f bezeichnet dabei die Frequenz der Lichtwelle. h ist eine Naturkonstante. Sie heißt Planck-Konstante oder Planck'sches Wirkungsquantum und hat den Zahlenwert $6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ bzw. $4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eVs}$.

Beispiel

Ein Helium-Neon-Laser emittiert rotes Licht der Wellenlänge $\lambda = 633 \text{ nm}$ und der Lichtleistung $P = 0,5 \text{ mW}$. Wie viele Photonen verlassen ihn in $t = 3 \text{ s}$?

Lösung:

Die Aufgabe lösen Sie zweckmäßigerweise in drei Schritten.

Schritt 1: Berechnung der gesamten abgestrahlten Lichtenergie E_{ges}

$$\begin{aligned} E_{\text{ges}} &= P \cdot t && \text{Energie} = \text{Leistung} \text{ mal } \text{Zeit} \\ &= 0,5 \cdot 10^{-3} \frac{\text{J}}{\text{s}} \cdot 3 \text{ s} && \text{Einsetzen der Zahlenwerte} \\ &= 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ J} \end{aligned}$$

Schritt 2: Berechnung der Energie eines Photons

$$\begin{aligned} E_{\text{Ph}} &= h \cdot f && \text{Photonenmodell} \\ &= \frac{h \cdot c}{\lambda} && \text{Grundgleichung der Wellenlehre: } c = \lambda \cdot f \\ &= \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3,0 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{633 \cdot 10^{-9} \text{ m}} && \text{Einsetzen der Zahlenwerte} \\ &= 3,14 \cdot 10^{-19} \text{ J} \end{aligned}$$

Schritt 3: Berechnung der Anzahl N der emittierten Photonen

$$\begin{aligned} N &= \frac{E_{\text{ges}}}{E_{\text{Ph}}} && \text{Definition der Anzahl} \\ &= \frac{1,5 \cdot 10^{-3} \text{ J}}{3,14 \cdot 10^{-19} \text{ J}} = \mathbf{4,8 \cdot 10^{15}} && \text{Einsetzen der Zahlenwerte} \end{aligned}$$

Alle experimentellen Befunde zum Fotoeffekt lassen sich mit dem Photonmodell erklären, wenn man annimmt, dass ein Photon mit einem Elektron in der Metalloberfläche stößt und dabei spontan seine gesamte Energie $h \cdot f$ überträgt. Einen

Teil davon, die Austrittsarbeit W_A , benötigt das Elektron zum Verlassen des Metalls. Den Restbetrag $h \cdot f - W_A$ behält es als kinetische Energie. Nach dem Stoß existiert das Photon nicht mehr.

Die mathematische Formulierung dieser Energiebilanz heißt Einsteingleichung.

Regel

Einsteingleichung

Löst ein Photon der Energie $h \cdot f$ ein Fotoelektron aus, so gilt für dessen kinetische Energie E_{kin} :

$$E_{\text{kin}} = h \cdot f - W_A$$

W_A bezeichnet dabei die Austrittsarbeit.

Beispiel

Monochromatisches Licht der Wellenlänge 546 nm löst aus einer Metallschicht Fotoelektronen der kinetischen Energie 0,33 eV aus. Entscheiden Sie mithilfe der Tabelle, um welches Metall es sich handelt.


Metall	Na	K	Cs	Cu	Au	Pt
Austrittsarbeit in eV	2,28	2,25	1,94	4,84	4,83	5,66

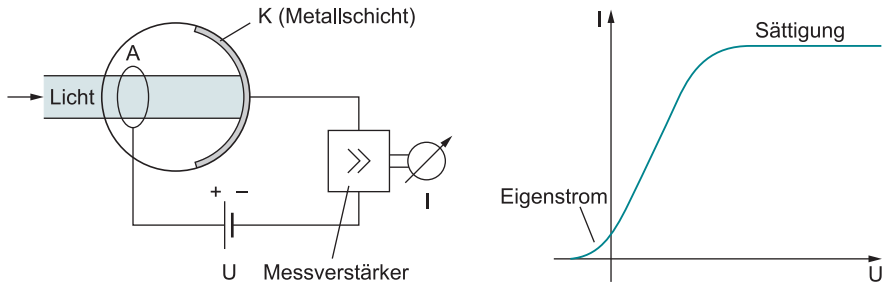
Lösung:

Sie berechnen mithilfe der Einsteingleichung den Betrag der Auslösearbeit und bestimmen anschließend anhand der Tabelle die Metallsorte:

$$\begin{aligned}
 E_{\text{kin}} &= h \cdot f - W_A && \text{Einsteingleichung} \\
 \Rightarrow W_A &= h \cdot f - E_{\text{kin}} && \text{auf beiden Seiten } W_A \text{ addieren und Seiten tauschen} \\
 &= h \cdot \frac{c}{\lambda} - E_{\text{kin}} && \text{Grundgleichung der Wellenlehre: } c = \lambda \cdot f \\
 &= 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eVs} \cdot \frac{3,0 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{546 \cdot 10^{-9} \text{ m}} && \text{Zahlenwerte einsetzen (aus Formelsammlung und Aufgabentext)} \\
 &= 0,33 \text{ eV} \\
 &= 1,94 \text{ eV}
 \end{aligned}$$

Es handelt sich demnach um **Cäsium**.

Die Anzahl der ausgelösten Fotoelektronen und deren kinetische Energie kann man experimentell mit einer **Fotozelle** bestimmen. Das ist ein evakuierter Glas Kolben, in dem einer Metallschicht K mit möglichst kleiner Auslösearbeit eine lichtdurchlässige, z. B. ringförmige Elektrode A gegenübersteht. Wird A mit dem Pluspol einer veränderbaren Gleichspannungsquelle U und die beleuchtete Metallschicht K mit deren Minuspol verbunden, werden Fotoelektronen von K nach A gesaugt. Den so zustande kommenden Strom nennt man **Fotostrom**. 



Mit zunehmender Saugspannung U nimmt die Fotostromstärke zu, weil pro Zeiteinheit immer mehr Fotoelektronen von K nach A gelangen. Wenn bei größeren Saugspannungen alle in einer Zeitspanne ausgelösten Fotoelektronen in dieser Zeitspanne auch zur Elektrode A gelangen, ist eine weitere Steigerung der Fotostromstärke nicht mehr zu beobachten, **Sättigung** tritt auf.

Die Fotoelektronen verlassen die Metallschicht auch ohne Saugspannung bereits mit einer bestimmten Geschwindigkeit und gelangen teilweise zur Elektrode A . Dieser schwache, **Eigenstrom** genannte Fotostrom lässt sich durch eine geringe Gegenspannung auf null absenken.

Beispiele

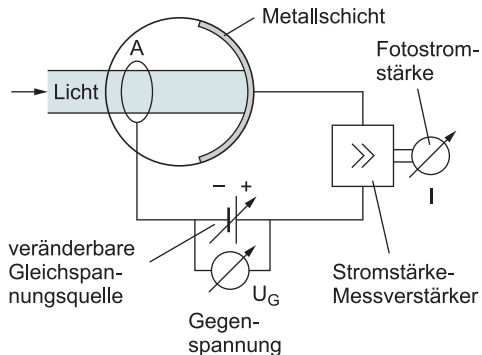
1. Beschreiben und begründen Sie, wie man mit einer Fotozelle die kinetische Energie von Fotoelektronen messen kann, die von einfarbigem Licht der Frequenz f ausgelöst werden.

Lösung:

Die Fotozelle wird so geschaltet, dass ein Fotoelektron von der positiven Metallschicht angezogen und von der negativen Ringelektrode A abgestoßen wird. Das Elektron durchläuft auf dem Weg von der Metallschicht zu A ein Gegenfeld und kann nur dann zum Fotostrom beitragen, wenn seine kinetische

Energie größer als $e \cdot U_G$ ist. Stellt man die Gegenspannung U_G so ein, dass der Fotostrom gerade zum Erliegen kommt, so können selbst die schnellsten Fotoelektronen nicht mehr gegen das elektrische Feld anlaufen. Dann gilt:

$$E_{\text{kin, max}} = e \cdot U_G$$



2. Beschreiben und begründen Sie, wie man mit einer Fozelle die Anzahl N der im Zeitintervall Δt ausgelösten Fotoelektronen messen kann.

Lösung:

Man betreibt die Fozelle im Sättigungsbereich und misst die zugehörige Sättigungsstromstärke I_S . Dann gilt:

$$I_S = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad \text{Definition der Stärke eines Gleichstroms: Die Ladungsmenge } \Delta Q \text{ passiert pro Zeitintervall } \Delta t \text{ den Leiterquerschnitt.}$$

$$= \frac{N \cdot e}{\Delta t} \quad e: \text{Elementarladung}$$

$$\Rightarrow N = \frac{I_S \cdot \Delta t}{e} \quad \text{nach } N \text{ umstellen}$$

- Aufgaben**
- Erläutern Sie, warum man die Befunde 2 (kinetische Energie der Fotoelektronen) und 3 (Grenzfrequenz) mit dem Wellenmodell des Lichts nicht erklären kann (siehe Regel-Kasten S. 2).
 - Erklären Sie die zwei Befunde aus Aufgabe 1 mithilfe des Photonenmodells.
 - Die Cäsiumschicht einer Fozelle (Auslösearbeit $W_A = 1,94 \text{ eV}$) wird von einem schwachen Lämpchen so beleuchtet, dass pro Sekunde auf einen mm^2 die Energie $1,00 \cdot 10^{-7} \text{ J}$ trifft.
 - Welche Energie E_A trifft pro Sekunde auf ein Cäsiumatom vom Durchmesser $5,00 \cdot 10^{-10} \text{ m}$?
 - Wie lange würde es demnach dauern, bis ein Cäsiumatom so viel Strahlungsenergie gesammelt hat, wie zur Ablösung eines Fotoelektrons gebraucht wird?
 - Kommentieren Sie das Ergebnis aus Teilaufgabe b.
 - Eine Lichtquelle gibt eine Lichtleistung von $0,50 \text{ mW}$ ab. Wie viele Photonen strahlt sie in einer Minute ab, wenn 35 % der Photonen die Frequenz $f_1 = 4,6 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ (rot) und 65 % die Frequenz $f_2 = 7,3 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ (blau) besitzen?
 - Beschreiben Sie, wie man die Einsteingleichung experimentell verifizieren kann (Prinzipiskizze des Versuchsaufbaus mit Bezeichnung der verwendeten Geräte, Durchführung und Auswertung).
 - Welche Geschwindigkeit besitzt ein Fotoelektron höchstens, das von Licht der Wellenlänge $404,7 \text{ nm}$ aus einer Cäsiumschicht (Auslösearbeit $W_A = 1,94 \text{ eV}$) ausgelöst worden ist?

Lösungen



Alle Aufgaben gelöst?

Falls ja: Gratulation! Sie finden auf den folgenden Seiten alle korrekten Antworten und Lösungen zu den Aufgaben des Buches und können so Ihre Ergebnisse kontrollieren.

Falls nein: Kein Beinbruch. Zum einen finden Sie im Lösungsteil ausführliche Rechen- und Lösungswege, die Ihnen Schritt für Schritt zeigen, wie Sie zur korrekten Lösung gelangen. Zum anderen befinden Sie sich mit der Erkenntnis, dass speziell die Quantenphysik und ihre Aussagen oft doch sehr seltsam erscheinen (Bild), in guter Gesellschaft: Von Richard Feynman, der für seine Arbeiten zur Quantenelektrodynamik mit dem Physiknobelpreis ausgezeichnet wurde, stammt der Satz: „[...] Auf der anderen Seite denke ich, es ist sicher zu sagen, niemand versteht Quantenmechanik.“ Und der junge Max Born, der die Quantenmechanik später statistisch interpretierte und dafür ebenfalls den Nobelpreis erhielt, kam in einem Brief an Albert Einstein zu dem Schluss: „Die Quanten sind eine hoffnungslose Schweinerei.“

1. *Befund 2:* Im Wellenmodell ist die von einer Lichtwelle transportierte Energie proportional zum Quadrat der Wellenamplitude. Die kinetische Energie eines Fotoelektrons, welche gleich der um die Auslösearbeit verminderten, vom Licht auf das Elektron übertragenen Energie ist, müsste daher von der Lichtintensität abhängen und nicht – wie beobachtet – von der Frequenz.

Befund 3: Nach dem Wellenmodell transportiert auch Licht, dessen Frequenz kleiner als die Grenzfrequenz ist, Energie auf die Metalloberfläche. Nach Verstreichen einer angemessenen „Sammelzeit“ müsste ein potenzielles Fotoelektron daher auch aus einer solchen Lichtwelle genügend Energie gesammelt haben, um aus der Metalloberfläche austreten zu können – im Widerspruch zur experimentellen Beobachtung.

2. *Befund 2:* Nach dem Photonenmodell gilt für die kinetische Energie eines Fotoelektrons die Einsteingleichung $E_{\text{kin}} = h \cdot f - W_A$. E_{kin} hängt demnach nicht von der Intensität des auftreffenden Lichts ab und ist umso größer (kleiner), je größer (kleiner) die Frequenz des Lichts ist.

Befund 3: Je nachdem, ob die Energie $h \cdot f$ des einfallenden Photons größer oder kleiner als die Austrittsarbeit W_A ist, kann es ein Fotoelektron auslösen ($E_{\text{kin}} > 0$) oder nicht. Für die Grenzfrequenz f_G folgt demnach:

$$E_{\text{kin}} > 0 \Leftrightarrow h \cdot f - W_A > 0 \Leftrightarrow f > \frac{W_A}{h} = f_G$$

3. a) Berechnung der Querschnittsfläche A eines Cs-Atoms:

$$A = r^2 \cdot \pi = (2,50 \cdot 10^{-10} \text{ m})^2 \cdot \pi = 1,96 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$$

Die auf diese $1,96 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ eintreffende Leistung P_A (Energie E_A pro s) erhält man aus einer Verhältnisrechnung:

$$\frac{P_A}{A} = \frac{1,00 \cdot 10^{-7} \frac{\text{J}}{\text{s}}}{10^{-6} \text{ m}^2}$$

$$\Rightarrow P_A = 0,10 \frac{\text{J}}{\text{s} \cdot \text{m}^2} \cdot A = 0,10 \frac{\text{J}}{\text{s} \cdot \text{m}^2} \cdot 1,96 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2 = \mathbf{1,96 \cdot 10^{-20} \frac{\text{J}}{\text{s}}} = \mathbf{0,12 \frac{\text{eV}}{\text{s}}}$$

Pro Sekunde trifft Licht der Energie 0,12 eV auf das Cäsiumatom.

- b) Für die Auslösezeit t_A gilt:

$$t_A = \frac{W_A}{P_A} = \frac{1,94 \text{ eV}}{0,12 \frac{\text{eV}}{\text{s}}} = \mathbf{16,2 \text{ s}}$$

- c) Die in b berechnete endliche Auslösezeit von $t_A = 16,2 \text{ s}$ widerspricht der experimentellen Beobachtung eines spontan einsetzenden Fotostroms. Für die Berechnung von t_A wurde dabei die klassische Vorstellung des Wellenmodells zugrunde gelegt, dass sich die Energie der auf die Fotoschicht treffenden Lichtwelle gleichmäßig über die Auftrefffläche verteilt.

4. In 60 s strahlt die Lichtquelle die Energie $0,5 \cdot 10^{-3} \frac{\text{J}}{\text{s}} \cdot 60 \text{ s} = 0,03 \text{ J}$ ab. Bezeichnet N die gesuchte Anzahl aller abgestrahlten Photonen, so werden $0,35N$ Photonen der Frequenz f_1 und $0,65N$ Photonen der Frequenz f_2 abgestrahlt.

$$0,35N \cdot h \cdot f_1 + 0,65N \cdot h \cdot f_2 = 0,03 \text{ J}$$

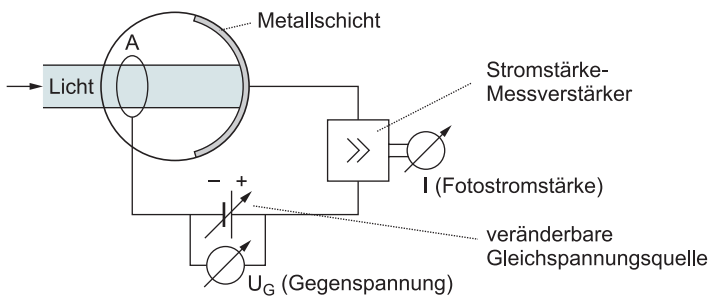
$$N \cdot h \cdot (0,35 \cdot f_1 + 0,65 \cdot f_2) = 0,03 \text{ J}$$

$N \cdot h$ ausklammern

$$N = \frac{0,03 \text{ J}}{(0,35 \cdot 4,6 + 0,65 \cdot 7,3) \cdot 10^{14} \text{ Hz} \cdot 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}} = 7,1 \cdot 10^{16}$$

nach N umstellen und Zahlenwerte einsetzen

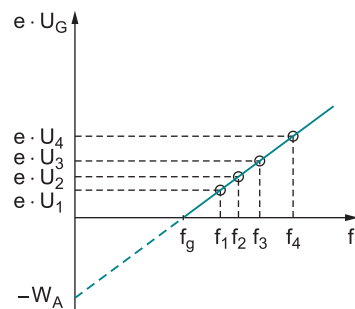
5. Versuchsaufbau:



Durchführung: Das Licht einer Quecksilberdampf Lampe trifft auf die Metallschicht einer Fotozelle, ohne die ringförmige Anode zu treffen. Nacheinander werden Filter, die jeweils nur Licht einer Frequenz des Quecksilberdampflampenlichts passieren lassen, in den Strahlengang gebracht. Jedes Mal stellt man die Gegenspannung U_G so ein, dass der Fotostrom gerade zum Erliegen kommt.

Messungen: Mittels der Filterbeschriftung bestimmt man die Frequenzen f_1, f_2, f_3, f_4 des durchgelassenen Lichts, mittels des Voltmeters die eingestellten Gegenspannungen U_1, U_2, U_3, U_4 .

Auswertung: $e \cdot U_G$ ist die kinetische Energie E_{kin} der schnellsten Fotoelektronen unmittelbar nach Verlassen der Fotokathode. In einem $f - (e \cdot U_G)$ -Diagramm werden die Messwertepaare $(f | e \cdot U_G)$ eingetragen. Die Punkte liegen auf einer Geraden. Demnach gilt: $E_{\text{kin}} = m \cdot f + t$, wobei m die Steigung der Geraden und t ihr y-Achsenabschnitt ist. Zur Bestätigung der Einsteingleichung weist man mithilfe des Diagramms nach, dass $m = h$ und $t = -W_A$ ist.



6. $E_{\text{kin}} = h \cdot f - W_A$

$$\frac{1}{2} m \cdot v^2 = h \cdot f - W_A$$

$$\frac{1}{2} m \cdot v^2 = h \cdot \frac{c}{\lambda} - W_A$$

$$v^2 = \frac{2 \cdot \left(h \cdot \frac{c}{\lambda} - W_A \right)}{m}$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot \left(h \cdot \frac{c}{\lambda} - W_A \right)}{m}}$$

$$= \sqrt{\frac{2 \cdot \left(4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eVs} \cdot \frac{3,0 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{404,7 \cdot 10^{-9} \text{ m}} - 1,94 \text{ eV} \right)}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}}}$$

$$= \sqrt{\frac{2,25 \text{ eV} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \frac{\text{J}}{\text{eV}}}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}}} = \mathbf{6,3 \cdot 10^5 \frac{\text{m}}{\text{s}}}$$

Einsteingleichung

Formel für kinetische Energie:

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

Grundgleichung der

Wellenlehre: $c = \lambda \cdot f$

auf beiden Seiten mit 2 multiplizieren, durch m dividieren

auf beiden Seiten radizieren

Zahlenwerte einsetzen

1 eV = $1,6 \cdot 10^{-19}$ J

7. Da die kinetische Energie von Fotoelektronen null ist, wenn sie von Licht der Grenzfrequenz f_G ausgelöst werden, folgt aus der Einsteingleichung:

$$0 = h \cdot f_G - W_A$$

$$h \cdot f_G = W_A$$

$$f_G = \frac{W_A}{h}$$

$$= \frac{4,57 \text{ eV}}{4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eVs}} = \mathbf{1,1 \cdot 10^{15} \text{ Hz}}$$

auf beiden Seiten W_A addieren und Seiten umstellen

auf beiden Seiten durch h dividieren

Zahlenwerte einsetzen

8. Die kinetische Energie, mit der ein Fotoelektron aus der Metalloberfläche austritt, wird im elektrischen Gegenfeld in elektrische Transportarbeit umgewandelt. Daher gilt:

$$e \cdot U_G = E_{\text{kin}}$$

$$= h \cdot f - W_A$$

$$\Rightarrow U_G = \frac{h \cdot f - W_A}{e}$$

$$= \frac{4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eVs} \cdot 7,4 \cdot 10^{14} \text{ Hz} - 1,94 \text{ eV}}{e} = \mathbf{1,1 \text{ V}}$$

Energiebilanz

Einsteingleichung

auf beiden Seiten durch e dividieren

Zahlenwerte einsetzen

9. $W_A = h \cdot f_G$

$$= 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eVs} \cdot 1,2 \cdot 10^{15} \text{ Hz} = \mathbf{5,0 \text{ eV}}$$

vgl. Aufgabe 7

Zahlenwerte einsetzen



© **STARK Verlag**

www.stark-verlag.de
info@stark-verlag.de

Der Datenbestand der STARK Verlag GmbH ist urheberrechtlich international geschützt. Kein Teil dieser Daten darf ohne Zustimmung des Rechteinhabers in irgendeiner Form verwertet werden.

STARK