

NEUES ABITUR

Abitur **MEHR
ERFAHREN**

Physik
Gymnasium

Das musst du können.

STARK

Inhalt

Vorwort

1	Statisches elektrisches Feld	1
1.1	Elektrische Feldstärke und elektrisches Potenzial	1
1.2	Homogenes elektrisches Feld – Plattenkondensator	6
1.3	Radiales Feld – Coulombgesetz	11
2	Statisches magnetisches Feld	13
3	Bewegung geladener Teilchen im E- und B-Feld	16
3.1	Vergleich mit dem Gravitationsfeld	16
3.2	Geladene Teilchen im homogenen elektrischen Feld	18
3.3	Geladene Teilchen im homogenen magnetischen Feld	21
3.4	Geladene Teilchen im E- und B-Feld	23
3.5	Relativistische Massenzunahme	24
3.6	Anwendungen	26
4	Elektromagnetische Induktion	31
4.1	Induktionsgesetz	31
4.2	Lenz'sche Regel – Selbstinduktion	33
4.3	Technische Anwendungen	37
5	Schwingungen und Wellen	40
5.1	Mechanische Schwingungen	40
5.2	Elektromagnetische Schwingungen – Schwingkreis	42
5.3	Analogien zwischen elektromagnetischer und mechanischer Schwingung.....	45
5.4	Wellenphänomene	48
5.5	Elektromagnetische Wellen	53

6	Eigenschaften von Quantenobjekten	63
6.1	Teilchencharakter von Photonen	63
6.2	Wellencharakter von Quantenobjekten	67
6.3	Verhalten von Quantenobjekten	69
7	Atomphysik.....	73
7.1	Linienpektren	73
7.2	Vorläufer der quantenmechanischen Atommodelle	75
7.3	Quantenmechanische Atommodelle	75
7.4	Mehrelektronensysteme.....	80
7.5	Röntgenstrahlung	80
7.6	Experimentelle Befunde – Anwendungen	82
8	Kernphysik.....	86
8.1	Kernaufbau.....	86
8.2	Radioaktivität	87
8.3	Strahlenbelastung und Strahlenschutz	91
	Stichwortverzeichnis	93

Autor: Florian Borges


Weiterführende Lernhilfen:

- Ausführliche Erläuterungen sowie viele Übungsaufgaben finden Sie in unseren Abitur-Trainingsbänden Physik 1 und 2 inkl. Lernvideos.
- Mit unseren bewährten roten Prüfungsbänden – erhältlich für viele Bundesländer – können Sie in Vorbereitung auf das Abitur Ihre Prüfung realitätsnah simulieren: Sie finden darin die offiziellen Prüfungsaufgaben der letzten Jahre mit vollständigen Lösungen sowie viele nützliche und aktuelle Hinweise zu Ablauf und Anforderungen des Abiturs.


Vorwort

Liebe Schülerin, lieber Schüler,

dieses handliche Buch bietet Ihnen einen **Leitfaden**, der Sie systematisch durch den Prüfungsstoff führt, der im Physikabitur behandelt wird. Dabei sind mit den Themenbereichen *Elektrisches und magnetisches Feld*, *Schwingungen und Wellen* sowie *Quanten-, Atom- und Kernphysik* die für die Prüfung verbindlichen Sachgebiete vollständig abgedeckt. Das AbiturSkript eignet sich besonders zur Auffrischung und Wiederholung des Prüfungsstoffs kurz vor dem Abitur.

- Zu Kapitelbeginn sind wichtige **Anwendungsgebiete** zu dem behandelten Stoff (Experimente, Naturphänomene, Technik) zusammengestellt, die Gegenstand von Prüfungsaufgaben sein können.
- **Definitionen** und **Regeln** sind durch einen grauen Balken am Rand gekennzeichnet, wichtige **Begriffe** durch Fettdruck hervorgehoben.
- Den jeweiligen Lerninhalt veranschaulichen viele **Abbildungen**.
- Abschnitte mit Inhalten, die (in den meisten Bundesländern) für das **erhöhte Anforderungsniveau** ausgewiesen sind, sind durch das Symbol **eA** gekennzeichnet.
- Passgenaue **Beispiele**  verdeutlichen, wie sich die Theorie zur Lösung wichtiger Standardaufgaben anwenden lässt.
- Unter der Überschrift **Weitere typische Aufgabenstellungen** finden Sie zusätzliche Tipps und Lösungsskizzen zu Fragestellungen, die typischerweise in der Abiturprüfung auftauchen.
- Das **Stichwortverzeichnis** führt schnell und treffsicher zum gesuchten Lernstoff.

Viel Erfolg bei der Abiturprüfung!



Florian Borges

4 Elektromagnetische Induktion

Anwendungsgebiete:

- ① Experimente: bewegte Leiterschleifen/Spulen im Magnetfeld (gleichmäßig oder beschleunigt)
- ② Technik: Generator; Elektromotor; induktive Aufladung (Akku-Zahnbürste); Transformator; Wirbelstrombremse; Induktionsherd

4.1 Induktionsgesetz

In einer Leiterschleife der Querschnittsfläche A , die sich in einem homogenen Magnetfeld der Flussdichte B befindet, tritt eine Induktionsspannung auf, wenn sich der magnetische Fluss $\Phi = B_{\perp} \cdot A$ durch diese Schleife zeitlich ändert. Dabei ist $B_{\perp} = B \cdot \cos \alpha$ der zur Fläche A senkrechte Anteil der Flussdichte B (α : Winkel zwischen Magnetfeld und Flächennormale). Eine Spule stellt eine Reihenschaltung vieler solcher Leiterschleifen dar, die Induktionsspannung wird größer.

Induktionsgesetz

Jede zeitliche Änderung des magnetischen Flusses $\Phi(t)$ durch eine Spule induziert zwischen den Spulenenden die Induktionsspannung $U_{\text{ind}} = -N \cdot \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ (für $\Phi \sim t$) bzw. $U_{\text{ind}}(t) = -N \cdot \dot{\Phi}(t)$ (allgemein)

N : Windungszahl der Spule

$\dot{\Phi}(t)$: Ableitung von $\Phi(t)$ nach der Zeit

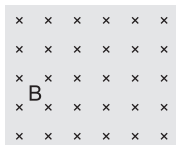
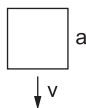
Die **zeitliche Flussänderung** $\dot{\Phi}(t) = \dot{B}_{\perp}(t) \cdot A(t) + B_{\perp}(t) \cdot \dot{A}(t)$ kann realisiert sein durch eine

- **Änderung des Magnetfelds** (\dot{B}_{\perp}). Beispiel: mit Wechselspannung betriebener Elektromagnet; rotierende Leiterschleife (Generator)
- **Änderung der Fläche** (\dot{A}). Beispiel: Ein- und Austritt einer Leiterschleife in ein Magnetfeld

Anschauliche Deutung: In beiden Fällen ändert sich die **Zahl der Feldlinien**, die die Schleifenfläche durchsetzt: einmal, weil sich die *Fläche* selbst (\dot{A}), einmal, weil sich die *Dichte der Feldlinien* (\dot{B}_{\perp}) ändert.



1. Eine quadratische Leiterschleife (Kantenlänge a) bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit v auf ein räumlich begrenztes, homogenes Magnetfeld der Flussdichte B zu und durchquert dieses.



- Erklären Sie das Zustandekommen der Induktionsspannung mithilfe der auftretenden
 - Flussänderung;
 - Wirkung der magnetischen Feldkraft.
- Skizzieren Sie den zeitlichen Verlauf des magnetischen Flusses in der Schleife und der Induktionsspannung während eines vollständigen Durchgangs.

Lösung:

- a) **Flussänderung:** Während des Eintretens in das B -Feld nimmt die von B durchsetzte Fläche $A(t)$ (wegen $v = \text{konst.}$) linear zu ($\rightarrow U_{\text{ind}} = \text{konst.}, < 0$), beim Austritt linear ab ($\rightarrow U_{\text{ind}} = \text{konst.}, > 0$). In Formeln:

$$|U_{\text{ind}}| = |\dot{\Phi}| = B \cdot |\dot{A}| = B \cdot a \cdot |\dot{a}| = B \cdot a \cdot v = \text{konst.}$$

Solange sich die Schleife vollständig innerhalb des Feldes befindet, bleibt $A(t) = \text{konst.}$ ($\rightarrow U_{\text{ind}} = 0$).

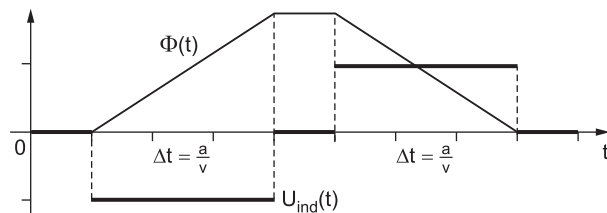
Magnetische Feldkraft: Sie wirkt während des Ein-/Austrittens auf die Ladungsträger in der im B -Feld liegenden Querseite der Schleife (nicht in den Längsseiten, da diese parallel zu v). Die Ladungstrennung führt zu $U_{\text{ind}} = \pm \text{konst.}$ an den Seitenenden.

In Formeln:

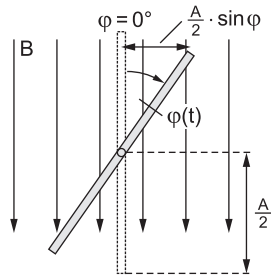
$$|U_{\text{ind}}| = |E| \cdot a = \left| \frac{F_L}{q} \right| \cdot a = \left| \frac{q \cdot v \cdot B}{q} \right| \cdot a = v \cdot B \cdot a = \text{konst.}$$

Sind beide Querseiten im B -Feld, kompensieren sich die zugehörigen magnetischen Kräfte ($\rightarrow U_{\text{ind}} = 0$).

- b) t - U_{ind} - bzw. t - Φ -Diagramm:



2. Eine Leiterschleife (Querschnittsfläche A) dreht sich in einem homogenen Magnetfeld im Uhrzeigersinn mit konstanter Frequenz um ihre Längsachse (Skizze: Frontalansicht). Zum Zeitpunkt $t=0$ s befinde sich die Schleife in der Stellung $\varphi=0^\circ$, in der sie gerade nicht von den Feldlinien durchsetzt wird.



Bestimmen Sie die Funktionsgleichung $U_{\text{ind}}(t)$ und beschreiben Sie anhand der Gleichung, wie man den Scheitelwert der Induktionsspannung erhöhen könnte.

Lösung: Für die von B durchsetzte Fläche $A(\varphi)$ gilt $A(0^\circ)=0$, $A(90^\circ)=A$ und allgemein: $A(\varphi(t)) = A \cdot \sin \varphi(t) = A \cdot \sin(\omega \cdot t)$

Induktionsspannung: Induktionsgesetz mit $N=1$

$$U_{\text{ind}}(t) = -\dot{\Phi} = -B \cdot \dot{A} = -B \cdot A \cdot (\sin(\omega \cdot t))' = -B \cdot A \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

Ein höherer Scheitelwert $U_{\text{max}} = B \cdot A \cdot \omega$ ist möglich durch Vergrößern der Flussdichte B , der Querschnittsfläche A oder der Kreisfrequenz ω .

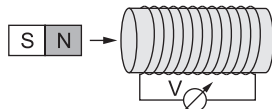
4.2 Lenz'sche Regel – Selbstinduktion

Lenz'sche Regel

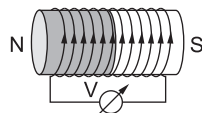
Induktionsvorgänge laufen stets so ab, dass sie ihrer Ursache entgegenwirken.



Einer Zylinderspule wird ein Stabmagnet genähert. Bestimmen Sie mithilfe der Lenz'schen Regel die technische Richtung des induzierten Spulenstroms.



Lösung: Dem sich nähernden Stabmagnetpol steht nach der Lenz'schen Regel ein gleichnamiger Spulenmagnetpol gegenüber. Nach der Rechte-Hand-Regel (vgl. S. 14) muss der Strom daher in der eingezeichneten Richtung fließen.



Hinweis: Die Lenz'sche Regel ist aus heutiger Sicht kein eigenständiges physikalisches Gesetz, sondern lediglich eine (historische) Formulierung des Umstands, dass selbstverständlich auch die elektromagnetische Induktion dem Energieerhaltungssatz unterliegt.

Unter **Selbstinduktion** versteht man das Auftreten einer Induktionsspannung in einem Leiterkreis, die durch eine Änderung des Stroms im gleichen Leiterkreis verursacht wird.

Selbstinduktion

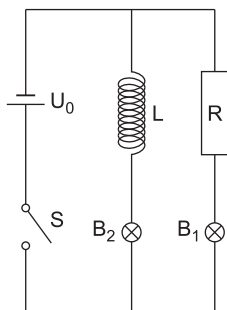
Ändert sich in einer Spule die Stromstärke I , wird in der Spule selbst eine Gegenspannung U_{ind} induziert, die zu jedem Zeitpunkt proportional zur Stromstärkeänderung ist:

$$U_{\text{ind}} = -L \cdot \dot{I} \quad [L] = 1 \frac{\text{Vs}}{\text{A}} = 1 \text{ H}$$

Der Proportionalitätsfaktor L heißt **Induktivität** (Einheit: 1 Henry).

Grundversuch zur Selbstinduktion: Nach dem Schließen des Schalters S leuchtet Glühlampe B_1 sofort, B_2 erst verzögert auf.

Begründung: In der Spule der Induktivität L baut sich das Magnetfeld verzögert auf, weil durch die Stromstärkezunahme eine Gegenspannung induziert wird und daher in Bilanz kaum Strom fließen kann. Erst wenn die Stromstärke in der Spule sich nicht mehr ändert, leuchtet auch B_2 in voller Stärke.



Die Induktivitäten einiger weniger Leiterkreise kann man durch ihre geometrischen Daten ausdrücken, so z. B. für Zylinderspulen.

Induktivität einer Spule

Eine langgestreckte Zylinderspule (Länge ℓ , Windungszahl N , Querschnittsfläche A) hat die Induktivität

$$L = \mu_0 \cdot A \cdot \frac{N^2}{\ell}$$

μ_0 : magnetische Feldkonstante ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$)

Analog zum elektrischen Feld innerhalb eines Kondensators ist im magnetischen Feld einer Spule Energie gespeichert.

In der Spule gespeicherte Energie

Im magnetischen Feld einer stromdurchflossenen Spule (Stromstärke I , Induktivität L) ist die Energie

$$W = \frac{1}{2} L \cdot I^2$$

gespeichert.



Eine zylindrische Spule ($\ell = 1,00 \text{ m}$, $N = 2000$, $A = 400 \text{ cm}^2$) wird von einem Strom der Stärke $2,5 \text{ A}$ durchflossen.

Berechnen Sie, wie lange ein geeignet angeschlossenes Glühlämpchen ($3,0 \text{ V}$; $0,05 \text{ A}$) nach dem Abtrennen der Stromversorgung maximal leuchten kann.

Lösung:

Induktivität:

$$L = \mu_0 \cdot A \cdot \frac{N^2}{\ell} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot 400 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \frac{2000^2}{1,00 \text{ m}} = 0,201 \text{ H}$$

Energieinhalt der Spule:

$$W = \frac{1}{2} L \cdot I^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,201 \text{ H} \cdot (2,5 \text{ A})^2 = 0,628 \text{ J}$$

Leistungsaufnahme des Lämpchens:

$$P = U_0 \cdot I_0 = 3,0 \text{ V} \cdot 0,05 \text{ A} = 0,15 \text{ W}$$

Maximale Leuchtdauer:

$$P = \frac{W}{t} \Rightarrow t = \frac{W}{P} = \frac{0,628 \text{ J}}{0,15 \text{ W}} = 4,2 \text{ s}$$

Weitere typische Aufgabenstellungen

1. Argumentation mithilfe der Lenz'schen Regel (Reibungs-/Brems-effekt)
2. Erläuterung des Funktionsprinzips bei technischen Anwendungen der Induktion (vgl. Kap. 4.3, S. 37), z. B. Erzeugung sinusförmiger Wechselspannung, Akku-Zahnbürste Induktionsherd, Wirbelstrombremse, magnetischer Datenspeicher, Mikrofon, Lautsprecher; Zündanlage beim Verbrennungsmotor

3. Ein- und Ausschaltvorgang an Spulen (quantitativ) **eA**

Basis: Grundversuch zur Selbstinduktion, vgl. S. 34

Lösungsansatz: Kirchhoff'sche Maschenregel

Einschaltvorgang: Im Stromkreis mit dem Gesamtwiderstand $R_{\text{ges}} = R + R_L$ (R_L : ohmscher Widerstand der Spule) fließt der Strom der Stärke $I(t)$, der nach dem Schließen des Schalters von $I(0\text{ s}) = 0\text{ A}$ aus ansteigt. Die dabei induzierte Gegenspannung U_{ind} (Lenz'sche Regel) wirkt zusammen mit der Batteriespannung U_0 als Spannungsquelle im Kreis, sodass gilt:

$$U_{R_{\text{ges}}}(t) = U_0 + U_{\text{ind}}(t) \Leftrightarrow R_{\text{ges}} \cdot I(t) = U_0 - L \cdot \dot{I}(t)$$

$$\Rightarrow I(t) = \frac{U_0 - L \cdot \dot{I}(t)}{R_{\text{ges}}}$$

- $t = 0\text{ s}$: Die Gegenspannung ist maximal und betragsgleich der Batteriespannung wegen $I(0\text{ s}) = 0\text{ A} \Rightarrow U_0 = L \cdot \dot{I}(0\text{ s}) = U_{\text{ind}}(0\text{ s})$.
- $t > 0\text{ s}$: $I(t)$ nimmt zu, folglich nimmt $\dot{I}(t)$ und damit die Gegenspannung ab. Nach einer hinreichend großen Zeit t_0 erreicht die Stromstärke ihren Maximalwert $I(t) = \frac{U_0}{R_{\text{ges}}} = \text{konst. für } t > t_0$.

Anmerkung: $I(t)$ wächst exponentiell, $I(t) = \frac{U_0}{R_{\text{ges}}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{R_{\text{ges}}}{L} \cdot t}\right)$.

Ausschaltvorgang: Der Stromkreis besteht jetzt aus Spule, Widerstand R und den beiden Lämpchen; eine äußere Spannungsquelle gibt es nicht mehr. In der Spule wird beim Abfallen des Stromes eine Spannung induziert, die dem Absinken der Stromstärke entgegenwirkt:

$$U_{R_{\text{ges}}}(t) = U_{\text{ind}}(t) \Leftrightarrow R_{\text{ges}} \cdot I(t) = -L \cdot \dot{I}(t) \Rightarrow I(t) = -\frac{L}{R_{\text{ges}}} \cdot \dot{I}(t)$$

- $t = 0\text{ s}$: Die Stromstärke, die Spannungen und die zeitliche Änderung (= Abnahme) der Stromstärke sind maximal.
- $t > 0\text{ s}$: $I(t)$ nimmt ab, dabei verringern sich die Änderungsrate $\dot{I}(t)$ und die Gegenspannung. Nach einer hinreichend großen Zeit t_0 erreicht $I(t)$ praktisch den Wert null.

Anmerkung: $I(t)$ fällt exponentiell, $I(t) = \frac{U_0}{R_{\text{ges}}} \cdot e^{-\frac{R_{\text{ges}}}{L} \cdot t}$.

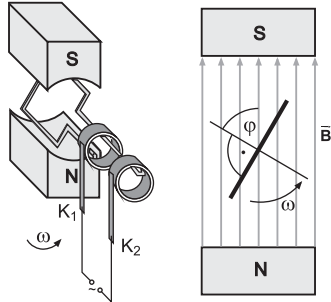
4.3 Technische Anwendungen

1 Generator

Als Generatoren bezeichnet man in der Elektrotechnik eine umlaufende Maschine, die durch elektromagnetische Induktion elektrische Spannung erzeugt und dabei mechanische in elektrische Energie umwandelt.

Die Skizze zeigt den prinzipiellen Aufbau eines **Außenpol-Wechselstromgenerators**. Darin wird

durch die Rotation einer Spule der Querschnittsfläche A mit N Windungen mit konstanter Winkelgeschwindigkeit ω in einem homogenen Magnetfeld der Flussdichte \vec{B} wird zwischen den Spulenenden die sinusförmige Wechselspannung $U(t)$ induziert.



Begründung (vgl. Beispiel 2, S. 33):

Zeitabhängigkeit des Drehwinkels $\varphi(t)$:

$$\varphi(t) = \omega \cdot t + \varphi_0$$

Magnetischer Fluss $\Phi(t)$:

$$\Phi(t) = B \cdot A \cdot \cos \varphi(t) = B \cdot A \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0)$$

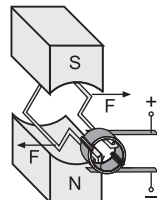
Induktionsspannung $U(t)$:

$$\begin{aligned} U(t) &= -N \cdot \dot{\Phi}(t) = -N \cdot (B \cdot A \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0))' = N \cdot B \cdot A \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0) \\ &= \hat{U} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0) \quad \text{mit der Scheitelspannung } \hat{U} = N \cdot B \cdot A \cdot \omega \end{aligned}$$

2 Elektromotor

Als Elektromotor bezeichnet man in der Elektrotechnik eine umlaufende Maschine, die durch **Lorentzkkräfte** elektrische Energie in mechanische umwandelt. Die Skizze zeigt den prinzipiellen Aufbau eines **Gleichstromelektromotors**.

Eine zwischen den Polen eines Permanentmagneten drehbar gelagerte, von einem Gleichstrom durch-

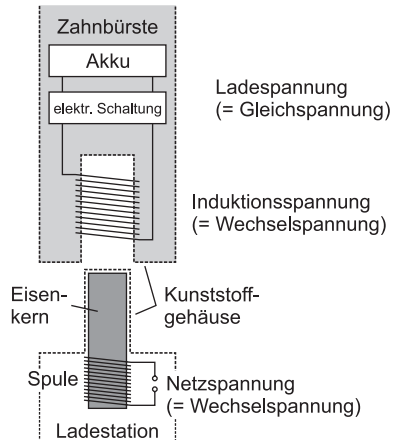


flossene rechteckige Spule erfährt senkrecht zu den Magnetfeldlinien zwei Lorentzkräfte \vec{F} , welche die Spule drehen. In dem Moment, in dem die Spulenfläche senkrecht von den Feldlinien durchsetzt wird, kehrt ein sogenannter Kommutator die Stromrichtung in der Spule um und bewirkt so zusammen mit ihrem Eigenschwung ein Weiterdrehen in der ursprünglichen Richtung.

3 Aufladen einer Akku-Zahnbürste

Die Ladestation einer elektrischen Zahnbürste besteht im Wesentlichen aus einer Spule (= Primärspule) mit Eisenkern, an die eine Wechselspannung angelegt wird. Das auf diese Weise im Eisenkern erzeugte magnetische Wechselfeld $B(t)$ der Frequenz f lässt sich durch $B(t) = B_0 \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t)$ beschreiben. Zum Aufladen des Akkus stellt man die Zahnbürste auf die Ladestation und damit die in der Bürste eingebaute Spule (= Sekundärspule)

auf den Eisenkern. Das in diesem sich fortwährend zeitlich verändernde Magnetfeld induziert in der Sekundärspule gemäß Induktionsgesetz eine Wechselspannung $U(t) \sim \dot{B}(t)$ gleicher Frequenz f zwischen den Spulenenden (**Transformatorprinzip**, vgl. 4). Diese wird durch eine elektrische Schaltung gleichgerichtet und so der Akku geladen.



4 Transformator

Funktionsprinzip: Ein Transformator besteht aus zwei Spulen, die keine leitende Verbindung haben, aber auf einem gemeinsamen, in sich geschlossenen Eisenkörper aufgewickelt sind. Schließt man die Primärspule an eine Wechselspannungsquelle an, fließt durch sie ein Wechselstrom. Der dadurch im Eisenkern erzeugte periodisch veränderliche magnetische Fluss durchsetzt auch die Sekundärspule und

induziert in ihr eine Wechselspannung. Abhängig vom Verhältnis der Wicklungszahlen beider Spulen lassen sich mit Transformatoren die Scheitelwerte von Wechselspannungen und Wechselströmen relativ verlustfrei nahezu beliebig ändern.

Verlustreduzierte Übertragung elektrischer Energie: Beim Transport einer elektrischen Leistung $U \cdot I$ in einer Fernleitung vom ohmschen Widerstand R wird die Leistung $R \cdot I^2$ in Form von Wärme an die Umgebung abgegeben. Dieser unerwünschte Leistungsverlust lässt sich durch Hochtransformieren der Spannung bei gleichzeitiger Senkung der Stromstärke deutlich verringern.

5 Technische Anwendung von Wirbelströmen eA

Entstehung von Wirbelströmen: Befindet sich ein Metallkörper in einem zeitlich veränderlichen Magnetfeld (z. B. Wechselfeld einer Spule; Relativbewegung zu einem Permanentmagneten), so wird gemäß dem Induktionsgesetz eine elektrische Spannung induziert, die aufgrund der Ausdehnung des Metallkörpers einen ringförmigen Induktionsstrom hervorruft.

Wirbelstrombremse: Wird eine rotierende Metallscheibe senkrecht von einem Magnetfeld durchsetzt, so erzeugen die entstehenden Wirbelströme nach der Lenz'schen Regel ihrerseits ein Magnetfeld, das dem ursprünglichen Magnetfeld entgegenwirkt und so die Bewegung, die zu der Induktion geführt hat, hemmt; die Scheibe wird abgebremst.

Induktionsherd: Unter dem Glaskeramikfeld eines Herds befindet sich eine Induktionsspule, die von einem Wechselstrom hoher Frequenz durchflossen wird. Das dadurch erzeugte hochfrequente magnetische Wechselfeld durchsetzt den metallischen Topfboden und erzeugt dort Wirbelströme. Durch den Stromfluss erwärmt sich aufgrund des ohmschen Widerstandes des Bodenmaterials der Topf und damit der Topfinhalt.

In der Praxis verwendet man für den Topfboden ferromagnetisches Material wie z. B. Stahl, da dies weitere Vorteile mit sich bringt (Bündelung des Magnetfelds im Topf, zusätzliche Erwärmung durch Ummagnetisierungsvorgänge).

6 Eigenschaften von Quantenobjekten

Anwendungsgebiete:

- ❶ Fotoeffekt: Fotokathode; Gegenfeldmethode
- ❷ De-Broglie-Wellen: Interferenz von Quantenteilchen (z. B. Elektronen): Streuung am Doppelspalt (Versuch von Jönsson) oder Gitter (Versuch von Davisson und Germer)
- ❸ Heisenberg'sche Unschärferelation: Grundaussage zur prinzipiellen Messbarkeit von Quantengrößen; Abschätzen der statistischen Streuungen von Messgrößen
- ❹ Technik: Elektronenmikroskop; Quantencomputer; Kryptografie

6.1 Teilchencharakter von Photonen

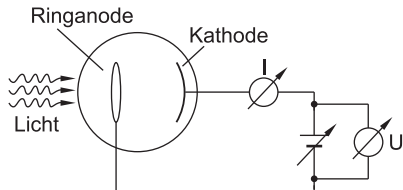
Erster Grundversuch zum Fotoeffekt (qualitativ)

Geeignete Beleuchtung löst Elektronen aus einer Metalloberfläche:

- Trifft (UV-reiches) Licht einer Hg-Dampflampe auf eine negativ geladene Zinkplatte, wird diese entladen (Nachweis: Elektroskopauschlag geht zurück). Glühlampenlicht bewirkt keine Entladung.
- Durchdringt das Hg-Licht vorher eine Glasplatte, findet keine Entladung statt.
- Eine positiv geladene Zinkplatte wird nicht entladen.

Zweiter Grundversuch zum Fotoeffekt (quantitativ)

In einer Vakuumfotozelle wird der Strom und die kinetische Energie der durch das Licht ausgelösten Fotoelektronen in Abhängigkeit von der Frequenz und Intensität des verwendeten Lichts gemessen.



Ergebnis: Die Anzahl der pro Zeiteinheit erzeugten Fotoelektronen ist proportional zur Intensität des einfallenden Lichts. Die weiteren Befunde stehen aber im **Widerspruch zum Wellenmodell des Lichts**:

Empirischer Befund	Vorhersage des Wellenmodells
<ul style="list-style-type: none"> Fotoeffekt setzt sofort ein Kinetische Energie E_{kin} der Fotoelektronen hängt von der Frequenz f des einfallenden Lichts ab, nicht von der Intensität; je höher f, desto größer E_{kin} Existenz einer Grenzfrequenz f_G: bei Licht mit $f < f_G$ kein Fotoeffekt 	<ul style="list-style-type: none"> Verzögerter Einsatz, da Lichtwelle sich gleichmäßig auf alle Atome der Metalloberfläche verteilt → nötige Austrittsenergie muss erst angehäuft werden Lichtenergie abhängig von der Intensität (\sim Amplitudenquadrat), nicht von der Frequenz der Lichtwelle keine Grenzfrequenz, weil Energiezuführung unabhängig von der Frequenz

Zur Erklärung des Fotoeffekts entwickelte Einstein eine zum Wellenmodell alternative Modellvorstellung des Lichts.

Fotoeffekt: Theoretische Erklärung mit dem Photonenmodell

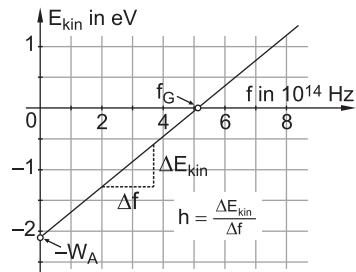
- Licht lässt sich als Strom von **Photonen** deuten, die sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegen, unteilbar sind und nur als Ganzes erzeugt oder absorbiert werden können.
- Die Energie E_{Ph} eines Photons ist direkt proportional zur Lichtfrequenz f , die Proportionalitätskonstante ist das **Planck'sche Wirkungsquantum h** (kurz: Planck-Konstante):

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

- Trifft ein Photon auf ein Metall, kann es ein Elektron aus dem Metallverbund herauslösen (Austrittsarbeit W_A), wenn $E_{\text{Ph}} > W_A$; die Restenergie bildet die kinetische Energie des Fotoelektrons:
 $E_{\text{kin}} = h \cdot f - W_A$ (**Einstein-Gleichung**)

f- E_{kin} -Diagramm: Gerade

- Typische grafische Darstellung zum Fotoeffekt
- Ablesen der Kenngrößen
 - Grenzfrequenz f_G : Schnittpunkt mit der f -Achse
 - Austrittsarbeit W_A : Schnittpunkt mit der E_{kin} -Achse
 - Planck-Konstante h : Steigung



- f_G bzw. W_A metallspezifisch. Es gilt: $0 = h \cdot f_G - W_A \Rightarrow f_G = \frac{W_A}{h}$



Erläutern Sie eine Anordnung zur Bestimmung der maximalen kinetischen Energie von Fotoelektronen in Abhängigkeit von der verwendeten Lichtfrequenz mithilfe einer Vakuumfotозelle.

Lösung: Gefragt ist nach der **Gegenfeldmethode**.

Wesentliche Punkte:

- Versuchsaufbau: vgl. Skizze zum zweiten Grundversuch (S. 63)
- Licht einer bestimmten Frequenz fällt auf die Kathode der Vakuumfotозelle und löst dort Fotoelektronen aus
- Fotoelektronen fliegen in Richtung der ringförmigen Anode und treffen diese teilweise → Kathode wird positiv geladen (Elektronenmangel), Ringanode negativ; es fließt ein Strom durch das Ampere-meter zwischen Anode und Kathode.
- Anlegen einer regelbaren Gegenspannung: Einstellung der Spannung U so, dass gerade kein Strom mehr fließt → Die Energie $e \cdot U$ ist der gesuchte Wert für $E_{\text{kin, max}}$.
- Variation der Lichtfrequenz f → Messreihe von $(f | E_{\text{kin, max}})$ -Paaren → f - $E_{\text{kin, max}}$ -Diagramm (Gerade)

Photonen haben zwar keine Ruhemasse, aber eine relativistische Masse $m_{\text{ph}} = m(c)$ und wegen $E = m \cdot c^2$ (Energie-Masse-Äquivalenz nach Einstein) den relativistischen Impuls

$$p_{\text{ph}} = m_{\text{ph}} \cdot c = \frac{E_{\text{ph}}}{c^2} \cdot c = \frac{E_{\text{ph}}}{c} = \frac{h \cdot f}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

Impuls des Photons

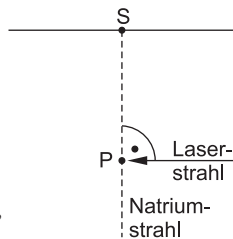
Ein Photon der Wellenlänge λ besitzt den Impuls

$$p = \frac{h}{\lambda}.$$



Strahlauslenkung

Ein feiner Strahl aus Natriumatomen (Atommasse $3,82 \cdot 10^{-26}$ kg) trifft senkrecht auf einen Auffangschirm am Punkt S ($v = 685 \frac{\text{m}}{\text{s}}$). Wird der Strahl senkrecht zur Strahlrichtung mit monochromatischem Laserlicht geeigneter Wellenlänge am Punkt P bestrahlt ($\lambda = 592$ nm), können die Natriumatome Photonen dieses Lichts absorbieren ($|\overline{PS}| = 60$ cm).



Begründen Sie, dass in diesem Fall der Na-Strahl nicht mehr bei S auftrifft, und berechnen Sie die Verschiebung auf dem Schirm.

Lösung: Der Impuls der absorbierten Photonen wird auf die Na-Atome übertragen und diese werden nach links abgelenkt (Impulserhaltung).

Strahlensatz:

$$\frac{x}{d} = \frac{p_L}{p_{\text{Na}}} \Rightarrow x = \frac{p_L}{p_{\text{Na}}} \cdot d$$

Impuls eines Photons:

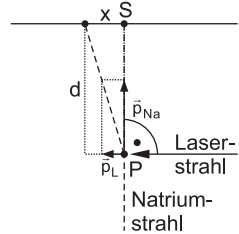
$$p_L = \frac{h}{\lambda} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{592 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 1,12 \cdot 10^{-27} \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$$

Impuls eines Natriumatoms:

$$p_{\text{Na}} = m \cdot v = 3,82 \cdot 10^{-26} \text{ kg} \cdot 685 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 2,62 \cdot 10^{-23} \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$$

Strahlablenkung:

$$x = \frac{p_L}{p_{\text{Na}}} \cdot d = \frac{1,12 \cdot 10^{-27}}{2,62 \cdot 10^{-23}} \cdot 0,60 \text{ m} = 2,6 \cdot 10^{-5} \text{ cm} = 26 \mu\text{m}$$



Comptoneffekt eA

Beschreibung: Bei der Streuung von monochromatischer Röntgenstrahlung (vgl. Kap. 7.5, S. 80 ff.) an einem geeigneten Körper tritt in der Streustrahlung neben der Primärstrahlung der Wellenlänge λ auch längerwellige Sekundärstrahlung der Wellenlänge $\lambda' = \lambda + \Delta\lambda$ auf.

Interpretation im Photonenmodell: elastischer Stoß zwischen Photon und Elektron des Streukörpers

Erklärung im Photonenmodell:

- **Sekundärstrahlung:** Stoß eines Photons mit schwach gebundenem, anfangs ruhendem Elektron des Streuatoms \rightarrow Ein Teil ΔE der Photonenenergie geht auf das Elektron über. \rightarrow Nach dem Stoß verlassen ein Photon kleinerer Energie (also größerer Wellenlänge) und das gestoßene Elektron mit der kinetischen Energie $E_{\text{kin}} = \Delta E$ den Streukörper.
- **Primärstrahlung:** Stoß eines Photons mit fest gebundenem, inneren Elektron des Streuatoms \rightarrow Austausch von Energie und Impuls des Photons mit dem Atom als Ganzem \rightarrow Wegen des großen Massenunterschieds der Stoßpartner ändern sich Energie und damit Wellenlänge des Photons nicht.

Comptonformel

Der **Wellenlängenunterschied** $\Delta\lambda$ zwischen Primär- und Sekundäranteil der Compton-Streustrahlung ist durch den **Streuwinkel** ϑ sowie durch drei Naturkonstanten bestimmt:

$$\Delta\lambda = \lambda_C \cdot (1 - \cos \vartheta) \quad \text{mit} \quad \lambda_C = \frac{h}{m_0 \cdot c} = 2,43 \text{ pm}$$

h : Planck'sches Wirkungsquantum

m_0 : Elektronruhemasse

c : Vakuumlichtgeschwindigkeit

λ_C : Comptonwellenlänge



In einem Streuexperiment fällt monochromatische Röntgenstrahlung der Wellenlänge 1,00 pm auf eine Graphitprobe. Die von der Probe gestreute Sekundärstrahlung wird für verschiedene Streuwinkel ϑ vermessen; für den Winkel ϑ_1 misst man Strahlung der Wellenlänge 1,04 pm. Berechnen Sie den Streuwinkel ϑ_1 .

Lösung: Umstellen der Comptonformel

$$\begin{aligned} \Delta\lambda &= \lambda_C \cdot (1 - \cos \vartheta_1) \Rightarrow \cos \vartheta_1 = 1 - \frac{\Delta\lambda}{\lambda_C} = 1 - \frac{\lambda' - \lambda}{\lambda_C} \\ &= 1 - \frac{0,04 \text{ pm}}{2,43 \text{ pm}} = 0,9835 \Rightarrow \vartheta_1 = 10^\circ \end{aligned}$$

6.2 Wellencharakter von Quantenobjekten

Quantenobjekte – im klassischen Sinne also kleine „Teilchen“ wie Elektronen – zeigen unter bestimmten Voraussetzungen typische Welleneigenschaften. Die Brücke zwischen Teilchen- und Wellenbild liefert die Modellvorstellung de Broglies, die den Teilchenimpuls mit einer Wellenlänge verknüpft.

De-Broglie-Wellenlänge

Einem Teilchen mit dem Impuls $p = m \cdot v$ (m : Masse; v : Geschwindigkeit) lässt sich eine Wellenlänge zuordnen:

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad \text{bzw.} \quad \lambda = \frac{h}{m \cdot v}$$

h : Planck'sches Wirkungsquantum



Berechnen Sie die Wellenlänge von ursprünglich als ruhend angenommenen Elektronen, die die Beschleunigungsspannung U durchlaufen haben (U genügend klein, sodass nichtrelativistische Rechnung ausreichend).

Lösung: Aufstellen der Energiebilanz

$$E_{\text{beschl}} = E_{\text{kin}} \Leftrightarrow e \cdot U = \frac{1}{2} m \cdot v^2 = \frac{m^2 \cdot v^2}{2m} = \frac{p^2}{2m}$$

$$\Rightarrow p = \sqrt{2m \cdot e \cdot U}$$

$$\Rightarrow \lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2m \cdot e \cdot U}}$$

Das Wellenverhalten von materiellen Teilchen tritt in den aus der Optik bekannten **Interferenzexperimenten** bei geeigneter Geometrie der Versuchsanordnung zutage. Typisch sind:

- Doppelspaltexperiment (Versuch von Jönsson: Elektroneninterferenz; Analogie: Interferenz von Licht, vgl. Kap. 5.5, S. 59 f.)
- Streuung am Einkristall (Experiment von Davisson und Germer: Elektroneninterferenz; Analogie: Bragg-Reflexion von Röntgenstrahlung am Einkristall, vgl. Kap. 7.5, S. 82)



Das Fulleren C-60 ist ein hochsymmetrisches Kohlenstoffmolekül aus 60 Atomen (Durchmesser ca. 0,7 nm), das aufgrund seiner Struktur auch „Fußballmolekül“ genannt wird. Solche Fullerene werden auf etwa $200 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ beschleunigt und fliegen auf ein Gitter mit Gitterkonstante g . Mit einem Detektor 1,1 m hinter dem Gitter sind die Maxima erster Ordnung etwa $30 \mu\text{m}$ seitlich vom Hauptmaximum deutlich zu erkennen. Bestimmen Sie g .

Lösung:

Beugungsbedingung für Maximum 1. Ordnung (vgl. Kap. 5.5, S. 60):

$$\sin \alpha_1 = \frac{\lambda}{g} \quad (*)$$

Kleine-Winkel-Näherung (wegen $30 \mu\text{m} \ll 1,1 \text{ m}$):

$$\sin \alpha_1 \approx \tan \alpha_1 = \frac{30 \cdot 10^{-6} \text{ m}}{1,1 \text{ m}} = 2,7 \cdot 10^{-5} \stackrel{(*)}{\Rightarrow} g = \frac{\lambda}{2,7 \cdot 10^{-5}} \quad (**)$$

De-Broglie-Wellenlänge:

$$m_{C-60} = 60 \cdot m_C = 60 \cdot 12 \text{ u} = 60 \cdot 12 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1,2 \cdot 10^{-24} \text{ kg}$$

$$\Rightarrow \lambda = \frac{h}{m_{C-60} \cdot v} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{1,2 \cdot 10^{-24} \text{ kg} \cdot 200 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 2,8 \cdot 10^{-12} \text{ m} = 2,8 \text{ pm} \quad (***)$$

Gitterkonstante:

$$g = \frac{(**)}{2,7 \cdot 10^{-5}} = \frac{(***)}{2,7 \cdot 10^{-5}} = 1,0 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 0,1 \mu\text{m}$$

6.3 Verhalten von Quantenobjekten

Die **Quantenmechanik** wurde in den 1920er-Jahren in zwei äquivalenten Formulierungen von Heisenberg (Matrizenmechanik, 1925) und Schrödinger (Wellenmechanik, 1926) entwickelt. In der Beschreibung von physikalischen Objekten unterscheidet sie sich grundsätzlich von der klassischen Mechanik. Ihre wesentlichen Aussagen sind (in wellenmechanischer Formulierung):

- Der Ausgang eines Quantenexperiments ist vom Zufall bestimmt.
- Die Quantenmechanik beschreibt nicht wie die klassische Physik das deterministische Verhalten eines einzelnen Teilchens, sondern das statistische Verhalten einer Gesamtheit von Objekten.
- Eine Gesamtheit quantenphysikalischer Objekte wird durch eine Wellenfunktion $\Psi(x, t)$ beschrieben. Die Wellenfunktion dient zur Beschreibung von Wahrscheinlichkeiten, hat aber keine anschauliche Bedeutung.
- Das Quadrat des Betrags der Wellenfunktion $|\Psi(x, t)|^2$ stellt eine Wahrscheinlichkeitsdichte dar. Der Ausdruck $|\Psi(x, t)|^2 \cdot \Delta x$ beschreibt die Wahrscheinlichkeit, zum Zeitpunkt t ein Quantenobjekt aus dem Ensemble in einem Bereich Δx um den Ort x herum zu finden (Aufenthaltswahrscheinlichkeit).

Das **statistische Verhalten** einer großen Anzahl von Quantenobjekten wie Elektronen oder Photonen zeigt sich z. B. bei einer genaueren Analyse des Doppelspaltexperiments (vgl. Kap. 5.5, S. 59): Verringert man die Strahlungsintensität so weit, dass am Schirm im Mittel pro Zeiteinheit nur ein Treffer registriert wird, ist dort zunächst nur ein zufälliges, scheinbar regelloses Punktmuster zu erkennen; nach und nach bil-



© **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