

## 7

## Quantenphysik

Die Aufgaben dieses Kapitels beschäftigen sich mit den faszinierenden Quantenobjekten und deren besonderem Verhalten. Den Experimenten zum Nachweis deren Wellen- und Teilcheneigenschaften kommt hier eine zentrale Bedeutung zu. Die Vorgänge beim Photo- und COMPTON-Effekt sollten Sie besonders gut verstehen und auch berechnen können, da sie essentielle Grundlagen für das Verständnis des Atomaufbaus liefern.

## Wissen

Berücksichtigen Sie bei Ihrer Vorbereitung die folgenden Themen:

- ⊕ Die Energie elektromagnetischer Strahlung der Frequenz  $f$  liegt in Quanten (Photonen) der Größe  $W = h \cdot f$  vor und wird auch so übertragen. Die PLANCK-Konstante  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Js ist eine Naturkonstante und lässt sich insbesondere aus Experimenten zum Photoeffekt oder zum Röntgenspektrum bestimmen.
- ⊕ Beim Photoeffekt setzen Photonen Metallelektronen frei, falls die Photonenenergie  $h \cdot f$  die metallspezifische Ablösearbeit  $W_A$  erreicht  $\left(f \geq f_{gr} = \frac{W_A}{h}\right)$ . Die Energiedifferenz  $W(f) = h \cdot f - W_A$  bildet die Obergrenze für die kinetische Energie der freigesetzten Elektronen. Es gilt  $h = \frac{\Delta W}{\Delta f}$ .
- ⊕ Mit der Spannung  $U$  beschleunigte Elektronen werden in einer Metallanode abgebremst und erzeugen dabei Röntgenstrahlung. Der minimale Glanzwinkel  $\alpha_{min}$  der BRAGG-Reflexion führt auf die kürzeste Wellenlänge  $\lambda_{min} = 2 \frac{d}{n} \cdot \sin(\alpha_{min})$ , bzw. die maximale Frequenz  $f_{max} = \frac{c}{\lambda_{min}}$  des Spektrums, und es gilt  $h = \frac{e \cdot U}{f_{max}}$ .
- ⊕ Die EINSTEIN'sche Gleichung  $W = m \cdot c^2$  liefert für ein Photon die Masse  $m = \frac{h}{c^2} \cdot f$  und den Impuls  $p = \frac{h}{\lambda}$ . Hiermit kann man z. B. den COMPTON-Effekt  $\left(\Delta\lambda = \lambda_C \cdot (1 - \cos(\varphi))\right)$  mit  $\lambda_C = \frac{h}{m_e c} = 2,4 \text{ pm}$  und die Paarbildung beschreiben.
- ⊕ Fasst man bewegte Elektronen als Materiewellen mit der DE-BROGLIE-Wellenlänge  $\lambda = \frac{h}{p}$  auf, so lassen sich hiermit die Doppelspalt-Interferenzen (JÖNSSON), sowie die Beugungsringe (DAVISSON, GERMER) beschreiben.
- ⊕ Doppelspaltexperimente führen für die Quantenobjekte „Photonen“ (Young) und „Elektronen“ (JÖNSSON) gleichermaßen auf die Dualismusproblematik (Welle oder Teilchen?). Der Kopenhagener Deutung (BOHR, HEISENBERG 1927) folgend, dürfen die Modellvorstellungen „Welle“, bzw. „Teilchen“, nur hinsichtlich ihrer formalen Implikationen, z. B. der Auswertung von Messwerten, nicht aber bezüglich der Beschreibung realer Objekte und Sachverhalte als relevant angesehen werden.
- ⊕ Die HEISENBERG'sche Unschärferelation  $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h$  drückt die prinzipielle Unmöglichkeit aus, Ort und Impuls von Quantenobjekten gleichzeitig beliebig genau zu bestimmen. Daher lassen sich auch ihre Bewegungen nicht klassisch-deterministisch beschreiben. Auch andere Paare korrespondierender Messgrößen erfüllen die Unschärferelation, z. B. Energie und Zeit:  $\Delta W \cdot \Delta t \geq h$ .

## 7.1 Aufgaben zur mündlichen Prüfung

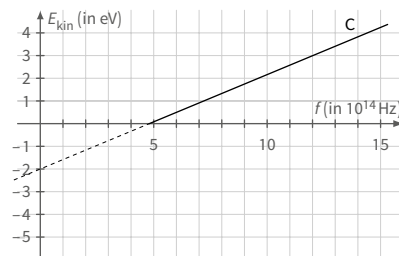
### 1. Photoeffekt und seine Umkehrung

- Erklären Sie, was man unter dem Photoeffekt versteht.
- Begründen Sie, ob sich beim HALLWACHS-Experiment die Zinkplatte auch entlädt, wenn sich zwischen UV-Lichtquelle und Zinkplatte eine Glasscheibe befindet.
- Platin emittiert und absorbiert Strahlung der Wellenlänge  $\lambda = 231,5 \text{ nm}$ . Berechnen Sie die Energie der zugehörigen Photonen in eV. Geben Sie an, aus welchem Grund ein Mensch diese absorbierte Strahlung nicht bemerkt.

### 2. Gegenfeldmethode

- Das Gegenspannungsexperiment wird mit verschiedenen Photozellen, deren Kathoden mit unterschiedlichen Metallen beschichtet sind, durchgeführt. Erläutern Sie, wie sich die zugehörigen  $W(f)$ -Kurven unterscheiden.
- Geben Sie die Steigung einer bestimmten Geraden  $W(f)$  des Gegenspannungsexperiments an und erklären Sie deren physikalische Bedeutung.

- Im nebenstehenden Frequenz-Energie-Diagramm sehen Sie Cäsium eingetragen. Lesen Sie aus dem Diagramm die zum Element gehörige Austrittsarbeit und die Grenzfrequenz ab. Geben Sie eine Funktionsgleichung für den Graphen mit den zugehörigen physikalischen Größen an und erläutern Sie seinen Verlauf.



- Tragen Sie anschließend den Graphen für das Element Silber in das Diagramm ein und geben Sie an, mithilfe welcher Größen Sie dies getan haben.
- Der Lichteinfall auf eine Photozelle kann durch das Verkleinern einer Ringblende verringert werden. Geben Sie an, wie sich diese Veränderung des Experiments auf die erforderliche Gegenspannung auswirkt und begründen Sie Ihre Antwort.

### 3. HEISENBERG'sche Unschärferelation

- Geben Sie die HEISENBERG'sche Unschärferelation an und erläutern Sie deren Bedeutung.
- Begründen Sie die Tatsache, dass die HEISENBERG'sche Unschärferelation das BOHR'sche Atommodell anzweifelt.

**4. Materiewellen**

- Zeigen Sie über eine Herleitung, wie DE BROGLIE dazu kam, Elektronen die Wellenlänge  $\lambda = \frac{h}{p}$  zuzuschreiben.
- Geben Sie experimentelle Befunde an, die die von DE BROGLIE postulierte Wellennatur von Elektronen belegen.
- Elektronen durchlaufen eine Spannung von 10V und treffen dann auf einen Spalt der Breite  $\Delta x = 0,5 \cdot 10^{-4}$  m. In einem Abstand  $e = 12$  cm ist parallel zum Spalt eine Fotoplatte aufgestellt.
  - Bestimmen Sie die DE-BROGLIE-Wellenlänge und erläutern Sie, welche Bedeutung sie in dem Experiment hat.
  - Begründen Sie, was auf der Fotoplatte zu sehen sein wird.

**5. Lichtelektrischer Effekt und COMPTON-Effekt**

- Berechnen Sie, unter welchen Bedingungen beim COMPTON-Effekt eine größtmögliche Wellenlängenänderung der eintretenden Strahlung auftritt.
- Ein Strahlungsquant, das eine Wellenlänge von  $10^{-10}$  m hat, tritt mit einem freien Elektron in Wechselwirkung und wird dabei um einen Winkel von  $90^\circ$  abgelenkt. Ermitteln Sie die Wellenlänge des gestreuten Strahlungsquants. Berechnen Sie auch, wie groß die Energie ist, die infolge des COMPTON-Effekts dabei auf das Elektron übertragen wird.

**6. Röntgenröhre**

Erläutern Sie, wie sich aus dem Spektrum einer Röntgenröhre die PLANCK-Konstante bestimmen lässt.

**7. Polarisation**

Zwei Polarisationsfilter sind um  $90^\circ$  gegeneinander gedreht und lassen kein Licht hindurch.

Geben Sie an, wie sich der Lichtdurchgang verändert, wenn zwischen die beiden Filter ein dritter gesetzt wird, der gegenüber den beiden anderen um je  $45^\circ$  gedreht ist.

Begründen Sie Ihre Antwort mittels der Quantenvorstellung.

**8. Fotozelle und Kondensator**

Eine Cäsiumfotozelle (Austrittsarbeit  $W_A = 1,94$  eV) wird zum Laden eines Kondensators mit der Kapazität  $C = 80$  nF benutzt. Bei der Bestrahlung der Zelle mit rotem Licht der Wellenlänge  $\lambda = 723$  nm findet keine Kondensatoraufladung statt. Wenn man die Fotokathode aber mit blauem Licht der Wellenlänge  $\lambda = 480$  nm beleuchtet, wird der Kondensator geladen.

- Erklären Sie dieses Verhalten des Kondensators.

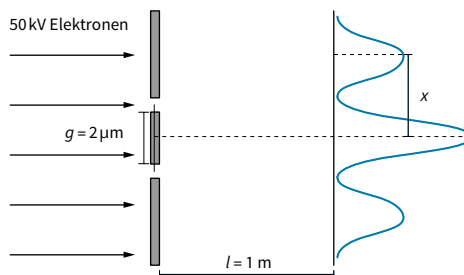
Für die folgenden Versuche wird blaues Licht der Wellenlänge  $\lambda = 480 \text{ nm}$  verwendet.

- Berechnen Sie die maximal mögliche Ladung des Kondensators und die zugehörige Kondensatorspannung.
- Die Spannung am Kondensator ändert sich allmählich mit jedem Photoelektron. Erläutern Sie, wie der zeitliche Verlauf der Kondensatorspannung bei der Aufladung von der Frequenz und der Intensität des Lichtes abhängt.

### 9. Elektronenbeugung am Doppelspalt

C. JÖNSSON führte 1961 das abgebildete Doppelspaltexperiment mit Elektronen durch.

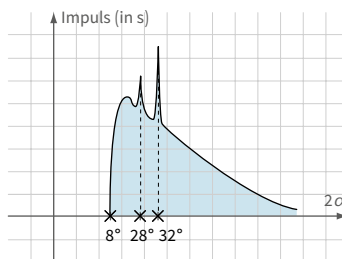
- Berechnen Sie, welchen Abstand  $x$  das erste Nebenmaximum vom Hauptmaximum besitzt. Erklären Sie kurz, wie sich die Interferenzfigur verändert, wenn nur einzelne Elektronen nacheinander auftreffen.



- Nehmen Sie an, dass die Elektronen vorwiegend im Bereich zwischen den beiden Nebenmaxima erster Ordnung auf dem Schirm auftreffen. Zeigen Sie, dass die HEISENBERG'sche Unschärferelation erfüllt wird und schätzen Sie die Impulsunschärfe ab.

### 10. Die PLANCK'sche Konstante $h$

- Die Strahlung einer mit 31,6 kV betriebenen Röntgenröhre führt bei BRAGG-Reflexion an einem NaCl-Kristall ( $d = 282 \text{ pm}$ ) auf das abgebildete Röntgenspektrum. Bestimmen Sie aus dem Diagramm die PLANCK'sche Konstante  $h$  (Literaturwert:  $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ ). Deuten Sie auch die beiden Peaks (Spitzen) des Spektrums.



- Erläutern Sie kurz eine andere Messmethode zur Bestimmung der PLANCK'schen Konstanten  $h$ .
- Erläutern Sie die Bedeutung der PLANCK'schen Konstanten  $h$  für die Quantenphysik (2 Aspekte).