

# Elemente der Quantenphysik

Oberstufe (grundlegend, weiterführend)

Erwin Kunesch

Hinweise	2
M1 Der Photoeffekt	4
M2 Photonen	6
M3 Der Compton-Effekt	8
M4 Materiewellen	9
M5 Interferenz	10
M6 Spektren	11
M7 Der Franck-Hertz-Versuch	13
M8 Das Atommodell von Bohr	14
M9 Kaleidoskop – Testen Sie Ihr Wissen	17
Lösungen	19

© RAABE 2024

## Erklärung zu den Symbolen



einfaches Niveau



mittleres Niveau



schwieriges Niveau



Zusatzaufgaben



Internetrecherche



Taschenrechner

## Die Schülerinnen und Schüler lernen:

die Eigenschaften und „neuartigen Teilchen“, die Lichtquanten oder Photonen zuerst anhand einschlägiger Experimente und anschließend anhand theoretischer und rechnerischer Überlegungen kennen. Der Stoß von Photonen mit nahezu freien Elektronen wird bei der Behandlung des Compton-Effekts weiter vertieft. Die unterschiedlichen Betrachtungen von Elektronen und Photonen als Teilchen bzw. als Wellen führen dann auch auf Überlegungen hinsichtlich der Interferenz dieser Wellen. Die damit verbundene Entstehung von Spektren unterschiedlicher Art zeigen auch die Vorgänge beim Franck-Hertz-Versuch, bei dem die bisherigen Erkenntnisse bestätigt werden. Anschließend wird noch das Atommodell von Bohr unter die Lupe genommen, bevor ein abschließendes Kaleidoskop zusammenfassend die grundlegenden Themen dieser Materialien berührt.

### Überblick:

Legende der Abkürzungen:

**AB** Arbeitsblatt

**LEK** Lernerfolgskontrolle

**FS** Formelsammlung

Thema	Material	Methode
Der Photoeffekt	M1	AB
Photonen	M2	AB
Der Compton-Effekt	M3	AB, FS
Materiewellen	M4	AB
Interferenz	M5	AB
Spektren	M6	AB
Der Franck-Hertz-Versuch	M7	AB
Das Atommodell von Bohr	M8	AB
Kaleidoskop – Testen Sie Ihr Wissen	M9	AB, FS, LEK

## Hinweise

### Lernvoraussetzungen

Die Lernenden haben bereits Kenntnisse über den Aufbau von Atomen und über die klassischen Atommodelle sowie die daraus resultierenden Widersprüche. Aus der Strahlenoptik sind Ihnen bereits die Grundlagen hinsichtlich der Wellenoptik und den damit verbundenen Erkenntnissen der Interferenz von Lichtstrahlen bekannt. Dabei werden auch geometrische Grundlagen in einfacher Form vorausgesetzt. Die Begriffe Energie, Frequenz und Wellenlänge sollten parat sein. Die Berechnung mit kleinsten Werten mithilfe des Taschenrechners (negative Exponenten) sollte keine Probleme aufwerfen.

### Methodisch-didaktische Anmerkungen

Mithilfe der Materialien **M1** und **M2** gelingt der Einstieg in die Theorie des Zusammenhangs zwischen Energie, Wellenlänge und Frequenz von Photonen und materiellen Teilchen. In beiden Themenbereichen nimmt der Begriff der Energiequanten eine zentrale Rolle ein. Die Inhalte der beiden Materialien sind themenübergreifend, wobei in **M1** der Photoeffekt im Vordergrund steht, während in **M2** die Energie von Lichtquanten die Aufgabenstellung dominiert. Im Material **M3** kommt es zur Interaktion zwischen einem quasifreien Teilchen Elektron und einem Energiequant bei der Beschreibung des Compton-Effekts. Da die Behandlung des Compton-Effekts in den Lehrplänen mancher Bundesländer nicht mehr aufgeführt ist, bietet sich diese Thematik als weiterführende Behandlung zur Vertiefung in einem oder mehreren Referaten an. **M4** hat ausschließlich die Wellenlängeigenschaften als De-Broglie-Wellen zum Inhalt, was dann im Material **M5** zu daraus resultierenden Interferenzen führt. Eine Weiterentwicklung dieser Betrachtungen ergibt dann im Material **M6** die Beschäftigung mit Spektren, speziell mit Linienspektren. Insbesondere werden die Vorgänge und Erkenntnisse speziell beim Franck-Hertz-Versuch mit Material **M7** behandelt. Die daraus gewonnenen Überlegungen führen tiefer gehend in **M8** auf das Atommodell von Bohr, auf das auch rechnerisch ausführlicher eingegangen wird. Zum Schluss folgt in einem kleinen Kaleidoskop mit **M9** ein Überblick über die besprochenen Themen.

Das Konzept der vorliegenden Materialien sieht vor, dass die einzelnen Aufgabengruppen **M1** bis **M8** aufeinanderfolgend bearbeitet werden können. Andererseits lassen sich alle Materialien je nach Unterrichtsstand auch unabhängig voneinander einsetzen.

### Zusatzmaterialien

Sie finden alle Abbildungen und Grafiken auch zum Download.



## M1 Der Photoeffekt

1. Eine frisch geschmirgelte Zinkplatte wird mit einem Elektroskop verbunden. Sie wird zuerst positiv geladen und dann einmal mit Glühlicht und einmal mit dem Licht einer Quecksilberdampf Lampe (Hg-Lampe) beleuchtet. In einem weiteren Versuch wird die Platte negativ geladen und der Reihe nach ebenfalls mit diesen beiden Lichtquellen bestrahlt.
  - a) **Fertigen** Sie eine beschriftete Skizze des Versuchsaufbaus an.
  - b) **Beschreiben** Sie die möglichen Beobachtungen bei
    - (i) positiver Ladung – Glühlicht,
    - (ii) negativer Ladung – Glühlicht,
    - (iii) negativer Ladung – Hg-Licht.
  - c) **Interpretieren** Sie die Beobachtungen.
  - d) **Erklären** Sie, welche Folgerungen daraus gezogen werden können.
  - e) Eine negativ geladene Zinkplatte wird einmal mit UV-Licht, ein anderes Mal mit Infrarotlicht bestrahlt. **Erklären** Sie, ob und ggf. welche Effekte auftreten können.
  
2. Die beim Photoeffekt aus einer Zinkplatte herausgelösten Elektronen ergeben einen Photostrom, der gemessen werden kann.
  - a) **Fertigen** Sie eine beschriftete Skizze des Versuchsaufbaus zur Messung des Photostroms an.
  - b) **Erklären** Sie die bei Durchführung des Versuchs auftretenden Beobachtungen hinsichtlich
    - (i) der Zeitspanne bis Einsetzen des Photostroms,
    - (ii) unterschiedlicher Wellenlängen bzw. Frequenzen des eingestrahlt Lichts.
  - c) Bei Pflasterarbeiten sollen Steine aus einem bereits vorhandenen Pflaster herausgeschlagen werden. Ein Kind versucht eine halbe Stunde mit seinem Hämmchen, einen Stein herauszuschlagen, doch ohne Erfolg. Ein Bauarbeiter beobachtet dies und schlägt nun seinerseits kräftig mit seinem Hammer auf den Stein, worauf dieser sich sofort aus seiner Verankerung löst.  
**Stellen** Sie anhand dieses Beispiels eine gedankliche Verbindung zu den Erscheinungen beim Photoeffekt **her**.
  - d) **Ziehen** Sie aus den Ergebnissen dieses Versuchs und den angestellten Überlegungen eine Folgerung.

## Der Franck-Hertz-Versuch

M7

- Fertigen** Sie eine Skizze des Aufbaus des Franck-Hertz-Versuchs **an**. Verwenden Sie bei der Beschriftung die Begriffe Heizspannung, Kathode, Anodengitter, Quecksilberdampf, Elektronenstrahl, Auffängerelektrode, Beschleunigungsspannung, Gegenspannung, Messverstärker bzw. I. Achten Sie dabei auch auf die richtige Polung der Spannungsquellen. 
  - Beschreiben** Sie die Durchführung des Versuches. Erläutern Sie die Beobachtung, die sich bei Erhöhung der Beschleunigungsspannung feststellen lässt, und fertigen Sie eine ungefähre Skizze des bei I zu messenden Stromverlaufs in Abhängigkeit von der Beschleunigungsspannung.
  - Interpretieren** Sie diese Beobachtung.
  - Berechnen** Sie die Wellenlänge der Anregungsenergie, die für Höherstufung eines Quecksilberatoms nötig ist.
- Füllt man ein geeignetes Franck-Hertz-Rohr mit Argon, so findet man außer einer Reihe von Maxima, deren Abstand 10,5 V beträgt, eine weitere Reihe mit dem Abstand 12,8 V.

  - Überlegen** Sie, weshalb hier drei Linien des Argon-Spektrums zu erwarten sind.
  - Berechnen** Sie die zugehörigen Wellenlängen.
  - Erstellen** Sie **graphisch** ein (nicht maßstabsgetreues) Schema, das sämtliche möglichen Übergänge zwischen zwei Quantenbahnen in Abhängigkeit von den gegebenen Wellenlängen darstellt.
  - Stellen Sie fest**, ob ein Aufleuchten des Gases zu erwarten ist.
  - Berechnen** Sie die Energien, die bei den oben angeführten Übergängen abgegeben werden.
  - Überlegen** Sie, welche Energiebeträge von den Argon-Atomen absorbiert werden, wenn man das Gas einmal mit Elektronen der Energie 13 eV und einmal mit Photonen der gleichen Energie bestrahlt. 
- Helium besitzt eine Ionisierungsenergie von 24,5 eV. In einem Franck-Hertz-Rohr befindet sich Heliumgas, das mit Elektronen der Energie 40,0 eV beschossen wird. Sieht man von Mehrfachstößen ab, so erhält man aus dem Heliumgas austretende Elektronen mit den Energien 40,0 eV, 18,8 eV, 17,2 eV und 15,5 eV.

  - Erklären** Sie, wie diese Energien zustande kommen.
  - Ermitteln** Sie die Anregungsenergien und die ihnen zugeordneten Wellenlängen.
  - Die Heliumatome werden nun mit Photonen der Energie 23,5 eV beschossen. **Überlegen** Sie, welche Restenergien zu erwarten sind. **Begründen** Sie Ihre Antwort.

$$\lambda_c = \frac{h}{m_0 \cdot c} = \frac{6,6261 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{9,1094 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 3,00 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 2,43 \cdot 10^{-12} \text{ m}$$

$$\cos \vartheta = 1 - \frac{h \cdot c}{\lambda_c} \cdot \left( \frac{1}{E'} - \frac{1}{E} \right)$$

$$\cos \vartheta = 1 - \frac{6,6261 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3,00 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2,43 \cdot 10^{-12} \text{ m}} \cdot \left( \frac{1}{3,50} - \frac{1}{8,20} \right) \cdot \frac{1}{10^{-14} \text{ J}}$$

$$\cos \vartheta = -0,33964 \Rightarrow \vartheta = 109,855^\circ \approx 110^\circ$$

### Lösungen (M4)

1. a) Die gegebene Geschwindigkeit  $1,2 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  ist kleiner als 10 % der Lichtgeschwindigkeit, also kleiner als  $3,0 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ .  
Somit ist keine relativistische Rechnung erforderlich.

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v} = \frac{6,6261 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{6,6446616 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot 1,2 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 8,31005 \cdot 10^{-15} \text{ m} \approx 8,3 \cdot 10^{-15} \text{ m}$$

- b) Da die vorgegebene Geschwindigkeit  $3,5 \cdot 10^7$  größer ist als 10 % der Lichtgeschwindigkeit, also größer als  $3,0 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ , müssen wir hier die relativistische Massenveränderung beachten.

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{6,6446616 \cdot 10^{-27} \text{ kg}}{\sqrt{1 - \frac{\left(3,5 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{\left(3,0 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}}} = 6,69034914 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v} = \frac{6,6261 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{6,69034914 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot 3,5 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 2,8297 \cdot 10^{-15} \text{ m} \approx 2,8 \cdot 10^{-15} \text{ m}$$

2. Die Geschwindigkeit des Sportlers betrug  $v = \frac{100 \text{ m}}{9,58 \text{ s}} = 10,438 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v} = \frac{6,6261 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{95 \text{ kg} \cdot 10,438 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 6,68216 \cdot 10^{-37} \text{ m} \approx 6,7 \cdot 10^{-37} \text{ m}$$