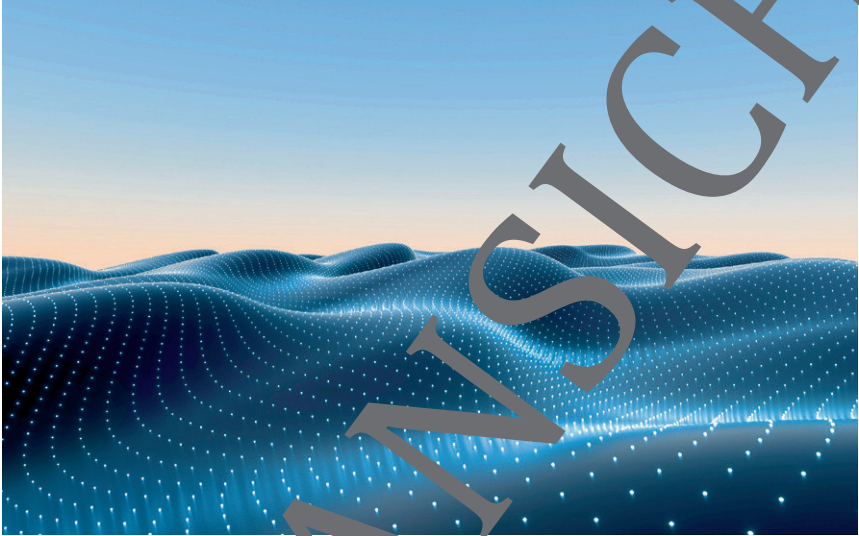


Elemente der Quantenphysik

Erwin Kunesch



© Jason marz/Moment

Immer häufiger rücken Unzulänglichkeiten und Widersprüche zur Theorie der klassischen Atommodelle in das Bewusstsein der öffentlichen Diskussion. In populärwissenschaftlichen Medien werden diese Widersprüche häufig nur angeschnitten und ihre Konsequenz für die Physik nicht vollständig aufgeklärt. Mit diesen Materialien lernt Ihre Klasse einige wesentliche Versuche kennen, um Nachweise von Quantenphänomenen kennen. Ihre Lernenden können damit ihr Verständnis vom Aufbau von Materie, insbesondere dem Atommodell und dem Welle-Teilchen-Dualismus, erweitern und erhalten einen Einblick in wesentliche Errungenschaften der Physik des letzten Jahrhunderts.

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

Erklärung zu den Symbolen



einfaches Niveau



mittleres Niveau



schwieriges Niveau



Zusatzaufgaben



Internetrecherche



Taschenrechner

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 Welleneigenschaften 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 tiefergehend 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 Unterrichtsstund auch unabhängig voneinander einsetzen.

Zusatzmaterialien

Sie können 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 Quecksilberdampflampe (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 herausgelassenen 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 Handwerker versucht eine halbe Stunde mit seinem Hammer, einen Stein herauszuschlagen, doch ohne Erfolg. Ein Bauarbeiter beobachtet dies und schlägt nun seinerseits kräftig mit seinem Hammer auf den Stein. Darauf dieses Stein sofort aus seiner Verankerung löst. **Stellen** Sie anhand dieses Beispiels eine gedankliche Verbindung zu den Erscheinungen beim Photoeffekt her.
 - d) **Verknüpfen** Sie aus den Ergebnissen dieses Versuchs und den angestellten Überlegungen eine Folgerung.

3. Zur Messung der maximalen kinetischen Energie ausgelöster Photoelektronen verwendet man die Gegenfeldmethode.
- Erstellen** Sie eine beschriftete Skizze des Versuchsaufbaus.
 - Beschreiben** Sie die Durchführung des Versuches.
4. Bei den in den Aufgaben 1 bis 3 durchgeführten Versuchen ergeben sich folgende Beobachtungen:
- Die maximale kinetische Energie ist umso größer, je kleiner die Wellenlänge λ (bzw. je größer die Frequenz f) des eingestrahlenen Lichts ist.
 - Die maximale kinetische Energie ist unabhängig von der Bestrahlungsstärke.
 - Unterhalb einer bestimmten Frequenz (oberhalb einer bestimmten Wellenlänge) werden keine Photoelektronen ausgelöst.
 - Der Photoeffekt setzt sofort ein.
- Zeigen** Sie in jedem der aufgeführten Punkte den Widerspruch zur Wellentheorie **auf** und **geben** Sie die Auflösung der Widersprüche durch Einstein an.
5. Bei der Durchführung der Gegenfeldmethode lässt ein Filter nur blaues Licht durch, das eine Cäsium-Kathode bestrahlt. Um ein Elektron ab der Cäsium-Kathode auszulösen, ist eine Energie von $1,94 \text{ eV}$ nötig. Die Messung ergibt eine Gegenspannung von $1,44 \text{ V}$.
- Berechnen** Sie die Energie eines auftreffenden Lichtquants.
 - Ermitteln** Sie die maximale Austrittsgeschwindigkeit der Photoelektronen.
6. Eine Natrium-Photozelle wird von einer Leuchtbirne mit der Aufschrift 20 W beleuchtet. Dabei werden 4% der aufgenommenen Energie in Licht umgesetzt. Die Entfernung zwischen Photozelle und Leuchtbirne misst $1,0 \text{ m}$. Der Durchmesser eines Na-Atoms beträgt $3,7 \cdot 10^{-10} \text{ m}$.
- Berechnen** Sie die Leistung des Lichtes auf ein Flächenelement im Abstand von 1 m .
 - Berechnen** Sie den Anteil der Lichtleistung, der auf ein Atom auftrifft.
 - Schätzen** Sie unter diesen Annahmen durch Rechnung die Zeit **ab**, die vom Beginn der Beleuchtung der Na-Photozelle vergeht, bis nach den Vorstellungen der Wellentheorie der Photoeffekt einsetzen sollte.
 - Formulieren** Sie den Widerspruch zum experimentellen Ergebnis.
 - Entscheiden** Sie, wie sich das experimentelle Ergebnis ändern würde, wenn man die langwelligste Spektrallinie einer Helium-Lampe verwenden würde.



M2 Photonen

- Berechnen** Sie die Photonenenergie blauen Lichtes mit einer Wellenlänge von 450 nm in Joule und in eV.
- Bestimmen** Sie die maximale kinetische Energie von Photoelektronen, die durch ultraviolettes Licht der Wellenlänge 200 nm aus einer Kaliumoberfläche herausgeschlagen werden.
 - Die photoelektrische Grenzwellenlänge von Kalium beträgt 440 nm.
Geben Sie die nötige Gegenspannung an, um den Photostrom zu unterbinden.
- Berechnen** Sie die Wellenlänge eines Photons mit 0,5 eV Energie.
- Ermitteln** Sie die Geschwindigkeit, mit der die schnellsten Elektronen aus einer Metalloberfläche, deren Grenzwellenlänge 600 nm beträgt, emittiert werden, wenn die Oberfläche mit Licht der Wellenlänge 400 nm bestrahlt wird.
- Berechnen** Sie die Austrittsarbeit bei Natriummetall, wenn die Photoelektrische Grenzwellenlänge 680 nm beträgt.
- Durch ultraviolettes Licht der Wellenlänge 150 nm werden Elektronen mit einer maximalen kinetischen Energie von 3,00 eV aus einer Metalloberfläche herausgeschlagen. **Bestimmen** Sie
 - die Austrittsarbeit für das Metall.
 - die Grenzwellenlänge des Metalls.
 - die Gegenspannung, die erforderlich ist, um den Photostrom zu beenden.
- Bei einem Versuch zur Gegenstrommethode beim Photoeffekt wird mit einer Cäsium-Photozelle folgende Tabelle aufgenommen:
(λ ist die Wellenlänge des bestrahlenden Lichtes, U die Bremsspannung)

λ in nm	405	436	492	546	579
U in V	1,15	0,93	0,62	0,36	0,24

 - Ermitteln** Sie anhand einer Formelsammlung, welche Lampe verwendet wurde.
 - Stellen** Sie die kinetische Energie der Photonen in Abhängigkeit von der Frequenz des eingestrahlten Lichtes graphisch dar.
(10^{14} Hz \leftrightarrow 1 cm; 1 eV \leftrightarrow 2 cm)

Verlängern Sie die Linie bis zum Schnittpunkt mit der Ordinate (y -Achse).

- Bestimmen Sie aus der Zeichnung die Ablösearbeit von Cäsium.
- Berechnen Sie jeweils die Geschwindigkeit der schnellsten Elektronen.
- Ermitteln Sie rechnerisch den Wert der Planck'schen Konstanten.
- Die Ablösearbeit für Natrium beträgt 2,3 eV.

Beschreiben Sie, wie der Graph der lichtelektrischen Geraden in das Diagramm von Aufgabe b) einzutragen wäre.

8. Bei einem Versuch zum Photoeffekt ergaben sich folgende Messdaten:

Frequenz in 10^{14} Hz	5,98	6,71
Bremsspannung in V	0,223	0,525

- Bestimmen Sie die Art der bestrahlenden Lampe.
- Geben Sie jeweils die kinetische Energie der Photoelektronen bei Verwendung der beiden Wellenlängen an.
- Stellen Sie die kinetische Energie der Photonen in Abhängigkeit von der Frequenz des eingestrahlten Lichtes graphisch dar.
(10^{14} Hz \leftrightarrow 1 nm; 1 eV \leftrightarrow 2 cm)
- Ermitteln Sie anhand geometrischer Überlegungen die Planck'sche Konstante.
- Bestimmen Sie anhand der graphischen Darstellung die Austrittsarbeit sowie mithilfe einer Formelsammlung das verwendete Kathodenmaterial.
Geben Sie die Auswirkung an, die kinetische Energie der Photoelektronen an.
- Die Lichtintensität (Bestrahlungsstärke) wird mit dieser Wellenlänge ($\lambda = 588$ nm) verdoppelt. Beschreiben Sie die Auswirkung hinsichtlich des Photoeffekts.

9. Betrachten Sie ein Lichtquant mit Wellenlänge $\lambda = 200$ nm.

- Berechnen Sie die Energie dieses Lichtquants in J und eV.
- Berechnen Sie die Masse dieses Lichtquants.
- Berechnen Sie den Impuls dieses Lichtquants.

10. Ein Lichtquant auf der Sonnenoberfläche weist einen Impuls von $1,10 \cdot 10^{-27} \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$ auf.

Berechnen Sie

- seine Masse.
- die Kraft, mit der es vom Mittelpunkt der Sonne angezogen wird.

M3 Der Compton-Effekt



- Arthur Holly Compton verwendete bei seinen Streuversuchen Röntgenstrahlung der Wellenlänge $\lambda = 71,26 \text{ pm} = 71,26 \cdot 10^{-12} \text{ m}$. Die nach einer Streuung an einem freien Elektron auftretende Röntgenstrahlung fand unter dem Streuwinkel ϑ statt. (Die Compton-Wellenlänge λ_c beträgt 243 pm)
 - Berechnen** Sie die Änderung der Wellenlänge für $\vartheta = 76,5^\circ, 90,0^\circ$ und $123,0^\circ$.
 - Wir betrachten das Compton-Photon bei einem Streuwinkel von $\vartheta = 90^\circ$.
Berechnen Sie
 - seine Energie.
 - seinen Impulsbetrag.
 - Ermitteln** Sie den Winkel, um den das Rückstoßelektron gestreut wird.
Erläutern Sie Ihre Vorgehensweise anhand einer Skizze.
 - Berechnen** Sie die Energie, die das Elektron aufnimmt.
 - Ermitteln** Sie den Impuls des Elektrons nach dem Stoß.
 - Berechnen** Sie die Geschwindigkeit, mit der das Rückstoßelektron wegfliegt.

- Bei einem Versuch zum Compton-Effekt besitzt die Primärstrahlung eine Quantenenergie von 0,511 MeV. Wir betrachten diejenige Streustrahlung, deren (Compton-) Photonen eine Energie von 0,221 MeV besitzen.

Berechnen Sie

- den Photonenimpuls p vor dem Stoß mit dem Elektron,
- den Photonenimpuls p' nach dem Stoß mit dem Elektron,
- die Masse m des Compton-Elektrons,
- den Streuwinkel ϑ .

- Bei einem Versuch zum Compton-Effekt vermindert sich die Quantenenergie der Primärstrahlung von $8,70 \cdot 10^{-14} \text{ J}$ auf $4,70 \cdot 10^{-14} \text{ J}$.

Berechnen Sie

- den Photonenimpuls p vor dem Stoß mit dem Elektron,
- den Photonenimpuls p' nach dem Stoß mit dem Elektron,
- die Masse m des Compton-Elektrons,
- den Impuls des Compton-Elektrons,
- den Streuwinkel ϑ .

Materiewellen

M4

1. a) **Ermitteln** Sie die De-Broglie-Wellenlänge eines Alpha-Teilchens, das sich mit einer Geschwindigkeit von $1,2 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ bewegt.
 b) **Berechnen** Sie die De-Broglie-Wellenlänge dieses Teilchens, wenn die Geschwindigkeit $3,5 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ beträgt.
2. Der ehemalige jamaikanische Sprinter Usain Bolt brachte 75 kg auf die Waage und stellte im Jahre 2009 den Weltrekord im 100-m-Lauf in 9,58 s auf.
Berechnen Sie seine De-Broglie-Wellenlänge.
3. Ein Elektron bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von $1,5 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.
Zeigen Sie durch Rechnung, dass eine relativistische Betrachtung für die De-Broglie-Wellenlänge vernachlässigbar ist.
4. Ein Proton wird aus dem Ruhezustand durch eine Spannung von 1,0 kV beschleunigt.
 a) **Ermitteln** Sie rechnerisch, ob eine relativistische Rechnung erforderlich ist.
 b) **Berechnen** Sie die Frequenz der Materiewellen.
 c) **Berechnen** Sie die De-Broglie-Wellenlänge des Protons.
5. **Berechnen** Sie die Beschleunigungsspannung, die
 a) ein Proton,
 b) ein Alphateilchen aus dem Ruhezustand durchläuft, wenn es die De-Broglie-Wellenlänge von $7,5 \cdot 10^{-11} \text{ m}$ aufweist.
6. Ein Elektron hat die De-Broglie-Wellenlänge $2,0 \cdot 10^{-8} \text{ cm}$.
Berechnen Sie
 a) seine Geschwindigkeit.
 b) seine kinetische Energie.
 c) einen Impuls, den es durchlaufen hat.
 d) die Beschleunigungsspannung, die es durchlaufen hat.
 (i) nach Methoden der klassischen Physik.
 (ii) mithilfe der Quantenphysik.

M5 Interferenz

1. a) **Beschreiben** und **erklären** Sie den Versuch zur Erzeugung von Teilchenstrahl-Interferenzen unter Zuhilfenahme der BRAGG-Beziehung.
 - b) **Leiten** Sie aus den Ausführungen der Aufgabe a) eine Formel für die Materiewellenlänge, die zur Entstehung des ersten Interferenzrings führt, in Abhängigkeit von den Daten der Glühkathode und dem Netzebenenabstand her.
 - c) **Leiten** Sie eine Formel für die Materiewellenlänge, die zur Entstehung des ersten Interferenzrings führt, falls der Netzebenenabstand nicht bekannt ist und die Elektronen mit der Spannung U beschleunigt werden.
 - d) **Berechnen** Sie die Materiewellenlänge der Wellenlänge für den ersten Interferenzring anhand der Methoden von Aufgabe b) und Aufgabe c), wobei der Netzebenenabstand d den Wert $2,13 \cdot 10^{-10}$ m und die Beschleunigungsspannung U den Wert 2,5 kV annimmt. Dabei gilt für den Bildschirmaufstand $L = 13,5$ cm und für den Radius $R = 1,6$ cm.
 - e) Aufgrund mangelnder Bestrahlungsstärke lässt sich nur das erste Interferenzmaximum für diese Werte mit dieser Röhre beobachten. Trotzdem lässt sich ein weiterer Interferenzring beobachten. **Erklären** Sie, worauf dieser zweite Interferenzring zurückzuführen ist.
 - f) Der zweite zu beobachtende Ring weist einen Durchmesser von 5,4 cm auf und lässt sich auf einen Netzebenenabstand von $1,23 \cdot 10^{-10}$ m zurückführen. **Berechnen** Sie mit der Methode, die Ihnen am geeignetsten erscheint, die zugehörige Wellenlänge.
 - g) **Begründen** Sie durch Rechnung, dass es sich bei dem zweiten Ring nicht um ein Maximum 2. Ordnung des unter d) betrachteten Netzebenenabstands handelt.
2. **Beschreiben** und **erklären** Sie den Versuch von Möllenstedt und Düker. Gehen Sie dabei auch auf den Nachweis ein, dass es sich ausschließlich um Elektronenstrahlen handelt. **Recherchieren** Sie nötigenfalls im Internet.

Mehr Materialien für Ihren Unterricht mit RAAbits Online

Unterricht abwechslungsreicher, aktueller sowie nach Lehrplan gestalten – und dabei Zeit sparen.
Fertig ausgearbeitet für über 20 verschiedene Fächer, von der Grundschule bis zum Abitur: Mit RAAbits Online stehen redaktionell geprüfte, hochwertige Materialien zur Verfügung, die sofort einsetz- und editierbar sind.

- ✓ Zugriff auf bis zu **400 Unterrichtseinheiten** pro Fach
- ✓ Didaktisch-methodisch und **fachlich geprüfte Unterrichtseinheiten**
- ✓ Materialien als **PDF oder Word** herunterladen und individuell anpassen
- ✓ Interaktive und multimediale Lerneinheiten
- ✓ Fortlaufend **neues Material** zu aktuellen Themen



Testen Sie RAAbits Online
14 Tage lang kostenlos!

www.raabits.de

