

Thema: Atommodelle

1. Aufgabe: Das Bohrsche Atommodell

Das Spektrum einer Wasserstoff-Gasentladung wird subjektiv durch ein Strichgitter mit 1000 Strichen auf 1,20 mm betrachtet.

- (1) Skizziere den Versuchsaufbau!
- (2) Leite begründet her: $\alpha = \arcsin\left(\frac{\lambda}{d}\right)!$
 [α : Winkel, unter dem eine Linie gesehen wird; λ : Wellenlänge der Linie;
 d : Abstand der Striche auf dem Gitter]
- (3) Bestimme den Winkelbereich, in dem alle Linien der BALMER-Serie im Spektrum 1.Ordnung zu finden sind!

Rydbergatome sind Mehrelektronenatome, bei denen das äußerste Elektron in ein sehr hohes Energieniveau angeregt ist. Im Weltraum gibt es solche Atome mit „riesigem“ Radius, bei denen sich dieses Elektron in einem Zustand mit der Quantenzahl $n = 350$ befinden kann, im Labor erreicht man etwa $n = 100$.

- (4) Begründe, warum solche hochangeregten Zustände des Elektrons die gleichen wie beim Wasserstoff-Atom sind!
- (5) Leite nach dem Bohrschen Atommodell die Aussagen für den Radius r_n der n -ten Quantenbahn und für die zugehörige Geschwindigkeit v_n begründet her!
 [Materialseite: Aussagen des Bohrschen Atommodells zum Wasserstoffatom]
- (6) Berechne die Entfernung des Elektrons eines Rydbergatoms vom Kernmittelpunkt, das auf der 350. Quantenbahn kreist!
- (7) Berechne die Ionisierungsenergie eines Rydbergatoms, dessen äußerstes Elektron auf die Quantenbahn $n = 29$ gehoben wurde!

Pionenatome sind in Laborversuchen erzeugte Atome, bei denen Elektronen durch Pionen ersetzt wurden. Ein Pion besitzt die selbe Ladung wie ein Elektron, aber dessen 273-fache Masse. Ersetzt man alle Elektronen durch ein einziges Pion, so entsteht ein Einpionensystem.

- (8) Modifiziere alle auf der Materialseite dargestellten Aussagen des Bohrschen Atommodells für ein Einpionensystem mit der Kernladung $Z \cdot e$!
 [Materialseite: Aussagen des Bohrschen Atommodells zum Wasserstoffatom]
- (9) Berechne den Radius der innersten Bahn eines Kupfer-Einpionensystems!
- (10) Berechne die von einem Kupfer-Einpionensystem absorbierte Energie, die zum Verlust des Pions führt!

2. Aufgabe: Das Ritzsche Kombinationsprinzip

- (1) Erläutere das Ritzsche Kombinationsprinzip! Fertige dazu eine geeignete Skizze an!
- (2) Zeichne in einem geeigneten Maßstab mit Hilfe der fünf bekannten Frequenzen des He^+ -Spektrums ein Ausschnitt des He^+ -Termschemas!
[Materialseite: Frequenzen]
- (3) Untersuche, ob in deinem Termschema weitere Frequenzen beobachtbar sein müssten, und gib diese gegebenenfalls an!

3. Aufgabe: Das Potenzialtopfmodell

Ein organisches Farbstoffmolekül kann vereinfacht mit dem Modell eines linearen Potenzialtopfes der Länge L beschrieben werden, dessen Energieniveaus mit der Gleichung $E_n = \frac{h^2}{8 \cdot m_e \cdot L^2} \cdot n^2$ berechnet werden können.

[h : Plancksche Konstante, m_e : Masse eines Elektrons].

- (1) Leite die obige Gleichung mit Hilfe einer Skizze begründet her!
- (2) Für die folgende Betrachtung sollen $L = 0,89 \text{ nm}$ und der Grundzustand zu Grunde gelegt werden.
Eine Lösung dieses Farbstoffes wird mit UV-Licht aus dem Wellenlängenbereich zwischen 170 nm und 200 nm beleuchtet. Bestimme die Wellenlängen derjenigen Photonen, die von der Lösung absorbiert werden können!

4. Aufgabe: Der Franck-Hertz-Versuch

- (1) Skizziere den typischen Aufbau des Franck-Hertz-Versuchs und erläutere die Funktion der einzelnen Komponenten!
- (2) Deute den Verlauf des dargestellten Messgraphen mit Hilfe der physikalischen Vorgänge in der Röhre!
[Materialseite: Messgraph zum Franck-Hertz-Versuch]
- (3) Diskutiere, ob sichtbare Erscheinungen in der Röhre zu erwarten sind!

5. Aufgabe: Quantenobjekte

„Sie sind weder Teilchen noch Welle“.

„Sie haben etwas Welliges, etwas Körniges und etwas Stochastisches.“

Erläutere diese Aussagen zu Quantenobjekten!

Material zur 1. Aufgabe

Aussagen des Bohrschen Atommodells zum Wasserstoffatom

- I. Radius der Quantenbahn:
$$r_n = \frac{\epsilon_0 \cdot h^2}{\pi \cdot e^2 \cdot m_e} \cdot n^2$$
- II. Elektronengeschwindigkeit auf der Quantenbahn:
$$v_n = \frac{e^2}{2 \cdot \epsilon_0 \cdot h} \cdot \frac{1}{n}$$
- III. Gesamtenergie des Elektrons auf der Quantenbahn:
$$E_n = - \frac{m_e \cdot e^4}{8 \cdot \epsilon_0^2 \cdot h^2} \cdot \frac{1}{n^2}$$
- ϵ_0 : elektrische Feldkonstante; h : Planck-Konstante; e : Elementarladung;
 m_e : Ruhmasse des Elektrons; n : Hauptquantenzahl (natürliche Zahl)

Material zur 2. Aufgabe

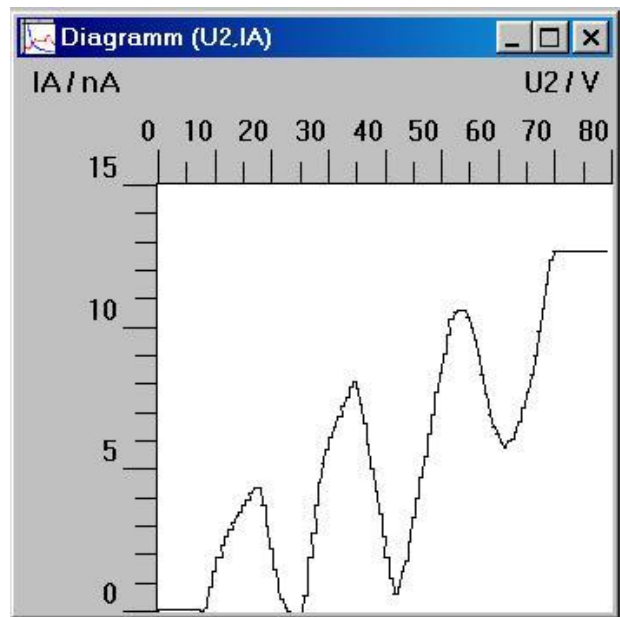
Frequenzen

Im Jahr 1929 hat *Paschen* das Spektrum von He^+ untersucht und fand u.a. folgende fünf Frequenzen:

$$f_1 = 1,2336 \cdot 10^{16} Hz; f_2 = 1,1696 \cdot 10^{16} Hz; f_3 = 0,9869 \cdot 10^{16} Hz; f_4 = 0,2467 \cdot 10^{16} Hz; f_5 = 0,0639 \cdot 10^{16} Hz$$

Material zur 4. Aufgabe

Messgraph zum Franck-Hertz-Versuch

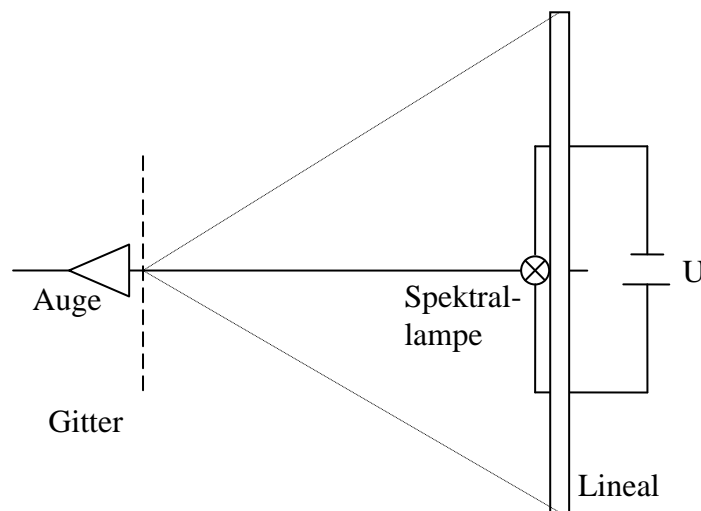


Lösungen

1. Aufgabe: Das Bohrsche Atommodell

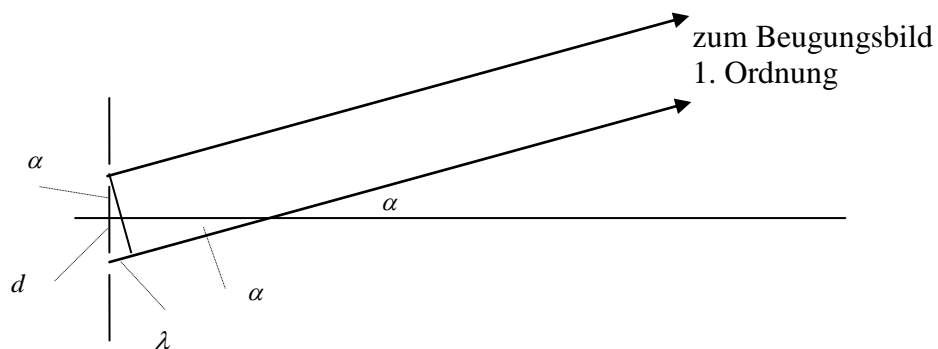
Das Spektrum einer Wasserstoff-Gasentladung wird subjektiv durch ein Strichgitter mit 1000 Strichen auf 1,20 mm betrachtet.

(1) Skizziere den Versuchsaufbau!



(2) Leite begründet her: $\alpha = \arcsin\left(\frac{\lambda}{d}\right)!$

[α : Winkel, unter dem eine Linie gesehen wird; λ : Wellenlänge der Linie;
 d : Abstand der Striche auf dem Gitter]



Da d klein im Vergleich zum Abstand Gitter-Lampe ist, verlaufen die Lichtstrahlen von der „beobachteten Linie“ parallel zum Auge (Fraunhofersche Betrachtung). Der Gangunterschied für konstruktive Interferenz ist $k \cdot \lambda$, wobei hier $k = 1$ sein soll. Vom oberen Strahl wird das Lot auf den unteren gefällt, um den Gangunterschied zu konstruieren. Die Strahlen verlaufen im Winkel α zur optischen Achse. Da die Winkelsumme in Dreiecken 180° beträgt und in der Skizze zwei rechtwinklige Dreiecke zu sehen sind, liegt α auch im kleinen Dreieck in der oberen Ecke vor. Es

gilt hier: $\sin(\alpha) = \frac{\lambda}{d} \Leftrightarrow \alpha = \arcsin\left(\frac{\lambda}{d}\right)$.

- (3) Bestimme den Winkelbereich, in dem alle Linien der BALMER-Serie im Spektrum 1. Ordnung zu finden sind!

Die Formel zur Bestimmung der emittierten Frequenzen lautet: $f_{m,n} = R \cdot \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right)$ mit

$R = 3,289841 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$ [FS S.69, 110]. In der Balmer-Serie sind $n = 2$; $m = 3, \dots, \infty$. Die kleinste Frequenz und damit die größte Wellenlänge gehören zu $n = 2$ und $m = 3$.

$$\lambda_{\max} = \frac{c}{f_{\min}} \approx 656,11 \text{ nm} . \text{ Mit } d = \frac{1,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{1000} \text{ folgt } \alpha_{\max} \approx 33,15^\circ .$$

Die größte Frequenz und damit die kleinste Wellenlänge gehören zu $n = 2$ und $m \rightarrow \infty$.

$$\lambda_{\min} = \frac{c}{f_{\max}} \approx 364,51 \text{ nm} . \text{ Mit } d = \frac{1,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{1000} \text{ folgt } \alpha_{\min} \approx 17,68^\circ . \text{ Die Balmer-Serie der 1. Ordnung ist im Winkelintervall von } \alpha_{\min} \approx 17,68^\circ \text{ bis } \alpha_{\max} \approx 33,15^\circ \text{ zu beobachten.}$$

Rydbergatome sind Mehrelektronenatome, bei denen das äußerste Elektron in ein sehr hohes Energieniveau angeregt ist. Im Weltraum gibt es solche Atome mit „riesigem“ Radius, bei denen sich dieses Elektron in einem Zustand mit der Quantenzahl $n = 350$ befinden kann, im Labor erreicht man etwa $n = 100$.

- (4) Begründe, warum solche hochangeregten Zustände des Elektrons die gleichen wie beim Wasserstoff-Atom sind!

Im Kern befinden sich Z Protonen, er ist also Z -fach positiv geladen. In der Hülle sind Z Elektronen, und damit ist das Atom elektrisch neutral. Bringt man ein Elektron auf eine Bahn mit sehr großem Radius, so schirmen aus Sicht dieses Elektrons ($Z-1$) Elektronen den Z -fach positiven Kern ab. Er erscheint dem weit entfernten Elektron also nur noch 1-fach positiv geladen. Dies ist die Situation wie beim H-Atom. Wechselt das entfernte Elektron auf benachbarte Energieniveaus, so sind die gleichen Absorptions- und Emissionslinien zu erwarten wie beim H-Atom.

- (5) Leite nach dem Bohrschen Atommodell die Aussagen für den Radius r_n der n -ten Quantenbahn und für die zugehörige Geschwindigkeit v_n begründet her!

[Materialseite: Aussagen des Bohrschen Atommodells zum Wasserstoffatom]

Auf der Bahn mit der Quantenzahl n lässt die Coulombkraft $F_{C,n} = \frac{e \cdot e}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r_n^2}$ als Zentralkraft

$F_{Z,n} = \frac{m_e \cdot v_n^2}{r_n}$ das Elektron um den Kern kreisen. Bohr postuliert zusätzlich, dass der Drehimpuls ein Vielfaches einer Konstanten ist: $L_n = m_e \cdot v_n \cdot r_n = n \cdot \frac{h}{2 \cdot \pi}$. Setzt man die Kräfte gleich und berücksichtigt das Postulat, so ergibt sich:

$$\frac{e \cdot e}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r_n^2} = \frac{m_e \cdot v_n^2}{r_n} \Leftrightarrow \frac{e^2}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} = \underbrace{m_e \cdot v_n \cdot r_n}_{=L_n} \cdot v_n = n \cdot \frac{h}{2 \cdot \pi} \cdot v_n \Rightarrow v_n = \frac{2 \cdot \pi \cdot e^2}{n \cdot h \cdot 4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0}$$

$$\Rightarrow v_n = \frac{e^2}{2 \cdot h \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{1}{n} \text{ . Für den Radius gilt damit: } \frac{e^2}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} = m_e \cdot v_n^2 \cdot r_n \Leftrightarrow r_n = \frac{e^2}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot m_e \cdot v_n^2}$$

$$r_n = \frac{e^2}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot m_e \cdot \left(\frac{e^2}{2 \cdot h \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{1}{n}\right)^2} = \frac{h^2 \cdot \epsilon_0}{e^2 \cdot \pi \cdot m_e} \cdot n^2 \text{ .}$$

- (6) Berechne die Entfernung des Elektrons eines Rydbergatoms vom Kernmittelpunkt, das auf der 350. Quantenbahn kreist!

$$n = 350 \Rightarrow r_{350} = \frac{h^2 \cdot \epsilon_0}{e^2 \cdot \pi \cdot m_e} \cdot 350^2 \approx 6,4824 \cdot 10^{-6} \text{ m .}$$

- (7) Berechne die Ionisierungsenergie eines Rydbergatoms, dessen äußerstes Elektron auf die Quantenbahn $n = 29$ gehoben wurde!

Um das Rydbergatom zu ionisieren, muss der Energiebetrag aufgebracht werden, der das

Elektron auf der 29. Bahn hält. $E_{29} = -\frac{m_e e^4}{8 \epsilon_0^2 h^2} \cdot \frac{1}{29^2} = -1,6178 \cdot 10^{-2} \text{ eV}$. Um dieses Elektron zu

entfernen, werden ca. $1,6178 \cdot 10^{-2} \text{ eV}$ benötigt.

Pionenatome sind in Laborversuchen erzeugte Atome, bei denen Elektronen durch Pionen ersetzt wurden. Ein Pion besitzt die selbe Ladung wie ein Elektron, aber dessen 273-fache Masse. Ersetzt man alle Elektronen durch ein einziges Pion, so entsteht ein Einpionensystem.

- (8) Modifiziere alle auf der Materialseite dargestellten Aussagen des Bohrschen Atommodells für ein Einpionensystem mit der Kernladung $Z \cdot e$!
[Materialseite: Aussagen des Bohrschen Atommodells zum Wasserstoffatom]

Für die Anpassung muss berücksichtigt werden: $Q_1 = Z \cdot e$; $Q_2 = e$; $m = 273 \cdot m_e$.

$$\Rightarrow r_n = \frac{\epsilon_0 \cdot h^2}{\pi \cdot Z \cdot e^2 \cdot 273 \cdot m_e} \cdot n^2 \text{ und } v_n = \frac{Z \cdot e^2}{2 \cdot \epsilon_0 \cdot h} \cdot \frac{1}{n} \text{ und } E_n = -\frac{273 \cdot m_e \cdot Z^2 \cdot e^4}{8 \cdot \epsilon_0^2 \cdot h^2} \cdot \frac{1}{n^2} \text{ .}$$

- (9) Berechne den Radius der innersten Bahn eines Kupfer-Einpionensystems!

$$\text{Es gilt: } n = 1 \text{ und } Z_{Cu} = 29 \text{ . } \Rightarrow r_1 = \frac{\epsilon_0 \cdot h^2}{\pi \cdot 29 \cdot e^2 \cdot 273 \cdot m_e} \cdot 1^2 \approx 6,6841 \cdot 10^{-15} \text{ m .}$$

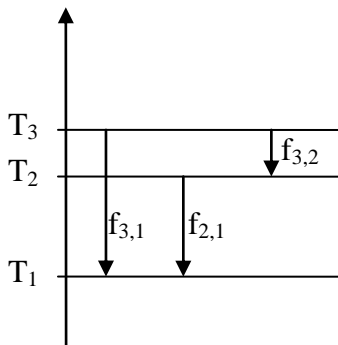
- (10) Berechne die von einem Kupfer-Einpionensystem absorbierte Energie, die zum Verlust des Pions führt!

Hierzu muss die Energie im Grundzustand berechnet werden. Sie muss für die Abtrennung des Pi-
ons kompensiert werden. $E_1 = -\frac{273 \cdot m_e \cdot 29^2 \cdot e^4}{8 \cdot \epsilon_0^2 \cdot h^2} \cdot \frac{1}{1^2} \approx -3,1238 \cdot 10^6 \text{ eV}.$

2. Aufgabe: Das Ritzsche Kombinationsprinzip

(1) Erläutere das Ritzsche Kombinationsprinzip! Fertige dazu eine geeignete Skizze an!

Die diskreten Zustände eines Atoms lassen sich durch so genannte Terme beschreiben. Wechselt das Atom von einem höheren Term(-Zustand) in einen niedrigeren, so muss diesem Energieverlust eine beobachtbare Wellenlänge (Frequenz, Linie) entsprechen. Alle beobachteten Wellenlängen (Frequenzen, Linien) müssen einem Übergang von einem höheren Term(-Zustand) in einen niedrigeren entsprechen.



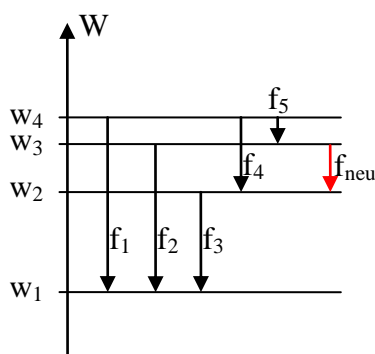
(2) Zeichne in einem geeigneten Maßstab mit Hilfe der fünf bekannten Frequenzen des He^+ -Spektrums ein Ausschnitt des He^+ -Termschemas!
[Materialseite: Frequenzen]

Die Differenzen aus den gegebenen Frequenzen werden bestimmt, und man erhält folgende Zusammenhänge:

$$f_1 - f_2 = f_5; \quad f_1 - f_3 = f_4; \quad f_1 - f_4 = f_3; \quad f_1 - f_5 = f_2.$$

Darüber hinaus gilt: $f_2 - f_3 = f_4 - f_5 \approx 0,1828 \cdot 10^{16} \text{ Hz}.$

Daraus ergibt sich das Termschema (z.B. $1 \text{ cm} \hat{=} 10^{15} \text{ Hz}.$)



- (3) Untersuche, ob in deinem Termschema weitere Frequenzen beobachtbar sein müssten, und gib diese gegebenenfalls an!

Es muss eine weitere Frequenz geben. Sie wird emittiert beim Übergang von W_3 zu W_2 und beträgt $f_2 - f_3 = f_4 - f_5 \approx 0,1828 \cdot 10^{16} \text{ Hz}$.

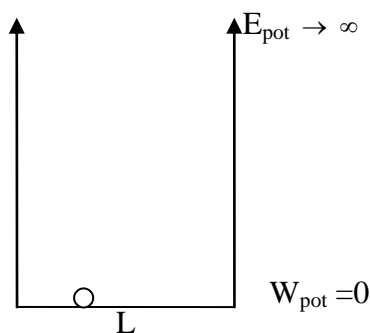
3. Aufgabe: Das Potenzialtopfmodell

Ein organisches Farbstoffmolekül kann vereinfacht mit dem Modell eines linearen Potenzialtopfes der Länge L beschrieben werden, dessen Energieniveaus mit der Gleichung $E_n = \frac{h^2}{8 \cdot m_e \cdot L^2} \cdot n^2$ berechnet werden können.

[h : Plancksche Konstante, m_e : Masse eines Elektrons].

- (1) Leite die obige Gleichung mit Hilfe einer Skizze begründet her!

Ein Elektron befindet sich in einem Potenzialtopf, wenn es aufgrund des hohen Potenzials an den Rändern seines Aufenthaltsbereichs diesen nicht verlassen kann.



Im Bereich der Länge L besitzt das Elektron nur kineti-

sche Energie: $E_{ges} = \frac{1}{2} m_e v^2 = \frac{p^2}{2 m_e}$, da $p = m_e v$. Das

Elektron wird durch eine Wellenfunktion beschrieben, deren Wellenlänge der de-Broglie-Beziehung genügt:

$p = \frac{h}{\lambda}$. Die Welle kann keine fortschreitende Welle

sein, da ihr Amplitudenquadrat an den Rändern den wert 0 haben muss, denn dort kann das Elektron nicht sein. Man muss zur quantenmechanischen Beschrei-

bung des Elektrons also eine stehende Welle wählen, die an den Rändern Knoten besitzt. Für die Wellenlänge solcher stehenden Wellen gilt: $L = n \frac{\lambda}{2} \Leftrightarrow \lambda = \frac{2L}{n}$. Berücksichtigt man die entsprechenden Größen in der Energiegleichung, folgt:

$$E_{ges} = \frac{p^2}{2 m_e} = \frac{\left(\frac{h}{\lambda}\right)^2}{2 m_e} = \frac{h^2}{2 m_e \lambda^2} = \frac{h^2}{2 m_e \left(\frac{2L}{n}\right)^2} = \frac{h^2}{8 m_e L^2} n^2.$$

- (2) Für die folgenden Betrachtung sollen $L = 0,89 \text{ nm}$ und der Grundzustand zu Grunde gelegt werden.

Eine Lösung dieses Farbstoffes wird mit UV-Licht aus dem Wellenlängenbereich zwischen 170 nm und 200 nm beleuchtet. Bestimme die Wellenlängen derjenigen Photonen, die von der Lösung absorbiert werden können!

Da der Grundzustand vorliegen soll, ist $n = 1$. $E_m - E_1 = \frac{h^2}{8 \cdot m_e \cdot L^2} \cdot (m^2 - 1) = hf_{m,1}$. Hieraus folgt:

$$f_{m,1} = \frac{h}{8 \cdot m_e \cdot L^2} \cdot (m^2 - 1) \text{ Für die Wellenlänge gilt dann:}$$

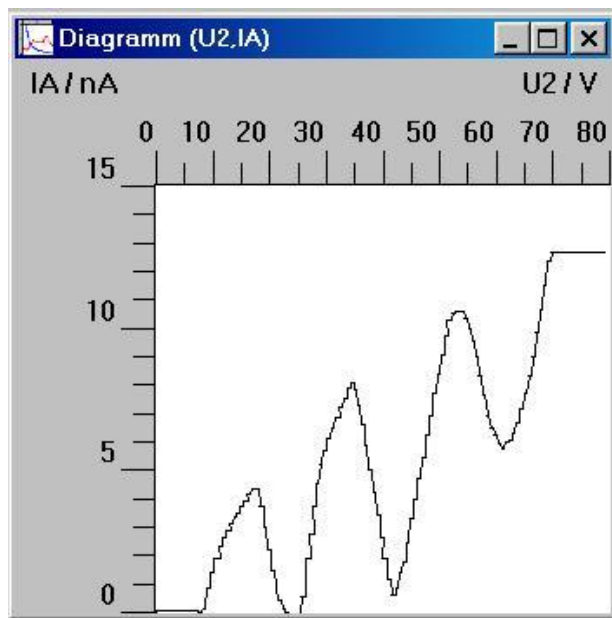
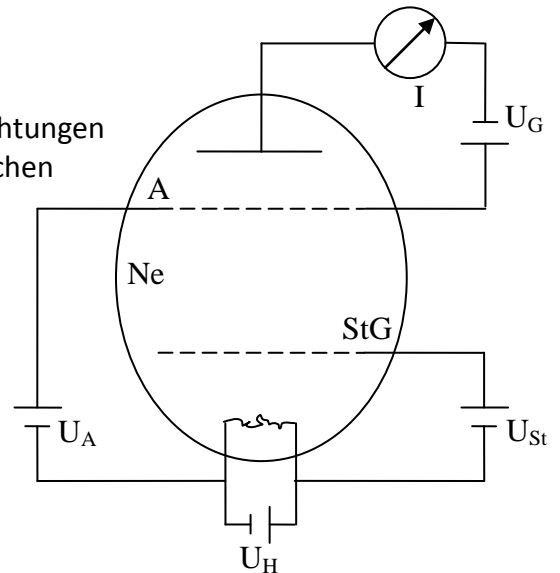
$$\lambda_{m,1} = \frac{c}{\frac{h}{8 \cdot m_e \cdot L^2} \cdot (m^2 - 1)} = \frac{8 \cdot m_e \cdot L^2 \cdot c}{h(m^2 - 1)} \approx 2611,7 \text{ nm} \cdot \frac{1}{(m^2 - 1)}. \text{ Es ergeben sich folgende Wellen-}$$

längen: $\lambda_{2,1} \approx 870,6 \text{ nm}$; $\lambda_{3,1} \approx 326,5 \text{ nm}$; $\lambda_{4,1} \approx 174,1 \text{ nm}$; $\lambda_{5,1} \approx 108,8 \text{ nm}$. Nur $\lambda_{4,1} \approx 174,1 \text{ nm}$ liegt in dem angegebenen Bereich.

4. Aufgabe: Der Franck-Hertz-Versuch

- (1) Skizziere den typischen Aufbau des Franck-Hertz-Versuchs und erläutere die Funktion der einzelnen Komponenten!

Die mit U_H geheizte Glühwendel emittiert Elektronen. Diese bilden mit unterschiedlichen Geschwindigkeitsrichtungen eine Elektronenwolke um die Glühwendel herum. Zwischen Glühwendel und Steuergitter (StG) wird durch U_{ST} (ca. 10V) ein elektrisches Feld aufgebaut, in dem die Elektronen vorbeschleunigt werden, ihre Geschwindigkeitsvektoren werden nach oben ausgerichtet. Die Anodenspannung U_A zwischen Glühdraht und Anodengitter (A) ist von 0V bis ca. 80V regelbar und beschleunigt die Elektronen in Richtung der oberen Auffängerelektrode. Zwischen ihr und der Anode (A) liegt ein kleines Gegenfeld, das durch die Spannung U_G (ca. 8V) verursacht wird. Erreichen Elektronen trotz des Gegenfelds die Auffängerelektrode, werden sie als Strom I gemessen. Das Gegenfeld lässt nur Elektronen mit einer bestimmten Mindestenergie passieren.



- (2) Deute den Verlauf des dargestellten Messgraphen mit Hilfe der physikalischen Vorgänge in der Röhre!

[Materialseite: Messgraph zum Franck-Hertz-Versuch]

Wird die Anodenspannung U_A von 0V beginnend erhöht, können zu Beginn keine Elektronen das Gegenfeld überwinden, die U-I-Kurve verläuft noch parallel zur U-Achse. Mit zunehmender Spannung erreichen immer mehr Elektronen die Auffängerelektrode, da ihre Energie mit U_A steigt und sie das Gegenfeld überwinden können. Bis zum ersten Maximum

sind die Elektronen mit den Gasatomen in der Röhre (z.B. Ne) nur in elastische Wechselwirkungen getreten, sie haben ihre Energie dabei nicht an die Atome abgegeben.

Dies geschieht erstmalig in dem Spannungsbereich zwischen dem ersten Maximum und dem ersten Minimum. Elektronen haben unmittelbar vor dem Anodengitter (A) eine ausreichend hohe Energie, um Atome mit diesem Energiebetrag anzuregen. Dabei geben sie ihre Energie an die Atome ab und besitzen nicht mehr genügend Energie, das Gegenfeld zu überwinden, und der Strom sinkt. Im abfallenden Kurventeil ist zu erkennen, dass immer mehr Elektronen diesen Anregungsprozess leisten und nicht mehr als Strom gemessen werden können. Vom ersten Minimum zum zweiten Maximum nehmen immer mehr Elektronen, die ursprünglich bei einer Anregung ihre Energie abgegeben hatten, erneut Energie aus dem Beschleunigungsfeld auf und können in zunehmendem Maße das Gegenfeld überwinden und werden als Strom gemessen. Der Anregungsbereich wandert dabei nach unten, da die Elektronen jetzt nicht mehr erst vor der Anode, sondern bereits früher genug Energie für eine unelastische WW mit den Atomen haben. Danach reicht die Strecke bis zur Anode für eine weitere Energieaufnahme. Beim zweiten Maximum wurde wieder so viel Energie aufgenommen, dass es direkt an der Anode (A) erneut zur Anregung kommen kann. Im Spannungsintervall vom zweiten Maximum bis zum folgenden Minimum regen immer mehr Elektronen auf ihrem Weg nach oben Gasatome zweimal an und haben dann nicht mehr genug Energie, das Gegenfeld zu überwinden. Erst nach dem zweiten Minimum gelangen die ersten Elektronen, die eine zweifache Anregung geleistet haben, wieder durch das Gegenfeld; die zweite Anregungsschicht ist nach unten gewandert, und nach der zweiten Anregung bleibt noch genug Raum, um erneut Energie für die Überwindung des Gegenfeldes aufzunehmen. Bei weiterer Spannungserhöhung kommt es dann zur erneuten dritten Anregung vor dem Anodengitter (A). Insgesamt steigt die Kurve tendenziell, da immer mehr Elektronen auch ohne unelastische WW zur Auffängerelektrode gelangen und als Strom gemessen werden.

(3) Diskutiere, ob sichtbare Erscheinungen in der Röhre zu erwarten sind!

Wenn man die Anregungszonen sehen kann, liegen sie in einzelnen Schichten parallel zum Anodengitter in gleichen Abständen zueinander. Zwischen ihnen ist es dunkel, und auch der Bereich zwischen der obersten Schicht und dem Anodengitter ist dunkel, oder die oberste Schicht liegt direkt am Gitter. Die Schichten haben eine gewisse Dicke, da nicht alle Elektronen exakt im gleichen Abstand von der Anode die Anregungsenergie besitzen.

Der Abstand zwischen zwei Maxima beträgt in der Graphik ca. 19 V. Nach $hf = 19\text{ eV}$ lässt sich die Wellenlänge der Resonanzabsorption berechnen: $\lambda = \frac{c \cdot h}{19\text{ eV}} \approx 65,25\text{ nm}$. Diese Wellenlänge

ist zu klein, die dazugehörige Frequenz zu groß für das sichtbare Spektrum. Entweder kann man also gar nichts in der Röhre beobachten, oder das Termschema des benutzten Gases in der Röhre besitzt unter dem mit 19 eV angeregten Niveau dichter beieinander liegende Niveaus, deren energetische Abstände Wellenlängen sichtbaren Lichts entsprechen. Man könnte dann die Schichten in der Mischfarbe dieser Frequenzen sehen.

5. Aufgabe: Quantenobjekte

„Sie sind weder Teilchen noch Welle“.

„Sie haben etwas Welliges, etwas Körniges und etwas Stochastisches.“

Erläutere diese Aussagen zu Quantenobjekten!

Die uns bekannten Quantenobjekte sind Elektronen und Photonen. Elektronen besitzen Eigenschaften von Teilchen, die man in klassischen Versuchen wie zum Beispiel beim glühelektrischen Effekt oder bei der Ablenkung in der Elektronen-Ablenkröhre („waagerechter Wurf“) beobachten kann. Auch Photonen zeigen Eigenschaften, wie Teilchen sie besitzen; dies kann man beim Studium des Photoeffekts oder der genauen Betrachtung einer fotografischen Aufnahme einer Interferenzfigur erkennen. Ihre Welleneigenschaften zeigen Elektronen als auch Photonen in verschiedenen Interferenzversuchen mit einem Doppelspalt, einem Strich- oder einem räumlichen Gitter, etc.

Führt man mit diesen Quantenobjekten z. B. den Doppelspaltversuch durch, so erkennt man aber, dass sie keine Teilchen im klassischen Sinn sein können, denn sie verhalten sich völlig anders. Z.B. entsteht ein typisches Interferenzbild auch dann, wenn die Teilchen über eine lange Zeit nacheinander durch den Doppelspalt fliegen. Die Auftreffwahrscheinlichkeit auf dem Schirm oder Film wird dadurch nicht verändert. Die Interferenzfigur selbst gibt zwar einerseits die Intensitätsverteilung an, andererseits stellt sie die Auftreffwahrscheinlichkeit der Quantenobjekte auf dem Schirm oder Film dar. Das Interferenzbild ist auch keine Überlagerung der Auftreffverteilungen bei nacheinander geöffneten Spalten wie man sie mit Gewehrkugeln, Fußbällen oder anderen klassischen Teilchen erreicht. Das Komplementaritätsprinzip zeigt außerdem, dass die Interferenzen verschwinden, wenn der Weg, den die Objekte zur Beobachtungsebene genommen haben, bekannt ist: Interferenz und die „Welcher-Weg-Information“ schließen sich aus. Somit können Quantenobjekte keine klassischen Teilchen sein.

Wellen im klassischen Sinn können sie aber auch nicht sein: In einer Welle ist die Energie nicht gequantelt. Ihre Intensität müsste das Maß sein, um Elektronen durch Licht aus einem Metall auslösen zu können – dies ist aber nicht so (Photoeffekt). Auch bewegen sich weder Photonen noch Elektronen wie Wellen, bei denen etwas in oder quer zur Ausbreitungsrichtung schwingt, so wie es bei Wasser- oder Schallwellen der Fall ist. Licht nur als elektromagnetische Welle zu betrachten, erklärt weder den Photoeffekt noch die Interferenzfähigkeit.

Beide Quantenobjekte besitzen eine stochastische Eigenschaft, die ein fester Bestandteil ihres Seins ist, wie das Komplementaritätsprinzip zeigt. Auch der Versuch der nacheinander geöffneten und jeweils von der Hälfte der Objekte passierten Spalte zeigt, dass die Wahrscheinlichkeit für die Wahl des einen oder anderen Wegs nicht beeinträchtigt oder zerstört werden darf, damit sich die Objekte wie interferenzfähige Wellen verhalten.

Die quantenmechanische Interpretation spricht deshalb weder von Teilchen noch von Wellen, sondern von Quantenobjekten, deren Eigenschaften und Verhalten durch eine (mathematische!) Wellenfunktion $\Psi(\vec{r}, t)$ beschrieben wird. Ihr Amplitudenquadrat $\hat{\Psi}^2$ ist proportional zur Wahrscheinlichkeit, das Objekt zur Zeit t am Ort \vec{r} anzutreffen. Der Bezug zur klassischen Physik ist dadurch nicht aufgehoben, sondern sinnvoll ergänzt; auch hier ist die Intensität proportional zum Amplitudenquadrat der Welle. Körnig sind die Quantenobjekte schon deshalb, da sie sich nicht über eine Fotoschicht „verschmieren“, sondern ihre Wechselwirkung ganz diskret und punktuell ausüben; zwischen Orten der Belichtung liegen auch solche, die nicht „getroffen“ wurden. Eine Welle allein könnte das nicht erklären.