

Franck–Hertz–Versuch (FHV)

Manuel Staebel – 2236632 / Michael Wack 2234088

1 Ziele des Versuchs

– Nachweis der Existenz von diskreten Energieniveaus in der Atomhülle

Elektronen geben bei inelastischen Stößen mit Atomen bestimmte Energiebeträge ab. Bei einem inelastischen Stoß wird das Atom angeregt. Es gibt einen minimalen Energiebetrag, der zur Anregung nötig ist. Die Elektronen in der Hülle von Atomen besetzen nur diskrete Energieniveaus.

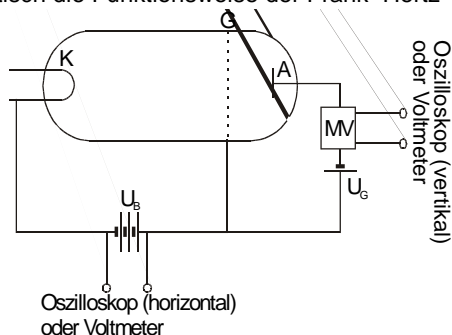
– Bestätigung des Bohr’schen Atommodells

Der Versuch zeigt eine Erscheinung, die mit den einfacheren Atommodellen (Tompson, Rutherford) nicht erklärbar ist. Das Bohr’sche Atommodell liefert die nötigen Erweiterungen, um die Beobachtungen zu erklären.

2 Versuchsaufbau

Der Franck–Hertz–Versuch wurde mit einer Neon– und einer Quecksilberöhre durchgeführt. Die Schaltskizzen sind für beide Versuche – wie in der Versuchsbeschreibung angegeben – identisch.

Hier schematisch die Funktionsweise der Franck–Hertz–Röhre:



In der Röhre befindet sich Neon (erster Versuch) oder Quecksilberdampf (zweiter Versuch). Elektronen, welche aus der indirekt beheizten Kathode K austreten, werden durch die Spannung U_b beschleunigt und erreichen, wenn sie am Anodengitter G genug kinetische Energie besitzen, um die Gegenspannung U_G zu überwinden, den Auffänger A (Anode). Auf ihrem Flug stoßen die Elektronen mit den Ne– bzw. Hg–Atomen in der Röhre. Falls die Energie eines stoßenden Elektrons ausreicht, ein Elektron eines zufällig getroffenen Atomes aus dem Grundzustand in einen höheren Energiezustand zu bringen, so erfolgt der Stoß elastisch, d.h. das Stoßelektron gibt Energie an das Hüllenelektron ab. Geschieht dies kurz vor dem Anodengitter, so hat das Elektron nicht mehr genug kinetische Energie, um die Gegenspannung zu überwinden, was sich in einem geringeren Anodenstrom I bemerkbar macht. Steigert man U_b , so wächst I wieder an, da die Elektronen nach dem Stoß wieder von neuem beschleunigt werden. Erreichen die Elektronen die nötige kinetische Energie, um mit Elektronen der Füllatome der Röhre wechselzuwirken, ein zweites mal, so fällt der Anodenstrom wieder ab. Die Abstände der Maxima der so aufgezeichneten Strom–Spannungs–Kennlinie liefert die Anregungsenergie der Valenzelektronen von Ne (18,3 eV bis 18,9 eV) und Hg (4,9 eV). Das angeregte Hüllenelektron geht, unter Aussendung eines Photons entsprechender Energie, wieder in den Grundzustand über. Bei Neon erfolgt dieser Rückfall in den Grundzustand stufenweise, so dass mehrere Wellenlängen sichtbaren Lichts emittiert werden (585 nm bis 703 nm und ca. 73 nm). Dies kann man als leuchtende Schicht beobachten, die bei Erreichen der erste Anregungsenergie abrupt am Anodengitter erscheint und bei Erhöhung der Beschleunigungsspannung in Richtung Kathode wandert. Bei der doppelten Spannung entsteht dann eine weitere Schicht, während die erste gerade in der Mitte zwischen K und G liegt. Bei Hg wird Licht im UV Bereich abgestrahlt.

3 Durchführung

3.1 Neon (Ne)

3.1.1 Ermitteln Sie die zwischen Anodengitter und Auffangelektrode anliegende Bremsspannung U_G , bei der die Maxima und die Minima der Franck–Hertz–Kurve im Bereich der Beschleunigungsspannung $U_B = 0V$ bis $40V$ besonders ausgeprägt sind.

Nach einigen Parametervariierungen stellten wir bei einer Gegenspannung von $(5,3 \pm 0,1) V$ eine für uns sehr schön zu erkennende Franck–Hertz–Kurve fest. Die Ausprägtheit der Kurve auf dem Oszilloskop konnte jedoch nur sehr subjektiv eingeschätzt werden und hat dadurch unserer Ansicht nach wenig Aussagekraft.

3.1.2 Skizzieren Sie diese Franck–Hertz–Kurve von Hand in Ihr Protokollheft.

Das Protokollblatt liegt unserer Versuchsausarbeitung bei.

3.1.3 Bestimmen Sie den Mittelwert der aus jeweils zwei benachbarten Maxima sich ergebenden Spannungsdifferenzwerte und dessen Fehler. Berechnen Sie aus der erhaltenen Anregungsspannung die Wellenlänge der resultierenden Emissionslinie ($h = 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eVs}$; $c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m/s}$).

Meßwerte:

Maximum	$U_B [V]$	$\Delta U_B [V]$
1	$(16,5 \pm 0,1)$	
2	$(32,8 \pm 0,1)$	16,3
3	$(51,6 \pm 0,1)$	18,8
4	$(72,7 \pm 0,1)$	21,1

Aus den gemessenen Spannungsdifferenzen ergibt sich ein Mittelwert von

$$\overline{\Delta U_B} = \frac{16,3 V + 18,8 V + 21,1 V}{3} = 18,7 V$$

Der mittlere quadratische Fehler (Standardabweichung) beträgt

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_1^n (x_i - \bar{x})^2} = 2,4$$

Aus der Anregungsspannung von $18,7 V$ läßt sich die Wellenlänge der (theoretisch) resultierenden Emissionslinie errechnen:

$$e U = \frac{h c}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{h c}{e U} = 66,3 \text{ nm}$$

Diese theoretische Wellenlänge kann selbstverständlich nicht beobachtet werden. Das angeregte Neonatom geht auch nicht durch Emission eines Photons in den Grundzustand über, sondern es werden bei einer Anregungsenergie von $18,9V$ Photonen mit einer Wellenlänge von $585,2 \text{ nm}$ und $73,6 \text{ nm}$ emittiert (es gibt also noch einen Zwischen–Anregungszustand).

3.2 Quecksilber (Hg)

Da Quecksilber bei Zimmertemperatur flüssig ist, musste hierfür die Elektronenröhre auf eine Temperatur von ca. 200°C gebracht werden (verwendete Temperaturen im Versuch: $T = (180 \pm 5)^\circ\text{C}$ und $T = (200 \pm 5)^\circ\text{C}$. Da der Ofen nur durch ein Bimetall gesteuert ein- und ausschaltete, erwies es sich als schwierig, die Temperatur im gewünschten Bereich konstant zu halten, was zu der Temperaturungenauigkeit von $\pm 5^\circ\text{C}$ führte.

3.2.1 Ermitteln Sie die zwischen Anodengitter und Auffangelektrode anliegende Bremsspannung U_G , bei der die Maxima und die Minima der Franck–Hertz–Kurve im Bereich der Beschleunigungsspannung $U_B = 0V$ bis $40V$ besonders ausgeprägt sind.

Bei der Quecksilberöhre ermittelten wir für die subjektiv optimalste Gegenspannung einen Wert von $(1,27 \pm 0,01) V$. Dieser Wert liegt deutlich unter dem Wert bei der Neonröhre, was auf eine niedrigere Anregungsenergie der Quecksilberatome schließen läßt.

3.2.2 Skizzieren Sie diese Franck–Hertz–Kurve von Hand in Ihr Protokollheft.

Das Protokollblatt liegt unserer Versuchsausarbeitung bei.

3.2.3 Bestimmen Sie den Mittelwert der aus jeweils zwei benachbarten Maxima sich ergebenden Spannungsdifferenzwerte und dessen Fehler. Berechnen Sie aus der erhaltenen Anregungsspannung die Wellenlänge der resultierenden Emissionslinie ($h = 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eVs}$; $c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m/s}$).

Meßwerte:

	T = (180 ± 5) °C		T = (200 ± 5) °C	
Maximum	U _B [V]	Δ U _B [V]	U _B [V]	Δ U _B [V]
1	(25,2 ± 0,1)		(28,0 ± 0,1)	
2	(30,9 ± 0,1)	5,7	(32,4 ± 0,1)	4,4
3	(36,0 ± 0,1)	5,1	(36,6 ± 0,1)	4,2
4	(41,7 ± 0,1)	5,7	(41,1 ± 0,1)	4,5
5	(48,1 ± 0,1)	6,4	(46,2 ± 0,1)	5,1
6	(54,3 ± 0,1)	6,2		
7	(59,0 ± 0,1)	4,7		

Aus den gemessenen Spannungsdifferenzen ergibt sich ein Mittelwert von

$$T = (180 \pm 5) \text{ °C: } \overline{\Delta U_B} = \frac{5,7V + 5,1V + 5,7V + 6,4V + 6,2V + 4,7V}{6} = 5,6V$$

$$T = (200 \pm 5) \text{ °C: } \overline{\Delta U_B} = \frac{4,4V + 4,2V + 4,5V + 5,1V}{4} = 4,6V$$

Der mittlere quadratische Fehler (Standardabweichung) beträgt

$$T = (180 \pm 5) \text{ °C: } s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_1^n (x_i - \bar{x})^2} = 0,64$$

$$T = (200 \pm 5) \text{ °C: } s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_1^n (x_i - \bar{x})^2} = 0,39$$

Aus der Anregungsspannung von 5,6V läßt sich die Wellenlänge der resultierenden Emissionslinie bei T = (180 ± 5) °C errechnen:

$$eU = \frac{hc}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{hc}{eU} = 221 \text{ nm}$$

Die Anregungsspannung von 4,6 V bei einer Temperatur von T = (200 ± 5) °C ergibt:

$$eU = \frac{hc}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{hc}{eU} = 270 \text{ nm}$$

Die beiden Wellenlängen der emittierten Photonen liegen wie erwartet im UV-Bereich.

4 Fragen

4.1 Was versteht man unter einem elastischen und einem inelastischen Stoß?

Bei einem inelastischen Stoß wird ein Teil der kinetischen Energie der Stoßpartner in andere Energieformen umgewandelt (in der Mechanik normalerweise in Verformungsarbeit und anschließend in Wärme; in der Atomphysik werden Atomen durch diese Energie angeregt). Dieser Verlust an Energie muss bei der Energieerhaltung berücksichtigt werden. Die Impulserhaltung gilt uneingeschränkt. Einen Stoß bezeichnet man als vollkommen inelastisch, wenn die Stoßpartner nach dem Stoß die gleiche Geschwindigkeit haben.

Beim vollkommen elastischen Stoß wird ausschließlich kinetische Energie zwischen den Stoßpartnern übertragen, d.h. der Energieerhaltungssatz gilt uneingeschränkt und es gilt, dass die Summe der kinetischen Energien vor dem Stoß gleich der Summe der kinetischen Energien nach dem Stoß ist. Der Impulserhaltungssatz gilt sowieso.

4.2 Warum kann ein Elektron mit einer Energie < 4,9 V nur einen elastischen Stoß mit einem Atom machen?

Wenn das Elektron inelastisch mit dem Atom stoßen würde, dann müsste das Atom Energie aufnehmen (in einer anderen Form als kinetische Energie; vgl. 1.). Dies ist jedoch nur möglich, wenn das Atom angeregt wird (= ein Elektron wird aus einer äußeren Schale auf eine energetisch höhere (innere) Schale angehoben). Die Anregung von Atomen ist nur mit diskreten Energiebeträgen möglich. Bei Quecksilberatomen liegt die erste mögliche Anregungsenergie bei $e \cdot U$ mit $U = 4,9V$. Bei kleineren Spannungen reicht die Energie des Elektrons nicht aus um das Quecksilberatom anzuregen und es kommt ausschließlich zu elastischen Stößen (= Beschleunigung des Atoms).

4.3 Warum kann ein Elektron bei einem elastischen Stoß mit einem Atom nur wenig Energie übertragen?

Das Elektron prallt ohne nennenswerten Geschwindigkeitsverlust von dem sehr viel schwerere (Faktor $\sim 10^4$) Atom ab. Es wird also reflektiert, ähnlich wie ein Gummiball an einer (schwereren) Wand. Das das Elektron fast seine ganze kinetische Energie behält, kann keine Energie an das Atom übertragen werden.

4.4 Wie gibt das durch einen inelastischen Stoß angeregte Atom seine Energie ab?

Sobald das Atom von seinem angeregten Zustand in den Grundzustand zurückfällt, emittiert es ein einzelnes elektromagnetisches Strahlungsquant der Wellenlänge $\lambda = h \cdot c / E$. Dabei entspricht E der Energie, die beim Zurückspringen eines Elektrons von einer inneren auf seine ursprüngliche äußere Schale frei wird. Zum Teil liegen diese Wellenlängen im sichtbaren Bereich, so dass man ein Leuchten beobachten kann.

4.5 Welcher Unterschied besteht zwischen der Anregung eines Atoms durch Elektronen bzw. Lichtquanten?

Lichtquanten besitzen eine ganz bestimmte Energie $E = h \cdot f$. Nur wenn dieser Energiebetrag genau einer diskreten Anregungsenergie eines Atoms entspricht, kann es zu einer Anregung kommen. Da sich ein Lichtquant nicht teilen oder abbremsen lässt, ist es unmöglich, dass es nur einen Teil seiner Energie abgibt.

Elektronen hingegen können einen Teil ihrer kinetischen Energie bei einem inelastischen Stoß mit einem Atom abgeben und so das Atom anregen. Das Elektron wird in diesem Fall gestreut und fliegt mit der, um die Anregungsenergie des Atoms, verringerten kinetischen Energie weiter.

Ein Elektron kann also durchaus mehrere Atome hintereinander anregen, wohingegen ein Photon immer seine gesamte Energie abgibt und somit vom Atom vollständig absorbiert wird.

4.6 Warum wird zwischen Auffängerelektrode und Anodengitter eine Bremsspannung benötigt?

Die Bremsspannung wirkt als Geschwindigkeitsfilter für Elektronen und sorgt dafür, dass nur Elektronen, die keine Gasatome angeregt haben, die Anode erreichen. Ohne Bremsspannung würden alle Elektronen, auch die, die durch inelastische Stöße ihre gesamte kinetische Energie verloren haben, zur Anode „gesaugt“. In diesem Fall würde der Strom linear mit der Beschleunigungsspannung (U_b) ansteigen.

4.7 Vergleichen Sie die Funktionsweise einer Franck–Hertz–Röhre mit der einer Leuchtstofflampe und versuchen Sie, die Leuchtstofflampe anhand des Prinzipschaltbildes (Abb.7) zu verstehen. Warum heißen diese Lampen Leuchtstofflampen?

Prinzipiell arbeiten beide Röhren gleich, indem sie die Anregung der Gasatome durch Elektronenstoß und die anschließende Lichtemission der Atome ausnutzen. Dazu werden die Elektronen zwischen Anode und Kathode beschleunigt bis sie die nötige kinetische Energie besitzen um ein einzelnes Atom anzuregen. Da dieser Vorgang bei der Leuchtstoffröhre möglichst oft passieren soll, arbeitet man hier mit höheren Spannungen. Auch Wechselstrom kann genutzt werden, da die Richtung der Beschleunigung keine Rolle spielt. Die Bremsspannung kann entfallen, da man den Anodenstrom nicht messen will. Leuchtstofflampen sind häufig mit Quecksilberdampf gefüllt; um das emittierte Licht sichtbar zu machen ist das Glas der Röhre mit einem „Leuchtstoff“ beschichtet.

Da in der Leuchtstoffröhre aufgrund der hohen Spannung Ionisation eintritt und sich ein Lichtbogen ausbildet kann man auf die Glühkathode verzichten. Man benötigt jedoch einen Starter um die hohe Zündspannung zu erzeugen.

4.8 Was ist der Unterschied zu einer Röntgenröhre?

In einer Röntgenröhre wird mit wesentlich höheren Beschleunigungsspannungen als in der Franck–Hertz–Röhre gearbeitet (10^3 V statt V). Dadurch besitzen die Elektronen mehr kinetische Energie und können auch Elektronen aus weiter innen liegenden Schalen anregen (in der Franck–Hertz–Röhre werden nur Valenzelektronen angehoben). Damit die Elektronen das Anodenmaterial in der Röntgenröhre möglichst ungebremst erreichen, arbeitet man im Vakuum, wohingegen die Franck–Hertz–Röhre mit Gas gefüllt ist. In der Röntgenröhre erzeugen die Elektronen beim Stoß mit den Atomen des Anodenmaterials Röntgenstrahlung (charakteristische Röntgenstrahlung durch Anregung von Elektronen in inneren Elektronenschalen und Röntgenbremsstrahlung), die wesentlich kurzwelliger als die Strahlung in der Franck–Hertz–Röhre ist.

5 Schlussbemerkung

Nach der Versuchsdurchführung stellte sich heraus, daß unser Praktikumsassistent die Messung der Beschleunigungsspannung direkt an der Röhre erwünschte (Angabe in der Versuchsbeschreibung: „...zwischen den Buchsen „ $U_b/10$ “ („x–Abl“) und Masse...“). Dadurch, dass wir die Spannung wie in der Versuchsbeschreibung angegeben gemessen haben, waren unsere Meßwerte genau um den Faktor 1/9,14 zu den eigentlichen Röhren–Beschleunigungsspannungen skaliert, wie wir durch Aufstellen einer Eichgeraden feststellten (Messung der tatsächlichen Beschleunigungsspannung und Messung der skalierten Spannungen am Output für die Oszilloskop–x–Ablenkung).

Der Franck–Hertz–Versuch hat bei uns das Schulwissen auf diesem Gebiet der Atomphysik weiter vertieft und durch eigene praktische Tätigkeit und den damit verbundenen Überlegungen die Prinzipien der diskreten Energien in der Atomhülle verdeutlicht.