

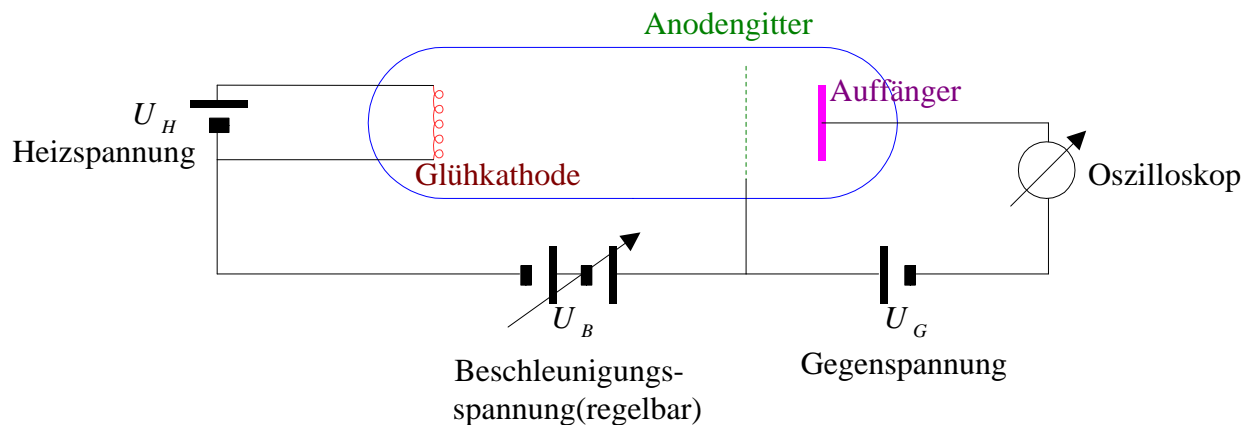
Physik-Praktikum:FHV

Einleitung:

Mit dem Franck-Hertz-Versuch kann man sehr anschaulich das Vorhandensein diskreter Energieniveaus in der Elektronenhülle der Atome nach dem Bohrschen Atommodell zeigen. Bei dem Versuchsaufbau mit Quecksilberröhre sieht man den abgestuften Energieverlauf auf dem Oszilloskop, während man bei der Neonröhre sogar das Licht der angeregten Atome sehen kann, weil es im sichtbaren Bereich liegt. Aus der Höhe der Beschleunigungsspannung, die man bei den jeweiligen Maxima und Minima messen kann, kann man Rückschlüsse auf die Energieniveaus der Atome ziehen.

Versuchsaufbau und Funktionsweise:

Eine Franck-Hertz-Röhre ist ein gasgefüllter Glaskolben (Quecksilber oder Neon) mit einer Glühkathode (Heizdraht), einer Gitteranode (gegenüber der Kathode positiv gepolt, so dass sich eine Beschleunigungsspannung U_B für Elektronen ergibt) und einer dahinter liegenden Auffängerelektrode. Der Auffänger ist gegenüber der Anode negativ gepolt, was eine Bremsspannung bzw. Gegenspannung U_G bewirkt.



Die Quecksilberröhre muss zusätzlich geheizt werden, damit sich ein ausreichend hoher Sättigungsdampfdruck einstellt. Die Temperaturmessung war allerdings ein Problem, denn während der Versuchsdurchführung schwankte die Temperatur stark, weil das Thermostat der Röhrenheizung nur eine einfache Regelung per Bimetallstreifen beherrscht.

In der Glühkathode werden Atome ionisiert, und die freien Elektronen durchlaufen die Beschleunigungsspannung zwischen Kathode und Gitteranode. Hinter dem Gitter werden sie beim Durchlauf einer (kleineren) Gegenspannung abgebremst, und treffen auf die Auffängerelektrode.

Falls die Elektronen auf dem Weg mit Gasatomen kollidieren, dann kann dies entweder vollkommen elastisch (dann verlieren die Elektronen praktisch keine kinetische Energie) oder inelastisch passieren. Beim inelastischen Stoß wird die abgegebene kinetische Energie zur Anregung der Gasatome genutzt, d.h. die Elektronen verlieren so viel Energie, wie der erste Anregungszustand des Atoms benötigt. In diesem Fall reicht die Energie der Elektronen nicht mehr, um gegen die Gegenspannung zur Auffängerelektrode zu gelangen; dies zeigt sich an einem Einbruch des Auffängerstroms bei der entsprechenden Beschleunigungsspannung. Erhöht man die Spannung, können immer mehr Elektronen, die einen inelastischen Stoß hinter sich haben, genug kinetische Energie erlangen, um die Gegenspannung zu überwinden, der Auffängerstrom steigt. Ist die Spannung hoch genug, dass diese Elektronen ein weiteres Mal inelastisch anregen können, dann geschieht das bei einem Teil der Elektronen auch, anschließend haben sie zu wenig Energie um zur Auffängerelektrode zu gelangen: ein weiterer Einbruch in der Kurve des Auffängerstroms (dieser Schritt kann sich noch mehrmals wiederholen).

Bei der Neonröhre reicht bei maximaler Beschleunigungsspannung die Energie aus, um Gasatome zu

ionisieren, deren Elektronen selbst wieder beschleunigt werden, so dass die Röhre zündet. Bei der Quecksilberrohre geschieht das bereits bei geringeren Spannungen (ca. 45 V).

Bei der Neonröhre sieht man an den Stellen, an denen die Elektronen die Atome anregen, eine leuchtende Schicht (die eine – wenn auch geringe – Breite hat, weil nicht alle Elektronen exakt gleich viel Energie haben (Austrittsarbeit Kathode, elastische Stöße)).

Durchführung:

Zuerst wird mit dem Oszilloskop die Franck-Hertz-Kurve angezeigt: Das Steuergerät wird auf „ramp“ geschaltet (d.h. die Beschleunigungsspannung ist sägezahnförmig mit dem eingestellten Maximalwert und einer Frequenz von 50 Hertz; dieser Spannungsverlauf wird auch für die x-Ablenkung des Oszilloskops verwendet), und mit den Einstellknöpfen für die Signalverstärkung, die Gegenspannung (beide am Steuergerät), x- und y-Position, x- und y-Vergrößerung, Fokus und Intensität (am Oszilloskop) wird ein möglichst gutes Bild der Franck-Hertz-Kurve eingestellt und auf Millimeterpapier abgezeichnet. Die Gegenspannung ließ sich nicht auf weniger als 1,3 V herunterregeln; bei der Quecksilberrohre war das Bild hier am besten.

Anschließend wird das Steuergerät auf manuellen Betrieb umgeschaltet, die Beschleunigungsspannung so eingestellt, dass auf dem Oszilloskop der Lichtpunkt in einem Maximum bzw. Minimum steht, und die Beschleunigungsspannung mit einem Digitalmultimeter gemessen (damit eine größere Messgenauigkeit erzielt wird); dies wird mit jedem Maximum und Minimum durchgeführt. Weil die Maxima und Minima relativ rund sind, kann der genaue Wert schlecht bestimmt werden, daher die große Messgenauigkeit.

Dies alles wird zuerst mit der Neon-Franck-Hertz-Röhre und dann mit der Quecksilber-Franck-Hertz-Röhre (jeweils mit 150 °C und 180 °C Heiztemperatur) durchgeführt.

Ergebnisse:

Neonröhre

Gegenspannung: $U_G = 2,6 \pm 0,05 \text{ V}$

#	1	2	3	4
<i>Maximum</i> [V]	$18,8 \pm 0,5$	$36,4 \pm 0,5$	$55,7 \pm 0,5$	$76,9 \pm 0,5$
<i>Minimum</i> [V]	$24,7 \pm 0,5$	$42,1 \pm 0,5$	$64,7 \pm 0,5$	

Spannungsdifferenzen:

#	0-1	1-2	2-3	3-4
<i>Spannungsdifferenz zwischen Maxima</i>	$(18,8 \pm 0,5) \text{ V}$	$(17,6 \pm 1) \text{ V}$	$(19,3 \pm 1) \text{ V}$	$(21,1 \pm 1) \text{ V}$

Mittelwert: 19,2 V ; Standardabweichung: 1,5 V ; Messunsicherheit: 0,9 V (bei einem Vertrauensniveau von 68,26 %)

Berechnung der Wellenlänge der resultierenden Emissionslinie :

$$\lambda = \frac{hc}{E} = (6,47 \pm 0,29) \cdot 10^{-8} \text{ m ;}$$

Das vierte Maximum war sehr nah an der oberen Grenze der Beschleunigungsspannung; weil die Sägezahnspannung unmittelbar dahinter steil abfällt, und wir nicht wissen, wie exakt diese Spannungskante von der Elektronik produziert wird, ist es nicht sicher, ob dieses Maximum tatsächlich ein ist oder nur die Folge eines Effekts der Ansteuer-Elektronik.

Quecksilberröhre bei 140 °C

Gegenspannung: $U_G = 1,3 \pm 0,05 \text{ V}$;

Temperatur: $\vartheta = (140 \pm 5)^\circ\text{C}$;

#	1	2	3	4	5
<i>Maximum [V]</i>	11,8 ± 0,2	16,2 ± 0,2	21,3 ± 0,2	26,4 ± 0,2	31,3 ± 0,2
<i>Minimum [V]</i>	14,0 ± 0,3	18,7 ± 0,3	23,2 ± 0,3	28,6 ± 0,3	34,0 ± 0,3

Die Minima sind unschärfer, daher ist die vermutete Messungenauigkeit größer (ebenso bei der nächsten Messreihe).

Spannungsdifferenzen:

#	1-2	2-3	3-4	4-5
<i>Spannungsdifferenz zwischen Maxima</i>	4,4 ± 0,4	5,1 ± 0,4	5,1 ± 0,4	4,9 ± 0,4

Mittelwert: 4,9 V ; Standardabweichung: 0,33 V ; Messunsicherheit: 0,2 V (bei einem Vertrauensniveau von 68,26 %)

Berechnung der Wellenlänge der resultierenden Emissionslinie :

$$\lambda = \frac{hc}{E} = (2,53 \pm 0,08) \cdot 10^{-7} \text{ m} ;$$

Quecksilberröhre bei 180 °C

Gegenspannung: $U_G = 1,31 \pm 0,05 \text{ V}$;

Temperatur: $\vartheta = (180 \pm 5)^\circ\text{C}$;

#	1	2	3	4	5	6
<i>Maximum [V]</i>	11,8 ± 0,2	16,2 ± 0,2	21,3 ± 0,2	26,4 ± 0,2	31,3 ± 0,2	36,6 ± 0,2
<i>Minimum [V]</i>	14,0 ± 0,3	18,7 ± 0,3	23,2 ± 0,3	28,6 ± 0,3	34,0 ± 0,3	

Spannungsdifferenzen:

#	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
<i>Spannungsdifferenz zwischen Maxima</i>	4,4 ± 0,4	5,1 ± 0,4	5,1 ± 0,4	4,9 ± 0,4	5,3 ± 0,4

Mittelwert: 4,96 V ; Standardabweichung: 0,30 V ; Messunsicherheit: 0,18 V (bei einem Vertrauensniveau von 68,26 %)

Berechnung der Wellenlänge der resultierenden Emissionslinie :

$$\lambda = \frac{hc}{E} = (2,50 \pm 0,08) \cdot 10^{-7} \text{ m} ;$$

Beiden Messungen mit der Quecksilberröhre kommt man also dem Literaturwert der Wellenlänge von $2,537 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ sehr nahe. Bei Messungen mit der Neonröhre kann man nicht auf die Wellenlänge schließen, weil die Neontome nicht direkt in den Grundzustand übergehen, sondern über einen Zwischenzustand, und senden somit zweimal ein Photon aus. Die oben berechnete Wellenlänge ist also nur ein theoretischer Wert.

Fragen:

1. Was versteht man unter einem elastischen und einem inelastischen Stoß?

Bei einem vollkommen elastischen Stoß wird zwar Energie zwischen den Stoßpartnern übertragen, aber die Energie bleibt kinetische Energie, d.h. bezüglich der kinetischen Energie gilt der Energieerhaltungssatz (die Summe der kinetischen Energien beider Partner vor dem Stoß ist gleich der Summe der kinetischen Energien nach dem Stoß) und der Impulserhaltungssatz.

Dagegen wird bei einem inelastischen Stoß ein Teil der kinetischen Energie in andere Energieformen umgewandelt (in der Mechanik meist Reibungsarbeit und somit Wärme), daher muss man beim Energieerhaltungssatz diese anderen Energieform mit einrechnen (d.h. er gilt nicht für die kinetischen Energien alleine); der Impulserhaltungssatz gilt uneingeschränkt.

Als vollkommen inelastisch bezeichnet man einen Stoß, bei dem die Stoßpartner nach dem Stoß die selbe Geschwindigkeit haben

2. Warum kann ein Elektron mit einer Energie < 4,9 V in einen elastischen Stoß mit einem Atom machen?

Ein Atom kann Energie nur in zwei Arten speichern: kinetische Energie (kontinuierliche Mengen) und Anregungsenergie (nur in diskreten Abstufungen). Bei einem inelastischen Stoß wird ein Teil der kinetischen Energie des Elektrons in Anregungsenergie des Atoms umgewandelt. Weil diese Anregungsenergie aber diskret abgestuft ist, gibt es eine Mindestenergie, die übertragen werden muss, um den ersten Anregungszustand zu erreichen (dann geht die komplette kinetische Energie des Elektrons in die Anregung des Atoms). Hat das Elektron weniger kinetische Energie als zum Erreichen des ersten Anregungszustands benötigt wird, kann das Atom nicht angeregt werden, sondern nur beschleunigt werden – dann wird nur kinetische Energie übertragen, es handelt sich also um einen vollkommen elastischen Stoß.

Bei Quecksilber ist diese Mindestanregungsenergie 4,9 V; Elektronen mit weniger kinetischer Energie können also unelastisch mit Quecksilberatomen kollidieren.

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

Weil die Masse eines Atoms sehr viel größer ist als die des Elektrons (je nach Atom etwa um das 10^4 -fache), verändert sich gemäß den Formeln für den elastischen Stoß die Geschwindigkeit des Atoms praktisch nicht, das Elektron wird im Prinzip reflektiert. Weil die kinetische Energie zwar linear von der Masse, aber quadratisch von der Geschwindigkeit abhängt, wird sehr wenig Energie übertragen.

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

Das Atom wechselt aus dem Anregungszustand plötzlich (d.h. ohne „Vorwarnung“; es ist ein statistischer Vorgang) und sofort (d.h. dieser Vorgang benötigt keine Zeit) in den Grundzustand oder einen niedrigeren Anregungszustand und gibt dabei die freiwerdende Energie als ein einzelnes elektromagnetische Strahlungsquant ab (je nach Energiedifferenz treten verschiedene Wellenlängen auf). Beim Franck-Hertz-Versuch werden nur die Valenzelektronen angeregt; die dafür benötigte Energie liegt in der Größenordnung mehrere eV, diese Energie haben dann auch die erzeugten Lichtquanten, die dahernach $E = h c / \lambda$ aus dem sichtbaren Spektrum stammen.

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

Elektronen besitzen kinetische Energie und können einen beliebigen Teil dieser Energie abgeben; so kann ein Elektron, das eine beliebige kinetische Energie höher als die Anregungsenergie für den ersten Anregungszustand des Atoms hat, das Atom anregen (wobei es diesen Anteil an kinetischer Energie verliert), und behält die restliche kinetische Energie bei. Weniger kinetische Energie bedeutet (bei gleicher Masse) eine geringere Geschwindigkeit.

Lichtquanten dagegen können nicht einen Teil ihrer Energie abgeben, weil sie ihre Geschwindigkeit nicht verringern können (Licht hat immer Lichtgeschwindigkeit). Die einzige Möglichkeit ist, dass das Lichtquant seine Energie komplett abgibt, indem es absorbiert wird; dies geschieht z.B. beim Photoeffekt und zeigt sich dort durch das Vorhandensein einer Grenzwellenlänge („Rotgrenze“: nur Photonen mit kürzerer Wellenlänge als die Grenzwellenlänge haben genug Energie, um die Ionisierungsenergie aufzubringen, so dass die Photoelektronen die Photokathode verlassen können): dazu muss die Lichtenergie gequantelt sein. Für die Anregung eines Atoms durch ein Photon bedeutet das: nur Photonen, die exakt die Energie eines bestimmten Anregungszustandes haben, können diesen Zustand anregen, Photonen mit höherer oder niedrigerer Energie ist das nicht möglich.

6. Warum wird zwischen Auffängerelektrode und Anodengitter eine Bremsspannung benötigt?

Beim Versuch sollen nur die Elektronen die Auffängerelektrode erreichen, die bei ihren Stößen keine Gasatome angeregt haben (also keine inelastische Stöße). Ansonsten würden alle Elektronen den Auffänger erreichen, auch die, die praktisch keine kinetische Energie besitzen – man könnte die Elektronen, die Atome angeregt haben, von denen, die keine angeregt haben, nicht unterscheiden, der Auffängerstrom würde kontinuierlich mit der Beschleunigungsspannung steigen. Die Gegenspannung hat also die Funktion eines Geschwindigkeitsfilters.

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?

Das Funktionsprinzip ist gleich; es gibt folgende Besonderheiten bei der Leuchtstofflampe:

Die Röhre ist mit Quecksilber (zusammen mit einem Zündgas) gefüllt. Die dabei entstehende UV-Strahlung wird mit Hilfe eines Leuchtstoffes auf der Wand der Röhre in sichtbares Licht umgewandelt (daher der Name). Die Ausbildung von getrennten leuchtenden Schichten (wie bei der F-H-Röhre) wird nicht benötigt (und ist auch nicht erwünscht, die Röhre soll gleichmäßig leuchten), daher wird die Leuchtstofflampe einfach mit der Wechselspannung des Stromnetzes betrieben (statt Gleichspannung wie bei der F-H-Röhre) – die Richtung, in die die Elektronen beschleunigt werden, spielt für die Lichterzeugung keine Rolle. Weil man auch keinen Auffängerstrom messen will, braucht man keine Bremsspannung.

Ein weiterer Unterschied ist, dass Leuchtstofflampen die Gasatome zwischen den beiden Elektroden ionisiert werden, so dass ein durchgehender Lichtbogen entsteht, während bei der Franck-Hertz-Röhre die Atome nur angeregt werden. Das hat zur Folge, dass erstens die Spannung der Leuchtstoffröhre höher sein muss (Transformation), zweitens man auf Glühkathoden verzichten kann und drittens ein Starter benötigt wird (weil der Lichtbogen nicht von Anfang an vorhanden ist, d.h. es müssen durch Ionisation von Gasatomen zuerst ausreichend freie Elektronen hergestellt werden; behilflich ist hier das Zündgas). Solange die Röhre noch nicht gezündet hat, also ihr Widerstand noch sehr groß ist, fließt der Strom über den Starter.

8. Was ist der Unterschied zu einer Röntgenröhre?

Bei einer Röntgenröhre ist die Beschleunigungsspannung sehr viel höher (im kV-Bereich statt im V-Bereich), daher erhält die Glühkathode eine wesentlich höhere kinetische Energie.

Außerdem ist eine Röntgenröhre möglichst gut evakuiert, so dass die Elektronen möglichst unbehindert bis zur Anode gelangen, während die Franck-Hertz-Röhre mit einem Gas gefüllt ist (Quecksilber bzw. Neon), damit die Elektronen mit den Gasteilchen kollidieren.

Drittens erzeugen die Elektronen in der Röntgenröhre beim Stoß mit den Atomen des Anodenmaterials Röntgenstrahlung (charakteristische Röntgenstrahlung durch Anregung von Elektronen in inneren Elektronenschalen und Röntgenbremsstrahlung), während in der Franck-Hertz-Röhre wegen der sehr viel kleineren Energie der Elektronen (eV statt keV) nur Valenzelektronen der Gasatome angeregt werden können, so dass sehr viel langwelligere Strahlung erzeugt wird (etwa im Bereich des sichtbaren

Lichts, abhängig vom verwendeten Gas). In der Röntgenröhre kann so etwas nicht passieren, weil wegedesVakuumsdieElektronenpraktischnurmitdemAnodenmaterialkollidierenkönnen.