Der Franck-Hertz-Versuch mit Hg-Dampf

Protokoll zu Versuch 35b

Steffen Schröder

5. April 2001

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung

In diesem Versuch soll die Anregungsenergie von Quecksilber durch Elektronenstoß untersucht werden. Was ist nun aber diese Anregungenergie?

1.1 Das Bohrsche Atommodell

Wenn man sich das Bohrsche Atommodell betrachtet, umkreisen die negativ geladenen Elektronen den positiv geladenen Atomkern auf festgelegten Bahnen. Dabe können sich immer nur $2n^2$ Elektronen auf den n-ten Bahn aufhalten. Die Bahnen haben einen festen Abstand zum Atomkern, so daß alle Elektronen auf der selben Bahn (ungefähr) die selbe potentielle Energie haben, da sie sich im radialsymmetrischen Feld des Atomkerns befinden.

Wenn ich nun Energie in das Atom als ganzes hineinstecken will, kann ich das nur machen als Wärmeenergie (kinetische Energie), die hier aber nicht auftritt, oder indem ich ein Elektron auf einen freien Platz auf einer höheren Bahn anhebe. Da sich in unserem im Moment benutzten Modell Elektronen jedoch ausschloießlich auf diesen Bahnen aufhalten können und diese Bahnen paarweise einen genau definierten abstand haben, benötige ich immer die selbe Menge Energie, um ein Elektron von Bahn n nach bahn m anzuheben.

Diese Energie führe ich dem Atom zu, indem ich es mit Elektronen beschieße. Diese haben eine Geschwindigkeit v und damit eine gewisse kinetische Energie W. sie stoßen nun also mit dem Atom zusammen. Ist die Energie kleiner als diejenige, die für den „kleinsten" Sprung eines Elektrons auf die nächthohere Bahn benötigte, also den mit der geringsten Energiezunahme des Elektrons, so wird der Stoß vollkommen elastisch sein, nichts passiert, außer daß das stoßende Elektron seine Richtung ändert.

Ist seine Energie jedoch ausreichend für einen Sprung, so gibt es diese Energie ab, es verliert kinetische Energie, also auch Geschwindigkeit, und ein Elektron im Atom wird in einen um genau diese Differenz energetisch höheren Zustand gehoben.

Ganz so einfach ist der Zusammenhang zwar nicht, es wäre z.B. noch die Spinquantenzahl usw. zu beachten, auch halten sich die Elektronen nicht wirklich auf festen Bahnen auf, man kann sie mit etwas gutem Willen als Orte Höchster Aufenthaltswahrscheinlichkeit auffassen, aber zur Beschreibung unseres Versuches und dessen Hintergrundes reicht dieses Wissen vollkommen aus.

1.2 Was passiert mit dem angeregten Atom?

In der Natur strebt jeder Körper o.ä. immer noch dem Energetisch nierdrigsten Zustand. Das heißt unser Atom will die überschüssige Energie möglichst schnell wieder abgeben. Wie tut es das? Ein Materieteilchen ausstoßen kann es nicht. Aber es kann „Licht" abstrahlen! Das Elektron fällt also nach kurzer zeit wieder in seinen Grundzustand zurück und gibt dabei die vorher aufgenommene Energie als Photon wieder ab. Da der Abstand der einzelnen Bahnen für ein chemisches Element charakteristisch ist, und auch immer nur Photonen, also Quanten, dieser Energiesdifferenzen abgegeben werden können, ist die Abgegebene Strahlung ebenso charakteristicsh für das Atom.

Wie jedoch finde ich die Energie der Strahlung? Die Energie der elektromagnetischen Strahlung ist definiert als

$$W = h\nu = h\frac{c}{\lambda} = \Delta E$$

wobei c die Lichtgeschwindigkeit und h das Plancksche Wirkungsquantum sind.

1.3 Und was machen wir damit?

Wir beschleuigen hier Elektronen mittels eines elektrisches Feldes, wodurch sie eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung durchführen, aber wir sorgen dafür, daß sie möglichst oft auf ihrem Weg mit Hg-Atomen zusammenstoßen. Dort tritt dann je nach ihrer kinetischen Energie der elastische oder der inelastische Stoß auf, so daß zu langsame Elektronen trotz häufiger Stöße und häufig wechselnder Richtung immer noch eine zur Entfernung zur Kathode proportionale Energie haben, wenn diese hoch genug ist für den niedrigstenergetischen Sprung im Hg-Atom geben sie diese beim nächsten Stoß ab und werden erneut beschleunigt. Da sie so häufig stoßen, erreichen sie nie eine Energie, die ausreichen würde für einen höherenergetischen Sprung, z.B. bei denen ein Elektron eine Schale überspringt.

2 Der Versuch

2.1 Prinzip

Wir benutzen im Prinzip eine Triode, in der sich etwas Quecksilber befindet. Die Glühkathode Kkann geheizt werden, die Netzanode N, die kurz vor der Anode A angebracht ist, wird gegenüber der Kathode positiv geladen, die Anode dahinter über eine Batterie wieder leicht positiv gegenüber N. Die Elektronen werden nun durch Glühemmission aus der Kathode gelöst und durch das homogene elektrische Feld zwischen K und N beschleunigt. Die meisten Elektronen fliegen jedoch durch die Löcher in der Netzanode, so daß sie danach gegen das homogene elektrische Feld zwischen N und A ankämpfen müssen. Nur solche mit einer genügend hohen Energie kommen an und können als Strom von A nach K gemessen werden.

Wird nun über eine Heizspirale die Röhre erwärmt, so nimmt die anfangs fast nicht vorhandene Quecksilberdampfdichte zu, die mittlere freie Weglänge der Elektronen sinkt, sie stoßen öfters mit den Hg-Atomen zusammen, der anfngliche regelrechte Strom geht über in einen Diffusionsprozeß, der aber nach Außen gleiche Eigenschaften hat.

Je höher die regelbare Beschleunigungsspannung zwischen K und N ist, desto schneller erreichen die Elektronen die zur Anregung der Hg-Atome nötige Energie, sie werden weiter beschleunigt und können unter Umständen weitere Anregungen durchführen. Wann dies geschieht, wird der versuch zeigen, jedenfalls haben die Elektronen nach durchlaufen der Potentialdifferenz U die kinetische Energie $W = eU$ gewonnen, somit können wir die Anregungsenergie herausbekommen über den Spannungsabstand der Stellen, an denen der gemessene Strom wieder abnimmt, d.h. die Elektronen erneut genügend Energie zur Anregung gewinnen.

2.2 Aufbau

Wir heizen die Kathode mittels einer Spannung zwischen $5V$ und $6,5V$. Je höher die Spannung, desto höher die Temperatur und desto mehr Elektronen werden emittiert, der Ausgangsstrom steigt also an, da mehr Elektronen zur Verfügung stehen. Die Gegenspannung wird durch eine Batterie erzeugt, die zwischen Netzanode und Auffanganode geschaltet wird, wobei sie allerdings erst noch durch den Eingang des Operationsverstärkers geht, der die winzigen Auffahgströme verstärken soll. Der Spannungsabfall an ihm ist unerheblich, er ist sehr gering und geht wie die meisten Größen nirgends in die Rechnung ein. Sein Ausgang wird an den Y-Eingang des Plotters gelegt. An dessen X-Eingang wiederum liegt die Spannung an, die auch zur Beschleunigung der Elektronen zwischen Kathode und Netzanode gelegt wird. Diese beträgt $0V$ bis ca. $48V$ und wirz zusätzlich über ein Voltmeter kontrolliert. Die Heizung wird getrennt durch ein eigenes Netzteil geregelt und die Temperatur durch ein eingebautes Digitalthermometer kontrolliert.

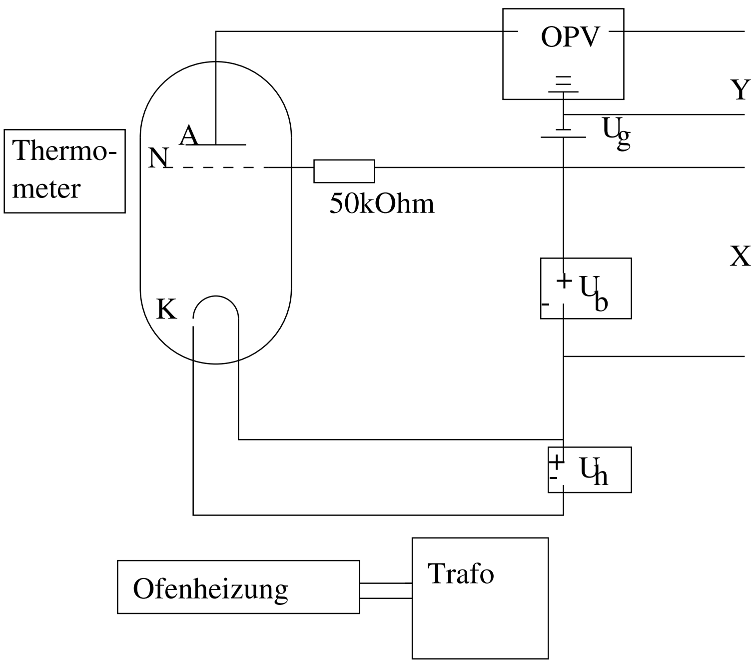

Abbildung 1: Versuchsaufbau

Zur Beschleunigungsspannung U_b gibt es noch einige Besonderheiten: Sie wird nur über einen hohen Schutzwiderstand an die Netzanode angelegt, an ihm fällt jedoch fast keine Spannung ab, da nur winzigste Ströme fließen, man kann ihn getrost vernachlässigen. Des weiteren ist dem Netzgerät zur Erzeugung von U_b noch ein groër Kondensator parallelgeschaltet, der sich bei angelegter Spannung auflädt, wenn man den Spannungsregler jedoch schnell herunterdreht übernimmt der Kondensator die Rolle der Spannungsquelle und entlädt sich nur langsam, d.h. U_b nimmt so langsam und regelmäßig ab, daß der Plotter bequem mitschreiben kann, die Kurven also besser werden. Bis auf die Beschleunigungspannung U_b sind alle anderen Werte vom Absolutwert her unwichtig, höchstens die Änderung des Anodenstromes interessiert noch. Alles andere ist zur Verchönerung, oder im Falle einer zu heiën Kathode, was eine Gasentladung bewirken kann, auch zur Zerstörung der Meßwerte zu gebrauchen, es sind nicht wirklich interessierende Parameter.

Wichtig ist sonst nur noch der ungefähre Temperaturbereich des Quecksilbers, da ich darüber bestimmen kann, ob die freie Weglänge der Elektronen groß (kleine Dampfdichte) oder klein (hohe Temperatur) ist.

2.3 Durchführung

Für die Aufzeichnung einer jeden Kurve haben wir den Kondensator voll aufgeladen ($U_b = 48V$), die Heizung auf jeden Fall ausgeschaltet, dann das Netzgerät schnell auf $0V$ geregelt und den Plotter so die Kurve von oben nach unten mitschreiben lassen.

Zuerst haben wir eine Messung bei kalter Röhre durchgeführt, dabei erschien eine Kurve, die der Kennlinie einer Triode stark ähnelt, jedoch bei $10V$ ihr maximum erreicht und dieses hält, der OPV ist dann in der Sättigung, er hat keine höhere Versorgungsspannung. Auch scheint er im Verstärkungsbereich recht linear zu Arbeiten, da keine größeren Verzerrungen zu erkennen waren. Diese Erkenntnis ist jedoch zur Auswertung nur seekundär wichtig.

Das wichtige Ergebnis hieraus ist, daß die Elektronen wie in der Vakuum-Triode freie Flugbahn haben und somit im Normalfall keine Stöße passieren.

Wenn man den Ofen immer mehr heizt, zeigen sich nach und nach immer deutlicher regelmäßige „Wellen“ in der Kurve, die insgesamt aufsteigend ist und für höhere Temperaturen immer flacher wird. Deshalb muß man bei Messungen bei hoher Temperatur sowohl Empfindlichkeit des Plotters als auch die Kathodenheizung erhöhen. Ist der Plotter allerding empfindlich eingestellt genügen winzigste Einflüsse aus des Umwelt, um den Stift zum Ausschlagen zu bringen, z.B. treten beim bewegen des Abgeschirmten kabels von der Netzanode zum OPV kleinste Ladungsverschiebungen auf, die sofort durch die hohe Verstakung zu einem großen Ausschlag führen. Deshalb muß man sie Schaltung während der Messungen in Ruhe lassen. Und die Heizung der Röhre muß ausgeschaltet sein, da sie sich stark auf den Ausschlag auswirkt.

2.4 Interpretation

Wenn man bei einer ausreichend hoher Dampfdichte U_b von $0V$ an langsam erhöht, so erkennt man abgesehen vom Rauschen des Verstärkers zuerst einen Anstieg des Stromes, der bei einem gewissen U_b aber wieder absinkt, bis er danach wieder zu steigen anfängt... Das passiert, da für kleine U_b noch keine Elektronen die nötige Anregungsenergie haben. Dann fängt es aber an, daß einige Elektronen zufällig verteilt im Diffusionsprozeß doch eine genügend hohe Energie aufgenommen haben, um das Hg bei Stößen anzuregen. Danach haben sie ihre Energie abgegeben und beschleunigen wieder. Nun sind aber viele davon nicht mehr in der Lage, das Gegenfeld zu überwinden, sie tragen nicht zum gemessenen Strom bei. Bei weiterer Erhöhung von U_b schaffen es nach und nach immer mehr Elektronen, noch einmal die nötige Energie aufzunehmen und es kommt zu erneuten inelastisdchen Stößen, der Strom sinkt ein wieteres mal ab.

Je höher ist, desto schneller erreichen die Elektronen die nötige Energie, desto öfters können sie auf ihrem Weg erfolgreich stoßen. Dies passiert in gewissen Stoßzonen, die jedoch nicht genau abregrenzt sind und immer weiter von der Netzanode zur Kathode wandern und von dort nachrücken. Daß der Stromabfall nie bis ganz auf 0 zurückgeht liegt u.a. daran, daß ein Elektron nur zufällig auf ein Atom trifft oder eben nicht. Durch einen hohen Dampfdruck bei hoher temperatur wird die freie Weglänge der Elektronen und damit auch die Stoßwahrscheinlichkeit höher. Dies läßt die Strommaxima und Minima deutlicher werden, behindert aber auch den Gesamtstrom, vor allem im Bereich zwischen Netzanode und Anode wird es für die Elektronen immer schwieriger im dort schwachen elektrischen Feld an der Anode anzukommen, so daß hier auch wieder immer mehr von der Netzanode aufgefangen werden. Inelastische Stöße passieren in diesem Bereich nicht, da die Elektronen im Gegenfeld nur Energie und damit Geschwindigkeit verlieren und nicht aufnehmen können. Wer vorher noch nicht erfolgreich war, wird es hier wahrscheinlich auch nicht mehr schaffen.

2.5 Auswertung

Wenn man sich die Kurve ansieht, die wir für $170°C$ aufzeichnen haben lasen, fällt auf, daß nach einem anfänglich durch den OPV gestörten Abschnitt Maxima und Minima der Auffangstromes I_a auftreten, die man jeweils als Folge auffassen kann. Die Folge der Maxima steigt erwartungsgemäß linear an, je höher die Beschleunigungsspannung, desto höher der Strom, wie es sich in einer Röhre „gehört". Die Folge der Minima, die von der Theorie her eigentlich die Nullfolge sein sollte, steigt aber auch ganz langsam. Dies liegt daran, daß die Stöße nur zufällig passieren, es ist ein stochastischer Vorgang, wenn die Wahrscheinlichkeit auch recht hoch ist. Einig Elektronen passieren jedoch mit weniger Gegenwehr und halten somit einen kleinen Strom Aufrecht. Auch Verluste in der Isolation können dazu beitragen.

Wenn man für die Folge der Stellen, an denen der Strom Maximal ist aufgetragen gegenüber ihrer laufenden Nummer, eine lineare Regression durchführt, erhält man einen Steigungskoeffizienten von $m = 4,74V$, d.h. sie liegen im Mittel $4,74V$ auseinander. Für die Minima beträgt der Abstand $4,95V$, sie wurden aber auch etwas ungenauer vom Schreiber mitgeschrieben. Diese Analysie ist zulässig, da der Regressionskoeffizient r wie in Tabelle 1 zu sehen annähertnd 1 ist, außerdem sagt uns auch die Theorie von vorher einen linearen Zusammenhang voraus. Beide Ausgleichsgeraden schneiden zu früh die jeweilige Nullinie, die ca. 2V verschiebung kommen von Kontaktspannungen der verschiedenene benutzten Metallen und auch vom Anlaufverhalten der Röhre.

Eine lineare Regression für Minima und Maxima zusammen habe ich nicht durchgeführt, da das Ergebnis dann noch hätte verrechnet werden müssen und ich die Annahme, daß im Schnitt alle $4,8V$ etwas „passiert" für ausreichend halte. Auch eine Standardabweichung gebe ich keine ann, da erstens meinem Taschenrechner für die lineare Regression keine sinnvolle zu entlocken ist und die Methode der übergreifenden Differenzen mir nur eine basis von 4 Werten zur Auswertung geliefert hätte, was ich für eine aussagekräftige Standardabweichung für zu wenig halte. Die Regressionskoeffizienten sind so nahe der 1, daß keine nennenswerte Standardabweichung zu erwarten ist, die etwas schlimmeres als mein Eichfehler von ca 3% bedeuten würde. Da ich im fol-

Nr.	$\frac{U_{max}}{V}$	$\frac{U_{min}}{V}$
1	12,4	14,2
2	16,6	18,7
3	21,2	23,3
4	25,8	28,0
5	30,6	32,8
6	35,4	37,7
7	40,5	44,6
8	45,4	(47,8)
Lineare Regression ($y = m \cdot x + b$):		
$m =$	4,74	4,95
$b =$	7,17	8,66
$r =$	0,9997	0,9978

Tabelle 1: Stromminima und Maxima

genden immer nur mit Potenzprodukten rechne, zieht sich der relative Fehler genau so in jedes Ergebnis durch.

Wie sieht nun die Anregungenergie vn Hg aus? Alle $4,8V$ passiert ein neuer Stoß, d.h. sobald ein Elektron von diesem Potentialunterschied beschleunigt wurde. Dann hat es die Energie $W = eU = e \cdot 4,8V = 4,8eV = 1,6022 \cdot 10^{-19} kg \cdot 4,8V = 7,69 \cdot 10^{-19} J$, Diese Energie nimmt das Atom auf und gibt sie als Strahlung wieder ab. Hierfür gilt also $\nu = \frac{h}{W} = \frac{4,8eV}{6,6262 \cdot 10^{-34} Js} = 1,16 \cdot 10^{15} Hz$, was einer Frequenz von $\lambda = \frac{c}{\nu} = 2,998 \cdot 10^{8} \frac{m}{s} 1,16 \cdot 10^{15} \frac{1}{s} = 258nm$ entspricht, also strahlt unsere Röhre im ultravioletten Bereich.

Für alle Werte gilt wie gesagt ein relativer Fehler von 3%, so daß $W_{Hg} = (4,8 \pm 0,12)eV = (7,69 \pm 0,24) \cdot 10^{-19} J$, $\nu = (1,16 \pm 0,03) \cdot 10^{15} Hz$ und $\lambda = (258 \pm 9)nm$.