

Physikalisches A-Praktikum

Versuch 27

Der Franck-Hertz-Versuch

Praktikanten: Nils Kanning
Steffen Klemer

Durchgeführt am: 06.02.2007

Gruppe: 6

Assistent: Till Bentner

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung | 4 |
| 2 | Theorie | 4 |
| 2.1 | Das BOHRsche Atommodell | 4 |
| 2.1.1 | Absorption und Emission von Licht | 4 |
| 2.1.2 | Anregung durch Elektronen | 5 |
| 2.2 | Der FRANCK-HERTZ-Versuch | 5 |
| 2.2.1 | Versuchsaufbau | 5 |
| 2.2.2 | Interpretation im Sinne des BOHRschen Modells | 6 |
| 3 | Durchführung | 7 |
| 4 | Auswertung | 8 |
| 4.1 | Die Energiedifferenz | 8 |
| 4.2 | Wellenlänge des optischen Übergangs | 8 |
| 4.3 | Übergang der Elektronen | 8 |
| 5 | Einordnung der Ergebnisse | 9 |
| A | Tabellen und Grafiken | 10 |

1 Einleitung

Im Jahr 1913 lieferte der FRANK-HERTZ-*Versuch* eine experimentelle Bestätigung für das zuvor von NIELS BOHR entwickelte Atommodell. Mit diesem Modell erweiterte BOHR das RUTHERFORDsche Bild eines Atoms, bestehend aus Elektronen die um einen Kern kreisen. Er postulierte, dass Atome Energie nur in diskreten Einheiten bestimmter Größe – *Quanten* – aufnehmen und abgeben können.

Eben diese Eigenschaft des Modells wird durch die in diesem Versuch auftretenden Effekte im Fall von Quecksilberatomen bestätigt. Es stellt sich heraus, dass die Atome Energie, die ihnen über beschleunigte Elektronen zugeführt wird, nur in bestimmten Portionen aufnehmen können.

2 Theorie

2.1 Das Bohrsche Atommodell

Klassisch stellte man sich den Aufbau eines Atoms analog zu unserem Sonnensystem vor. In diesem Bild umkreisen negativ geladene Elektronen einen positiven Kern. Diese Elektronen werden durch die als Zentripetalkraft wirkende Coulombkraft auf ihrer Bahn gehalten.

Bringt man an dieser Stelle MAXWELLS Theorie der Elektrodynamik ins Spiel, so würden die Elektronen während ihrer Bewegung Lichtwellen aussenden und damit Energie abgeben. Das Elektron würde so schon nach kurzer Zeit in den Kern stürzen und die Atome wären somit instabil.

Um diesen Widerspruch zur Existenz von Atomen über einen längeren Zeitraum zu erklären, erweiterte BOHR das Modell um drei Postulate, die über die klassische Physik hinausgehen:

1. Die Elektronen bewegen sich auf stabilen Kreisbahnen um den Kern ohne dabei Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung abzugeben.
2. Der Übergang eines Elektrons zwischen zwei Bahnen erfolgt nicht kontinuierlich, sondern sprunghaft. Die Differenz der beiden Bahnenergien E wird als elektromagnetische Strahlung – als *Lichtquant* – abgegeben. Die Frequenz ν der Strahlung ist definiert durch:

$$h\nu = E$$

Dabei ist h – das PLANCKsche *Wirkungsquantum* – eine universelle Naturkonstante.

3. Der Drehimpuls eines Elektrons auf einer stabilen Bahn ist ein ganzzahliges Vielfaches von $h/2\pi$.

2.1.1 Absorption und Emission von Licht

Mit Hilfe dieser Postulate kann man nun die Absorption bestimmter Spektrallinien erklären. Zunächst fassen wir $E = h\nu$ als Energie eines Lichtquants auf. Entspricht die Energie eines einfallenden Lichtquants einer Energiedifferenz zwischen zwei Elektronenbahnen, so wird das Quant absorbiert und das Elektron springt auf

eine energiereichere Bahn – das Atom wird *angeregt*. Die möglichen Energien der Elektronen werden als *Energieniveaus* bezeichnet.

Ist die Energie des Lichtquants sehr groß, so kann ein Elektron auch komplett vom Kern gelöst werden. Diesen Vorgang bezeichnen wir als *Ionisation*. Das betroffene Atom hat auf Grund des fehlenden Elektrons eine positive Ladung und wird *Ion* genannt.

Ebenfalls gemäß dem zweiten Postulat *emittiert* ein Atom ein Lichtquant, falls ein Elektron von einem höherem Energieniveau auf ein niedrigeres zurückfällt.

2.1.2 Anregung durch Elektronen

In dem im Folgenden beschriebenen Versuch werden Atome nicht mit Lichtquanten, sondern durch Stöße mit freien Elektronen angeregt.

Trifft ein freies Elektron auf ein Atom und hat nicht genügend Energie um es anzuregen, so kommt es zu einem elastischen Stoß und die Energie des freien Elektrons bleibt unverändert.

Ist die Energie des Elektrons ausreichend zur Anregung des Atoms, so stoßen beide Teilchen unelastisch. Die Energie des freien Elektrons verringert sich um die bei der Anregung aufgewandte Energie.

2.2 Der Franck-Hertz-Versuch

2.2.1 Versuchsaufbau

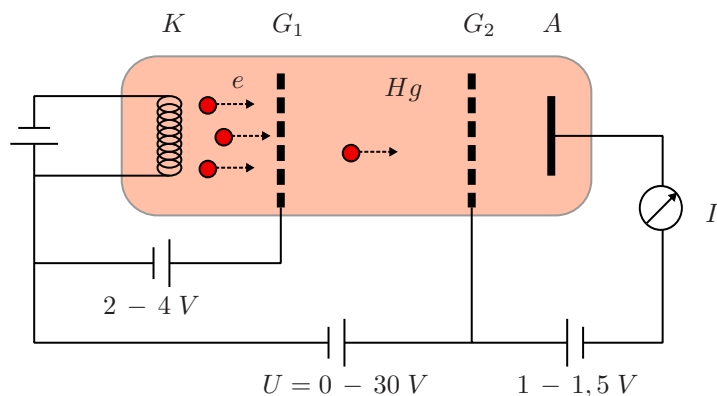


Abbildung 1: Schematischer Aufbau der FRANCK-HERTZ-Röhre

Der in Abb. 1 dargestellte Versuchsaufbau besteht aus einer evakuierten Röhre in der sich etwas Quecksilber Hg befindet.

Von einer beheizten Kathode K werden Elektronen abgedampft. Diese werden durch ein erstes Gitter G_1 mit Hilfe einer geringen Spannung abgesaugt. Danach folgt ein weiteres Gitter G_2 . Zwischen der Kathode und dem Gitter G_2 ist eine variable Spannung U angelegt. Die Spannung U ist so gerichtet, dass die Elektronen in Richtung einer sich noch hinter dem Gitter G_2 befindenden Anode A beschleunigt werden. Schließlich besteht zwischen dem Gitter G_2 und der Anode noch eine weitere, geringe Potentialdifferenz der Art, dass die Elektronen auf diesem Abschnitt abgebremst werden. Diese Potentialdifferenz wird auch *Bremsspannung* genannt.

Die Stromstärke I zwischen Anode und Kathode dient als lineares Maß für die Anzahl der Elektronen die die Anode erreichen und heißt auch *Auffängerstrom*.

2.2.2 Interpretation im Sinne des Bohrschen Modells

Das Ziel ist es nun, den sich einstellenden Strom I in Abhängigkeit von der Spannung U mit Hilfe der Annahmen des BOHRschen Atommodells zu erklären.

Dazu ist es zunächst nötig zu untersuchen, wie häufig es zu Stößen zwischen Elektronen und Quecksilberatomen kommt.

Sättigungsdampfdruck und mittlere freie Weglänge

Abhängig von der gewählten Temperatur der Versuchsanordnung variiert die Zahl der Quecksilberatome in der Gasphase. Der Druck dieser Atome in der Gasphase wird als *Sättigungsdampfdruck* bezeichnet.

Für den Versuch ist wichtig, dass es zu Stößen der beschleunigten Elektronen mit den Atomen kommt. Die mittlere Strecke die ein Elektron ohne Kollision zurücklegt wird als *mittlere freie Weglänge* bezeichnet. Diese sollte in unserem Fall also so klein sein, dass es zu mehreren Stößen bei einer Durchquerung der Röhre kommt.

Da der Sättigungsdampfdruck von der Temperatur abhängt, kann dies durch eine hinreichend hohe Temperatur in der Röhre erreicht werden.

Verlauf der Kennlinie

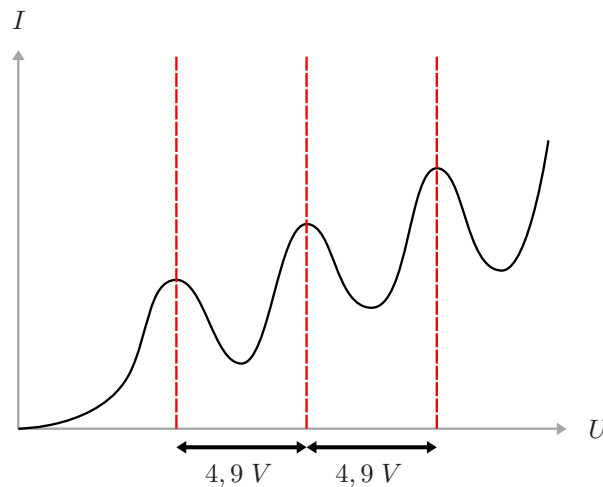


Abbildung 2: Kennlinie der FRANCK-HERTZ-Röhre

Nun betrachten wir den Auffängerstrom bei kleinen Beschleunigungsspannungen U .

Die abgedampften Elektronen bilden im Bereich der Kathode eine Raumladungswolke. Da die Spannung U noch gering ist, werden nur die äußeren Elektronen dieser Raumladung in Richtung des Gitters G_2 beschleunigt. Direkt an der Kathode wird das beschleunigende elektrische Feld durch die negative Ladung der Raumladung kompensiert.

Mit zunehmender Spannung können jedoch stets mehr Elektronen aus der Raumladung gen Anode beschleunigt werden. Der Strom I steigt somit mit der Spannung. Dies ist zudem ein Zeichen dafür, dass die Elektronen während der Beschleunigung zwischen den Gittern G_1 und G_2 nur elastisch mit den Quecksilberatomen zusammenstoßen und somit genug Energie haben um die Potentialdifferenz vor der Anode zu überwinden.

Erhöhen wir die Spannung weiter, so kommt es zu einem Einbruch des Auffängerstroms (siehe Abb. 2). Wir erklären dies mit unelastischen Stößen der Elektronen mit dem Quecksilber. Damit haben nun einige der Elektronen am Ende der Beschleunigungsstrecke eine Energie erreicht die vom Quecksilber aufgenommen werden kann und geben diese somit ab. Die erneute Beschleunigung nach dem Stoß mit einem Quecksilberatom reicht nun jedoch nicht aus, um die Bremsspannung zu überwinden. Damit tragen die Elektronen, die Energie an ein Quecksilberatom abgegeben haben, nicht mehr zum Auffängerstrom bei.

Erhöht man die Spannung U weiter, so steigt der Strom nach einem Minimum wieder an. Auch in diesem Fall kommt es zu unelastischen Stößen. Jedoch reicht die nach dem Stoß verbleibende Beschleunigung aus, um genug Energie aufzunehmen, damit die Bremspannung überwunden werden kann.

Bei einer noch höheren Spannung kommt es erneut zu einem Einbruch der Stromstärke. In dem Bereich dieser Spannung gibt ein Elektron in Analogie zur vorangegangenen Erklärung im Mittel zweimal Energie an ein Quecksilberatom ab. Weitere Stromstärkeneinbrüche lassen sich völlig analog erklären.

Es stellt sich heraus, dass die Spannungsdifferenzen zwischen den Strommaxima stets gleich sind. Ein Elektron nimmt also bei der Beschleunigung durch diese Spannungsdifferenz ΔU gerade die Energie auf, die nötig ist um ein Quecksilberatom anzuregen. Diese Energie kann mittels der Ladung des Elektrons e quantifiziert werden. Sie entspricht der Energie $E = h\nu$ eines Lichtquants welches entsteht, wenn das Atom in den Grundzustand zurückkehrt:

$$E = h\nu = e\Delta U \quad (1)$$

Bei Quecksilber ist diese *Anregungsenergie* $E = 4,9 \text{ eV}$ ¹.

Nun gehen wir noch auf zwei Besonderheiten der Kennlinie ein.

Auf Grund der bereits angesprochenen Raumladungswolke muss zunächst eine höhere Spannung als die, der Anregungsenergie entsprechenden $4,9 \text{ V}$, angelegt werden, bis es zu einem Einbruch der Stromstärke kommt.

Die Stromstärke sinkt bei den Minimum nicht auf Null, da die Geschwindigkeiten der von der Kathode abgedampften Elektronen einer Verteilungsfunktion folgen und somit nicht alle gleich sind. Damit gibt es einerseits auch in Fall des Minimums noch Elektronen deren Energie nicht zur Anregung ausreicht und die aus diesem Grund die Bremspannung überwinden können. Andererseits sind auch Elektronen vorhanden, die auf Grund ihrer hohen Anfangsenergie nach dem Stoß wieder genügend Energie aufnehmen um die Anode zu erreichen.

3 Durchführung

Wir führen den Versuch mit einem Aufbau wie in Abb. 1 durch. Hierzu heizen wir die Röhre vor und schalten dann die Heizspannung des Glühdrahtes ein. Nun

¹Peter Schaaf: Das Physikalische Praktikum. 2006, S. 200.

Messen wir den Auffängerstrom I als Funktion der Beschleunigungsspannung in 0.2V Schritten. Nach einer Erhöhung der Heiztemperatur, ermitteln wir die $I - U$ -Kennlinie erneut.

4 Auswertung

4.1 Die Energiedifferenz

In Abb. 3 sowie 4 sind beide Kennlinien aufgetragen. Die Maxima sind sehr ausgeprägt, daher verwenden wir nicht das in der Praktikumsanleitung beschriebene Schnittpunktverfahren. Es ergeben sich folgende Werte für die Maxima:

| | 1. Max [V] | 2. Max [V] | 3. Max [V] |
|---------------|------------|------------|------------|
| 175 °C | 7.5 | 12.4 | 17.4 |
| ΔU | | 4.90(7) | 5.00(7) |
| 191 °C | 7.4 | 12.3 | 17.2 |
| ΔU | | 4.90(7) | 4.90(7) |

Hieraus erhalten wir nun über Gl. 1 die Energiedifferenz:

$$\overline{\Delta E} = 4.95(4)eV$$

Der Fehler des gewichteten Mittels resultiert aus den Fehlern der einzelnen Energiedifferenzen, die wir auf Basis des Fehlers der Spannungsmessung und der Bestimmungsungenauigkeit der Maxima geschätzt haben.

4.2 Wellenlänge des optischen Übergangs

Aus der Beziehung

$$E = h\nu = h \frac{c_0}{\lambda}$$

können wir nun mit $h = 4,13567 \cdot 10^{-15} eVs^2$ und der Lichtgeschwindigkeit $c_0 = 2,9979 \cdot 10^8 m/s$ die Wellenlänge des absorbierten Photons berechnen. Damit erhalten wir

$$\lambda = 251(3)nm.$$

Auch dieser Fehler ergibt sich mittels Fehlerfortpflanzung aus dem Fehler von $\overline{\Delta E}$.

4.3 Übergang der Elektronen

Mit der Ordnungszahl 80 im Periodensystem besitzt Quecksilber 80 Elektronen in der Schale. Diese sind im Bohrschen Atommodell auf 6 Schalen der Größe $2n^2$ angeordnet, wobei n die Nummer der Schale ist. Im Grundzustand verteilen sich die Elektronen zu 2, 8, 18, 32, 18, 2. Damit sind die beiden vorletzten Schalen nicht vollständig. Die hier beobachteten Sprünge müssen demzufolge Übergänge zwischen diesen beiden oder in die nächst-höhere Schale sein. Sieht man sich das Energieniveauschema des Quecksilbers an³, so ist der wahrscheinlichste Übergang mit unserem gemessenen Wert von 4.95 eV der von 6^1S_0 nach 6^3P_1 . Vor der Anregung war der Drehimpuls also 0, nach dieser 1. Außerdem ändert sich die Magnetquantenzahl von 0 auf 1.

²Offizieller CODATA-Wert

³z.B. in Haken, Wolf, Atom- und Quantenphysik, Springer Verlag, 1996

5 Einordnung der Ergebnisse

Die Werte ab etwa 17-18V entsprechen nicht ganz den Erwartungen, was sich wohl mit der Sättigung der Röhre erklären lässt. Sonst entsprechen die gemessenen Werte recht genau den erwarteten. Da bereits die ermittelte Energiedifferenz mit ihrem Fehler sogar fast den erwarteten Wert berührte, musste die Wellenlänge auch sehr genau sein. Ein schöner Versuch mit schneller Auswertung und erträglicher Messung.

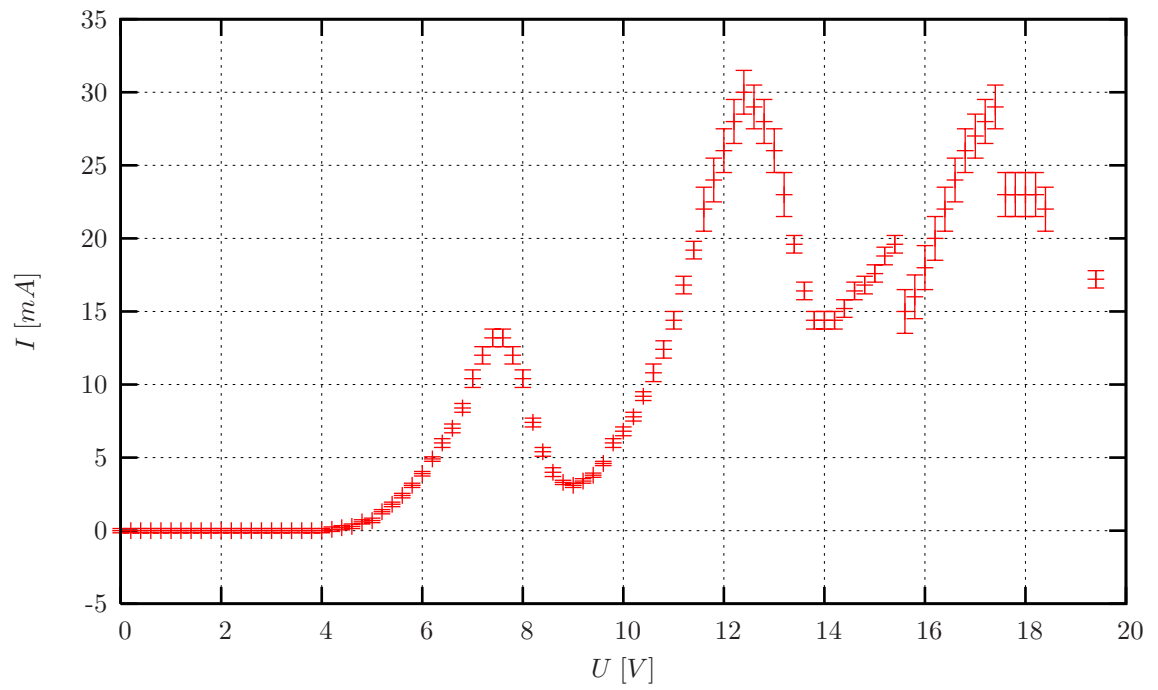
A Tabellen und Grafiken

Abbildung 3: Kennlinie bei 175 °C

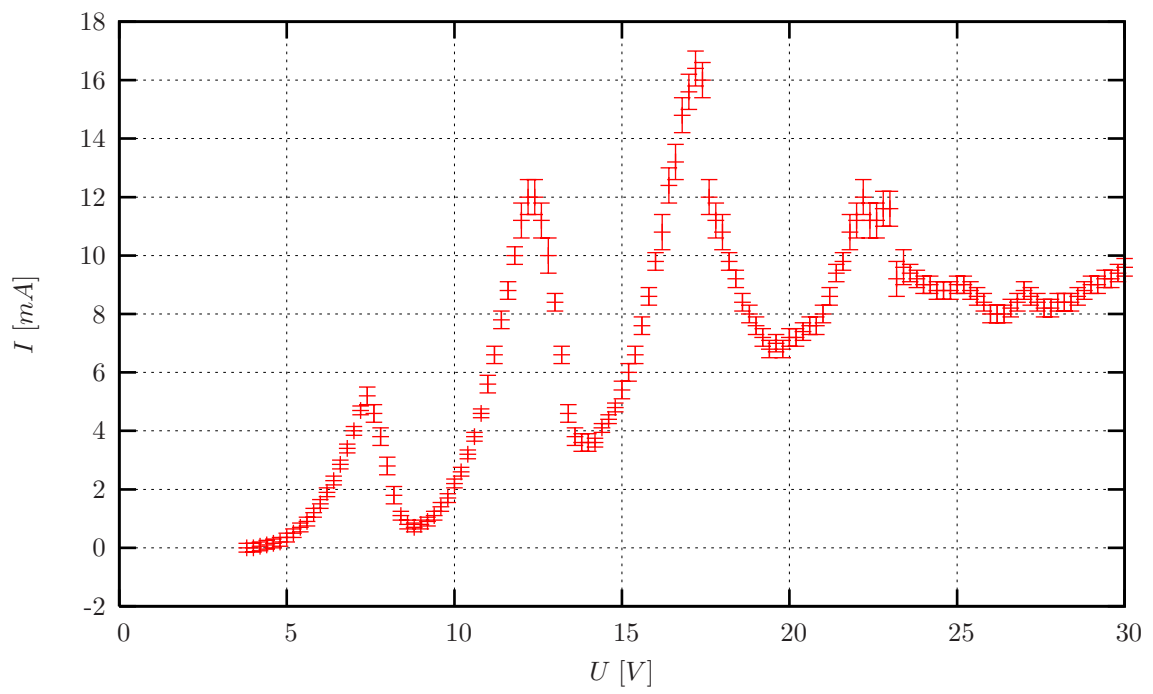


Abbildung 4: Kennlinie bei 191 °C