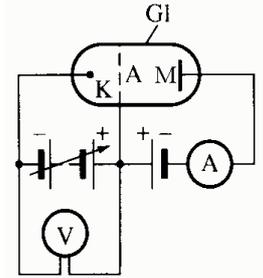


Der Elektronenstoßversuch wurde erstmals 1913 von James Franck und Gustav Hertz durchgeführt. Er sollte zeigen, daß es bei der Anregung eines Atoms durch einen Elektronenstoß nur diskrete Energiequanten gibt, d.h. daß sich die Energie des Atoms bzw. der Energie der einzelnen Elektronen eines Atoms nicht beliebig verändert, sondern nur sprunghaft, also nur in genau bestimmten Stufen verändert. Zwischenstufen existieren dabei nicht. Der Franck-Hertz-Versuch ist die Grundlage für die Quantentheorie.

Der Versuchsanordnung

In einer evakuierten Glasröhre befindet sich am einen Ende eine beheizbare Kathode K, in der Mitte eine Gitteranode A und am anderen Ende eine weitere Elektrode M. Außerdem befindet sich in der Röhre auch noch eine geringe Menge Quecksilber. Das ganze ist in einen Kasten (mit einem seitlichen Sichtfenster) mit einer thermostatgeregelten Heizspirale am Boden und einem Thermometer eingebaut. Die Anschlüsse der Röhre sind nach außengeführt. Von dort aus führen Laborsteckverbindungen zum Betriebsgerät. Es stellt alle nötigen Spannungen, zu denen wir später noch kommen werden, zur Verfügung und beinhaltet auch noch einen Meßverstärker. Von dort aus geht es weiter zu einem X-Y-Kurvenschreiber. Wobei auf der x-Achse die Anodenspannung und auf der y-Achse der Strom der Auffängerelektrode M aufgenommen wird.



Wie aus der Prinzipschaltung zu sehen ist liegt zwischen der Kathode K und der Anode A eine variable Spannung (max. ca. 70 V), die Beschleunigungsspannung U_b und zwischen der Anode und der Auffängerelektrode eine geringe Gegenspannung U_g , also einer zur Beschleunigungsspannung entgegengesetzte Spannung. Außerdem liefert das Betriebsgerät auch noch die Heizspannung U_h für die Glühkathode K von etwa 6V (Sie darf um $\pm 0,5V$ variiert werden).

1. Aufnahme der Strom-Spannungs-Kennlinie bei kalter Röhre

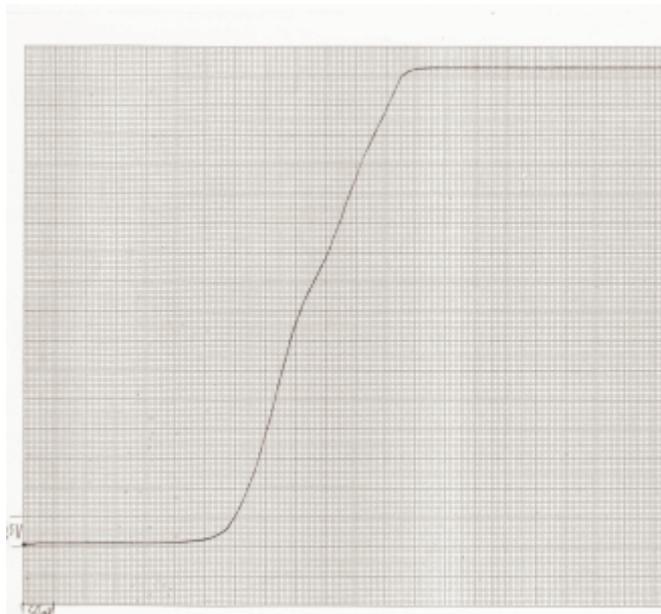
Zuerst überprüfen wir den Versuchsaufbau, ob alle Verbindungen richtig gesteckt sind. Anschließend schalten wir die Geräte ein und stellen die Heizspannung auf 6V und die Gegenspannung auf den minimalen Wert ein. Die Kathode wird durch die Heizspannung zum glühen gebracht. Anschließend suchen wir die passenden Meßbereiche des Kennlinienschreibers für die erste Kurvenaufnahme. Dabei versuchen wir den Anfangspunkt so genau wie möglich auf eine Kreuzung der Zentimeterlinien des Millimeterpapiers zu legen, um es nachher beim ablesen einfacher zu haben. Nun beginnen wir die Kurve bei kalter Röhre (sprich Zimmertemperatur von ungefähr $20^\circ C$, das Quecksilber ist also noch flüssig) aufzunehmen. Dazu drehen wir langsam die Spannung U_b hoch. Die Zugehörige Kennlinie ist in Bild 2 zu sehen.

Auswertung

Durch die Glühemission der Kathode wurden Elektronen freigesetzt, die dann durch das elektrische Feld der Beschleunigungsspannung in Richtung Anode beschleunigt wurden. Da die Anode aber aus einem Gitter besteht, wurde nur ein Teil der Elektronen dort aufgefangen der andere Teil ist durch das Gitter hindurchgeflogen. Diese Elektronen hatten genügend Energie um das entgegengesetzt gerichtete Feld zwischen der Auffängerelektrode und der

Anode zu überwinden, man könnte auch sagen sie hatten genügend Schwung. Dort werden sie dann über den Meßverstärker vom Kennlinienschreiber erfaßt und entsprechend auf der y-Achse aufgetragen.

Die Kennlinie entspricht der einer Vakuumdiode die in Durchflußrichtung geschaltet ist. Der Strom bleibt erst einmal gering. Ab einer gewissen Spannung, der „Schleußenspannung“, steigt er dann stark an. Die „Diode“ leitet nun. Der am Ende des Graphen annähernd waagrecht verlaufende Teil kommt dadurch zustande, daß die Glühkathode nur eine bestimmte



Anzahl von Elektronen liefern kann. Ab einer gewissen Menge können einfach nicht mehr Elektronen aus dem Metall austreten und der Strom bleibt annähernd konstant.

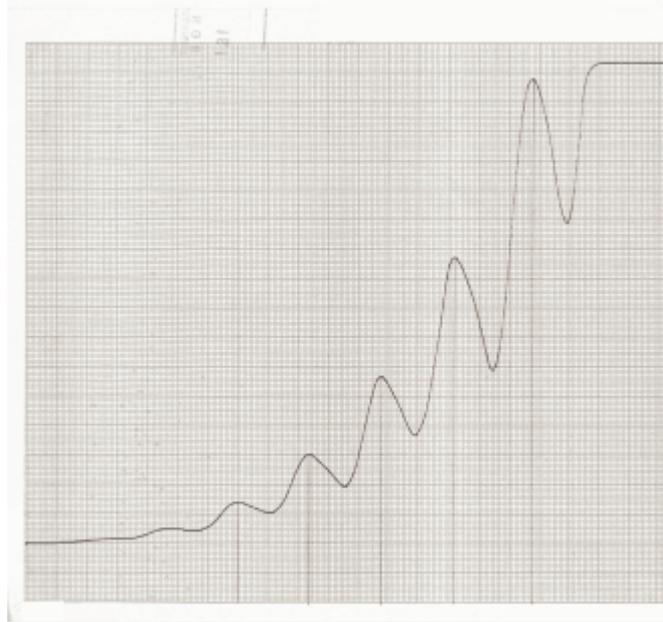
2. Die Aufnahme der Strom-Spannungs-Kennlinie bei erhitzter Röhre

Für die nachfolgenden Versuchsdurchgänge bleibt der Versuchsaufbau nahezu gleich, nur jetzt ist die Heizspirale am Boden des Kastens eingeschaltet und heizt somit die Röhre auf. Das darin enthaltene Quecksilber verdampft. Bei 180°C herrscht im inneren der Röhre ein Dampfdruck von ca. 0,15 mbar. Auch hier wird die Beschleunigungsspannung wider langsam bis zur maximalen Spannung gedreht d.h. eigentlich wurde diese nie erreicht, da es immer vorher zur Ionisation der Röhre kam, was am hellen leuchten der Röhre zu sehen war. Die Röhre leitete dadurch natürlich und der Strom schnellte nach oben aber dazu später. Der Versuch sollte bei mehreren Temperaturen durchgeführt werden, nämlich bei 160°C, 170°C, 180°C und 190°C. Dies versuchten wir dann auch, allerdings war es nicht immer möglich die exakten Temperaturen zu treffen, da die Heizspirale nur zwei Zustände kennt, nämlich an oder aus. Mit dem Thermostat war so nur eine grobe Näherung möglich, weshalb wir die Kennlinien eben zu anderen Temperaturen aufgenommen haben als vorgegeben. Die zu den Kurven notierten Temperaturen sind allerdings ziemlich genau, da diese mit dem Thermometer und nicht Thermostat ermittelt wurden. Allerdings stellte sich nachher heraus, daß der Meßbereich des Kennlinienschreibers nicht sonderlich glücklich gewählt war, so daß wir die Kennlinien noch einmal bei einer höheren Empfindlichkeit aufnahmen. Dabei springt die eine Temperatur etwas aus der Reihe (215°C), dafür fehlt eine andere Temperatur wegen Zeit- und Papiermangel.

Auswertung

Die Auswertung bezieht sich jetzt nur auf die Kurven des 2. Durchgangs, weil auf ihnen mehr zu erkennen ist.

Die Kurven beginnen auch wieder ähnlich dem Verlauf der Diodenkennlinie, allerdings bricht dann der Strom wieder zusammen um dann nach ein wenig später wieder anzusteigen. Danach folgen in ziemlich regelmäßigen Abständen noch ein paar weitere solcher Einbrüche, wonach dann jedesmal der Strom wieder ansteigt. Insgesamt gesehen steigt der Strom eigentlich immer weiter an, bis irgendwann die Beschleunigungsspannung soweit gestiegen ist, daß es zur Ionisation kommt und die Röhre nur noch einen geringen Widerstand hat. Der Strom schnell an dieser Stelle natürlich dann nach oben und die Röhre leuchtet intensiv grünbläulich.



Aber viel interessanter ist eigentlich der Bereich mit den periodisch auftretenden Schwankungen.

Die Elektronen werden wie im vorherigen Versuch durch die Beschleunigungsspannung U_b in Richtung Gitteranode A beschleunigt. Allerdings stoßen Sie nun zwischendurch mit den Quecksilberatomen zusammen, da diese sich ja nun in Form von Dampf in der gesamten Röhre verteilt haben. Solange die Elektronen noch nicht genügend Energie haben, erfolgen die Stöße elastisch, d.h. die Elektronen prallen an den Atomen ab. Sie verlieren dabei praktisch keine Energie. Dadurch hat ein Teil der Elektronen immer noch genügend Energie um durch die Gitteranode hindurchzufliegen und das Gegenfeld zu überwinden. Sie werden dann von der Elektrode M aufgenommen und verursachen dort dann einen Strom, den wir mit dem Kennlineienschreiber auf der y-Achse aufnehmen. Erhöht man nun die Beschleunigungsspannung weiter, werden die Elektronen auch stärker beschleunigt, sie wandern dann mit mehr Energie durch die Röhre. Dadurch gibt es auch mehr Elektronen, die die Elektrode M erreichen und so steigt der Strom. Ab einer gewissen Beschleunigungsspannung bricht der Strom jedoch zusammen, es kommen offenbar weniger Elektronen an der Elektrode M an. Dies wird davon begleitet, daß sich in der Röhre eine kleine leuchtende Zone zwischen der Kathode K und der Anode A gebildet hat. Sie liegt dabei mehr in der Nähe der Anode A. Der Grund hierfür ist, daß die Zusammenstöße mit den Quecksilberatomen nun nicht mehr elastisch sind. Bei einem Zusammenstoß geben die Elektronen ihre kinetische Energie (Bewegungsenergie) an die Hg-Atome ab. Dies bewirkt das eines der äußeren Elektronen des Hg-Atoms auf eine höhere Schale gehoben wird. Dieses hat dann mehr Energie bzw. braucht dann mehr Energie um sich dort zu halten. Da es diese Energie ab nicht hat, fällt es nach kurzer Zeit (in der Größenordnung von 10ns) wieder zurück in seine ursprüngliche Schale. Dabei gibt es Energie in Form von einem Photon wieder ab, es leuchtet also. Das Elektron, was mit dem Hg-Atom zusammengestoßen ist hat nun aber einen Teil seiner Energie abgegeben und hat dadurch auch nicht mehr genügend

Energie um das Gegenfeld zu überwinden, es wird von der Anode A aufgenommen. Auf diese Weise kommen nun weniger Elektronen an der Elektrode M an, der Strom sinkt folglich.

Erhöht man nun die Beschleunigungsspannung weiter, steigt der Strom wieder an, weil nun mehr Elektronen wider das Gegenfeld überwinden können. Die Leuchtzone beginnt dabei langsam Richtung Kathode K zu wandern. Doch irgendwann sinkt der Strom ein weiteres mal ab. Hierbei können wir in der Röhre eine weitere Leuchtzone erkennen, die sich dicht über der ersten befindet. Die Elektronen haben nun durch die höhere Beschleunigungsspannung und dem damit stärkeren Feld schon früher die nötige Energie um ein Hg-Atom zum Leuchten anzuregen. Dabei verlieren sie auch wieder Energie, allerdings ist nun noch die Strecke bis zur Anode noch etwas länger als vorhin. Sie werden also wieder beschleunigt, bekommen dadurch wieder mehr Energie und irgendwann reicht die Energie dann wieder um noch ein weiteres Hg-Atom anzuregen. So bildet sich eine zweite Leuchtzone. Jetzt hat das Elektron aber seine Energie kurz vor der Anode verloren, weshalb es nicht mehr stark genug beschleunigt wird um das Gegenfeld zu überwinden. Es wird also von der Anode aufgefangen und gelangt so natürlich nicht mehr zu Auffängerelektrode M, der Strom sinkt dementsprechend. Natürlich stoßen die Elektronen auch außerhalb der Leuchtzonen (Stoßzonen) zusammen, aber da haben sie nicht genügend Energie um das Atom anzuregen, weshalb der Stoß elastisch geschieht, Sie prallen einfach ab, praktisch ohne Energie zu verlieren [der Verlust ist nur minimal und die Energie wird auch nicht an das Atom abgegeben (hier gibt es ja nur definierte Energiestufen; Energiequanten), sondern muß an das elektrische Feld abgegeben werden].

Nach einer weiteren Steigerung der Beschleunigungsspannung steigt der Strom nun wieder an und die Stoßzonen wandern wieder in Richtung der Kathode. Irgendwann reicht die Energie der Elektronen aus um drei Atome anzuregen, es bildet sich eine weitere Leuchtzone/Stoßzone in der Nähe der Anode usw. Hier gibt es eigentlich nichts neues mehr, jetzt wiederholt sich nur noch das zuvor genannte. Das ganze geht jetzt erstmal immer so weiter, bis irgendwann die Beschleunigungsspannung so hoch ist, daß der Quecksilberdampf in der Röhre ionisiert wird. Es stehen plötzlich viele freie Elektronen zur Verfügung. Diese sorgen dann dafür, daß ein größerer Ladungstransport vorgenommen wird, der Strom steigt dem zufolge rapide an, die Röhre ist also niederohmig geworden. Dabei leuchtet die gesamte Röhre hell auf, nicht nur noch die Stoßzonen (ähnliches Prinzip wie bei der Leuchtstoffröhre).

Das gleiche wurde im Prinzip auch bei den anderen Temperaturen beobachtet.

3. Bestimmung der Anregungsenergie von Quecksilber

Die Kurven haben regelmäßige Schwankungen, die immer dann auftraten, wenn sich eine neue Stoßzone bildete; d.h. genau dann, wenn der Strom zu fallen beginnt haben die Elektronen die nötige Anregungsenergie erreicht. Deshalb kann man von den Abständen der örtlichen Maximas und damit aus der Differenz der Beschleunigungsspannung zwischen den Maximas auf die Anregungsenergie Rückschlüsse ziehen. Die Abstände betragen jeweils:

bei 170°C:

Maxima	1 / 2	2 / 3	3 / 4	4 / 5
Abstand in cm	2,45	2,45	2,55	2,7

Eigentlich ist es eins mehr, allerdings am Anfang der Kurve ist es nicht genau zu erkennen.

Der arithmetische Mittelwert der Abstände entspricht demnach:

$$\frac{\sum \text{Abstände}}{\text{Anzahl_der_Abstände}} = \frac{10,15\text{cm}}{4} = 2,5375\text{cm}$$

Die Empfindlichkeit des Kurven-Schreibers betrug auf der x-Achse 2V/cm. Daraus ergibt sich ein mittlerer Unterschied der Beschleunigungsspannung zwischen den Maximas von

$$2,5375\text{cm} * 2\text{V/cm} = 5,075\text{V}.$$

Nun das ganze für die Kurve bei 180°C:

Maxima	1 / 2	2 / 3	3 / 4	4 / 5
Abstand in cm	2,4	2,45	2,45	2,6

Auch hier wurde das erste weggelassen, da es nicht deutlich zu erkennen ist.

Der arithmetische Mittelwert der Abstände entspricht demnach:

$$\frac{\sum \text{Abstände}}{\text{Anzahl_der_Abstände}} = \frac{9,9\text{cm}}{4} = 2,475\text{cm}$$

Auch hier lag die Empfindlichkeit bei 2V/cm.

$$2,475\text{V} * 2\text{V/cm} = 4,95\text{V}$$

Und jetzt noch für die 215°C-Kurve.

Maxima	1 / 2	2 / 3	3 / 4	4 / 5	5 / 6
Abstand in cm	2,3	2,3	2,5	2,4	2,5

Diesmal haben wir einen Sprung mehr bekommen, da diesmal die Ionisation erst später eingetreten ist. Auch bei dieser Kurve ist am Anfang das Maxima nicht deutlich zu erkennen.

Der arithmetische Mittelwert der Abstände entspricht demnach:

$$\frac{\sum \text{Abstände}}{\text{Anzahl_der_Abstände}} = \frac{12\text{cm}}{5} = 2,4\text{cm}$$

Auch hier lag die Empfindlichkeit bei 2V/cm.

$$2,4\text{cm} * 2\text{V/cm} = 4,8\text{V}$$

Kommen wir nun zur Anregungsenergie Bestimmung der Anregungsenergie.

Praktischerweise entspricht die Spannung der Beschleunigungsspannung, d.h. genauer gesagt die Differenz zwischen den Maximas, in Volt [V] der Anregungsenergie in Elektronenvolt [eV]. Dadurch ist die Umrechnung äußerst einfach.

Bei 170°C sind das 5,075eV, das entspricht $5,075\text{eV} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{J/eV} = 8,12 \cdot 10^{-19} \text{J}$.

Bei 180°C sind das 4,95eV, das entspricht $4,95\text{eV} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{J/eV} = 7,92 \cdot 10^{-19} \text{J}$.

Bei 215°C sind das 4,8eV, das entspricht $4,8\text{eV} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{J/eV} = 7,68 \cdot 10^{-19} \text{J}$.

Es sieht fast so aus als würde die Anregungsenergie mit der Temperatur abnehmen. Allerdings ist das so noch nicht klar festzustellen, da es doch einige Unsicherheitsfaktoren gibt. Da wären z.B. der Fehler des Kennlinienschreibers, der einerseits durch die Wandlung des Eingangssignals einen Fehler macht (Digitalisierungsfehler), und außerdem der die Halterung des Stiftes ein kleines Spiel hat. Deshalb ist die Kurve schon ungenau. Auch der vorgeschaltete Meßverstärker könnte einen Fehler verursachen. Ein weiteres Problem ist die Ablesegenauigkeit der Kurve auf dem Millimeterpapier. Die liegt bei ca. +/-0,5mm dazu kommt, daß der Strich schon fast einen halben Millimeter breit ist und die Maximas teilweise so flach sind, daß der höchste Punkt nicht genau ausgemacht werden kann. Nimmt man nur mal die Ablesegenauigkeit kommt man im Extremfall schon auf gut einen Millimeter und das entspricht schon 0,2V. 0,2V ist aber auch schon fast die Differenz zwischen der Messung bei 170°C und der von 215°C, ohne die anderen Fehler zu berücksichtigen. Nimmt man das alles zusammen kommt im schlimmsten Fall heraus, daß es zwischen den einzelnen Temperaturen gar keine Unterschiede gibt. Trotzdem ist es durchaus wahrscheinlich, daß die Anregungsenergie von der Temperatur abhängig ist, leider ist dies in unseren Kurven nicht eindeutig zu erkennen, da die Unterschiede auch nur so groß sind wie die oben aufgeführten Fehlertoleranzen.

4. Berechnung der Frequenz und Wellenlänge nach der Bohrschen Frequenzbedingung

Wie zuvor schon beschrieben, wird das Elektron des Hg-Atoms bei einem Zusammenstoß mit eines beschleunigten Elektrons auf ein höheres Energieniveau gehoben. Dort bleibt es aber nur für etwa 10ns und fällt dann wieder zurück. Dabei sendet es ein Photon aus, dessen Wellenlänge und Frequenz man mit der Bohrschen Frequenzbedingung ermitteln kann.

Hierfür verwenden wir den Mittelwert der Anregungsenergie der aller 3 Kurven. Dieser wird nach folgender Formel berechnet:

$$E = \frac{1}{n} \cdot \sum_i E_i = 4,94\text{eV} \pm 0,2\text{eV} = (7,91 \pm 0,32) \cdot 10^{-19} \text{J}$$

Die Bohrsche Frequenzbedingung lautet:

$$\underline{h\nu = h \frac{c}{\lambda} = E_2 - E_1}$$

Dabei ist h das Plancksche Wirkungsquantum, ν die Frequenz, c die Lichtgeschwindigkeit, λ die Wellenlänge. Die beiden E entsprechen den Energien, die das Elektron vor und nach der Anregung, also der Differenz zwischen den Schalen. Diese Energiedifferenz ist unsere Anregungsenergie, die das Elektron des Hg-Atoms aufgenommen hat und so eine Schale hochgesprungen ist. Wenn es nun wieder zurück fällt gibt es genau diese Energie wieder in Form eines Photons ab. Daraus ergibt sich:

$$\Delta E = h \cdot \nu$$

$$\nu = \frac{\Delta E}{h} = \frac{(7,91 \pm 0,32) \cdot 10^{-19} \text{Ws}}{6,6 \cdot 10^{-34} \text{Ws}^2} = (1,198 \pm 0,048) \cdot 10^{15} \frac{1}{s} = (1,198 \pm 0,048) \cdot 10^{15} \text{Hz}$$

Die Wellenlänge:

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{300.000 \frac{km}{s}}{(1,198 \pm 0,048) \cdot 10^{15} \frac{1}{s}} = 250,4 \pm 9,7 \text{nm}$$

Das Licht, welches bei unelastischen Stößen abgegeben wird, liegt damit im ultravioletten Bereich. Dies scheint zunächst unwahrscheinlich, da schließlich ein bläuliches Licht während der Versuchsdurchführung zu sehen war. Trotzdem ist es wahrscheinlich, daß die Berechnung stimmt. Die Leuchterscheinung ist dadurch zu erklären, daß die Glasröhre vermutlich nicht vollkommen evakuiert ist, sondern mit einem Edelgas gefüllt ist, was durch die ultraviolette Strahlung zum Leuchten angeregt wird. Aufgrund der bläulichen Farbe vermute ich, daß es sich dabei um Argon handelt.